

Abschlußbericht

Projekttitlel	Sanierung des durch Grünalgenbefalls geschädigten Putzes der Poseritzer Kirche (Backsteingotik) in Poseritz/Rügen
Aktenzeichen	AZ 23375-45
Verfasser	Andreas Weiß, Dipl. Restaurator (HS) Dr. rer. nat. Frank Schlütter (Abschnitt 8.2.3)
Projektbeginn	1.5.2007
Laufzeit	3 Jahre und 4 Monate
Ort	Poseritz
Jahr	2011

Projektkennblatt

Der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	AZ 23375-45	Referat	45	Fördersumme	41.487,00 €
Antragstitel	Sanierung des durch Grünalgenbefall geschädigten Putzes der Poseritzer Kirche (Backsteingotik) in Poseritz / Rügen				
Stichworte	Grünalgen; mittelalterliches Backsteinmauerwerk; überhygroskopischer Wassergehalt; geregelte Lüftung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
	01.05.2007	30.9.2010			
Zwischenberichte	20.12.2007	25.6.2008	17.4. 2009	31.12.2009	
Bewilligungsempfänger	Stiftung zur Bewahrung kirchlicher Baudenkmäler in Deutschland (KiBa) Herrenhäuser Str. 12 30419 Hannover			Tel	0511 / 2796-333
				Fax	0511 / 2796-334
				Projektleitung Martin Amon	
				Bearbeiter Andreas Weiß Dipl. Rest. (HS)	
Kooperationspartner	Architekten Johannsen und Partner, 22089 Hamburg Landesamt für Kultur und Denkmalpflege Mecklenburg-Vorpommern, 19055 Schwerin Amtliche Materialprüfungsanstalt der Freien Hansestadt Bremen, 28199 Bremen				
Externe Konsultanten	Konservierungsabteilung des Dänischen Nationalmuseums, DK-2800 Kgs. Lyngby Fraunhofer Institut für Bauphysik Institutsteil Holzkirchen 83626 Valley Technische Universität Darmstadt Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, 64287 Darmstadt				

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Seit Anfang der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts ist in Mecklenburg-Vorpommern eine deutliche Zunahme von Grünalgenbewuchs an den Raumschalen mittelalterlicher Kirchen zu beobachten. Gleichzeitig wurden durch Sanierungen Bauschäden als Feuchtequellen beseitigt. Angesichts gleichbleibender Nutzung sind veränderte Umweltbedingungen als Ursachen für das forcierte Algenwachstum anzunehmen: Globale, mutmaßlich anthropogene Klimaveränderungen haben in der Region die Windlasten, sowie die Niederschlagsfrequenz und -intensität erhöht. In der Folge sind die Schlagregenbelastung der Gebäudehüllen und die Kondensatbelastung der Raumschalen durch unkontrollierte Luftwechsel gewachsen. Dies führt aufgrund der enormen Wasseraufnahmekoeffizienten des mittelalterlichen Backsteins zu einer zunehmenden Durchfeuchtung der Mauerwerke im überhygroskopischen Bereich. Neuere Quellen gehen zudem von einer Begünstigung des Algenwachstums durch die Verlagerung der SO₂- zur NO_x-Belastung der Luft nach 1990 aus. Der Algenbefall begünstigt die substantielle Schädigung betroffener Oberflächen durch mikrobiellen Sekundärbefall und die Aktivität löslicher Salze.

Die Dorfkirche Poseritz weist starke Algenbeläge in Teilbereichen von Wänden und Gewölben auf, die überwiegend seit Mitte der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts neuentstanden sind. Aufgrund der extrem witterungsexponierten Lage und einer enormen Durchfeuchtung der verhältnismäßig schwachen Backsteinmauern eignet sich die Kirche besonders für die Umsetzung von Modellvorhaben zur Prävention klima- bzw. bewitterungsbedingter Schäden und für die Kontrolle ihrer Wirkungsweise.

Projektziel ist die Abklärung von Möglichkeiten zur Prävention witterungsbedingter Durchfeuchtung mittelalterlicher Backsteinmauerwerke, sowie zur nachhaltigen Regulierung der Luftfeuchte im Raum als mittelbare und unmittelbare Ursachen des Algenbefalls. Aufgrund enormer finanzieller Engpässe und fehlenden Fachpersonals in den ländlichen Kirchengemeinden in der Region müssen nachhaltige Lösungen auf niedrigstmöglichem technischen und finanziellen Niveau gefunden werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Untersuchung von Schadensmechanismen und Auswirkungen möglicher Sanierungsvorschlägen wurde als integrierter Ansatz verfolgt. Dabei hatte die Eindämmung von Schadensursachen Priorität vor der Behebung von Symptomen. Um angesichts der Komplexität der Problemstellung einen effektiven Ressourceneinsatz zu gewährleisten, wurde das Projekt in konsekutive Abschnitte unterteilt. Für die Konzeption modellhafter Maßnahmen zur Prävention des Feuchteintrages über die äußeren Bauwerksoberflächen wurden der Feuchtehaushalt des Mauerwerks im Vergleich frei bewitterter und durch eine simulierte Fassadenbegrünung in Kombination mit einer Dachentwässerung, sowie durch Verputz geschützter Fassadenbereiche untersucht. Zur Senkung der Kondensatbelastung der Raumschale und der Feuchtebelastung der Ausstattung wurden Möglichkeiten der Klimastabilisierung durch geregelte Belüftung untersucht. Für die langfristige Erfolgskontrolle konzipierter Präventivmaßnahmen wurde eine repräsentative Achse der Raumschale saniert.

Ergebnisse und Diskussion

Die numerische Simulation eines Außenputzes zeigte eine phasenweise Senkung der Mauerfeuchte, ließ jedoch keine Tendenz zur dauerhaften Trocknung des Mauerwerks erkennen. Obwohl somit prinzipiell eine Senkung der Feuchtebelastung des Innenraumes zu erwarten ist, kann durch einen Außenputz auch bei zusätzlicher Hydrophobierung kein ausreichender Schutz des Bauwerks vor witterungsbedingter Durchfeuchtung gewährleistet werden. Der Schutz der Fassade vor Schlagregen und Auflaufwasser durch eine Kombination aus Dachentwässerung, Abdeckung schräger Mauerflanken und Begrünung führt langfristig zur Senkung des Wassergehaltes im Mauerwerk. Aufgrund der eingeschränkten Belüftung hinter der Begrünung wird jedoch die Abtrocknung des Mauerwerks nach außen behindert. Maßnahmen zur Senkung der relativen Luftfeuchte im Innenraum sind somit nicht nur zur Senkung der Feuchtebelastung von Raumschale und Ausstattung, sondern auch zur Austrocknung des Mauerwerks zwingend erforderlich. Aufgrund des erreichten Durchfeuchtungsgrades des Mauerwerks ist mit einer geregelten Belüftung des Innenraumes durch Außenluft allein mittelfristig keine nachhaltige Senkung der Luftfeuchte im Raum zu erreichen. Als ergänzende Maßnahmen müssen Möglichkeiten der maschinellen Entfeuchtung, sowie der Feuchteregulierung durch Beheizung bzw. Temperierung untersucht werden.

Die durch Testaufbauten zum Schutz der Fassaden vor witterungsbedingter Feuchtebelastung am Bauwerk zu erreichenden Veränderungen verlaufen so langsam, daß auch in der Verlängerung des Projektzeitraums keine abschließende Bewertung möglich ist. Die Untersuchungen werden deshalb im Forschungsprojekt Climate for Culture innerhalb des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Union bis 2014 weitergeführt. Gleichwohl können aufgrund der vorliegenden Ergebnisse bereits Maßnahmen zum Schutz der Gebäudehülle vor witterungsbedingter Feuchtebelastung ergriffen werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Der Abschlußbericht wird zunächst über die Online-Datenbank hericare des Hornemann-Instituts des Fachbereichs Konservierung und Restaurierung der HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen veröffentlicht. Nach Abschluß der weiterführenden Untersuchungen im Projekt Climate for Culture werden die Projektergebnisse zusammen mit dem Ergebnissen des DBU-Forschungsprojektes AZ 22116-45 „Sanierung durch Rauchgas- und Nitratemissionen geschädigter Wandmalereien in der Marienkirche zu Bergen auf Rügen“ in einem projektübergreifenden öffentlichen Kolloquium vorgestellt.

Fazit

Angesichts der komplexen Problemstellung haben sich die integrierte Untersuchung von Schadensmechanismen und Auswirkungen denkbarer Sanierungsvorschläge, sowie die Aufteilung in konsekutive Projektabschnitte bewährt. Auf Zwischenergebnisse, veränderte Rahmenbedingungen und aktuelle Forschungsergebnisse konnte so rechtzeitig reagiert und ein effektiver Einsatz der Projektressourcen gewährleistet werden. Im Zuge der Fortschreibung der Konzeption erforderliche externe Fachkompetenz und Laborkapazität konnte kostenneutral akquiriert werden. Durch Verzahnung mit dem Europäischen Forschungsprojekt Climate for Culture ist die weitere Bearbeitung offener gebliebener Probleme gesichert und eine hochkarätige wissenschaftliche Begleitung des Vorhabens weiterhin gewährleistet.

Inhaltsübersicht

1	Anlaß und Zielsetzung des Projekts.....	7
1.1	Hintergrund.....	7
1.2	Ausgangssituation	7
1.3	Fortschreibung.....	9
1.4	Zielsetzung	9
2	Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden	10
2.1	Strategie	10
2.1.1	Untersuchungen zu Feuchtebelastung/ Feuchteeintrag von Außen und Schadensprävention durch Fassadenbegrünung.....	11
2.1.2	Untersuchungen zu Auswirkungen einer Dachentwässerung	11
2.1.3	Untersuchungen zum Einfluß aufsteigender Feuchte auf die Durchfeuchtung des Mauerwerks	12
2.1.4	Untersuchungen zur Kondensatbelastung im Innenraum.....	12
2.1.5	Realisierung und Einregelung einer klimageführten Lüftung, Untersuchung der Auswirkungen auf das Raumklima.....	12
2.1.6	Probeachse für die Instandsetzung der Raumfassung.....	13
2.2	Durchgeführte Untersuchungen, Meßverfahren und Meßaufbauten	14
2.2.1	Rasterfeuchtemessung.....	14
2.2.2	Untersuchung der kapillaren Wasseraufnahme über die äußeren Bauwerksoberflächen... ..	15
2.2.3	Gravimetrische Feuchtemessungen und analytische Baustoffmikroskopie	15
2.2.4	Monitoring der Mauerfeuchte im Tiefenprofil unter Berücksichtigung von Präventivmaßnahmen.....	15
2.2.5	Monitoring der klimatischen Belastung von Bauwerksoberflächen unter Berücksichtigung von Präventivmaßnahmen	17
2.2.6	Vergleichende Untersuchung zu Auswirkungen einer Fassadenbegrünung.....	18
2.2.7	Vergleichende Untersuchungen zu Auswirkungen einer Dachentwässerung.....	18
2.2.8	Entfeuchtung des Raumklimas durch geregelte Lüftung	19
2.2.9	Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte	20
2.2.10	Rechnerische Simulationen zum Feuchtehaushalt des Mauerwerks.....	20
3	Ergebnisse	21
3.1	Zur Umsetzung im nächsten Bauabschnitt und zu weiterführenden Maßnahmen am Bauwerk (Zusammenfassung)	21
3.2	Zur Prävention der witterungsbedingten Durchfeuchtung des mittelalterlichen Backsteinmauerwerks.....	23
3.2.1	Zu Mechanismen der Feuchteaufnahme und des Feuchtetransports.....	23
3.2.2	Mögliche Auswirkungen einer Fassadenbegrünung.....	24
3.2.3	Mögliche Auswirkungen eines Außenputzes.....	24
3.3	Klimabeeinflussung durch geregelte Lüftung	25
3.4	Erkenntnisse zu verwendeten Meßverfahren	26
3.4.1	Einsatzmöglichkeiten einer kapazitiven Tiefensonde aus der Bodenfeuchteanalytik für die Mauerwerksdiagnostik	26
3.4.2	Monitoring der Mauerfeuchte durch Widerstandsmessung mit Gipsblöcken	28
4	Diskussion	29
4.1	Fortschreibung der Projektkonzeption.....	29
4.2	Probleme mit angewandten Untersuchungsmethoden.....	30
5	Öffentlichkeitsarbeit, Dissemination und Fortführung der Projektvorhaben	31
6	Fazit	32
7	Quellen- und Literaturverzeichnis	33
7.1	Ungedruckte Quellen	33

7.2	Gedruckte Quellen.....	33
7.3	Abbildungsnachweis	34
8	Anlagen, Abbildungen, Tabellen und Diagramme	34
8.1	Ausgangssituation, Randbedingungen.....	34
8.1.1	Bauwerk	34
8.1.2	Bewitterung.....	36
8.2	Materialkundliche Untersuchungen.....	37
8.2.1	Rasterfeuchtemessung mit dem Mikrowellenmeßsystem Moist 200B®	37
8.2.2	Monitoring der Materialfeuchte.....	39
8.2.2.1	Periodische Messungen im Tiefenprofil mit der kapazitiven Sonde PR2/6	39
8.2.2.2	Monitoring mit kapazitiven Oberflächensonden.....	43
8.2.3	Untersuchungsberichte der MPA Bremen.....	43
8.2.3.1	Kirche Poseritz - Feuchtemessungen 18.09.2007.....	43
8.2.3.2	Kirche Poseritz - Feuchtemessungen und Laboruntersuchungen zur Hydrophobie 26.11.2007	44
8.2.3.3	Kirche Poseritz - Feuchtemessungen 07.12.2007.....	48
8.2.3.4	Materialkundliche Untersuchungen am Mauerwerk der Kirche in Poseritz 06.02.2008	48
8.2.3.5	Ergebnisse-Tauchwägungen+w-Werte_150311 (2)	49
8.2.3.6	Daten für Simulationsrechnungen Kirche Poseritz 15.03.2011	56
8.2.3.7	Leitfähigkeitsmessungen und Bestimmung des pH-Wertes 08.04.2011 / 11.04.2011	56
8.2.4	Gravimetrische Feuchtemessung von oberflächennahen Tiefenprofilen	57
8.3	Simulation einer Fassadenbegrünung.....	58
8.4	Numerische Simulation des überhygroskopischen Wassergehaltes im Mauerwerk über einen Zeitraum vom 3 Jahren	59
8.4.1	Randbedingungen	59
8.4.1.1	Referenzdaten zum Außenklima (Standort Bremerhaven).....	59
8.4.1.2	Referenzdaten zum Raumklima.....	63
8.4.1.3	Materialparameter.....	65
8.4.2	Simulationsergebnisse zur Entwicklung der Mauerfeuchte bei wechselnden Randbedingungen	69
8.4.2.1	Mauerwerk im Ist – Zustand (Fälle 1).....	69
8.4.2.2	Mauerwerk mit Außenputz (Fälle 2)	73
8.4.2.3	Mauerwerk mit Außenputz einschließlich Hydrophobierung (Fälle 3).....	77
8.4.2.4	Mauerwerk mit Innenputz (Fälle 4).....	81
8.4.2.5	Mauerwerk mit Außen- und Innenputz (Fälle 5)	85
8.4.2.6	Mauerwerk mit Innen- und Außenputz + Hydrophobierung (Fälle 6)	89
8.4.2.7	Bewertungsmatrix.....	93
8.5	Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte	94

1 Anlaß und Zielsetzung des Projekts

1.1 Hintergrund

Seit Anfang der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts ist in Mecklenburg-Vorpommern eine deutliche Zunahme von Grünalgenbewuchs insbesondere auf Innenwandflächen mittelalterlicher Kirchen zu beobachten. Gleichzeitig wurden durch Sanierungen der Gebäudehüllen Bauschäden als Feuchtequellen beseitigt. Angesichts gleichbleibender Nutzung sind Veränderungen der Umweltbedingungen als Ursachen für das forcierte Algenwachstum anzunehmen:

Globale, mutmaßlich anthropogene Klimaveränderungen haben in der Region die Windlasten, die Niederschlagsfrequenz und die Niederschlagsintensität erhöht¹. In der Folge sind die Schlagregenbelastung der Gebäudehüllen, sowie die Kondensatbelastung der Raumschalen durch unkontrollierte Luftwechsel gewachsen. Beides steigert aufgrund der enormen Wasseraufnahmekoeffizienten der regionalen mittelalterlichen Backsteine die Durchfeuchtung der Mauerwerke. Neuere Quellen gehen zudem von einer Begünstigung des Algenwachstums durch die Verschiebung des Verhältnisses von SO₂- und NO_x-Belastung der Luft nach 1990 aus [Becker 2004]. Der Grünalgenbefall führt durch die Beförderung weiter mikrobiologischer Destruktionen und die Begünstigung der Aktivitäten löslicher Salze zu einer substantiellen Schädigung der betroffenen Oberflächen

1.2 Ausgangssituation

Vor diesem Hintergrund gab ein enormer Grünalgenbefall an Wand- und Gewölbeflächen in der Dorfkirche Poseritz im Jahre 2002 den konkreten Anlaß für die Konzeption des Projektes. Insbesondere an der Südwand des Langhauses hatte sich der Algenbelag seit einer vollständigen Reinigung im Jahre 1996 mit deutlich gesteigerter Intensität erneut ausgebreitet. Bauschäden, die zuvor Durchfeuchtungen des Mauerwerks verursacht haben können, waren jedoch bis 1993

¹ Diese in der Region in jüngerer Zeit zu beobachtenden Phänomene wurden in dem Projekt „Noah's Ark“ im 6. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union anhand globaler Klimasimulationen bestätigt [NOAH'S ARK 2007]. Dabei wurde die Entwicklung einzelner, für die Erhaltung von Kulturgütern in Europa relevanter klimatischer Belastungsfaktoren im Zeitraum von 1961 bis 2039 bzw. 2099 erforscht. Untersucht wurden unter anderem die jährliche Niederschlagsmenge, die Häufigkeiten von Starkregenereignissen (über 20mm Niederschlag/Tag), bzw. der Dauerregenbelastung (Häufigkeit von 5 aufeinanderfolgenden Niederschlagstagen), sowie die Schlagregenbelastung. Hier wurden jeweils Durchschnittswerte über zwei bis drei Jahrzehnte verglichen, d.h. für die Perioden von 1961 bis 1990 und von 2010 bis 2030 die Entwicklung von der jüngsten Vergangenheit bis in die nahe Zukunft bzw. für die Perioden von 1961 bis 1990 und von 2070 bis 2099 für die Entwicklung von der jüngsten Vergangenheit bis in die fernere Zukunft.

Die Ergebnisse zeigen für die südliche Ostseeregion eine klare Tendenz zu höheren Regenbelastungen: Seit dem letzten Drittel des 20. Jahrhunderts ist eine Zunahme der Dauerregenbelastung festzustellen, für die Zukunft wird eine Zunahme der Gesamtregenbelastung, sowie der Schlagregenbelastung prognostiziert.

Die Klimasimulationen erfolgten mit einer geografischen Auflösung von 50x50km für den Zeitraum von 2070 bis 2099, bzw. 2,5°x3,75° für die Zeiträume von 1961 bis 1990 und 2010 bis 2030. D.h. es wurden jeweils Durchschnittswerte für Zellen mit bis zu 295km Kantenlänge ermittelt. Diese Durchschnittswerte sind prinzipiell nicht repräsentativ für lokale Klimaverläufe, die stark von der topografischen Situation beeinflusst werden. Da jedoch die lokale Topographie am Standort Poseritz nicht erheblich von den regionalen Durchschnittswerten abweicht, können die im Projekt Noah's Ark festgestellten und prognostizierten Tendenzen zunächst als repräsentativ angesehen werden. Eine Präzisierung der Klimasimulationen mit einer geografischen Auflösung von 10km wird aktuell im Rahmen des Forschungsprojektes CLIMATE FOR CULTURE im 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union bis 2014 vorgenommen (vgl. Abb. 5 und Abb. 6, S. 36. ff.).

behalten, weitere baulich konstruktive Veränderungen, die als mögliche Schadensursache in Betracht kämen, sind nicht vorgenommen worden.

Augenscheinlich wird der Grünalgenbefall von einer erhöhten Durchfeuchtung des Mauerwerks begünstigt. Die Hauptursache dafür wurde im kapillaren Feuchteintrag aus Schlagregen, Aerosolimpaktion und Kondensat vermutet, deren Aufkommen mit einer zunehmenden Wind- und Regenbelastung gestiegen sein dürfte.

Dabei sind folgende, auf mittelalterliche Backsteinkirchen der südlichen Ostseeregion allgemein zutreffende Wirkmechanismen zu berücksichtigen:

a) Feuchteanreicherung im Mauerwerk aufgrund einer Disproportion zwischen Wasseraufnahme und Wasserabgabe

Aufgrund der Porenstruktur der Ziegel können mittelalterlichen Backsteinmauerwerke sehr schnell große Wassermengen über die Bauwerksoberfläche kapillar aufsaugen. Bei der Abtrocknung endet der kapillare Wassertransport in umgekehrter Richtung jedoch an einem Verdunstungshorizont unter der Oberfläche, der sich mit zunehmender Trocknung ins Material hinein verlagert. Der Weitertransport der Feuchtigkeit über die wachsende Distanz zur Oberfläche muß durch Dampfdiffusion erfolgen, die jedoch gegenüber dem kapillaren Wassertransport um Zehnerpotenzen verlangsamt verläuft [Krus/ Holm 1999]. Aus diesem Grunde wird zwischen den Schlagregen- bzw. Kondensatereignissen häufig keine vollständige Abtrocknung erreicht. Die Folge ist eine fortlaufende Feuchteanreicherung im Mauerwerk. An unverschatteten Süd- und Westwänden wird die Abtrocknung vermutlich zusätzlich verzögert, da durch die stärkere Erwärmung infolge intensiverer Sonneneinstrahlung die Verdunstungszone tiefer ins Mauerwerk wandert.

b) Feuchteintrag durch Sickerströmung, Behinderung des Kapillartransports mit zunehmender Wassersättigung

Einen wesentlichen Anteil an der Wasseraufnahme Aufnahme insbesondere aus Schlagregen und Ablaufwasser von Dächern haben auch Sickerströmungen, die in mittelalterlichen Mauerwerken an Quetschfugen der Ziegeln, an Flankenabrissen der Verfugung und sonstigen Rissen auftreten. Durch diese Sickerströmungen kann das Wasser wesentlich schneller und tiefer in das Mauerwerk gelangen, als durch Kapillartransport. Aufgrund der Abhängigkeit von den Porenradien sinkt zudem mit zunehmender Wassersättigung des Mauerwerks die Geschwindigkeit des Kapillartransports² u.a. in die Verdunstungszone. Durch das Zusammenwirken dieser Phänomene wird die Austrocknung ebenfalls behindert.

c) Wasserabgabe in den Innenraum

Die Feuchteanreicherung über die äußere Bauwerksoberfläche hat einen mehr oder weniger kontinuierlichen Feuchteintrag in den Innenraum durch Verdunstung aus dem Mauerwerk zur Folge. In den betroffenen Räumen ist der tatsächliche Wassergehalt³ in der Raumluft in der Regel höher, als in der Außenluft.

² Die Geschwindigkeit des Kapillartransports ist abhängig von der Saugspannung der Kapillaren, die mit abnehmendem Kapillardurchmesser steigt. Kleinere Kapillaren werden deshalb prinzipiell zuerst gefüllt, da sie aufgrund ihrer höheren Saugspannung bis zu ihrer Sättigung Wasser aus größeren Kapillaren absaugen. Mit der Sättigung der kleineren Kapillare verbleibt nur die geringere Saugspannung der größeren Kapillare [Krus 1995, S. 9].

³ Spezifische Feuchte, Wasserdampfgehalt der Luft

d) Kondensatbelastung des Innenraums

Mit steigendem Wassergehalt der Raumluft steigt außerdem das Risiko der Tauwasserbildung an den Wandoberflächen. Da eine höhere Windbelastung aufgrund der unvermeidlichen Undichtigkeiten historischer Baukörper auch zu einer höheren Luftwechselrate führt, wird die Verdunstung aus den Wänden in die Raumluft phasenweise durch den Austausch mit trockenerer Außenluft kompensiert. Insbesondere im Frühjahr und im Sommer begünstigt der Zustrom von feuchter Außenluft jedoch die Tauwasserbildung in ungeheizten Kirchen bzw. die sorptive Feuchteaufnahme durch poröse Materialien.

1.3 Fortschreibung

Bei Projektbeginn 2007 hatte sich der Grünalgenbefall auch auf die von Schlagregen und Sonnenstrahlung deutlich weniger betroffene Nordwand des Langhauses ausgedehnt. Da vor allem die Bereiche der über die Dachtraufe hinausragenden Strebeböden betroffen sind, mußten auch Normalregen und das Ablaufwasser des Daches als Schadensursache mit in Betracht gezogen werden. Dies allerdings wiederum unter dem Aspekt sich wandelnder Witterungsbedingungen, da die Baukonstruktion seit mindestens 7 Jahrzehnten nicht relevant verändert wurde.

Während eine in den algenbefallenen Bereichen der Südwand bei der Reinigung 1996 entfernte Zementputzschlämme darauf schließen ließ, daß hier seit längerem Durchfeuchtungsprobleme bestanden, kann die Ausbreitung des Algenbefalls auf die Nordwand zunächst nur mit veränderten Umfeldbedingungen erklärt werden.

1.4 Zielsetzung

Beispielhaft für den gesamten Bestand kulturhistorisch wertvoller Dorfkirchen in der Region übersteigen die Sanierungskosten der Kirche Poseritz das finanzielle Leistungsvermögen der Kirchengemeinde deutlich. Eine nachhaltige Sanierung erfordert somit nicht nur detaillierte Kenntnisse der komplexen Klimawirkungen am Gebäude, sondern auch langfristig kostengünstige Lösungen.

Hauptziel des Projektes war die Erforschung von Möglichkeiten zur Prävention der witterungsbedingten Durchfeuchtung des mittelalterlichen Backsteinmauerwerks als der mittelbaren Ursache für den Grünalgenbefall der Raumschale. Als wesentliche Voraussetzung für die Erreichung dieses Ziels waren die Mechanismen der Feuchteaufnahme über die äußere Bauwerksoberfläche, sowie des Feuchtetransports in den Innenraum durch geeignete Untersuchungen zu klären.

Die Witterungsbelastung mußte dabei als objektive Schadensursache zunächst hingenommen werden. Denkbare bauseitige Präventionsmaßnahmen, wie Dachentwässerungen, Fassadenbegrünungen, Verputze oder Vorhangfassaden sind aus ästhetischer Sicht in der Denkmalpflege mehr oder weniger umstritten. Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse sollten deshalb die Abwägung von konservatorischen Vorteilen und ästhetischen Beeinträchtigungen bei der Planung von Präventionsmaßnahmen versachlichen helfen.

Bei einer natürlichen Austrocknung des Mauerwerks war selbst durch die erfolgreiche Prävention der witterungsbedingten Feuchtezufuhr erst mit erheblicher Verzögerung eine Reduzierung der Feuchtbelastung des Innenraumes⁴ und insbesondere der Raumschale zu erwarten. Aus diesen Gründen wurden parallel zur Prävention des Feuchteintrages über die äußeren Bauwerksoberflächen als der primären Schadensursache auch die Reduzierung der sekundären Feuchtbelastung der inneren Bauwerksoberflächen verfolgt. Unter der Prämisse der Übertragbarkeit auf vergleichbare Bauten in der Region waren dabei nachhaltige Lösungen mit minimalstem technischen und finanziellen Aufwand anzustreben. Aus diesem Grunde wurden die entsprechenden Untersuchungen auf Möglichkeiten der Klimabeeinflussung durch geregelte Lüftung konzentriert, wobei eine für die Erhaltung gefaßter Oberflächen von Kunst- und Kulturgütern im Raum ausreichende Klimastabilität zu gewährleisten war.

2 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

2.1 Strategie

Bei der Konzeption des Projektes wurde die Untersuchung der Schadensmechanismen, sowie möglicher Auswirkungen von Sanierungsvorschlägen als integrierter Ansatz verfolgt. Dabei hatte die Eindämmung von Schadensursachen Priorität vor der Behebung von Symptomen. Hinsichtlich der Modellhaftigkeit der Projektergebnisse, insbesondere für kleine Gemeinden im ländlichen Raum, wurde von alternativ denkbaren Konzepten jeweils die langfristig kostengünstigste Lösung mit geringstmöglichen Eingriffen in die Bausubstanz verfolgt.

Im Hinblick auf die Finanzierung der gegenüber der ursprünglichen Konzeption auftretenden Mehrkosten wurde eine Unterteilung in einzelne, in sich schlüssige Abschnitte vorgenommen. Angesichts der Komplexität der zu untersuchenden Probleme werden diese Abschnitte nacheinander abgearbeitet. Dies brachte zwar eine deutliche Verlängerung der Projektlaufzeit mit sich, ermöglichte jedoch, anhand von Zwischenergebnissen notwendige Korrekturen an Strategie und Methoden der Untersuchung rechtzeitig vorzunehmen und somit die Projektressourcen so effektiv wie möglich einzusetzen.

Die wissenschaftliche Betreuung oblag der MPA Bremen als Projektpartner. Bei der Fortschreibung der Konzeption wurden darüber hinaus die Konservierungsabteilung des Dänischen Nationalmuseums, das Fraunhofer Institut für Bauphysik Institutsteil Holzkirchen und das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt⁵ konsultiert.

⁴ Aufgrund von hygrothermischen Wechselwirkungen besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der Materialfeuchte der Raumschale und der Feuchtegehalt der Raumluft, d.h. eine Senkung der Materialfeuchte in der Raumschale bewirkt prinzipiell eine Reduzierung der Luftfeuchte im Raum. Abhängig vom Durchfeuchtungsgrad und den stofflichen Parametern des Mauermaterials, der natürlichen Luftwechselrate im Innenraum und den verbleibenden klimatischen Wechselwirkungen an den äußeren Bauwerksoberflächen kann es jedoch mehrere Jahre dauern, bis eine signifikante Senkung der Mauerfeuchte erreicht wird.

⁵ In persona Prof. Dr. Ing. H. Garrecht und MA S. Reeb

2.1.1 Untersuchungen zu Feuchtebelastung/ Feuchteeintrag von Außen und Schadensprävention durch Fassadenbegrünung

Der Feuchteeintrag in das Mauerwerk über die äußere Bauwerksoberfläche ist nach bisherigen Erkenntnissen die primäre Schadensursache. Für die Konzeption und die Beurteilung der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen sollten daher der Anteil potentieller Feuchtequellen (Schlagregen, Normalregen, Ablaufwasser, Spritzwasser, Tauwasser) quantifiziert, sowie Wege, zeitliche Abläufe und Randbedingungen der Feuchteaufnahme und -abgabe ermittelt werden.

Angesichts des fortgeschrittenen Schadensprozesses und hinsichtlich einer unmittelbaren Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf andere Objekte war es geboten, auch bereits Maßnahmen zum Schutz der Fassaden vor Feuchteeintrag in die Untersuchung einzubeziehen. Diese beschränken sich prinzipiell auf die Abschirmung des Mauerwerks vor Niederschlagswasser und die Reduzierung von Kondenswasser und Aerosolimpaktion. Hier wurde zunächst auf die Untersuchung einer Fassadenbegrünung orientiert. Diese stellt die energetisch günstigste Variante für einen vollflächigen und vollständigen⁶ Regenschutz der Fassade dar. Sie verursacht zugleich die geringsten substantiellen und ästhetischen Beeinträchtigungen des Bauwerks⁷. Durch Windschutz, Verschattung und Schutz vor Strahlungswärmeverlusten erzeugt eine Begrünung außerdem ein Mikroklima an der Bauwerksoberfläche, daß sich seinerseits auf deren sorptiven Feuchtehaushalt auswirkt. Je nach Bewitterung und hygrothermischem Bauteilzustand können gegenüber unbewachsenen Fassaden sowohl die sorptive Feuchteaufnahme, als auch die Feuchtabgabe durch Desorption begünstigt werden⁸. Deshalb waren auch mögliche Auswirkungen auf die Kondensatbelastung und den Feuchtehaushalt von Bauwerksoberflächen unter den für die südliche Ostseeregion repräsentativen klimatischen Bedingungen und hohen Durchfeuchtungsgraden der Backsteinmauerwerke zu prüfen.

Dies erfolgte durch die vergleichende Untersuchung geschützter und ungeschützter Fassadenbereiche in identischem Klima. Da ein hinsichtlich der Schadensproblematik vergleichbares Objekt mit natürlichem Bewuchs nicht zur Verfügung stand, erschien die Simulation der Begrünung an einem repräsentativen Fassadenbereich der Kirche Poseritz sinnvoll. Die Abklärung der Vergleichbarkeit mit einer natürlichen Begrünung kann durch Vergleichsmessungen an einem Testaufbau an einer efeubewachsenen Fassade mit gleicher Ausrichtung in der Region sichergestellt werden.

2.1.2 Untersuchungen zu Auswirkungen einer Dachentwässerung

Da das Ablaufwasser des Daches als wesentliche Feuchtequelle in Betracht zu ziehen ist, wurde im untersuchten Fassadenbereich zusätzlich eine Abschirmung gegen das Ablaufwasser vorgenommen.

⁶ Vgl. [Kießl/ Rath 1989, S. 27]

⁷ Nach [Ak Fassadenbegrünung 2000] ist die Begrünung von dauerhaft feuchtebelasteten Mauern mit Selbstklimmern jedoch nicht unbedenklich. Insbesondere an den stark durchfeuchteten Strebebeyläufern wäre daher bis zu deren Austrocknung eine intensive Beobachtung zur Früherkennung möglicher Schäden durch den Bewuchs erforderlich.

⁸ Vgl. [Kießl/ Rath 1989, S. 26 ff.]

2.1.3 Untersuchungen zum Einfluß aufsteigender Feuchte auf die Durchfeuchtung des Mauerwerks

Eine sichere Beurteilung der Auswirkungen einer Fassadenbegrünung auf die Entwicklung der Feuchtegehalte im Mauerwerk erfordert eine Differenzierung der Feuchtezufuhr über die vertikalen Bauwerksoberflächen von möglicherweise über den Mauerfuß eingetragene kapillar aufsteigender Feuchte. Dazu sind vergleichende Untersuchungen der Materialfeuchte im Tiefenprofil in Bereichen mit- und ohne mögliche Einflüsse aufsteigender Feuchte notwendig.

2.1.4 Untersuchungen zur Kondensatbelastung im Innenraum

Die Kondensatbelastung der inneren Oberflächen der Außenwände ist einerseits mittelbar durch den Feuchteeintrag von außen in das Mauerwerk mitverursacht. Andererseits ist sie neben der Feuchtezufuhr von der Außenseite eine unmittelbare Ursache für die Durchfeuchtung der Mauerinnenseiten und damit für den Algenbefall. Die Erfassung von Betauungsperioden, ihrer Begleitumstände und Auswirkungen auf den Feuchtegehalt der oberflächennahen Mauerwerksbereiche ist deshalb für die Konzeption flankierender Entfeuchtungsmaßnahmen im Innenraum unverzichtbar.

2.1.5 Realisierung und Einregelung einer klimageführten Lüftung, Untersuchung der Auswirkungen auf das Raumklima

Abgesehen von der Eindämmung des Feuchteintrages von außen gibt es drei prinzipielle Ansätze zur Verhinderung der Durchfeuchtung der Wandinnenseiten infolge von Tauwasserbildung:

- a) Senkung der relativen Luftfeuchte an der Grenzfläche zwischen Raumluft und Bauteil durch Erwärmung der Bauteiloberfläche (Bauteiltemperierung⁹).
- b) Senkung des tatsächlichen Wassergehaltes der Raumluft (spezifische bzw. absolute Feuchte) durch maschinelle Entfeuchtung.
- c) Senkung des tatsächlichen Wassergehaltes der Raumluft durch Austausch mit trockenerer Außenluft.

Alle drei Varianten bekämpfen nicht die eigentliche Schadensursache, sie sind somit nur ergänzend zu äußeren Schutzmaßnahmen anwendbar. Die Varianten a) und b) verursachen periodisch Energie- und Wartungskosten, die bei Variante c) u.a. durch Ausnutzung natürlicher Druckdifferenzen am Gebäude und Verzicht auf Ventilatoren minimiert werden können. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen des Projekts das Potential einer klimagesteuerten Lüftung und deren Auswirkungen auf das Raumklima und sensible Bau- und Ausstattungsteile untersucht. Sofern erforderlich, ist die nachträgliche Einbindung von Bauteiltemperierung und/ oder maschineller Entfeuchtung in das Regelregime denkbar.

Für die Entfeuchtung des Raumklimas durch geregelte Lüftung wurde zunächst ein Testaufbau nach folgenden Prämissen konzipiert:

⁹ Nach [Käferhaus 2004] und [Großes Schmidt 2004] werden bei der Temperierung mittels unterputz oder aufputz in Kontakt mit der Mauer verlegter Heizrohre wesentlich höhere Wandbereiche erreicht, als bei dem Einsatz von

- Vermeidung von Eingriffen in die Bausubstanz bei der Realisierung der Luftführung (Nutzung vorhandener Öffnungen bzw. Kanäle für Zu- and Abluftführung);
- Vermeidung der Luftführung über Fenster wegen der zusätzlich erforderlichen Vorrichtungen zur Sturm- und Regensicherung¹⁰;
- Ausnutzung bauseitiger Potentiale zur Pufferung von Klimaschwankungen;
- Ausnutzung natürlicher Druckdifferenzen am Gebäude;
- Verwendung konfektionierter Bau- und Systemelemente zur Minimierung des Wartungsaufwandes und zur Gewährleistung der Übertragbarkeit;
- Weiterentwicklung eingeführter Regelbaugruppen;
- retrospektives Regelkonzept.

Für die geregelte Lüftung zur Klimakontrolle derzeit erhältliche konfektionierte Steuerungen basieren auf dem Vergleich der aktuellen Wassergehalte von Zu- und Raumluft. Für den Einsatz in Räumen mit kulturhistorisch wertvoller Ausstattung läßt sich der Eintrag von Schwankungen des Außenklimas in das Raumklima durch die Vorgabe fester Grenzwerte für das Raumklima minimieren. Dies ist für die Stabilisierung des Raumklimas in der Regel ausreichend. Für die in Poseritz modellhaft für die mittelalterlichen Backsteinkirchen des südlichen Ostseeraumes anstehende kontinuierliche Entfeuchtung des Raumklimas müßte jedoch eine gleitende Anpassung der Grenzwerte entsprechend des Entfeuchtungsfortschritts erfolgen. Der damit verbundene manuelle Aufwand würde die Übertragbarkeit insbesondere auf die keiner regelmäßigen professionellen Wartung unterliegenden Kirchen im ländlichen Raum einschränken. Aus diesen Gründen wurde angestrebt, die Möglichkeit einer automatisch gleitenden Anpassung an das Raumklima in die Steuerung zu implementieren.

2.1.6 Probeachse für die Instandsetzung der Raumfassung

Bei der Beurteilung der komplexen Schadensmechanismen in der Kirche Poseritz und der Auswirkungen von Präventivmaßnahmen sind umfangreiche bauphysikalische Untersuchungen unverzichtbar. Sie erfassen jedoch trotzdem immer nur einen Ausschnitt der Gesamtproblematik.

Für eine langfristige Erfolgskontrolle ist deshalb die Überprüfung der Meßergebnisse anhand der tatsächlichen Entwicklung an der sanierten Bauwerksoberfläche zu empfehlen. Dies kann zweckmäßig an einer repräsentativen Probeachse für die Sanierung der Raumschale erfolgen, die auch eine breite Vermittlung der Projektergebnisse fördert.

Ursprünglich war die Probeachse über den stark algenbefallenen Bereich der Südwand im mittleren Langhausjoch bis über die Hälfte der angrenzenden Gewölbekappe vorgesehen. Aufgrund der bis zum Ende der Projektlaufzeit unverändert hohen Feuchtebelastung der Wände konnte die Probeachse im Wandbereich nicht realisiert werden. Sie wurde alternativ auf die gesamte mittlere Gewölbekappe ausgedehnt. Da aufgrund der noch immer sehr hohen Luftfeuchte auch hier mit Versinterungen der Kalktünchen zu rechnen war, wurde auf eine Färbung der Kalktünche verzichtet, um zu erwartende Sinterflecken weniger stark in Erscheinung treten zu lassen.

Sockelleistenkonvektoren, die zudem höhere Belastungen der Wandoberflächen durch konvektive Luftströmungen mit dem Risiko von Schmutzablagerungen und Salzausblühungen hervorrufen.

2.2 Durchgeführte Untersuchungen, Meßverfahren und Meßaufbauten

In der ersten Projektphase ab Mai 2007 wurde mit materialkundlichen Untersuchungen zum Feuchtehaushalt und zum Durchfeuchtungszustand des Mauerwerkes der Südwand des Langhauses, sowie mit dem Monitoring der Mauerfeuchte begonnen. Im Frühjahr 2008 wurde das Monitoring der Klimawirkungen an äußeren und inneren Bauwerksoberflächen gestartet. Für vergleichende Untersuchung der Schlagregenbelastung, sowie der Möglichkeiten zum Schutz der äußeren Bauwerksoberflächen vor Witterungseinflüssen wurde ein Teil der Südfassade mit einer Dachentwässerung versehen. In einem weiteren Teilbereich wurde eine Fassadenbegrünung simuliert. Die Nachbewilligung von Projektmitteln durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt im Dezember 2008 ermöglichte darüber hinaus die Untersuchung von Möglichkeiten und Grenzen der Entfeuchtung des Raumklimas durch geregelte Lüftung.

Die Datenerfassung für das Monitoring der klimatischen Wechselwirkungen an Bauteiloberflächen und der Feuchtezustände von Bauteilen, sowie für die Funktionskontrolle der geregelten Lüftung erfolgt über ein modular erweiterbares analoges Meßnetz mit insgesamt 45 Meßwertgebern und 80 Datenkanälen¹¹.

Mit zunehmendem Erkenntnisgewinn ergaben sich im Verlauf des Projektes neue Fragen, die durch weitergehende materialkundliche Untersuchungen und numerische Simulationen geklärt werden mußten. Da ein Teil dieser Untersuchungen nicht von den ursprünglich Projektbeteiligten erbracht werden konnte, war die kurzfristige Akquisition externer Fachkompetenz und Laborkapazität erforderlich.

2.2.1 Rasterfeuchtemessung

In den am stärksten von Grünalgen befallenen Bereichen der Südwand wurde eine Rasterfeuchtemessung der oberflächennahen Mauerbereiche durchgeführt. Die Messung diente zur Erfassung von Zusammenhängen zwischen Algenbelastung und Durchfeuchtungsgrad auf der Innenseite, sowie der Lokalisierung der Feuchteinträge auf der Außenseite des Mauerwerks. Die Messungen erfolgten zerstörungsfrei unter Einsatz eines Mikrowellenmeßsystems¹². Zur Kompensation von Meßfehlern durch Materialinhomogenitäten¹³ wurde in einem Raster von ca. 1/3m pro Meßpunkt ein Mittelwert aus drei Meßwerten erfaßt. Auf eine materialspezifische Kalibrierung wurde wegen der erforderlichen Probeentnahmen verzichtet, die Messung erfolgte mit einer voreingestellten Kalibrierkurve¹⁴. Zur Kompensation von Meßfehlern aufgrund der starken Rauhtiefen der mittelalterlichen Maueroberflächen¹⁵ wurde mit einer nach Herstellerangaben bis 30cm Mauertiefe ausgelegten Volumensonde gemessen. Aufgrund aktueller Untersuchungen zu dem verwendeten Meßsystem ist

¹⁰ Das Trocknungsregime der Regelung (d.h. Unterbindung der Lüftung, sofern die spezifische Feuchte der Außenluft über die der Raumluft ansteigt) bietet allein keine ausreichende Regensicherheit, da selbst während eines heftigen Gewitterschauers die spezifische Feuchte der Außenluft unter der Feuchte der Raumluft bleiben kann.

¹¹ MOIST 200B[®] von hf-sensor.

¹² ALMEMO[®]-Meßnetz mit 56 Speicherkanälen und 24 Rechenkanälen.

¹³ Nach Herstellerangaben (mündliche Auskunft von Dr. Göller 2007) wird das Meßergebnis sowohl durch Dichteunterschiede, als auch durch die elektrischen Materialeigenschaften beeinflusst. Aus diesem Grunde ist eine materialspezifische Kalibrierung erforderlich, wobei die Kalibrierkurven resonanzabhängig und nicht interpolierbar sind.

¹⁴ Verwendet wurde die Kalibrierung „Altziegel“, hier die mit 20% angegebene Sättigungsfeuchte etwa der mutmaßlichen Sättigungsfeuchte des mittelalterlichen Backsteins entsprach. Die mit 1,25 kg/dm³ angegebene Rohdichte des Referenzmaterials liegt jedoch deutlich unter den ermittelten Rohdichten der verwendeten Ziegel (1,74 bis 1,9 kg/dm³) und Mörtel (1,56 bis 1,75 kg/dm³).

¹⁵ Aufgrund der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten von Wasser und Luft wird die Messung durch Luftschichten zwischen Sensor und Meßgut gestört.

jedoch davon auszugehen, daß im Wesentlichen die Feuchtigkeit im oberflächennahen Segment erfaßt wurde¹⁶.

2.2.2 Untersuchung der kapillaren Wasseraufnahme über die äußeren Bauwerksoberflächen

Ausgehend von den Ergebnissen der Rasterfeuchtemessungen wurde in verschiedenen Fassadenbereichen die kapillare Wasseraufnahme über die Bauwerksoberfläche geprüft. Dies erfolgte zunächst an ca. 55 Meßstellen vor Ort mit Prüfröhrchen nach Karstens. An einer Auswahl dieser Meßstellen wurden in bereits vor Ort geprüften Bereichen Materialproben für die Untersuchung der Wassersättigung und freien kapillaren Wasseraufnahme im Labor entnommen. Die Laboruntersuchung der kapillaren Wasseraufnahme erfolgte zunächst an getrockneten Proben, aufgrund der starken Abweichungen der Meßergebnisse gegenüber den in situ gemessenen Werten wurde eine zweite Probenserie im Anlieferungszustand ohne Trocknung untersucht. Weitere Messungen wurden an den zur Bestimmung von Porenradienverteilung und Feuchtespeicherfunktion entnommenen Bohrkernen durchgeführt¹⁷.

Zur Detektion eventueller hydrophobierender Beschichtungen bzw. Tränkungen erfolgten benetzungs- und Saugversuche an verschiedenen Querschnittsflächen der Proben¹⁸.

2.2.3 Gravimetrische Feuchtemessungen und analytische Baustoffmikroskopie

Aufgrund der Diskrepanzen im Wasseraufnahmeverhalten ein und derselben Materialprobe in situ (am Bauwerk) und im Laborversuch wurden die Proben mittels analytischer Baustoffmikroskopie auf mögliche Blockaden des Porenraumes untersucht¹⁹.

Zur Erfassung der Ausgangssituation für das ein Monitoring der Mauerfeuchten, sowie zur Abklärung der Kondensatbelastung der Raumschale wurden die Feuchte- und Salzgehalte des Mauerwerks Wandquerschnitt anhand von Bohrmehlproben bestimmt²⁰.

2.2.4 Monitoring der Mauerfeuchte im Tiefenprofil unter Berücksichtigung von Präventivmaßnahmen

Angesichts der komplexen Mechanismen des vorhandenen Durchfeuchtungsschadens²¹ erschien ein Monitoring der Entwicklung der Mauerfeuchte über den gesamten Mauerquerschnitt erforderlich.

¹⁶ Im Projektzeitraum wurde die vom Verfasser eingesetzte Gerätekombination im Rahmen einer Materarbeit an der Fachhochschule Potsdam über die angegebene Meßtiefe von 30cm an Prüfkörpern mit definierten Feuchtegehalten in verschiedenen Schichtungen getestet. Dabei konnte mit der Volumensonde nur die Feuchte im oberflächennahen Segment bis 5cm abgebildet werden [Wilhelmi 2008]. Dies wird durch die Ergebnisse der im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes AZ 22116-45 an über 400m² Wandmalerei der Marienkirche in Bergen auf Rügen durch den Verfasser vorgenommenen Rasterfeuchtemessungen bestätigt. Hier wurde mit der Volumensonde vor allem die hygroskopische Feuchte oberflächlich angereicherter Salze abgebildet [Weiß 2009].

¹⁷ Vgl. Abschnitte 8.2.3.2, S. 44 ff, 8.2.3.5, S.49.

¹⁸ Vgl. Abschnitte 8.2.3.2, S. 44 ff, 8.2.3.4, S. 48 ff.

¹⁹ Vgl. Abschnitte 8.2.3.4 bis 8.2.3.7, S. 48 ff.

²⁰ Vgl. Abschnitte 8.2.3.1, S. 43 ff, 8.2.3.3 und 8.2.3.4, S. 48ff, sowie 8.2.3.7, S. 56 .

Dabei stellt die Verfolgung der Materialfeuchtwerte in den am stärksten von Grünalgen befallenen Pfeilerbereichen der Südwand aufgrund der enormen Mauerquerschnitte von über 2m eine besondere Herausforderung dar. Während in größeren Tiefen periodische Einzelmessungen ausreichen, ist zur Analyse der kurzfristigen Reaktionen auf Klimaänderungen im oberflächennahen Bereich durch Kondensations-, Sorptions- und Desorptionsvorgänge eine permanente Überwachung der Materialfeuchte in mindestens 3 Tiefensegmenten erforderlich. Aufgrund der Feuchtegehalte im überhygroskopischen Bereich und der enormen Mauerstärken ist das Spektrum verfügbarer Meßverfahren und -geräte stark eingeschränkt. Mit Ausnahme der gravimetrischen Feuchtemessung am Bohrkern bzw. Bohrmehl, die als zerstörende Untersuchung nicht für ein Monitoring geeignet ist, deckt kein verfügbares Verfahren den gesamten Tiefenbereich mit der jeweils erforderlichen Auflösung ab. Daher ist die Kombination von mehreren Verfahren und deren Korrelation erforderlich.

