

Arbeitsbereich
Erhalt temporär genutzte Gebäude

„Die Wirkung eines Heizsystems („Temperier- bzw. Konditioniersystem“) auf feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk in einem temporär genutztem Gebäude“

Abschlußbericht F 1006/F-0E zu einem Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az 20941 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) in Osnabrück

von

Dipl.-Ing. Axel Dominik & Dipl.-Ing. Sabine Koch

August 2008

Inhalt

ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS.....	2
BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	4
VORWORT	5
ZUSAMMENFASSUNG.....	6
1 EINLEITUNG [SIEHE AUCH DOM04, DOM05.2, DOM05.3, FOR03].....	7
1.1 Problemstellung [siehe auch DOM04, DOM05.2, DOM05.3, FOR03]	8
1.2 Zielstellung [siehe auch DOM04, DOM05.2, DOM05.3, FOR03]	8
1.3 Vorgehensweise [siehe auch DOM04, DOM05.2, DOM05.3, FOR03]	9
2 UNTERSUCHUNGEN – STAND JUNI 2008	10
2.1 Voruntersuchungen (siehe dazu auch Bild 1).....	10
2.2 Hauptuntersuchungen (siehe dazu auch Bild 1).....	10
2.2.1 Prüfzeitraum und Prüfplan [DOM04]	11
2.2.2 Wasserbeauschlagung der Mauerwerkprüfwände von unten unter Zuschaltung der Heizungsanlage [DOM05.3].....	12
2.3 Bauwerksuntersuchungen.....	37
3 BEURTEILUNG.....	38
3.1 Feuchtegehalts-, Temperatur- und Formänderungsmessungen	38
3.1.1 Beheizung einer fünf Jahre alten Mauerwerkwand (ohne kapillar aufsteigende Feuchte).....	39
3.1.2 Beheizung einer fünf Jahre alten Mauerwerkwand (mit kapillar aufsteigender Feuchte).....	41
3.2 Chemische Tastuntersuchungen.....	54
3.3 Zusammenfassung (siehe auch [DOM03.1/ DOM06/ DOM09/])	56
4 ÜBERBLICK ÜBER DIE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE	60
4.1 Kleinprüfmauerwerkwand aus Römertuffstein.....	60
4.2 Mauerwerkprüfwände aus Mauerziegel, Römertuffstein und Grauwacke	60
5 BEDEUTUNG FÜR DIE PRAXIS NACH DEM DERZEITIGEN STAND DER UNTERSUCHUNGEN	66
6 AUSBLICK UND WEITERE FORSCHUNGSZIELE.....	63
7 LITERATUR.....	66

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Bild 1:	Prüfplan – die hellgrau unterlegten Abschnitte sind bereits abgeschlossen und die Untersuchungsergebnisse sind in Berichten dargestellt und erläutert worden.	11
Bild 2:	Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite 16 Tage nach der Wasserbeaufschlagung von unten: Feuchtefront erreicht zweite Lagerfuge oberhalb der Abdichtung und erste Ausblühungen sind sichtbar (MZ1) (a, b); keine Feuchtefront bzw. Oberflächenveränderungen visuell sichtbar (RT1) (c); Feuchtefront erreicht die erste Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (d).....	14
Bild 3:	Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite 60 Tage nach der Wasserbeaufschlagung von unten: Feuchtefront erreicht dritte Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Ausblühungen nehmen zu und Ausblühungen über der Heizung sind vorhanden (MZ1) (a, b); keine eindeutige Feuchtefront visuell sichtbar, erste leichte Ausblühungen sichtbar (RT1) (c, d); Feuchtefront erreicht die erste Stoßfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (e, f).....	15
Bild 4:	Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite 75 Tage (9 Tage) nach der Wasserbeaufschlagung von unten (Inbetriebnahme der Heizung): Feuchtefront erreicht dritte Lagerfuge oberhalb der Abdichtung und Ausblühungen nehmen weiter zu (MZ1) (a, b); Feuchtefront in der ersten Lagerfuge oberhalb der Abdichtung visuell sichtbar, die leichten Oberflächenveränderungen scheinen nicht weiter zuzunehmen (RT1) (c); Feuchtefront erreicht die erste Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (d).....	16
Bild 5:	Ausblühungen an Mauerwerk- (a) und Grauwackewand (b) im unteren, feuchten Fugenbereich.	17
Bild 6:	Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite 84 Tage (18 Tage) nach der Wasserbeaufschlagung von unten (Inbetriebnahme der Heizung): Feuchtefront erreicht zweite Lagerfuge oberhalb der Abdichtung und erste Ausblühungen sind sichtbar (MZ1) (a, b); keine Feuchtefront bzw. Oberflächenveränderungen visuell sichtbar (RT1) (c); Feuchtefront erreicht die erste Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (d).....	18
Bild 7:	Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite 128 Tage (62 Tage) nach der Wasserbeaufschlagung von unten: Feuchtefront erreicht zweite Lagerfuge oberhalb der Abdichtung und erste Ausblühungen sind sichtbar (MZ1) (a, b); keine Feuchtefront bzw. Oberflächenveränderungen visuell sichtbar (RT1) (c); Feuchtefront erreicht die erste Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (d).	19
Bild 8:	Lage der Feuchtemesssensoren im Mauerwerk in Ansicht, Querschnitt und Detail und Lage der Messwiderstände im Sensor bzw. Mauerwerk.....	20
Bild 9:	Widerstand in Ω m über die Mauerwerkstärke und über die Höhe, für die Mauerziegelprüfwand MZ1 in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.	24

Bild 10:	Widerstand in Ωm über die Mauerwerkstärke und über die Höhe, für die Römertuffsteinprüfwand RT1 in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.	25
Bild 11:	Widerstand in Ωm über die Mauerwerkstärke und über die Höhe, für die Grauwackeprüfwand GW1 in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.	26
Bild 12:	Lage der Feuchtemesssensoren im Mauerwerk in Ansicht, Querschnitt und Detail und Lage der Temperaturmessstellen im Sensor bzw. Mauerwerk.	27
Bild 13:	Relative Luftfeuchte $r. F$ in % und Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$ im Raum in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.	28
Bild 14:	Temperatur in K über die Mauerwerkstärke und über die Höhe, für die Mauerziegelprüfwand MZ1 in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.	30
Bild 15:	Temperatur in K über die Mauerwerkstärke und über die Höhe, für die Römertuffsteinprüfwand RT1 in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.	31
Bild 16:	Temperatur in K über die Mauerwerkstärke und über die Höhe, für die Grauwackeprüfwand GW1 in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.	32
Bild 17:	Lage und Anordnung der SDM-Punkte (zur Zeit keine Messung mehr möglich, siehe dazu auch Abschnitt 2.2.2) und der digitalen Präzisionstaster an den Mauerwerkprüfwänden – schematische Darstellung und Foto am Beispiel der Römertuffsteinwand.....	33
Bild 18:	Formänderungsmessungen ϵ_{DP} (+: Quellen; -: Schwinden) in $[\text{mm}/\text{m}]$ mittels DP an der Längs- und Stirnseite der Mauerwerkprüfwand aus MZ, RT und GW abhängig vom Prüfalter in Tagen $[\text{d}]$ ab Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.	36
Bild 19:	Kalibrierkurven für Trass-Kalk-Mörtel im Vergleich karbonatisiert/nicht karbonatisiert – Feuchtegehalt w_s in Abhängigkeit vom spezifischen Widerstand ρ (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0A).	42
Bild 20:	Kapillare Wasseraufnahme bei 5-Stein-Prüfkörpern: 5-Stein-Prüfkörper ohne Wasserbeaufschlagung am Beispiel der Römertuffsteine (a); 5-Stein-Prüfkörper aus Mauerziegel (3. Mauerstein wird erreicht) (b), aus Römertuffstein (3. Lagerfuge wird erreicht) (c), und Grauwacke (nach 1. Lagerfuge ist offensichtlich kein weiterer „Feuchteaufstieg“ mehr möglich) (d) nach 9 Tagen der Wasserbeaufschlagung von unten.	48
Bild 21:	Erwartete Funktion und Wirkung eines „Temperiersystems“ an einer Mauerwerkswand (Systemskizze).	59

Tabelle 1: Wärmeeindringkoeffizient b und Wärmekapazität c.	45
Tabelle 2: Ausgewählte Materialkennwerte.	51
Tabelle 3: Chemische Analyse von Ausblühungen auf der Mauerziegel- und Grauwackeprüfwand (Analysen sind vom Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) durchgeführt worden).....	55
Tabelle 4: Chemische Analyse von baustoffschädlichen Salzen, die in den verwendeten Mauerziegeln und dem TKM-Mörtel enthalten sind (Analysen sind vom Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) durchgeführt worden).	56

Begriffe und Definitionen

—

Vorwort [DOM04, FOR03]

Geplant war es neben den Laboruntersuchungen und den Untersuchungen an Mauerwerkprüfwänden im südlichen Seitenschiff der Basilika St. Ursula (siehe dazu auch Bild 1 und Forschungsantrag an die Deutsche Bundesstiftung Umwelt aus dem Jahre 2003 [FOR03]), begleitend praxisnahe Untersuchungen zum Raumklima und zu Feuchte- und Salztransportprozessen im Fundament- und Sockelmauerwerk der Kirche, mit und ohne Zuschaltung des „Temperier- und Konditioniersystems“, durchzuführen. Diese Untersuchungen konnten nur für einen kurzen Zeitraum durchgeführt werden, da dass anfänglich, u. a. vom Erzbischöflichen Generalvikariat in Köln und von der Kirchengemeinde der Basilika St. Ursula befürwortete Forschungsvorhaben, ohne Vorankündigung gestoppt worden ist und bis heute keine Entscheidung zur weiteren Vorgehensweise vorliegt. Um das Forschungsvorhaben aufrecht erhalten zu können, sind kurzfristig die Untersuchungen am Bauwerk ausgesetzt worden, bis eine Entscheidung durch das Generalvikariat in Köln getroffen wird. Die Messeinrichtungen in der Kirche sind so angelegt worden, dass die Untersuchungen bei einer positiven Entscheidung jederzeit fortgesetzt werden können. Die Untersuchungen an den Mauerwerkprüfwänden, die inzwischen in andere Räumlichkeiten ausgelagert worden sind, wurden wie geplant durchgeführt.

Das „Heizsystem“ ist zwischenzeitlich ohne die Kenntnis darüber, wie die Wirkung des Systems auf das Raumklima und auf die Bausubstanz ist, in die Kirche eingebaut worden und wird jetzt angabegemäß betrieben. Weitere Messungen zum Raumklima, zum Feuchtegehalt und zur Temperaturverteilung im Mauerwerk der Kirche werden bisher abgelehnt.

Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse, die bis zum Stop des Forschungsvorhabens durch das Erzbischöfliche Generalvikariat an den Mauerwerkprüfwänden und in der Kirche St. Ursula in Köln festgestellt worden sind, sind in Bericht F 1006/F-0A bzw. F 1006/F-0B mitgeteilt worden.

Die Untersuchungen an der Kleinprüfwand aus Römertuffstein (siehe Bericht F 1006/F-0C, Abschnitt 2.1.1) und an der Einzelprüfwand aus Mauerziegel (siehe Bericht F 1006/F-0C, Abschnitt 2.1.2) sind abgeschlossen und die Untersuchungsergebnisse sind in dem Bericht F 1006/F-0C dargestellt worden. Die Untersuchungen an den Laborwänden aus Mauerziegel (MZ), Römertuffstein (RT) und Grauwacke (GW) sind weiter fortgeführt worden. Aufgrund der geltenden Naturgesetze erstreckt sich der Prüfplan, wie bereits mehrfach erläutert, allerdings über einen längeren Zeitraum als geplant (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0D).

Nachdem die Mauerwerkprüfwände einen Trocknungszustand erreicht haben, der ohne Zwangstrocknung offensichtlich nicht weiter deutlich beeinflusst werden kann, sind die Mauerwerkprüfwände von unten mit Wasser so beaufschlagt worden, dass sie kapillar Wasser durch die Mauerwerksohle aufnehmen können. Unter anderem die Wasseraufnahme der Mauerwerkswände von unten ist messtechnisch verfolgt und dokumentiert worden.

Nach etwa zwei Monaten Standzeit, nachdem kein übermäßiges Saugverhalten an den drei Mauerwerkswänden mehr feststellbar war, ist die Heizung an den drei Mauerwerkprüfwänden zugeschaltet worden. Zunächst ist die Heizung mit einer Vorlauftemperatur von 35 °C (Rücklauftemperatur lag bei etwa 30 °C), später dann von 53 °C (Rücklauftemperatur etwa 50 °C) betrieben worden.

Die Wasseraufnahme, die Formänderungen, die Temperaturverteilung im Mauerwerk und die Gewichtsveränderung (soweit möglich) sind messtechnisch verfolgt und dokumentiert worden. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse dazu sind in diesem Bericht dargestellt.

1 EINLEITUNG

[siehe auch DOM04, DOM05.2, DOM05.3, FOR03]

An vielen historischen Bauwerken sind im Sockelbereich des Mauerwerkes Schäden vorhanden, die auf das Vorhandensein von Feuchte und oft auch von baustoffschädlichen Salzen hindeuten. Die im Mauerwerk vorhandene Feuchte wird meist auf kapillar aus dem Fundamentmauerwerk aufsteigende Feuchte zurückgeführt.

Im Zusammenhang mit der Instandsetzung solcher Schäden und im Rahmen einer Raumtemperierung werden oft spezielle Heizverfahren („Temperier- bzw. Konditioniersysteme“) genannt, die zu einer deutlichen Verbesserung des Gesamtzustandes des Bauwerkes beitragen sollen. Die Wirkung von vorgenannten Heizverfahren auf die Baukonstruktion sowie auf das Raumklima insgesamt ist noch nicht genau bekannt.

Die grundsätzlichen Wirkmechanismen, sowohl auf die historische Substanz und deren Inhaltsstoffe, als auch auf das Raumklima, werden oft kontrovers diskutiert.

In der romanischen Basilika St. Ursula in Köln war anfänglich die Möglichkeit gegeben, über einen langen Zeitraum, zuerst anhand von Eignungsversuchen an Mauerwerkprüfwänden (laborähnlich) in der Kirche (siehe dazu Bild 1) und später auch am historischen Mauerwerk der Kirche selbst, die Wirkungsweise der „Temperier- bzw. Konditionierverfahren“ zu erforschen.

Vor Beginn der Hauptuntersuchungen sind Voruntersuchungen an zwei, den späteren Mauerwerkprüfwänden vergleichbaren, Tuffstein- und Mauerziegelmauerwerkprüfwänden durchgeführt worden, um die weiteren Untersuchungsmethoden, abhängig von den Ergebnissen der Voruntersuchungen, abstimmen zu können. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse sind in Bericht F 1006/F-0A [DOM04] und F 1006/F-0C [DOM05.2] und in diesem Bericht beschrieben, dargestellt und erläutert und, soweit nach dem derzeitigen Untersuchungsstand möglich, beurteilt.

Die Ergebnisse der Hauptuntersuchungen werden untersuchungsbegleitend in Bericht F 1006/F-0A [DOM04], F 1006/F-0C [DOM05.2], F 1006/F-0D [DOM05.3] und in diesem Abschlußbericht dargestellt und beurteilt.

1.1 Problemstellung

[siehe auch Dom04, Dom05.2, Dom05.3, For03]

Die Basilika St. Ursula in Köln weist insbesondere im Sockelbereich des gotischen Hochchores, aber auch am Sockelmauerwerk des südlichen Seitenschiffes innen und außen Schäden infolge einer Feuchte- und Salzbeanspruchung auf.

Mittels „Temperier- bzw. Konditioniersystem“, das in die Kirche eingebaut werden sollte, sollen, nach Angabe der Befürworter, direkt die Fundament- und/oder Wandoberflächen, nicht aber die Raumluft „beheizt“ werden, wobei eine indirekte Raumtemperierung mit dem Verfahren möglich sein soll. Es soll verhindert werden, dass Feuchtigkeit ins Mauerwerk eindringen bzw. aufsteigen kann und es nicht mehr zur Kondensatbildung kommt. Durch den Einsatz eines „Temperier- bzw. Konditioniersystems“ soll der Energiebedarf sinken und ein „behaglicheres“ Raumklima geschaffen werden.

Das „Temperier- bzw. Konditioniersystem“ ist in Bezug auf den Einsatz zur „Trockenlegung“ und zur „Beheizung“ von temporär genutzten historischen Bauwerken aktuell in der Diskussion. Da bis jetzt noch keine genauen wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Wirkungsweise des Systems im Bereich von stark durchfeuchtetem und salzbelastetem Mauerwerk auf die Bausubstanz vorliegen, ist es unbedingt erforderlich, dass allen an der Instandsetzung von historischen Bauwerken Beteiligten (Planer, Denkmalpfleger, Restauratoren) die Wirkung von verschiedenen Instandsetzungsmethoden, insbesondere auch die des beschriebenen Heizsystems unter definierten und speziellen objektspezifischen Bedingungen, bekannt ist.

1.2 Zielstellung

[siehe auch DOM04, DOM05.2, DOM05.3, FOR03]

Zielsetzung des Forschungsprojektes ist es, mittels der Untersuchungsergebnisse die Feuchtesituation selbst und die Feuchtetransportmechanismen grundsätzlich, die in einem romanischen Fundament- und Sockelmauerwerk bestehen bzw. stattfinden, beurteilen zu können, auch unter Berücksichtigung von baustoffschädlichen Salzen und deren Einfluss auf den Feuchtetransport im Mauerwerk.

Die Wirkung der vorgenannten „Heizsysteme“ sollte zuerst an speziellen Prüfwänden und soweit für die historische Substanz vertretbar, direkt an Bauwerk untersucht werden. Die Untersuchungen am Bauwerk sind bisher nicht ermöglicht worden (siehe dazu auch Vorwort).

1.3 Vorgehensweise

[siehe auch DOM04, DOM05.2, DOM05.3, FOR03]

Für die Untersuchungen zur Wirkungsweise eines „Temperier- bzw. Konditioniersystems“ auf feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk sind, in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Voruntersuchungen, drei **mobile Mauerwerkswände** aus unterschiedlichem Steinmaterial (Mauerziegel (MZ), Römertuffstein (RT) und Grauwacke (GW)) mit einem an historisches Mauerwerk nach historischer Rezeptur angepassten Trass-Kalk-Mörtel (TKM) errichtet worden. In bzw. an die Mauerwerkswände wurden u. a. Feuchtemesssensoren mit dem TKM und Messtaster eingesetzt, um den Feuchtetransport bzw. die Feuchte- und Temperaturverteilung und die oberflächennahen Formänderungen des Mauerwerkes während der einzelnen Untersuchungsphasen, vor und nach Aufbau eines „Temperier- bzw. Konditioniersystems“, erfassen zu können.

2 UNTERSUCHUNGEN – STAND JUNI 2008

Nachfolgend sind die Untersuchungsergebnisse aus den fortgeführten Hauptuntersuchungen (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0A [DOM04], F 1006/F-0C [DOM05.2] und F 1006/F-0D [DOM05.3] dargestellt und beurteilt.

2.1 Voruntersuchungen

(siehe dazu auch Bild 1)

Um die Hauptuntersuchungen, insbesondere den Prüfaufbau, genauer festlegen zu können, sind Voruntersuchungen an einer Kleinprüfmauerwerkwand und an Mehrsteinprüfkörpern (Zwei- bzw. Dreisteinprüfkörper), bestehend aus Römertuffstein und einem Trasskalk-Trasszement-Mörtel (TK-TZ-Mö), zur Wirkungsweise des „Temperiersystems“ durchgeführt worden. An einer weiteren Mauerwerkprüfwand (Einzelprüfwand), bestehend aus Mauerziegel und einem Trass-Kalk-Mörtel (TKM, nach einer sogenannten historischen Rezeptur zusammengesetzt), sind zusätzlich Voruntersuchungen zu Feuchtetransportvorgängen im Mauerwerk, insbesondere zur Feuchteabgabe, durchgeführt worden.

Der Versuchsaufbau und die Untersuchungsergebnisse der Voruntersuchungen sind in Bericht F 1006/F-0A [DOM04], F 1006/F-0C [DOM05.2] und F 1006/F-0D [DOM05.3] dargestellt.

2.2 Hauptuntersuchungen

(siehe dazu auch Bild 1)

Nachfolgend werden die abschließenden Ergebnisse der Hauptuntersuchungen in Ergänzung zu Bericht F 1006/F-0A [DOM04], F 1006/F-0C [DOM05.2] und F 1006/F-0D [DOM05.3] dargestellt und beurteilt. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung sind dem Bericht F 1006/F-0A [DOM04] zu entnehmen.

2.2.1 Prüfzeitraum und Prüfplan [DOM04]

Der genaue Prüfplan, ist bereits in den vorangegangenen Berichten vorgestellt worden und ist in Bild 1 nochmals dargestellt, um einen Überblick über das Forschungsvorhaben zu geben. Aufgrund der sehr langen Trocknungszeiten der Mauerwerkprüfwände, insbesondere die des Mörtels, ist eine Verlängerung des Prüfzeitraumes notwendig geworden.

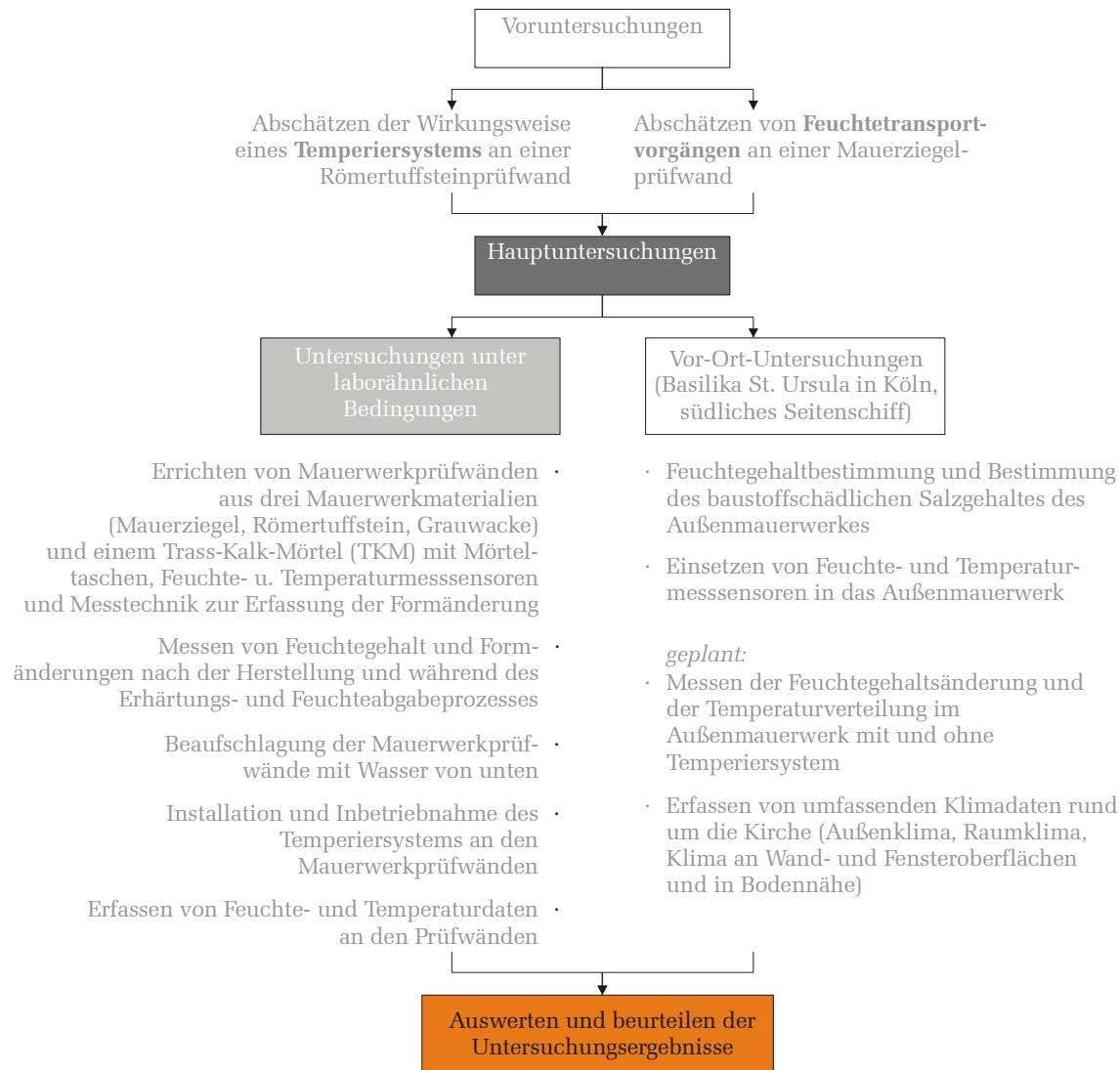


Bild 1: Prüfplan – die **hellgrau** unterlegten Abschnitte sind bereits abgeschlossen und die Untersuchungsergebnisse sind in genannten Berichten dargestellt und erläutert worden.

2.2.2 Wasserbeaufschlagung der Mauerwerkprüfwände von unten unter Zuschaltung der Heizungsanlage [DOM05.3]

Nachdem die Mauerwerkprüfwände nach einem Trocknungszeitraum nach der Herstellung von etwa 1.800 Tagen eine Feuchtesituation erreicht haben, die offensichtlich nur noch durch eine Zwangstrocknung nachhaltig gesteigert werden kann, was aber in Bezug auf die Beurteilung der Formänderungsmessungen zu nicht beurteilbaren Ergebnissen geführt hätte, wie kurzzeitig durchgeführte Untersuchungen an drei identischen Mauerwerkprüfwänden gezeigt haben, sind die Prüfwände von unten mit Wasser so beaufschlagt worden, dass sie kapillar Feuchte durch die Mauerwerksohle aufnehmen können (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0D [DOM05.3]).

Nach etwa zweimonatiger Standzeit der Mauerwerkprüfwände in Wasser, ist die an den Wänden installierte Heizungsanlage mit zunächst + 35 °C (Vorlauftemperatur; Rücklauftemperatur beträgt + 30 °C) und dann später mit + 53 °C (Vorlauftemperatur; Rücklauftemperatur beträgt + 50 °C) in Betrieb genommen worden, da vom Betrieb solcher Anlagen entsprechende Heiztemperaturen für die Anfangs –und Dauerbeheizungen angegeben worden sind.

Wägungen können aufgrund der Wasserbeaufschlagung und der installierten Heizungsanlage nur noch bedingt durchgeführt werden und werden aus diesem Grunde nur noch unregelmäßig durchgeführt, um die Heizungsanlage und die Messtaster nicht durch die Wägevorgänge zu beanspruchen bzw. ggf. sogar zu beschädigen.

Die Messung mittels der Setzdehnungsmesser wurden aufgrund dessen, dass die Messgeräte inzwischen nicht mehr von der Herstellerfirma gewartet werden können, nur bis zur Auslagerung der Prüfwände aus der Kirche bzw. bis kurz danach durchgeführt.

Begleitend zu den Messungen wird das Raumklima, in dem die Mauerwerkswände stehen, erfasst.

2.2.2.1 Visuell feststellbare Feuchteaufnahme der Mauerwerkswände [DOM05.3]

Mit Beginn der Wasserbeaufschlagung der Mauerwerkprüfwände von unten und der Zuschaltung der Heizungsanlage, werden die Wände regelmäßig besichtigt und die visuell feststellbaren Veränderungen werden dokumentiert.

In den ersten Tagen der Wasseraufnahme ist, wie bereits bei Vorversuchen an einer Römertuffstein- und Mauerziegelwand festgestellt, nur eine geringe Wasseraufnahme des Mauerwerkes bei allen drei Prüfständen feststellbar.

Bei der **Mauerziegelwand** ist die Feuchtefront über der abgedichteten Zone oberhalb der Acrylglasplatten in der Lagerfuge (über der 2. Mauerwerkschicht) nach etwa **11 Tagen** Standzeit nach der Wasserbeaufschlagung, auf der heizungsabgewandten Seite insbesondere im Fugenbereich, sichtbar.

Bei der **Grauwackewand** erscheint die Feuchtefront nach etwa **15 Tagen** Prüfzeit in der ersten sichtbaren Lagerfuge. In dieser Zeit hat die Feuchtefront der **Mauerziegelwand** bereits die zweite Lagerfuge erreicht. Die Steine erscheinen an der Oberfläche, wie bei der Grauwackewand, visuell trocken, zeigen im Randbereich Fuge/Mauerziegel allerdings bereits erste Ausblühungen. Bei der Römertuffsteinwand ist nach 16 Tagen Standzeit visuell keine Feuchtefront bzw. Veränderung an der Oberfläche sichtbar (siehe dazu Bild 2).

Etwa 60 Tage nach der Wasserbeaufschlagung ist deutlich die Zunahme der Ausblühungen an der Mauerziegelwand zu erkennen. Zudem ist die visuell sichtbare Feuchtefront inzwischen bis zur dritten Lagerfuge angestiegen und an der Wandrückseite, wo die Heizungsanlage installiert worden ist, sind inzwischen Ausblühungen ober- und unterhalb der vermörtelten Heizungsrohre sichtbar. Bei der Römertuffsteinwand sind erste leichte Ausblühungen sichtbar und die Lage der Feuchtefront in der untersten sichtbaren Lagerfuge lässt sich „erahnen“. Bei der Grauwackewand ist die Feuchtefront in den Stoßfugen angelangt und erste farbliche Veränderungen (weißlich) an den Steinen und Fugen werden sichtbar (siehe dazu auch Bild 3).



a



b



c



d

Bild 2: Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite **16 Tage** nach der Wasserbeaufschlagung von unten: Feuchtefront erreicht zweite Lagerfuge oberhalb der Abdichtung und erste Ausblühungen sind sichtbar (MZ1) (a, b); keine Feuchtefront bzw. Oberflächenveränderungen visuell sichtbar (RT1) (c); Feuchtefront erreicht die erste Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (d).

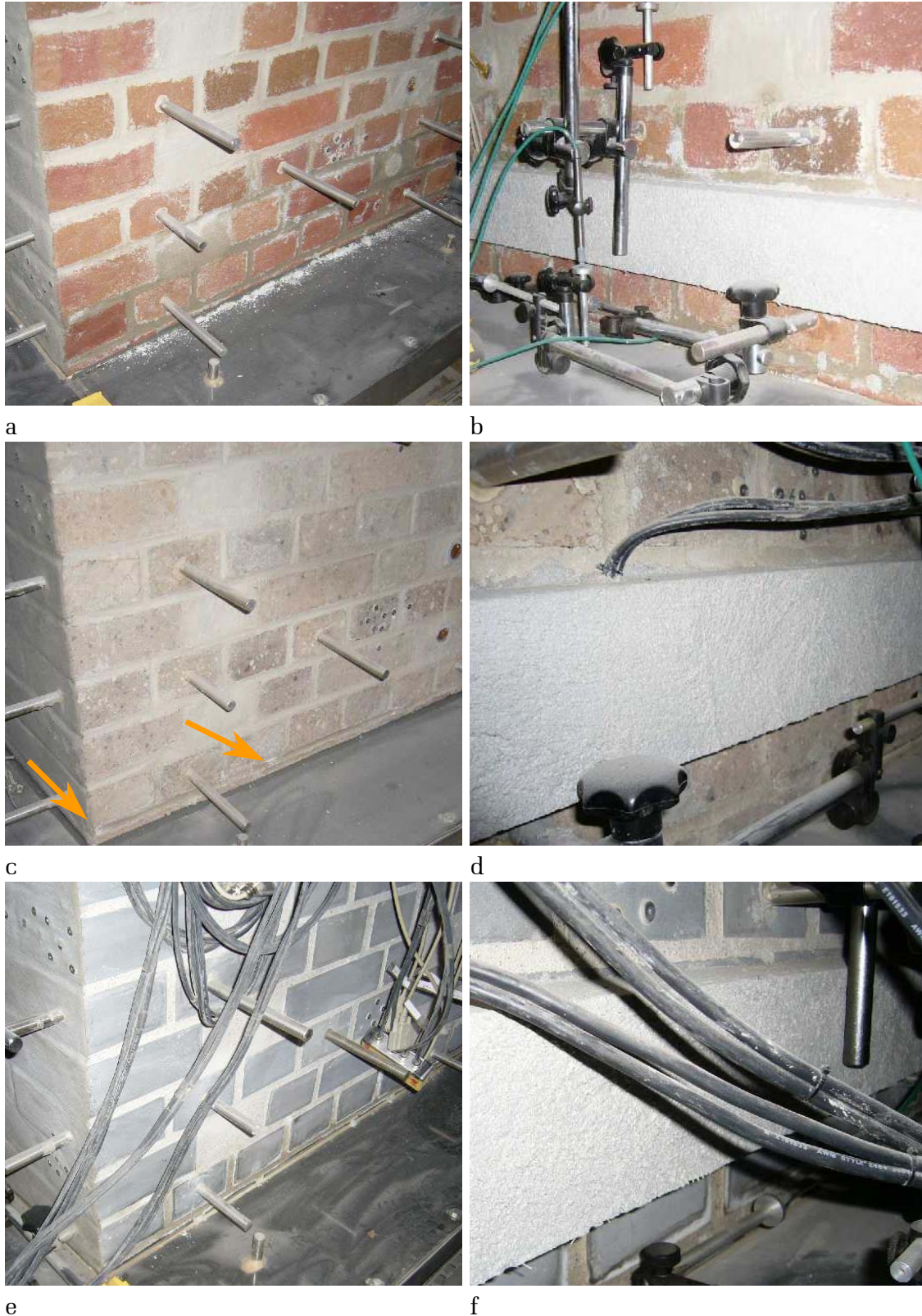


Bild 3: Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite **60 Tage** nach der Wasserbeaufschlagung von unten: Feuchtestfront erreicht dritte Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Ausblühungen nehmen zu und erste Ausblühungen über der Heizung sind vorhanden (MZ1) (a, b); keine eindeutige Feuchtestfront visuell sichtbar, erste leichte Ausblühungen sichtbar (RT1) (c, d); Feuchtestfront erreicht die erste Stoßfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (e, f).



Bild 4: Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite **75 Tage (9 Tage)** nach der Wasserbeaufschlagung von unten (Inbetriebnahme der Heizung): Feuchtefront erreicht dritte Lagerfuge oberhalb der Abdichtung und Ausblühungen nehmen weiter zu (MZ1) (a, b); Feuchtefront in der ersten Lagerfuge oberhalb der Abdichtung visuell sichtbar, die leichten Oberflächenveränderungen scheinen nicht weiter zuzunehmen (RT1) (c); Feuchtefront erreicht die erste Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (d).

Vor dem Zuschalten der Heizung nach 66 Prüftagen, ist der Stand der Feuchtefront auf der heizungsabgewandten Seite auf allen drei Mauerwerkprüfwänden mit einem Grafitstift festgehalten worden.

Nach dem Zuschalten der Heizung ist in dem Prüfzeitraum die Feuchtefront bei allen drei Mauerwerkprüfwänden nur noch geringfügig im visuell sichtbaren Bereich (Mauerwerkoberfläche) über die nach 66 Tagen festgehaltenen Markierungen hinaus angestiegen (siehe Bild 6 und 7).

Die Ausblühungen dagegen haben bei der Mauerziegel- und der Grauwackewand deutlich zugenommen. Dabei ist zu beobachten, dass die

Ausblühungen insbesondere in der Kontaktfuge zwischen Mauerstein und Mörtel, also nicht mitten auf der Fuge, entstehen und lediglich beim Mauerziegel nach und nach auch an der Steinoberfläche auftreten. Weiterhin ist zu beobachten, dass sich die Ausblühungen in Form der Kristallisation an der Mauerwerkoberfläche bei der Mauerziegel- und der Grauwackewand deutlich voneinander unterscheiden. Bei beiden Wänden wachsen die Ausblühungen nach und nach auf, bis sie „abrieseln“. Allerdings erfolgt das Aufwachsen bei der Mauerziegelwand eher wolkgig, wohingegen sie bei der Grauwackewand fadenartig erscheint. Offensichtlich treten die Ausblühungen bei der Grauwackewand stärker auf, als bei der Mauerziegelwand.

Bei der Römertuffsteinwand ist keine weitere Zunahme bei den Ausblühungen visuell feststellbar (siehe Bild 5 bis 7).

Obwohl dem Wasser noch keine Salze zugegeben worden sind, kommt es allein durch die baustoffeigenen Salze zu einer erheblichen Anreicherung von baustoffschädlichen Salzen an der Oberfläche, so dass auch der karbonatisierte Mörtel bereits beansprucht wird.

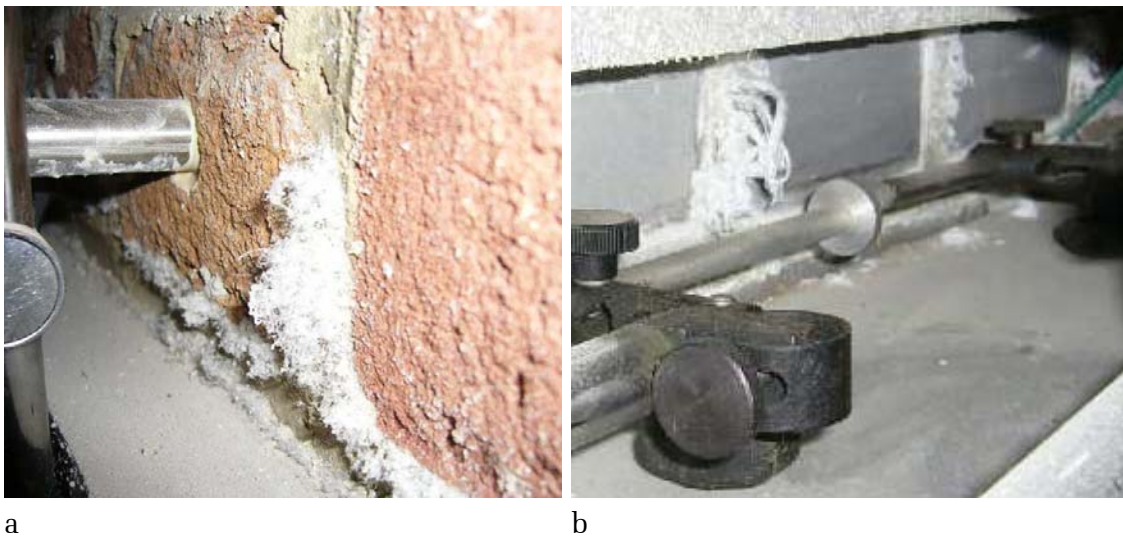


Bild 5: Ausblühungen an Mauerwerk- (a) und Grauwackewand (b) im unteren, feuchten Fugenbereich.

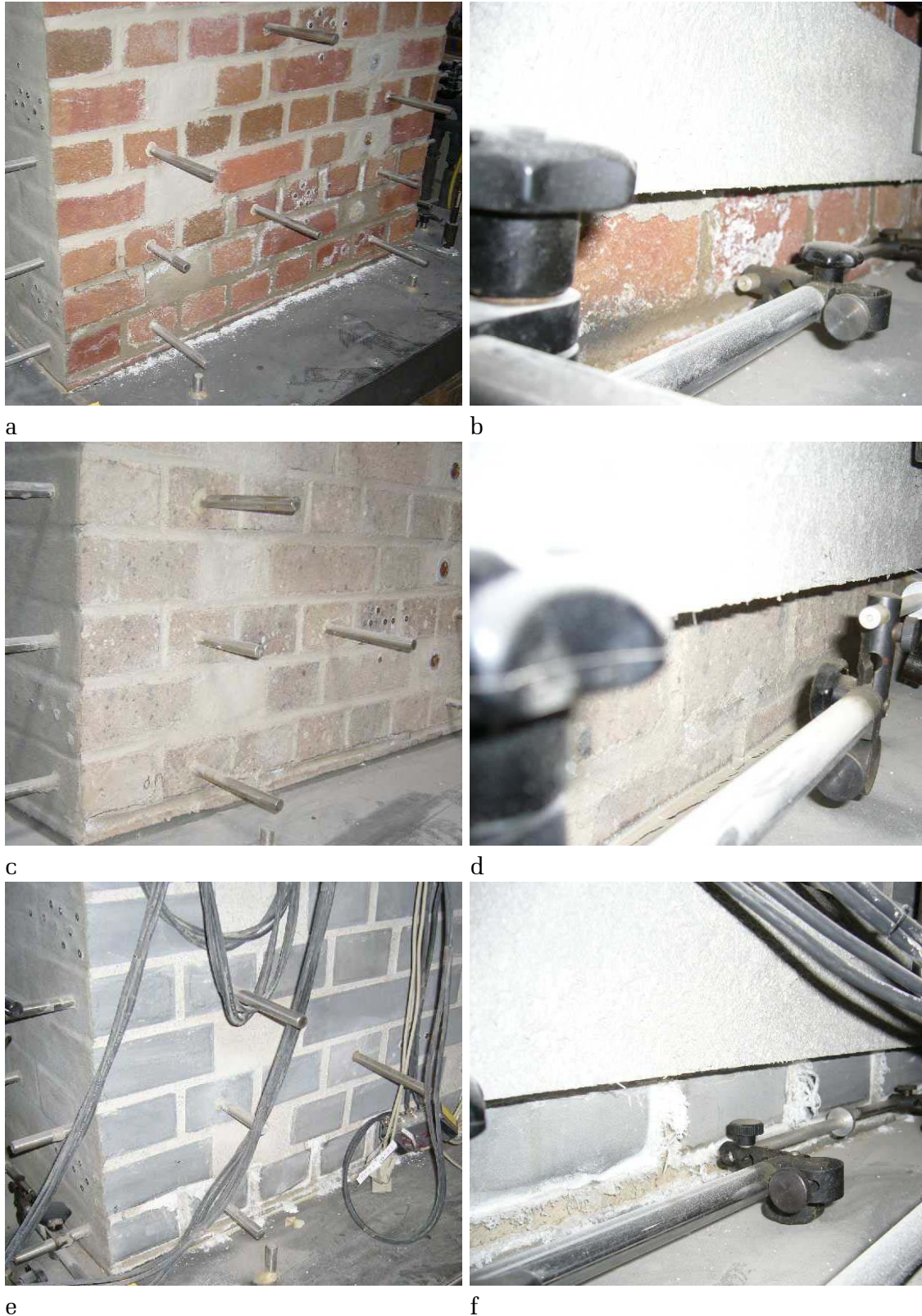


Bild 6: Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite **84 Tage (18 Tage)** nach der Wasserbeaufschlagung von unten (Inbetriebnahme der Heizung): Feuchtefront erreicht zweite Lagerfuge oberhalb der Abdichtung und erste Ausblühungen sind sichtbar (MZ1) (a, b); keine Feuchtefront bzw. Oberflächenveränderungen visuell sichtbar (RT1) (c); Feuchtefront erreicht die erste Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (d).

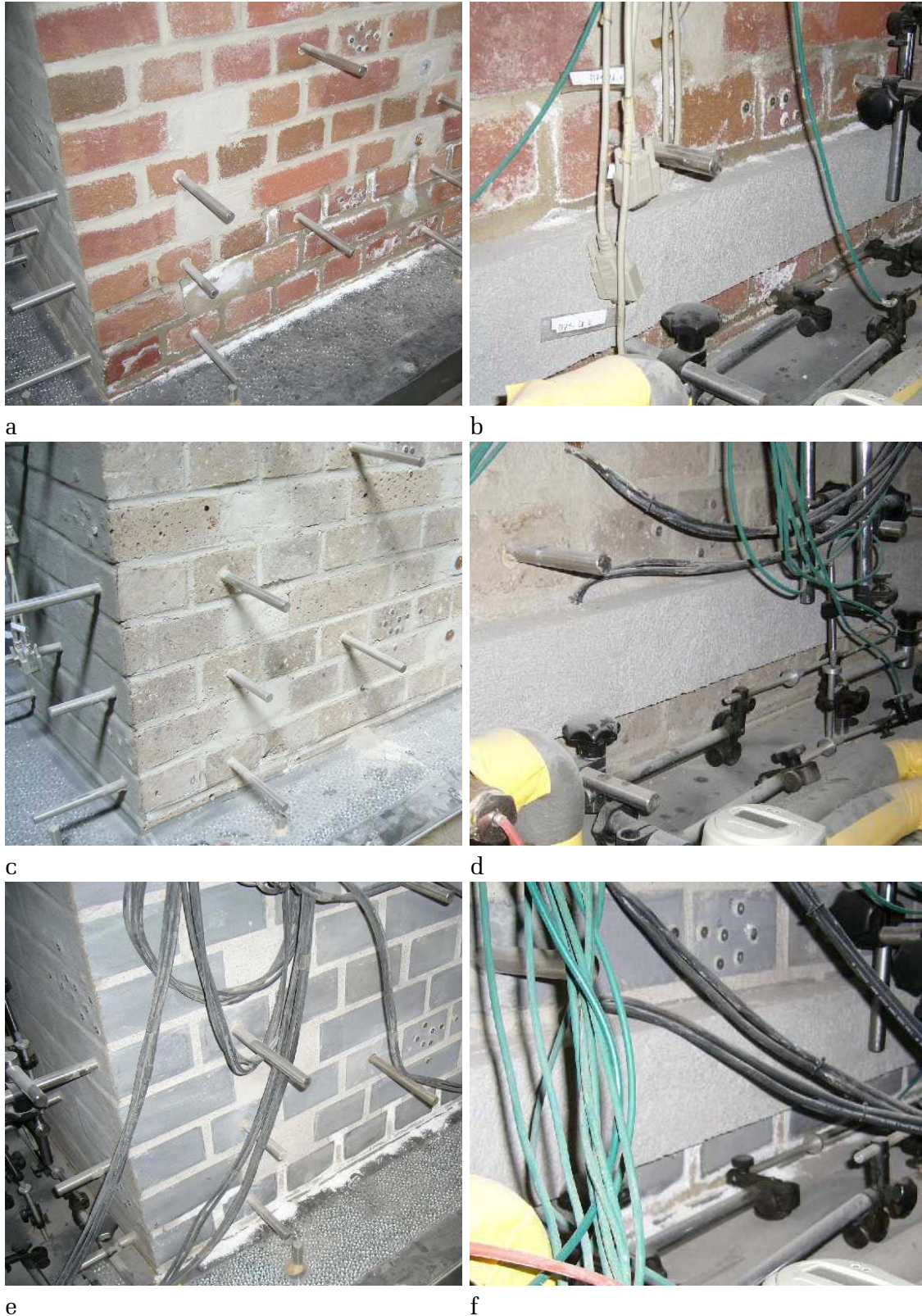


Bild 7: Zustand der Mauerwerkprüfwände an der Längsseite **128 Tage (62 Tage)** nach der Wasserbeaufschlagung von unten: Feuchtefront erreicht zweite Lagerfuge oberhalb der Abdichtung und erste Ausblühungen sind sichtbar (MZ1) (a, b); keine Feuchtefront bzw. Oberflächenveränderungen visuell sichtbar (RT1) (c); Feuchtefront erreicht die erste Lagerfuge oberhalb der Abdichtung, Steine sind im Randbereich nass (GW1) (d).

2.2.2.2 Feuchtegehaltsmessungen

FEUCHTEMESSSENSOREN

Neben der visuell festgestellten Feuchteaufnahme der einzelnen Mauerwerkprüfwände, wird die Feuchteaufnahme in regelmäßigen Abständen auch durch Feuchtemesssensoren über die Mauerwerkstärke und über die Mauerwerkhöhe erfasst (siehe dazu auch Bild 8). Die Feuchtemesssensoren sind mit dem TKM-Mörtel in das Mauerwerk eingesetzt worden; sie geben also den Feuchtegehalt über die Tiefe und Höhe im Mörtel wieder (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0A).