Nach dem die Ausgangsfeuchte gravimetrisch ermittelt wurde, erfolgen die periodische Kontrollen in größeren Tiefen mit der für Bodenfeuchtemessungen entwickelten kapazitiven Tiefensonde PR2/6 von Delta T Devices. Da diese Sonde innerhalb der DBU-Projekte AZ 23375-45 in Poseritz und AZ 22116-45 an der Kirche St. Marien in Bergen erstmalig in Deutschland in der Mauerwerksdiagnostik zum Einsatz kam, wurde sie parallel im BMBF Forschungsvorhaben PRÄVENT der Fachhochschule Potsdam im Vergleich mit weiteren Verfahren zur Mauerfeuchtemessung getestet. Da für den Einsatz der Sonde in der Mauerwerksdiagnostik bisher keine materialspezifischen Kalibrierungen verfügbar sind, können zunächst nur vergleichende Messungen durchgeführt werden. Die Kalibrierung für mittelalterlichen Backstein ist in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner MPA Bremen, dem Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen und der Konservierungsabteilung des Dänischen Nationalmuseums²² vorgesehen. Weiterhin werden folgende Punkte untersucht:

- Einfluß von des Materialschlusses zwischen Sonde und Meßgut auf das Meßergebnis²³;
- Abfall der Empfindlichkeit bzw. Erfassungsbereich bei Messungen im Mauerwerk;
- Einfluß von löslichen Salzen auf das Meßergebnis;
- Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse.

Konstruktionsbedingt endet der Erfassungsbereich der Profilsonde PR2 ca. 2,5cm vor der Maueroberfläche. Für die Überwachung des Feuchtehaushalts der oberflächennahen Mauerwerksbereiche waren deshalb Widerstandsmessungen mit Gipssonden aus der Bodenfeuchteanalytik vorgesehen²⁴. Die Messung erfolgt dabei über Elektroden innerhalb von materialschlüssig in das Mauerwerk eingebrachten Gipsblöcken, in den sich eine Ausgleichsfeuchte mit dem Mauerwerk einstellt. Die prinzipielle Störanfälligkeit der Feuchtebestimmung über die

²¹ Überlagerung der Feuchteinträge durch Regenwasser, Kondensat und Sorption, mutmaßliche Kapillarblockade durch einen Wasserhorizont hinter der äußeren Bauwerksoberfläche, Rekondensation in die Raumluft abgebener Feuchte,

²² in persona Poul Klens Larsen.

²³ Zur Absicherung der Testergebnisse war eine größere Anzahl von Meßbohrungen erforderlich, die aufgrund der Wertigkeit des Objektes nicht ausschließlich an der Marienkirche Bergen realisiert werden konnten. Tests erfolgten deshalb auch an der Dorfkirche Poseritz und an der Villa Schöningen in Potsdam..

²⁴ Eingesetzt werden Elektroden vom Typ SOILMOISTURE G-BLOCK: 5201 F1. Aufgrund der elektrolytischen Anfälligkeit des Gipses müssen die Sonden mit Wechselstrom betrieben und über AC/DC-Wandler in das gleichstrombasierte ALMEMO®-Meßnetz eingebunden werden. Aufgrund der Sorptionsisothermen des Backsteins können Feuchteänderungen im Mauerwerk nicht über die Messungen der Ausgleichsfeuchten in Bohrlöchern abgebildet werden. Bei entsprechenden Messungen des Verfassers an der benachbarten mittelalterlichen Stadtkirche St. Marien Bergen verharrte die Ausgleichsfeuchte in Bohrlöchern bereits in 10cm Mauertiefe über einen Zeitraum von 15 Monaten dauerhaft über 98% relativer Feuchte als der Erfassungsgrenze der eingesetzten kapazitiven Feuchtesensoren.

elektrische Leitfähigkeit durch lösliche Salze wird bei diesem Verfahren dadurch kompensiert, daß der Porenraum zwischen den Elektroden infolge der Wasserlöslichkeit des Gipses in erster Linie durch eine Gipslösung gefüllt wird. Da bei unerwarteter, bei der Kalibrierung der Gipsblöcke aufgetretener Probleme²⁵ erscheint die Verifizierung der Messung durch ein weiteres Meßsystem erforderlich. Zu diesem Zweck werden parallel im Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt entwickelte TDR-Sonden eingesetzt. Da diese Sonden allerdings erst gegen Ende der Projektlaufzeit verfügbar waren, konnten die Messungen innerhalb des Projektzeitraumes nicht abgeschlossen werden.

Aufgrund der Baugröße liegt die räumliche Auflösung der Gipssonden oberhalb von 25mm Materialtiefe. Sie sind deshalb nicht für die Erfassung der Feuchtetransportvorgänge über die Bauwerksoberflächen geeignet, die jedoch von entscheidender Bedeutung für die die Erforschung der am Mauerwerk wirksamen Durchfeuchtungsmechanismen ist. Aus diesem Grunde wird die Oberflächenfeuchte zusätzlich mit kapazitiven Meßelementen überwacht²⁶.

Jeweils identische Meßaufbauten an vergleichbaren Meßpunkten²⁷ ermöglichen den Vergleich der äußeren und inneren Bauwerksoberfläche, als auch der frei bewitterten und der durch eine simulierte Begrünung geschützten Fassadenbereiche

2.2.5 Monitoring der klimatischen Belastung von Bauwerksoberflächen unter Berücksichtigung von Präventivmaßnahmen

Bei dem Monitoring der klimatischen Belastungen von Bauwerksoberflächen werden vor allem die Kondensat- und Schlagregenbelastung, sowie die Bedingungen für die sorptive Feuchtaufnahme verfolgt. Jeweils identische Meßaufbauten an vergleichbaren Meßpunkten²⁷ ermöglichen den Vergleich der äußeren und inneren Bauwerksoberfläche, als auch der frei bewitterten und der durch eine simulierte Begrünung geschützten Fassadenbereiche²⁸. Dabei werden jeweils folgende Parameter meßtechnisch erfaßt:

- Temperatur und relative Feuchte der Luft im Nahfeld der Maueroberfläche²⁹
- Temperatur an der Maueroberfläche³⁰

Weitere relevante Werte, wie

²⁵ Vgl. Abschnitt 3.4.2.

²⁶ Erfassung über die Maueroberfläche mit kapazitiven Sensoren nach Doser, Bei diesem Meßprinzip werden die Platten eines Kondensators auf die Oberfläche des Meßgutes gebracht, welches als Dielektrikum fungiert. Gemessen wird die Kapazität des Kondensators, die somit von der Dielektrizitätskonstante des Meßgutes abhängt. Aufgrund der Differenz der Dielektrizitätskonstanten von Wasser (~80) und porösen Baustoffen (ca. 1,5 bis max. 9 [Holdefer 1999]) wird die Dielektrizitätskonstante poröser Materialien wesentlich durch deren Wassergehalt beeinflusst.

²⁷ Jeweils in ca. 5m Höhe außen an den Südflanken der gestuften Strebe Pfeiler im mittleren Langhausjoch, sowie innen an der Schildwand neben dem Strebe Pfeiler im östlichen Langhausjoch. Die Innenmeßpunkt liegt im Einflußbereich des stark durchfeuchteten Doppelpfeilers zwischen dem mittleren und dem östlichen Langhausjoch. Die Inneren Strebe Pfeiler selbst sind für die Datenerfassung nicht repräsentativ, da Sie durch Abrisse teilweise von der Außenwand entkoppelt sind.

²⁸ Vgl. Abschnitt 2.2.6, S. 18.

²⁹ Die Erfassung erfolgt jeweils ca. 10cm vor der Maueroberfläche mit kombinierten Sensoren in einer permanent zwangsbelüfteten und gegen Wärmestrahlung abgeschirmten Wetterhütte.

³⁰ Erfassung mit an der Oberfläche befestigten Thermistoren.

- die relative Feuchte an der Maueroberfläche³¹
- der Taupunktstand der Luft an der Maueroberfläche³²

werden aus den Meßwerten berechnet.

2.2.6 Vergleichende Untersuchung zu Auswirkungen einer Fassadenbegrünung

Die Simulation der Fassadenbegrünung erfolgt durch belaubte Netze³³, die zweilagig an einem Stützgerüst vor die Fassade gespannt wurden³⁴. Dabei mußte ein hinsichtlich der Vergleichbarkeit mit der ungeschützten Fassade repräsentativer Bereich abgedeckt werden. Aufgrund der in der Höhe der Fassade stark variierenden Witterungsbelastung und der komplizierten Gebäudegeometrie war die vollständige Einbeziehung eines Strebepfeilers und der angrenzenden Schildwandbereiche erforderlich.

2.2.7 Vergleichende Untersuchungen zu Auswirkungen einer Dachentwässerung

Bei fehlenden Dachentwässerungen führt das Ablaufwasser des Daches zu einer Erhöhung der Spritzwasserbelastung im Sockelbereich. Es kann weiterhin zur Durchfeuchtung über die Traufe vorstehender Bauteile beitragen und vom Wind an die übrigen Fassadenbereiche geweht werden. Anteil und Lokalisation der durch die fehlende Dachentwässerung hervorgerufenen Feuchtebelastung einer Fassade sind somit stark von der momentanen Windbelastung abhängig und aufgrund der Überlagerung durch die Belastung aus Schlag- und Normalregen³⁵ schwer abschätzbar. Eine verlässliche Erfassung erfordert deshalb vergleichende Messungen der Gesamtregenbelastung über die gesamte Höhe der Fassade in geschützten und ungeschützten Bereichen gleicher Exposition. Zu diesem Zweck wurde ein Teilbereich der Fassade mit einer Dachentwässerung versehen. Die Messung war durch vertikal vom Traufpflaster bis unter die

³¹ Die relative Feuchte der Luft in der Grenzschicht zur Maueroberfläche hat einen entscheidenden Einfluß auf die Sorptions- und Desorptionsvorgänge an der Oberfläche. Sie ist mit verfügbarer Sensorik nicht meßbar und wird deshalb über den tatsächlichen Wassergehalt der Luft im Nahfeld und die Oberflächentemperatur näherungsweise ermittelt. Dabei bleibt jedoch der durch Sorption und Desorption von der untersuchten Oberfläche auf den Feuchtegehalt der Luft in der Grenzschicht ausgeübte Einfluß unberücksichtigt.

³² Differenz zwischen Taupunkttemperatur der Luft in der Grenzschicht zur Oberfläche und der Oberflächentemperatur zur Erfassung von Betauungsperioden. Die Taupunkttemperatur wird aus den Meßwerten für relative Feuchte und Temperatur der Luft im Nahfeld ermittelt. Dabei bleibt der durch Sorption und Desorption von der untersuchten Oberfläche auf den Feuchtegehalt der Luft in der Grenzschicht ausgeübte Einfluß unberücksichtigt.

³³ Vgl. Abschnitt 8.3, S. 58.. Zum Einsatz kamen militärische Tarnnetze des Typs „Desert hell“. Dieser Typ wurde aufgrund der vollständigen „Belaubung“, sowie des hellen Farbtones ausgewählt, der eine gegenüber dem natürlicheren Farbtönen von Typen wie „woodland“ oder „Laubtarn, Frühling und Herbst“ geringere Aufheizung des Luftraumes hinter der Camouflage infolge von Sonneneinstrahlung erwarten ließ.

³⁴ Der Abstand der Lagen untereinander, sowie zu Mauerwerk beträgt ca. 10cm, die Stärke des gesamten Aufbaus liegt somit mit ca. 20cm etwa im Bereich eines Efeubewuchses. An der schrägen Pfeilerflanke wurde die erste Lage zusätzlich mit einer wasserabführenden Folie gesichert, da die Tarnnetze im Gegensatz zu einem Efeubewuchs nur bei vertikaler Montage eine sichere Abschirmung des Mauerwerks von Schlagregen und Ablaufwasser gewährleisten.

³⁵ Normalregen, d.h. ohne Windauslenkung lotrecht fallender Regen erreicht über die Dachtraufe vorstehende Fassadenteile und kann zur Spritzwasserbelastung der Sockelbereiche beitragen..

Dachtraufe gespannte Auffangbleche vorgesehen, die jeweils in konventionelle, in das Meßnetz eingebundene Niederschlagsgeber³⁶ entwässern.

2.2.8 Entfeuchtung des Raumklimas durch geregelte Lüftung

Der Testbetrieb der Lüftungsanlage wurde im Mai 2009 aufgenommen, nachdem Vergleichsdaten zum Raumklima über einen vollständigen Jahreszyklus erfaßt worden waren.

Die Belüftung erfolgt über eine zwischen Chor und Langhaus befindliche Gruft. Auf diesem Wege werden kurzzeitige Schwankungen des Außenklimas in der Zuluft gedämpft. Die Entlüftung erfolgt über eine vorhandene Gewölbeöffnung im Langhaus unter Ausnutzung des Kamineffektes im Turm.

Für die Regelung wird der im Rahmen des DBU-Modellvorhabens Az. 20879 „Klimastabilisierung in temporär genutzten Gebäuden zum Zwecke des Bautenschutzes und zur Verbesserung der Nutzbarkeit“ optimierte Lüftungsindikator „Lindi“ des Anbieters HYGROMETRIK Dr. Brockmann eingesetzt [Vielhaber et al. 2009]. Den Anforderungen des Modelleinsatzes in Poseritz entsprechend wurden die Geräteparameter um die Möglichkeit der gleitenden Anpassung von Grenzwerten auf der Basis einer retrospektiven Bewertung des Raumklimas erweitert. Unter der Maßgabe einer Problemlösung mit minimalem Installations- und Betriebsaufwand wird zunächst ein Betrieb ohne Ventilatoren, ausschließlich auf der Basis der natürlichen Druckdifferenzen am Gebäude untersucht. Die Regelung erfolgt über konfektionierte Abschlußklappen aus der Lüftungstechnik, die synchron angesteuert den Luftstrom in den Zu- und Abluftöffnungen bei entsprechender Anforderung durch den Lüftungsindikator unterbrechen.

Unter den Maßgaben minimaler Eingriffe in die vorhandene Bausubstanz und Vermeidung von Sturm- und regenanfälligen Stellgliedern wurde zunächst ein Testaufbau mit Zuluftführung über eine Fensteröffnung in der Nordwand der Sakristei und Entlüftung über eine vorhandene Gewölbeöffnung im mittleren Langhausjoch unter Ausnutzung des Kamineffektes im Turm erprobt. Hinsichtlich der Druckverhältnisse am Gebäude handelte es sich dabei um die ungünstigste Konstellation: Die Nordseite der Kirche ist in der Regel auch die Leeseite des Gebäudes. Die schon aus diesem Grunde verhältnismäßig geringen Druckdifferenzen zwischen Zu- und Abluftöffnung wurden durch die zwischen Turm und Kirchenschiff im offenen Dachstuhl entstehenden Druckverluste weiter reduziert. Die dabei erreichte durchschnittliche Luftwechselrate von ca. 0,25/h³⁷ erschien für die Trocknung der Raumschale nicht ausreichend³⁸. Zur Steigerung der Luftwechselrate erfolgte zunächst eine Verlegung der Zuluftöffnung auf die Südseite als der überwiegenden Luvseite der Kirche, da hier wesentlich höhere Druckdifferenzen gegenüber dem Turmraum zu erwarten waren. Eine dafür erforderliche Maueröffnung konnte im Bereich der neuzeitlichen Zusetzung eines barocken Grufthalses denkmalverträglich erstellt werden. Gleichzeitig wurde so die Option erhalten, im Falle zu starker lüftungsbedingter Klimaschwankungen das Gruftgewölbe zur Vorpufferung in den Zuluftstrom einzubinden. Weiterhin wurde über eine zweite Abluftöffnung ein eine direkte Verbindung zwischen Kirchenschiff und Turm zur Reduzierung der Druckverluste im Dachstuhl

³⁶ Analoge Geber mit Kipplöffel und Reed-Kontakt.

³⁷ Unmittelbar auf die Lüftung zurückzuführender Anteil an der Geamtluftwechselrate, überschlägliche Ermittlung anhand er gemessenen Luftgeschwindigkeiten in Zu- und Abluftöffnung.

³⁸ Nach einer ersten Bilanzierung wurden durchschnittlich 14 Liter Wasser pro Tag bzw. ca. 5000 Liter Wasser pro Jahr aus dem Innenraum herausgelüftet. Dem stehen ein bisher nicht Bilanzierter Feuchteeintrag über die äußeren Bauwerksoberflächen, sowie mehrere 10.000 Liter Wasser gegenüber, die sich bereits über die Ausgleichsfeuchte hinaus im Mauerwerk befinden.

hergestellt. Zur Optimierung der Regelung war hier außerdem eine Verbesserung der Luftdichtigkeit zwischen Turm und Kirchenschiff erforderlich. Zu diesem Zweck wurden die Tür und das Orgelgehäuse³⁹ instand gesetzt, die beide Räume voneinander trennen.

Da in dem ursprünglichen Testaufbau phasenweise auch trockene Luft aus dem Dachraum über die Abluftöffnung im Gewölbe in das Kirchenschiff strömte, wurde diese Öffnung zunächst belassen, um ein eventuelles Trocknungspotential durch Zuluft aus dem Dachraum abzuklären.

Die Funktionskontrolle der Regelung und das Monitoring der Raumklimawirkungen erfolgen über das ALMEMO Meßnetz.

2.2.9 Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte

Zur Klärung Feuchtetransportvorgänge im Mauerwerk und zur Bestimmung der für einen eventuellen Verputz der Außenseite erforderlichen Materialparameter wurden Untersuchungen zu Porenradialverteilung und Feuchtespeicherfunktion der Mauermaterialien durchgeführt.

Die Porenradialverteilungen wurde durch Quecksilberporosimetrie anhand vor Ort entnommener Bohrkerne bestimmt. Die Feuchtespeicherfunktionen wurden durch Approximation der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie ermittelt⁴⁰. Im Rahmen dieser Untersuchungen war es auch möglich, Erkenntnisse zur Optimierung der Mauerfeuchtemessung im Tiefenprofil mit der Tiefensonde PR2/6 von Delta T Devices zu gewinnen⁴¹.

2.2.10 Rechnerische Simulationen zum Feuchtehaushalt des Mauerwerks

Die Simulationen dienten der Überprüfung der langfristigen Auswirkungen von Verputzen auf die Entwicklung der Mauerfeuchten⁴². Dabei kam die Software Delfin für Simulation des gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransports in porösen Materialien des Instituts für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden zum Einsatz.

Da die Simulationen sehr kurzfristig und kostenneutral erbracht werden mußten, erfolgten sie auf der Basis eines vereinfachten Modells. Ausgehend von den Ergebnissen der Rasterfeuchtemessung⁴³ und den Beobachtungen am Objekt liegt die stärkste Durchfeuchtung des Mauerwerks im Bereich der Strebebeyler vor, gefolgt von den anschließenden, ca. 1m starken Schildwandbereichen. Sie wurden in einem eindimensionalen Modell nachgestellt⁴⁴. Da einerseits der genaue Mauerwerksaufbau über den gesamten Mauerquerschnitt unbekannt ist und andererseits vier am Bauwerk entnommene Ziegelproben, sowie eine zugehörige Mörtelprobe aus

³⁹ eine ehemalige Patronatsloge.

⁴⁰ [Krus/ Holm 1999], Vgl. Abb. 18 und Abb. 19, S. 55

⁴¹ Vgl. Abschnitt 3.4.1, S. 26, Abb. 11 und Abb. 12, S. 39 ff., sowie Abb. 18 und Abb. 19, S. 55 ff.

⁴² Sie wurden freundlicherweise durch Prof. Dr. Ing. Harald Garrecht und Dipl. Ing. Simone Reeb im Fachbereich Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt.

⁴³ Vgl. Abb. 7, S. 37.

⁴⁴ Die verhältnismäßig aufwendige die Modellierung des Strebebeylers (vgl. Abb. 8, S. 37) wurde zunächst zurückgestellt. Sie wird bei der Simulation möglicher Entfeuchtungsmaßnahmen für den Innenraum im Rahmen der Fortführung der Untersuchungen im Projekt Climate for Culture berücksichtigt. Da für diese Simulation auch eine andere Software zum Einsatz kommt, wird zugleich eine Verifizierung vorliegenden Simulationsergebnisse ermöglicht.

dem Mauerinneren sehr ähnliche Feuchtespeicherfunktion aufwiesen⁴⁵, wurden aus den Ergebnissen der materialkundlichen Untersuchungen einheitliche Materialkennwerte für die Simulation abgeleitet⁴⁶.

Für die Simulation der klimatischen Belastung wurde auf den in der Software implementierten Referenzdatensatz für Bremerhaven zurückgegriffen⁴⁷. Zur Anpassung an das lokale Klima wurden aus den Grenzwerten der lokal erfaßten Klimadaten harmonische Datensätze der relativen Luftfeuchte, sowie der Raumtemperatur abgeleitet⁴⁸. Zur Korrelation des Modells mit der tatsächlichen Feuchtebelastung am Bauwerk wurde zunächst die Regenbelastung gegenüber den Referenzwerten leicht erhöht. Damit ließ sich die am Objekt gravimetrisch partiell festgestellte Wassersättigung des Mauerwerks⁴⁹ rechnerisch nachvollziehen. Die in den Simulationsergebnissen erkennbare Abtrocknung des Mauerwerks während der Sommerperioden konnten jedoch durch die Beobachtungen am Objekt nicht bestätigt werden⁵⁰. Zur Annäherung der Simulation an die tatsächliche Durchfeuchtungssituation des Mauerwerks vor Ort wurden deshalb die Simulationen in einer zweiten Serie mit gegenüber den Referenzdaten stark erhöhter Regenbelastung wiederholt⁵¹. Da aus den Simulationen mit dem Bestandsklima entsprechenden Werten für die relative Luftfeuchte im Raum keine Tendenz in Richtung einer dauerhaften Abtrocknung des Mauerwerks ablesbar war, wurden die Simulationen weiterhin mit einer um 15% relativer Feuchte reduzierten Feuchtebelastung der Raumluft wiederholt.

Insgesamt wurden 24 Konstellationen mit wechselnden Parametern berechnet⁵².

3 Ergebnisse

3.1 Zur Umsetzung im nächsten Bauabschnitt und zu weiterführenden Maßnahmen am Bauwerk (Zusammenfassung)

Zur Lösung der Durchfeuchtungsprobleme der Raumschale ist ein Schutz der äußeren Bauwerksoberflächen vor witterungsbedingten Feuchteinträgen unerlässlich, die Senkung der Luftfeuchte im Raum um mittelfristig realistische 15% relativer Feuchte allein ist für eine nachhaltige Trocknung des Mauerwerks nicht ausreichend.

Durch einen Verputz der Fassade ist selbst bei Hydrophobierung kein ausreichender Schutz vor Feuchteinträgen durch Schlagregen gegeben. Bei einer Senkung der Luftfeuchte im Raum um 15% relativer Feuchte ist eine Austrocknung des Mauerwerks nur bei zusätzlichen Maßnahmen zum

⁴⁵ Vgl. Tabelle 6, sowie Abb. 18 und Abb. 19, S. 50 bis 55.

⁴⁶ Vgl. Tabelle 7, S. 56.

⁴⁷ Vgl. Abb. 24 und Abb. 27 bis Abb. 31. Die Simulation sind Daten zu verschiedenen Strahlungsparametern erforderlich (vgl. Abb. 29 bis Abb. 31). Diese Daten sind aufgrund der damit verbundenen erheblichen Mehrkosten während des Projektzeitraumes vor Ort nicht erfaßt worden, da zum Zeitpunkt der Konzeption des Meßnetzes die Notwendigkeit von hygrothermischen Bauteilsimulationen nicht absehbar war. Insofern war für die Simulation zunächst der Rückgriff auf den geographisch nächstliegenden Referenzdatensatz erforderlich. Für die Weiterführung der Untersuchungen im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes Climate for Culture wird das Meßnetz vor Ort um die erforderlichen Strahlungssensoren ergänzt.

⁴⁸ Vgl. Abb. 23, Abb. 32 und Abb. 33.

⁴⁹ Vgl. Tabelle 1, S 43 ff., Tabelle 5, S. 48, Tabelle 6, S. 50.

⁵⁰ Vgl. Abb. 38 bis Abb. 85, Fälle „xAy“. Obwohl die Regenbelastung am Standort Poseritz aufgrund stärkerer kontinentaler Einflüsse insgesamt geringer, als am Standort Bremerhaven sein dürfte, werden durch das Modell die zusätzlichen Feuchtebelastungen durch das Ablaufwasser des Daches und durch Aerosolimpaktion nicht abgebildet.

⁵¹ Vgl. Abb. 38 bis Abb. 85, Fälle „xBy“.

⁵² Vgl. Tabelle 9 S. 93.

Schlagregenschutz zu erwarten. Aufgrund der eingeschränkten Wirksamkeit zum Schutz des Bauwerkes und darüber hinaus bestehender Probleme wie optischer Veränderungen und fraglicher Reversibilität sollte auf einen Außenputz ganz verzichtet werden.

Mit der Begrünung der Fassaden durch Efeu ist eine weitestgehende Abschirmung vertikaler Flächen gegen Schlagregen und Spritzwasser im Sockelbereich zu erwarten. Ob damit auch an den schrägen Flanken der beiden ergänzten Pfeiler an der Südseite ein ausreichender Regenschutz gewährleistet werden kann, sollte zumindest überprüft werden. Alternativ ist hier eine Verblechung denkbar, die jedoch im Zusammenhang mit der Begrünung konstruktive Probleme aufwirft⁵³. Um Schäden am Mauerwerk infolge des Dickenwachstums lichtflüchtender Triebe des Efeus zu vermeiden, setzt die Begrünung eine Instandsetzung der Fassaden voraus, bei der vorhandene Risse und Spalten im Mauerwerk oberflächenbündig geschlossen werden müssen.

Ob eine Begrünung mit Efeu auch eine ausreichende Abschirmung gegen das kumuliert anfallende und abhängig vom Wind in bestimmten Fassadensegmenten konzentriert auftreffende Ablaufwasser das Daches gewährleistet, ist ebenfalls fraglich, insbesondere für die unter der Dachtraufe hervorragenden Strebepfeiler.

Aus diesem Grunde ist die Kombination der Fassadenbegrünung mit einer Dachentwässerung anzuraten.

Aufgrund eingeschränkter Belüftung der Oberfläche wird durch die Fassadenbegrünung die Abtrocknung des Mauerwerks nach außen behindert. Andererseits kann durch eine Senkung der relativen Luftfeuchte im Raum die Austrocknung des Mauerwerks über die Innenseite beschleunigt werden. Mittelfristig ist jedoch die bisher getestete geregelte Belüftung auf Unterdruckbasis für eine nachhaltige Senkung der Luftfeuchte im Raum nicht ausreichend. Bei der Weiterführung der Untersuchungen im Rahmen des Projekts Climate for Culture sind daher folgende grundsätzliche Möglichkeiten zu beurteilen:

- weitere Steigerung der Luftwechselraten durch den Einsatz von Ventilatoren;
- Kombination der geregelten Lüftung mit maschineller Entfeuchtung⁵⁴
- Feuchteregelung durch Beheizung bzw. Temperierung.

Für die Untersuchung der Auswirkung der weiteren Steigerung der Luftwechselraten und der maschinellen Entfeuchtung können mit verhältnismäßig geringem Aufwand Testaufbauten in das bestehende Meß- und Regelsystem integriert werden. Eine gegenüber der bisherigen Situation signifikante Erhöhung der Risiken für klimabedingte Schäden an Raumschale und Ausstattung ist dabei nicht gegeben.

Die Feuchteregelung durch Beheizung ist dagegen mit einem großen Risikopotential behaftet: Durch die Erwärmung ist mit einer verstärkten Verdunstung von Feuchte aus der Raumschale zu rechnen, die jedoch nicht aus dem Raum abgeführt wird. Neben einem höheren Risiko für Schäden durch Kristallisation leicht löslicher Salze ist deshalb mit zusätzlichen Kondensatproblemen zu

⁵³ Eine Versiegelung der verhältnismäßig großen Flächen durch die Verblechung behindert die Austrocknung des Mauerwerks. Eine hinterlüftete Konstruktion ist ihrerseits anfällig gegen Beschädigung durch das Dickenwachstum lichtflüchtender Triebe des Efeus.

⁵⁴ Kombination in alternativem Betrieb, d.h. Überbrückung der klimabedingten Lüftungspausen (bei zu hohen Luftfeuchten bzw. zu niedrigen Temperaturen des Außenklimas) durch maschinelle Entfeuchtung. Ein gleichzeitiger Betrieb würde Energieverschwendung zur Entfeuchtung der Außenluft bedeuten..

rechnen, sofern Raumschale und Ausstattung nicht gleichmäßig erwärmt werden. Selbst für den unwahrscheinlichen Fall, daß dies für alle empfindlichen Oberflächen gelingt, besteht das Risiko von Tauwasserausfällen innerhalb von Bauteilen. Da eine Beheizung gegenüber der maschinellen Entfeuchtung mit großer Wahrscheinlichkeit⁵⁵ auch die energetisch ungünstigere Lösung darstellt, sollen Anforderungen und Auswirkungen beider Verfahren zunächst durch hygrothermische Gebäudesimulation verglichen werden.

3.2 Zur Prävention der witterungsbedingten Durchfeuchtung des mittelalterlichen Backsteinmauerwerks

3.2.1 Zu Mechanismen der Feuchteaufnahme und des Feuchtetransports

Die Rasterfeuchtemessungen der oberflächennahen Mauerwerksbereiche zeigen sowohl innen, als auch und vor allem auf der Außenseite erhebliche Feuchtekonzentrationen im Bereich der Strebpfeiler. Die Feuchteverteilung an den Schildwänden läßt den Eintrag von Ablaufwasser des Daches als wesentliche Feuchtequelle vermuten.

In den Bereichen mit hohen Materialfeuchten im oberflächennahen Mauersegment⁵⁶ waren weiterhin deutliche Einschränkungen der kapillaren Wasseraufnahme über die äußere Bauwerksoberfläche festzustellen, die proportional zur gemessenen Durchfeuchtung bis zur vollständigen Blockade reichten.

Bei anschließenden Untersuchungen zu möglichen Ursachen für die Einschränkung der kapillaren Wasseraufnahme konnten jedoch, entgegen ersten Vermutungen, keine sperrenden bzw. wasserabweisenden Beschichtungen etc. nachgewiesen werden. Auch partiell vorhandene, durch Materialumlagerung bzw. –umbildung entstandene Horizonte (Kalk- und Gipskrusten) erklären die Behinderung des kapillaren Wassertransports nicht ausreichend. Gesamtfeuchtegehalte unterhalb der Sättigungsfeuchte⁵⁷, sowie deutliche Unterschiede in der kapillaren Wasseraufnahme ein und der selben Proben in situ und im Labor lassen auf Feuchtegradienten in Richtung Bauwerksoberfläche bis hin zur Wassersättigung des oberflächennahen Porenraumes schließen, die ebenfalls als Ursache für die Einschränkung der kapillaren Wasseraufnahme in situ in Betracht zu nehmen ist.

Insgesamt befand sich die Mauerfeuchte im Untersuchungsbereich sowohl in den entnommenen Proben, als auch über den gesamten Mauerquerschnitt weit im sogenannten überhygroskopischen Bereich, d.h. jenseits der größtmöglichen sich durch Sorption und Desorption mit der Umgebungsluft einstellenden Gleichgewichtsfeuchten. Daraus ist zu schließen, daß zumindest bis zur Einstellung der Kapillarblockade an der Oberfläche dauerhaft mehr flüssiges Wasser in das in das Mauerwerk eingetragen wurde, als daraus wieder verdunsten konnte. Es ist darüber hinaus anzunehmen, daß trotz der Kapillarblockade der Oberfläche weiterhin Wasser durch Risse und Spalten in das Mauerwerk eindringt.

Da die äußere Bauwerksoberfläche in der Regel⁵⁸ trocken erscheint und die Wasseraufnahme in situ im untersuchten Bereich auch bei andauernd trockener und warmer Witterung eingeschränkt bis

⁵⁵ Nach aktuellen Untersuchungen des Dänischen Nationalmuseums in vergleichbaren Bauten, vgl. [Larsen 2010].

⁵⁶ Aufgrund übereinstimmender Erfahrungen mit der eingesetzten Sonde (vgl. Anm. 16) ist davon auszugehen, daß bei den Feuchtemessungen maximal 5cm Mauertiefe erreicht, vor allem aber die Feuchte unmittelbar unter der Oberfläche abgebildet wurde.

⁵⁷ Freie Sättigung.

⁵⁸ Außer bei unmittelbarer Beregnung.

blockiert war, muß die Ursache für die oberflächennahe Wasseranreicherung zunächst in der Morphologie⁵⁹ bzw. dem hygrothermischen Zustand des Bauteils selbst gesucht werden⁶⁰.

Aus den Daten des Klimamonitorings ist deutlich ein Feuchteeintrag aus der Raumschale in die Raumluft ablesbar. Aufgrund der extrem hohen Feuchte der Raumluft, die sich phasenweise im Sättigungsbereich befindet, ist jedoch auch die Austrocknung der Mauern über die Innenseite stark eingeschränkt. Darüber hinaus kommt es auch raumseitig zur Kondensatbelastung des Mauerwerks. Ein deutlicher Materialfeuchtegradient in Richtung der inneren Maueroberfläche ist damit zu erklären.

Die Porenradialmaxima aller untersuchten Ziegel, sowie eines der zwei untersuchten Mauermörtel liegen im Bereich der Kapillarporen (10 nm – 10.000 nm). Das Mauerwerk kann somit als kapillar aktiv eingestuft werden⁶¹. Aufgrund der erreichten Wassersättigung der Poren dürfte der Kapillartransport jedoch bis zum Erliegen verlangsamt sein⁶².

3.2.2 Mögliche Auswirkungen einer Fassadenbegrünung

Das vergleichende Monitoring der Materialfeuchten der frei bewitterten und der mit Kunstlaub verhüllten Fassadenbereiche ergab einen Rückgang der Materialfeuchte im oberflächennahen Mauersegment⁶³ im verhüllten Fassadenbereich, der jedoch etwa 5 Monate nach Anbringen der Verhüllung zunächst stagnierte. Der Rückgang der Feuchte ist vermutlich eine Folge des Schutzes vor Schlagregen und Ablaufwasser durch die Verhüllung.

Vergleichsmessungen der Materialfeuchte im Tiefenprofil zeigen über eine Periode von August 2008 bis Juni 2010 einen leichten Rückgang der Feuchte an dem verhüllten Strebebfeiler, sowie eine leichte Zunahme der Feuchtigkeit an dem frei bewitterten Pfeiler.

Aufgrund einer geringeren Aufheizung durch Sonneneinstrahlung und vor allem durch das Zusammenwirken der eingeschränkten Belüftung und aus dem Mauerwerk verdunstender Feuchte ist die relative Feuchte der Luft im Nahfeld hinter der Camouflage im Mittel höher, als an der frei bewitterten Fassade. Dies führt über die Absenkung des Dampfdruckgefälles zu einer Behinderung der Abtrocknung über die äußere Bauwerksoberfläche und zu einer erhöhten Kondensatbelastung.

3.2.3 Mögliche Auswirkungen eines Außenputzes

Als Ergebnis der Diskussion der feuchtetechnischen Kennwerte des Mauerwerks und möglicher Verputze ist davon auszugehen, daß ein Verputz ohne Hydrophobierung zumindest keinen ausreichenden Schutz des Mauerwerkes vor Feuchteinträgen durch Schlagregen bieten würde. Selbst wenn es gelänge, durch die Einstellung der Porenradialverteilung eine gegenüber dem

⁵⁹ Nach [Krus 1995, S. 49 ff.] könnten Anomalien der Porenradialverteilung zu Plateaus in der Wassergehaltsverteilung im Tiefenprofil führen. In den bisher durch analytische Baustoffmikroskopie untersuchten Proben konnten keine signifikanten Anomalien der Porenstruktur festgestellt werden.

⁶⁰ Möglicherweise hat der Feuchtegehalt des Mauerwerks in Poseritz einen kritischen Wert überschritten, ab dem die Abtrocknung nach außen aus dem Bauteil heraus blockiert wird. Durch Risse und Spalten eindringendes Wasser würde so zu einem beschleunigten Anstieg einer dauerhaften Durchfeuchtung führen. Die dramatische Zunahme des Grünalgenbefalls auf der Innenseite wäre so zu erklären.

⁶¹ Vgl. Abb. 18, S. 55, sowie [Garrecht et al 2009, S. 48].

⁶² Vgl. 2, S. 8.

⁶³ Vgl. Anm. 26.

Mauerwerk signifikant höhere Saugspannung im Putz zu gewährleisten, würde dies bestenfalls⁶⁴ die Abtrocknung des Mauerwerks nach außen verbessern, jedoch nicht den kapillaren Feuchteintrag verhindern⁶⁵.

Der Vergleich der Ergebnisse der hygrothermischen Bauteilsimulation⁶⁶ zeigt zwar für fast alle untersuchten Fälle mit Außenputz eine gegenüber der unverputzten Außenseite geringere Durchfeuchtung des Mauerwerks. Dies läßt prinzipiell auch eine geringere Feuchteabgabe in die Raumluft vermuten. Dennoch wird in allen Fällen periodisch die freie Wassersättigung des Mauerwerks erreicht, in keinem Fall hat der Außenputz zu einer langfristigen Trocknung des Mauerwerks beigetragen⁶⁷.

Eine Hydrophobierung des Außenputzes bzw. der Deckputzlage behindert prinzipiell die Abtrocknung des Mauerwerks nach außen, da die Verdunstungszone hinter die Hydrophobierung verlagert wird und die hydrophobierte Schicht nur durch Dampfdiffusion überwunden werden kann⁶⁸. In den numerischen Simulationen der Entwicklung des überhygroskopischen Wassergehalts konnte in keinem der 8 untersuchten Fälle mit Hydrophobierung des Außenputzes eine positive Auswirkung auf die Entwicklung des Wassergehalts im Mauerwerk festgestellt werden⁶⁹.

3.3 Klimabeeinflussung durch geregelte Lüftung

In der ersten, im Mai 2009 begonnenen Testphase der geregelten Lüftung konnten durchschnittlich 14 Liter Wasser pro Tag entsprechend ca. 5.000 Litern pro Jahr aus der Kirche „herausgelüftet“ werden. Bereits im August 2009 gab es erste visuelle Anzeichen für eine phasenweise Trocknung der Raumschale: In der Südwestecke des Langhauses traten vermehrt Salzausblühungen auf, im Scheitel der Gewölbe von Chor und Langhaus kam es regelmäßig zu Abplatzungen von Kalktünchen, die sehr wahrscheinlich auf Salzkristallisationen infolge der Desorption von Feuchtigkeit aus dem Mauerwerk zurückzuführen waren. Gleichzeitig wurde das Raumklima von den Nutzern als wesentlich angenehmer empfunden. Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine Senkung der Konzentration von Pilzsporen in der Raumluft durch eine Steigerung der Luftwechselrate zurückzuführen⁷⁰. Während gegenüber dem Referenzzeitraum ein vor Inbetriebnahme der Lüftung ein leichter Rückgang der Materialfeuchte an der Oberfläche der Südwand zu verzeichnen ist, kann trotz Erhöhung der Luftwechselraten durch Optimierung der Luftführung⁷¹ bisher keine signifikant auf die Lüftung zurückzuführende Änderung der relativen

⁶⁴ Unter der Annahme, daß Feuchtigkeit aus dem Mauerwerk kapillar bis in den Putz transportiert wird, der Putz aufgrund seiner Porenradialverteilung einen kapillaren Sog auf das Mauerwerk ausübt und der Kapillartransport nicht durch Grenzschichtphänomene zwischen Putz und Mauerwerk behindert wird (vgl. auch Abb. 86, S. 94).

⁶⁵ Auch ein positiver Gradient der Saugspannung vom Mauerwerk in Richtung Putz würde sich im Falle der kapillaren Wasseraufnahme durch den Putz, beispielsweise bei einem Schlagregenereignis, umkehren, da mit der Sättigung der Poren deren Saugspannung gegen Null tendiert (prinzipiell würde bei gleichem Saugverhalten bzw. gleicher Porenradialverteilung von Putz und Mauerwerk das Mauerwerk solange Wasser aus dem Putz saugen, bis ein Ausgleich der Wassergehalte erreicht ist, s. a. Anm. 2, S. 8). Außerdem besteht eine direkte Proportionalität zwischen der Saugspannung und der kapillaren Wasseraufnahme über die Bauwerksoberfläche, d.h. ein Putz durch seine Porenradialverteilung gegenüber dem Mauerwerk saugend eingestellter Putz wird auch bei der kapillaren Wasseraufnahme über die Bauwerksoberfläche höhere Werte erreichen, als das unverputzte Mauerwerk (vgl. [Garrecht et al 2009, S. 50]).

⁶⁶ Vgl. Tabelle 9, S. 93

⁶⁷ Vgl. Abb. 38 bis Abb. 85, S. 37 ff., Fälle 1, 2, 4 und 5.

⁶⁸ Vgl. Ausführungen unter Punkt a) in Abschnitt 1.2, S. 7 ff.

⁶⁹ Vgl. Tabelle 9, S. 93, sowie Abb. 46 bis Abb. 85, S. 73 ff., Fälle 2, 3, 5 und 6.

⁷⁰ Neben einem frischeren Geruch der Raumluft wird über einen Rückgang allergischer Reaktionen berichtet („weniger Frösche im Hals“).

⁷¹ Vgl. Abschnitt 2.2.8, S. 19 ff.

Luftfeuchte festgestellt werden⁷². Offenbar wird die lüftungsbedingte Feuchteabfuhr bisher durch zusätzliche Feuchteemissionen aus den Wänden kompensiert.

Ob eine weitere Erhöhung der Luftwechselrate durch den Einsatz von Ventilatoren zu einer dauerhaften Senkung der relativen Luftfeuchte beitragen kann, wird bei der Weiterführung der Untersuchungen im Rahmen des Projektes Climate for Culture zu klären sein.

Bisher ist gegenüber dem Referenzzeitraum keine signifikant lüftungsbedingte Steigerung von Klimaschwankungen an den Meßpunkten im Nahfeld betroffener Oberflächen feststellbar. Bei den angesichts der hohen Feuchtelasten verhältnismäßig geringen Luftwechselraten kann jedoch nicht beurteilt werden, ob dies auf eine bestimmungsgemäße Funktion der Regelung, oder lediglich auf die klimatische Trägheit des Raumes zurückzuführen ist.

3.4 Erkenntnisse zu verwendeten Meßverfahren

3.4.1 Einsatzmöglichkeiten einer kapazitiven Tiefensonde aus der Bodenfeuchteanalytik für die Mauerwerksdiagnostik⁷³

Meßsystem/ Meßprinzip

Aufgrund positiver Erfahrungen der Konservierungsabteilung des Dänischen Nationalmuseums wurde⁷⁴ die kapazitive Tiefensonde PR2 auf ihre Eignung für die Mauerfeuchtediagnostik getestet. Die Sonde erfaßt Materialfeuchten über die Änderung eines elektrischen Feldes in Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten der umgebenden Materialien. Die Meßwerte werden als Spannung ausgegeben. Somit sind vergleichende Messungen möglich, für die Bestimmung absoluter Feuchtegehalte sind materialspezifische Kalibrierungen erforderlich⁷⁵. Verfälschungen der Meßergebnisse durch lösliche Salze sind nach Herstellerangaben vernachlässigbar⁷⁶.

Erfassungsbereich/ Empfindlichkeit/ Handhabung

Abhängig von der Baulänge der Sonde werden Mauertiefen bis 1000mm erreicht. Für die Messung muß eine Bohrung von 28mm Durchmesser bis 115 mm über die größte Meßtiefe ins Mauerwerk eingebracht und mit einem Schutzrohr ausgekleidet werden. Durch axiale Verschiebung der Sonde können die Tiefenprofile in beliebige Schritte aufgelöst werden. Aufgrund der Anordnung der Sensoren wird jedoch immer ein Bereich von ca. 4cm axialer Ausdehnung erfaßt, sodaß bei höheren Auflösungen nur gleitende

⁷² Der Mittelwert der relativen Luftfeuchte verharrte bei ca. 94% rF, über das Jahr 2010 war sogar ein unwesentlicher Anstieg auf 95% rF zu verzeichnen. Relativierend ist anzumerken, daß die Messungen im Nahfeld der Südwand und des Schalldeckels der Kanzel erfolgten. Obwohl für den Meßpunkt an der Südwand eine direkte Beeinflussung durch die Feuchteemissionen aus der Wand nicht ausgeschlossen werden kann, zeigten sich aber keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Meßpunkten.

⁷³ Dieser Abschnitt wurde in wesentlichen Punkten aus dem Abschlußbericht des Verfassers zum DBU-Projekt AZ 22116-45 übernommen, da die betreffende Sonde aufgrund der vergleichbaren Einsatzproblematik und der erforderlichen, an einem Objekt nicht verantwortbaren Anzahl von Testbohrungen hier parallel zu dem Projekt AZ 23375-45 in Poseritz getestet wurde.

⁷⁴ Nach freundlicher Empfehlung durch Poul Klenz Larsen.

⁷⁵ Die mitgelieferten Kalibrierkurven für organisches und mineralisches Erdreich ergaben am Mauerwerk tendenziell zu hohe Werte.

⁷⁶ Vgl. [Delta-T 2004], S. 26.

Mittelwerte über jeweils 4cm Mauertiefe ausgegeben werden⁷⁷. Tangential wird ein Sektor von ca. 260° erreicht⁷⁸, sodaß für eine umlaufende Erfassung der Materialfeuchte in jedem Tiefensegment mehrere Einzelmessungen erforderlich sind, für die die Sonde jeweils um ihre Achse gedreht wird. Abhängig von der Überdeckung der Sektoren bei den Einzelmessungen ergibt sich dabei auch tangential ein Durchschnittswert. Nach Herstellerangaben nimmt die Empfindlichkeit der Sonde radial mit zunehmender Materialtiefe exponential ab und tendiert jenseits eines Radius von 100mm Materialtiefe um die Sonde gegen Null⁷⁹.

Meßgenauigkeit/ Kalibrierung

Die Wiederholgenauigkeit bei der Feuchtemessung im Mauerwerk ist trotz händischer Zustellung in axialer und tangentialer Richtung unerwartet hoch. Bei einer Basis von über 2300 Wertepaaren blieb die Abweichung bei Wiederholungsmessungen mit 99%iger Wahrscheinlichkeit unter 4% des jeweils kleineren Meßwertes. Die Standardabweichung lag bei 0,7%⁸⁰, die maximale Abweichung betrug 10,4% des Meßwertes. Der maximale Offset der einzelnen Sensorelemente der Sonde lag bei den durchgeführten Testreihen bei 6,7% vom Mittel der Meßwerte⁸¹.

Probleme

Aufgrund der Differenzen der Dielektrizitätskonstanten von Luft und Wasser, sowie der mit zunehmender Entfernung exponential abnehmenden Empfindlichkeit der Sonde hat der Materialschluß zwischen Sondenschutzrohr und Mauerwerk (Wandung der Meßbohrung) einen großen Einfluß auf das Meßergebnis. Bereits bei einem umlaufenden Luftspalt von 2 bis 3mm waren erhebliche Abweichungen des Meßwertes festzustellen.

Präzise Bohrungen bis in Mauertiefen von 1100mm sind bei dem erforderlichen Durchmesser von 28mm selbst mit stationären, wassergekühlten Diamantbohrsystemen kaum zu erstellen. Dabei würde zudem⁸² unkontrolliert zusätzliches Wasser in das Mauerwerk eingebracht. Die Messung der Mauerfeuchten kann erst nach Einstellung eines Gleichgewichtes zwischen eingebrachter und vorhandener Feuchtigkeit im Mauerwerk beginnen, die Einstellung dieser Ausgleichsfeuchte müßte anhand von periodischen Messungen ermittelt werden. Zusätzlich können weitere Bohrungen zur stationären Befestigung des Bohrsystems erforderlich werden. Dies ist zumindest im Bereich sensibler Oberflächen problematisch.

Alternativ sind trockene Bohrungen mit Schlagbohrsystemen möglich. Neben dem u.U. schädigenden Eintrag von Schwingungen in das Mauerwerk führen hier Eigenschwingungen des Bohrsystems zu konischen Aufweitungen der Bohrung zur Oberfläche hin. Der daraus resultierende, sich mit zunehmender Tiefe der Bohrung verjüngende Luftspalt zwischen Sondenschutzrohr und Mauerwerk erschwert aufgrund der o. g. Zusammenhänge die Auswertung der Meßergebnisse. Zumindest sind die Werte einer Meßreihe im Tiefenprofil nicht direkt vergleichbar, sodaß nicht sicher auf Feuchtequellen (Beispielsweise Kondensat an der Oberfläche) bzw. Feuchteströme geschlossen werden kann. Vergleiche periodischer Messungen sind jedoch möglich.

Prinzipiell läßt sich dieses Problem durch die Verfüllung des Luftspaltes mit Injektionsmörtel lösen. Auch dabei wird jedoch in Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstanten der eingebrachten Reagenzien das

⁷⁷ Nach vom Verfasser experimentell bestätigten Herstellerangaben wird über diesem Bereich gleichmäßig die volle Empfindlichkeit des Systems erreicht, während außerhalb dieses Bereiches die Empfindlichkeit steil abfällt.

⁷⁸ Anhand der Anordnung der Sensorelemente auf dem Sondenstab geschätzt. Angaben des Herstellers liegen nicht vor.

⁷⁹ Vgl. [Delta-T 2004], S. 26.

⁸⁰ Bezogen auf die Wertepaare aller Sensorelemente. Die höchste Standardabweichung einzelner Sensorelemente lag bei 1% vom Meßwert.

⁸¹ Vgl. Abb. 14, S. 41.