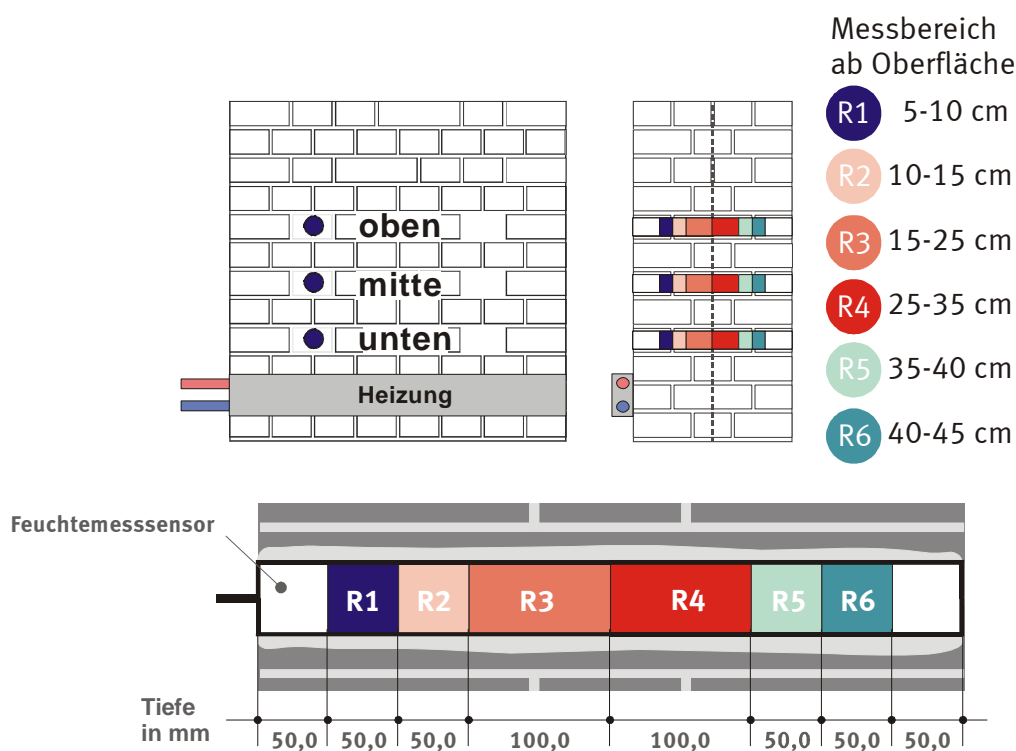


Bild 8: Lage der Feuchtemesssensoren im Mauerwerk in Ansicht, Querschnitt und Detail und Lage der Messwiderstände im Sensor bzw. Mauerwerk.

In Bild 9 bis 11 sind die Messergebnisse der Widerstandsmessung zur Feuchtegehaltsänderung in den Mauerwerkswänden über den Mauerwerkquerschnitt und die Mauerwerkhöhe nach der Wasserbeaufschlagung von unten und dem Zuschalten der Heizung nach 66 Tagen (Vorlauftemperatur + 35 °C) bzw. 85 Tagen (Vorlauftemperatur auf + 53 °C erhöht) dargestellt.

Mit der kapillaren Wasseraufnahme der Mauerwerkprüfwände von unten, zeigen die Sensoren bei der **Mauerziegelwand** im unteren Bereich (Sensor unten) eine eindeutige Feuchtezunahme, nach etwa 50 Tagen nimmt auch im mittleren Bereich (Sensor mitte) die Feuchte im Mauerwerk zu.

Im oberen Mauerwerksbereich (Sensor oben) ist eine leichte Feuchtereduktion zu verzeichnen. Im unteren und mittleren Mauerwerksbereich nimmt die Feuchte nach dem Start der Heizung zunächst weiter ab, bis dann nach etwa 80 Tagen im unteren Bereich eine Konstanz und schließlich sogar wieder eine leichte Feuchteabnahme und im mittleren Bereich eine Konstanz festzustellen ist. Nach etwa 50 Tagen ist bei dem mittleren Bereich außen an der heizungsabgewandten Seite eine deutlich stärkere Feuchtezunahme als bei den anderen Messstellen zu verzeichnen, die nach etwa 90 Tagen wieder ähnlich den anderen Messstellen verläuft.

Bei der **Römertuffsteinwand** zeigen die Messergebnisse bezüglich der Feuchteaufnahme, die mittels der Feuchtemesssensoren ermittelt werden, ein ganz anderes Verhalten als bei der Mauerziegelwand auf. Nach der Wasserbeaufschlagung bis zum Start der Heizung nach 66 Tagen ist bei der Römerwand keine wesentliche Veränderung der Feuchtesituation im Mauerwerk mittels der Feuchtemesssensoren feststellbar. Nach dem Start der Heizung mit einer Vorlauftemperatur von + 35 °C ist nur im unteren Bereich ein geringer Einfluss in der Hinsicht erkennbar, dass eine anfängliche leichte Feuchtereduktion im Mörtel eintritt. Mit dem Erhöhen der Vorlauftemperatur auf + 53 °C tritt auch im mittleren und oberen Bereich eine geringfügige Feuchtereduktion im Mauerwerk ein.

Anmerkung: Das Nachhalten der zugegebenen Wassermengen und Probebohrungen im unteren Mauerwerksbereich (unterhalb der montierten Heizung) zeigen, dass die Römertuffsteinwand Wasser kapillar aufnimmt. Allerdings ist die aufgenommene Menge deutlich geringer als bei der Mauerziegelwand und ähnlich der Grauwackewand (vergleiche auch Abschnitt 3.1.2). Die Ergebnisse, die mittels der Feuchtemesssensoren zur Feuchtesituation ermittelt worden sind, entsprechen den visuellen Beobachtungen. Erklärungsansätze werden in Abschnitt 3 gegeben.

Bei der **Grauwackewand** ist die Wasserbeaufschlagung bis zum Start der Heizung nur im unteren Mauerwerksbereich (Sensor unten) bei den außenliegenden Widerständen (Messtiefe R1 etwa 50 mm und R6 etwa 450 mm ab Mauerwerkoberfläche) messbar. Die Messwerte der übrigen Messstellen im unteren Bereich und die Messwerte im mittleren und oberen Bereich bleiben nahezu unverändert. Mit dem Start der Heizung nach 66 Tagen nimmt weiterhin die Feuchte nur im unteren Außen-

bereich (Sensor unten, R1 und R6) weiter ab. Mit dem Beginn der Erhöhung der Vorlauftemperatur auf + 53 °C (Rücklauftemperatur + 50 °C) findet dann eine Feuchtereduktion an den Messstellen R1 und R6 im unteren Bereich statt, bei dem mittleren Bereich tritt eine leichte Feuchtereduktion über den gesamten Mauerwerkquerschnitt ein, wohingegen im oberen Mauerwerkbereich, außer bei Messstelle R1 (Messtiefe 50 mm ab Mauerwerkoberfläche), die weiter eine leichte Feuchteabnahme verzeichnet, eine leichte Feuchtezunahme zu erkennen ist (siehe dazu auch Bild 9 bis 11).

Es wird noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im Mauer-
mörtel und damit auch im Feuchtemesssensor umgebenden Mörtel völlig andere Feuchtesituationen gegeben sein können als in den Mauersteinen (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0A).

WÄGUNGEN UND DOKUMENTATION DER WASSERSTÄNDE

Bisher ist die Masseänderung (Feuchtezunahme bzw. Feuchtereduktion) der Mauerwerkprüfwände über regelmäßige Wägungen erfasst worden. Mit der Installation der Heizung an die Mauerwerkswände und dem Befüllen der Prüfwannen ist das Wiegen der Prüfwände aufgrund der vorhandenen Messtechnik sehr schwierig geworden, so dass nur noch zu ausgesuchten Zeitpunkten Wägungen durchgeführt werden. Um einen Anhalt über die Wasseraufnahme der einzelnen Mauerwerkprüfwände zu erhalten, werden regelmäßig die Wasserstände in den Prüfwannen kontrolliert und dokumentiert und die ggf. nachgefüllten Wassermengen werden protokolliert.

Die Wägungen der Mauerwerkprüfwände zeigen eine deutliche Massezunahme bei allen drei Mauerwerkswänden nach der Wasserbeaufschlagung der Wände von unten und dem Zuschalten der Heizung (siehe dazu auch Abschnitt 3.1.2). Dabei ist besonders zu beachten, dass die Römertuffstein- und die Grauwackewand zur Zeit etwa die hinzugegebene Wassermenge (Zugabemenge Wasser beträgt bei **RT- und GW-Wand** zur Zeit etwa 37 Liter) als Massezunahme aufweisen. Ein messbarer Verlust durch z. B. Verdampfen von Feuchte durch den Betrieb der Heizung, ist im Rahmen der Messtoleranzen zur Zeit nicht bzw. nur gering messbar.

Bei der Mauerziegelwand (Zugabemenge Wasser beträgt bei **MZ-Wand** zur Zeit etwa 92 Liter) dagegen kann durch die Wägungen und dem protokollieren der Wasserzugabemengen zur Zeit eine abgegebene Feuchte-

menge (Verdampfen bzw. Verdunsten von Feuchte aus dem Mauerwerk) an zugegebenen Wasser von etwa 45 Liter festgestellt werden. Vom zugegebenen Wasser sind also etwa 47 Liter in der MZ-Wand verblieben.

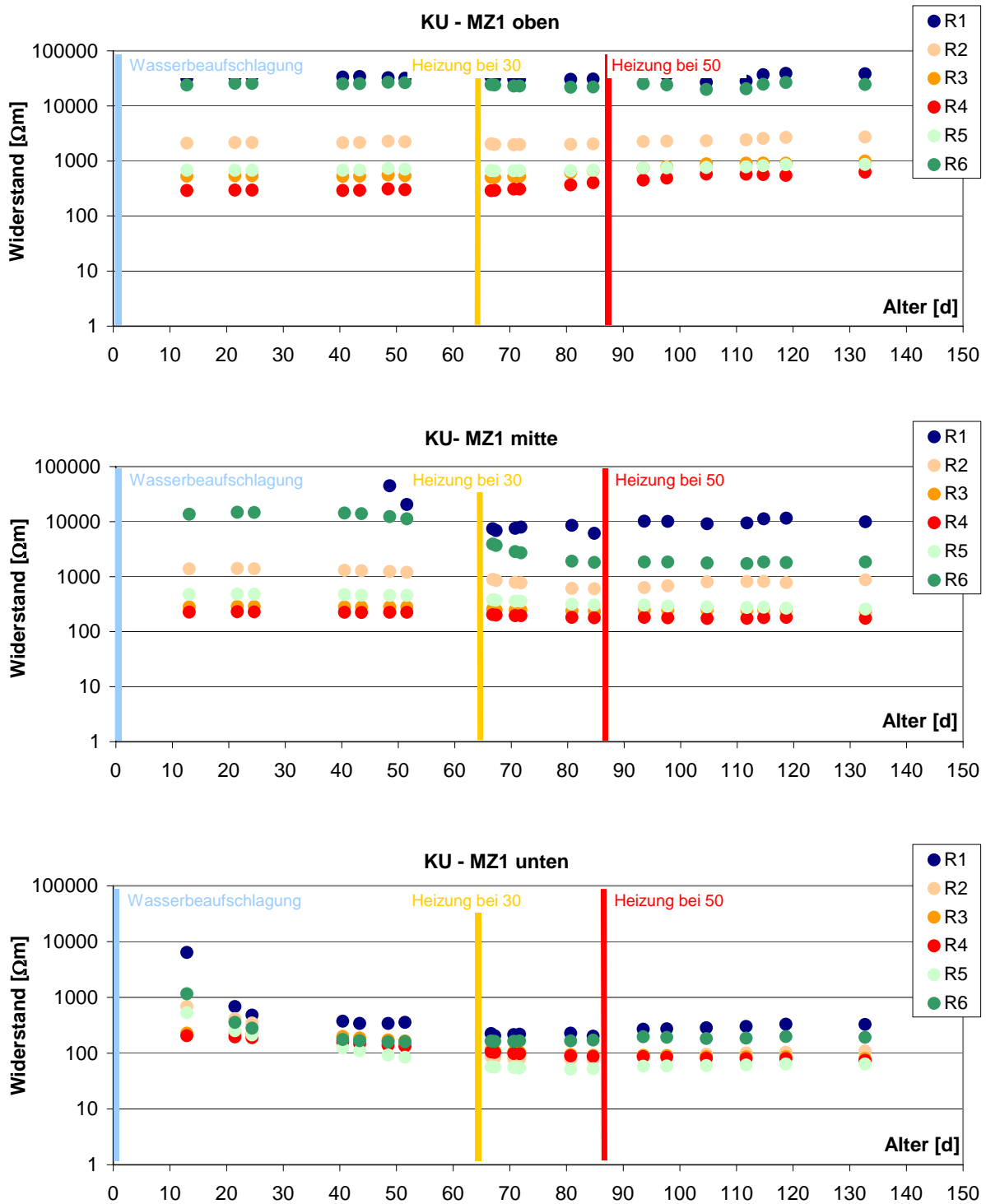
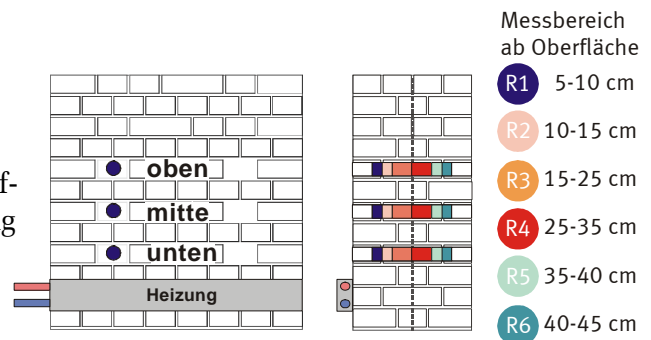


Bild 9: Widerstand in Ωm über die Mauerwerk-tiefe und über die Höhe, für die **Mauerziegelprüfwand MZ1** in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.



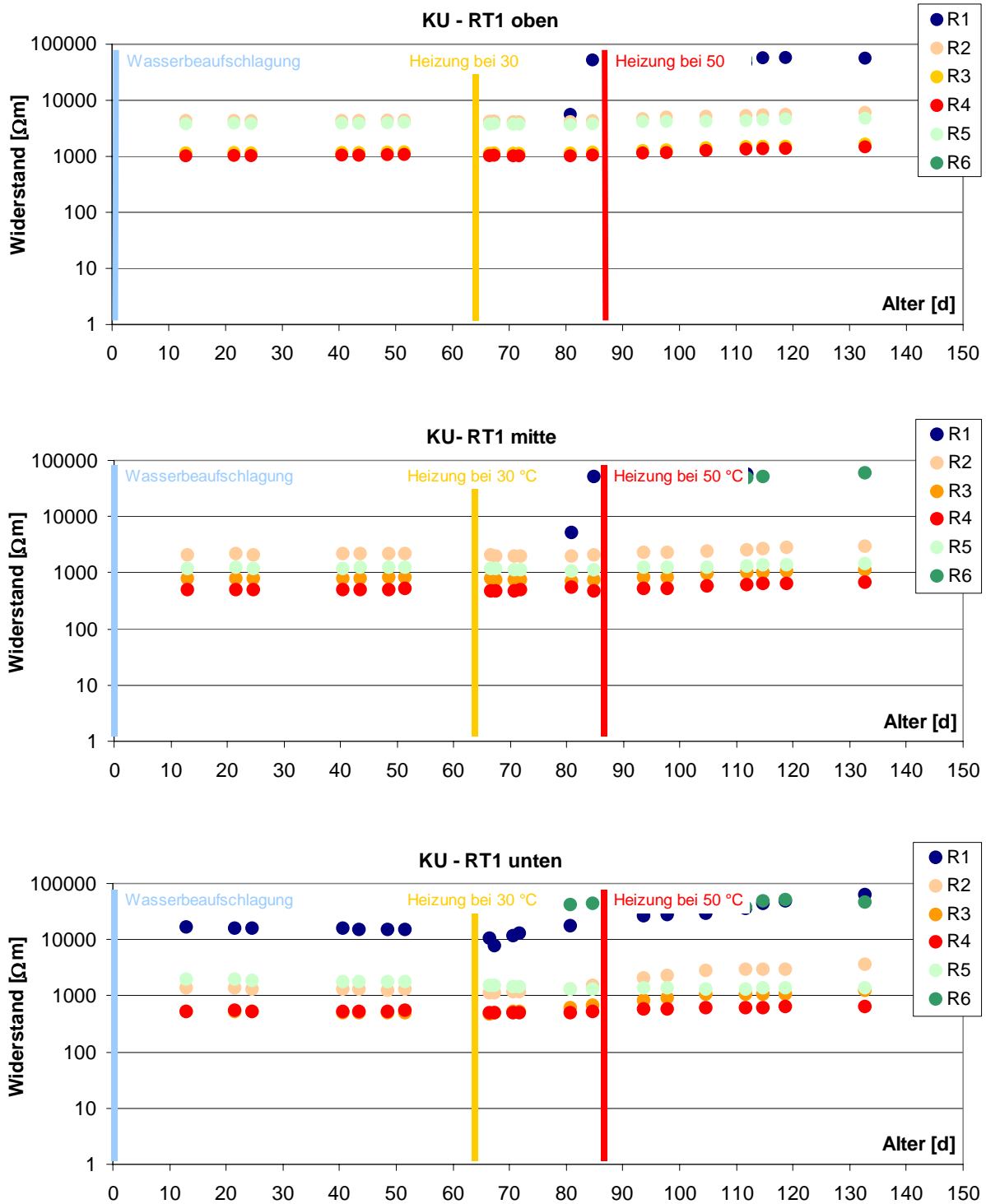
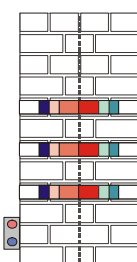
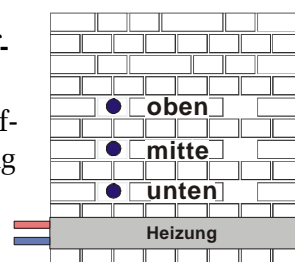


Bild 10: Widerstand in Ωm über die Mauerwerkstiefe und über die Höhe, für die **Römertuffsteinprüfwand RT1** in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.



Messbereich ab Oberfläche

- R1 5-10 cm
- R2 10-15 cm
- R3 15-25 cm
- R4 25-35 cm
- R5 35-40 cm
- R6 40-45 cm

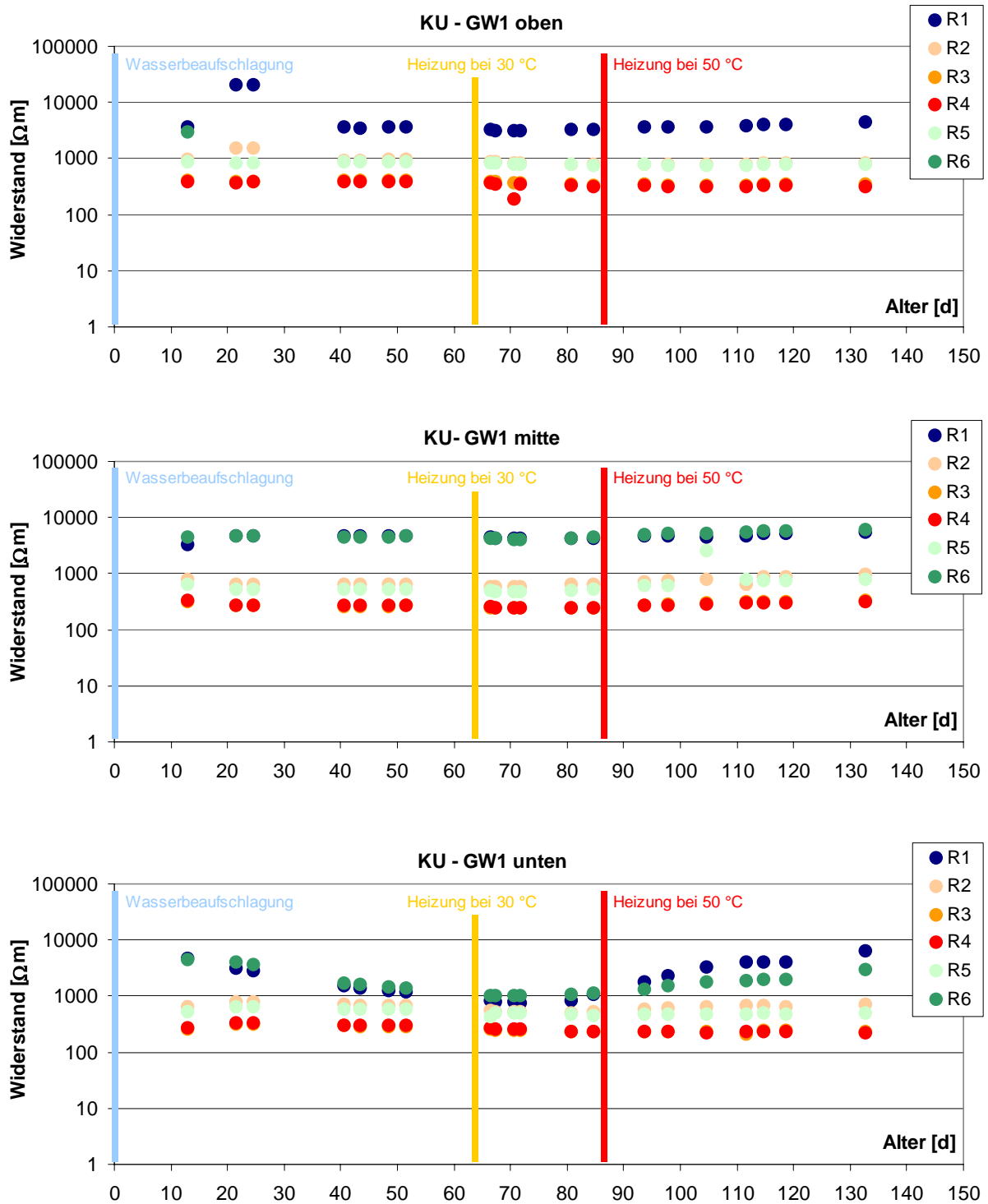
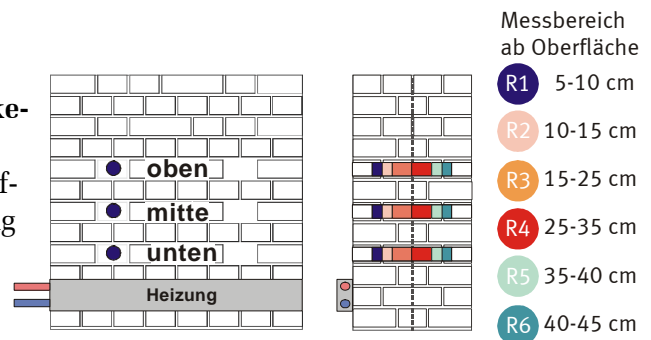


Bild 11: Widerstand in Ωm über die Mauerwerk-tiefe und über die Höhe, für die **Grauwacke-prüfwand GW1** in Abhängigkeit vom Prüfaller t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.



2.2.2.3 Temperaturmessungen

Mittels der Feuchte- und Temperaturmesssensoren wird über die Mauerwerkstärke und die Mauerwerkhöhe neben der qualitativen Feuchteverteilung, auch die Temperaturverteilung bei allen drei Mauerwerkprüfwänden erfasst (siehe dazu auch Bild 12).

In den nachfolgenden Diagrammen ist die Temperaturverteilung in Kelvin, wie sie sich messtechnisch in den Mauerwerkprüfwänden über die Tiefe und Höhe darstellt, von dem Zeitpunkt der Wasserbeaufschlagung abgebildet (siehe dazu auch Bild 14 bis 16).