⁸² Insbesondere bei Hohlräumen in Bereich der Bohrung

Meßergebnis beeinflusst, die Einstellung eines Feuchtegleichgewichtes zwischen Mauerwerk und Injektionsmörtel muß abgewartet und überwacht werden. Nach Einstellung dieses Gleichgewichtes werden die Meßwerte zusätzlich durch die gegenüber dem Mauerwerk abweichende Porengeometrie des Injektionsmörtels beeinflusst. Die Untersuchung der Ausgleichsfeuchten des Mauerwerks und des aufgrund seines Penetrationsvermögens zunächst verwendeten Injektionsmörtels Ledan D1 ergab ein wesentlich höheres Feuchtespeichervermögen des Injektionsmörtels, der somit auch zu einer Verfälschung der Meßergebnisse beiträgt⁸³. Zur Optimierung des Verfahrens ist deshalb die Untersuchung der Feuchtespeicherfunktion weiterer Verfüllmörtel erforderlich.

Bewertung

Anerkannter Stand der Technik bei Mauerfeuchteanalysen an Baudenkmalen ist die gravimetrische Feuchtemessung am Bohrkern oder Bohrmehl (Darrfeuchtemessung). Obwohl an sich unbestechlich, ist diese Methode anhand aktueller Untersuchungsergebnisse⁸⁴ zumindest für mittelalterliche Backsteinmauerwerke in Frage zu stellen. Offenbar schwankt hier das Wasseraufnahmevermögen aufgrund von Materialinhomogenitäten so stark, daß aus dem von einer singulären Bohrung erfaßten Volumen nicht sicher auf das umgebende Mauerwerk geschlossen werden kann. Angesichts der Systemgenauigkeit (s. o.) kann hier (in Abhängigkeit des zu präzisierenden Erfassungsbereiches und der Optimierung der Bohrung bzw. des Verfüllmörtels) die kapazitive Tiefensonde PR2 verlässlichere Ergebnisse liefern. Während gravimetrische Analysen an Bohrkernen bzw. –mehl nur Momentaufnahmen liefern, ermöglicht die Tiefensonde PR2 beliebig viele Wiederholungsmessungen und damit ein Langzeitmonitoring der Mauerfeuchte in großen Querschnitten.

Aufgrund der erforderlichen Materialschlüssigkeit ist der Aufwand für die Erstellung der Meßbohrung etwas höher, als für eine gravimetrische Feuchtemessung erforderlich. Die eigentliche Messung ist jedoch bei hoher Genauigkeit mit sehr geringem Aufwand durchzuführen: Die Messung eines Feuchteprofils über 1000mm Mauertiefe bei einer axialen Auflösung von 10mm und 60% tangentialer Überdeckung ist inklusive objektspezifischer tabellarischer und grafischer Auswertung in 1,5 Stunden zu realisieren⁸⁵.

3.4.2 Monitoring der Mauerfeuchte durch Widerstandsmessung mit Gipsblöcken

Bei der Kalibrierung im Labor stellte sich zunächst heraus, daß die eingesetzten Gipsblöcke vom Typ SOILMOISTURE G-BLOCK: 5201F1 im Anlieferungszustand nicht aushydratisiert waren. Auch nach erfolgter Hydratation waren bei Wassersättigung erhebliche Schwankungen der Empfindlichkeit festzustellen, die nicht mit der Temperaturabhängigkeit der Sonden zu erklären waren.

⁸³ Vgl. Abb. 19, S. 55

⁸⁴ Anhand der Gegenüberstellung von Ergebnissen der gravimetrischen Feuchtebestimmung am Bohrmehl mit den Ergebnissen der Vergleichsmessungen mit der kapazitiven Tiefensonde PR2 durch den Verfasser im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes AZ 23375 und der Masterarbeit von Anne Wilhelmi an der FH Potsdam vorgenommen wurden, ist davon auszugehen, daß aufgrund der Inhomogenitäten vorindustrieller Backsteine bei Darrfeuchtemessungen nicht von einer Bohrung auf das umgebende Mauerwerk geschlossen werden kann.

⁸⁵ Dabei werden insgesamt 504 Meßwerte ausgewertet, die Ausgabe erfolgt in drei jeweils um 120° versetzten Einzelprofilen, sowie einem daraus gemittelten Profil.

4 Diskussion

4.1 Fortschreibung der Projektkonzeption

Die ursprüngliche Projektkonzeption basierte entsprechend dem damaligen Erkenntnisstand und der bis zur Antragstellung 2002 absehbaren Schadensentwicklung auf der Annahme, daß sich der Feuchteeintrag in das Mauerwerk im Wesentlichen auf Schlagregen von außen und Kondensat von innen beschränkt. Dies sollte durch ein Monitoring der klimatischen Wechselwirkungen an Bau- und Ausstattungsoberflächen nachgewiesen werden. Die zu untersuchenden Präventivmaßnahmen waren auf die Entfeuchtung und Klimastabilisierung durch geregelte Lüftung begrenzt und Maßnahmen zum Schlagregenschutz des Mauerwerks Folgeprojekten vorbehalten worden. Die bei Projektbeginn im Mai 2007 zu verzeichnende Dynamik der Schadensentwicklung und das in der ersten Projektphase festgestellte Paradoxon im Feuchtehaushalt des Backsteinmauerwerkes erforderten eine Fortschreibung der Konzeption.

Aufgrund der dramatischen Zunahme des Grünalgenbefalls über die Südwand des Langhauses hinaus war eine Überprüfung der Konzeption für das Klimamonitoring geboten. Dafür war eine Abklärung der Zusammenhänge zwischen Algenbefall und Feuchteverteilung in der Fläche und im Mauerquerschnitt erforderlich.

Angesichts außergewöhnlich hoher Mauerfeuchtwerte und der Kapillarblockade im Bereich der äußeren Bauwerksoberfläche war eine Konzentration auf die Prozesse des Feuchteeintrages über die äußeren Bauwerksoberflächen und die Möglichkeiten zu deren Schutz vor Witterungseinflüssen geboten.

Das revidierte Konzept beinhaltet vergleichende Untersuchungen zu den Auswirkungen einer Fassadenbegrünung und einer Dachentwässerung auf den Feuchtehaushalt des mittelalterlichen Mauerwerks. Meßtechnisch bedeutete die vergleichende Untersuchung geschützter und ungeschützter Fassadenbereiche eine Verdoppelung der Meßpunkte mit identischen Meßaufbauten. Dies betrifft sowohl das Monitoring der klimatischen Wechselwirkungen an den Oberflächen, als die Überwachung von Änderungen der Materialfeuchte im Mauerquerschnitt. Zur Begrenzung von Mehrkosten wurde dafür die raumseitige Entfeuchtung durch geregelte Lüftung zunächst zurückgestellt.

Mit der Präzisierung der Erkenntnisse über die Feuchteverteilung im Mauerwerk konnte der Grünalgenbefall der inneren Bauwerksoberflächen zumindest anteilig auf die Rekondensation der aus dem Mauerwerk in den Innenraum abgegebenen Feuchte zurückgeführt werden. Aufgrund des erreichten Durchfeuchtungsgrades sind deshalb für die kurz- und mittelfristige Prävention des Algenbefalls auch feuchteregulierende Maßnahmen im Innenraum unverzichtbar.

Folgerichtig wurden bei der Fortschreibung der Projektkonzeption die Untersuchungen zur Eignung der geregelten Lüftung für die nachhaltige Schadensbeseitigung wieder aufgegriffen und die dafür zusätzlich erforderlichen Mittel beantragt.

Die zur Vorauswertung in der letzten Projektphase vorgenommene Synthese der Zwischenergebnisse des Klimamonitorings und der Ergebnisse des Monitorings der Mauerfeuchte⁸⁶ lieferte noch keine schlüssige Erklärung der Feuchtetransportvorgänge im Mauerwerk. Darüber hinaus ergab sich die Notwendigkeit, alternativ zur Begrünung die Auswirkungen eines Verputzes der Fassade zum Schutz vor witterungsbedingten Feuchteinträgen zu prüfen. Da für den Fall einer positiven Bewertung die Ausführung der Putzarbeiten im Bauabschnitt 2011 avisiert war, sollten außerdem die für den Verputz erforderlichen Materialparameter benannt werden. Zur Klärung dieser

⁸⁶ Vgl. Abb. 11, S. 39.

Fragestellungen erscheinen zusätzliche Untersuchungen zu feuchtetechnischen Kennwerten der Mauermaterialien unausweichlich. Für diese sehr aufwendigen Untersuchungen war die Akquisition externer Fachkompetenz und Laborkapazität erforderlich. Hier konnte das Fraunhofer Institut für Bauphysik Institutsteil Holzkirchen⁸⁷ kostenneutral als Kooperationspartner gewonnen werden.

Auch nach Vorlage und Diskussion der feuchtetechnischen Kennwerte des Mauerwerks und möglicher Verputze erschien eine verantwortungsvolle Abwägung zwischen Begrünung und Verputz der Fassade sehr gewagt. Während bei der grundsätzlich reversiblen Begrünung vor allem die Folgen einer verzögerten Austrocknung des Mauerwerks für den Innenraum zu bedenken waren, standen bei einem Verputz neben der optischen Veränderung des Bauwerks sowohl die Reversibilität, als auch die Wirksamkeit in Frage⁸⁸. Hier erschien die Überprüfung durch numerische Simulation der Entwicklung des überhygroskopischen Wassergehalts im Mauerwerk als geeignetes Mittel, um zu einer abschließenden, und vor allem in dem anstehenden Bauabschnitt 2011 umsetzbaren Entscheidung zu gelangen. Dafür war erneut und sehr kurzfristig die Akquisition externer Fachkompetenz erforderlich. Hier konnte das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Darmstadt⁸⁹ als Kooperationspartner gewonnen werden.

Die durch Testaufbauten zum Schutz der Fassaden vor witterungsbedingter Feuchtebelastung und zur Senkung der Raumlufffeuchte am Bauwerk zu erreichenden Veränderungen verlaufen so langsam, daß auch in der Verlängerung des Projektzeitraums keine abschließende Bewertung möglich ist. Die Untersuchungen werden deshalb im Forschungsprojekt Climate for Culture innerhalb des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Union bis 2014 weitergeführt. Gleichwohl können aufgrund der vorliegenden Ergebnisse im Bauabschnitt 2011 bereits Maßnahmen zum Schutz der Gebäudehülle vor witterungsbedingter Feuchtebelastung ergriffen werden.

Nachdem sich erst im Verlauf des Projektes die Notwendigkeit von Untersuchungen mittels hygrothermischer Gebäudesimulation ergab, konnten mit der Einbeziehung des Fraunhofer Institutes für Bauphysik und des Fachgebietes Werkstoffe im Bauwesen der TU Darmstadt aktuelle Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet in das Projekt einfließen. Mit der Weiterführung der Untersuchungen im Projekt Climate for Culture ist dies, ebenso wie eine hochkarätige wissenschaftliche Begleitung auch weiterhin gewährleistet.

4.2 Probleme mit angewandten Untersuchungsmethoden

Ausgehend von den spezifischen Anforderungen des Projektes mußten Meßaufbauten zur Erfassung von Klimaparametern neu entwickelt, oder durch erstmalige Adaption von Meßelementen realisiert werden, die für andere Einsatzzwecke konzipiert wurden. Dabei waren vereinzelte Fehlschläge nicht auszuschließen.

Besondere Probleme bereitet die meßtechnische Erfassung der Gesamtregenbelastung der Fassaden. Die Aufgrund der Höhe der eingesetzten Auffangbleche von über 8m auftretende Beschleunigung ablaufender Regentropfen führt bereits an kleineren Unebenheiten der Bleche zum Absprengen der Tropfen, die somit nicht zur Zählung in den Niederschlagsgeber gelangen. Obwohl

⁸⁷ In persona Dr. Ing. Martin Krus und Dipl. Restaurator (Univ.) Ralf Kilian.

⁸⁸ Vgl. Abschnitt 3.4.1, S. 26 ff.

⁸⁹ In persona Prof. Dr. Ing. Harald Garrecht und Dipl. Ing. Simone Reeb.

die Konstruktion der Auffangbleche deshalb zweimal mit großem Aufwand verändert wurde, konnte das Problem nicht gelöst werden⁹⁰. Im Zuge der Fortführung der Untersuchungen im Projekt Climate for Culture wird deshalb⁹¹ auf eine rechnerische Bilanzierung der Regenbelastung orientiert. Gleichwohl wurden die Auswirkungen einer Dachentwässerung bei der vergleichenden Untersuchung frei bewitterter und geschützter Fassadenbereiche erfaßt, da letztere gegen das Ablaufwasser des Daches abgeschirmt wurden.

Obwohl für das Monitoring der Mauerfeuchte sehr hochwertige Gipssonden eines renommierten Herstellers eingesetzt wurden, lieferten diese zunächst keine stabilen Meßwerte⁹².

Aufgrund der Kondensatbelastung im Innenraum und der Witterungsexposition der Südfassade kam es vereinzelt zu Ausfällen von Sensoren und Datenloggern.

Im Ergebnis der von externen Konsultanten erbrachten Untersuchungen zur Validierung der kapazitiven Mauerfeuchtemessungen im Tiefenprofil erschien eine Optimierung der eingesetzten Verfüllmörtel geboten⁹³. Dazu ergänzend erforderliche Untersuchungen zur Feuchtespeicherfunktion alternativer Mörtel konnten im Projektzeitrum nicht mehr kostenneutral realisiert werden. Die vergleichenden Untersuchungen zum Einfluß aufsteigender Feuchte wurden deshalb zurückgestellt. Sie werden im Zuge der Weiterführung der Untersuchungen im Rahmen des Projektes Climate for Culture erbracht.

5 Öffentlichkeitsarbeit, Dissemination und Fortführung der Projektvorhaben

Aufgrund der langsamen Reaktion des Bauwerkes auf getestete Präventions- und Sanierungsmaßnahmen, sowie aufgrund unerwarteter und im Rahmen des Projektes nicht abschließend zu beantwortenden Fragestellungen werden die Untersuchungen im Forschungsprojekt Climate for Culture innerhalb des 7. Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Union bis 2014 weitergeführt. Die Projektergebnisse werden anschließend zusammen mit dem Ergebnissen des DBU-Forschungsprojektes AZ 22116-45 „Sanierung durch Rauchgas- und Nitratemissionen geschädigter Wandmalereien in der Marienkirche zu Bergen auf Rügen“ in einem projektübergreifenden öffentlichen Kolloquium vorgestellt. Dazu werden Fachvorträge und Präsentationen der einzelnen Projektbereiche und –beteiligten vorbereitet.

Der Abschlußbericht wird zunächst über die Online-Datenbank hericare des Hornemann–Instituts des Fachbereichs Konservierung und Restaurierung der HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen veröffentlicht.

Über den Projektabschluß hinaus sind weitere Publikationen der Projektergebnisse, sowie deren Vorstellung in Fachvorträgen vorgesehen.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse des Projektes werden unmittelbar durch die Kirchengemeinde bei anstehenden Maßnahmen zur Sanierung der Raumschale und der Gebäudehülle umgesetzt.

⁹⁰ Eine alternativ denkbare Aufteilung in Einzelsegmente geringerer Höhe war aus Kostengründen nicht realisierbar, da für jedes Segment sowohl ein zusätzlicher Sensor, als auch ein weiterer Speicherkanal im Datenlogger erforderlich gewesen wäre.

⁹¹ In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen und Glasgow Caledonian University

⁹² Vgl. Abschnitt 3.4.2.

⁹³ Vgl. Abschnitt 3.4.1.

Da die Probleme an der Kirche Poseritz exemplarisch die an den ungeheizten Backsteinkirchen Norddeutschlands insgesamt zu erwartenden Folgen regionaler Klimaänderungen zeigen, sind die im Rahmen des Projektes gefundenen Problemlösungen modellhaft für den vergleichbaren Gebäudebestand der Region.

6 Fazit

Angesichts der komplexen praxisrelevanten Problemstellung hat sich die integrierte Untersuchung von Schadensmechanismen und Auswirkungen denkbarer Sanierungsvorschläge als gangbarer Weg hin zu modellhaft umsetzbaren Projektergebnissen erwiesen. Die durch Aufteilung in konsekutive Projektabschnitte bedingte Verlängerung der Laufzeit hat sich ausgezahlt, weil auf diese Weise auf Zwischenergebnisse, veränderte Rahmenbedingungen und aktuelle Forschungsergebnisse rechtzeitig mit der Fortschreibung der Konzeption reagiert und somit ein sehr effektiver Einsatz der Projektressourcen gewährleistet werden konnte.

Im Zuge der Fortschreibung der Konzeption über die Ressourcen der Projektgruppe hinaus erforderliche externe Fachkompetenz und Laborkapazität konnte kostenneutral akquiriert werden.

Durch Verzahnung mit dem Europäischen Forschungsprojekt Climate for Culture konnte die weitere Bearbeitung von Probleme gesichert werden, die aufgrund technischer Schwierigkeiten und finanzieller Grenzen innerhalb der Projektlaufzeit nicht abschließend geklärt werden konnten. Auf diese Weise ist auch eine hochkarätige wissenschaftliche Begleitung des Vorhabens weiterhin gewährleistet.

Anhang

7 Quellen- und Literaturverzeichnis

7.1 Ungedruckte Quellen

- Delta-T 2004 Delta-T devices (Hrsg.). User Manual for the Profile Probe type PR2. Cambridge 2004
- Krus 1995 Krus, M. Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralische Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Diss. Universität Stuttgart (1995)
- Larsen 2010 Larsen, P. K.. Low energy climate control in historic buildings. Conservation heating or dehumidification? Online im Internet unter <http://www.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/oslo/KlenzLarsenOslo2010.pdf> im April 2011
- NOAH'S ARK 2007 NOAH'S ARK. GLOBAL CLIMATE CHANGE IMPACT ON BUILT HERITAGE AND CULTURAL LANDSCAPES. DELIVERABLE 12. PRODUCTION OF THE VULNERABILITY ATLAS. Institute of Atmospheric Sciences and Climate - National Research Council (Italy) April 2007
- Weiß 2009 Weiß, A.. Abschlußbericht zum Forschungsprojekt AZ 22116-45 der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Bergen 2009
- Wilhelmi 2008 Wilhelmi, A.. Vergleichende Analyse verschiedener Feuchtemessverfahren zur Ermittlung des Flächen- und Tiefenprofils im Mauerwerk. Masterarbeit. Fachhochschule Potsdam, Fachbereich Bauingenieurwesen. Potsdam 2008.

7.2 Gedruckte Quellen

- Ak Fassadenbegrünung 2000 Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanze. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (Hrsg.) Bonn 2000, zitiert nach: Leitfaden zur naturverträglichen Restaurierung von historische bedeutsamen Mauerwerk aus Sand- und Kalkstein. Ökologische Bildungsstätte Oberfranken (Hrsg.) , S. 36
- Becker 2004 Becker, K.-H.. Änderungen der Atmosphäre im globalen Wandel – Bedeutung für den Erhalt der Kulturgüter. In: Brickwedde, F. und Weinmann, A. (Hrsg.): „Nachhaltiger Schutz des kulturellen Erbes – Umwelt und Kulturgüter.“ Berlin 2004, S. 37-56.
- Garrecht et al 2009 Garrecht, H., Reeb, S., Berk, K.. Experimentelle und numerische Untersuchungen zur feuchtetechnischen Wirkung von Putzsystemen auf feuchtebelastetem Mauerwerk. In: Feuchteschutz am Baudenkmal . IFS-Tagung. IFS-Bericht Nr. 34 – 2009. Mainz 2009, S. 45 bis 56
- Großeschmidt 2004 Großeschmidt, H. Das Temperierte Haus: Sanierte Architektur – behagliche Räume – „Großvitrine“. In: Kotterer, M., Großeschmidt, H. und Kippes, W.. Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wien 2004, S. 325 bis 381
- Holdefer 1999 Holdefer, M.. Relative Dielektrizitätskonstante ϵ_r (DK-Werte) von flüssigen und festen Medien. Weil am Rhein 1999

- Käferhaus 2004 Käferhaus, J.. Kartause Mauerbach: Auf der Suche nach der schadenspräventiven Heizung für historische Gebäude. Vergleich von sechs unterschiedlichen Wärmeverteilungssystemen und deren Auswirkungen auf die Räume. In: Kotterer, M., Großes Schmidt, H. und Kippes, W.. Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wien 2004, S. 269 bis 323
- Kießl/ Rath 1989 Kießl, K., Rath, J.. Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf den Wärme- und Feuchtehaushalt von Außenwänden und Schadensrisiko. Holzkirchen 1989.
- Krus/ Holm 1999 Krus, M., Holm, A.: Approximationsverfahren für die Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte. Proceedings 10. Bauklimatisches Symposium Dresden, 27.-29. September 1999, S. 423-432.
- Vielhaber et al. 2009 Vielhaber, J., Brokmann, T., Eckermann, W.. Klimastabilisierung in temporär genutzten Gebäuden. In: Djahanschah, S. (Hrsg.). Erhalt temporär genutzter Gebäude. Berlin 2009, S. 53 bis 89

7.3 Abbildungsnachweis

Max-Planck Institut für Meteorologie Hamburg: Abb. 5 und Abb. 6
 Reeb, S., TU Darmstadt: Abb. 23 bis Abb. 85
 Schlütter, F., MPA Bremen: Abb. 18 bis Abb. 19
 Weiß, A., Gingst: Abb. 1 bis Abb. 4, Abb. 7 bis Abb. 17, Abb. 21, 22:, Abb. 86

8 Anlagen, Abbildungen, Tabellen und Diagramme

8.1 Ausgangssituation, Randbedingungen

8.1.1 Bauwerk



Abb. 1: Grünalgenbefall an der Südwand des Langhauses im Sommer 2007. In den Bereichen mit freiliegender Mauerwerksoberfläche wurde 1995 eine zementäre Putzschlamm entfernt.



Abb. 2: Südwand des Langhauses, 1. Achse. Infolge des geringen Dachüberstandes und der fehlenden Dachentwässerung sind die Strebepfeiler vollständig dem Ablaufwasser des Daches ausgesetzt. Ein besonderes Problem stellen dabei die schrägen Flanken der vermutlich im 18. Jahrhundert ergänzten Pfeiler in der 1. und 2. Achse dar.



Abb. 3: Maueroberfläche an der schrägen Pfeilerflanke in der 2. Achse der Südwand des Langhauses im August 2007. Bereits 5mm unter der trocken erscheinenden Oberfläche ist mit bloßem Auge die Nässe im Mauerwerk erkennbar.



Abb. 4: Auch bei den Probeentnahmen zur gravimetrischen Feuchtebestimmung stößt man wenige Millimeter unter der Oberfläche auf flüssiges Wasser (Zustand im Dezember 2007, die hier ermittelten Feuchtwerte in Tabelle 5, S. 48)

8.1.2 Bewitterung

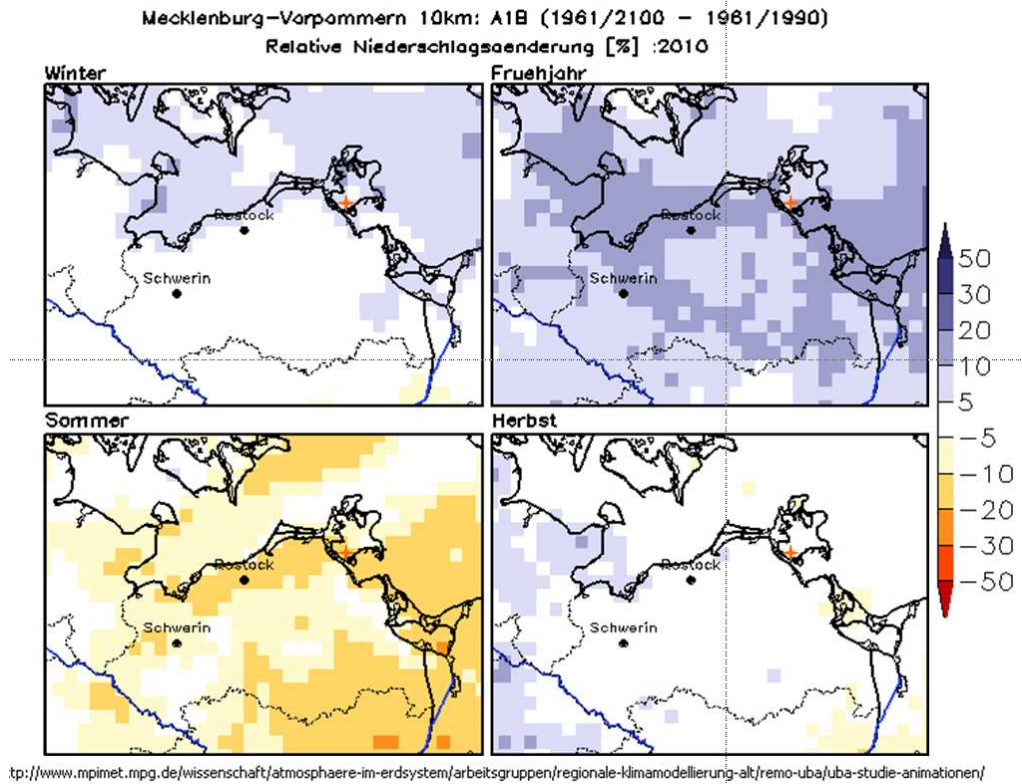


Abb. 5: Für das Jahr 2010 berechnete Änderung der mittleren saisonalen Niederschlagsmengen in Mecklenburg Vorpommern gegenüber den 30-jährigen Mittelwerten der Klimanormalperiode 1961/ 1990 (Vom Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg im Rahmen des Projekts Climate for Culture zur Verfügung gestellte Daten). Für den mit einem roten Kreuz markierten Standort Poseritz wird in Winter und Frühjahr eine Zunahme der Niederschlagsmengen ausgewiesen.

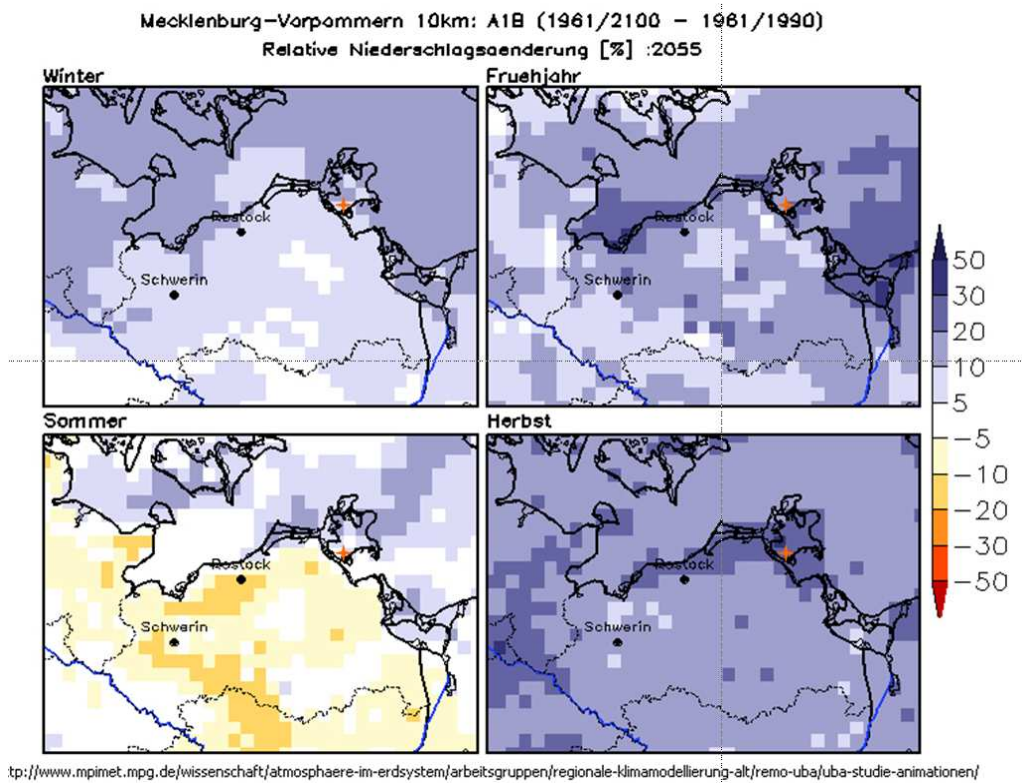


Abb. 6: Für das Jahr 2055 prognostizierte Änderung der mittleren saisonalen Niederschlagsmengen in Mecklenburg Vorpommern gegenüber den 30-jährigen Mittelwerten der Klimanormalperiode 1961/ 1990 (Vom Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg im Rahmen des Projekts Climate for Culture zur Verfügung gestellte Daten). Für den mit einem roten Kreuz markierten Standort Poseritz wird über das ganze Jahr eine Zunahme der Niederschlagsmengen prognostiziert..

8.2 Materialkundliche Untersuchungen

8.2.1 Rasterfeuchtemessung mit dem Mikrowellenmeßsystem Moist 200B[®]

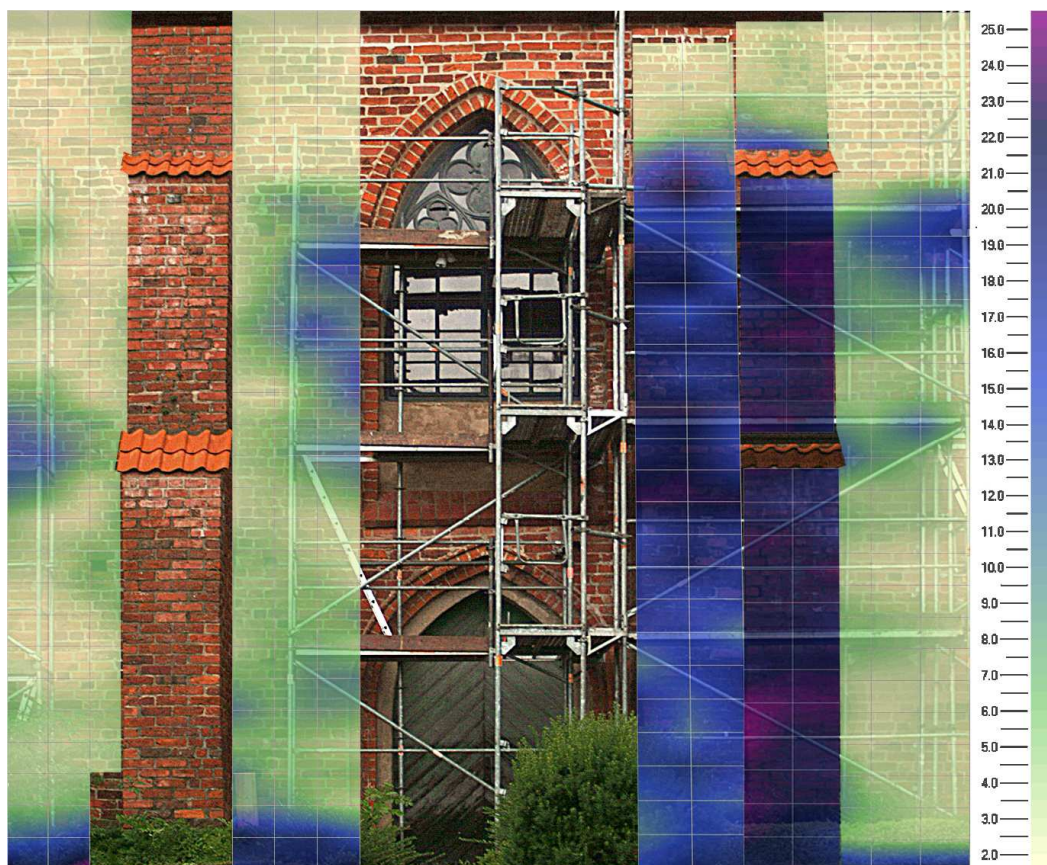


Abb. 7: Ergebnisse der Rasterfeuchtemessung mit dem Mikrowellenmeßsystem Moist 200B[®] auf der Außenseite der Südwand im Bereich der Strebpfeiler zwischen dem 2. und 3. Langhausjoch. Besonders erhöhte Feuchtwerte sind im Bereich der Strebpfeiler, an den Schildwänden in ca. 4 bis 7m Höhe, sowie im Sockelbereich zu erkennen. Während letztere auf Spritzwasser zurückzuführen sein dürften, kann bei den übrigen Durchfeuchtungen ein direkter Einfluß des Auflaufwassers des Daches angenommen werden. Die Meßwerte sind in Volumenprozent angegeben, die Messung erfolgte mit der Kalibrierung „Altziegel“. Da dieser Kalibrierung mit $1,2\text{Kg}/\text{dm}^3$ zumindest keine repräsentative Rohdichte zugrunde liegt, handelt es sich eher um relative, als um absolute Werte.



Abb. 8: Untersucher Bereich der Südfassade des Langhauses aus Abb. 7. Die Pfeile markieren jeweils die Lage der Meßstellen für Klima- und Materialfeuchtwerte an den mittelalterlichen Strebpfeilern beidseits der mittleren Achse. Der Wandbereich zwischen Tür- und Fenstergewänden und dem rechten mittelalterlichen Strebpfeiler ist durch einen schräg gestellten Strebpfeiler vermutlich aus dem 18. Jahrhundert verdeckt. Der überwiegende Teil der schrägen Flanke des Pfeilers ragt unter dem Dachüberstand hervor und ist somit auch der Feuchtebelastung durch Normalregen ausgesetzt.

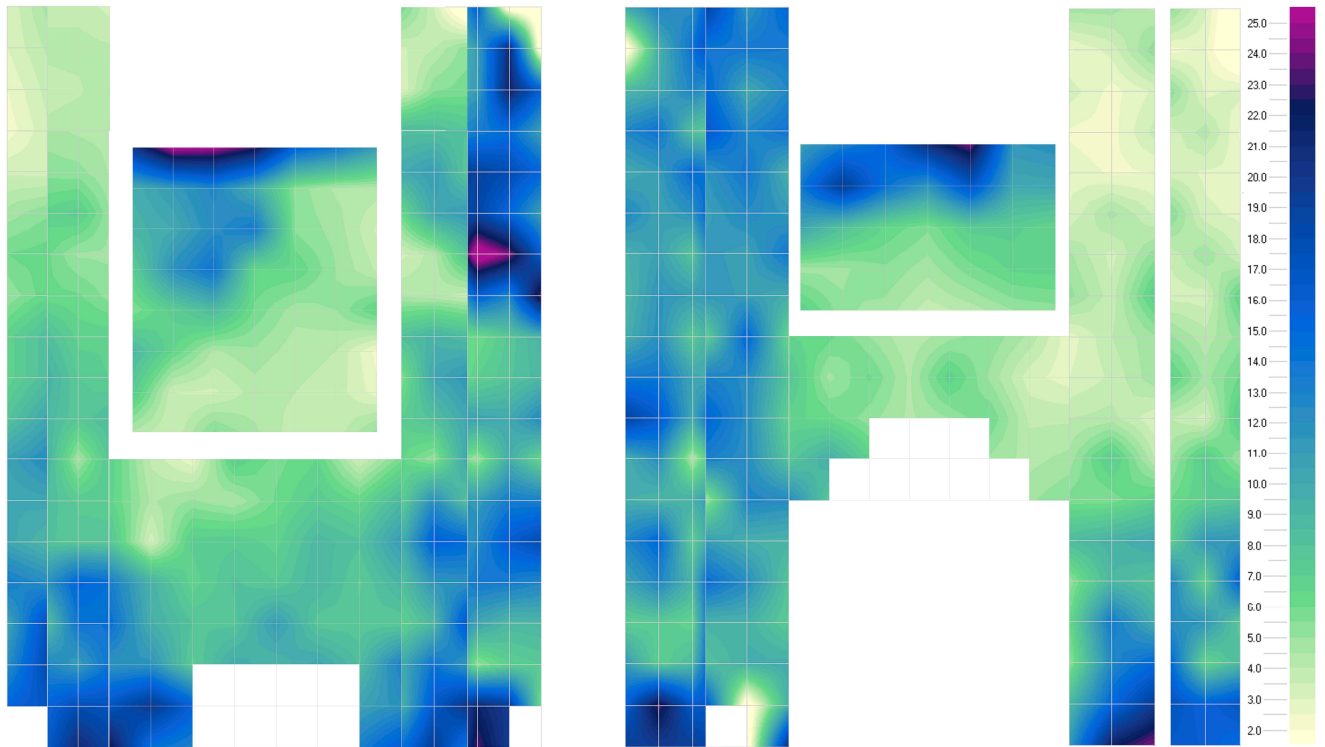


Abb. 9: Ergebnisse der Rasterfeuchtemessung mit dem Mikrowellenmeßsystem Moist 200B® auf der Innenseite der Südwand im Bereich der Schildwände im 2. und 3. Langhausjoch. Besonders erhöhte Feuchtwerte sind in den an die Strebepfeiler anschließenden ca. 1m starken Wandbereiche, an den Fensterbrüstungen, sowie im Sockelbereich zu erkennen.



Abb. 10: Grünalgenbewuchs an Südwand im Bereich des Pfeilers zwischen dem 2. und 3. Langhausjoch. Ein Vergleich mit Abb. 9 zeigt keine durchgehende Korrelation zwischen Algenbewuchs und Materialfeuchte. Dies kann beispielsweise an abweichenden Materialfeuchten an der für den Algenbewuchs relevanten unmittelbaren Oberfläche liegen, da durch die Mikrowellensonde prinzipiell Materialfeuchten bis in 30cm Tiefe erfaßt werden. Insbesondere im Bereich der auf ca. 50cm ausgedünnten Wandbereiche der Fensterbrüstungen könnte gegenüber den mutmaßlich dauerfeuchten stärkeren Wandbereichen auch eine periodische Abtrocknung das Algenwachstum erschweren.

8.2.2 Monitoring der Materialfeuchte

8.2.2.1 Periodische Messungen im Tiefenprofil mit der kapazitiven Sonde PR2/6

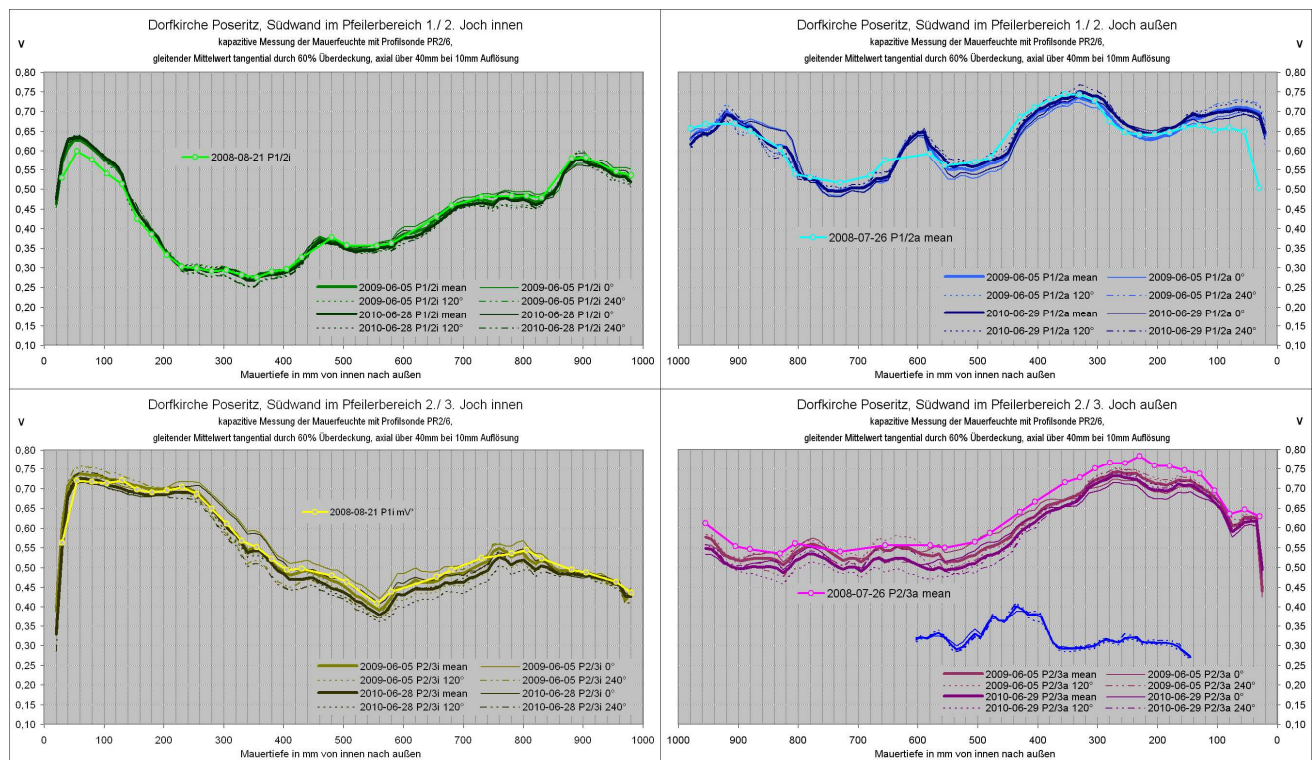


Abb. 11: Feuchteprofile über den gesamten Mauerquerschnitt im Pfeilerbereich von innen (links) nach außen (rechts). Über einen Zeitraum von drei Jahren zeigt sich an dem verhüllten Pfeiler (unteres Profil) eine leichte, aber eindeutige Tendenz zur Abtrocknung. Mit Ausnahme der Inneren Mauerschale ist diese Tendenz über den gesamten Mauerquerschnitt zu beobachten. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der numerischen Simulation (Abb. 38 bis Abb. 85, S. 69 ff.), die während der Trocknungsphasen ebenfalls eine gleichmäßige Verteilung der Feuchte über den Mauerquerschnitt zeigen. Die stagnierenden Feuchtwerte im Bereich der inneren Mauerschale sind vermutlich auf die Rekondensation von Feuchte aus der Raumluft zurückzuführen. An dem frei bewitterten Pfeiler stagniert die Feuchtebelastung dagegen über den gesamten Mauerquerschnitt, im Bereich der Mauerschalen ist sogar eine zunehmende Durchfeuchtung zu beobachten. Da aufgrund der ausstehenden Kalibrierfunktion für den Einsatz der Sonde im Mauerwerk bisher keine absoluten Feuchtwerte bestimmt werden können, wird die relative Änderung der Durchfeuchtung abgebildet. Zur Einordnung der Feuchtwerte ist im Diagramm unten rechts ein mit der selben Sonde im mittelalterlichen Backsteinmauerwerk der Westwand des Südquerhauses der ca. 15km entfernten Marienkirche in Bergen aufgenommenes Feuchteprofil abgebildet. Aufgrund der Ausgleichfeuchten des Mauerwerks und des zur Gewährleistung des Materialkontakts eingesetzten Verfüllmörtels (vgl. Abb. 12, Abb. 19 und Abschnitt 3.4.1) wird das Feuchteprofil bis ca. 50cm von den Maueroberflächen mit in das Mauerinnere abnehmender Tendenz überhöht dargestellt.

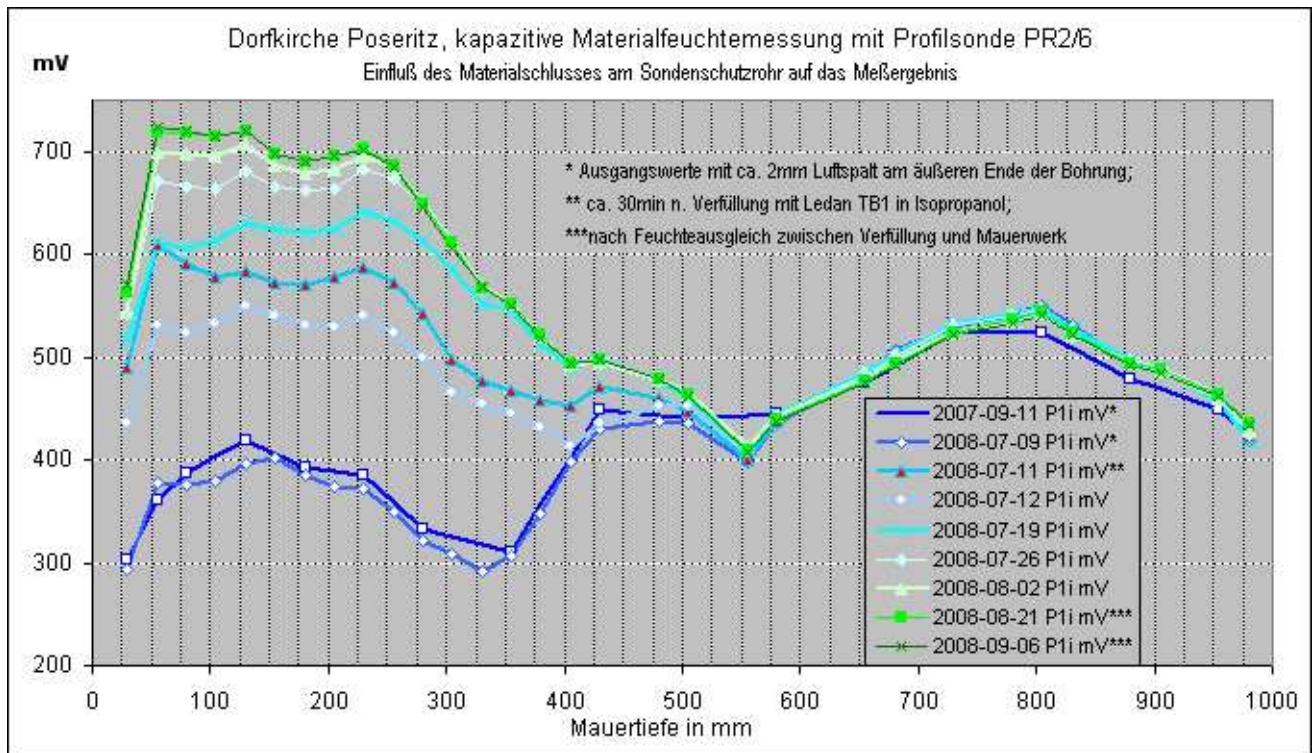


Abb. 12: Einfluß des Luftspaltes bzw. des Verfüllmörtels im oberflächennahen Bereich der Bohrung (links). Bei unverfülltem Luftspalt zwischen Sondenschutzrohr und Meßgut (=fehlender Materialschluß, dunkelblaue Graphen) werden tendenziell gegenüber der tatsächlichen Mauerfeuchte zu niedrige Werte angezeigt. Nach Verfüllung des Luftspaltes und Einstellung der Ausgleichsfeuchte zwischen dem Meßgut Mauerwerk und dem Verfüllmörtel (grüne Graphen) werden tendenziell zu hohe Werte angezeigt, da der Mörtel im Gleichgewichtszustand bis zu 3 mal mehr Wasser als das Mauerwerk aufnimmt (vgl. Abb. 19)

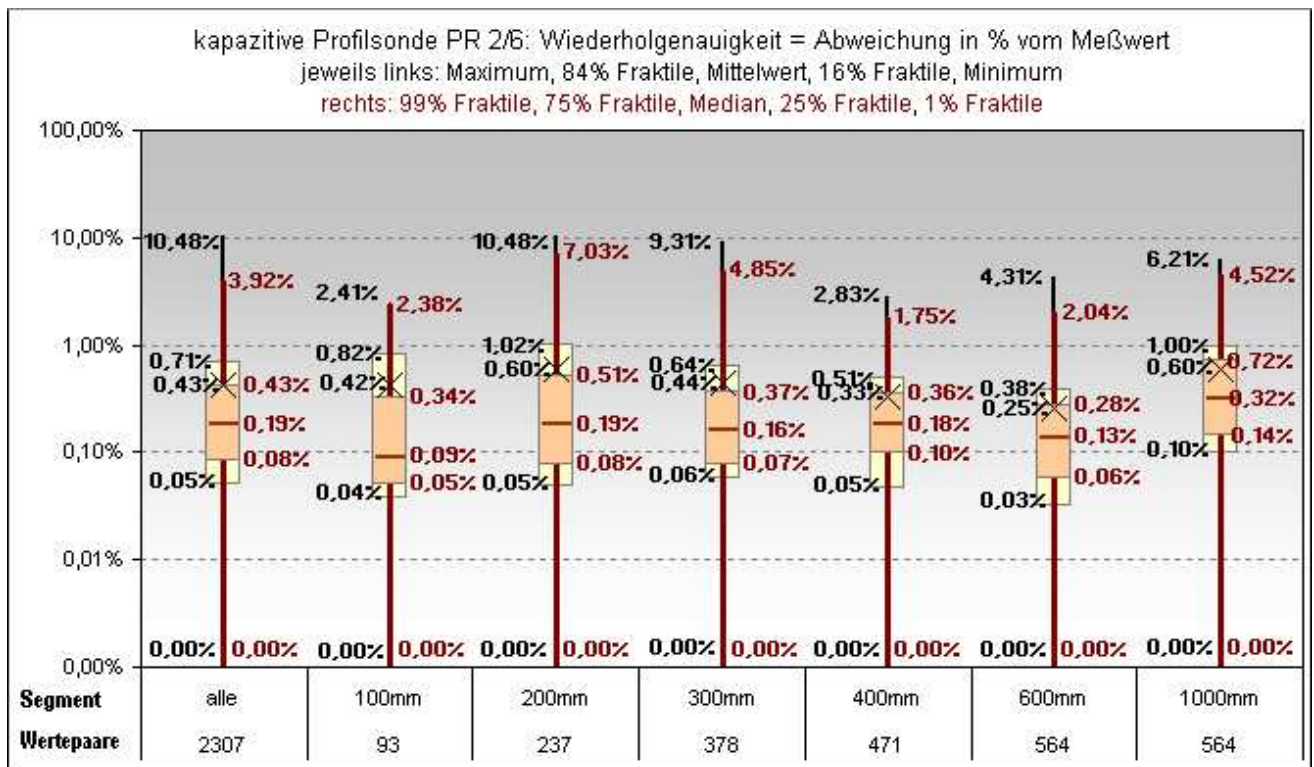


Abb. 13: Wiederholgenauigkeit der einzelnen Sensoren der Sonde bei händischer Zustellung in statistischer Auswertung (Boxplots)

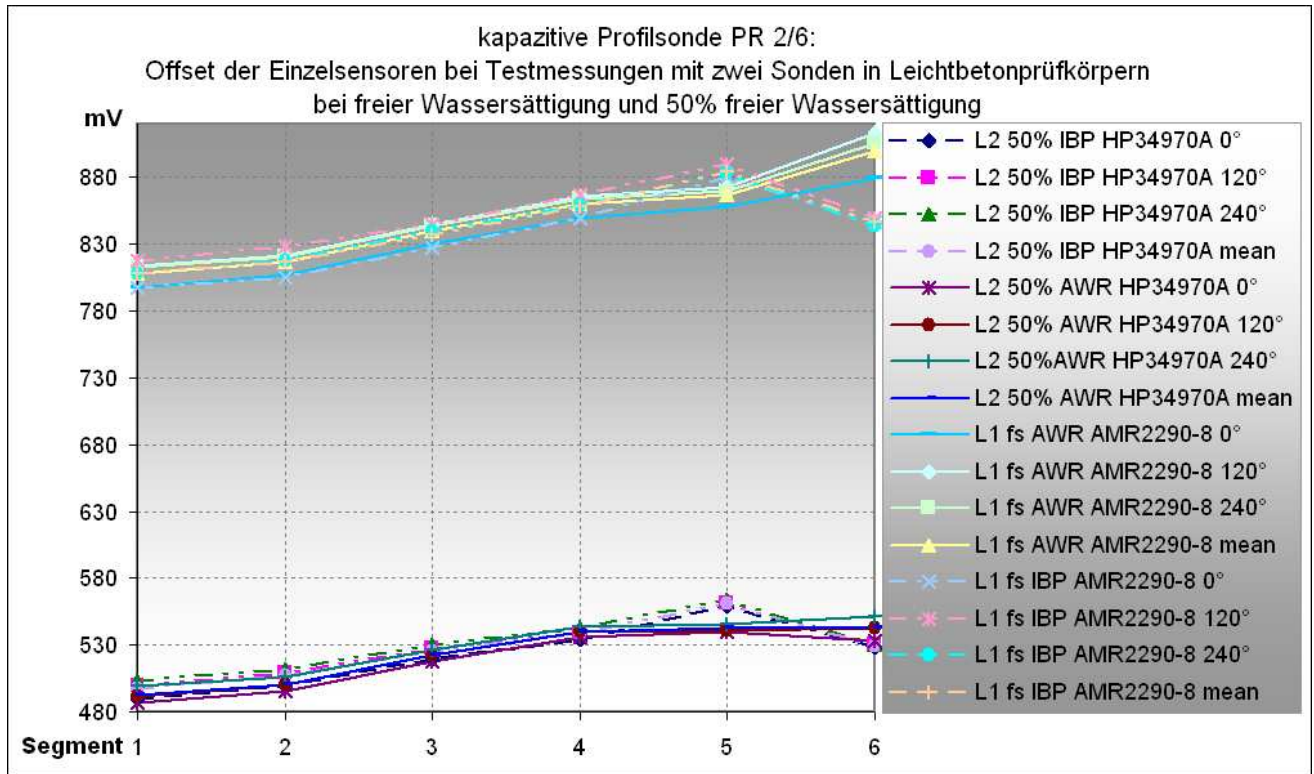


Abb. 14: Offset der Einzelsegmente von zwei PR 2/6 - Sonden im Vergleich. Beide Sonden zeigen unterschiedliche Charakteristika in den Segmenten 5 (60cm) und 6 (100cm). Für die Messungen in Poseritz wurde die Sonde mit den Bezeichnungen AWR HP23970A bzw. AMR AMR2290-8 eingesetzt.