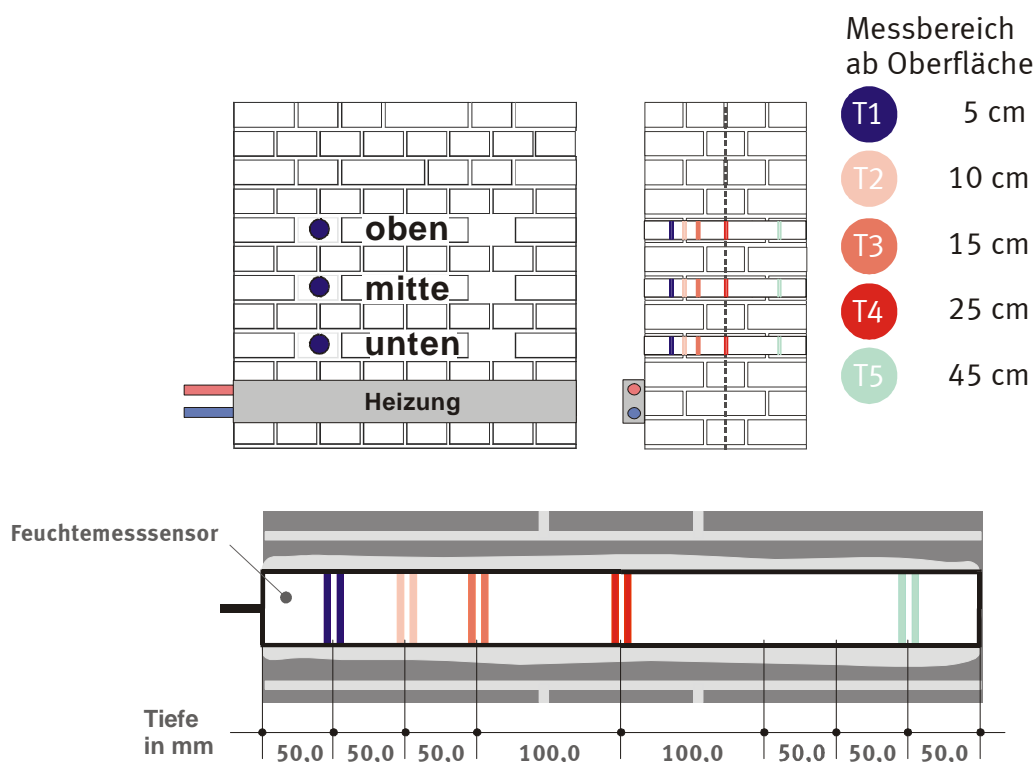


Bild 12: Lage der Feuchtemesssensoren im Mauerwerk in Ansicht, Querschnitt und Detail und Lage der Temperaturmessstellen im Sensor bzw. Mauerwerk.

Die Temperaturaufzeichnungen sind nachfolgend ab der Wasserbeaufschlagung dargestellt. Alle Wände weisen dabei über die Höhe und die Mauerwerkstärke eine nahezu gleichmäßige Temperaturverteilung von etwa 12 °C (285 K) auf. Die Raumtemperatur lag in dieser Zeit im Mittel bei etwa 13 °C (siehe dazu auch Bild 13).

Mit dem Zuschalten der Heizung nach 66 Tagen und einer Betriebstemperatur der Heizung von + 35 °C im Vorlauf und + 30 °C im Rücklauf, steigt die Temperatur, wie zu erwarten, über die Mauerwerkstärke und die Mauerwerkstärke an. Bei der **Mauerziegelwand** und der **Römertuffsteinwand** wird dabei im unteren Bereich (Sensor unten), unmittelbar

nach dem Zuschalten der Heizung, ein Temperaturgefälle von der beheizten zur unbeheizten Seite von etwa $+ 7 \text{ °C}$ bzw. K erreicht. Die **Grauwackewand** heizt sich langsamer auf und ein Temperaturgefälle von etwa $+ 7 \text{ °C}$ bzw. K wird erst nach etwa 19 Tagen nach dem Zuschalten der Heizung erreicht. Insgesamt findet eine Erwärmung des Mauerwerkes bei einer Heiztemperatur von $+ 50 \text{ °C}$ im unteren Bereich an der Oberfläche von bis zu 27 (MZ/GW) bis 30 °C (303 K) (RT) statt. Über die Höhe (mittlerer und oberer Sensor) betrachtet, ist festzustellen, dass bei allen Wänden eine Erwärmung im Prüfzeitraum auf etwa 22 °C (295 K) an der Oberfläche erreicht wird, die über den Mauerwerkquerschnitt nahezu gleichmäßig verteilt ist (Temperaturdifferenz von der beheizten Oberfläche zur unbeheizten beträgt beim mittleren und oberen Sensor etwa 2 bis 3 °C bzw. K; dabei ist allerdings nicht immer die Oberflächentemperatur an der beheizten Seite in einer Tiefe von etwa 50 mm die größte gemessene Temperatur, sondern größtenteils liegen die Temperaturen im Kern oberhalb der Oberflächentemperatur an der beheizten Seite).

Die Raumtemperatur liegt in diesem Zeitraum im Mittel bei etwa $+ 19 \text{ °C}$, wobei sich die Raumluft in diesem Zeitraum insgesamt von etwa $+ 16 \text{ °C}$ bis auf etwa $+ 22 \text{ °C}$ erwärmt hat.

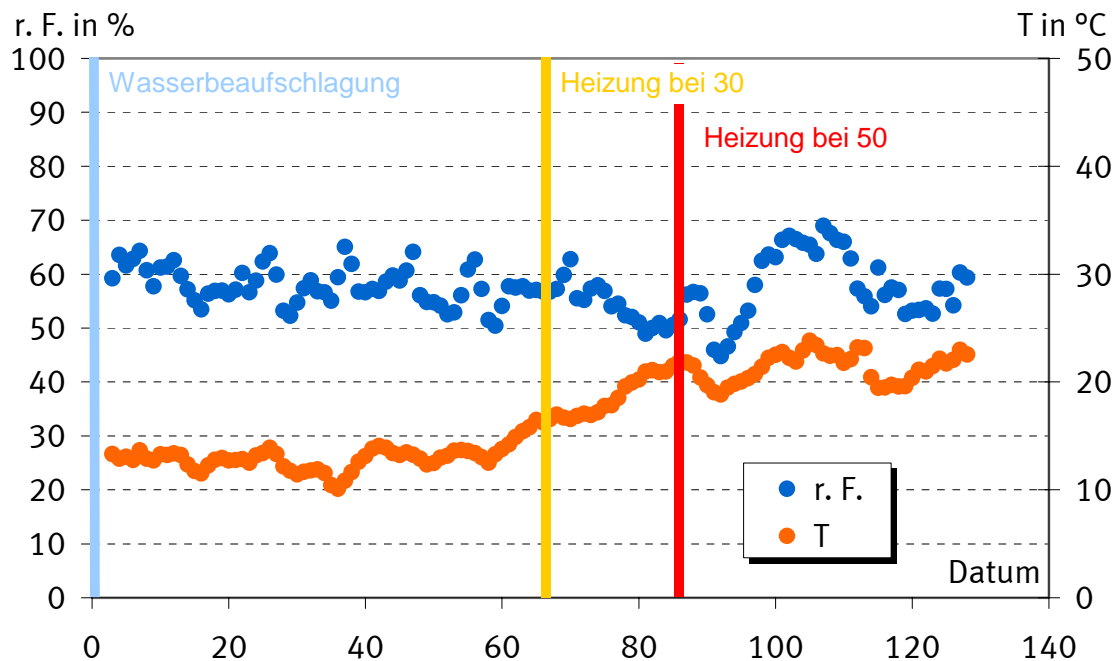


Bild 13: Relative Luftfeuchte r. F. in % und Temperatur T in $^{\circ}\text{C}$ im Raum in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.

Nach etwas 20 Tagen ist die Heizung von einer Vorlauftemperatur von + 35 °C (Rücklauftemperatur + 30 °C) auf eine Vorlauftemperatur von + 53 °C (Rücklauftemperatur + 50 °C) erhöht worden. Dadurch steigt die Temperatur an der beheizten Oberfläche am unteren Sensor bis auf maximal etwa + 32 °C (305 K) bei der **Mauerziegelwand**, etwa + 34 °C (307 K) bei der **Römertuffsteinwand** und etwa + 30 °C (303 K) bei der **Grauwackewand** an. Insgesamt nimmt auch das Temperaturgefälle über den Mauerwerkquerschnitt, wie zu erwarten, zu, das am unteren Sensor mit einer maximalen Temperaturdifferenz von der beheizten zur unbeheizten Oberfläche von + 10 °C bzw. K bei der MZ-Wand, + 12 °C bzw. K bei der RT-Wand und + 7 °C bzw. K bei der GW-Wand am größten ist.

Über die Höhe betrachtet zeigt sich, dass der Temperaturgradient bei allen Mauerwerkswänden am mittleren Sensor zugenommen hat. Insgesamt ist ein Temperaturgefälle von der beheizten zur unbeheizten Seite von etwa + 2 bis + 3 °C bzw. K bei den Mauerwerkswänden gegeben.

Die Raumtemperatur ist in diesem Zeitraum relativ gleichmäßig und liegt im Mittel bei etwa + 21,3 °C.

Nach etwa 112 Tagen nimmt die Temperatur bei allen Wänden über die Höhe und die Mauerwerkstiefe für mehrere Tage ab, was auf einen kurzzeitigen Stromausfall und einem gleichzeitigen Absinken der Raumtemperatur zurückgeführt werden kann.

Es fällt auf, dass die Heiztemperatur von + 50 °C (Rücklauftemperatur) an dem vordersten Temperaturfühler (Tiefe etwa 50 mm an der heizungszugewandten Seite) nicht erreicht wird, sondern nur etwa + 30 °C erreicht werden. Über den Mauerwerkquerschnitt ist also insbesondere von der beheizten zu unbeheizten Seite ein ungleichmäßiger Temperaturabfall festzustellen.

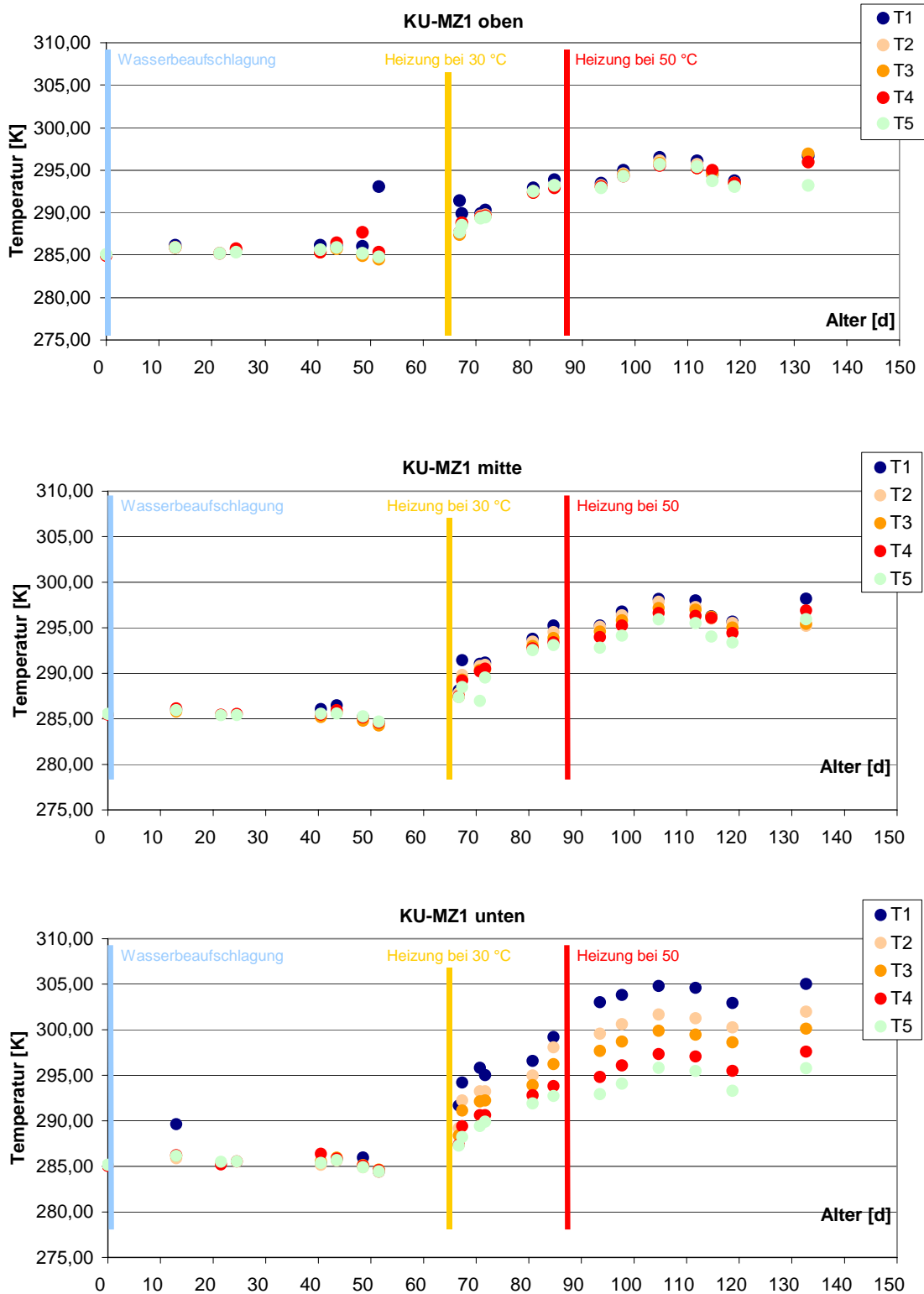
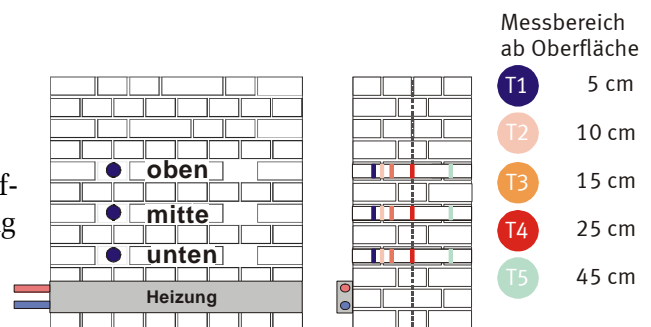


Bild 14: Temperatur in K über die Mauerwerk-tiefe und über die Höhe, für die **Mauerziegelprüfwand MZ1** in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.



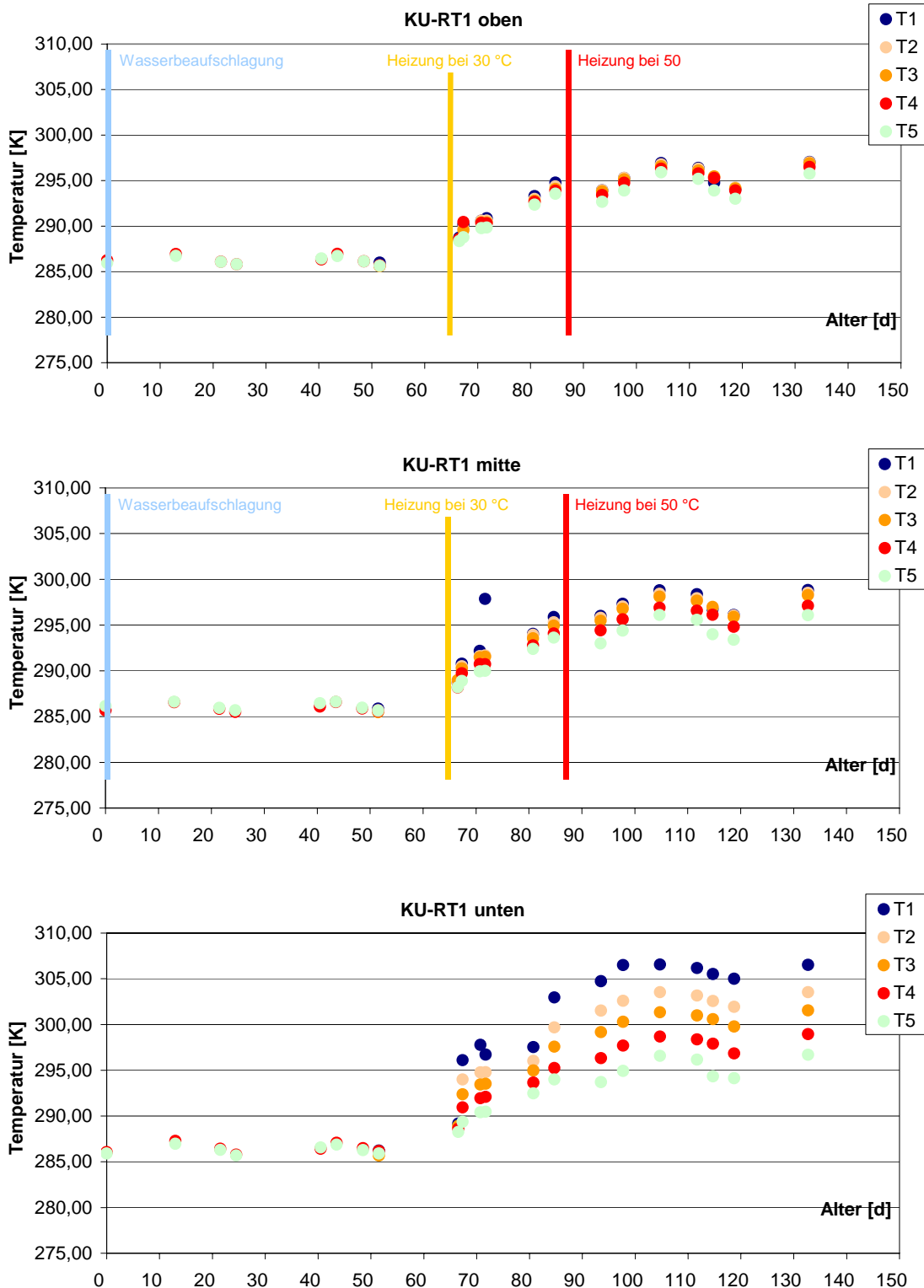


Bild 15: Temperatur in K über die Mauerwerk-tiefe und über die Höhe, für die **Römertuffsteinprüfwand RT1** in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.



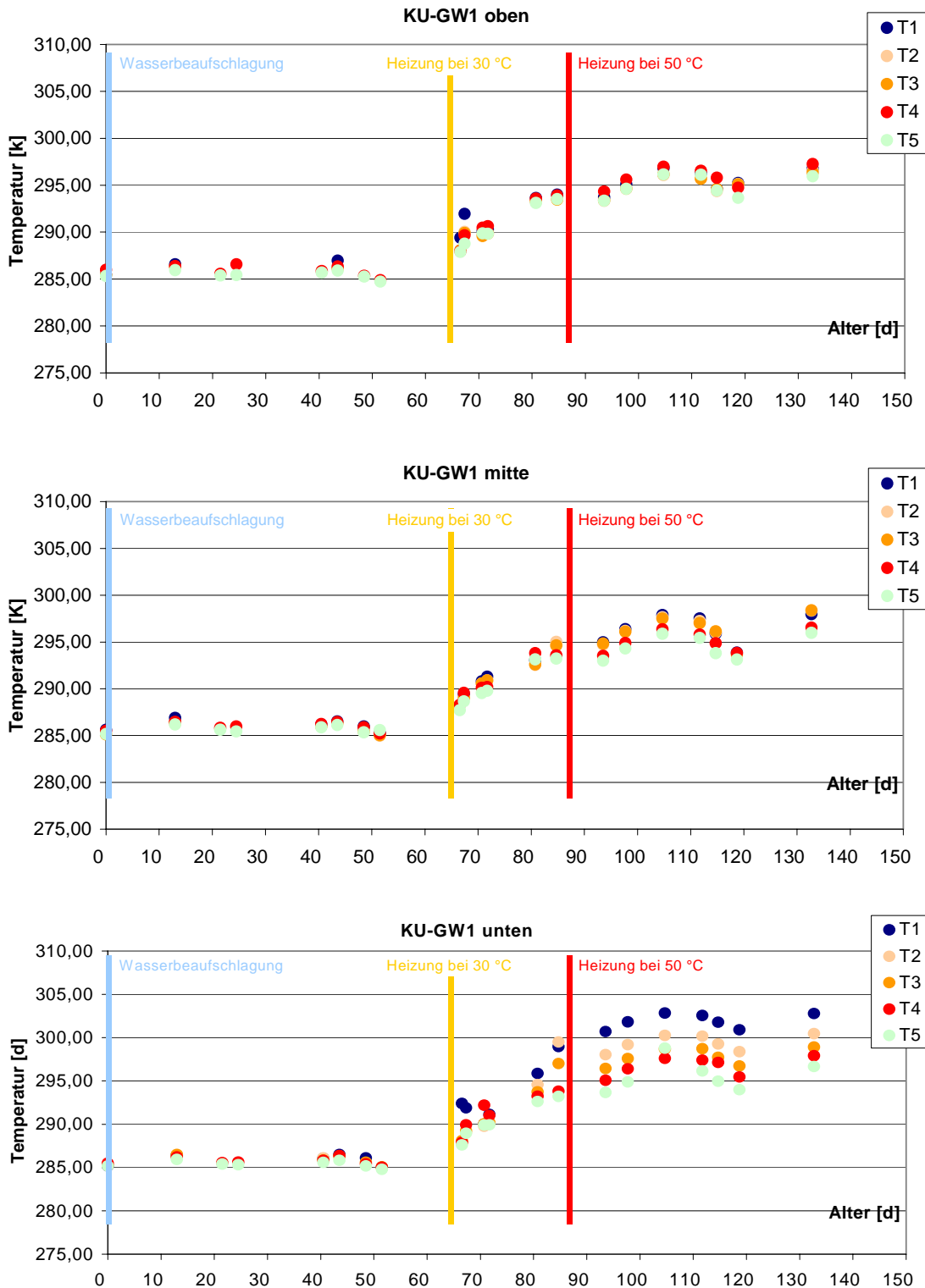
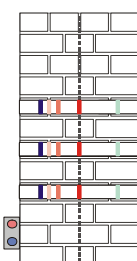
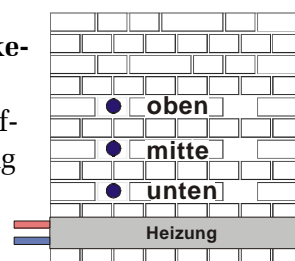


Bild 16: Temperatur in K über die Mauerwerk-tiefe und über die Höhe, für die **Grauwacke-prüf-wand GW1** in Abhängigkeit vom Prüfalter t in Tagen nach Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.



- Messbereich ab Oberfläche
- T1 5 cm
 - T2 10 cm
 - T3 15 cm
 - T4 25 cm
 - T5 45 cm

2.2.2.4 Formänderungsmessungen

Nachfolgend sind die mit der Feuchteaufnahme verbundenen Formänderungen des Mauerwerkes im Vergleich der einzelnen Mauerwerkarten untereinander und im direkten Vergleich der Längs- und Stirnseiten der einzelnen Mauerwerkswände dargestellt (siehe dazu auch Bild 17).