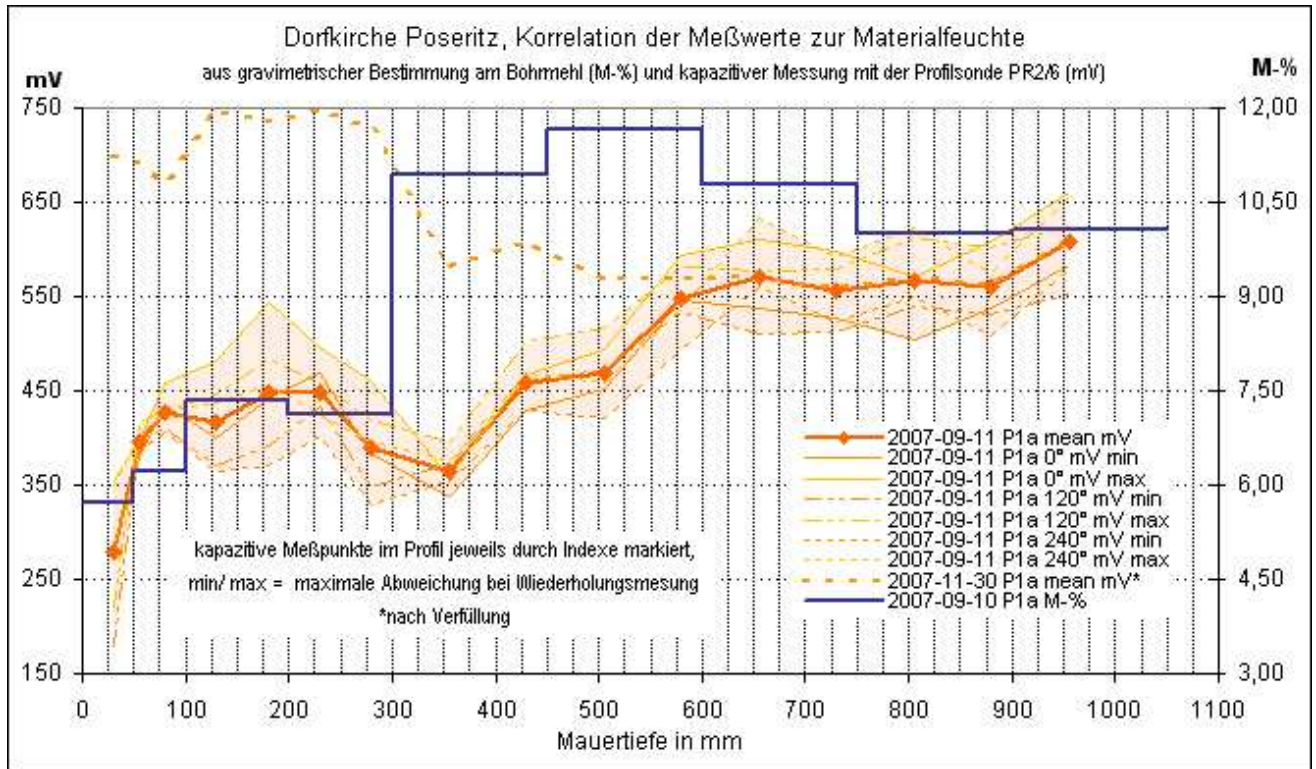
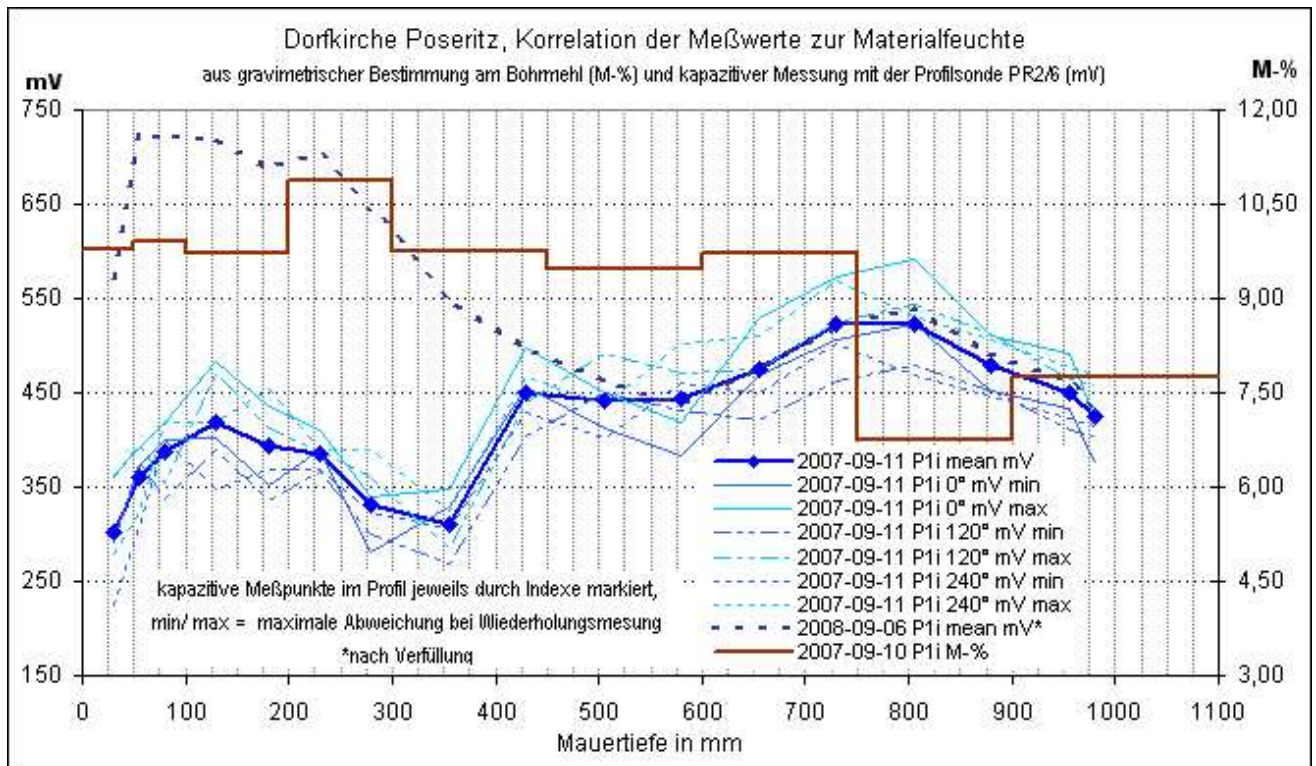


Abb. 15, 16: Vergleich der kapazitiv gemessenen Feuchteprofile mit den gravimetrisch am Bohrmehl aus der Meßbohrungen bestimmten Materialfeuchtwerten. Weder in den durch Luftspalt bzw. Verfüllmörtel verfälschten vorderen Bereichen, noch in den hinteren Bereichen der Bohrung mit direktem Materialschluß sind eindeutige Korrelationen der Meßwerte beider Verfahren erkennbar. Die Ursache ist sehr wahrscheinlich eine geringere Empfindlichkeit des kapazitiven Verfahrens gegenüber Materialinhomogenitäten, da hier gegenüber der gravimetrischen Messung ein deutlich größeres Mauervolumen erfaßt wird. Die mit „...mean...“ bezeichneten Graphen bilden Mittelwerte aus jeweils 3 radial mit ca. 60° Überdeckung um 120° versetzte Einzelmessungen ab. Die mit „...min“ und „...max“ beschrifteten Graphen bilden die Meßwerte dieser Einzelmessungen unter Berücksichtigung in Abb. 13 dargestellten maximalen Abweichungen ab. Die Spreizung zwischen den Werten der radial versetzten Einzelmessungen ist ein Hinweis auf Materialinhomogenitäten.



8.2.2.2 Monitoring mit kapazitiven Oberflächensonden

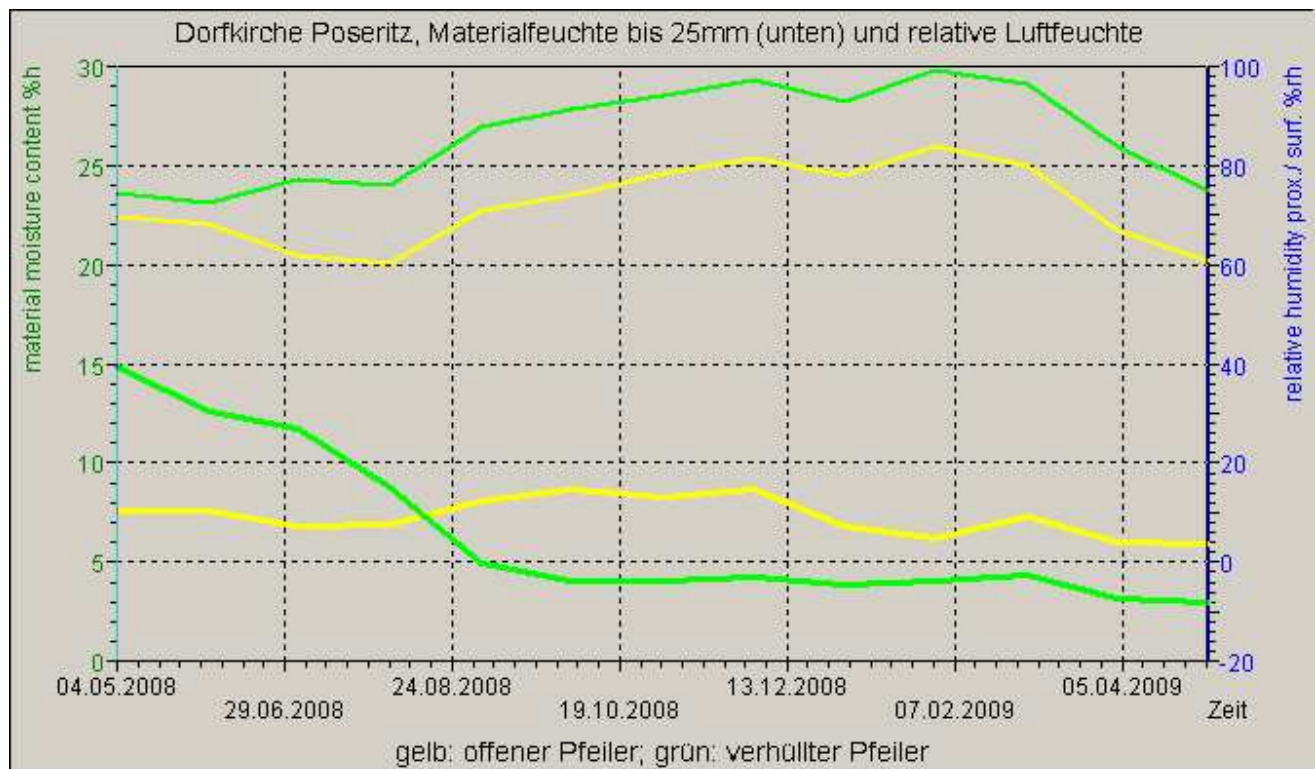


Abb. 17: Vergleich der Entwicklung der Mauerfeuchten an den Oberflächen der Meßpunkte P1a (gelb) und P2a (grün) mit dem Verlauf der relativen Luftfeuchten. Als Resultat der Abschirmung gegen Schlagregen und Ablaufwasser des Daches war hinter der simulierten Begrünung zunächst ein deutlicher Rückgang der Mauerfeuchte festzustellen. Die anschließende Stagnation der Werte ist sehr wahrscheinlich durch aus dem Mauerinneren an die Oberfläche dringendes Wasser verursacht worden. Bemerkenswert ist die hinter der Camouflage gegenüber dem frei bewitterten Pfeiler durchgehend höhere Luftfeuchte. Offenbar bildet sich hier ein Mikroklima aus, in dem durch eingeschränkte Belüftung aus dem Mauerwerk verdunstende Feuchte gestaut wird. Dies behindert die Abtrocknung des Mauerwerks nach außen durch ein geringeres Dampfdruckgefälle und eine phasenweise erhöhte Kondensatbelastung.

8.2.3 Untersuchungsberichte der MPA Bremen

8.2.3.1 Kirche Poseritz - Feuchtemessungen 18.09.2007

Tabelle 1: Feuchtemessungen an Bohrmehlproben

Profil	Segment [cm]	Material	Einwaage [g]	Feuchtegehalt [M-%]	Bemerkungen
P 1a (o.D.)	0-5	Mörtel	10,1	5,71	
	5-10	Mörtel	10,0	6,22	
	10-20	Z.+M.	10,2	7,35	
	20-30	Z.+M.	10,1	7,11	Sehr... Hohlraum o.
	30-45	Z.+M.	10,2	10,94	
	45-60	Z.+M.	10,5	11,66	
	60-75	Z.+M.	10,0	10,78	
	75-90	Z.+M.	10,2	10,01	
	90-105	Z. (M.)	10,1 (10,2)	10,07 (9,54)	Nachmessung 19.09.
P 2a	0-5	Mörtel	10,1	9,57	

(07.09.07)	5-10	Mörtel	10,2	11,74	
	10-20	Mörtel + Z.	10,1	9,15	
	20-30 ¹⁾	Ziegel	10,2 (10,2)	5,12 (3,42)	Nachmessung 19.09.
	30-45	Z.+M.	10,1	9,17	
	45-60	Ziegel	10,1	6,23	
	60-75	Ziegel	10,2	6,87	
	75-90	Ziegel	10,1	10,14	
	90-105	Ziegel	10,1 (10,2)	10,30 (9,77)	Nachmessung 19.09.
P 1i (08.09.07)	0-30	Z.+M.	10,1	11,56	
	-0,5-0	Mörtel	9,6	11,71	
	0-5	Ziegel	10,1	9,78	
	5-10	Ziegel	10,0	9,91	
	10-20	Ziegel	10,2	9,71	
	20-30	Z.+M.	10,0	10,87	Hohlraum
	30-45 (1)	Z.+M.	10,1	8,08	
	30-45 (2)	Z.+M.	10,2	11,40	
	45-60	Z.+M.	10,1	9,48	
	60-75	Z.+M.	10,1	9,73	
	75-90	?	10,0	6,75	extrem hart (heiß)
90-110	?	10,1 (10,1)	7,76 (6,71)	Nachmessung 19.09.	
P 2i (10.09.07)	0-45	Ziegel	10,0	4,69	
	-0,5-0	-	-	-	nicht vorhanden
	0-5	Mörtel (Z.)	10,1	1,50	
	5-10	Ziegel	10,1	4,88	
	10-20 ¹⁾	Ziegel	10,0 (10,2)	5,29 (3,41)	Nachmessung 19.09.
	20-30 ¹⁾	Ziegel	10,2 (10,2)	4,40 (2,91)	Nachmessung 19.09.
	30-45	Ziegel	10,1 (10,2)	2,71 (2,26)	Nachmessung 19.09.
	45-60	Z.+M.	10,1 (10,1)	2,16 (2,66)	Nachmessung 19.09.
	60-75	M.+Z.	10,1 (10,2)	6,42 (5,86)	Nachmessung 19.09.
	75-90	Ziegel	10,0 (10,2)	6,98 (6,43)	Nachmessung 19.09.
	90-110	Ziegel	10,1 (10,2)	5,03 (5,92)	Nachmessung 19.09.

¹⁾ Probenmenge für Nachmessung zu gering (Feuchtegehalt durch die 1. Messung zu stark reduziert)

8.2.3.2 Kirche Poseritz - Feuchtemessungen und Laboruntersuchungen zur Hydrophobie 26.11.2007

Probenentnahme: 24.09.2007

Feuchtemessung: 25.09.2007

Tabelle 2: Probenmaterial

Probe	Material	Entnahmestelle	Saugverhalten (Carsten)	Fragestellung / Untersuchungen
MZ 1 (+)	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, Schildwand links neben der Tür	saugend	- Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (Tropfenproben, evtl. Mikroskopie)

MZ 2 (++)	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, Schildwand links neben der Tür	nicht saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (Tropfenproben, evtl. Mikroskopie)
MZ 3 (•)	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, senkrechter Pfeiler rechts neben schrägem Pfeiler	nicht saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (Tropfenproben, evtl. Mikroskopie)
MZ 4 (••)	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, senkrechter Pfeiler rechts neben schrägem Pfeiler	nicht saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (Tropfenproben, evtl. Mikroskopie)
RZ 1 (•••)	Austauschziegel (ca. 1995)	S-Seite, senkrechter Pfeiler rechts neben schrägem Pfeiler	nicht saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (Tropfenproben, evtl. Mikroskopie)
RZ 2 (••••)	Austauschziegel (ca. 1995)	S-Seite, senkrechter Pfeiler rechts neben schrägem Pfeiler	nicht saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (Tropfenproben, evtl. Mikroskopie)
RZ 3 (Δ)	Nicht datierter Ziegel	S-Seite, schräger Pfeiler rechts neben der Tür	nicht saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (Tropfenproben, evtl. Mikroskopie)
Z1	Austauschziegel (ca. 1995)	S-Seite, Schildwand links neben der Tür	schwach saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (w-Wert, evtl. Mikroskopie)
Z2	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, Schildwand links neben der Tür	nicht saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (w-Wert, evtl. Mikroskopie)
Z3	Austauschziegel (ca. 1995)	Strebpfiler	nicht saugend	<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Nachweis der Hydrophobierung (w-Wert, evtl. Mikroskopie)
M3	Reparaturmörtel (ca. 1995)	An Z3 haftender Mauermörtel		<ul style="list-style-type: none"> - Feuchtebestimmung - Durchfeuchtungsgrad

Tabelle 3: Untersuchungsergebnisse

Probe	Material	Entnahmestelle	Saugverhalten (Carsten)	Einwaage [g]	Feuchtegehalt [M-%]	Laboruntersuchungen zur Hydrophobie (Wassertropfenprobe)
MZ 1 (+)	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, Schildwand links neben der Tür	saugend	1,10	4,43	- über die Oberfläche und über die Sägefläche (Querschnitt) normal saugend - an der Oberfläche geringfügige lokale Unterschiede in der Sauggeschwindigkeit
MZ 2 (++)	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, Schildwand links neben der Tür	nicht saugend	1,70	2,47	- über die Oberfläche und über die Sägefläche (Querschnitt) gleichmäßig normal saugend
MZ 3 (•)	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, senkrechter Pfeiler rechts neben schrägem Pfeiler	nicht saugend	1,2	0,42	- über die Oberfläche und über die Sägefläche (Querschnitt) normal saugend
MZ 4 (••)	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, senkrechter Pfeiler rechts neben schrägem Pfeiler	nicht saugend	1,0	7,79	- über die Oberfläche und über die Sägefläche (Querschnitt) normal saugend
RZ 1 (•••)	Austauschziegel (ca. 1995)	S-Seite, senkrechter Pfeiler rechts neben schrägem Pfeiler	nicht saugend	2,50	4,83	- über die Oberfläche und über die Sägefläche (Querschnitt) normal saugend - keine nennenswerten Unterschiede im Saugverhalten gegenüber den mittelalterlichen Ziegeln - Saugfähigkeit durch die Brennhaut (dunklere Oberfläche) nur geringfügig reduziert
RZ 2 (••••)	Austauschziegel (ca. 1995)	S-Seite, senkrechter Pfeiler rechts neben schrägem Pfeiler	nicht saugend	2,8	10,20	- über die Oberfläche und über die Sägefläche (Querschnitt) normal saugend - Saugfähigkeit durch die Kalkablagerungen auf der Oberfläche nicht nennenswert reduziert
RZ 3 (Δ)	Nicht datierter Ziegel	S-Seite, schräger Pfeiler rechts neben der Tür	nicht saugend	28,3	9,81	- geschwärzte Oberfläche sowohl auf dem Ziegel als auch auf dem Mörtel wasserabweisend - an Bruchflächen Ziegel und Mörtel bis unmittelbar unter die geschwärzte Oberfläche stark saugend - Maß der Wasserabweisung korreliert mit dem Grad der Oberflächenverschmutzung / Schwärzung
Z1	Austauschziegel (ca. 1995)	S-Seite, Schildwand links neben der Tür	schwach saugend		3,3*	- nicht durchgeführt, dafür w-Wert-Messung
Z2	Mittelalterlicher Ziegel	S-Seite, Schildwand links neben der Tür	nicht saugend	27,9	5,62 (6,6*)	- nicht durchgeführt, dafür w-Wert-Messung
Z3	Austauschziegel (ca. 1995)	S-Seite, senkrechter Pfeiler	nicht saugend		9,1	- nicht durchgeführt, dafür w-Wert-Messung
M3	Mauermörtel zu Z3					

* Feuchtebestimmung durch Darr-Wägung

Kennwertbestimmungen Labor

Tabelle 4: Ermittelte Materialkennwerte

Proben- Bez.	RD [g/cm ³]	OP [V%]	Wasseraufnahme / Feuchtegehalt [M-%]			w-Wert ± Std.abw. [kg/(m ² h ^{0,5})]	
			Max.	Pr.entn.	Durchf.gr.	nach DIN	baufeucht
Z1	1,84	24,3	13,2	3,3*	25	13,4 ± 0,5	n.b.
Z2	1,81	26,6	14,7	5,6 (6,6*)	45**	7,0 ± 0,2	n.b.
Z3	1,84	24,7	13,5	8,1	60	6,3 ± 0,5	5,0 ± 0,1
Mörtel zu Z3				6,5			

RD: Rohdichte

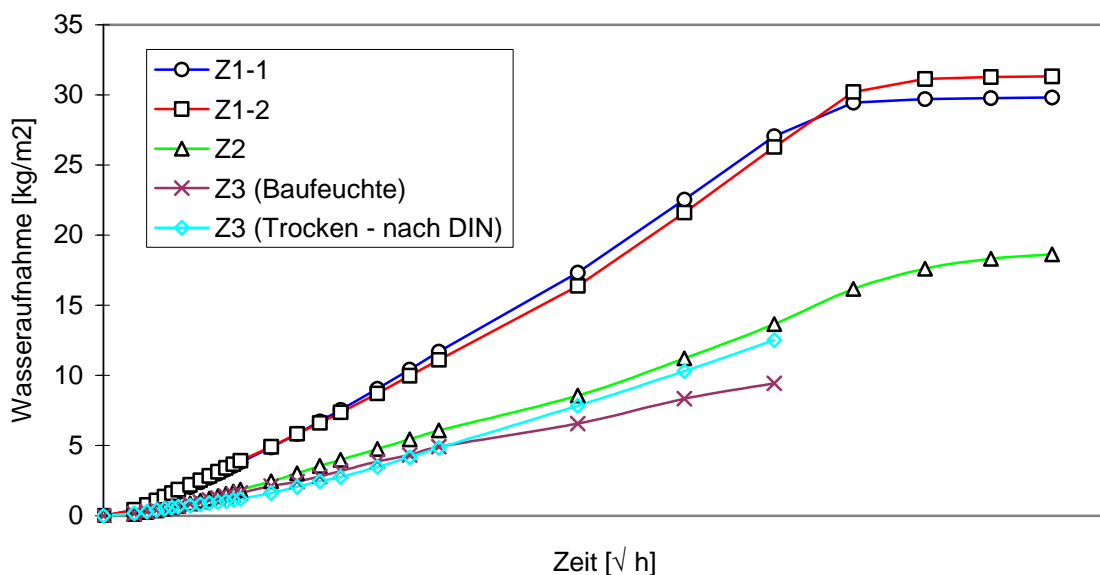
OP: Offene Porosität

WA: Freie kapillare Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck

* Feuchtebestimmung durch Darr-Wägung

** berechnet mit dem Wert aus der Darr-Wägung (* in links nebenstehender Spalte)

Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert)



Bewertung:

- Die Ziegel waren im Entnahmestadium nicht wassergesättigt
- Der Wasseraufnahmekoeffizient der Reparaturziegel ist doppelt so hoch wie der des gemessenen mittelalterlichen Ziegels
- Aufgrund ihres hohen w-Wertes begünstigen die Austauschziegel eine Feuchteaufnahme ins Mauerwerk

8.2.3.3 Kirche Poseritz - Feuchtemessungen 07.12.2007

Tabelle 5: Ergebnisse der Feuchtemessungen

Profil	Segment [cm]	Material	Einwaage [g]	Feuchtegehalt [M-%]
P 68 (o.D.)	0-1	Ziegel (Bruchstücke)	10,6 (10,7)	12,13 (12,29)
	0,6-2	Ziegel (Bruchstücke)	11,0	12,97
	1-2	Ziegel (Bohrmehl und Bruchstücke)	10,4	15,08
	2-3	Ziegel (Bohrmehl und Bruchstücke)	10,4	14,98
		Ziegel (Bruchstücke)	11,3	13,08
	3-4	Ziegel (Bohrmehl und Bruchstücke)	10,7	14,56
		Ziegel (Bruchstücke)	10,4	13,16
	4-5	Ziegel (Bohrmehl und Bruchstücke)	10,6	14,63
		Ziegel (Bruchstücke)	10,4	13,17
	5-10	Ziegel (Bohrmehl)	10,8	14,29
10-15	Ziegel (Bohrmehl)	10,4	14,76	

Bewertung

- Ziegel über den gesamten Querschnitt vollständig wassergesättigt
- Feuchte im vorderen Abschnitt vermutlich etwa gleich hoch wie Innen
Begründung: Die etwas niedrigeren Werte sind vermutlich die Folge der Probenbeschaffenheit (vgl. Segmente 2-3, 3-4, 4-5: Feuchte an Bruchstücken immer 1-2 % niedriger als an Bohrmehl)

8.2.3.4 Materialkundliche Untersuchungen am Mauerwerk der Kirche in Poseritz 06.02.2008

Amtliche Materialprüfungsanstalt
der Freien Hansestadt Bremen*
ein Geschäftsbereich der
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen



Paul-Feller-Str. 1 28199 Bremen ☎ 0421 / 53708 0 📠 0421 / 53708 10
mail@mpa-bremen.de <http://www.mpa-bremen.de>

Dr. rer. nat. Frank Schlütter
schluetter@mpa-bremen.de

Tel.: (0421) 53708-43
Fax: (0421) 53708-10

06.02.2008
Slü

Materialkundliche Untersuchungen am Mauerwerk der Kirche in Poseritz

Das Hauptaugenmerk der bisherigen Arbeiten lag auf der Analyse der Feuchte- und Salzgehalte in der S-Wand der Kirche (Bereich mit starkem Grünalgenbefall) sowie auf der Klärung der Feuchtetransportwege. Es wurden Tiefenprofile der Feuchte- und Salzgehalte im Wandquerschnitt, Wasseraufnahmemessungen nach Carsten, mikroskopische Untersuchungen und Kennwertbestimmungen an Ziegeln durchgeführt.

Diese Erfassung des Ist-Zustandes diene insbesondere einer Entscheidungsfindung hinsichtlich der Lage der geplanten Musterachse sowie der Festlegung des erforderlichen Messprogramms (Umfang der Messungen, Auswahl möglicher Messverfahren, Anzahl und Platzierung der Messfühler, Messzeitraum etc.).

Die vorliegenden Ergebnisse lassen sich in Stichpunkten wie folgt zusammenfassen:

1. Starke Durchfeuchtung des Mauerwerks über den gesamten Querschnitt
2. Im Inneren der Wand praktisch permanente Wassersättigung
3. Kontinuierlicher Feuchtetransport in den Innenraum der Kirche
4. Keine Salze (lediglich leichte Vergipsung der historischen Ziegel in Oberflächennähe)
5. Keine Hydrophobierung
6. Starke Behinderung der kapillaren Wasseraufnahme über die Ziegeloberflächen
→ unabhängig von den Witterungsverhältnissen (auch nach längeren Regenspauzen)
→ nicht durch die Vergipsung erklärbar (gipsfreie Ziegel zeigen das gleiche Verhalten)
7. Diskrepanz im Wasseraufnahmeverhalten ein und derselben Materialprobe in situ (am Bauwerk) und im Laborversuch
→ am Bauwerk nicht saugend
→ im Labor normal saugend

Schlussfolgerungen zur Fortführung des Projektes

Der kontinuierliche Feuchtetransport über die S-Wand in den Kirchinnenraum hat fatale Folgen für das in der Kirche befindliche Kulturgut. Die Frage, warum die Wasseraufnahme und damit auch die Wasserabgabe über die Ziegeloberflächen auch bei trockenem und warmem Wetter stark eingeschränkt ist, bedarf dringender Klärung. Es sind bauwerksspezifische Ursachen zu vermuten, deren Klärung nur durch ein entsprechendes in situ Messprogramm möglich ist.

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass im Projektantrag nicht oder nicht ausreichend berücksichtigte Einflussgrößen (z.B. Windlast, Pfeiler, Dachentwässerung) stärker als geplant in die Überlegungen und Messungen einbezogen werden müssen. Aus unserer Sicht ist sowohl eine Erweiterung des Untersuchungs- als auch des Klimamessprogramms in dem im Zwischenbericht beschriebenen Umfang zwingend erforderlich.

Dr. Frank Schlütter

8.2.3.5 Ergebnisse-Tauchwägungen+w-Werte_150311 (2)

30.11.2010

DBU Projekt Poseritz

1. Tauchwägung

(Bestimmung von Rohdichte, Offener Porosität, Freier Wasseraufnahme)

BK1, BK2, BK3/I und 3/II, BK4

Z1, Z2, Z3

M1, M2 und M3

Füllmörtel 134 und 135

2. Wasseraufnahmekoeffizient

(Bestimmung der w-Werte)

BK1 v + h

BK2 v + h

BK3 v + h

BK4 v + h

M2

Z1

Z2

Z3

Anmerkung: Werte für Z1 bis Z3 aus MPA-Auftrag 6124-07

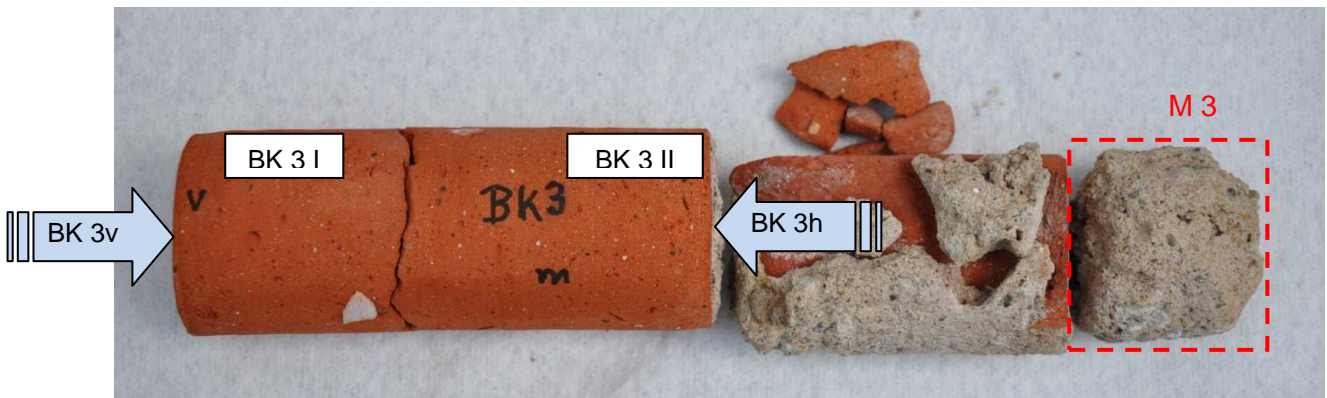
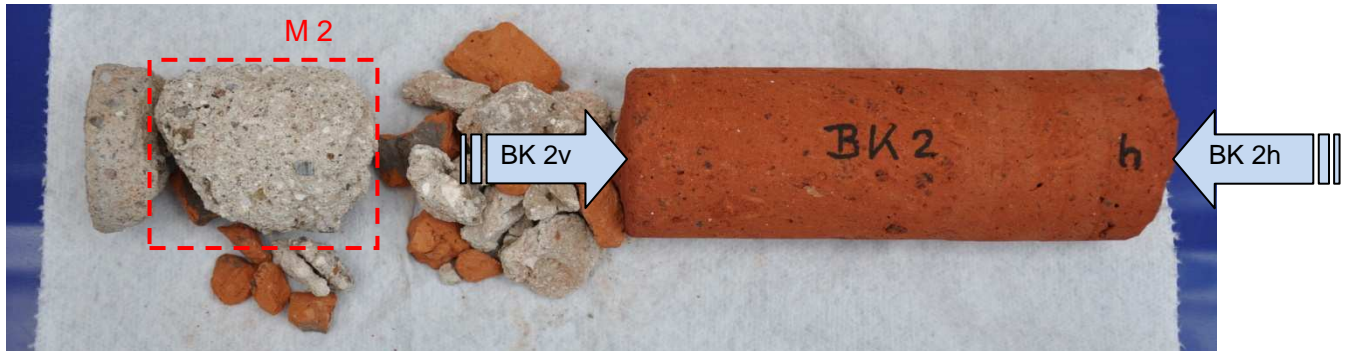
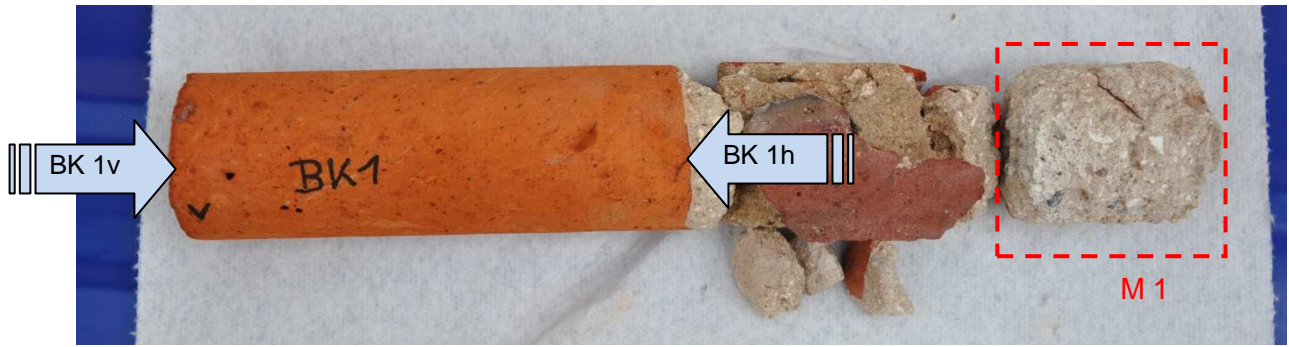
Tabelle 6: Ergebnisübersicht

			RD g/cm ³	OP Vol.-%	FWA M-%	FWA _{err} M-% / kg/m ³	w-Wert kg/(m ² h ^{0,5})	Bemerkungen
Ziegel	BK 1	Ma. Ziegel	1,74	28,2	16,3	16,2 / 282	1,0 (±0,0)	Exponierte Oberfläche
							19,5 (±0,2)	Rückseite (in der Wand)
	BK 2	Ma. Ziegel	1,80	24,7	13,7	13,7 / 247	29,4 (±0,4)	Oberfläche (in der Wand)
							28,3 (±0,2)	Rückseite (in der Wand)
	BK 3	Ma. Ziegel	1,90	21,7	11,4	11,4 / 217	2,3 (±0,1)	Exponierte Oberfläche
							8,9 (±0,5)	Rückseite (in der Wand)
	BK 4	Ma. Ziegel	n.b.	n.b.	n.b.	n.b. / 270	11,7 (±0,3)	Exponierte Oberfläche
							17,6 (±0,1)	Rückseite (in der Wand)
Z 1	Rep.ziegel	1,84	24,3	13,2	n.b.	13,8 ± 0,5		
Z 2	Ma. Ziegel	1,81	26,6	14,7	n.b.	7,0 ± 0,2		
Z 3	Rep.ziegel	1,84	24,7	13,5	n.b.	6,3 ± 0,5		
Mörtel	M 1	zu BK 1	1,56	34,3	22,0	22,0 / 343		
	M 2	zu BK 2	1,61	32,5	20,1	n.b.	21,7 (±3,4)	
	M 3	zu BK 3	1,75	20,0	11,5	11,4 / 200		
Füllmörtel	134		1,13	42,5	37,6	37,6 / 425		LEDAN
	135		0,96	51,7	53,6	53,8 / 516		LEDAN

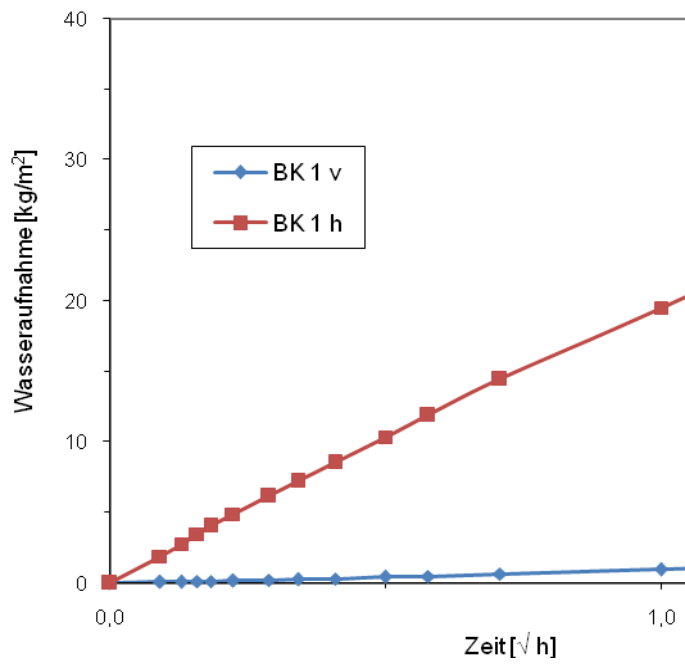
Messverfahren: Rohdichte, Offener Porosität, Freier Wasseraufnahme mittels Tauchwägung
FWA bestimmt über Tauchwägung
FWA_{err} errechnet über Feuchtespeicherfunktion
Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) in Anlehnung an DIN 52617

Auswertung:

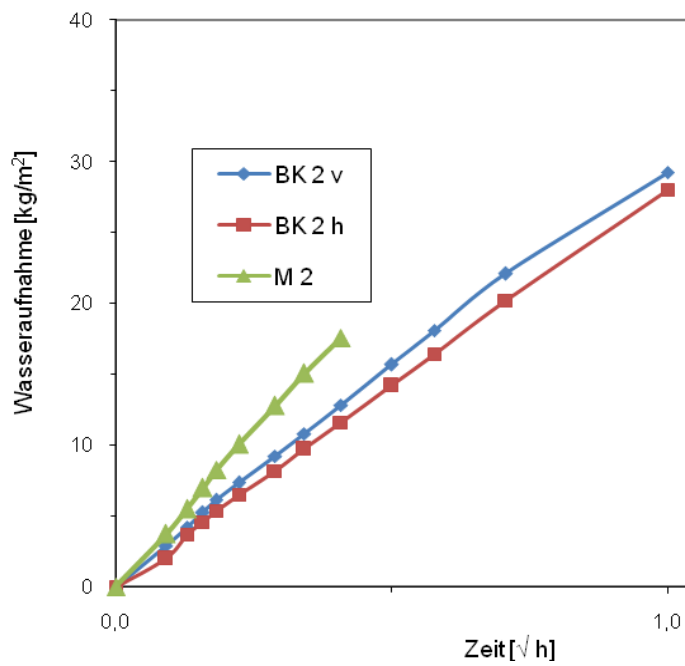
- Saugfähigkeit der Ziegel sehr unterschiedlich
- Wasseraufnahmekoeffizienten der Ziegel (w-Werte) zwischen 9 und 29 kg/(m²h^{0,5})
- Die sehr unterschiedlichen Saugfähigkeiten dürften eine inhomogene Feuchteverteilung im Mauerwerk zur Folge haben
- Alle exponierten Oberflächen - innen und außen weisen eine gegenüber dem Kern reduzierte Saugfähigkeit auf
 - BK 1: Faktor 20
 - BK 3: Faktor 4
 - BK 4: Faktor 1,5
- Besonders starke Reduzierung an der Oberfläche des BK 1 (Faktor 20)
- Nicht exponierter Ziegel BK 2 mit etwa gleichem Saugverhalten an Vorder- und Rückseite
- Laborergebnisse deuten auf eine Trocknungsblockade an den exponierten Wandoberflächen
- Ursache der Trocknungsblockade sind Gipseinlagerungen im oberflächennahen Porenraum
- Mörtel durch niedrige Rohdichten und hohe bis sehr hohe freie Wasseraufnahme gekennzeichnet
- Es ist von hohen Wasseraufnahmekoeffizienten der/des Mörtels auszugehen (M2: 22 kg/(m²h^{0,5}))
- Füllmörtel weisen sehr hohe Wasseraufnahme und deutlich andere Porenradienverteilungen und Feuchtespeicherfunktionen auf als die Ziegel und Mörtel
-



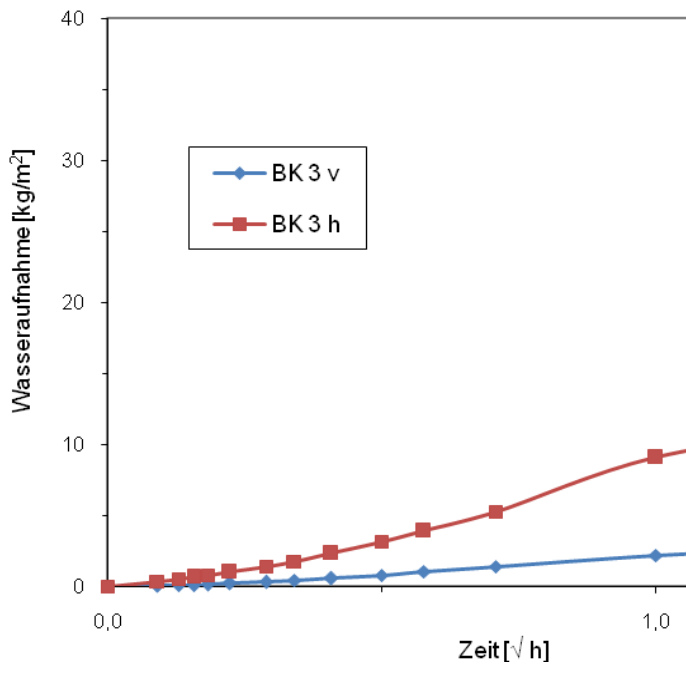
Wasseraufnahmekoeffizienten - BK 1



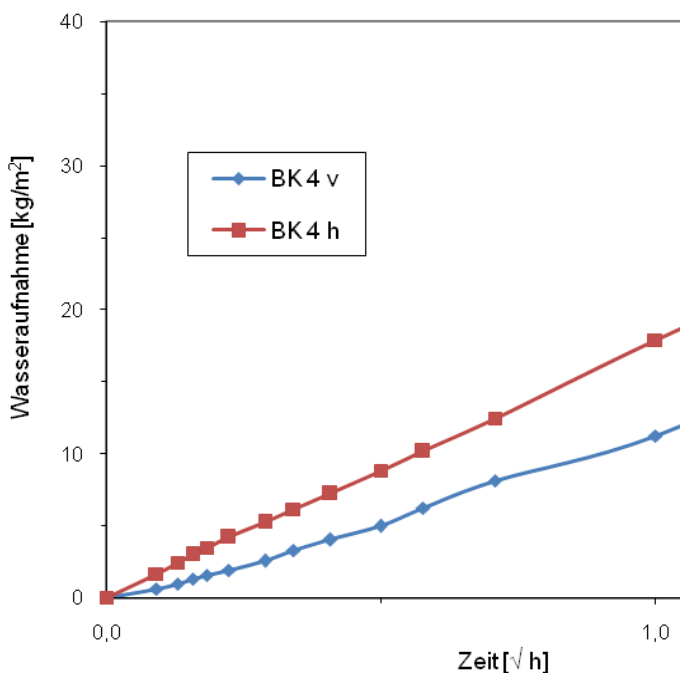
Wasseraufnahmekoeffizienten - BK 2



Wasseraufnahmekoeffizienten - BK 3



Wasseraufnahmekoeffizienten - BK 4



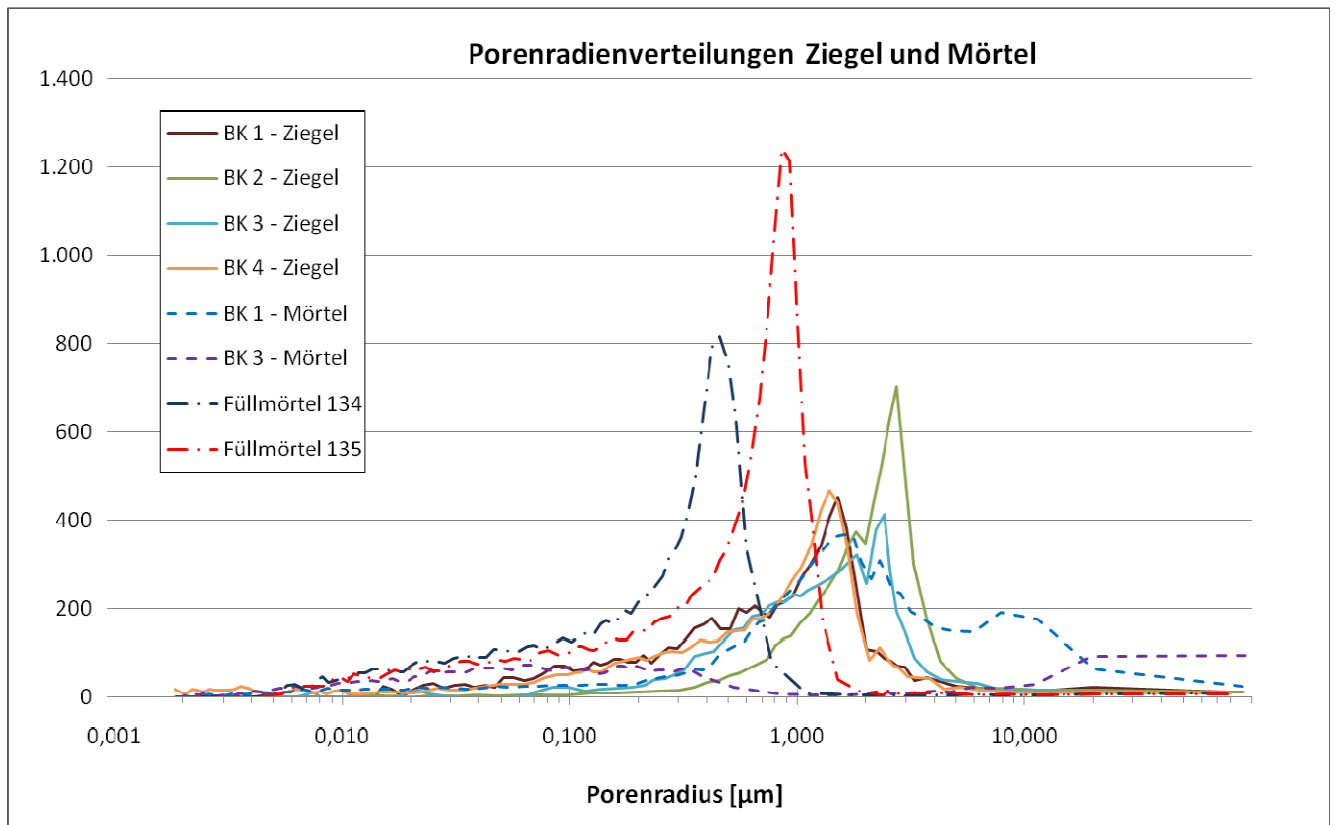


Abb. 18: Differentielle Porenradienverteilung der am Bauwerk entnommenen Ziegel- und Mörtelproben, sowie der für die kapazitive Materialfeuchtemessung eingesetzten Verfüllmörtel. Die Darstellung basiert auf Untersuchungsergebnissen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik Holzkirchen.