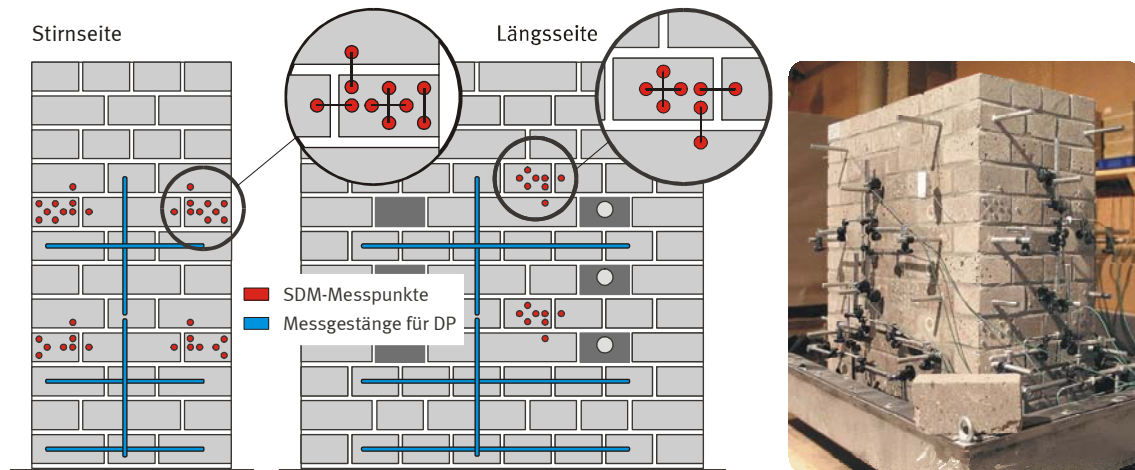


Bild 17: Lage und Anordnung der SDM-Punkte (zur Zeit keine Messung mehr möglich, siehe dazu auch Abschnitt 2.2.2) und der digitalen Präzisionstaster an den Mauerwerkprüfwänden – schematische Darstellung und Foto am Beispiel der Römertuffsteinwand.

Den Diagrammen ist u. a. zu entnehmen, dass alle Mauerwerkprüfwände mit Beginn der Wasserbeaufschlagung Formänderungen insbesondere im unteren Längs- und Stirnseitenbereich (Messstelle 1, siehe dazu auch Bild 18) erfahren.

- **Längs- und Stirnseite, *horizontale* Messtaster**

Bisher werden an der Grauwackewand im unteren Bereich (Messstelle 3, längs, unten, horizontal (MS 3 – l/u/h)) an der **Längsseite** mit bis zu etwa 1,3 mm/m die größten, an der Römerwand mit maximal 1,0 mm/m die geringsten Formänderungen (Quellen) gemessen. Die Mauerziegelwand weist geringfügig höhere Formänderungen in diesem Bereich als die Römertuffsteinwand auf.

An der **Stirnseite** können im unteren horizontalen Bereich (MS 3 – st/u/h) bei der Mauerziegel- und Römertuffsteinwand ähnliche Formänderungen (Quellen) wie an der Längsseite festgestellt werden. Bei der Grauwackewand dagegen sind an der Messstelle 3 an der Stirnseite mit maximal etwa 0,3 mm/m deutlich geringere

Formänderungen (Quellen) vorhanden als an der Längsseite in diesem Bereich.

Insgesamt nehmen die Formänderungen in horizontaler Richtung (Messstelle 1, längs, oben, horizontal (MS 1 – l/o/h) und Messstelle 2, längs, mitte, horizontal (MS 2 – l/m/h)) über die Höhe an der Längsseite bei allen Mauerwerkprüfwänden ab. Dabei ist bei allen drei Mauerwerkprüfwänden zunächst an MS 2 ein Quellen festzustellen, das bei der Römertuffsteinwand mit dem Zuschalten der Heizung nach 66 Tagen in eine Schwindverformung übergeht. Die Messstelle 1 weist bei allen Mauerwerkprüfwänden eine Schwindverformung auf, die bei der Römertuffsteinwand am stärksten und bei der Grauwackewand nur gering messbar ist.

An der Stirnseite treten bei den Messstellen 1 und 2 nur geringe Formänderungen auf. Ähnlich der Längsseite weist die Messstelle 1 (oben) überwiegend eine Schwindverformung bei allen drei Mauerwerkprüfwänden auf. Die Messstelle 2 (mitte) verhält sich bei den drei Mauerwerkprüfwänden unterschiedlich. Bei der Mauerziegel- und der Grauwackewand ist eine Quellverformung festzustellen, die bei der Grauwackewand mit maximal etwa 0,25 mm/m deutlich stärker ist, als bei der Mauerziegelwand mit maximal etwa 0,1 mm/m. Bei der Römertuffsteinwand verhalten sich Messstelle 1 und 2 nahezu gleich und wie bei der Längswand ist auch hier festzustellen, dass mit dem Zuschalten der Heizung, die Quellverformung in eine Schwindverformung übergeht.

- **Längs- und Stirnseite, vertikale Messtaster**

Insgesamt sind an der Längsseite in vertikaler Richtung (Messstelle 4, längs, oben, vertikal (MS 4 – l/o/v) und Messstelle 5, längs, unten, vertikal (MS 5 – l/u/v)) nur geringe Formänderungen an den drei Mauerwerkprüfwänden festzustellen., die bei der Römerwand am deutlichsten auftreten und insbesondere nach dem Zuschalten der Heizung als Schwindverformung auftreten. Bei der Mauerziegel- und der Grauwackewand sind nur geringe Formänderungen vorhanden, die offensichtlich im Prüfzeitraum von dem Zuschalten der Heizung unbeeinflusst sind.

An der Stirnseite sind ähnlich geringe Formänderungen in vertikaler Richtung messbar. Nur bei der Grauwackewand sind insbesondere im unteren Bereich (MS 5) starke Schwindverformungen

von bis zu etwa $-0,22$ mm/m (im Mittel) feststellbar. An der Messstelle 4 (oben) betragen die Schwindverformungen an der Grauwackewand derzeit maximal etwa $-0,13$ mm/m.

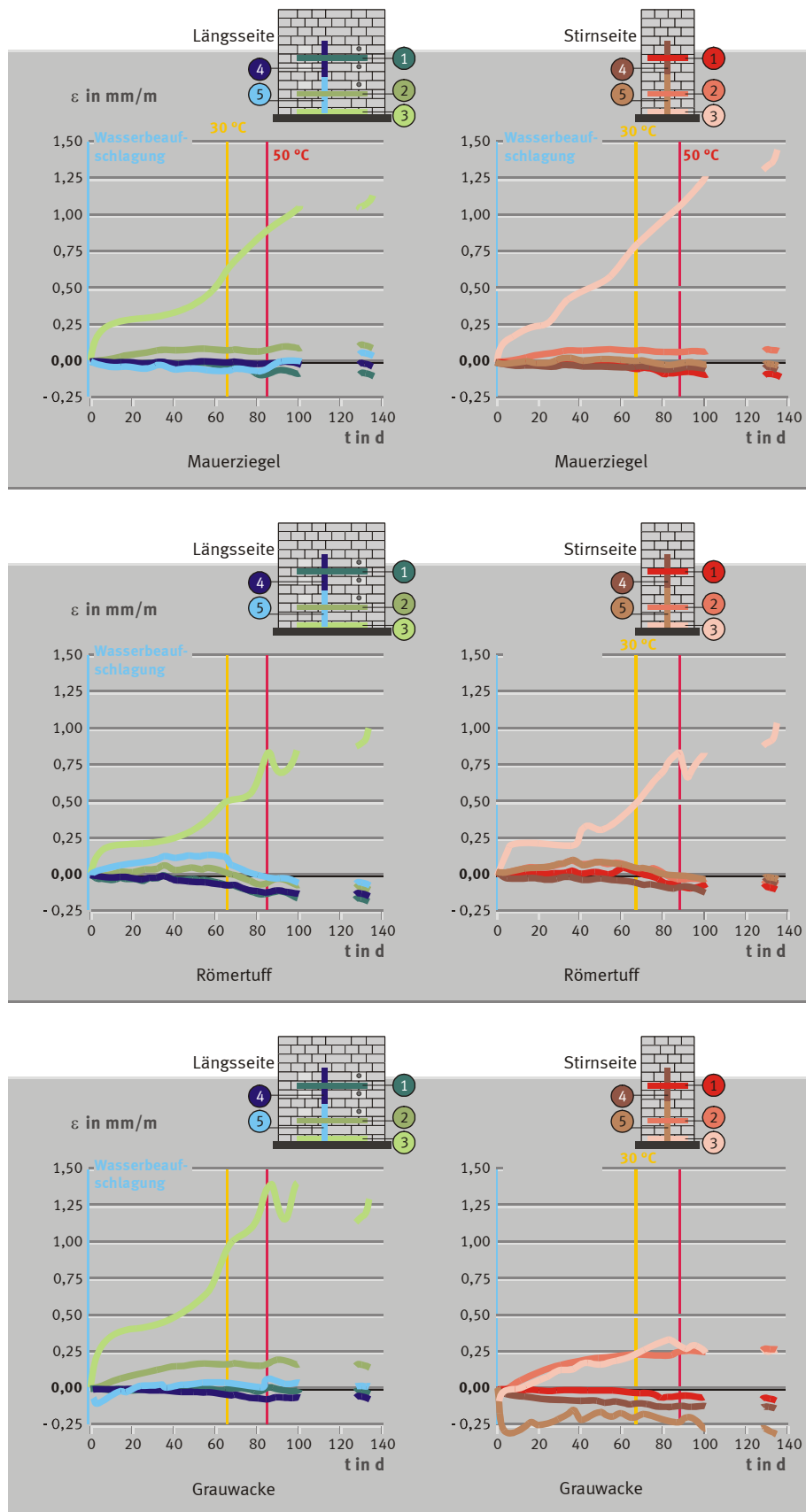


Bild 18: Formänderungsmessungen ϵ_{DP} (+: Quellen; -: Schwinden) in [mm/m] mittels DP an der **Längs-** und **Stirnseite** der Mauerwerkprüfwand aus **MZ, RT** und **GW** abhängig vom Prüfalter in Tagen [d] ab Wasserbeaufschlagung von unten und Start der Heizung nach 66 und 85 Tagen.

2.3 Bauwerksuntersuchungen

Wie bereits erläutert, konnten die Bauwerksuntersuchungen in der Kirche St. Ursula in Köln nicht wie geplant durchgeführt werden. Die bis zum Abbruch des Forschungsprojektes durch das Erzbistum Köln ermittelten Ergebnisse sind in den Berichten F 1006/F-0A [DOM04] und F 1006/F-0C [DOM05.2] vorgestellt worden.

3 BEURTEILUNG

3.1 Feuchtegehalts-, Temperatur- und Formänderungsmessungen

Gemäß dem vorgesehenen Prüfplan sollten die Mauerwerkprüfwände vor der Beheizung im Sockelbereich bis zum Erreichen des Ausgleichsfeuchtezustandes im Raumklima gelagert werden (siehe dazu auch Bericht F 1006/0A [DOM04] und Folgende). Auch nach einer Lagerungszeit von etwa fünf Jahren ist keine Massekonstanz in den Mauerwerkswänden erreicht und auch die Feuchtemesssensoren, die in die Wände eingebaut worden sind, zeigen noch keine vollständige Trocknung im Mörtelbereich (Fuge) der Wände an.

Die Mauerziegel- und die Grauwackewand haben im Fugenbereich in Wandmitte offenbar immer noch einen Durchfeuchtungsgrad von etwa $D = 50 \%$. Die Römertuffsteinwand weist einen Feuchtegehalt im Fugenbereich von $D \leq 40 \%$ auf. Dies bedeutet, dass trotz der etwa fünf Jahren Lagerung der Mauerwerkswände im Raumklima, offenbar im Kernmauerwerk (Mörtel) immer noch ein erhöhter Feuchtegehalt gegeben ist. Es wird noch einmal darauf hingewiesen, dass der Feuchtegehalt im Mörtel deutlich unterschiedlich zum Feuchtegehalt in den Mauersteinen ist (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0A, -0B und -0C).

Aufgrund dieser Situation wurde beschlossen, mit den weiterführenden Untersuchungen zu dem Verhalten von Mauerwerkswänden unter Beheizung eines feuchten Sockelmauerwerkes (nachgestellt durch kapillare Wasseraufnahme) zu beginnen. Zunächst ist die Heizung ohne die Wasserbeaufschlagung der Wände von unten zugeschaltet worden (siehe dazu Abschnitt 3.1.1), später ist dann die Heizung mit der Möglichkeit der kapillaren Wasseraufnahme der Mauerwerkswände von unten betrieben worden (siehe dazu Abschnitt 3.1.2).

Zu Beginn der Untersuchungen ist die Heizung mit einer Temperatur von $+ 30 \text{ °C}$ (Rücklauftemperatur) betrieben worden, die sich bei denen, während des Prüfzeitraums wirkenden Umgebungslufttemperaturen nur unwesentlich auf die Wandtemperatur auswirkt. In etwa 50 mm Tiefe, ab der beheizten Wandoberfläche, werden Temperaturen von etwa $+ 21 \text{ °C}$ bis $+ 22 \text{ °C}$ gemessen, die dann nach außen, zur heizungsabgewandten Seite, hin abnehmen. Bei einer Erhöhung der Heiztemperatur auf $+ 50 \text{ °C}$ (Rücklauftemperatur), werden in 50 mm Tiefe – abhängig von der Mauerwerkart – etwa $+ 30 \text{ °C}$ im Mauerwerk gemessen. Ein deutlicher Teil der Heizenergie wird demnach offensichtlich in den Raum abgeführt.

3.1.1 Beheizung einer fünf Jahre alten Mauerwerkwand (ohne kapillar aufsteigende Feuchte)

Zunächst wurden die Mauerwerkprüfwände ohne die Einwirkung von kapillar aufsteigendem Wasser u. a. in Hinblick darauf untersucht, ob die noch im Mauerwerk vorhandene Restfeuchte durch eine „Beheizung“ mit einer Temperatur von anfänglich + 30 °C (Rücklauftemperatur) und später von + 50 °C (Rücklauftemperatur), beschleunigt reduziert werden kann. Diese Situation würde z. B. einem hergestellten Mauerwerkpfeiler in einem Bauwerk entsprechen, der eine Horizontalsperre aufweist, aber noch herstellfeucht ist und mittels der „Sockelheizung“ beheizt wird.

Die Beheizung der Wände bei + 30 °C (Rücklauftemperatur) ist für etwa einen Monat und die Beheizung bei + 50 °C (Rücklauftemperatur) ist für etwa zwei Monate durchgeführt worden. Die Masse der Wände wurde vor und nach der Beheizung durch Wägungen bestimmt. Der Feuchtegehalt im Fugenmörtel wurde mittels der Feuchtemesssensoren verfolgt.

Die Wägungen der Mauerwerkprüfwände vor und während der Beheizung ergab keinen wesentlichen Massenunterschied. Es wurde eine Massedifferenz bei der Mauerziegelwand von etwa - 4 kg (Masseverlust), bei der Römertuffsteinwand von etwa + 5 kg (Massezunahme) und bei der Grauwackewand von etwa + 2 kg (Massezunahme) ermittelt, die allerdings auch auf Wägetoleranzen zurückgeführt werden können. Die Messungen mittels der Feuchtemesssensoren zeigten im Kernmauerwerk ab einer Tiefe von 7,5 cm in dem Messzeitraum von etwa drei Monaten ebenfalls keine wesentliche Veränderung der Messwerte, also des Feuchtegehaltes im Mauermörtel.

Die **Mauerziegelwand** weist mit einer Masseabnahme von gemessenen - 4 kg, unter Berücksichtigung der Messtoleranzen, einen nahezu konstanten Feuchtegehalt im Prüfzeitraum auf. Die Feuchtemesssensoren in der Mauerziegelwand zeigen ähnliche Messwerte wie in der Römertuffsteinwand an. Es fällt auf, dass der Feuchtegehalt unten in Wandmitte bei einer Heiztemperatur von + 30 °C (Rücklauftemperatur) zwar etwas abnimmt, in der mittleren Höhe der Wand aber nahezu konstant bleibt, bzw. offenbar geringfügig zunimmt. Bei einer Heiztemperatur von + 50 °C (Rücklauftemperatur) ist eine leichte Feuchteabgabe aus dem Fugenmörtel in einer Tiefe von 12,5 cm, gemessen von der beheizten Wandoberfläche, festzustellen. Insgesamt bleibt der Feuchtege-

halt in Wandmitte aber noch erhöht. Der Durchfeuchtungsgrad liegt in diesem Bereich, in Abhängigkeit von der Höhe der Wand, zwischen D etwa 65 % und 80 %.

Die Beheizung mittels Sockelheizung zeigt bei der **Römertuffsteinwand** während der einmonatigen Beheizung mit einer Temperatur von + 30 °C (Rücklaufemperatur) an der Wandoberfläche (Tiefe 10 cm ab Wandoberfläche), wie aufgrund der bisher ermittelten Untersuchungsergebnisse zu erwarten war, keine weitere Trocknung. An der Wand unten, etwas oberhalb der Heizung und in Wandmitte, kann eine langsame Feuchteabgabe und damit eine Reduktion des Feuchtegehaltes im Mörtel festgestellt werden. Bei einer Heiztemperatur von + 50 °C setzt sich dieser Trend langsam weiter fort.

Im Gegensatz zum Grauwackestein ist der Römertuffstein kapillaroffen und nimmt im relativen Luftfeuchtebereich bis etwa 85 % sorptiv deutlich mehr Wasser auf, als der Mauerziegel. Da die Masse der Römertuffsteinwand während des Heizvorganges offenbar um etwa + 5 kg zugenommen hat, der Mörtel aber gemäß den Feuchtemesssensoren geringfügig trockener geworden ist, muss von einer Feuchteanreicherung durch sorptive Feuchteaufnahme in Verbindung mit einer Kondensation von dampfförmigem Wasser im Stein ausgegangen werden. Der Durchfeuchtungsgrad im Mörtel der Römertuffsteinwand beträgt D etwa 40 %. Aus den Voruntersuchungen war erkennbar, dass die Römertuffsteine Feuchtigkeit deutlich schneller abgeben, als der Mörtel. Demzufolge wäre es denkbar, dass im Zuge einer längeren Beheizung die Wände evtl. unter den raumklimatischen Bedingungen noch Feuchtigkeit abgeben. Bei niedrigen Temperaturen im Raum muss aber umgekehrt mit einer Feuchtezunahme gerechnet werden.

Bei der **Grauwackewand** war an der zur Heizung zugewandten Wandoberfläche, aber auch an der abgewandten Wandoberfläche, eine geringfügige Trocknung unten und in der mittleren Wandhöhe festzustellen. Die Trocknung war am Wandfuß auf der beheizten Seite geringfügig höher als auf der heizungsabgewandten Seite, wobei gleichzeitig eine leichte Erhöhung des Feuchtegehaltes im Kernmauerwerk festzustellen ist. Offenbar kondensiert in diesem Bereich Feuchte im Mörtel aus, was auch die im Prüfzeitraum festgestellte geringfügige Massezunahme erklären könnte.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Beheizung der Mauerwerkprüfwände ohne Wasserbeaufschlagung von unten hat im Prüfzeitraum zu keiner wesentlichen Masse- und damit Feuchteabnahme der Wände geführt. Die Wände haben bis auf die Mauerziegelwand im Prüfzeitraum geringfügig an Masse zugenommen. Die Beheizung (Energieaufwand) hat also offenbar nur zu einer geringfügigen Verlagerung der Feuchte in der Prüfwand geführt. Der Energieeinsatz hat sich im Prüfzeitraum noch nicht ausgezahlt.

3.1.2 Beheizung einer fünf Jahre alten Mauerwerkwand (mit kapillar aufsteigender Feuchte)

Die Mauerwerkprüfwände sind in spezielle Wannen gemauert worden, die definiert mit Wasser befüllt werden können.

Da die Prüfwände auch nach einer Standzeit im Raumklima von über fünf Jahren und unter Beheizung von etwa zwei Monaten (siehe dazu auch Abschnitt 3.1.1) nicht den Ausgleichsfeuchtegehalt erreicht haben, wurde beschlossen, die Wannen so definiert mit Wasser zu füllen, dass die Mauerwerkwände über den Mauerwerkfuß kapillar Wasser aufnehmen können. Es zeigte sich, ähnlich wie dies im Rahmen der Voruntersuchungen (siehe dazu auch [DOM04 und DOM05.2]) bereits festgestellt worden war, dass der kapillare Feuchttransport, abhängig von der Mauerwerkart, in den Mauerwerkwänden insgesamt, entgegen aller Annahmen, unter allseitigen raumklimatischen Bedingungen und über die Höhe im Prüfzeitraum nur sehr langsam stattfindet.

Nach einer Standzeit von etwa zwei Monaten unter Wasserbeaufschlagung (ohne Beheizung) war lediglich an der Mauerziegelwand eine leichte Durchfeuchtung bis zur ersten Fuge über der Acrylglasplatte, also bis etwa eine Steinlage über dem Wasserspiegel, visuell feststellbar. Die anderen beiden Mauerwerkwände wiesen zu diesem Zeitpunkt noch keine sichtbar feuchte Mauerwerkoberfläche auf (siehe dazu auch Abschnitt 2.2.2.1).

An allen drei Prüfwänden wurde dann nach 66 Tagen die Heizung zugeschaltet und für etwa drei Wochen mit + 30 °C (Rücklauftemperatur) betrieben. Danach wurde die Temperatur auf + 50 °C (Rücklauftemperatur) erhöht. Die Wände sind vor der Befüllung mit Wasser und vor der Beheizung gewogen worden. Der Wasserverbrauch wird laufend gemessen und der Feuchtegehalt sowie die Temperatur werden in drei unter-

schiedlichen Wandhöhen über den gesamten Wandquerschnitt mittels Feuchte- und Temperaturmessensoren im Mörtelbereich erfasst (siehe dazu auch Abschnitt 2.2.2.2 und 2.2.2.3). Darüber hinaus werden wie gehabt die Formänderungen mittels digitaler Wegaufnehmer auf der beheizten Wandseite (Längsseite) und einer Stirnseite erfasst (siehe dazu auch Abschnitt 2.2.2.4).

3.1.2.1 Mauerziegelmauerwerkwand

FEUCHTEMESSUNG

Bei den nachfolgend aufgeführten Durchfeuchtungsgraden D_Ω handelt es sich um aus den Widerstandsmessungen, abhängig von verschiedenen Feuchtegehalten, des Mörtels umgerechneten Feuchtegehalten (siehe dazu auch Bild 19).

Die **Mauerziegelprüfwand** hat in dem Prüfzeitraum seit der Wasserbeaufschlagung von etwa vier Monaten kapillar etwa 92 kg Wasser aufgenommen. Davon sind in diesem Zeitraum etwa 52 kg als Massezunahme über die Wägung festgestellt worden, so dass 40 kg Wasser demnach von der Mauerwerkwand abgegeben worden sind. Dennoch ist im Kern des Mauerwerks im Mörtel über die Höhe eine nahezu gleichmäßige Durchfeuchtung in Höhe von bis zu etwa $D_\Omega = 80\%$ feststellbar (siehe dazu auch Bild 9).

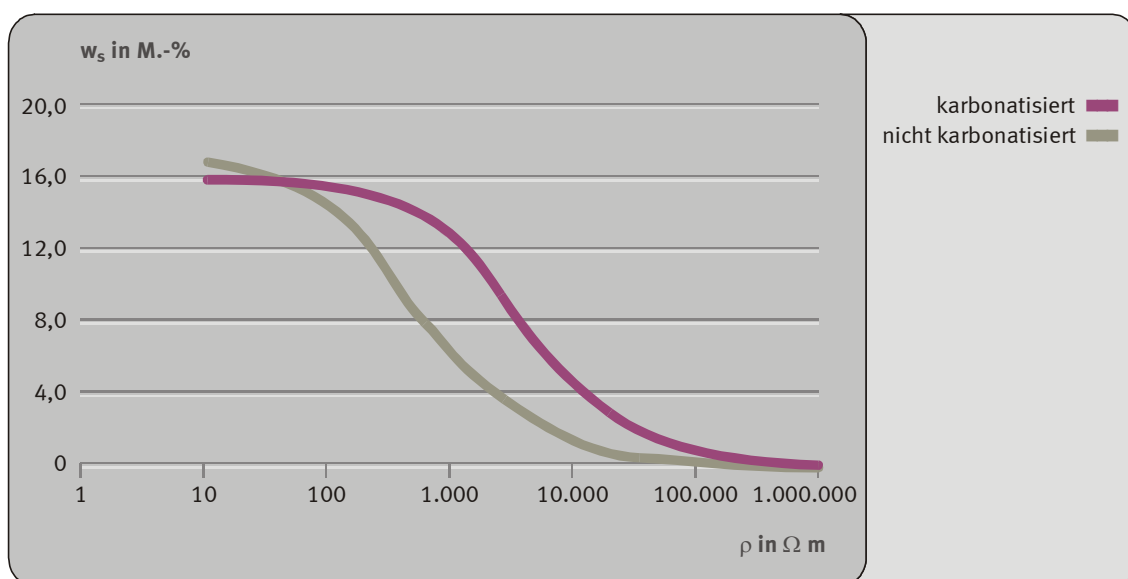


Bild 19: Kalibrierkurven für Trass-Kalk-Mörtel im Vergleich karbonatisiert/nicht karbonatisiert – Feuchtegehalt w_s in Abhängigkeit vom spezifischen Widerstand ρ (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0A).

Die Feuchtemesssensoren zeigen bis zum Beginn der kapillaren Wasseraufnahme, insbesondere in den wandoberflächennahen Bereichen, wie zu erwarten, eine stetige Feuchteabgabe. Es fällt auf, dass auch oberflächennah im Mörtel keine vollkommene Trocknung im Prüfzeitraum erzielt wird. So liegt der Durchfeuchtungsgrad am mittleren Sensor, in etwa 75 mm Tiefe, etwa bei $D_{\Omega} = 6$ bis 10 %; in 125 mm Tiefe liegt er aber noch bei $D_{\Omega} = 35$ %. In Wandmitte beträgt D_{Ω} etwa 70 bis 80 %. Damit ist die Mauerziegelwand im Mörtelbereich zur Wandmitte noch deutlich nass.

Nach Beginn der kapillaren Wasseraufnahme ist bei der Mauerziegelwand schnell eine Durchfeuchtung der ersten zwei bis drei Mauersteinlagen und z. T. extreme Ausblühungen auf den unteren Fugenmörtellagen erkennbar (siehe dazu auch Bild 2 bis 7).

Am unteren Feuchtemesssensor ist im Gegensatz zur Römertuffstein- und zur Grauwackewand eine sehr schnelle Durchfeuchtung bis zur vierten Mauerwerklage feststellbar. Der Durchfeuchtungsgrad D_{Ω} erreicht bei dem unteren Sensor bei den in Mauerwerkmitte liegenden Messstellen nahezu die Sättigung (D etwa 100 %). In etwa 75 mm Tiefe von außen wird immer noch ein Durchfeuchtungsgrad von D_{Ω} etwa 60 % erreicht. Auf Höhe des mittleren Feuchtemesssensor, wo im Fugenmörtel vor der Wasserbeaufschlagung von unten noch ein deutlich erhöhter Feuchtegehalt (Herstellfeuchte) vorhanden war, ist ein zusätzlicher leichter Feuchtegehaltsanstieg festzustellen. Am oberen Feuchtemesssensor ist nach dem Beginn der kapillaren Wasseraufnahme erwartungsgemäß kaum eine Feuchtegehaltsveränderung messbar.

Mit Beginn der Beheizung der **Mauerziegelwand** mit einer Temperatur von + 30 °C kann keine wesentliche Veränderung bei der Feuchteaufnahme festgestellt werden. Die Durchfeuchtungsgrade liegen beim unteren Feuchtemesssensor in Wandmitte weiterhin bei nahezu $D_{\Omega} = 100$ % und an den Außenwandflächen bei etwa $D_{\Omega} = 80$ %.

In mittlerer Wandhöhe nimmt der Feuchtegehalt ebenfalls bei + 30 °C Heiztemperatur weiterhin zu; zudem ist an der Wandoberfläche eine deutliche Feuchtezunahme feststellbar. Diese Zunahme ist offensichtlich auf einen Tauwasseranfall zurückzuführen.

Der oberste Feuchtemesssensor in der Mauerziegelwand zeigt einen sehr leichten Feuchteabgabebetrend (Fuge) auf, der auch bei der Beheizung mit + 50 °C weiter anhält. Eventuell ist diese Feuchteabgabe aber auch im

Zusammenhang mit den in dieser Zeit herrschenden hohen Raumtemperaturen und der in diesem Bereich der Mauerwerkwand gegebenen größeren Verdunstungsfläche (Seitenflächen, Längs- und Oberseite) zu sehen. Bei dem mittleren Feuchtemesssensor ist im Rahmen der + 50 °C Heizphase keine wesentliche Veränderung bei der Feuchteaufnahme bzw. -abgabe zu erkennen. In Wandmitte ist im Fugenbereich der Feuchtegehalt weiterhin sehr hoch. Am unteren Sensor ist die kapillare Sättigung in Wandmitte erreicht. Hier ist keine wesentliche Veränderung der Feuchtesituation in Wandmitte und an den nach außen von der Beheizung weg gerichteten Sensoren mit dem Erhöhen der Heiztemperatur auf + 50 °C erkennbar. Zur Heizung hin nimmt der Feuchtegehalt im Bereich des unteren Feuchtemesssensors bei den oberflächennahen Messstellen (etwa 75 mm und 125 mm Tiefe) leicht ab. Offensichtlich wird in diesem Mauerwerkbereich Wasser verdampft. Das verdampfte Wasser kondensiert offensichtlich z. T. in der Mauerwerkwand, insbesondere in den Mauerziegeln, und wird in die Umgebungsluft abgegeben. Die in die Umgebungsluft verdampfte Feuchtemenge muss nach Gegenüberstellung der Wasserzugabemenge und der Gewichtsänderung der Mauerwerkwand sehr groß sein, da die Wand kontinuierlich Wasser aufnimmt, aber nur gering an Masse zunimmt.

Die in den Vorversuchen festgestellte Steigerung des Feuchtedurchsatzes durch das Mauerwerk infolge der Beheizung und der Kondensation von verdampfendem Wasser wird bei dieser Mauerwerkwand bestätigt, insbesondere wenn die Feuchteabgabe nach der Herstellung der Mauerwerkwand mit der Feuchteabgabe während der kapillaren Wasseraufnahme verglichen wird. Durch eine „natürliche Trocknung“ einer nicht vollständig durchfeuchteten, nur herstellfeuchten Mauerwerkwand werden etwa 60 kg Wasser in 150 Tagen durch die gesamte Mauerwerkoberfläche abgegeben. In etwa der gleichen Zeit werden während der Beheizung etwa 40 kg Wasser verdampft.

TEMPERATURMESSUNG

Die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen verwendeten Materialien konnten im Rahmen der Untersuchungen nicht ermittelt werden. Aus verschiedenen Tabellenwerken sind Werte für die hier eingesetzten Materialien für eine überschlägige Beurteilung des Verhaltens der Mauerwerkwand unter Beheizung entnommen worden (siehe dazu auch Tabelle 1).

Der Vergleich der im Mauerwerk herrschenden Temperaturen bei gleichen umgebungsklimatischen Bedingungen, mit und ohne kapillar aufsteigender Feuchte, zeigt bei der Mauerziegelwand, dass die Temperatur in etwa 50 mm Tiefe von der beheizten Wandoberfläche aus bei der feuchten Wand etwa 5 K größer als bei der Wand mit einem niedrigeren Feuchtegehalt ist. Bei der Grauwackewand zum Beispiel ist ein solch deutlicher Temperaturunterschied bei unterschiedlichen Feuchtezuständen nicht feststellbar. Es kann angenommen werden, dass der Feuchtegehalt in den Mauerziegeln und auch im Römertuffstein vor Beginn der kapillaren Wasseraufnahme sehr gering war und die Wärmedämmwirkung der Mauersteine demzufolge deutlich höher ist, als bei z. B. einem feuchten Mauerstein, so dass größere Temperaturunterschiede mit Beginn der Wasserbeaufschlagung gemessen werden konnten. In der Grauwackewand hat der Feuchtegehalt der Grauwackesteine keinen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit, da die Grauwackesteine selbst nur sehr wenig Wasser aufnehmen können. Die Fugen waren in der Grauwackewand vor der Wasserbeaufschlagung immer noch nass, so dass mit und ohne Heizung ähnliche Feuchte- und damit Wärmeleitbedingungen herrschten.

Die größere Wärmeleitfähigkeit λ des Grauwackemauerwerkes insgesamt zeigt sich auch in der geringeren Spreizung der Temperaturmessung über den Mauerwerkquerschnitt (siehe dazu auch Bild 14 bis 16).

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit λ , Wärmeeindringkoeffizient b und Wärmekapazität c .

Material	λ	b	c
	W/(m·K)	J/(m ² Ks ^{0,5})	J/(kg K)
1	2	3	4
Mauerziegel	ca. 0,60	ca. 850 bis 1.000	ca. 1.000
Römertuffstein	ca. 0,55	ca. 300 bis 450 ^{*)}	
Grauwacke	ca. 3,50	ca. 2.200 bis 2.500	
Trass-Kalk-Mörtel (TKM)	ca. 0,80	ca. 1.000 ^{*)}	
Luft	ca. 0,02	ca. 14	
Wasser	ca. 0,64	ca. 1.630	ca. 4.200

^{*)}: Herleitung mit Hilfe der bekannten Tabellenwerke

FORMÄNDERUNGSMESSUNGEN

Die Formänderungen sind vom Verlauf her ähnlich wie bei der Römertuffsteinwand und sind unter Abschnitt 3.1.2.2 näher beschrieben.

3.1.2.2 Römertuffsteinmauerwerkwand

Nach einer Prüfdauer von etwa vier Monaten ist visuell keine Durchfeuchtung an der Römertuffsteinwand an der heizungszugewandten Seite im Bereich der Acrylglasplatte zu erkennen. Lediglich an der ersten Lage der heizungsabgewandten Seite sind sehr leichte Ausblühungen im Kontaktbereich zwischen Mauerstein und Fugenmörtel unmittelbar oberhalb der Acrylglasplatte sichtbar.

FEUCHTEMESSUNGEN

Die Römertuffsteinwand hat in einem Prüfzeitraum von nahezu fünf Jahren ohne Beheizung unter raumklimatischen Bedingungen etwa 91 kg an Masse abgenommen. Dennoch ist der Mörtel zwischen den Römertuffsteinen – wie nachfolgend beschrieben – noch feucht bis nass (siehe dazu auch Bild 10). Es wurde also auch in dieser langen Lagerungszeit unter raumklimatischen Verhältnissen, wie bereits erläutert, kein Ausgleichsfeuchtezustand erreicht.

Mit Beginn der Wasserbeaufschlagung (kapillare Wasseraufnahme) hat die Masse (der Feuchtegehalt) der Römertuffsteinwand im Prüfzeitraum von etwa vier Monaten um absolut etwa 41 kg zugenommen. Dies bedeutet bei einer über den Wandfuß aufgenommenen Wassermenge von insgesamt etwa 36 kg, das eine zusätzliche Masseaufnahme von etwa + 5 kg gegeben ist, die, unter Berücksichtigung von Messtoleranzen, zur Zeit auf eine Tauwasserbildung infolge der Beheizung im Mauerwerk zurückgeführt werden kann.

In einem Prüfzeitraum von etwa fünf Jahren haben die Feuchtegehalte im Mörtel der Römertuffsteinwand kontinuierlich abgenommen. Allerdings ist der Mörtel gemäß der mittels der Feuchtemesssensoren ermittelten Daten in einer Tiefe von etwa 75 mm von der Oberfläche nicht vollständig „trocken“. Am unteren Sensor lagen die Durchfeuchtungsgrade vor der Wasserbeaufschlagung in 75 mm Tiefe bei etwa $D_{\Omega} = 35 \%$ und in Wandmitte bei etwa $D_{\Omega} = 50 \%$. In etwa 125 mm Tiefe betrug der Durchfeuchtungsgrad im Mörtel am oberen Sensor zu dieser Zeit etwa $D_{\Omega} = 20 \%$ und im Kern des Mauerwerkes etwa

$D_{\Omega} = 35 \%$. Damit weist die Römertuffsteinwand gemäß der Feuchte-messensoren gegenüber der Mauerziegelwand einen geringeren Feuchtegehalt zum Beginn der kapillaren Wasseraufnahme auf.

Mit Beginn der kapillaren Wasseraufnahme veränderte sich der gemessene Feuchtegehalt im Mörtel der Römertuffsteinwand nur geringfügig. Da aber die Prüfwand – wie die Wägungen ergeben haben – Feuchtigkeit aufgenommen hat, ist von einer verstärkten Feuchteaufnahme von den Römertuffsteinen auszugehen. In Höhe des oberen Sensors ist im Prüfzeitraum allerdings noch keine wesentliche Beeinflussung der Mörtelmesswerte festzustellen.

Parallel zu den großen Prüfwänden sind auch kleinere, sogenannte 5-Stein-Prüfkörper, die aus Steinen und Lagerfugen, nicht aber Stoßfugen bestehen, hergestellt worden (siehe Bild 19). An diesen 5-Stein-Prüfkörpern sind ebenfalls Untersuchungen zur kapillaren Wasseraufnahme durchgeführt worden. An den 5-Stein-Prüfkörpern war zwar eine kapillare Feuchteaufnahme feststellbar, diese endete aber bei einer Prüfdauer von etwa 150 Tagen, bei den Mauerziegel- und Römertuffsteinprüfkörpern augenscheinlich in der 3. Mauersteinlage und bei dem Grauwackeprüfkörper in der ersten Lagerfuge.

Anmerkung: Gemäß dem Bericht [FIT99] weist die verwendete Grauwacke einen Porenanteil von 2,2 Vol.-% auf und hat neben tonigen Einschlüssen auch einen sehr geringen Anteil an Kapillarporen, so dass bei einem Einbau entgegen dem Lager eine kapillare Feuchteaufnahme bis zur ersten Lagerfuge denkbar wäre; der Stein ist dann allerdings offensichtlich nicht in der Lage, der Mörtelfuge Wasser zu entziehen, so dass die kapillare Wasseraufnahme beim 5-Stein-Prüfkörper zum Stillstand kommt; genauere Aussagen sind erst nach weiterführenden Untersuchungen möglich.

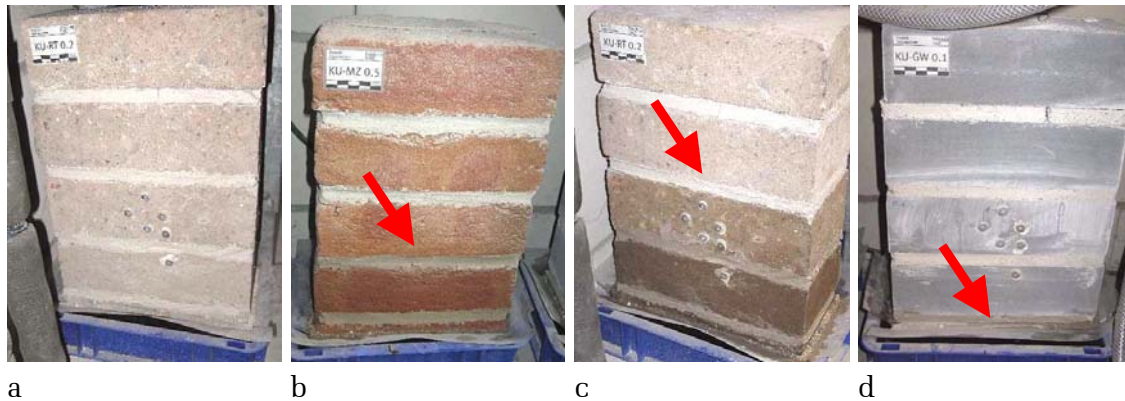


Bild 20: Kapillare Wasseraufnahme bei 5-Stein-Prüfkörpern: 5-Stein-Prüfkörper ohne Wasserbeaufschlagung am Beispiel der Römertuffsteine (a); 5-Stein-Prüfkörper aus Mauerziegel (3. Mauerstein wird durchfeuchtet) (b), aus Römertuffstein (3. Lagerfuge wird durchfeuchtet) (c), und Grauwacke (nach 1. Lagerfuge ist offensichtlich kein weiterer „Feuchteaufstieg“ mehr möglich) (d) nach 9 Tagen der Wasserbeaufschlagung von unten.

Werden diese Untersuchungsergebnisse für die Mauerwerkswände aus Römertuffstein- und auch Mauerziegel herangezogen, so muss unter den gegebenen Prüfbedingungen davon ausgegangen werden, dass ein wesentlicher kapillarer Feuchtetransport, zumindest im Anfangsstadium, über mehrere Wochen durch die Fugen stattfindet. Die Mauersteine beginnen erst nach einer bestimmten kapillaren Sättigung des Fugenmörtels nicht nur durch Diffusion, sondern auch durch Kapillarkräfte und Tauwasserbildung Wasser aufzunehmen. Die Kapillarkraft des Steines muss dann größer sein als die Kapillarkraft im Mörtel. Die Ergebnisse, die dazu vorliegen, sind im Prüfbericht F 1006/F-0A [DOM04] beschrieben worden. Trotz eines festgestellten Durchfeuchtungsgrades beim Mörtel von nahezu $D_{\Omega} = 100 \%$ waren die benachbarten Mauersteine (Mauerziegel, Römertuffstein) wesentlich „trockener“. Offenbar können die Steine (Mauerziegel, Römertuff) erst bei einem Durchfeuchtungsgrad im Mörtel von über 70 % Wasser kapillar aufnehmen.

Dieser Feuchtegehalt ist im Messbereich der Feuchtemesssensoren im Prüfzeitraum in der Römertuffsteinwand nicht erreicht worden.

TEMPERATURMESSUNG

Die Beheizung der Römertuffsteinwand bei + 30 °C und später bei + 50 °C führt im oberflächennahen Bereich (unterer Sensor) zu einer Feuchteabgabe im Mörtel an der heizungszugewandten Seite und zu einer sehr geringfügigen Feuchteerhöhung an der heizungsabgewandten Seite. Eine genaue Aussage darüber, ob dieser Effekt auf die Beheizung zurückgeführt werden kann, ist derzeit noch nicht möglich.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass das Beheizen die kapillare Feuchteaufnahme im Prüfzeitraum nicht, wie von einigen Befürwortern angegeben, reduzieren kann, sondern offenbar sogar zu einer Beschleunigung der Wasseraufnahme führt, da die Verdunstung von Wasser zu einem kapillaren Nachsaugen führt und zusätzlich zu einer Tauwasserbildung im kälteren und feuchten Kernbereich der Mauerwerkwand (siehe dazu auch Voruntersuchungen in Bericht F 1006/F-0A).

Bezüglich der erreichten Temperaturen an der Römertuffsteinprüfwand ist zu sagen, dass die Römertuffsteinwand sich im Vergleich zur Mauerziegel- und Grauwackewand an der heizungszugewandten Seite, insbesondere am unteren Sensor, stärker erwärmt und einen großen Temperaturgradienten über den Mauerquerschnitt aufweist (siehe dazu auch Bild 15), was u. a. auf die höhere Wärmedämmfähigkeit des Römertuffsteines im Vergleich zu Mauerziegel und Grauwacke und des geringen Wärmeeindringkoeffizienten (siehe dazu auch Tabelle 1) zurückgeführt werden kann.

FORMÄNDERUNGSMESSUNGEN

Die Formänderungen an der horizontalen Messstelle 1 unten an der Längsseite der Römertuffsteinwand (MS 3 – l/u/h) entsprechen nahezu den Formänderungen an der Mauerziegel- und der Grauwackewand in diesem Bereich. Es werden Formänderungen von etwa 1 mm/m, sowohl an der Längsseite, aber auch an der Stirnseite (MS 3 – st/u/h) gemessen.

Die Formänderung muss im Wesentlichen auf die Feuchteaufnahme zurückgeführt werden. Die Temperatur der Heizung hat offensichtlich an den Prüfwänden direkt nur einen geringen Einfluss auf die Formänderung im Mauerwerk. Auffällig an der Römertuffsteinwand ist gegenüber den anderen untersuchten Mauerwerkswänden (Mauerziegel und Grauwacke), dass die übrigen Messwerte der digitalen Wegaufnehmer zwar mit Beginn der kapillaren Wasseraufnahme, sowohl an der Längs- wie auch an der Stirnseite sehr kleine Dehnung zeigen (insbesondere **Längs:** MS 2 – l/m/h, MS 5 – l/u/v und **Stirn:** MS 2 – st/m/h, MS 5 – st/u/v), dann aber im Zuge der Beheizungsphase eine deutliche Verkürzung aufweisen, was so bei der Mauerziegel und der Grauwackewand nicht feststellbar ist (siehe dazu auch Bild 18).

Die oberen Messstellen MS 1 (horizontal) und 4 (vertikal) an der Stirn- und Längsseite weisen anfänglich während der kapillaren Wasseraufnahme ein nahezu neutrales Verhalten auf, während sie im Zuge der Beheizungsphase ebenfalls eine sehr kleine Verkürzung zeigen. Diese Formänderungen gehen mit einer leichten zunehmenden Trocknung der oberflächennahen Wandbereiche einher; sie stehen aber offensichtlich nicht im direkten Zusammenhang mit der Beheizung.

Anmerkung: Die Formänderungen der Messstellen MS 3 (horizontal, unten) an der Stirn- und Längsseite der Römertuffstein- und Mauerziegelwand sind im Gegensatz zur Grauwackewand nahezu identisch. Dies könnte ein Hinweis auf nahezu gleiche Formänderungen infolge Feuchtezunahme von Mörtel und Stein sein.

Das Formänderungsverhalten der Fugenmörtel zwischen den Mauerziegeln und dem Römertuffstein muss allerdings etwas unterschiedlich beurteilt werden, als das vom Fugenmörtel zwischen den Grauwackesteinen. Dies kann u. a. auf die unterschiedlichen Eigenschaften ein und desselben Mörtels im Verbund zu unterschiedlichen Steinen erklärt werden (siehe Tabelle 2). Die Porosität des Mörtels TKM ist in Verbund zum Römertuffstein und zum Mauerziegel, ebenso wie die kapillare Wasseraufnahme, deutlich geringer, als im Verbund zur Grauwacke. Dies führt mit zu einer langsameren und geringeren Wasseraufnahme. Der Mörtel im Verbund zum Mauerziegel und Römertuffstein ist zudem deutlich fester und hat ein anderes Feuchtedehnverhalten (siehe Tabelle 2).

3.1.2.3 Grauwackemauerwerkwand

FEUCHTEGEHALTSMESSUNGEN

Die Masse (der Feuchtegehalt) der Grauwackewand hat im Prüfzeitraum von etwa vier Monaten um etwa 37 kg (bzw. Liter) zugenommen. Verdunstet ist in dieser Zeit trotz Heizung, abhängig von den Messtoleranzen, maximal etwa 1 kg. Wird jetzt berücksichtigt, dass die Prüfwand über einen Zeitraum von etwa fünf Jahren nur etwa 40 kg Wasser der

Herstellfeuchte abgegeben hat, wird deutlich, welche Mengen an Wasser in der Wand jetzt vorhanden sind.

Der Fugenteil in der Wand beträgt bei 0,5 m³ Mauerwerk etwa 140 l Mörtel (entspricht etwa 140 l x 1,55 kg/dm³ = 217 kg ≈ **220 kg**). Der wasserzugängliche Porenraum beträgt dabei etwa 20 M.-%. (entspricht etwa 220 kg x 0,20 = 44 kg; 44 kg x 1,55 kg/dm³ ≈ **68 dm³** ≈ **68 l** aufnehmbares Wasser; siehe Tabelle 2). Damit sind etwa 55 % des kapillar zugänglichen Mörtelporenraums bei der aufgenommenen Wassermenge ausgefüllt. Die Grauwackesteine nehmen kein Wasser mehr auf, da ihr Porenraum (etwa 2 bis 3 Vol.-%), wie mittels der Formänderungsmessungen mit Beginn der Herstellung der Mauerwerkwand festgestellt (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0A), immer noch mit Wasser (Herstellfeuchte) gefüllt ist.