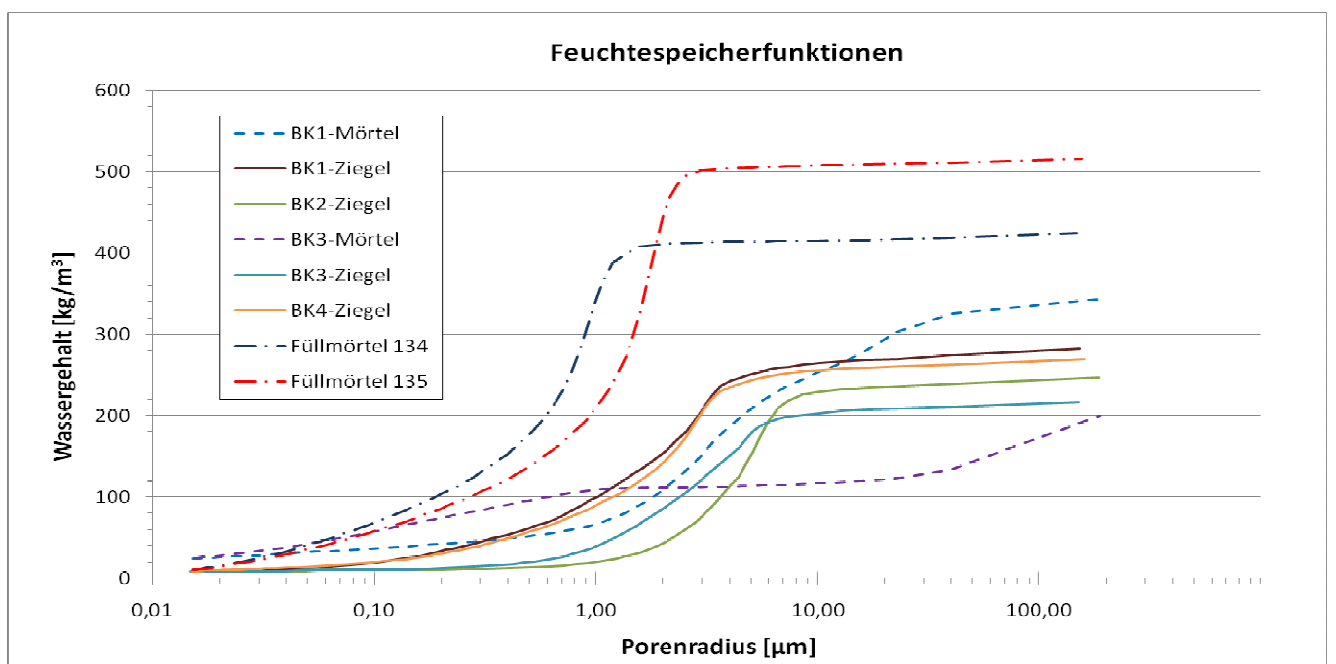


Abb. 19: Feuchtespeicherfunktion der am Bauwerk entnommenen Ziegel- und Mörtelproben, sowie der für die kapazitive Materialfeuchtemessung eingesetzten Verfüllmörtel. Die Darstellung basiert auf Untersuchungsergebnissen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik Holzkirchen.

8.2.3.6 Daten für Simulationsrechnungen Kirche Poseritz 15.03.2011

Ziegel (ohne Beeinträchtigung saugend)	w-Wert: 20 kg/m ² h ^{0,5}
Ziegel mit Gipshorizont	w-Wert: 1 kg/m ² h ^{0,5}
Lage des Gipshorizontes	vordere 0,2 mm gipsfrei Gipshorizont: 0,2 bis 1 mm
Mauerwerksquerschnitt	Schildwand: 1 m Pfeiler: 2 m
Anfangszustand	Wassergesättigter Ziegel

Tabelle 7 Aus den Ergebnissen der materialkundlichen Untersuchungen abgeleitete Daten als Vorgabe für die numerische Simulation des überhygroskopischen Wassergehaltes

8.2.3.7 Leitfähigkeitsmessungen und Bestimmung des pH-Wertes 08.04.2011 / 11.04.2011

Die Messungen erfolgten an Bohrmehlproben, die im Bereich der Meßstelle P2/3 i an der südlichen Schildwand im 3. Langhausjoch in etwa 4,5m Höhe entnommen wurden.

Von den Bohrmehlproben wurden an wässrigen Eluatn die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert ermittelt. Hierzu wurden 3g Probematerial in 30 ml deionisiertem H₂O eluiert.

Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit erfolgte mit einem Leitfähigkeitsmessgerät METTLER DELTA 340.

Der pH-Wert wurde mit einem pH-Messgerät TESTO 240 gemessen.

Profil	Segment [cm]	pH-Wert	Leitfähigkeit [µS cm ⁻¹]
P 2/3 ir (I)	0-1	7,5	462
	1-2	8,8	85
	2-3	9,1	74
	3-4	9,2	49
	4-5	9,1	63
P2/3 il (II)	0-1	8,5	582
	1-2	9,3	91
	2-3	9,2	103
	3-4	9,4	88
	4-5	9,4	66
	5-6	9,4	64
	6-7,5	9,4	56

P2/3 iu (III)	0-1	9,0	257
	1-2	9,3	109
	2-3	9,4	81
	3-4	9,4	64
	4-5	9,5	61
	5-6,5	9,5	61
	6,5-8	9,6	66
	8-10	9,5	59
Referenz (Destilliertes Wasser)		9,3	6

Tabelle 8

Bewertung:

- Die pH-Werte liegen in der Nähe des neutralen Bereiches (vgl. Referenzmessung)
- Mit zunehmender Tiefe steigen die pH-Werte geringfügig an. Wahrscheinliche Ursache hierfür ist CaOH_2 aus den Mauermörteln im Wandinneren
- Ein geringe Salzbelastung liegt im vorderen Segment der Probe P2/3 ir, in den vorderen 3 Segmenten der Probe P2/3 il sowie in den vorderen beiden Segmenten der Probe P 2/3 iu vor. Ursache ist sehr wahrscheinlich der im oberflächennahen Bereich der Ziegel mikroskopisch nachgewiesene Gips
- Ein Belastung des Mauerwerks mit leicht löslichen kann für die untersuchten Profile ausgeschlossen werden

8.2.4 Gravimetrische Feuchtemessung von oberflächennahen Tiefenprofilen

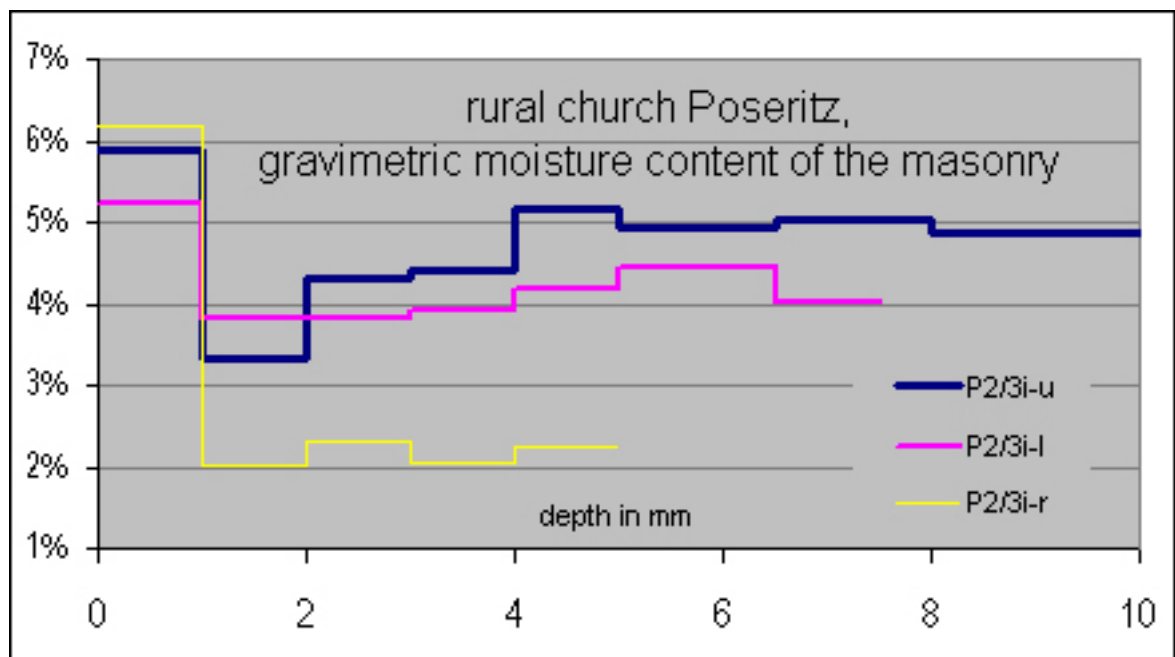


Abb. 20: Feuchtestprofile im Bereich der Meßstelle P2/3i an der südlichen Schildwand im 3. Langhausjoch. Die deutliche Feuchteanreicherung an der Oberfläche ist auf Kondensat zurückzuführen, da hygroskopische Salze im Ergebnis der Leitfähigkeitsmessungen als Ursache ausgeschlossen werden können (vgl. Tabelle 8, S. 57)

8.3 Simulation einer Fassadenbegrünung



Abb. 21, 22:

Für die Simulation der Fassadenbegrünung wurden im Bereich der Strebepfeiler zwischen der 2. und 3. Achse der Langhaussüdwand militärische Tarnnetze in zwei Lagen im Abstand von jeweils 10cm vor die Maueroberflächen gespannt. Da im Gegensatz zu einer natürlichen Begrünung mit Efeu nur an den senkrechten Flächen mit einem verlässlichen Schutz vor Schlagregen und Ablaufwasser zu rechnen war, wurde die schräge Flanke des linken Pfeilers zusätzlich mit einer wasserführenden, hinterlüfteten Folie abgespannt. Außerdem wurden die Verdachungen der Pfeilervorsprünge durch Verblechungen erweitert, sodaß anfallendes Wasser über die äußere Ebene der Camouflage abgeleitet wurde.



8.4 Numerische Simulation des überhygroskopischen Wassergehaltes im Mauerwerk über einen Zeitraum vom 3 Jahren

8.4.1 Randbedingungen

8.4.1.1 Referenzdaten zum Außenklima (Standort Bremerhaven)

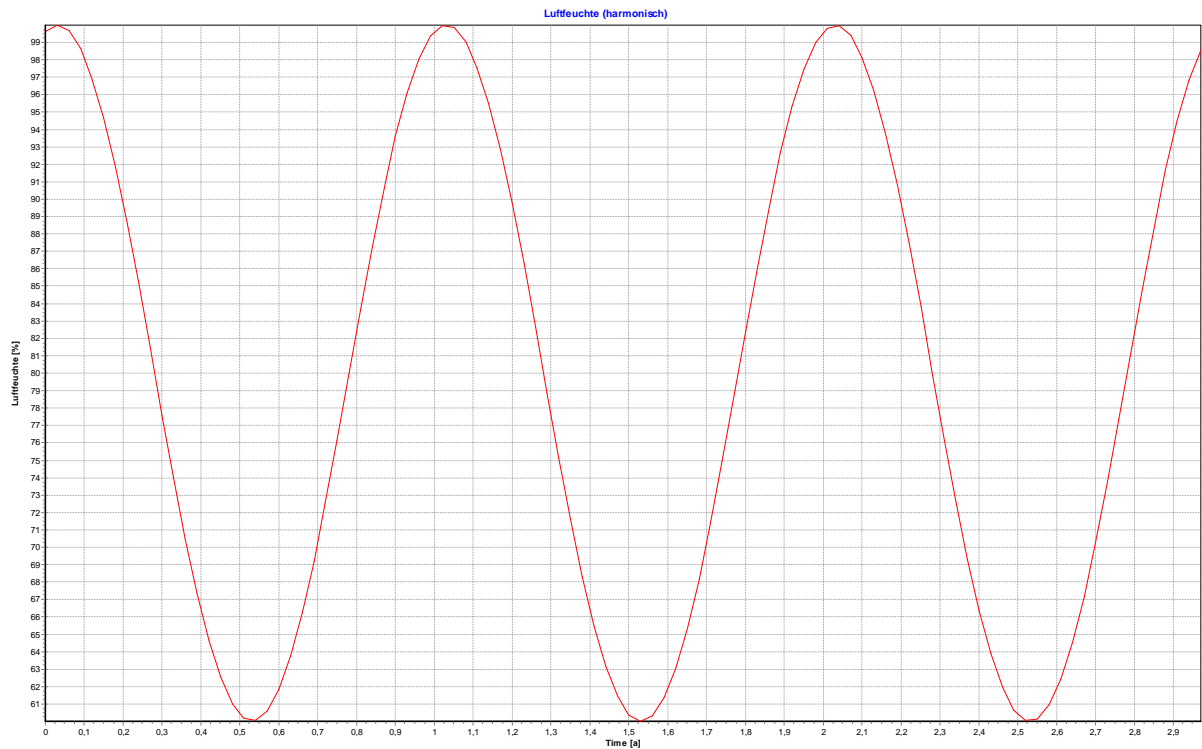


Abb. 23: Relative Feuchte der Luft außen, harmonischer Verlauf, Grenzwerte aus Bestandsklima abgeleitet

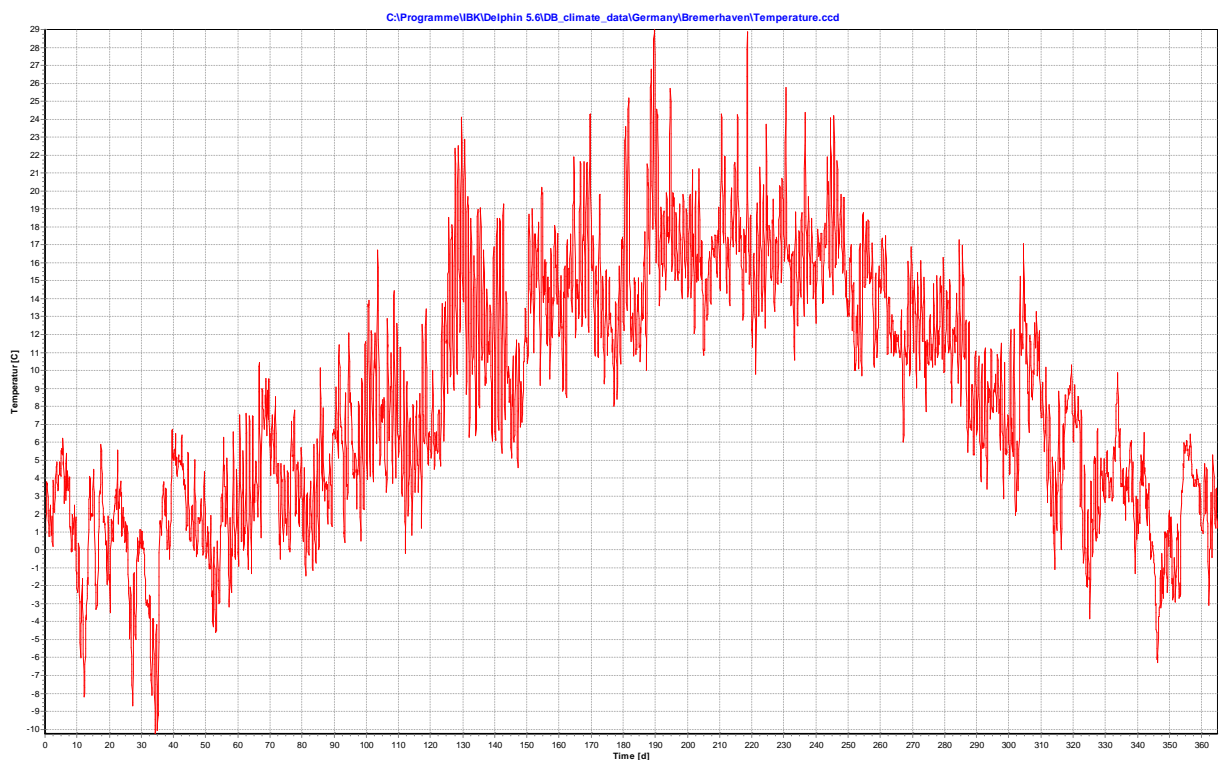


Abb. 24: Temperatur der Luft außen

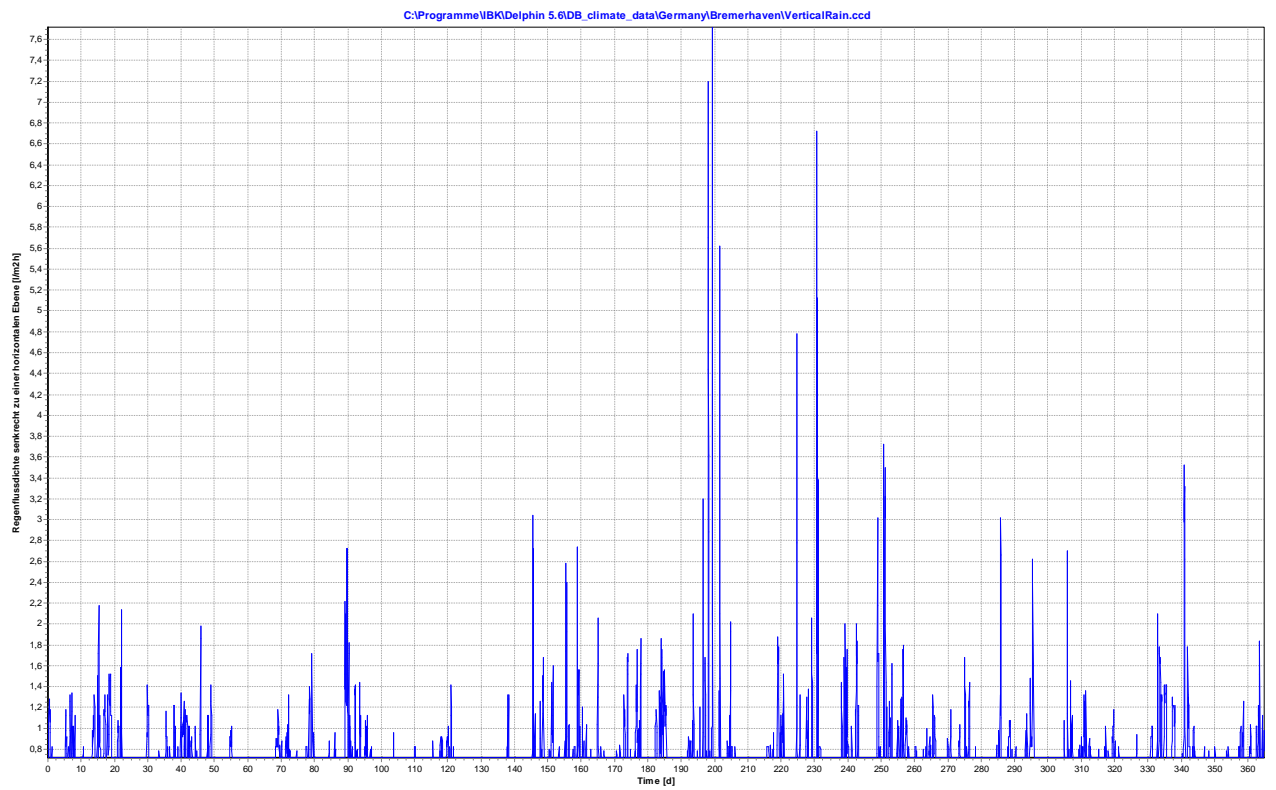


Abb. 25: Normalregenbelastung, gegenüber den Referenzklimadaten leicht erhöht

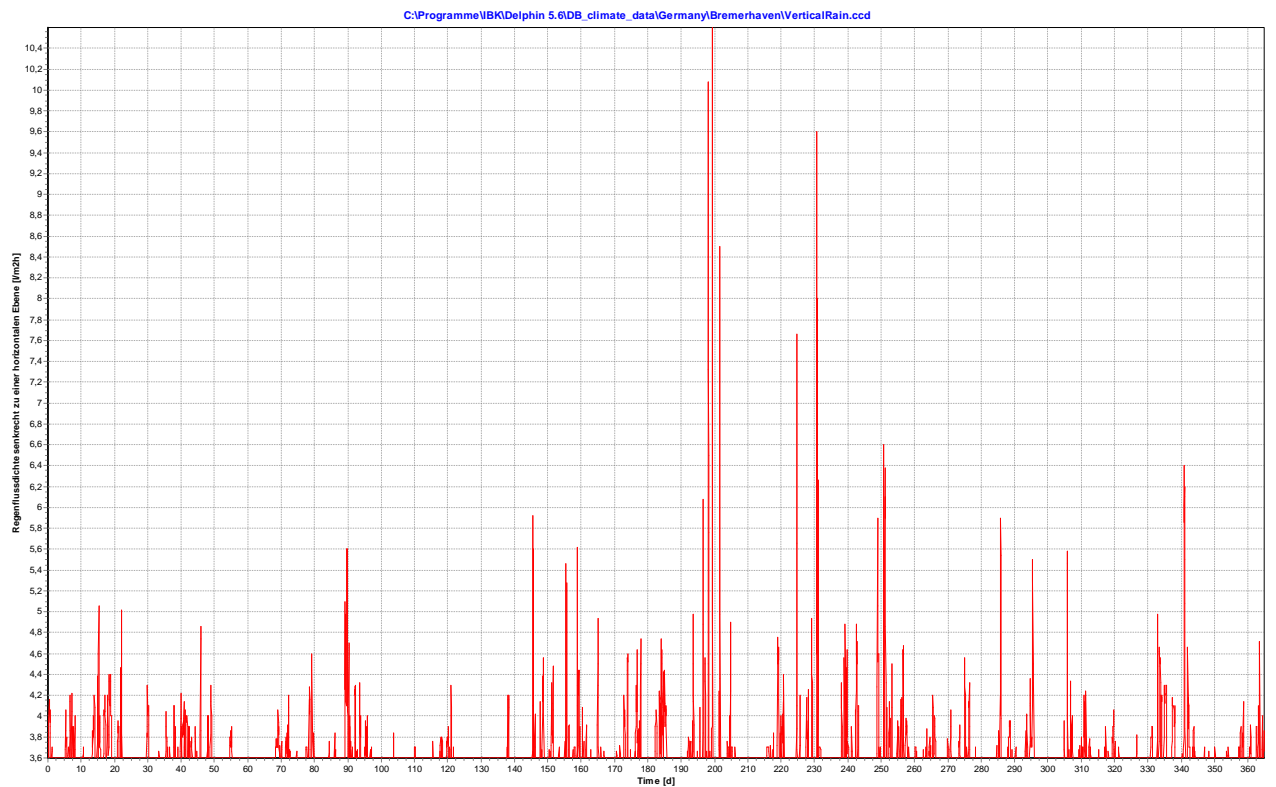


Abb. 26: Normalregenbelastung, gegenüber den Referenzklimadaten stark erhöht

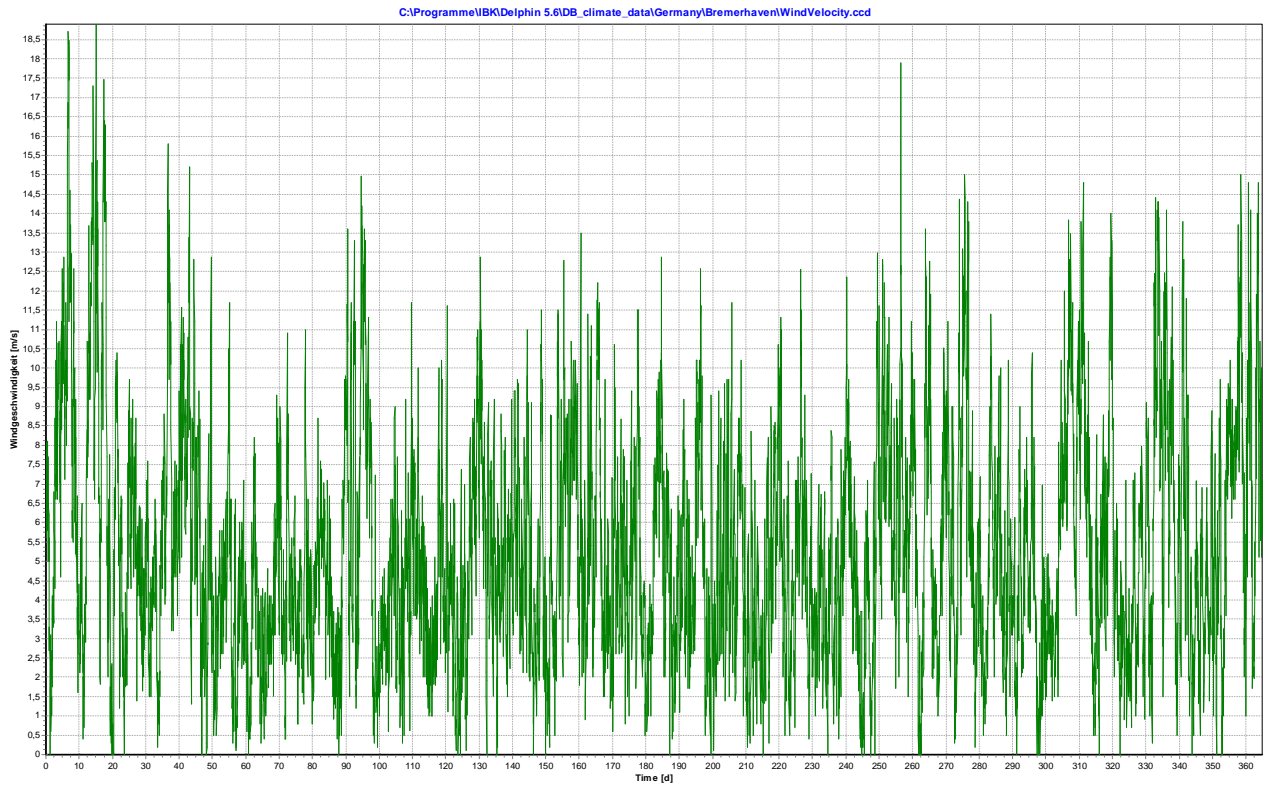


Abb. 27: Windgeschwindigkeit

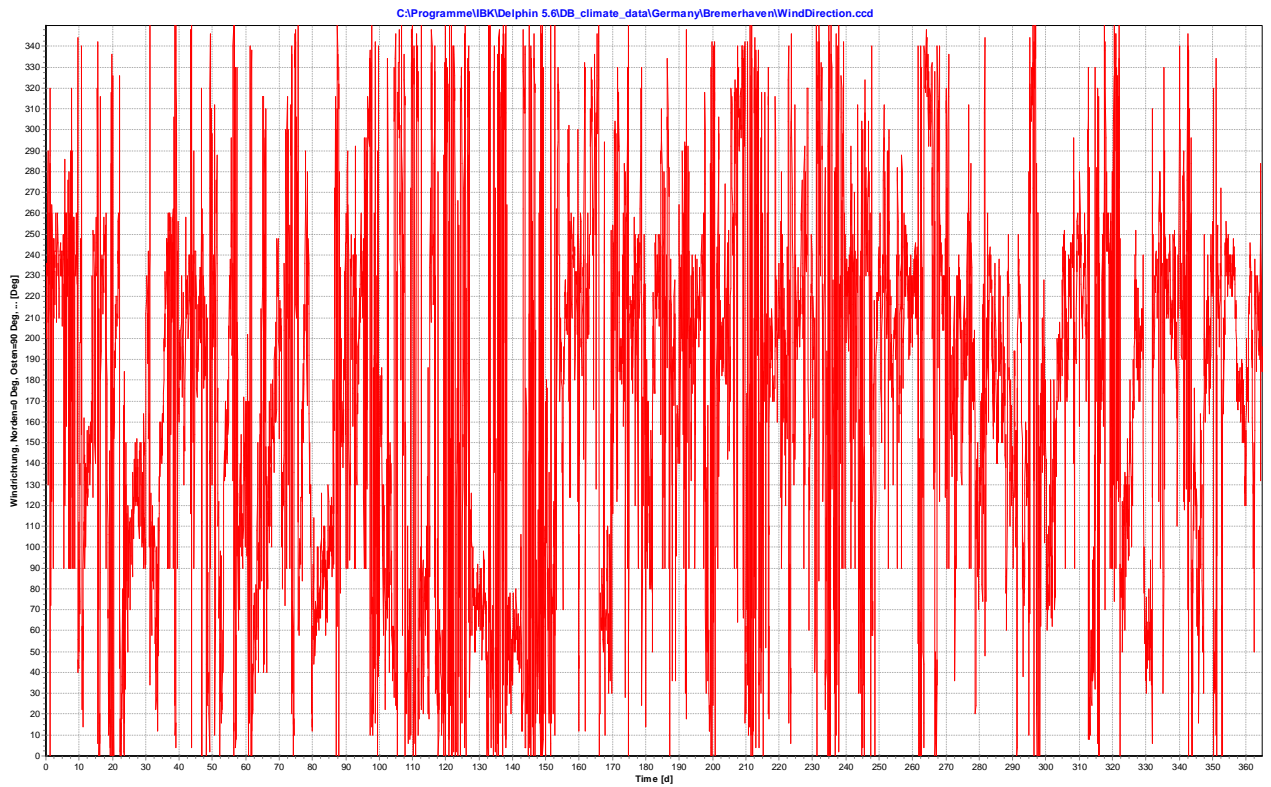


Abb. 28: Windrichtung

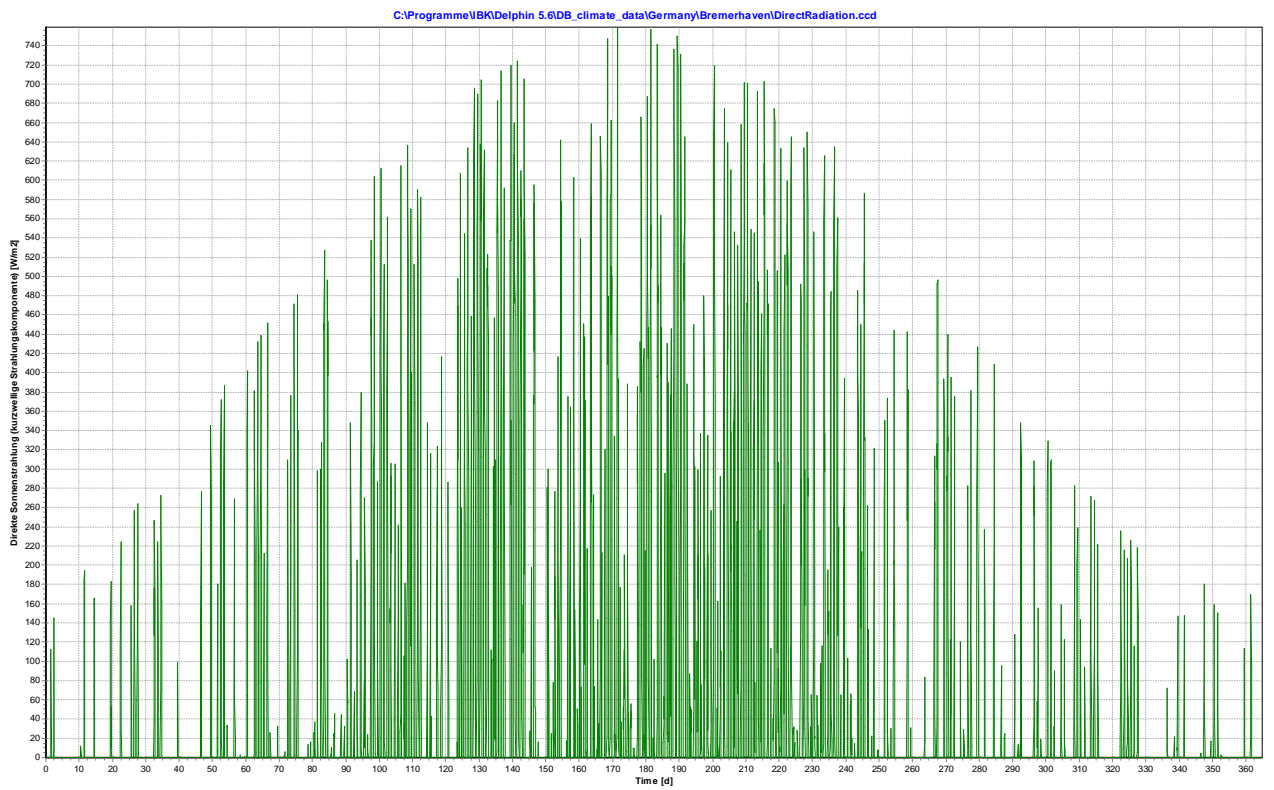


Abb. 29: Direkte Sonneneinstrahlung

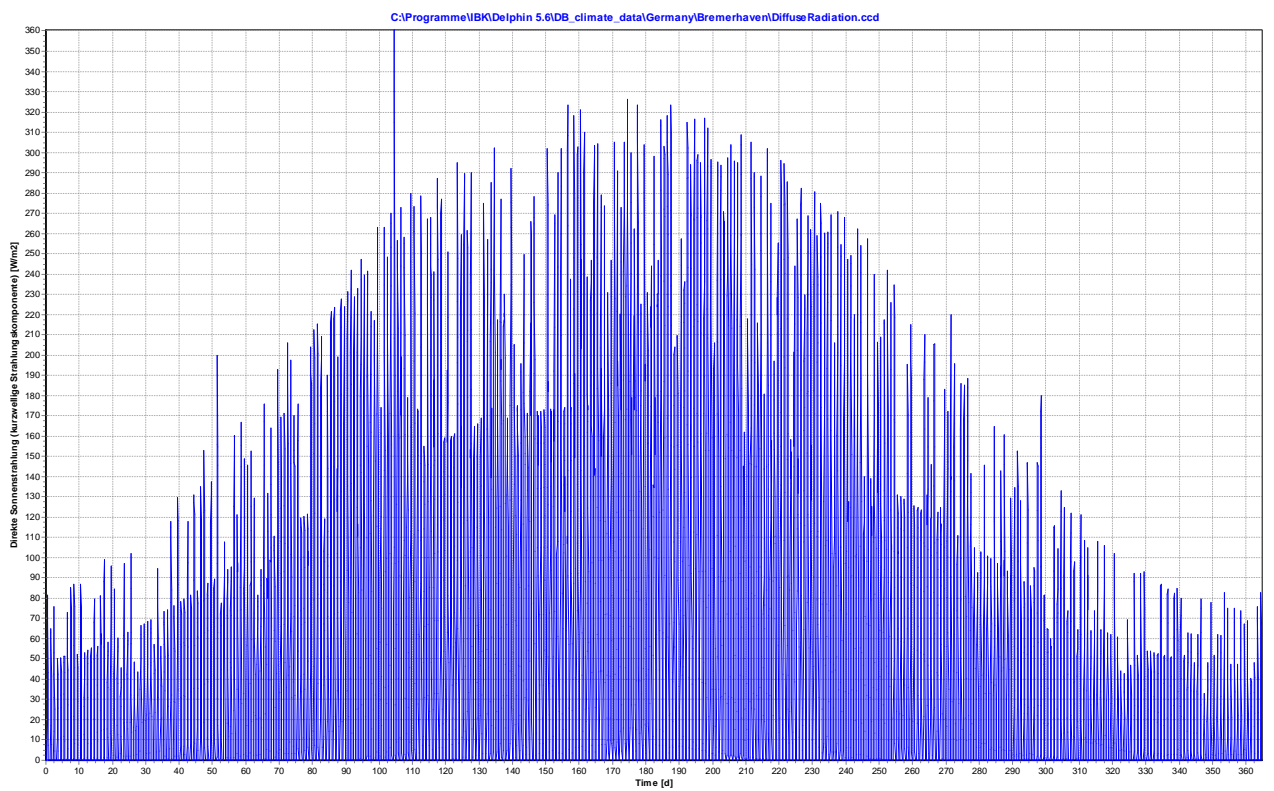


Abb. 30: Diffuse Sonneneinstrahlung

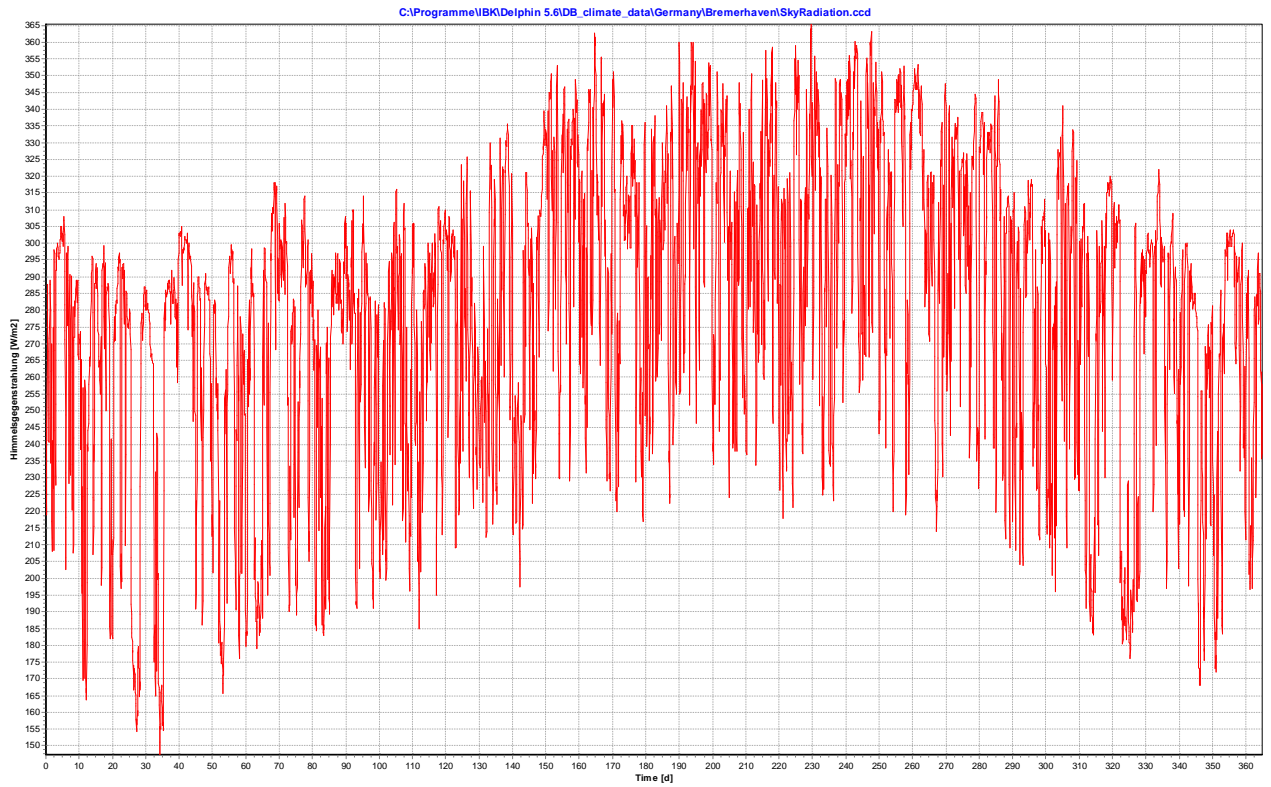


Abb. 31: Himmelsgegenstrahlung

8.4.1.2 Referenzdaten zum Raumklima

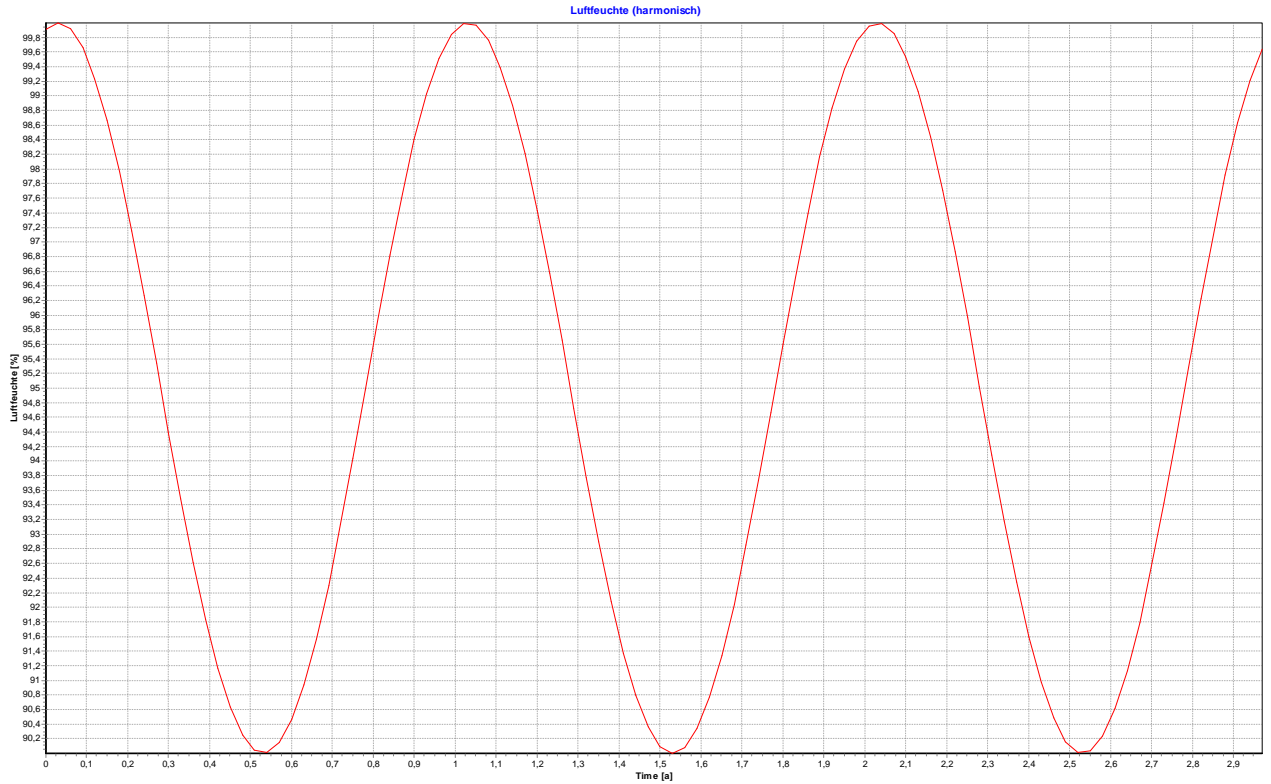


Abb. 32: Relative Feuchte der Luft raumseitig, harmonischer Verlauf, Grenzwerte aus Bestandsklima abgeleitet

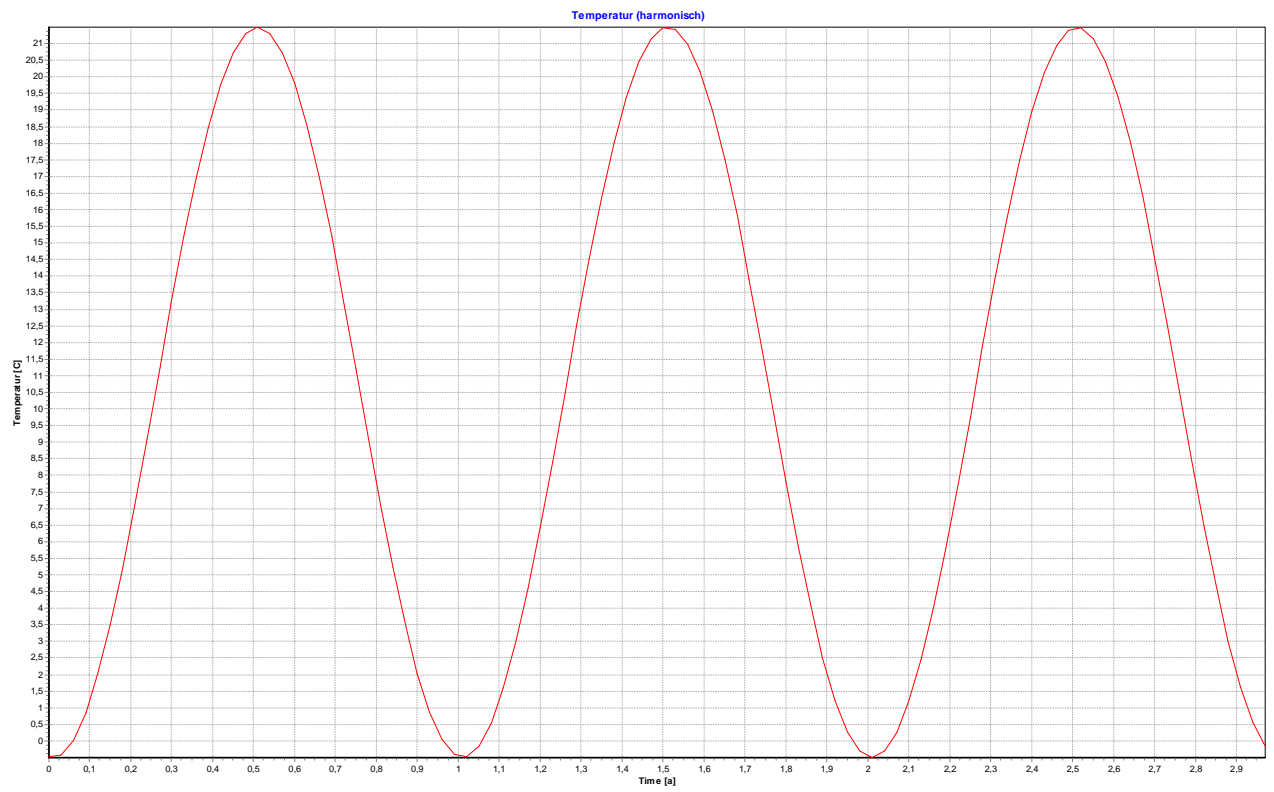


Abb. 33: Temperatur der Luft raumseitig, harmonischer Verlauf, Grenzwerte aus Bestandsklima abgeleitet

8.4.1.3 Materialparameter

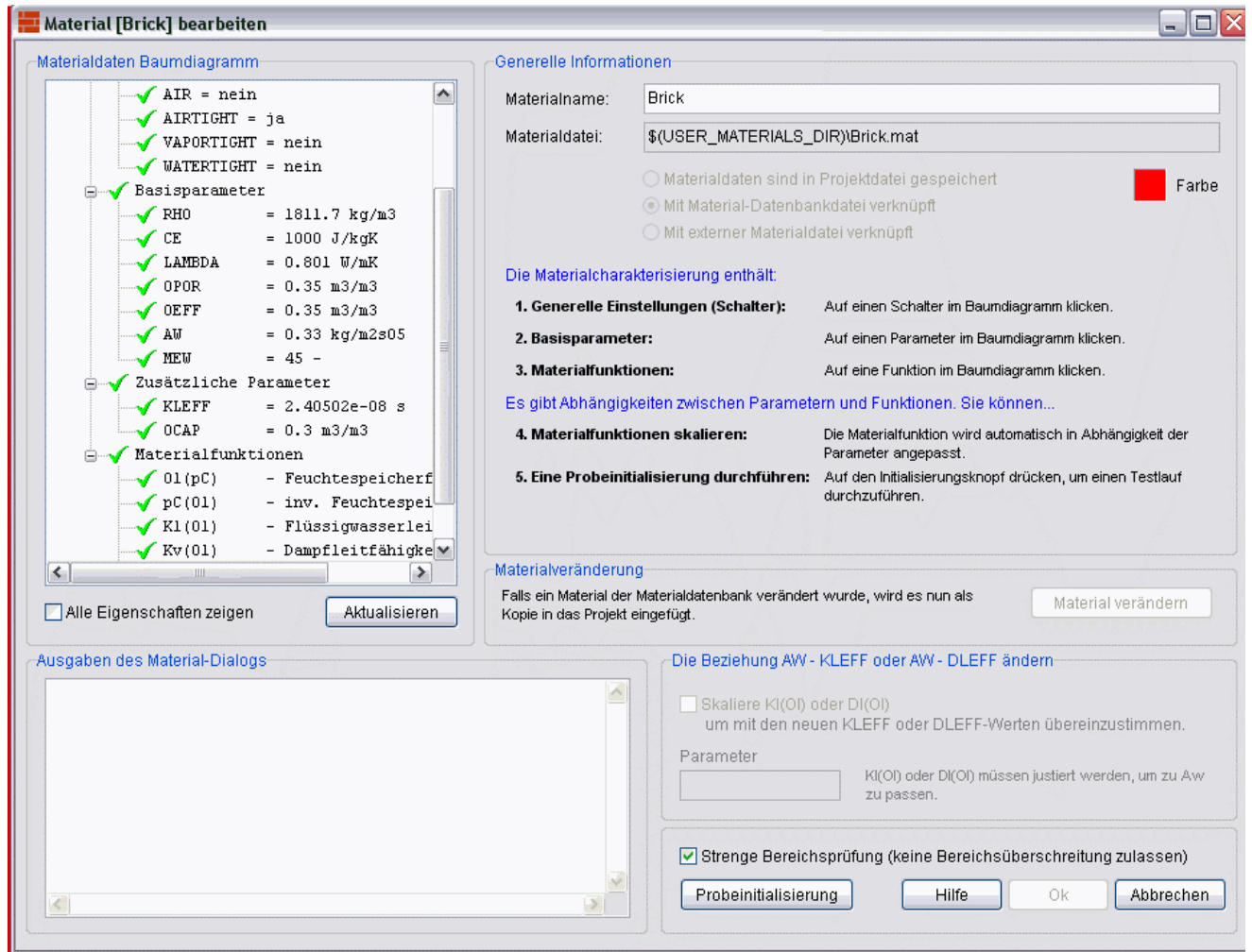


Abb. 34: Verwendete Materialparameter für das Mauerwerk

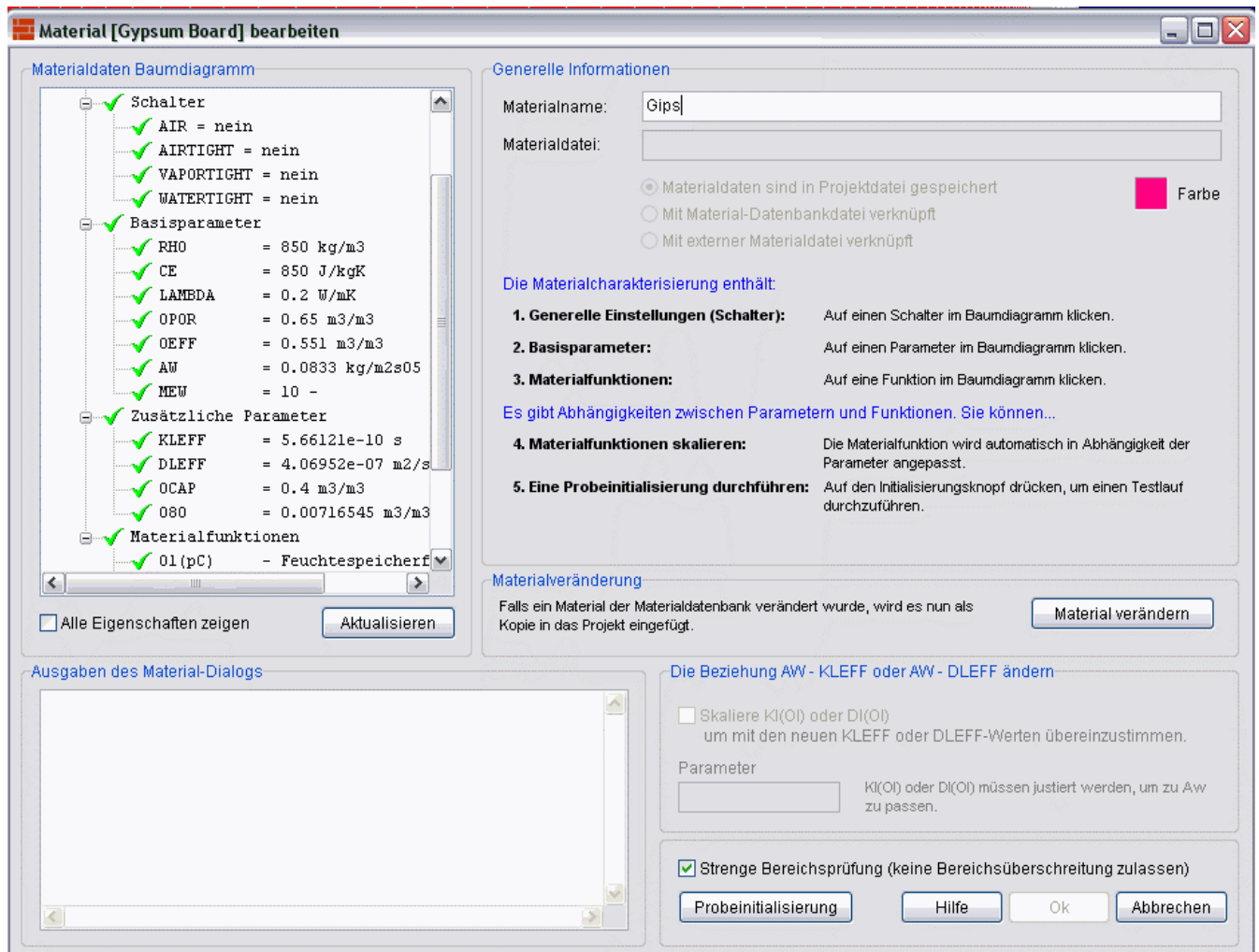


Abb. 35: Verwendete Materialparameter für den Gipshorizont an der Maueroberfläche

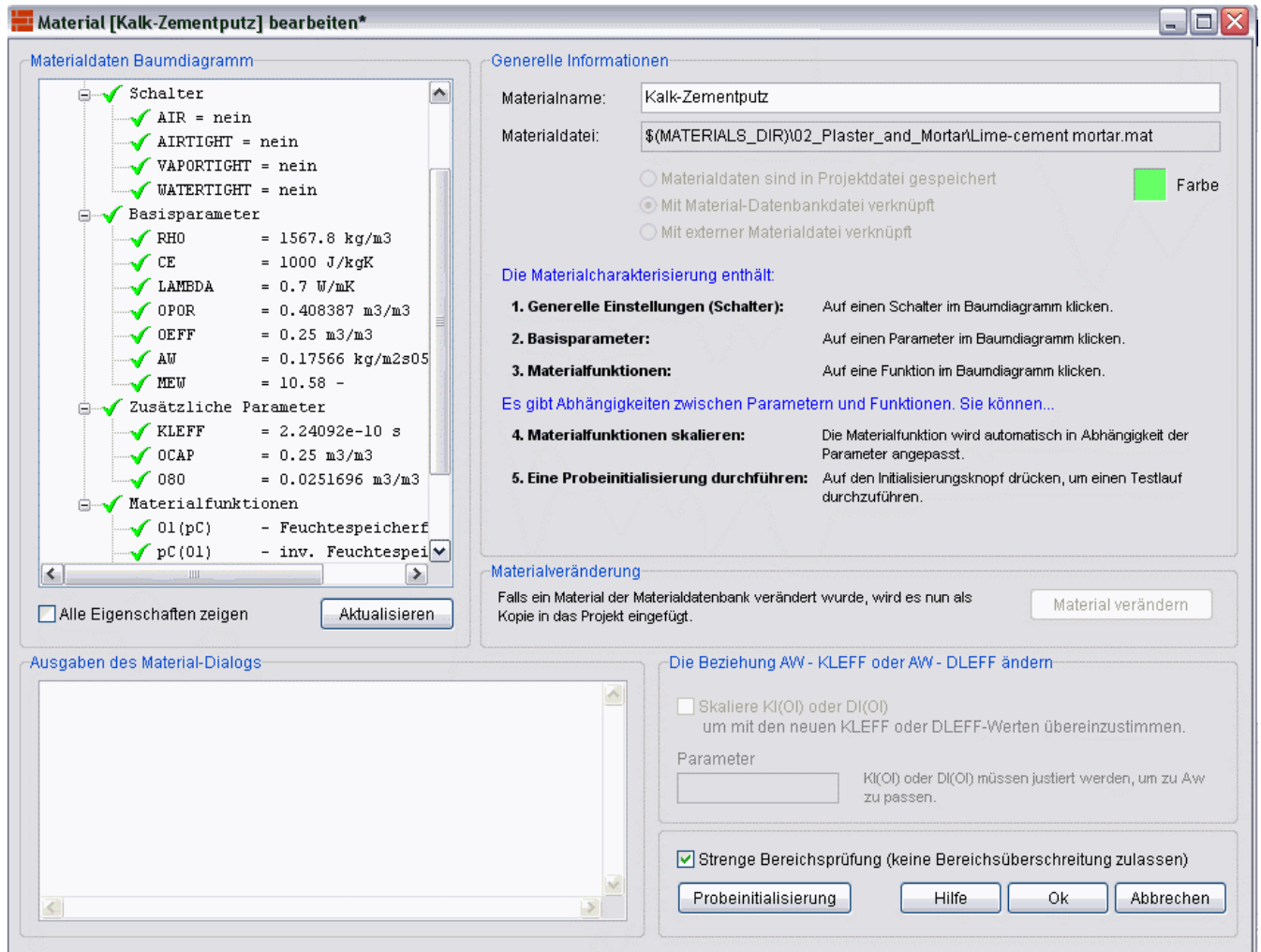


Abb. 36: Gewählte Materialparameter für den Außenputz

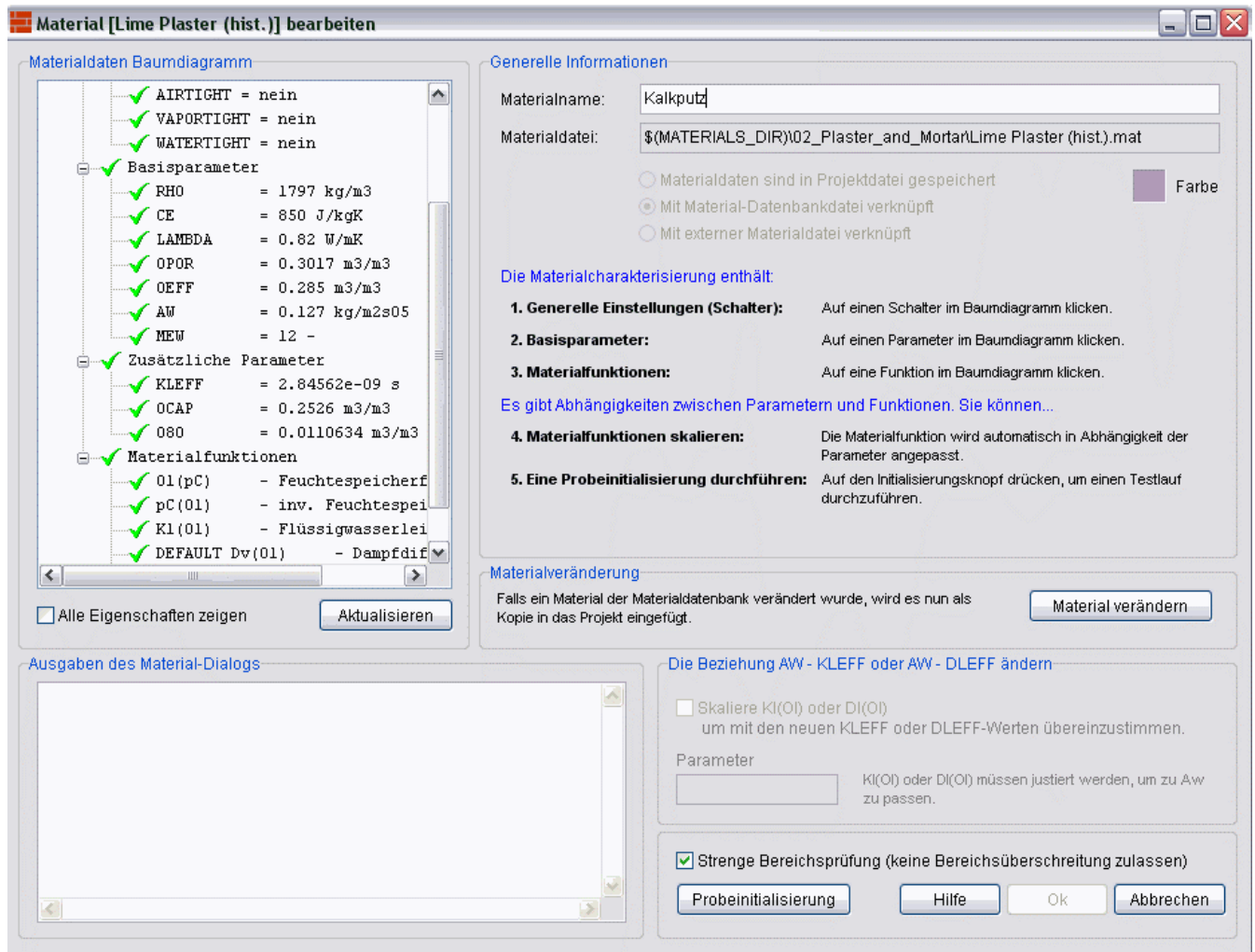


Abb. 37: Gewählte Materialparameter für den Innenputz

8.4.2 Simulationsergebnisse zur Entwicklung der Mauerfeuchte bei wechselnden Randbedingungen

8.4.2.1 Mauerwerk im Ist – Zustand (Fälle 1)

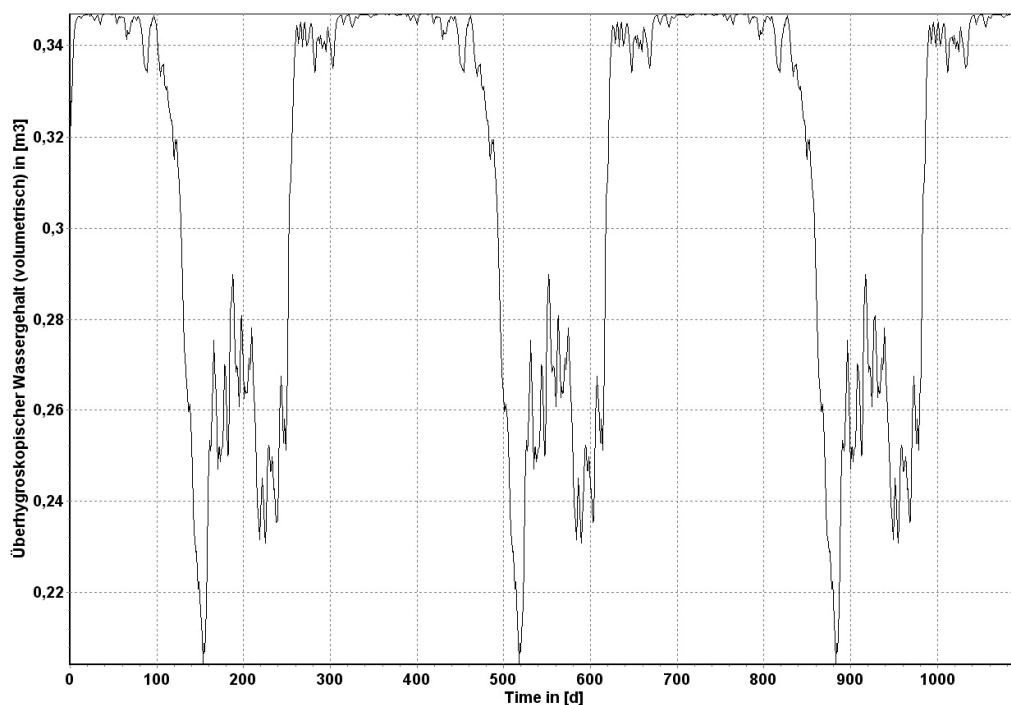


Abb. 38: Fall 1AC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt. Zur Abbildung der gravimetrisch ermittelten Materialfeuchtwerte wurde die Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven leicht erhöht. Die in der Simulation erkennbare Austrocknung über die Sommermonate konnte in der Praxis nicht beobachtet werden.

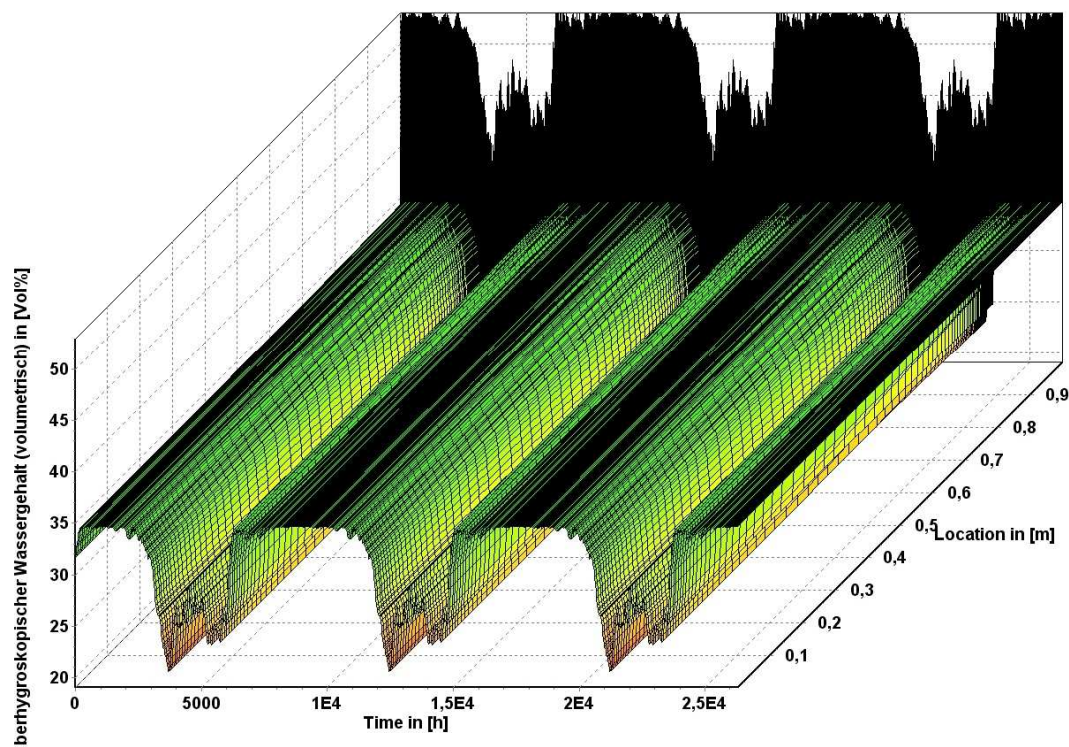


Abb. 39: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 38 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Während der Trockenphasen ist ein Feuchtgradient von außen nach innen zu beobachten.

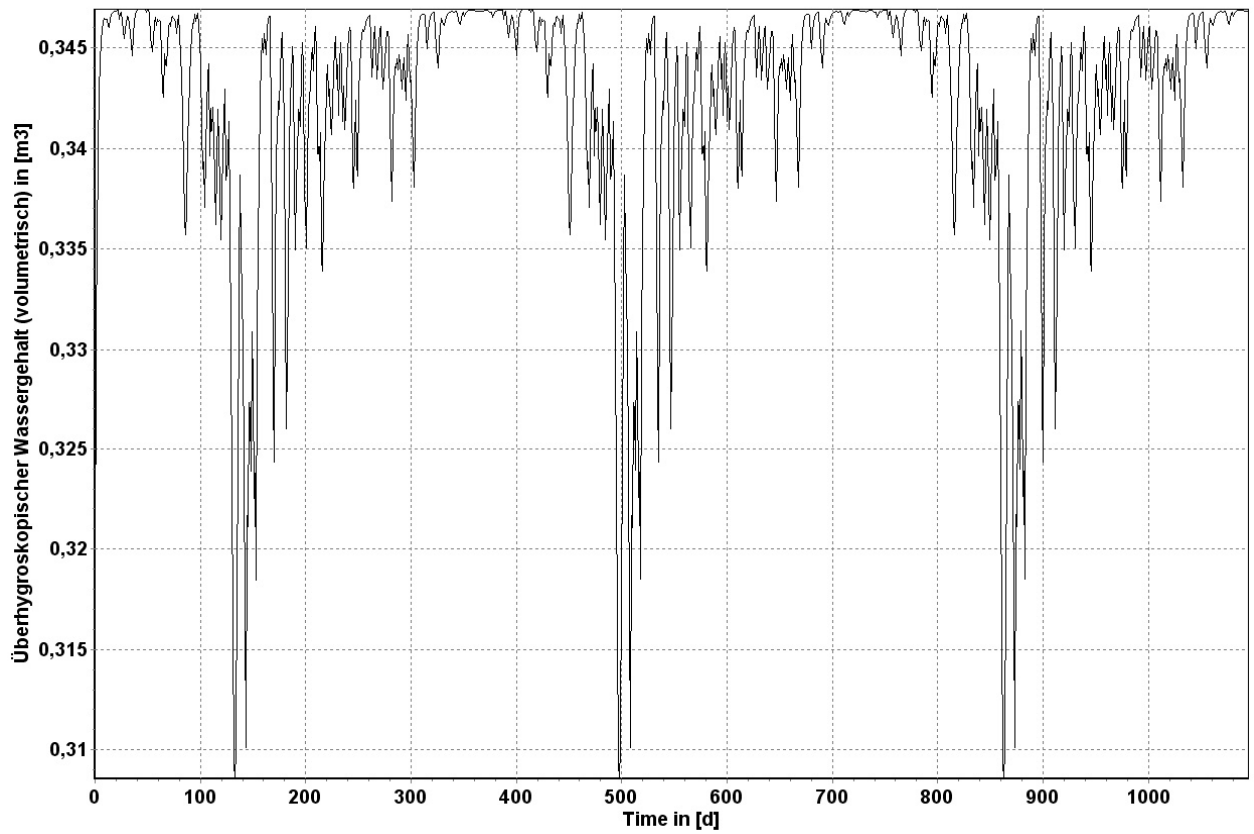


Abb. 40: Fall 1BC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt. Zur Abbildung der gravimetrisch ermittelten Materialfeuchtwerte wurde die Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven stark erhöht.

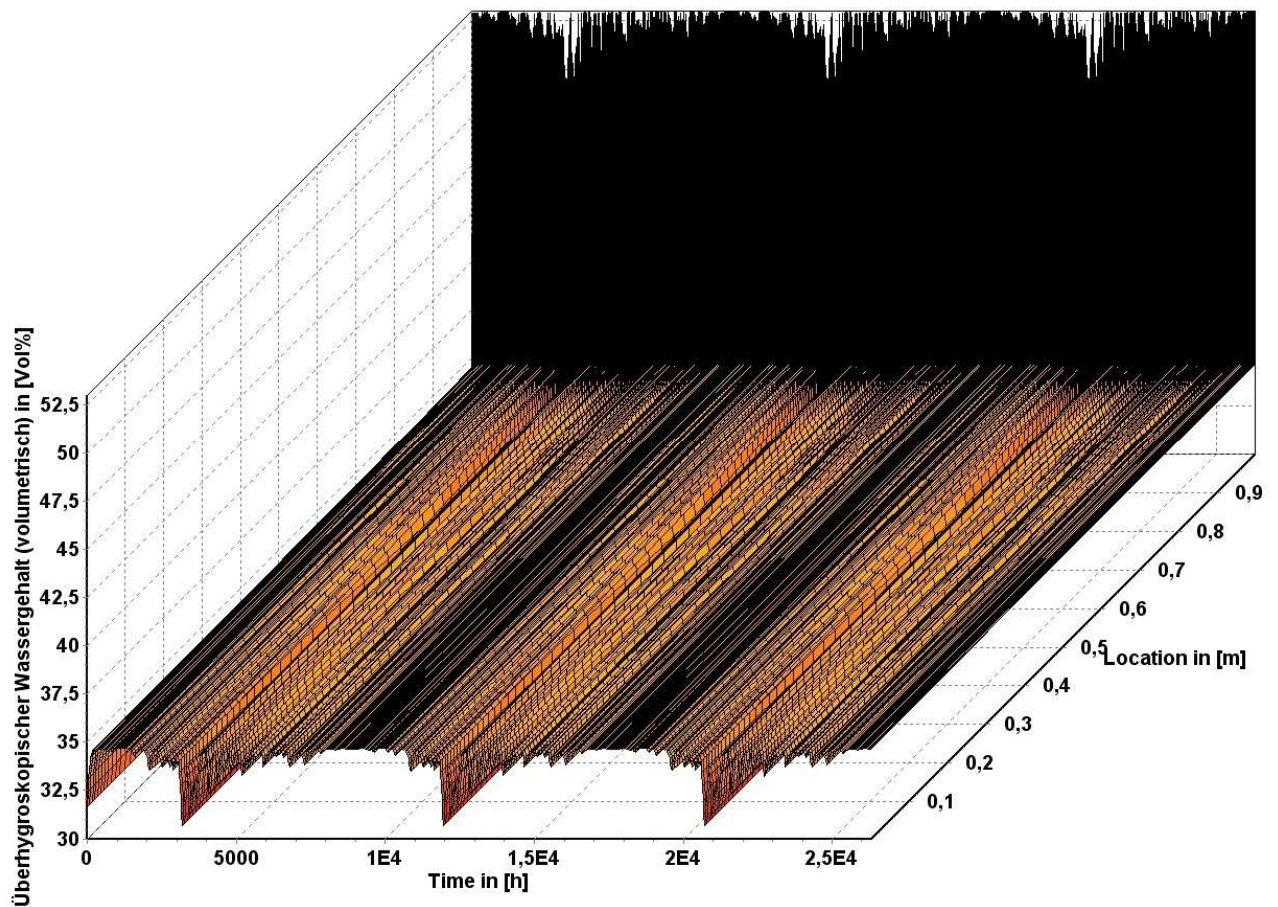


Abb. 41: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 40 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

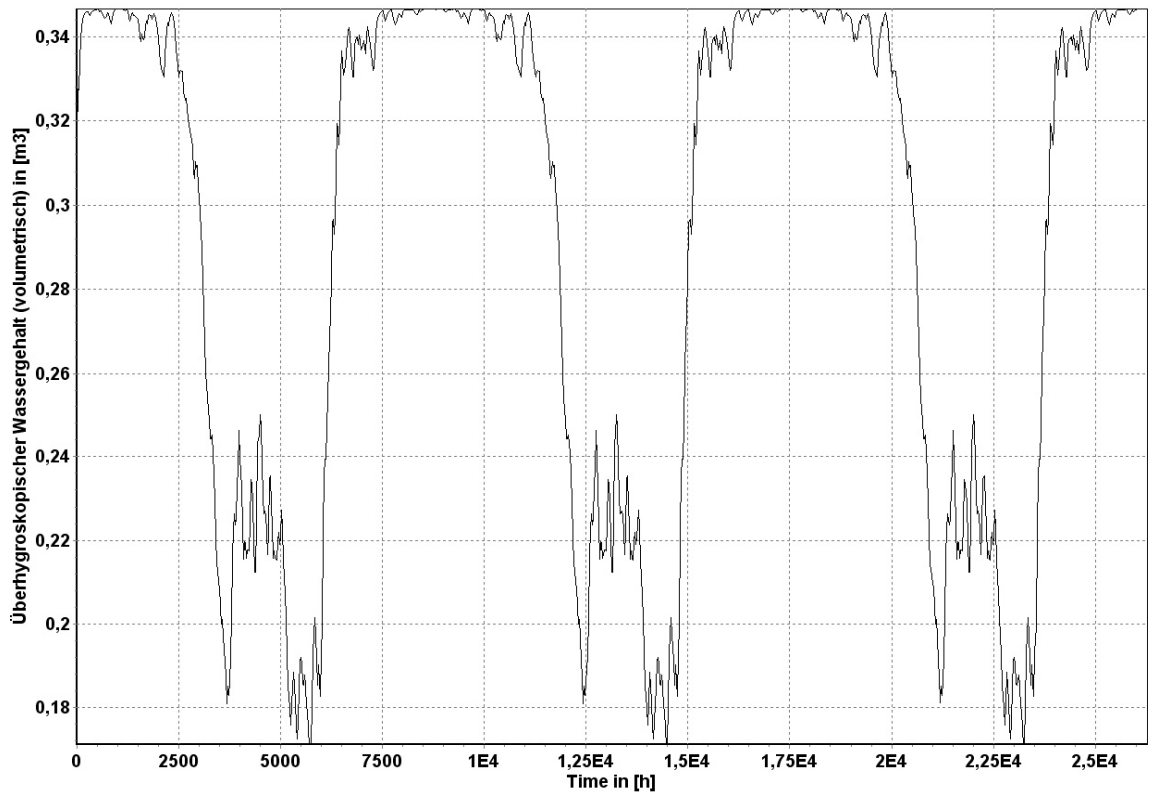


Abb. 42: Fall 1AD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten leicht erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Ein Vergleich mit Abb. 38 zeigt eine geringere Feuchtebelastung während der Trocknungsphasen.

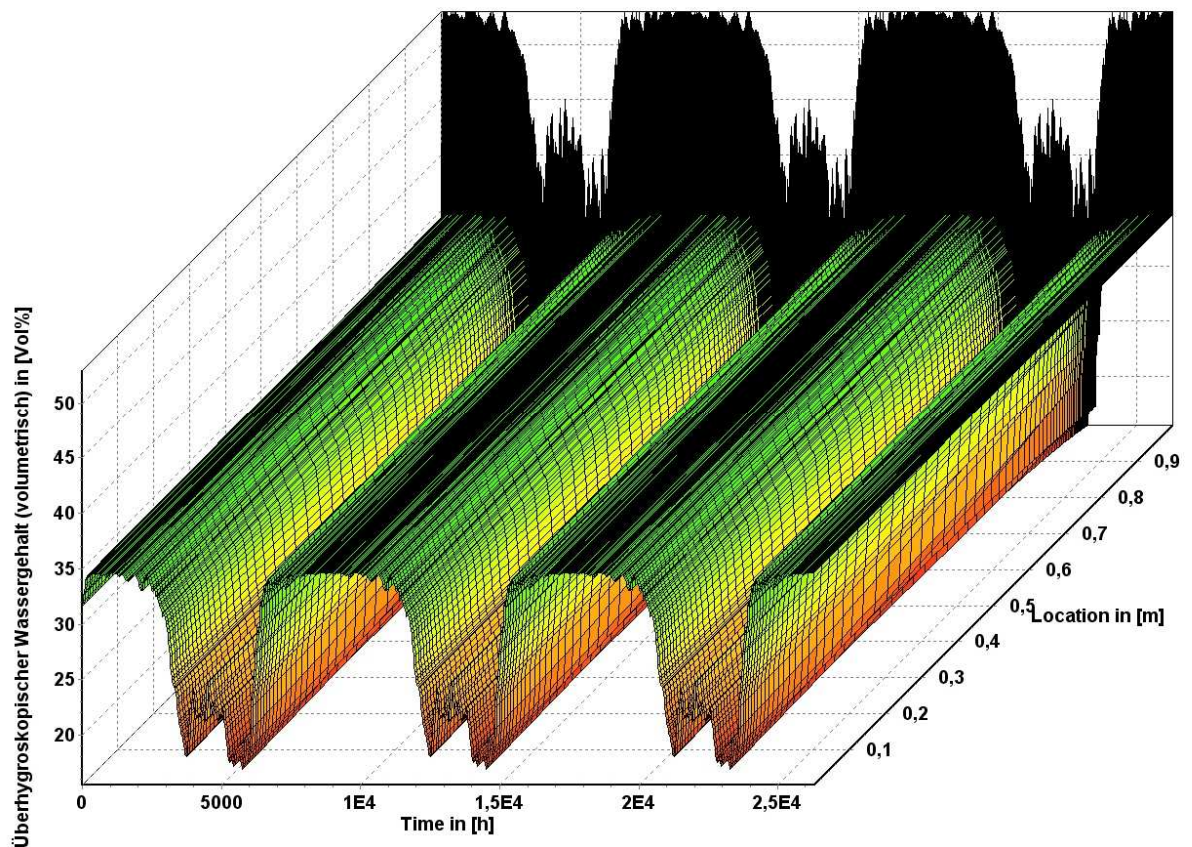


Abb. 43: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 42 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Während der Trocknungsperiode ist ein Feuchtgradient von außen nach innen erkennbar.

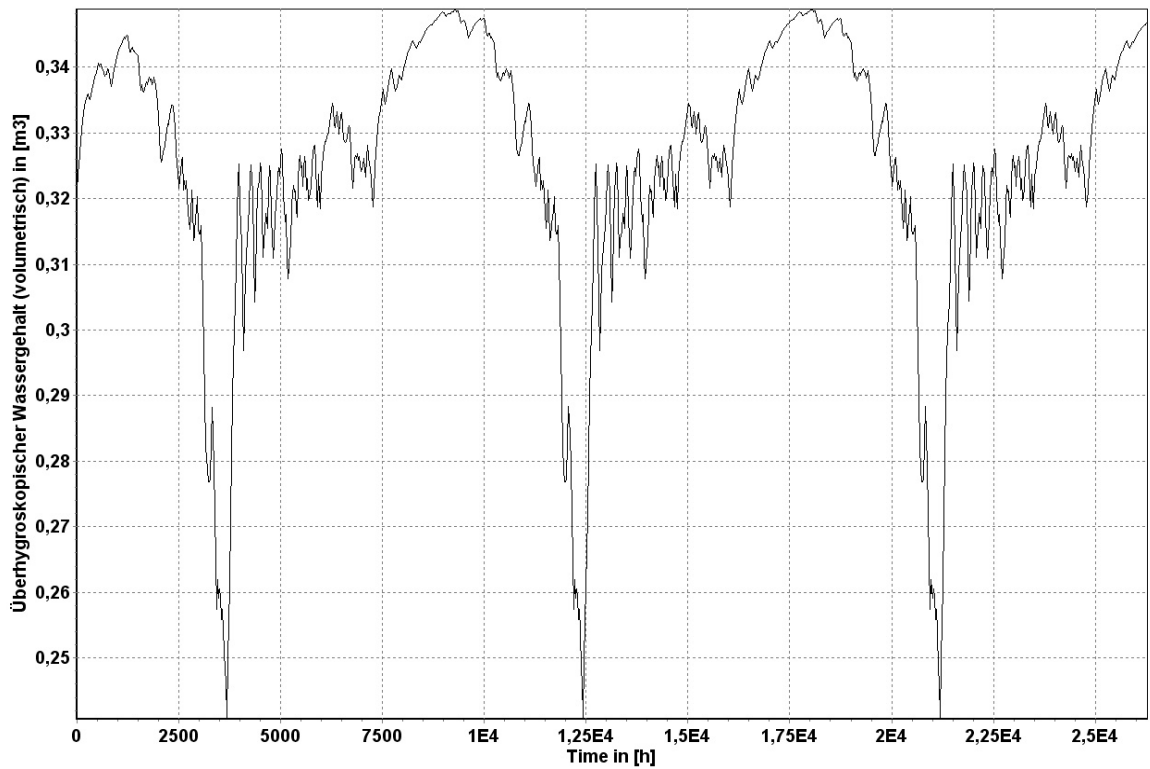


Abb. 44: Fall 1BD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten stark erhöht, Feuchte der Raumlufte gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 40 zu einer insgesamt geringeren Feuchtebelastung.

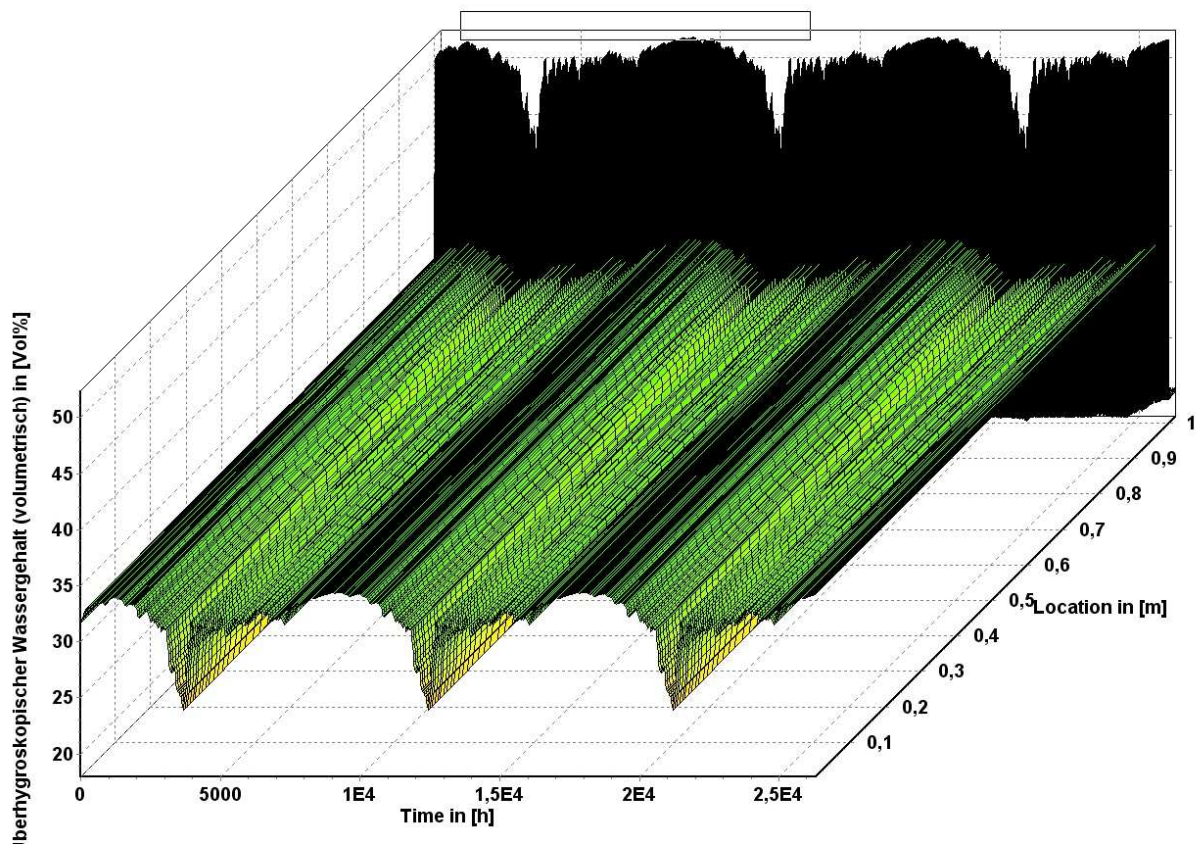


Abb. 45: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 44 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

8.4.2.2 Mauerwerk mit Außenputz (Fälle 2)

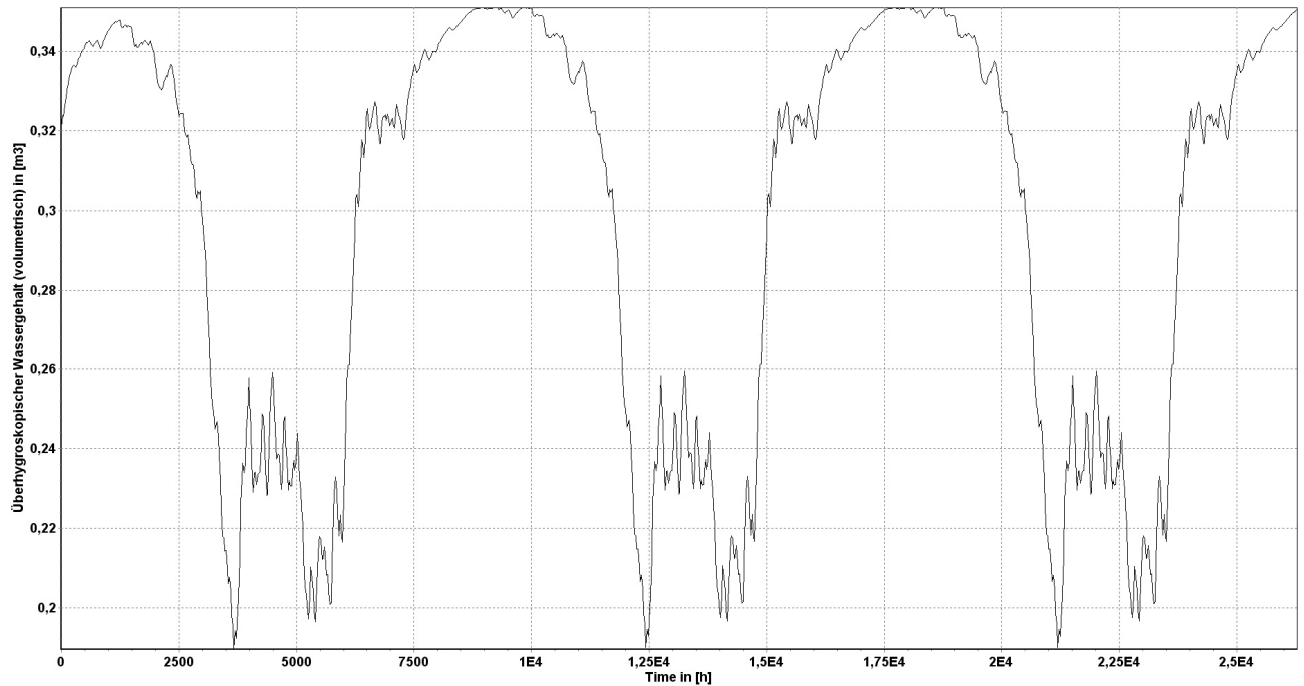


Abb. 46: Fall 2AC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven leicht erhöhter Regenbelastung. Gegenüber dem unverputzten Zustand (Abb. 38) ist insgesamt eine geringfügig niedrigere Feuchtebelastung festzustellen, die jedoch langfristig auf hohen Durchschnittswerten verharrt (es zeichnet sich keine dauerhafte Trocknung ab)

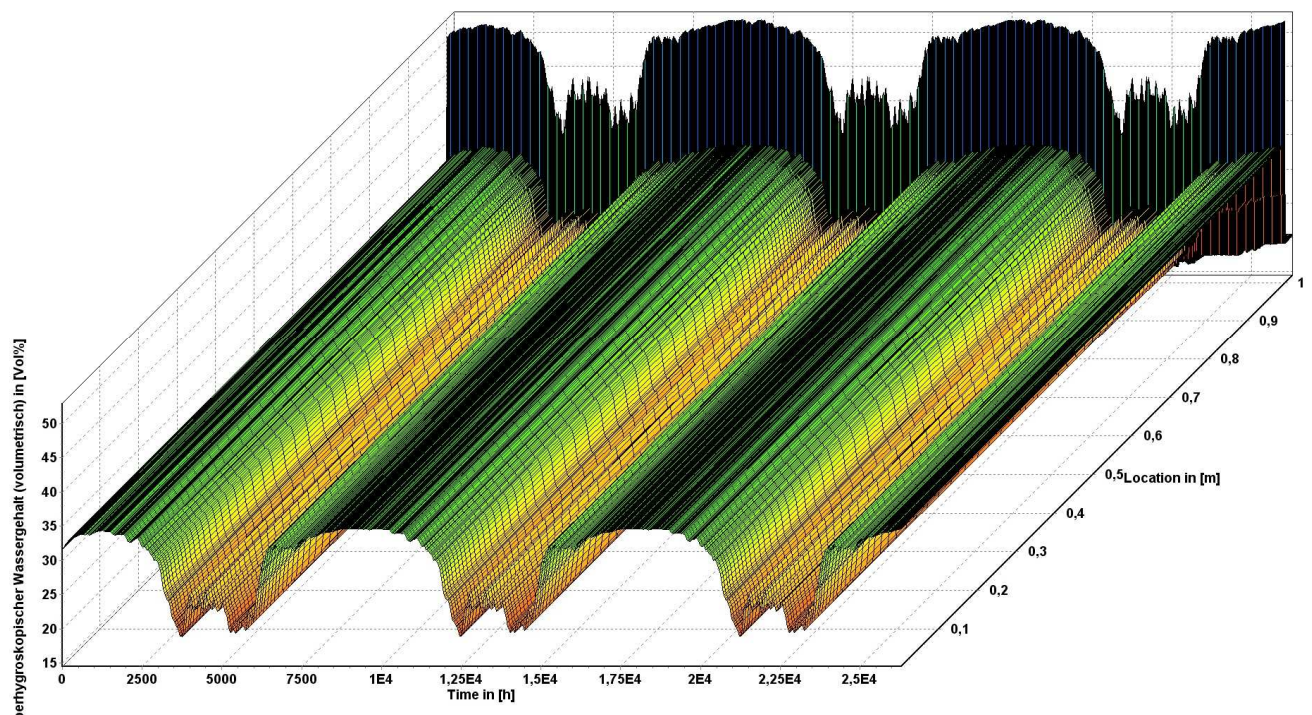


Abb. 47: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 46 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

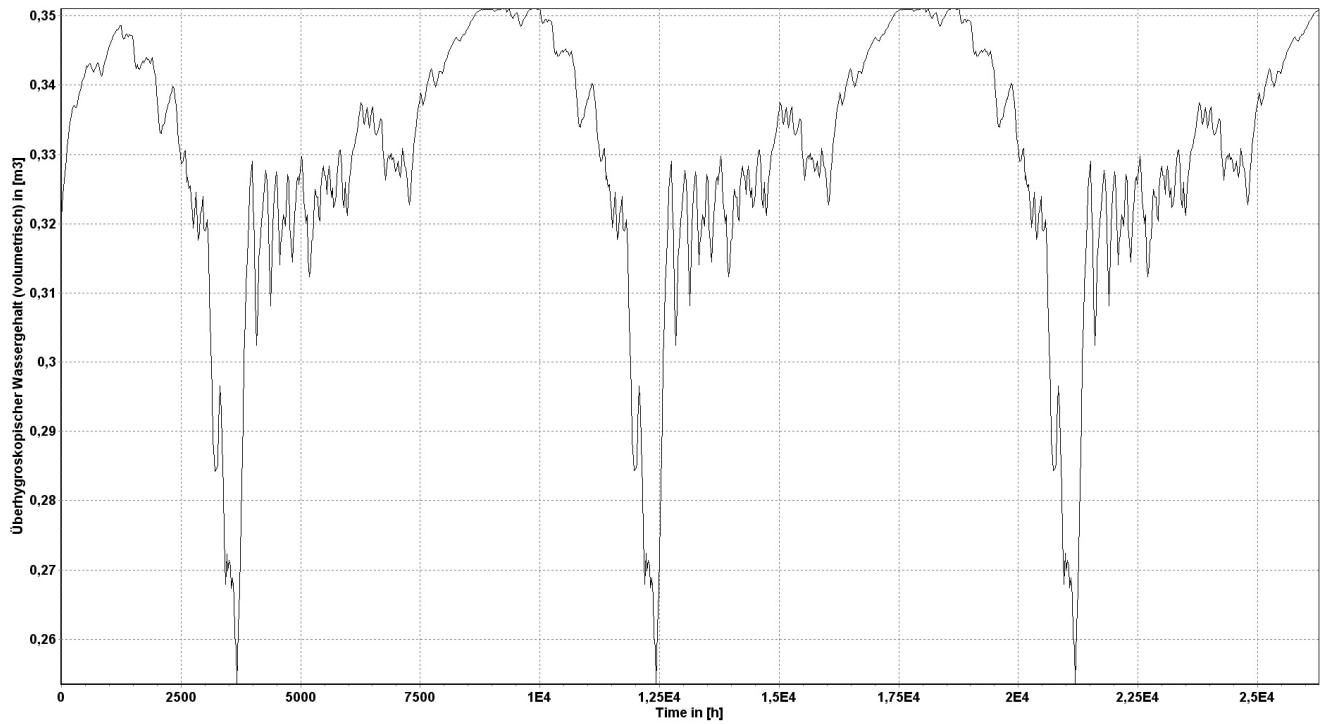


Abb. 48: Fall 2BC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven stark erhöhter Regenbelastung. Im Vergleich mit Abb. 40 führt der Außenputz zu einer insgesamt geringfügig niedrigeren Feuchtebelastung. Eine dauerhafte Trocknung zeichnet sich jedoch nicht ab.