Tabelle 2: Ausgewählte Materialkennwerte.

	ρ	μ	W _a		ω	P _{ges}	λ
	kg/m ³	–	M.-%	Vol.-%	kg/(m ² h ^{0,5})	Vol.-%	W/(m K)
TKM (ohne Verbund)	1,72	16,0	15,9	27,0	3,0	29,8	0,80
TKM im Verbund zu MZ	1,65	–	14,7	24,3	1,5	–	–
TKM im Verbund zu RT	1,67	–	15,6	25,6	1,3	–	–
TKM im Verbund zu GW	1,55	–	20,0	31,0	2,9	–	–
TKM angemacht mit Kochsalz (ohne Verbund)	1,66	–	15,7	27,0	0,3	–	–
Mauerziegel (MZ)	–	20,0	17,5	29,2	5,0	32,2	0,60
Römertuffstein (RT)	–	8,0	35,2	40,0	21,0	23,0	0,55
Grauwacke (GW)	–	>200,0	0,7	1,9	<0,5	2,3	3,50

Das Kernmauerwerk der Grauwackewand ist gemäß den mittels Feuchtemesssensoren festgestellten Werte über die gesamte Wandhöhe im Mörtelbereich (noch) deutlich durchfeuchtet (D beträgt etwa 60 bis 70 %). Richtung Wandoberfläche sind die Fugen zwar trockener (D etwa 40 %), aber immer noch feucht.

Mit Beginn der kapillaren Wasseraufnahme durch den Wandfuß wird am unteren Messsensor eine deutliche Durchfeuchtung des Mörtels in Richtung Wandoberfläche festgestellt. Am oberen Feuchtemesssensor ist an der Wandoberfläche keine wesentliche Feuchtegehaltsveränderung feststellbar, wohl aber am Sensor in der mittleren Wandhöhe, hier wird der Wandkern mit Beginn der kapillaren Wasseraufnahme feuchter.

Das zur kapillaren Wasseraufnahme zugegebene Wasser (etwa 37 kg bzw. Liter) wird von der Grauwackewand so aufgenommen, dass ein Feuchtehorizont visuell an der untersten Lager- und Stoßfuge über der Acrylglasplatte sichtbar wird (siehe dazu auch Bild 3.e).

TEMPERATURMESSUNGEN

Die Beheizung der Grauwackewand bei einer Temperatur von + 30 °C bewirkt bei dem unteren Sensor offensichtlich, dass oberflächennah keine weitere Feuchtezunahme im Mörtel zu messen ist und sogar eine geringfügige Tendenz einer oberflächennahen Feuchtereduktion im Fugenbereich festzustellen ist. Alle anderen Sensoren zeigen keinen eindeutigen Einfluss der Heizung auf das Mauerwerk.

Im Zuge der nahezu zweimonatigen einseitigen Beheizung der Wand mit einer Temperatur von + 50 °C ist an dem unteren Sensor (unmittelbar über der Heizung) eine deutliche oberflächennahe Trocknung, insbesondere auf der Seite der Heizung festzustellen. Da diese Trocknung aber auch auf der heizungsabgewandten Seite feststellbar ist, muss diese Trocknung auch im Zusammenhang mit dem wärmer gewordenen Raumklima gesehen werden. An den oberen und mittleren Sensoren ist keine wesentliche Veränderung der Messwerte feststellbar, was auf eine Nichteinwirkung der Heizung bezüglich des Feuchtetransportes in diesem Mauerwerksbereich hinweist, obwohl durch die einseitige Beheizung der Mauerwerkswand eine deutliche Zunahme der Mauerwerktemperatur über die Höhe und den Mauerwerkquerschnitt, wie bei den anderen Mauerwerkswänden auch, erfolgt.

FORMÄNDERUNGSMESSUNGEN

Die Messung über die digitalen Wegaufnehmer findet an allen Messstellen nah an der Mauerwerkoberfläche statt. Mauerwerkformänderungen werden bis zu etwa 50 mm Tiefe ab der Oberfläche erfasst.

Die kapillare Wasseraufnahme führt bei allen Mauerwerkswänden zu Formänderungen an den Messtastern (siehe dazu auch die Abschnitte 3.1.2.1 und 3.1.2.3). Eine sehr deutliche Formänderung findet an den Wänden im Bereich der horizontal an der Längs- und Stirnseite im unteren Bereich angeordneten Messtaster (MS 3 – l/u/h bzw. MS3 – st/u/h) statt. Diese Messstellen erfassen die erste Steinlage von unten (etwa 2 Steinlagen unter der Heizung). Die Messung dieser ersten horizontalen

Messstrecken sind somit direkt abhängig von der kapillaren Wasseraufnahme.

Insbesondere bei der Grauwackewand haben fast ausschließlich die Fugen einen Einfluss auf die gemessenen Formänderungen, da die Grauwackesteine selber, wie die Vorversuche gezeigt haben, keine wesentlichen Formänderungen mehr erfahren, da sie bereits durch die Tauwasseraufnahme und die Herstellfeuchte vor Versuchsbeginn gequollen waren.

An der Grauwackewand ist kein direkter Zusammenhang zwischen der Messstelle 3 an der Längs- und der Stirnseite und der Heizung feststellbar. Durch die zunehmende Wassersättigung ist an der Messstelle 3 (MS 3 – l/u/h) ein feuchtebedingtes Quellen von immerhin bis zu etwa 1,40 mm/m festzustellen. An der Stirnseite (MS 3 – st/u/h) beträgt dieser feuchtebedingte Quellvorgang im Gegensatz dazu nur etwa 0,3 mm/m. Dieser Wert ist deutlich geringer als bei allen anderen Mauerwerkswänden (vergleiche dazu auch Bild 18). Dies verdeutlicht, dass an der Grauwackewand die Formänderungen im Wesentlichen von den Mörtelfugen abhängig sind. Während an der Längsseite sieben Stoßfugen pro Meter (Dicke aller Mörtelfugen zusammen beträgt etwa 70 mm) vorhanden sind, sind es an der Stirnseite im Verhältnis dazu nur zwei Stoßfugen pro Meter (Dicke aller Mörtelfugen zusammen beträgt etwa 20 mm), also nur etwa 29 % des Fugenteils der Längsseite. Wird das auf die gemessene Gesamtformänderung an der Längsseite der Wand von $1,4 \text{ mm/m} \times 0,29 = 0,4 \text{ mm/m}$ bezogen, so wird deutlich, dass die Fugen im Grauwackemauerwerk eine entscheidende Bedeutung für die feuchtebedingten Formänderungen haben. Für eine zu verputzende, nasse Fassade führt dies im Umkehrschluss zu einer extremen Formänderung, z. B. im Zuge einer Feuchtereduktion, im Fugenbereich und damit zu den oft sichtbaren Putzrissen im Fugenbereich.

Die horizontalen Messstellen, die unmittelbar unter der Heizung liegen (MS 2 – l/m/h), liegen ebenfalls im Bereich der Feuchtezone der Grauwackewand, die durch die Wasserbeaufschlagung in der Wand gegeben ist, und im Bereich einer Binderlage (Mauerwerkaufbau, siehe dazu Bericht F 1006/F-0A). Die gemessenen Formänderungen (Quellen) betragen an der Längsseite (MS 2 – l/m/h) etwa 0,2 mm/m und an der Stirnseite (MS 2 – st/m/h) etwa 0,25 mm/m. An diesen Messstellen ist bisher nur eine sehr geringe zusätzliche Formänderung bei einer Heiztemperatur von + 50 °C feststellbar. Zur Zeit der Beheizung herrschte eine Raumtemperatur von etwa + 20 °C. Die Heizung bewirkt bis 50 mm

Tiefe und einer Temperatur von + 50 °C nur eine Aufheizung von + 30 °C in 50 mm Tiefe. Das hat offensichtlich noch keinen nennenswerten Einfluss auf die Temperaturdehnung des Mauerwerkes, zumal die Verdampfung von Wasser und damit die Abkühlung einer zusätzlichen temperaturbedingten Formänderung entgegen stehen. Es kann damit aber nicht ausgeschlossen werden, dass im Zuge einer Abkühlung des Umgebungsklimas große temperaturbedingte Spannungen entstehen können.

Insgesamt hat der Feuchtegehalt in der Wand um 37 kg so zugenommen, dass die Wand zumindest im unteren Steinlagenbereich durchfeuchtet ist. Die Beheizung der Wand hat hier offenbar zwar zu einer sehr geringfügigen Verdunstung des Wassers an der Mörteloberfläche geführt, in der Wand selber ist aber offenbar – wie schon bei den Vorversuchen festgestellt – eine Kondensation des Wasserdampfes eingetreten.

3.2 Chemische Tastuntersuchungen

An der Mauerziegel- und Grauwackewand sind im Prüfzeitraum extreme Ausblühungen über den ersten Fugen über der Acrylglasplatte aufgetreten. An der Römertuffsteinwand sind nach etwa 150 Tagen des Kapillartransportes nur punktuell einzelne, sehr leichte Ausblühungen entstanden (siehe dazu auch Bild 2 bis 7).

Da bis heute die Meinung vertreten wird, dass trasshaltige Mörtel kaum ausblühen und somit z. B. für die Verfüllung von Mauerwerk und für die Errichtung von Vorsatzschalen verwendet werden sollen, wurden chemische Analysen zur Art der Ausblühungen durchgeführt.

Die in Tabelle 3 dargestellten Werte wurden von den reinen Ausblühungen (ohne Mörtel und Mauerstein), die von der Mauerwerkoberfläche der Mauerziegel- und Grauwackewand (von der Römertuffsteinwand konnte keine ausreichende Menge an „Ausblühungen“ entnommen werden) entnommen worden sind, festgestellt.

Tabelle 3: Chemische Analyse von Ausblühungen auf der Mauerziegel- und Grauwackeprüfwand (Analysen sind vom Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) durchgeführt worden).

Anionen	Mauerziegel (MZ)		Grauwacke (GW)	
	Gehalt in		Gehalt in	
	mg/kg	M.-%	mg/kg	M.-%
1	2	3	4	5
Natrium	103.160	10,32	214.777	21,48
Kalium	2.906	0,29	1.211	0,12
Chlorid	n. b.	–	1.966	0,20
Nitrat	n. b.	–	2.930	0,29
Sulfat	119.858	11,98	12.397	1,24

n. b.: nicht bestimmbar, da unter Nachweisgrenze

Die Ausblühungen stellen eine Aufkonzentration bestimmter im Mauerwerk vorhandener Salze dar, die so im Trockenzustand nicht sichtbar werden. In Abhängigkeit von der Porosität des Mörtels werden mehr oder weniger Salze aus der Mörtelmatrix herausgelöst und reichern sich an der Bauteiloberfläche an, wo sie auskristallisieren und sichtbar werden. Es muss also auch im Bereich der Heizung von einer solchen Aufkonzentration, wie auch bei den Voruntersuchungen festgestellt, ausgegangen werden.

An der Mauerziegelwand wurden sehr hohe Natrium- und Sulfatgehalte in den entnommenen Ausblühungen festgestellt, während Chloride und Nitrate unter den gewählten Untersuchungsbedingungen nicht nachgewiesen werden konnten (siehe dazu auch Tabelle 4).

An der Grauwackewand wurden extrem hohe Natrium-, erhöhte Sulfat- und leicht bis mittel erhöhte Kalium-, Chlorid- und Nitratgehalte festgestellt. Der Gehalt an Kalium-, Chlorid- und Nitratsalzen ist gering, da nur die reine Ausblühung untersucht wurde und kann daher als unschädlich eingestuft werden.

Die Aufkonzentration an der Wandoberfläche macht aber deutlich, welches Potential z. B. ein Sanierputzsystem im Rahmen eines feuchten Mauerwerkes, insbesondere bei einer zusätzlichen Beheizung belastet. Die Beanspruchung eines Sanierputzsystems wird durch die Beheizung deutlich erhöht.

In vielen historischen Mauerwerken sind, insbesondere oft im Sockelbereich, aber auch im Mauerwerkern erhöhte baustoffschädliche Salze vorhanden. Dies ist auch z. B. an der historischen Kirche St. Ursula in Köln der Fall, wo das „Temperiersystem“ inzwischen eingebaut worden ist.

Tabelle 4: Chemische Analyse von baustoffschädlichen Salzen, die in den verwendeten Mauerziegeln und dem TKM-Mörtel enthalten sind (Analysen sind vom Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) durchgeführt worden).

Anionen	Mauerziegel		TKM-Mörtel	
	Gehalt in		Gehalt in	
	g/kg	M.-%	g/kg	M.-%
1	2	3	4	5
Chlorid	0,17	0,017	0,25	0,025
Nitrat	0,08	0,008	0,14	0,014
Sulfat	0,44	0,044	0,90	0,090

Die baustoffschädlichen Salze sollten möglichst in Ruhe gehalten bzw. es sollte ein Stoffsystem zur Beanspruchungsreduktion an der Mauerwerkoberfläche aufgebracht werden, das diese Stoffe lange Zeit für die historische Substanz unschädlich einlagern kann. Wird berücksichtigt, dass ein so geringer Salzgehalt, wie er z. B. in dem bei den Untersuchungen verwendeten TKM-Mörtel vorhanden ist (siehe dazu auch Tabelle 4), zu einer solchen extremen Aufkonzentration von baustoffschädlichen Salzen führen kann, nimmt diese Aufkonzentration bei einem größeren Gehalt an baustoffschädlichen Salzen in einem Baustoff um ein Vielfaches zu. Die Beheizung der Wand fördert bei den gegebenen Prüfbedingungen den Salztransport und damit die Beanspruchung durch die Salze zusätzlich.

3.3 Zusammenfassung (siehe auch [DOM03.1/DOM06/DOM09/])

Die Untersuchungen an den Mauerwerkprüfwänden aus Mauerziegel, Römertuffstein und Grauwacke, die bis zu diesem Zeitpunkt durchgeführt worden sind, veranschaulichen deutlich, dass die Rechenmodelle zur Erklärung von feuchtebedingten Prozessen in einem Verbundsystem, wie es das Mauerwerk mit seinen unterschiedlichen Steinen und Mörteln aber auch seiner unterschiedlichen Herstell- und Form-

arten darstellt, nur als sehr stark vereinfachte Hilfsmittel genutzt werden und nicht als allumfassende Erklärung für bestimmte Vorgänge herangezogen werden können. Die Berechnung von Mauerwerk als homogenen Stoff kann demnach zu gravierenden Falschbeurteilungen führen.

Alle untersuchten Mauerwerkswände weisen auch nach einer Versuchsdauer von fünf Jahren Lagerung im Raumklima, insbesondere im Mörtelbereich keinen Ausgleichsfeuchtegehalt auf.

Die Anordnung eines Heizsystems als eine Art „Sockelleistenheizung“ begünstigte die „Trocknung“ dieser Wände in einem Prüfzeitraum von etwa 150 Tagen nicht. Die Temperatur betrug bei einer Beheizung von + 50 °C in etwa 50 mm Tiefe nur noch etwa + 30 °C. Daher war auch keine größere temperaturbedingte Formänderung messbar. Dies könnte sich ändern, wenn die Umgebungstemperatur oder die Temperaturen am Wandfuß absinken.

Die kapillare Wasseraufnahme der Prüfwände nimmt, solange die Heizung nicht in Betrieb ist – wie auch bei den Voruntersuchungen festgestellt – bei raumklimatischen Bedingungen einen sehr langen Zeitraum in Anspruch; die Wände müssen für weitere Untersuchungen wesentlich länger in Wasser stehen. Die Verbundsysteme Mörtel-Stein-Mörtel können sogar den kapillaren Feuchtetransport unter den gegebenen Prüfbedingungen hemmen bzw. stoppen, wenn sie horizontal ausgerichtet sind.

Die Feuchtesituation in den Wänden verändert sich, sobald unterschiedliche Klimasituationen an der Wand entstehen. Entsteht z. B. Tauwasser in der Wand, z. B. durch eine einseitige Abkühlung oder einseitige Beheizung, so führt dieses Tauwasser zu einer weiteren Feuchteanreicherung in dem Verbundsystem Mauerwerk und begünstigt damit den weiteren kapillaren Feuchtetransport.

Wird eine solche Wand beheizt, so werden folgende Prozesse „begünstigt“:

- Wie vor beschrieben entsteht Tauwasser, das, wie die Untersuchungen zeigen, nur sehr langsam aus dem Mauerwerk entweichen kann. Ein Jahreszyklus reicht dazu z. B. nicht aus. Mit erhöhtem Feuchtegehalt sinkt die Wärmedämmwirkung und damit wird die Tauwasserbildung wiederum begünstigt und Energie geht verloren. Die Kapillaraktivität nimmt zu und das Mauerwerk wird stärker durchfeuchtet.

- Das Erwärmen von Wasser führt zum Verdunsten bzw. Verdampfen von Wasser und zu einem erhöhten Energieverbrauch.

Anmerkung:

Um einen Liter Wasser in einem Kochtopf zu verdampfen, wird eine Energie von 2.450 Joule/g benötigt ($2.450 \text{ J/g} \cong 2450 \text{ hWs}$). Um diesen Heizwert aufzubringen werden etwa 0,20 kg trockenes Holz benötigt. Das im Mauerwerk verdunstete bzw. verdampfte Wasser kondensiert im kühleren Bereich und führt dort wiederum zu einer deutlichen Feuchteanreicherung.

Bei einer Heiztemperatur von + 30 °C und einer relativen Luftfeuchte Φ_L (r. F.) von 70 % fällt Tauwasser nach überschlägiger Berechnung [FIS08] bei einer Temperatur von etwa + 12,5 °C aus.

Bei einer Heiztemperatur von + 50 °C und einer relativen Luftfeuchte Φ_L (r. F.) von 70 % fällt Tauwasser nach überschlägiger Berechnung [FIS08] bei etwa + 43 °C aus. Dies zeigt, dass Tauwasser infolge einer Beheizung in den Mauerwerkswänden anfallen muss.

In den Mauern selbst sind deutlich höhere Feuchtegehalte vorhanden, sodass Tauwasser wesentlich früher anfällt. Das Erwärmen von Wasser führt zu einem erhöhten Energieverbrauch. Da kühles Wasser kapillar ständig nachtransportiert wird, wird ständig Energie verbraucht, um das Wasser zu verdunsten bzw. zu verdampfen.

Die Heizung liegt im Bereich der Wand, wo die Wärmeleitfähigkeit durch den Feuchtegehalt ständig gesenkt ist. Hat eine mit Luft gefüllte Pore eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,02 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, so hat Wasser eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,64 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, also dem 32-fachen. Es geht im Verhältnis zu einer trockenen Wand mehr Energie verloren.

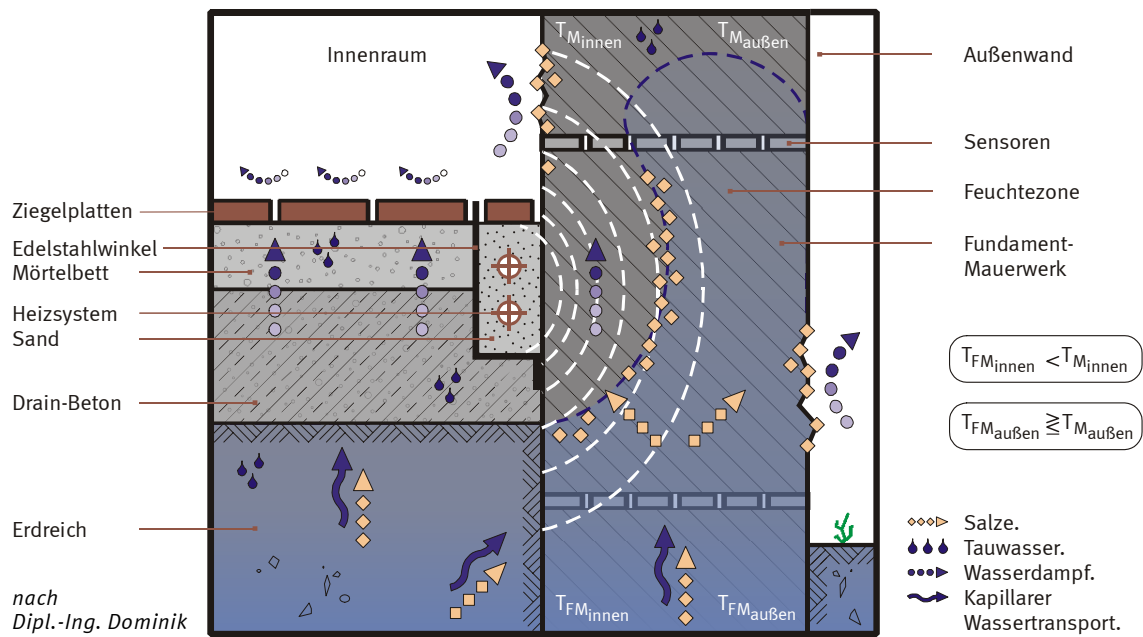


Bild 21: Erwartete Funktion und Wirkung eines „Temperiersystems“ an einer Mauerwerkwand (Systemskizze).

Das im Bild 20 dargestellte Wirkprinzip einer solchen Heizung, das aufgrund von vor dem Forschungsprojekt gemachten Überlegungen erstellt worden ist, muss nach den bis jetzt vorliegenden Untersuchungsergebnissen dahingehend verändert werden, dass bei einer beheizten Wand, die kapillar Wasser aufnimmt, nur eine oberflächennahe dünne Zone im Bereich der Heizungsrohre trocknet und sich in dieser Zone verstärkt Salze anlagern (vergleiche dazu auch Bericht F 1006/F-0C).

4 ÜBERBLICK ÜBER DIE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Nachfolgend werden alle wesentlichen Untersuchungsergebnisse des Forschungsprojektes, die im Prüfzeitraum festgestellt worden sind, kurz dargestellt und beurteilt (siehe dazu auch die Berichte F 1006/F-0A bis F-0E):

4.1 Kleinprüfmauerwerkwand aus Römertuffstein

Die Vorprüfung an einer etwa 44 cm (Länge) x 20 cm (Dicke) x 58 cm (Höhe) Kleinprüfmauerwerkwand aus Römertuffstein mit einseitiger Beheizung ergibt:

- bei einer zweiseitigen Verdunstungsmöglichkeit der kapillar saugenden Mauerwerkprüfwand wird bei einer Beheizungstemperatur von + 30 °C bis zum **7-fachen** der Verdunstungsmenge und damit ggf. auch der Salzanreicherung gegenüber der Normaltemperatur (etwa + 20 °C) festgestellt; die Wand wird sehr schnell nass,
- bei einer einseitigen Verdunstungsmöglichkeit wird die verdunstete Wassermenge bei einer einseitigen Beheizung der Mauerwerkwand im unteren Bereich von + 30 °C gegenüber der zweiseitigen Verdunstung nahezu **verdoppelt** und bei einer Beheizungstemperatur von + 50 °C nahezu **vervierfacht**; es fallen extreme Mengen an Tauwasser an der heizungsabgewandten Mauerwerkseite aus,
- die Wand wird durch die Beheizung im Prüfzeitraum zunehmend durchfeuchtet (Tauwasserbildung).