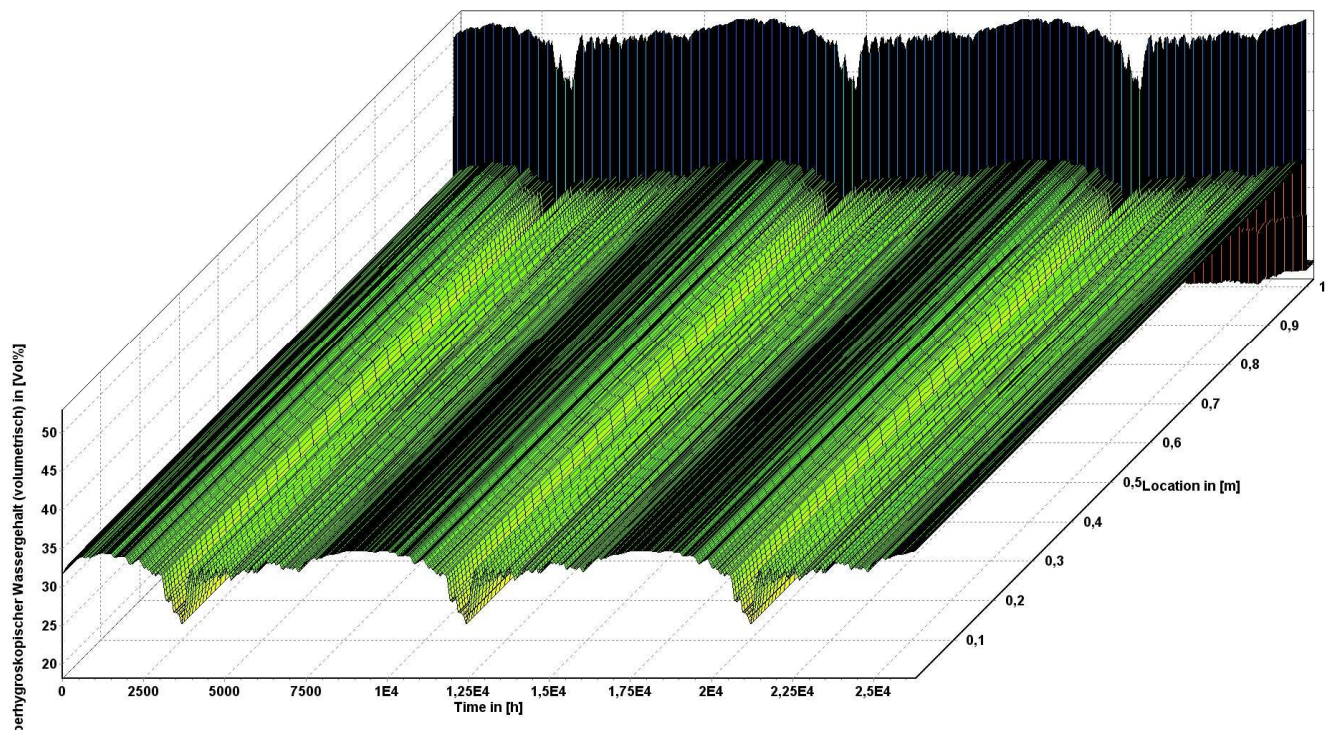


Abb. 49: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 48 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen

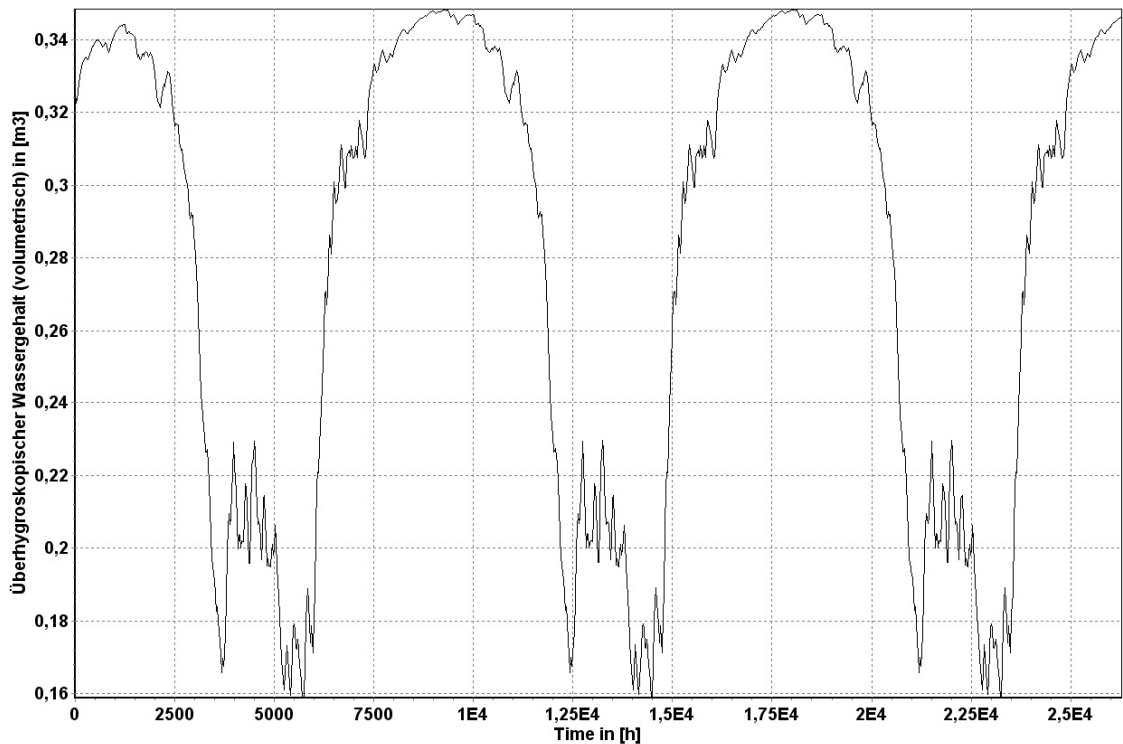


Abb. 50: Fall 2AD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten leicht erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 46 zu einer geringeren Feuchtebelastung während der Trocknungsphasen. Im Vergleich mit Abb. 42 führt der Außenputz zu einer insgesamt geringfügig niedrigeren Feuchtebelastung. Eine dauerhafte Trocknung zeichnet sich jedoch nicht ab.

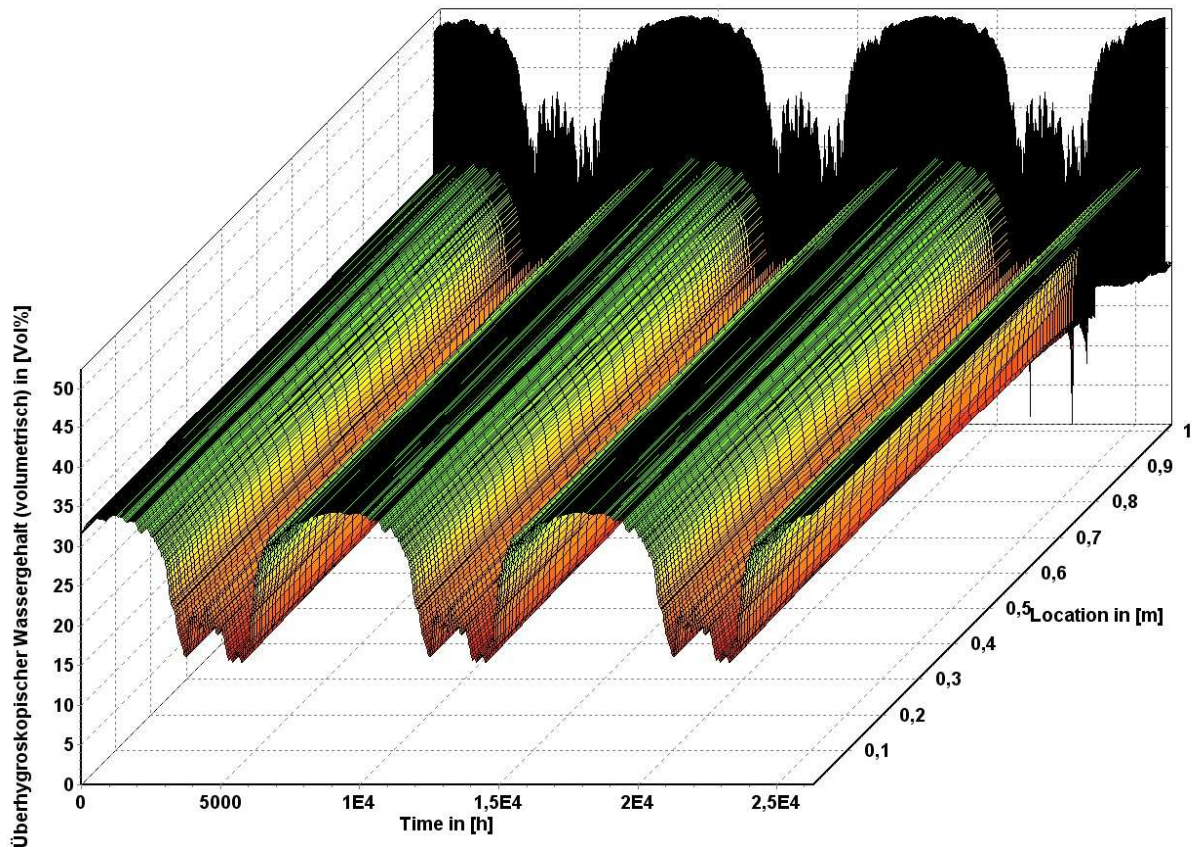


Abb. 51: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 50 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Während der Trocknungsperiode ist ein Feuchtegradient von außen nach innen erkennbar.

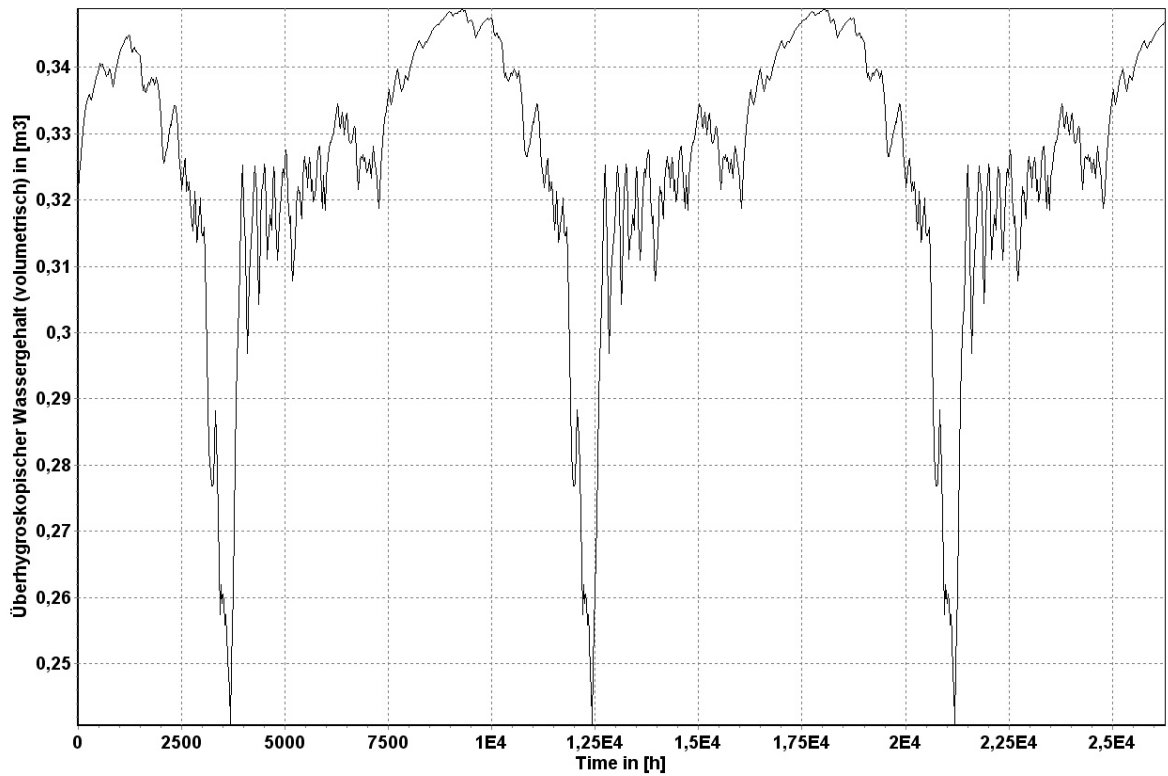


Abb. 52: Fall 2BD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten stark erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 48 zu einer insgesamt geringeren Feuchtebelastung.

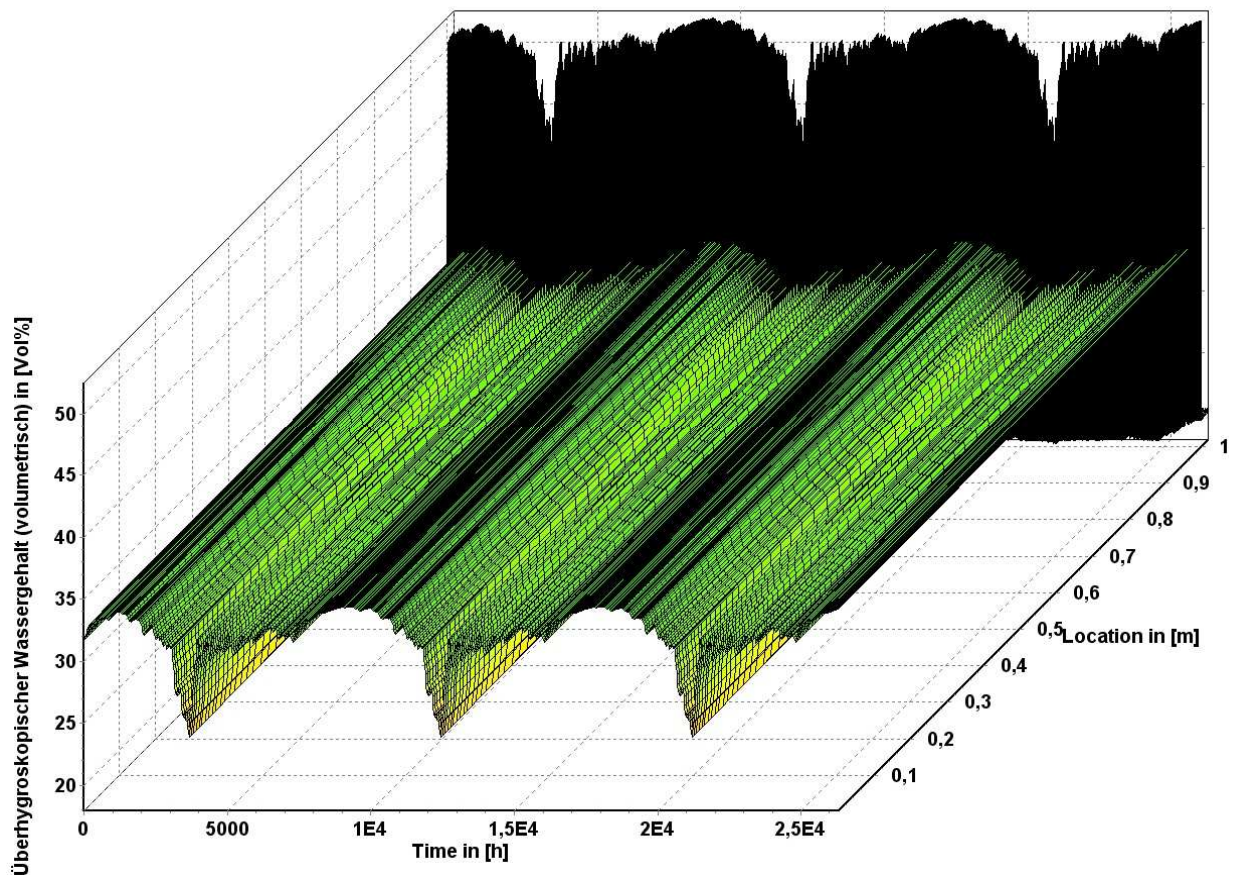


Abb. 53: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 52 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen

8.4.2.3 Mauerwerk mit Außenputz einschließlich Hydrophobierung (Fälle 3)

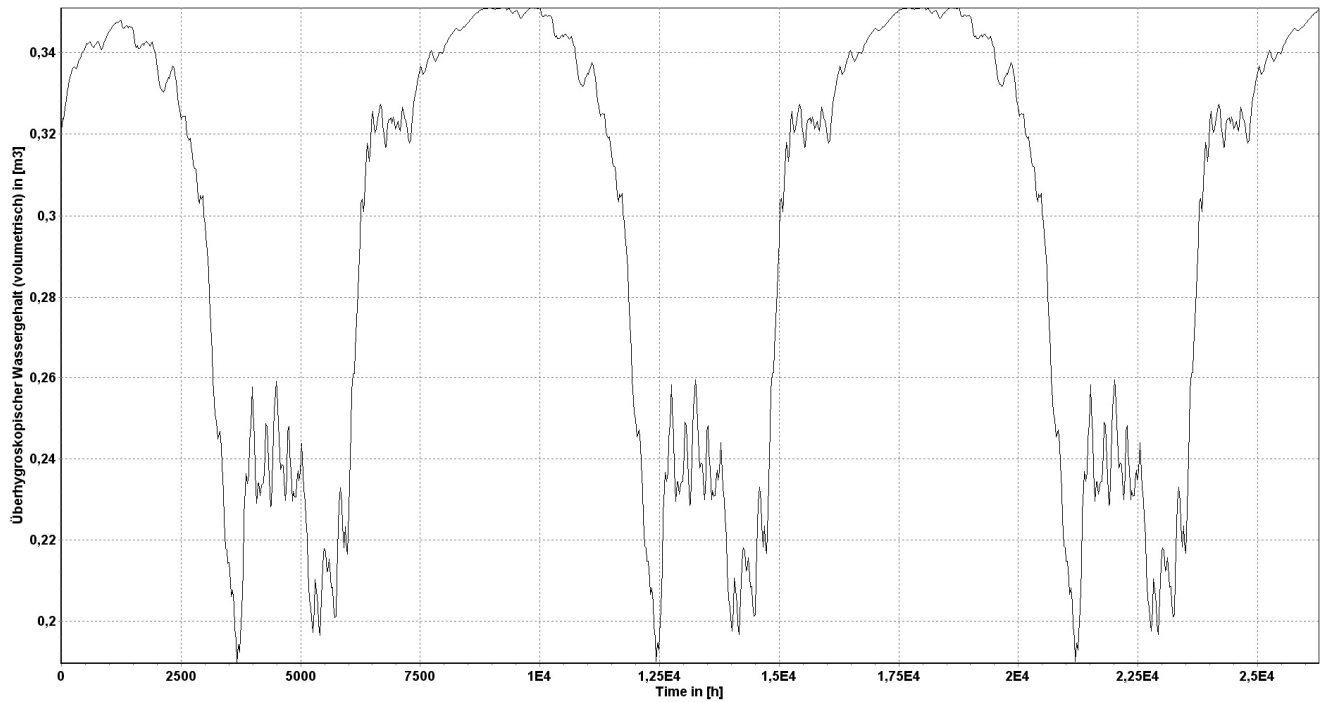


Abb. 54: Fall 3AC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven leicht erhöhter Regenbelastung.

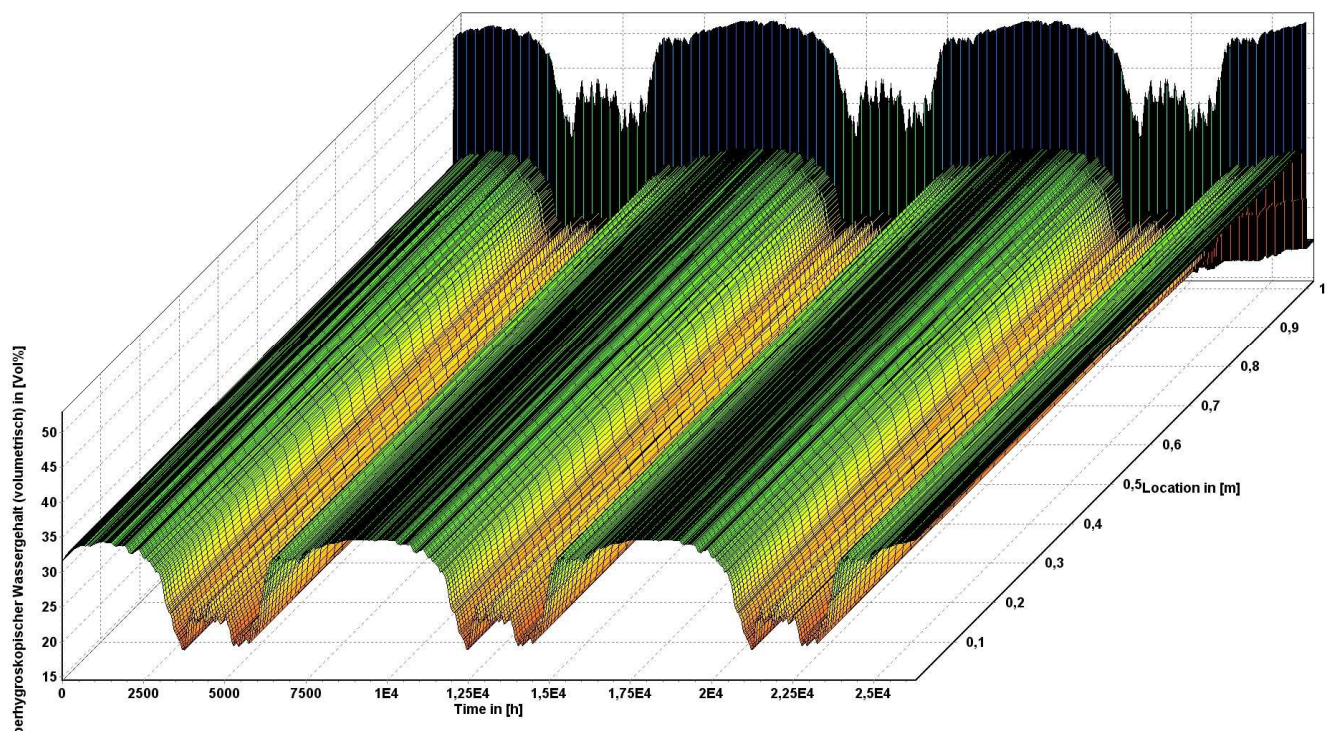


Abb. 55: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 54 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

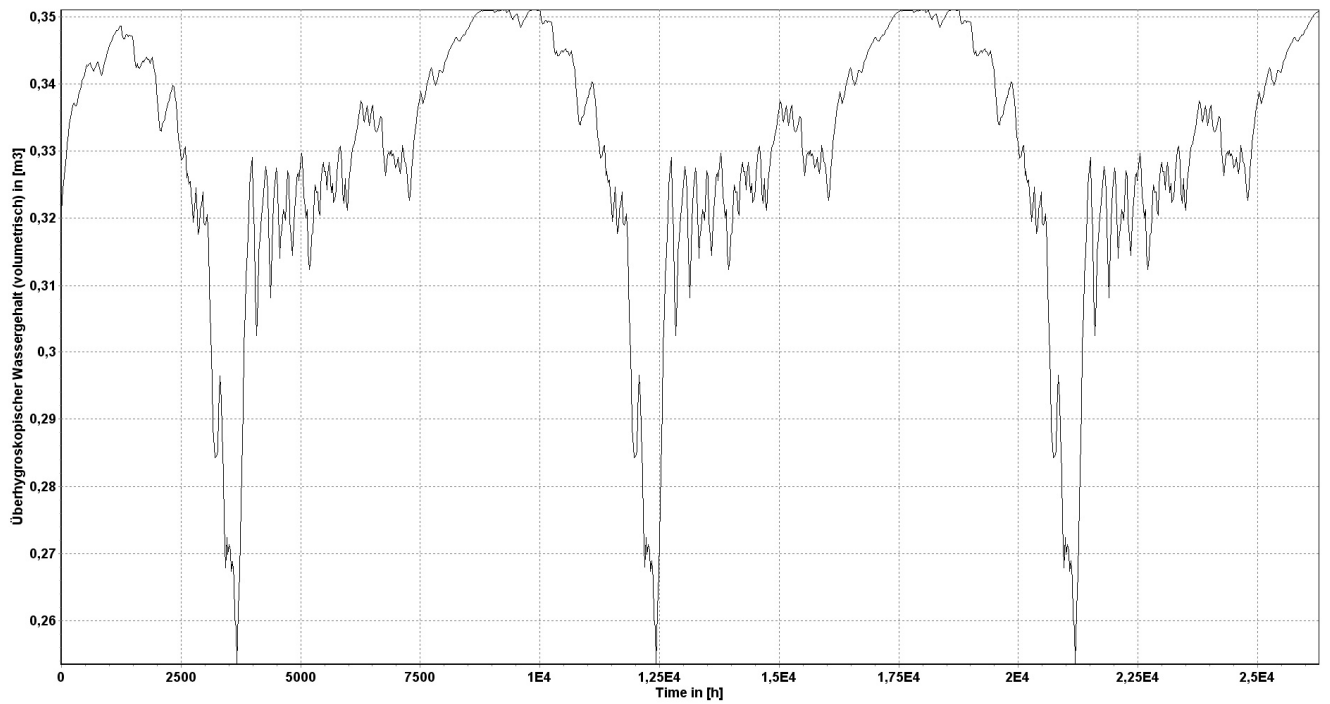


Abb. 56: Fall 3BC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven stark erhöhter Regenbelastung.

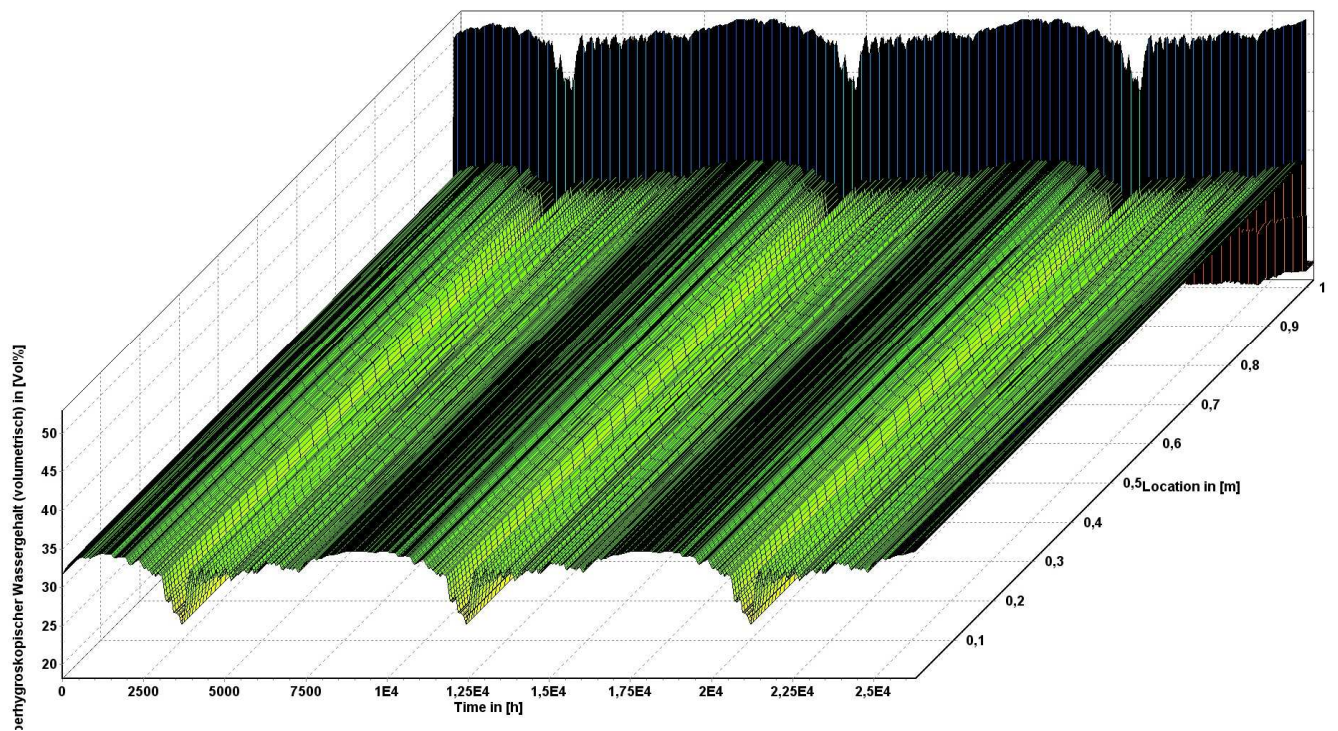


Abb. 57: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 56 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

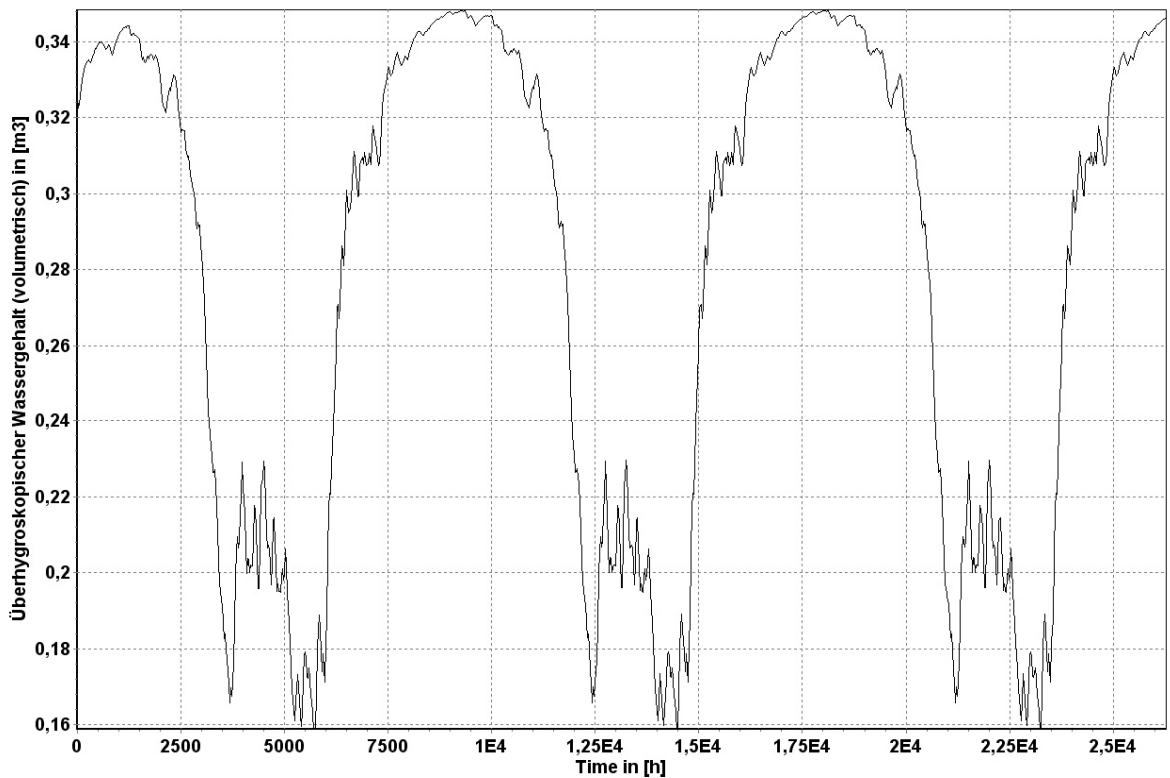


Abb. 58: Fall 3AD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten leicht erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 54 zu einer geringeren Feuchtebelastung während der Trocknungsphasen.

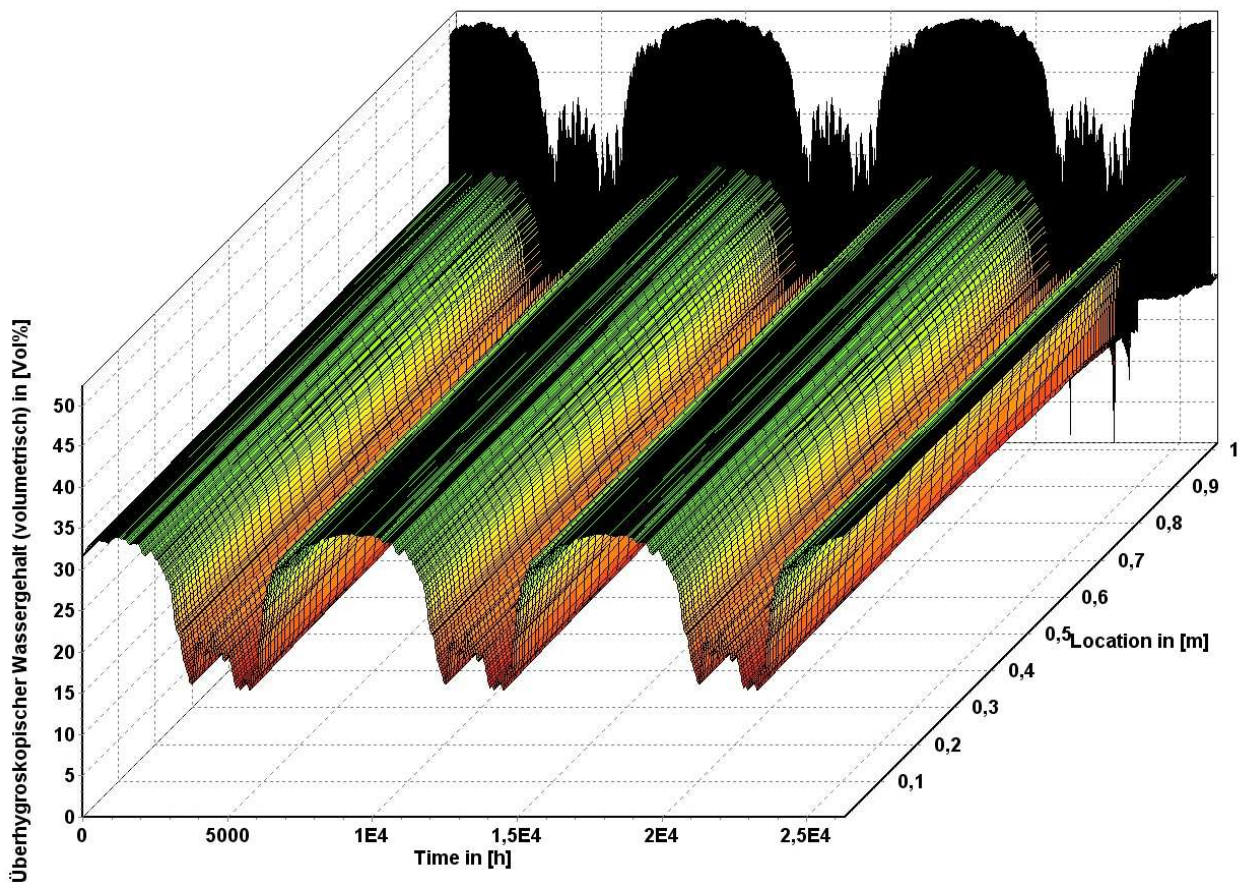


Abb. 59: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 58 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Während der Trocknungsperiode ist ein Feuchtegradient von außen nach innen erkennbar.

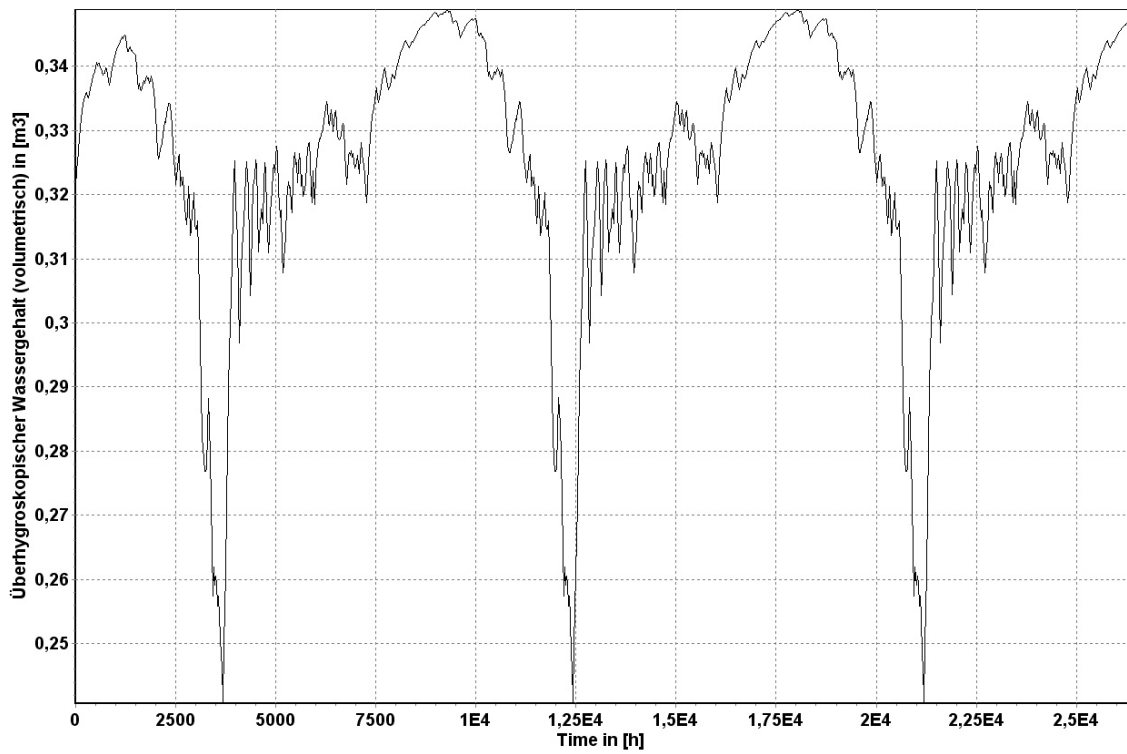


Abb. 60: Fall 3BD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten stark erhöht, Feuchte der Raumlufte gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 56 zu einer insgesamt geringeren Feuchtebelastung.

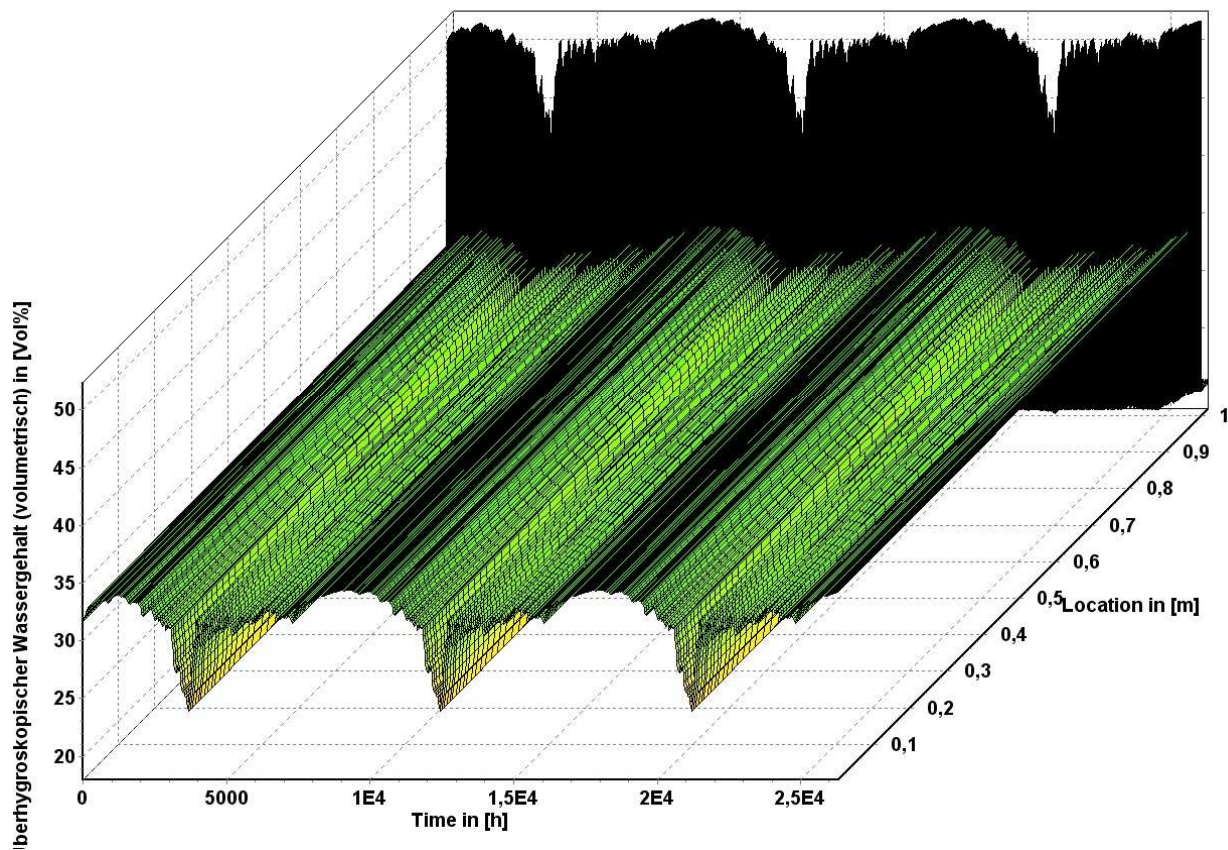


Abb. 61: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 60 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

8.4.2.4 Mauerwerk mit Innenputz (Fälle 4)

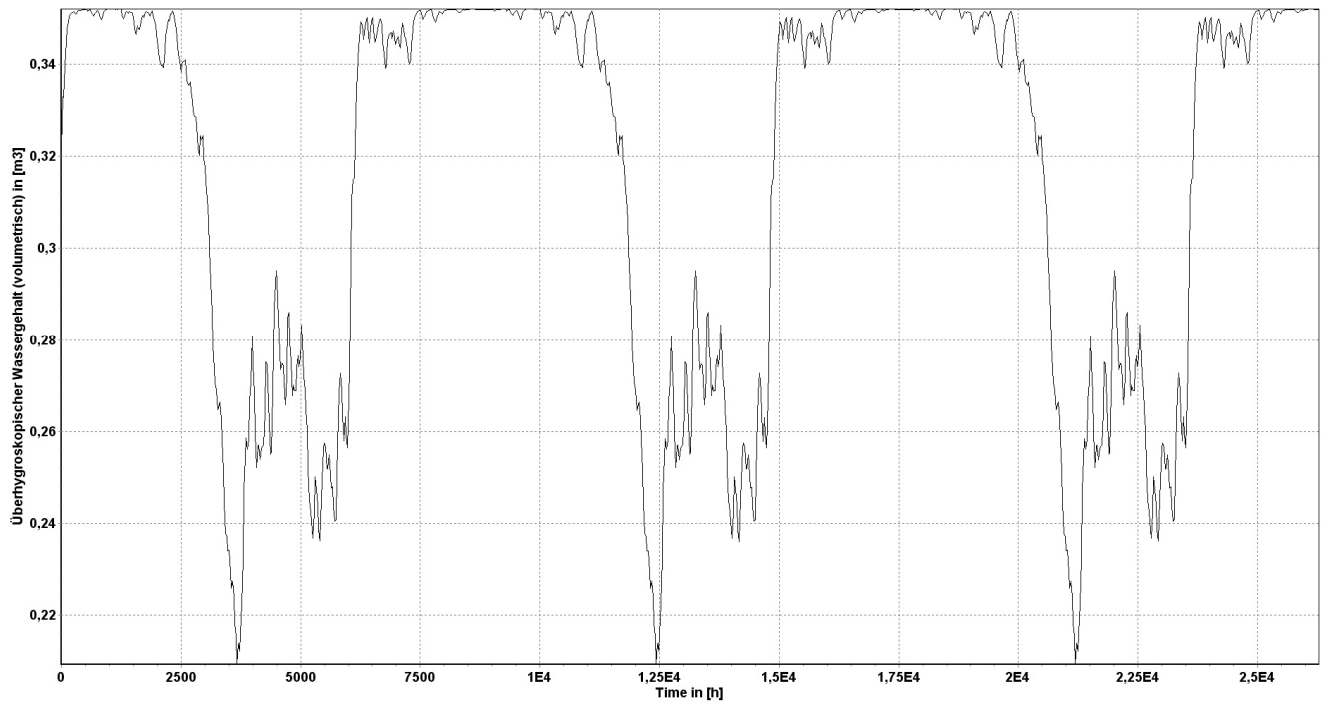


Abb. 62: Fall 4AC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven leicht erhöhter Regenbelastung. Im Vergleich mit Abb. 38 zeigt sich eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz.

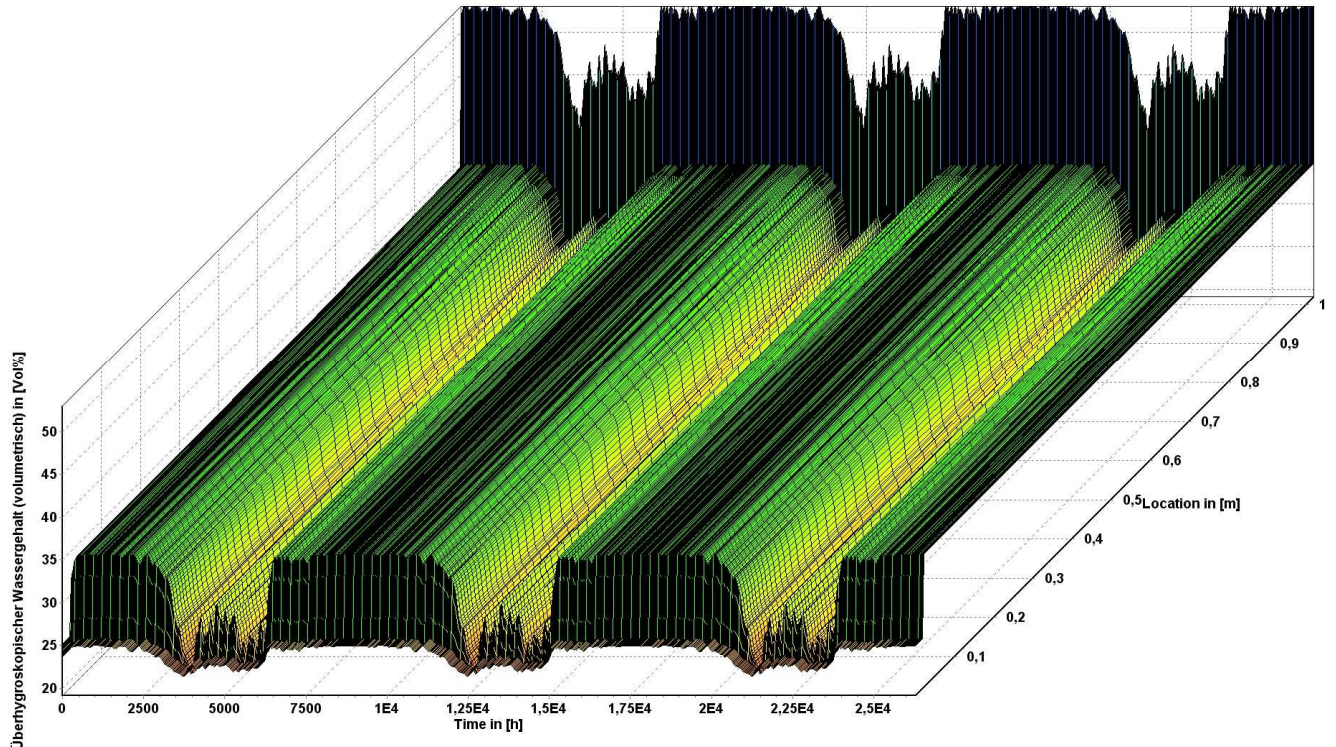


Abb. 63: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 62 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

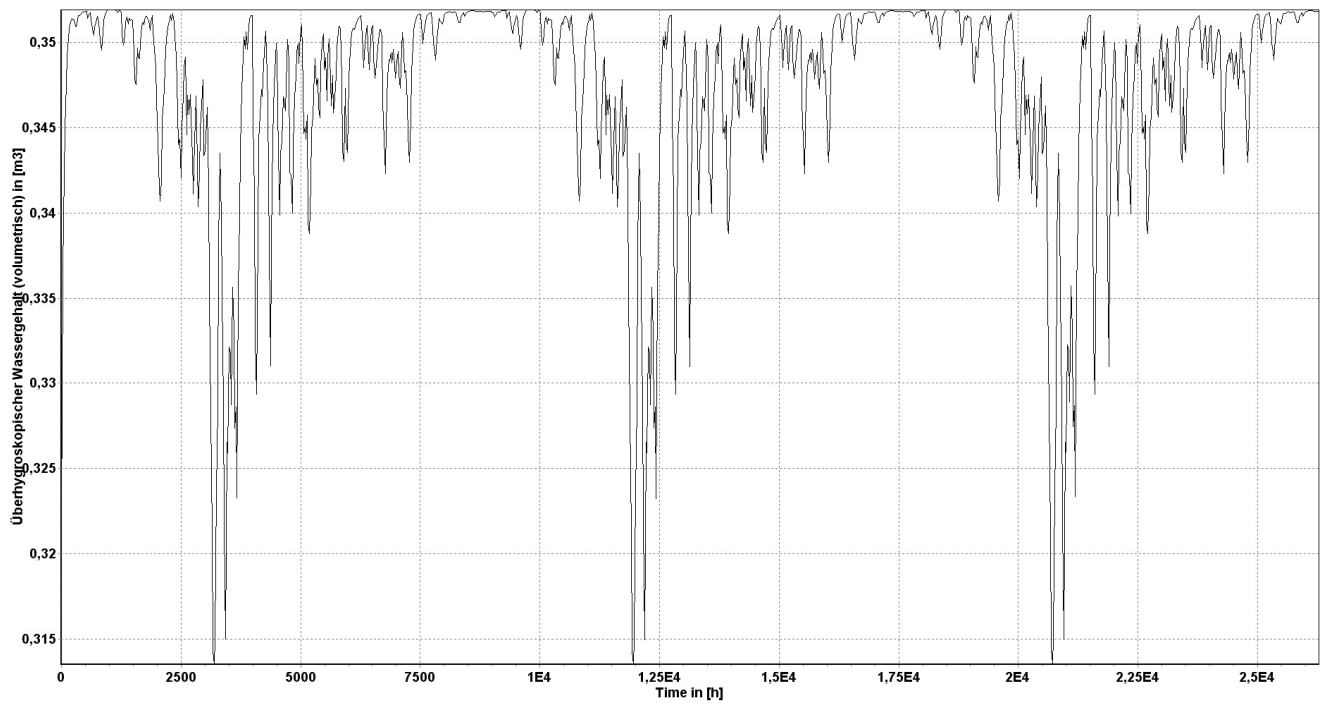


Abb. 64: Fall 4BC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven stark erhöhter Regenbelastung. Im Vergleich mit Abb. 40 zeigt sich eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz.

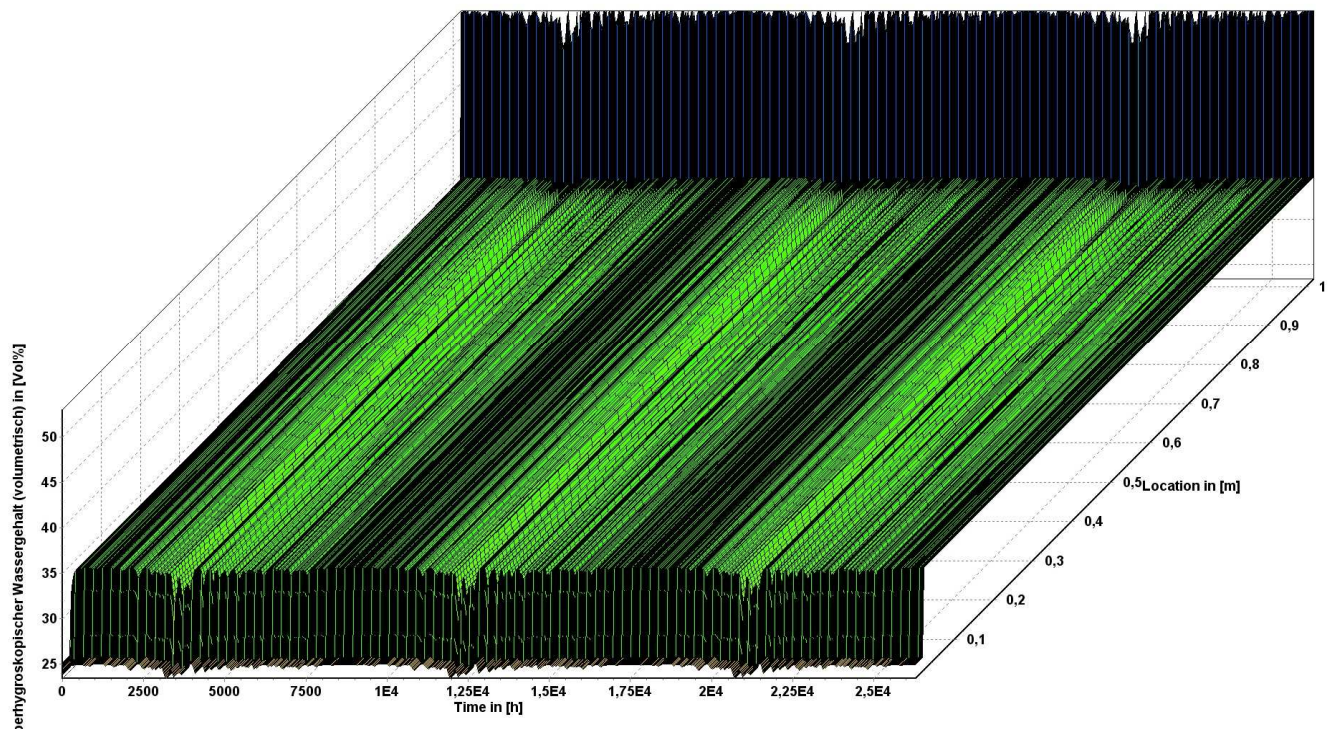


Abb. 65: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 64 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Im Vergleich mit Abb. 41 zeigt sich phasenweise eine Trocknungsbehinderung durch den gewählten Innenputz.