4.2 Mauerwerkprüfwände aus Mauerziegel, Römertuffstein und Grauwacke

Die Hauptuntersuchung an etwa 99 cm (Länge) x 49 cm (Dicke) x 100 cm (Höhe) Mauerwerkprüfwänden aus Mauerziegel, Römertuffstein und Grauwacke mit einseitiger Beheizung ergibt:

- die Zeit bis zum Erreichen des Ausgleichsfeuchtegehalts nach der Herstellung der Mauerwerkprüfwände dauert unter raumklimatischen Verhältnissen **länger als fünf Jahre**; der Mörtel weist auch nach fünf Jahren Standzeit unter raumklimatischen Bedingungen noch einen hohen Feuchtegehalt im Mauerwerkern, insbesondere im Mörtel, auf,

- die Feuchteabgabe verläuft entgegen vielen Aussagen in Veröffentlichungen teilweise vollkommen ungleichmäßig im Mauerstein und im Mörtel ab,
- die Fugen in den drei Mauerwerkswänden bleiben länger als fünf Jahre feucht bis nass,
- die Mauerwerkswände erfahren in dieser Zeit deutliche Formänderungen, die z. B. Rissbildungen im Putz zur Folge hätten,
- die ungleiche Feuchteabgabe der Mörtel in Verhältnis zu den Mauersteinen führt zu ungleichmäßigen Formänderungen und damit zu entsprechenden Rissbildungen z. B. in einem Putz,
- die Heizung bewirkt im Prüfzeitraum in den beheizten Mauerwerkprüfwänden (ohne kapillare Wasseraufnahme) keine Beschleunigung der Feuchteabgabe, allenfalls eine Verlagerung der Feuchtezonen,
- der Feuchtegehalt konnte durch die Beheizung in den Wänden nicht gesenkt werden,
- die kapillare Wasseraufnahme führt in den oberflächennahen Bereichen zu deutlichen Formänderungen, die rissverursachend sein können,
- die Beheizung der feuchten Mauerwerkswand führt bisher zu keinen temperaturbedingten, größeren Formänderungen; eine lufttrockene Wand müsste diesbezüglich noch untersucht werden,
- nach kurzer Zeit wurden im Bereich der durchfeuchteten Mörtelfugen Ausblühungen verstärkt im Kontaktbereich Mauerstein-Mörtelfuge deutlich; hier ist offenbar ein kapillargängiger Riss vorhanden; an der oberen Fugeflanke ist die Ausblühung früher vorhanden, als an der unteren Flanke; ähnliche Ergebnisse wurden bei Haftzugprüfungen von Steinen an Fugenmörtel festgestellt; der Verbund an der oberen Kontaktzone versagt meist eher als an der unteren Kontaktzone,
- der Feuchtetransport wird, entgegen der Angabe, gesteigert und nicht gestoppt bzw. reduziert,
- der Salztransport und die Anreicherung der Salze an der Mauerwerkoberfläche (Untersuchungen im Mauerwerkern sind dazu noch nicht durchgeführt worden) und damit die Beanspruchung

des Mauerwerkes durch baustoffschädliche Salze werden gesteigert,

- es ist mit Tauwasserbildung (Feuchteanreicherung) in Wandbereichen zu rechnen, die vor der Beheizung einen niedrigen Feuchtegehalt aufweisen,
- die Verdunstung von Wasser im heizungsnahen Bereich geht mit einem großen Energiebedarf einher; diese Energie geht für die Raumbeheizung verloren,
- der Energieeinsatz führt u. a. durch das verdunstete Wasser und die Tauwasserbildung in anderen Bereichen des Mauerwerkes zu einer größeren Beanspruchung und zu einer Ausbreitung der beanspruchten Zonen; durch die Beheizung einer feuchten Wand kann die Luftfeuchte in einem Raum sehr stark gesteigert werden; es muss mit entsprechenden Folgen gerechnet werden,
- die Temperaturverteilung bildet sich im Mörtelbereich des Sensors (Wandquerschnitt) nicht linear aus, sondern die Temperatur sinkt von der Heizung innerhalb von etwa 50 mm sehr stark ab (z. B. von + 50 °C auf + 30 °C), danach sinkt sie langsam, ebenfalls nicht linear, zur heizungsabgewandten Mauerwerkoberfläche hin auf etwa das Umgebungsklima ab.

5 BEDEUTUNG FÜR DIE PRAXIS NACH DEM DERZEITIGEN STAND DER UNTERSUCHUNGEN

Die nachfolgend gemachten Angaben beziehen sich nur auf eine Sockelheizung, nicht aber z. B. auf eine Wandheizung. Die Aussagen gründen auf den in diesem und den vorangegangenen Berichten (siehe dazu auch Bericht F 1006/F-0A bis F-D) vorgestellten Forschungsergebnissen. Sie sind zum derzeitigen Stand nicht ohne weiteres auf jeden Anwendungsfall übertragbar, sondern müssen im jeweiligen Einzelfall betrachtet werden.

Wir möchten in diesem Zusammenhang auch noch auf die bereits in Bericht F 1006/F-0B (Seite 10) gemachten Angaben zur Bedeutung der Untersuchungen und der Untersuchungsergebnisse für die Praxis verweisen.

- Die kapillare Feuchteaufnahme von Mauerwerkswänden führt zu erheblichen Formänderungen (insbesondere Quellvorgängen ($\epsilon \geq 1,5\text{mm/m}$) im Mauerwerk). Wird eine Wand trockengelegt, so kehren sich diese Formänderungen in ein Schwinden um. Übliche Putzsysteme können diese Formänderungen nicht rissfrei aufnehmen, was z. B. bei Sanierputzsystemen auch zu verstärkten Ausblühungen im Rissbereich führen kann.
- Sanierputzsysteme werden durch die Beheizung einer feuchten, salzhaltigen Wand deutlich stärker beansprucht, als ohne Beheizung.

Anmerkung:

Bei den Untersuchungen war festzustellen, dass die an den Stirnseiten aufgebraute Dichtschlämme, die einen erhöhten Sulfatwiderstand aufweist, abhängig von der Steinart, offensichtlich durch den Feuchte- und baustoffeigenen Salztransport und die Beheizung der Mauerwerkswände z. T. so stark beansprucht wird, dass innerhalb des Prüfzeitraumes von etwa 150 Tagen kapillarer Wasseraufnahme erste Schäden (Abplatzungen, Ausblühungen) aufgetreten sind.

- Die Beheizung der Mauerwerkswände kann zu einer starken Anreicherung von baustoffschädlichen Salzen führen. Die Aussage, das „normale“ Putze bei beheizten und mit baustoffschädlichen Salzen belasteten Mauerwerkswänden in Verbindung mit dem „Temperiersystem“ verwendet werden können, kann so nicht bestehen bleiben werden.

- Die Bausubstanz wird durch die Beheizung im Sockelbereich wesentlich stärker beansprucht also ohne Heizung.
- Die bei den Untersuchungen festgestellte ungleichmäßige Feuchteabgabe bzw. Feuchteaufnahme von Stein und Mörtel bedeutet für die Untersuchung von Feuchtegehalten im Mauerwerk, dass immer von Stein und Mörtel der Feuchtegehalt bestimmt werden muss, um eine repräsentative Aussage über die momentane Feuchtesituation im Mauerwerk zu erhalten.
- Sobald ein erhöhter Feuchtegehalt im Mauerwerk vorhanden ist, muss an der Bauteiloberfläche mit einer starken Aufkonzentration von bestimmten baustoffeigenen Salzen gerechnet werden.
- Entgegen der Aussage in der Literatur, dass die Karbonatisierung von trasshaltigem Mörtel die Ausblühungen verhindern könnte, konnte bei den eigenen Untersuchungen festgestellt werden, dass die Karbonatisierung ein Ausblühen nicht verhindern konnte.
- An Fugenmörteln (Versetz- und Verfugmörteln) entstehen offenbar sehr oft kapillargängige Risse im Verbundbereich zwischen Mauerstein und Fugenmörtel.
- Entsprechen die Verhältnisse einer historischen Wand den Prüfbedingungen der Untersuchungen, so muss die Beheizung von Mauerwerkswänden, wie sie angabegemäß in der Kirche St. Ursula in Köln durchgeführt wird, nach dem derzeitigen Untersuchungsstand unbedingt abgelehnt werden, da sie zur Beanspruchung und damit zum Schaden von unwiederbringlicher historischer Substanz führt. Die Forschungen haben gezeigt, dass feuchte- und salzbedingte Beanspruchungsprozesse bei den gegebenen Randbedingungen durch die Beheizung deutlich verstärkt werden.
- Die Feuchtesituation in einem historischen Sockel- und Fundamentmauerwerk ist geprägt von unterschiedlichen klimatischen Situationen außer- und innerhalb eines Mauerwerkes. Tauwasserbildung muss fast zwangsläufig im Mauerwerkquerschnitt stattfinden. Begleitende Maßnahmen, wie z. B. der Auftrag eines Sanierputzsystems, können die Wirkungen dieser Prozesse z. B. auf die Mauerwerkoberfläche konzentrieren, nicht aber beenden. Das Beheizen der Sockel, wie es im Forschungsprojekt und angabegemäß an der Kirche St. Ursula in Köln praktiziert wird, muss im Sinne des Erhaltes der historischen Substanz vermieden werden.

- Für das Beheizen im Sockelbereich wird eine große Energiemenge, u. a. für die Verdampfung von Wasser, benötigt, die dann der Raumheizung nicht mehr zur Verfügung steht.
- Die beanspruchte Zone eines feuchte und/oder salzbelasteten Mauerwerkes wird durch die Beheizung wesentlich vergrößert.
- Die Heizung sollte auf keinen Fall an einem Bauteil angebracht werden, das durch Feuchte (kapillar aufsteigende Feuchte, seitlich eindringende Feuchte) belastet wird.
- Die Heizung führte im Prüfzeitraum zu keiner Beschleunigung von Feuchteabgabeprozessen bei Mauerwerk (ohne kapillar aufsteigende Feuchte). Die Situation z. B. an Pfeilern im Kircheninnern, die keiner Kapillarwasserbelastung ausgesetzt sind, wird durch das Heizsystem aber auch nicht verbessert.

Die von den Befürwortern dieses Heizsystems in der Kirche St. Ursula vorgebrachten Vorteile des Heizsystems wie z. B.:

- Verhindern bzw. Reduzieren von kapillar aufsteigender Feuchte im Mauerwerk,
- Verhindern bzw. Reduzieren einer Beanspruchung des Mauerwerkes durch baustoffschädliche Salze,
- Aufbringen von „normalen“ Putz- und Mörtelsystemen auf das beheizte und feuchte- und salzbelastete Sockelmauerwerk,

konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen bisher nicht bestätigt werden. Die Beanspruchungen des Mauerwerkes nahm im Gegenteil unter den gegebenen Prüfbedingungen durch die Wirkung der Heizung noch zu.

6 AUSBLICK UND WEITERE FORSCHUNGSZIELE

Aufgrund der physikalischen Gesetze hat sich, wie bereits mehrfach erläutert, der ursprünglich vorgesehene Prüfplan deutlich verschoben. Wie die in den letzten und diesem Bericht vorgestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, müssen die bisher durchgeführten Untersuchungen noch über einen langen Zeitraum weiter fortgeführt werden, um vollständig gesicherte Aussagen u. a. bezüglich der Feuchtetransportvorgänge im Mauerwerk abhängig von einer Beheizung und den getroffenen Prüfungsbedingungen, treffen zu können. Dabei können die bisher getroffenen Randbedingungen variiert und kombiniert werden.

Nach Abschluss der ersten Prüfungsphase sind bereits Vorkehrungen für eine mögliche anschließende zweite Prüfungsphase getroffen worden. Neben dem langfristigen Einfluss der Heizung auf eine feuchtebelastete Mauerwerkswand, soll u. a. auch der langfristige Einfluss der Heizung auf eine „trockene“ Mauerwerkswand untersucht werden. Der Einfluss von baustoffschädlichen Salzen soll dabei ebenfalls, soweit aufgrund des aufgestellten Prüfplans möglich, berücksichtigt werden.

Von besonderem und aus aktuellem Interesse (Energieeinsparverordnung) soll dann z. B. auch der Einfluss der Heizung auf die Tauwasserbildung im Mauerwerk untersucht werden, sowie die Wirkung der Heizung bei einem wärmedämmten Mauerwerk (z. B. Mauerwerkprüfwände mit einem Wärmedämmverbundsystem). Die für die jeweilige Variante aufgebrachten Energiemengen sollen genau erfasst werden.

Nachfolgend sind noch einmal kurz die wichtigsten anzustrebenden Forschungsziele zusammenstellt:

- Die Versuchsdauer sollte, wie sich bei den Untersuchungen gezeigt hat, noch einmal deutlich verlängert werden, um die stattfindenden Prozesse repräsentativer abbilden und klarer erfassen zu können.
- Die tatsächlich im Mauerwerk stattfindenden Prozesse (Feuchtetransportvorgänge, Feuchte- und Temperaturverteilungen) sollten mit entsprechenden EDV-Programmen, z. B. „WUFI“ des Fraunhofer Institutes in Holzkirchen oder „DELPHI“ der TU Dresden, zur Optimierung dieser Programme unter bekannten und definierten Bedingungen, abgeglichen werden.

- Die Versuchsbedingungen sollten bezüglich der umgebungsklimatischen Bedingungen jetzt weiter differenziert erfolgen (z. B. Absenken der Temperatur am Wandfuß auf ein Maß, wie es im Erdreich vorhanden ist, Raumklima entsprechend einer Winterperiode einstellen).
- Die Prüfwände könnten im Modellversuch klimatisch wie bei einer Außenwand im Sockelbereich nachgestellt werden.
- Die Feuchtemesssensoren allein bilden die Feuchtegehaltsverhältnisse im Mörtel sehr gut ab. Die Feuchteverhältnisse, wie sie sich zwischen Stein und Mörtel in Abhängigkeit von Feuchtegehaltsveränderungen in einem der beiden Baustoffe einstellen, sollten noch genauer erfasst werden. Dazu könnten entsprechende vorbereitete Verbunduntersuchungen dienen.
- Die Mauerwerkprüfwände müssten unterschiedlichen Versuchsbedingungen, u. a. wie bei der Voruntersuchung an der Kleinprüfmauerwerkwand aus Römertuffstein durchgeführt, mit einseitiger Abdichtung etc., unterworfen werden (z. B. Normalputz-, Sanierputzauftrag).
- Begleitende thermogravimetrische Aufnahmen können zusätzliche Beurteilungshilfen zur Wirkung der Heizung auf die Mauerwerkwand geben.
- Es ist bekannt, dass ein feuchter mineralischer Baustoff in der Regel an Festigkeit verliert. Die Feuchtesituation trägt neben den Festigkeitsverlusten zu deutlichen lastbedingten Formänderungen (Kriechen) bei. Die Beheizung der Wände führte unter den gegebenen Prüfbedingungen zu einem vermehrten Feuchtetransport. Die Wirkung der Feuchtegehalte auf das Trag- und Formänderungsverhalten unter Dauerlast könnte wesentliche Aufschlüsse für den Bestand solcher Bauteile geben.
- Die Wirkung auf die Dauerhaftigkeit von Baustoffen unter erhöhten Feuchte- und Temperaturveränderungen sollte erfasst werden.
- In der Kirche St. Ursula sind Feuchte- und Temperaturmessensoren eingebaut. Die Sockelheizung ist angabegemäß trotz der Warnung, u. a. aufgrund der Voruntersuchungsergebnisse erfolgte, eingebaut und in Betrieb genommen worden. Da Voruntersuchungen durchgeführt und Messensoren eingebaut wurden, wäre es jetzt im Sinne vieler historischer Bauwerke von großem Interesse

zu prüfen, wie sich die Beheizung in der Praxis auf die Feuchte-situation, die Klimaverhältnisse, die Materialeigenschaften und den Energieaufwand tatsächlich ausgewirkt hat und weiter auswirkt.

7 LITERATUR

- [BAU] Bau-7025-C: Patenschaftskooperationen der RWTH Aachen mit der TU Dresden; Prüfung und Optimierung von Fugenmörteln, Steinerfüllstoffen und ihren Misch- und Applikationstechniken zur Restaurierung von schadhaften Mörtel- und Natursteinpartien an Baudenkmalern; Institut für Bauforschung (ibac) in Zusammenarbeit mit Institut für Baumaschinen und Baubetrieb (ibb) der RWTH Aachen.
- [BAU94] Bau-5015-M: Verbundforschungsprojekt: Steinzerfall und Steinkonservierung; Entwicklung von Verfugmörteln für Natursteinmauerwerk; Entwicklung von Schlämmemörtel für Natursteinmauerwerk; Anwendung der neuentwickelten Mörtelsysteme an Probeflächen ausgewählter historischer Bauwerkfassaden; Kaiserpfalz in Gelnhausen, Ruine Falkenstein in Falkenstein, Matthias-Kapelle in Kobern-Gondorf, Hasefriedhofskapelle in Osnabrück; Auftraggeber: Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1990 bis 1994
- [BAU05] Appel, W.: Auf trockenen Füßen – Die Wirkungsweise von Feuchtigkeitssperren mittels PUR-Systemen in der Altbau-sanierung; In: Bautenschutz und Bausanierung, 07.2005, S. 11–13
- [DOM96] Dominik, A.; Tandina, A. M.: Veröffentlichung Schläm-men: Mineralische Schlämmemörtel – Eigenschafts-veränderungen im Verbund zu verschiedenen Steinen; Ehingen, Expert 1996. In: „Werkstoffwissenschaften und Bausanierung“, Tagungsbericht des vierten Internationalen Kolloquiums, S. 455—479
- [DOM99.1] Dominik, A.; Lemke, R.; Buchenau, G.: Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Eigenschaften von Natursteinen. Aedificatio Publishers, Freiburg '99. In: „Materials Science and Restorations, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung V“, Tagungsbericht des fünften Internationalen Kolloquiums, Band 2, S. 1461—1470
- [DOM99.2] Dominik, A.; Breuer, Ch.; Steinmetz, K.: Hochtemperatur-beanspruchte Natursteine – Drachenfelser Trachyt, Römer-tuff, Ettringer und Weiberner Tuff; Aedificatio Publishers, Freiburg '99. In: „Materials Science and Restorations, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung V“, Tagungs-bericht des fünften Internationalen Kolloquiums, Band 2, S. 1471—1479

- [DOM00.1] Dominik, A.; Wengenroth, K.; Kroeff, A.: Zum Einfluß von unterschiedlichen Lagerungsbedingungen auf die Mörtel-eigenschaften. Tischvorlage zum Vortrag, Bauhaus-Universität Weimar, 2000
- [DOM00.2] Dominik, A.; Wengenroth, K.; Kroeff A.: Ibausil Mörtel-eigenschaften: „Zum Einfluss von unterschiedlichen Lagerungsbedingungen auf die Mörtel-eigenschaften; Tischvorlage zum Vortrag, Bauhaus-Universität Weimar, 2000
- [DOM03.1] Dominik, A.; Koch, S.; Link, R.: Zum Feuchtetransport und zur Formänderung von Mauerwerk unmittelbar nach der Herstellung. „Materials Science and Restorations, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung VI“, Tagungsbericht des sechsten Internationalen Kolloquiums, Karlsruhe, Sept. 2003
- [DOM03.2] Dominik, A.: Ermittlung von Kalibrierkurven für die Feuchtemesssensoren im Trass-Kalk-Mörtel (TKM), 2003
- [DOM04] Dominik, A.; Koch, S.: Kirche St. Ursula in Köln – Forschungsprojekt: „Die Wirkung eines Heizsystemes („Temperier- bzw. Konditioniersystem“) auf feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk in einem temporär genutzten Gebäude“; gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) in Osnabrück; Aachen, 09.2004 – Forschungsbericht F 1006/F-0A
- [DOM05.1] Dominik, A.: Dissertation und Veröffentlichung in Bearbeitung
- [DOM05.2] Dominik, A.; Koch, S.: Kirche St. Ursula in Köln – Forschungsprojekt: „Die Wirkung eines Heizsystemes („Temperier- bzw. Konditioniersystem“) auf feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk in einem temporär genutzten Gebäude“; gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) in Osnabrück; Aachen, 11.2005 – Forschungsbericht F 1006/F-0C
- [DOM05.3] Dominik, A.; Koch, S.: Kirche St. Ursula in Köln – Forschungsprojekt: „Die Wirkung eines Heizsystemes („Temperier- bzw. Konditioniersystem“) auf feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk in einem temporär genutzten Gebäude“; gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) in Osnabrück; Aachen, 03.2008 – Forschungsbericht F 1006/F-0D
- [DOM06] Dominik, A.; Koch, S.; Dominik, L.: Feuchtetransport in historischen Mauerwerkmaterialien – mit und ohne Einfluß eines „Temperiersystems“. 16. Internationale Baustofftagung – ibausil, Bauhaus-Universität Weimar, Sept. 2006

- [DOM09] Dominik, A.; Koch, S.; Dominik, L.: „Untersuchungsergebnisse zu Heizsystemen an feuchten historischen Mauerwerksockeln“; Vortrag – 1. Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken“, Technische Akademie Esslingen (TAE), Januar 2009
- [FIS08] Fischer, Heinz-Martin; Freymuth, Hanns; Häuptl, Peter; Homann, Martin; Jenisch, Richard; Richter, Ekkehard; Stohrer, Martin: „Lehrbuch der Bauphysik“, 6. Auflage, Seite 347, 2008; Vieweg & Teubner Verlag, Wiesbaden
- [FIT99] Fitzner, B.: Petrographische Kennwerte, Verwitterungsverhalten und Beurteilung – Lindlarer Grauwacke; Untersuchungsbericht, Geologisches Institut der RWTH Aachen, Februar 1999
- [FOR03] Forschungsantrag, DBU, 3. Version, 2003
- [FOR95.1] Forschungsprojekt: F-423: Entwicklung von Mauermörtelrezepturen für verschiedene Sandsteinarten; Voruntersuchungen und Anlegen von Fugenmörtel-Probeflächen an der St. Aegidien-Kirche in Oschatz; Voruntersuchungen und Anlegen von Fugenmörtel-Probeflächen am Hauptbahnhof in Dresden; Voruntersuchungen und Anlegen von Fugenmörtel-Probeflächen an der Treppe an Schloss Hartenfels-Wendelstein in Torgau; Voruntersuchungen und Anlegen von Fugenmörtel-Probeflächen an der Westfassade des Mariendom in Zwickau; Auftraggeber: Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1994 bis 1995
- [FOR95.2] Forschungsprojekt: F-1447: Untersuchung der Matthias-Kapelle in Kobern-Gondorf hinsichtlich der mörteltechnologischen Instandsetzung; Auftraggeber: Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1993 bis 1995
- [FOR97.1] Forschungsprojekt: F-2447: Untersuchung des Zeitzer Doms hinsichtlich der mörteltechnologischen Instandsetzung; Auftraggeber: Bundesministerium für Forschung und Technologie, 1993 bis 1997;
- [FOR97.2] Schubert, P.; Dominik, A.; Tebbe, H.: Forschungsprojekt: F-471: Austrocknungsverhalten von verputzten und unverputzten Hochlochziegeln; Institut für Bauforschung der RWTH-Aachen; Auftraggeber: Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, 1995 bis 1997
- [GRE02] Grewe, S.: Formänderungsverhalten von getränktem historischen „Kalk-Bimsstein“-Gewölbemauerwerk; *Shape changes of soaked historical „lime-pumice-stone“ vault structure*; **Diplomarbeit**; Dominik Ingenieurbüro / Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen, Fachbereich 3, 2002

- [HAU89] Hauck, D.; Hilker, E.: „Zum Feuchtedehnverhalten von Ziegeln“, Institut für Ziegelforschung e. V., Ziegeljahrbuch 1989, Seite 47 bis 68
- [HOL] Persönliche Mitteilung von Herrn Dr.-Ing. Holm, Fraunhofer Institut in Holzkirchen, Herrn Dipl.-Ing. Pleyers, pleyers bau innovationen gmbh in Würselen, Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Wittmann, Freiburg
- [KRI63] Krischer, O.: „Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik“, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1963
- [LIN04] Link, R.: persönliche Angaben nach Kahlert vom 25.02.2004
- [SCH] Schubert, P.: „Persönliche Mitteilung „, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac)
- [SCH80] Schubert, P.: „Begrenzung des Schwind- und Quellverhaltens von Mauersteinen zur Vermeidung von Risschäden“; ZI International (1980), H. 10, S. 645 bis 650
- [SCH82] Schubert, P.; Wesche, K.: „Verformung und Rissicherheit von MAuerwerk“; Mauerwerkkalender 1982, S. 111 bis 144; Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin

DIN V 4108 Teil 4, Juli 2004:
Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte (Vornorm)

DIN 4172, Juli 1955:
Maßordnung im Hochbau