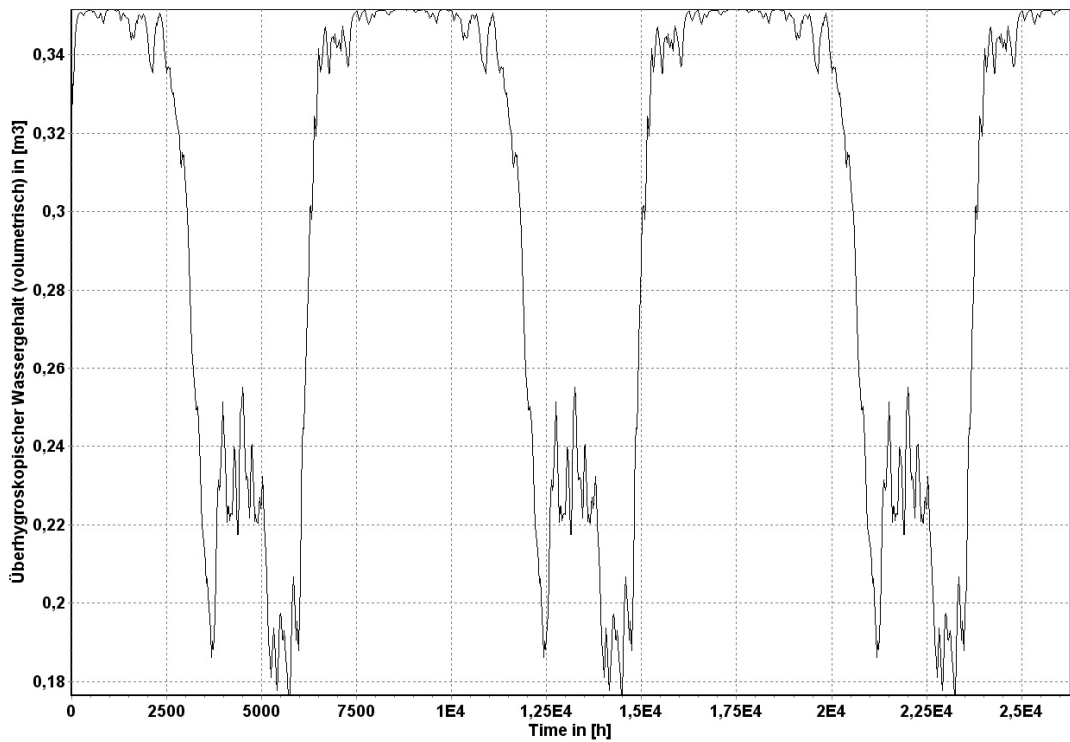


Abb. 66: Fall 4AD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten leicht erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 62 zu einer geringeren Feuchtebelastung während der Trocknungsphasen. Im Vergleich mit Abb. 42 zeigt sich eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz.

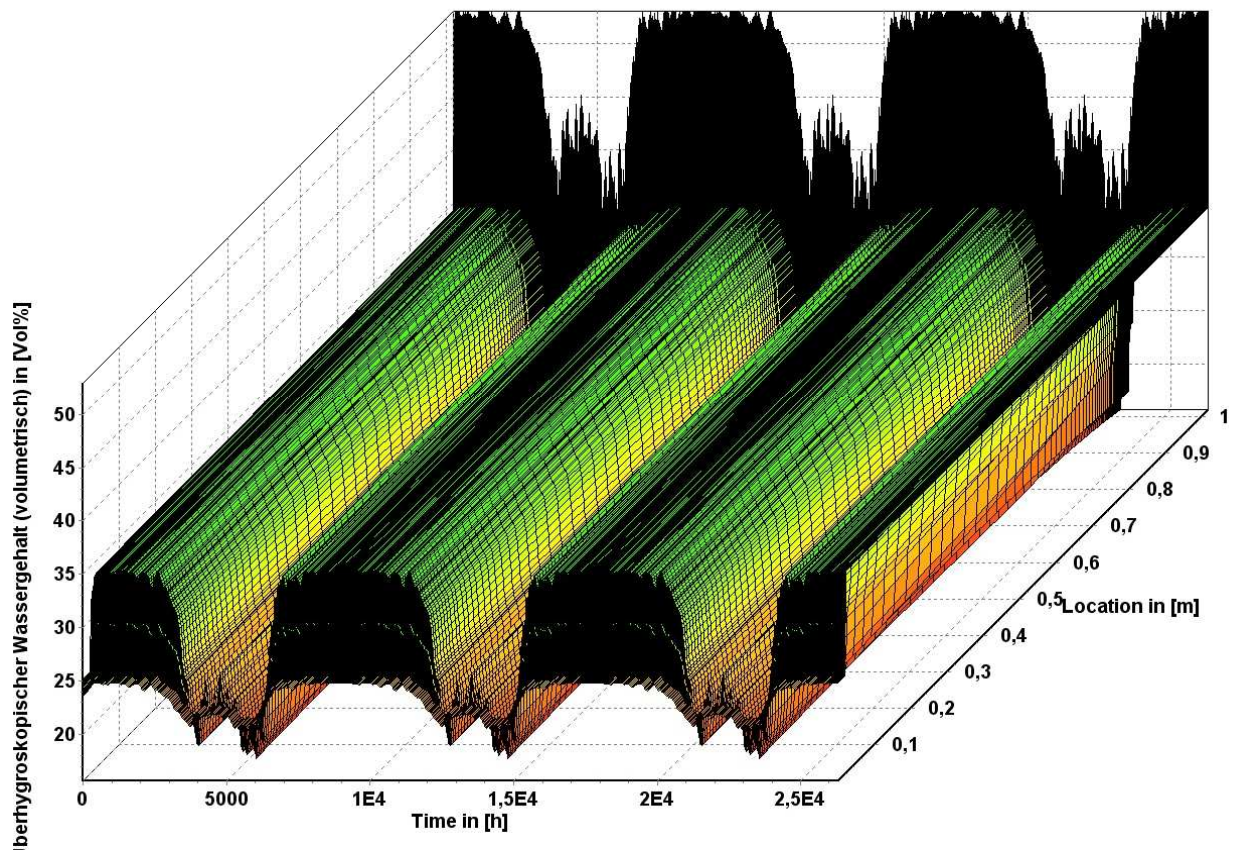


Abb. 67: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 66 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Während der Trocknungsperiode ist ein erkennbar. Ein Vergleich mit Abb. 43 zeigt im Gegensatz zu den Simulationen mit den raumseitigen Parametern des Bestandsklimas (Abb. 41 und Abb. 65) eine geringere Trocknungsblockade durch den Innenputz.

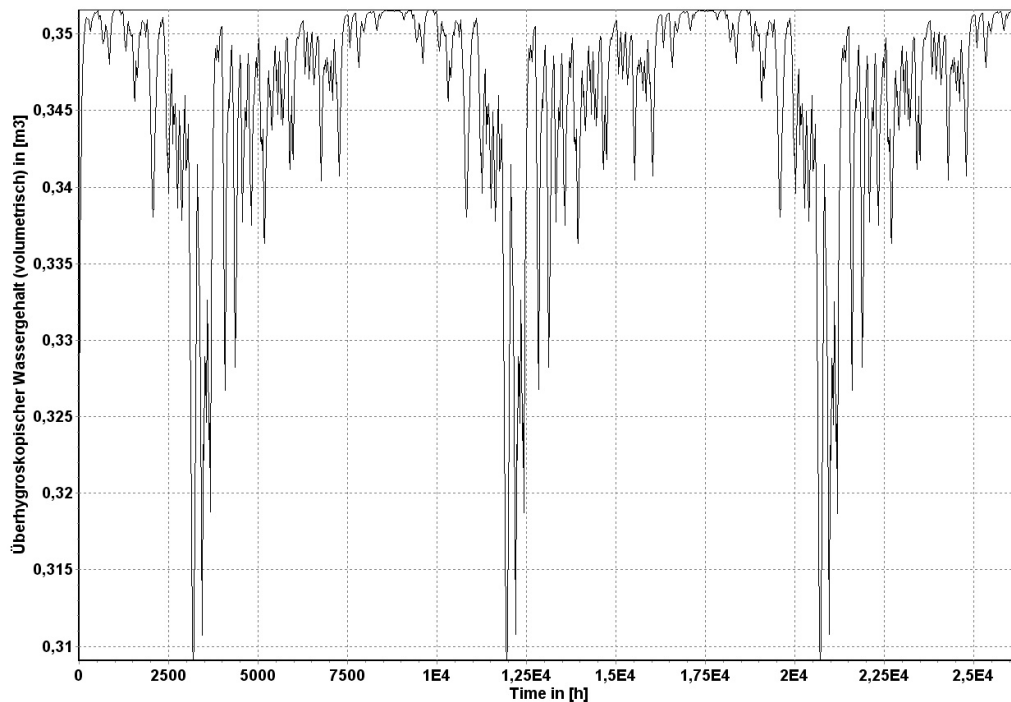


Abb. 68: Fall 4BD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten stark erhöht, Feuchte der Raumlufte gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 64 zu einer insgesamt geringeren Feuchtebelastung. Im Vergleich mit Abb. 44 zeigt sich eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz.

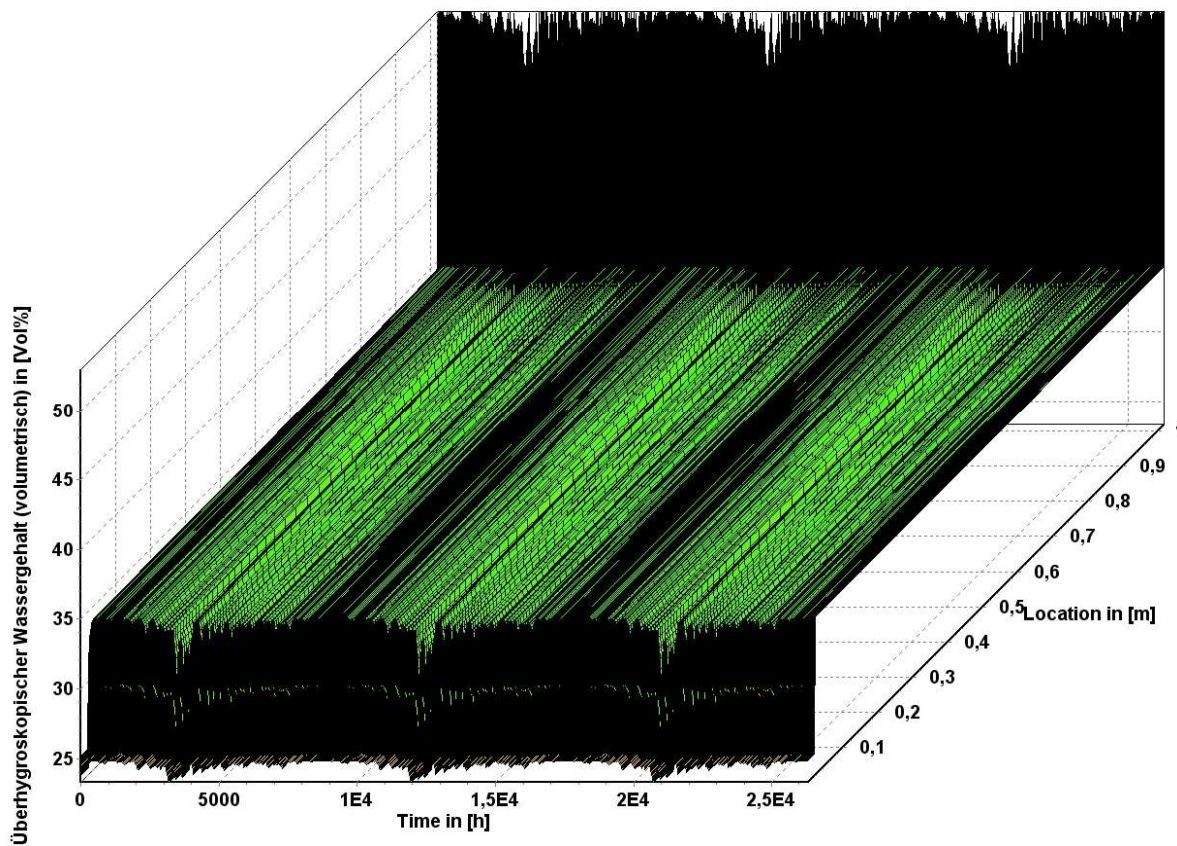


Abb. 69: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 68 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Ein Vergleich mit der Simulation bei gleichen Randbedingungen ohne Putz (Abb. 45) zeigt im Gegensatz zu den Simulationen bei leicht erhöhter Regenbelastung (Abb. 43 und Abb. 67) auch bei reduzierter Luftfeuchte im Innenraum eine deutliche Trocknungsblockade für das Mauerwerk durch den Innenputz.

8.4.2.5 Mauerwerk mit Außen- und Innenputz (Fälle 5)

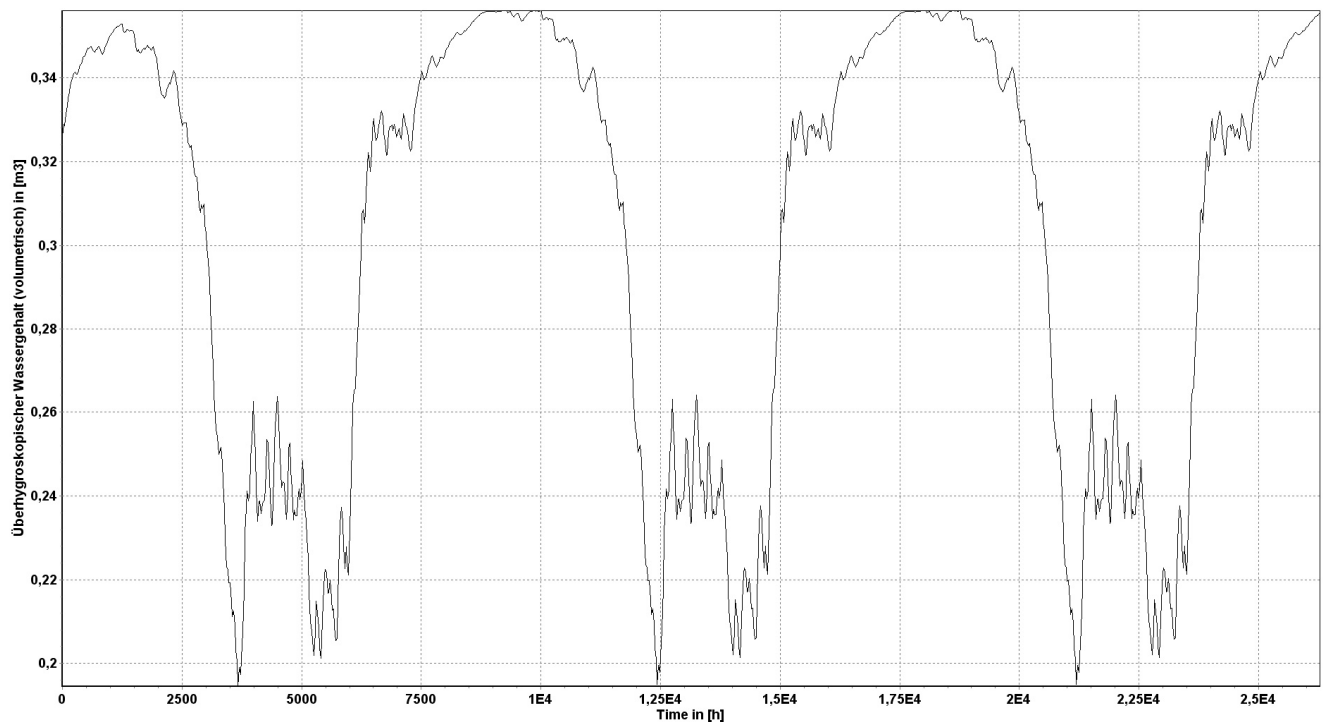


Abb. 70: Fall 5AC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven leicht erhöhter Regenbelastung. Im Vergleich mit Abb. 46 zeigt sich eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz. Der Vergleich mit Abb. 62 zeigt eine deutliche Reduzierung der Gesamtfeuchtebelastung durch den Außenputz. Eine dauerhafte Trocknung ist jedoch nicht erkennbar.

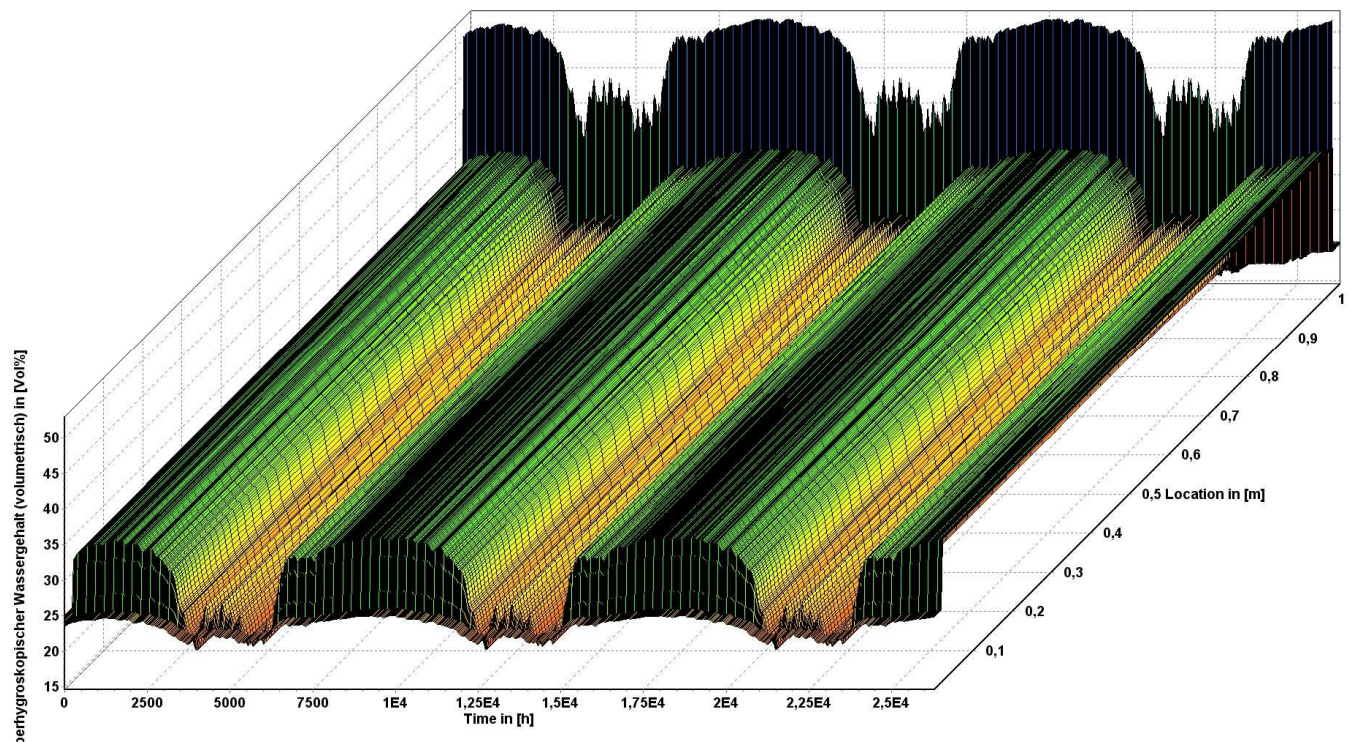


Abb. 71: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 70 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Der Vergleich mit Abb. 63 zeigt, daß in Kombination mit dem gewählten Außenputz die Durchfeuchtung des Mauerwerks phasenweise geringer ausfällt.

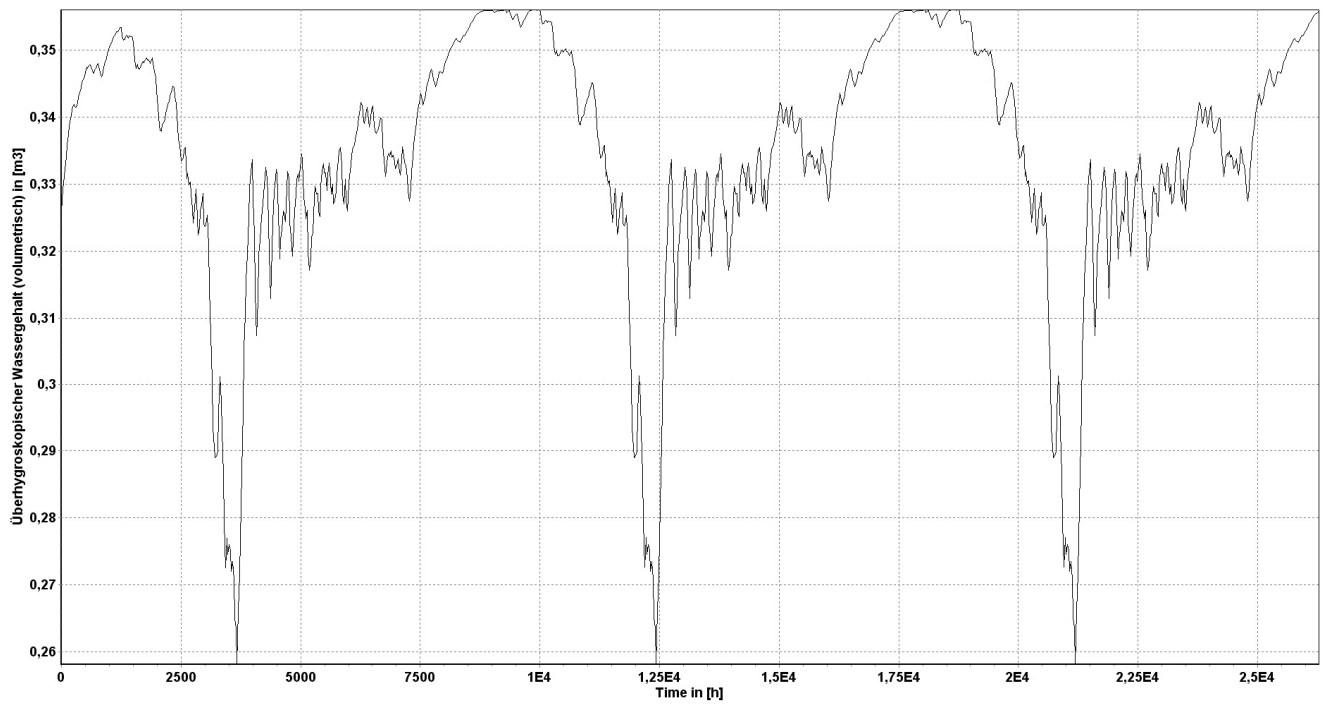


Abb. 72: Fall 5BC. Durchschnittlicher überhyroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven stark erhöhter Regenbelastung. Im Vergleich mit Abb. 48 zeigt sich eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz. Der Vergleich mit Abb. 64 zeigt eine deutliche Reduzierung der Gesamtfeuchtebelastung durch den Außenputz. Eine dauerhafte Trocknung ist jedoch nicht erkennbar.

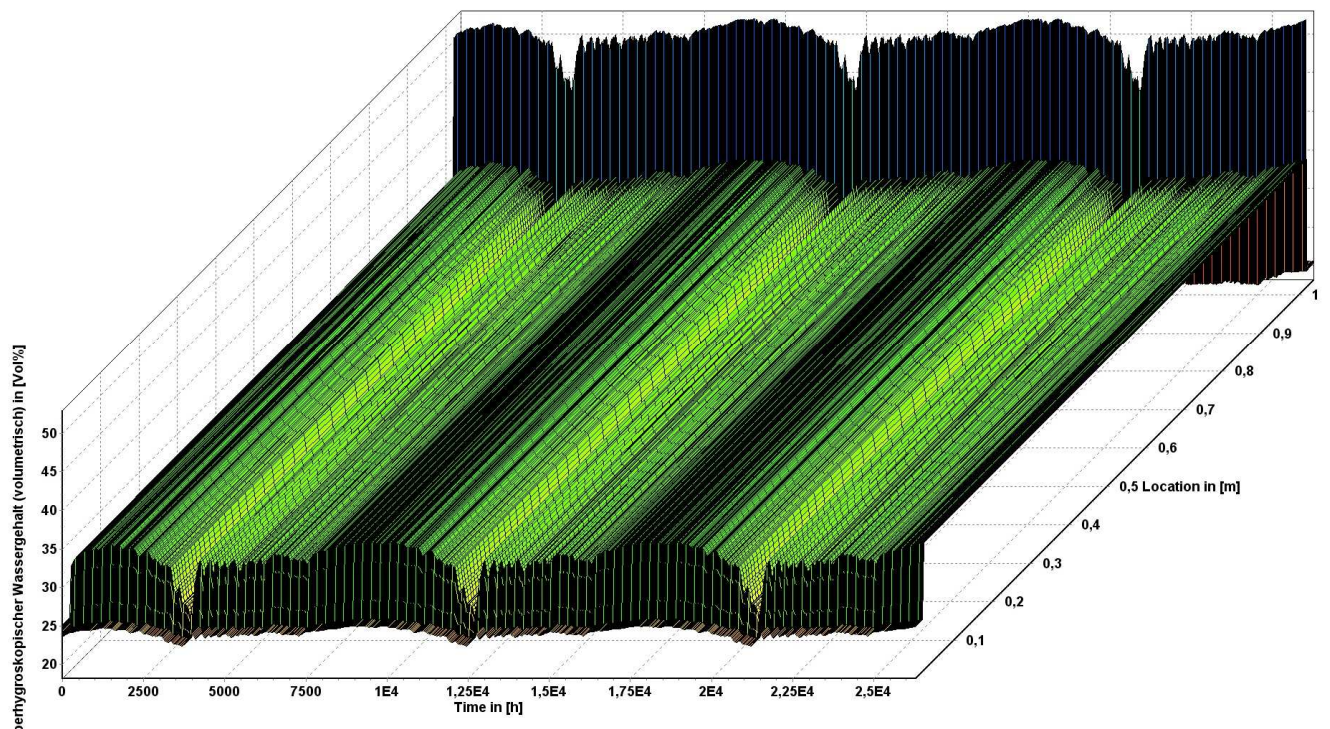


Abb. 73: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 72 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Im Vergleich mit Abb. 65 zeigt sich, daß der gewählte Außenputz phasenweise zu einem geringeren den Wassergehalt des Mauerwerks beiträgt. Im Vergleich mit Abb. 49 ist keine signifikante Trocknungsblockade durch den Innenputz zu erkennen.

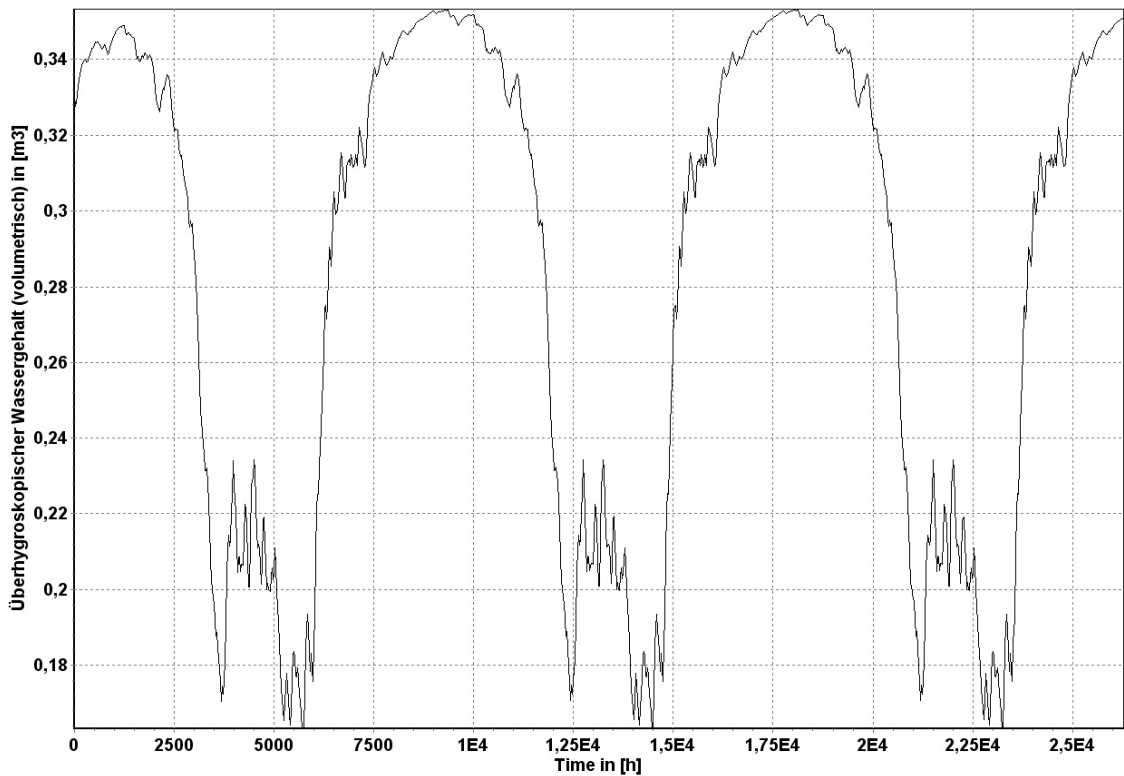


Abb. 74: Fall 5AD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten leicht erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 70 zu einer geringeren Feuchtebelastung während der Trocknungsphasen. Im Vergleich mit Abb. 50 zeigt sich eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz. Der Vergleich mit Abb. 66 zeigt eine deutliche Reduzierung der Gesamtfuchtebelastung durch den Außenputz. Eine dauerhafte Trocknung ist jedoch nicht erkennbar.

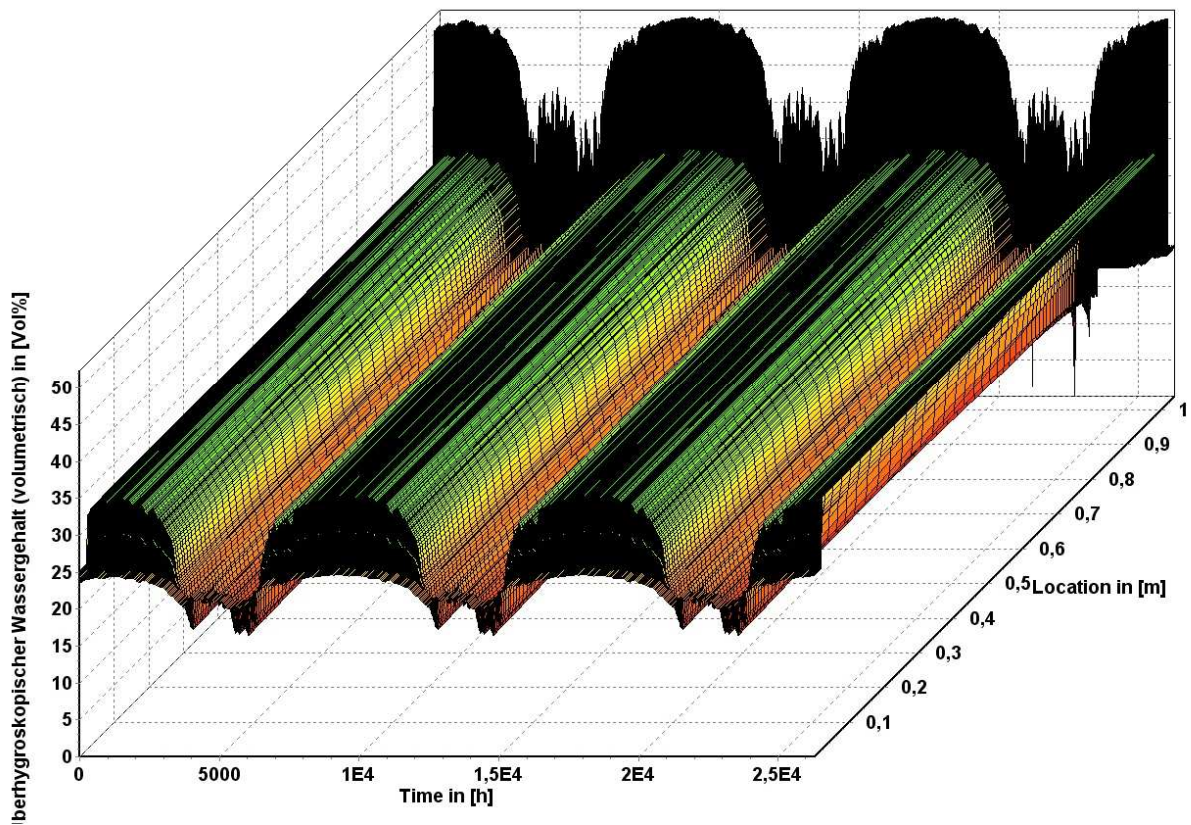


Abb. 75: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 74 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Während der Trockenphase ist ein Feuchtegradient von Außen nach innen erkennbar. Im Vergleich mit Abb. 67 zeigt sich bei Verputz der Außenseite eine insgesamt geringere Feuchtebelastung.

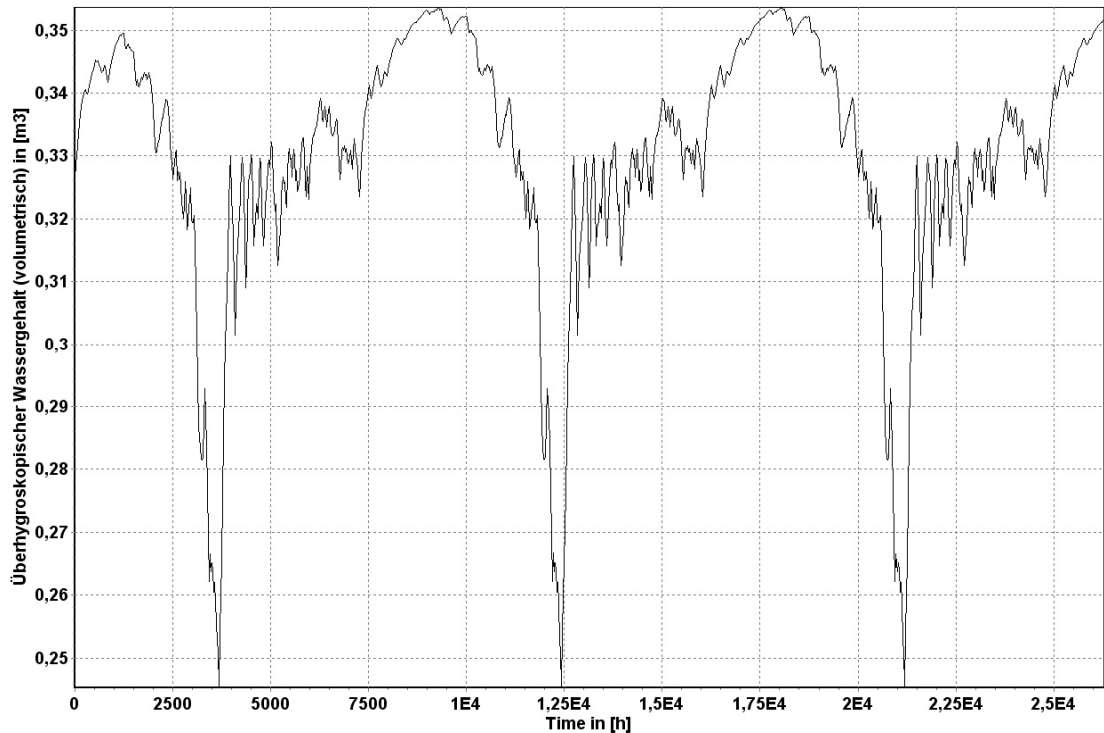


Abb. 76: Fall 5BD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten stark erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 72 zu einer insgesamt geringeren Feuchtebelastung. Im Vergleich mit Abb. 52 zeigt sich eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz. Der Vergleich mit Abb. 68 zeigt eine deutliche Reduzierung der Gesamtfeuchtebelastung durch den Außenputz. Eine dauerhafte Trocknung ist jedoch nicht erkennbar.

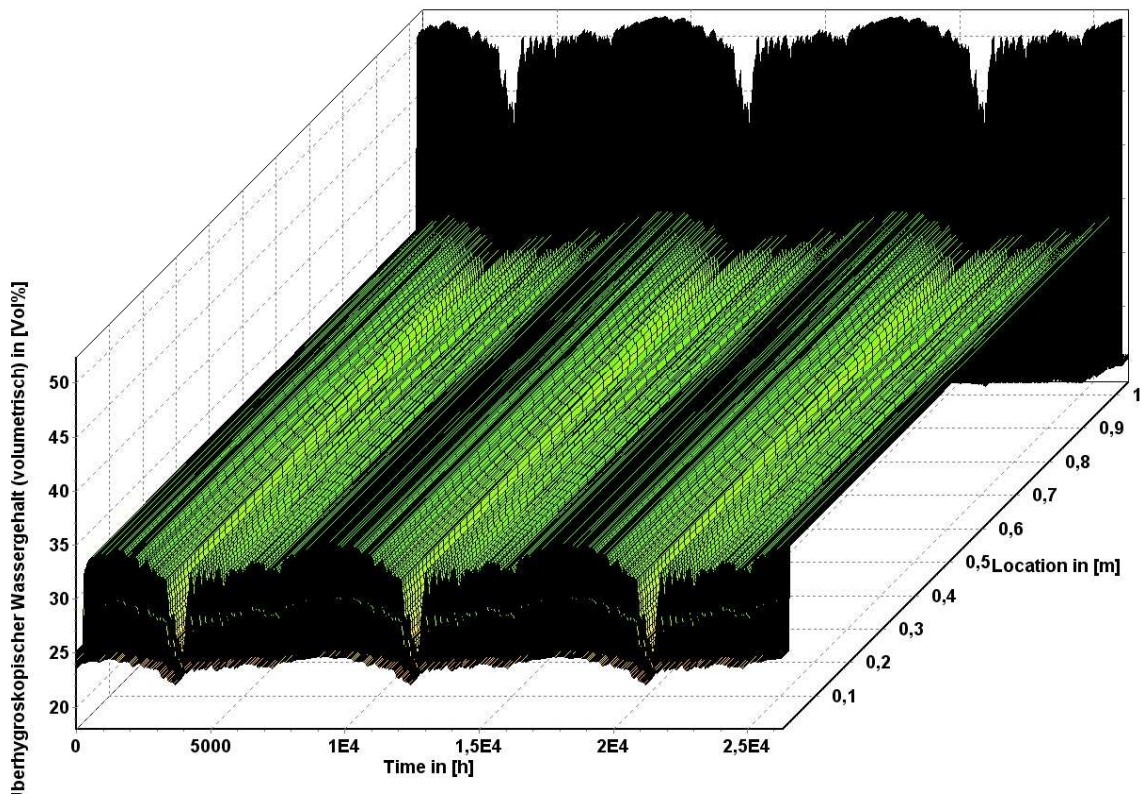


Abb. 77: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 76 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Im Vergleich mit Abb. 69 zeigt sich bei Verputz der Außenseite eine insgesamt geringere Feuchtebelastung.

8.4.2.6 Mauerwerk mit Innen- und Außenputz + Hydrophobierung (Fälle 6)

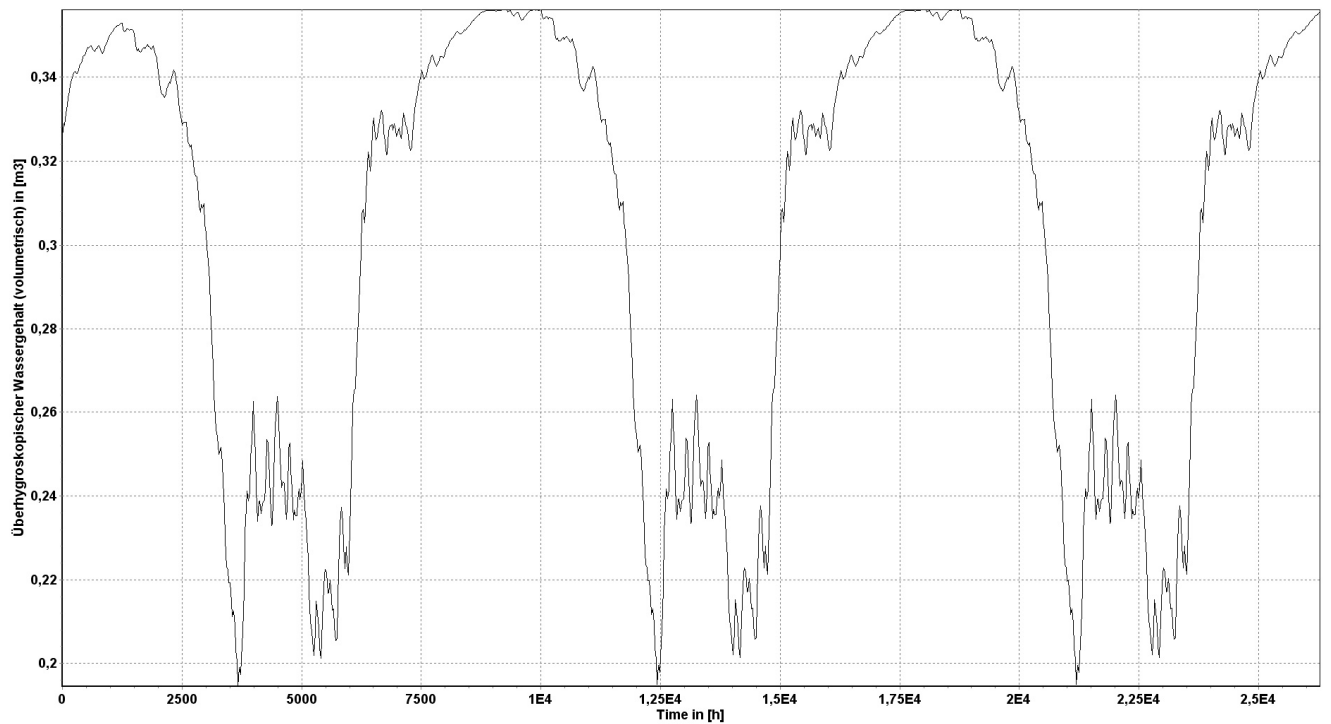


Abb. 78: Fall 6AC. Durchschnittlicher überhyroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven leicht erhöhter Regenbelastung. Der Vergleich mit Abb. 54 zeigt eine geringfügige Trocknungsbehinderung durch den Innenputz.

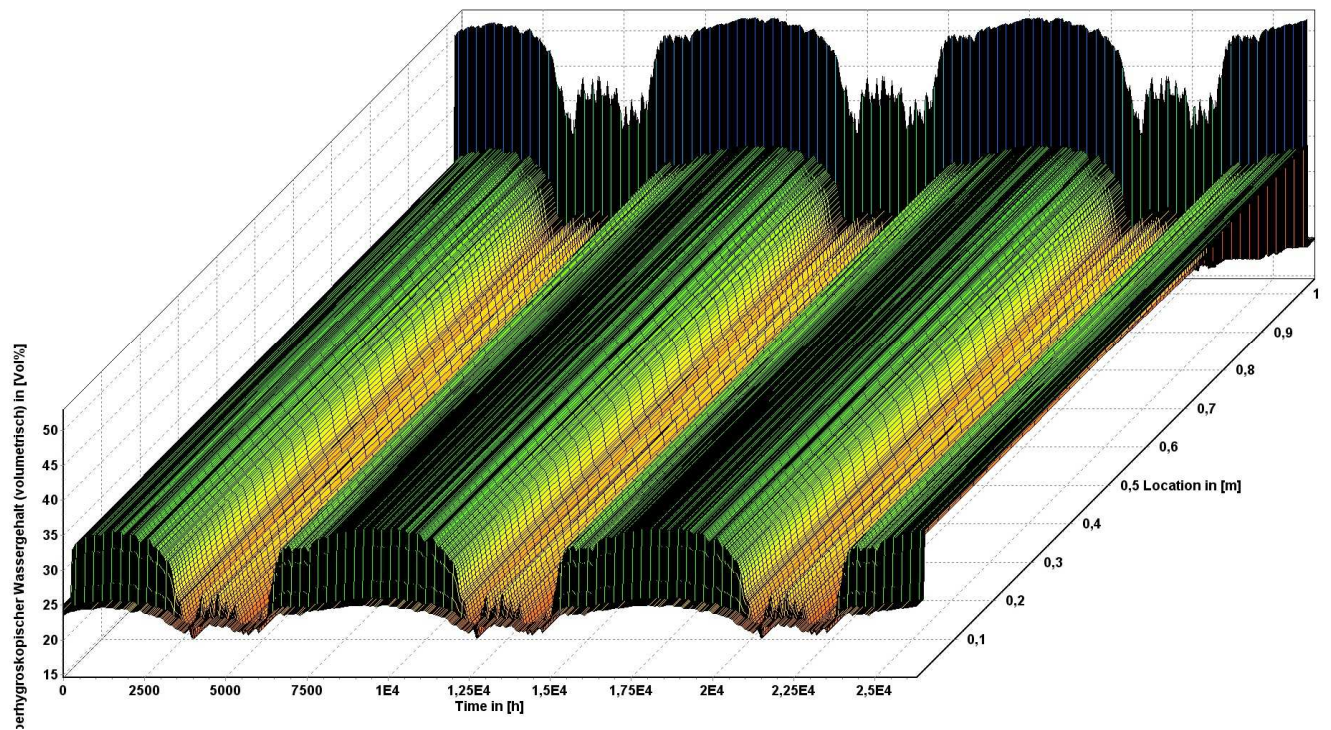


Abb. 79: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 78 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Der Vergleich mit Abb. 71 zeigt keinen nennenswerten Einfluß der Hydrophobierung auf die Feuchtebelastung des Mauerwerks.

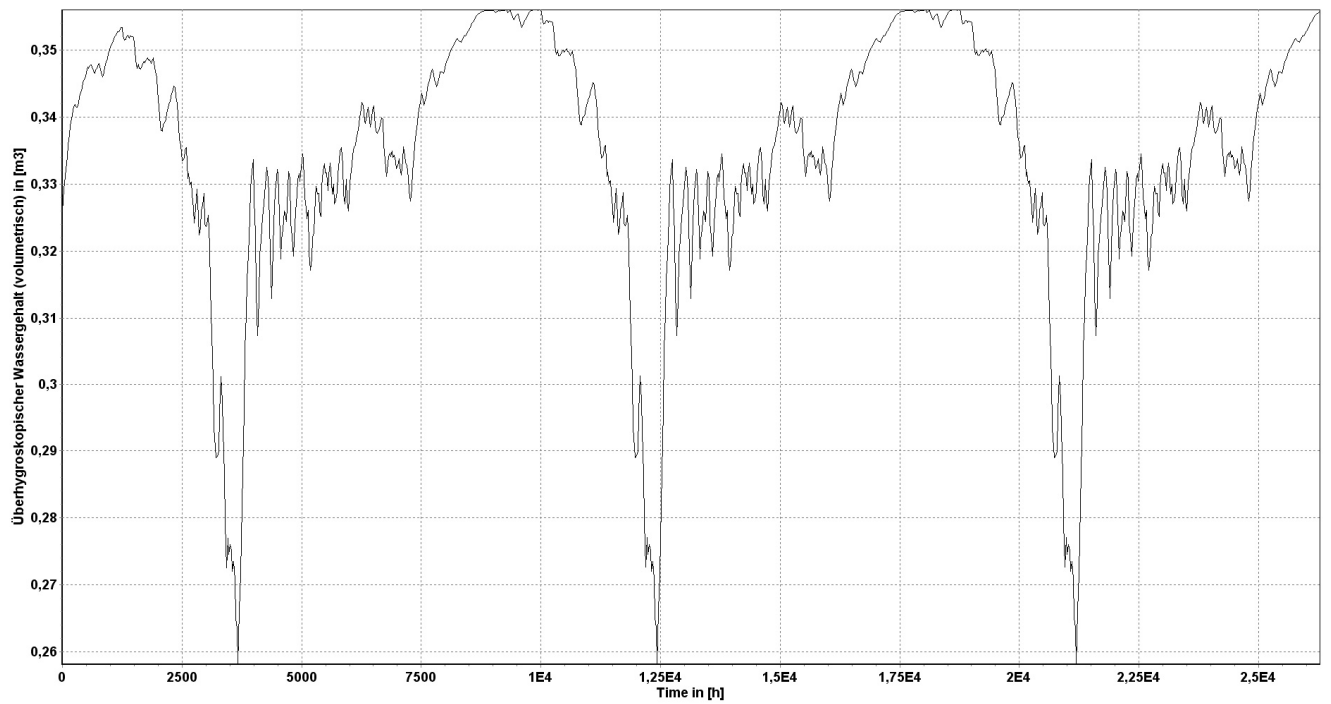


Abb. 80: Fall 6BC. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt bei gegenüber den Referenzdaten für Bremerhaven stark erhöhter Regenbelastung. Im Vergleich mit Abb. 56 ist eine Trocknungsbehinderung durch den Innenputz erkennbar.

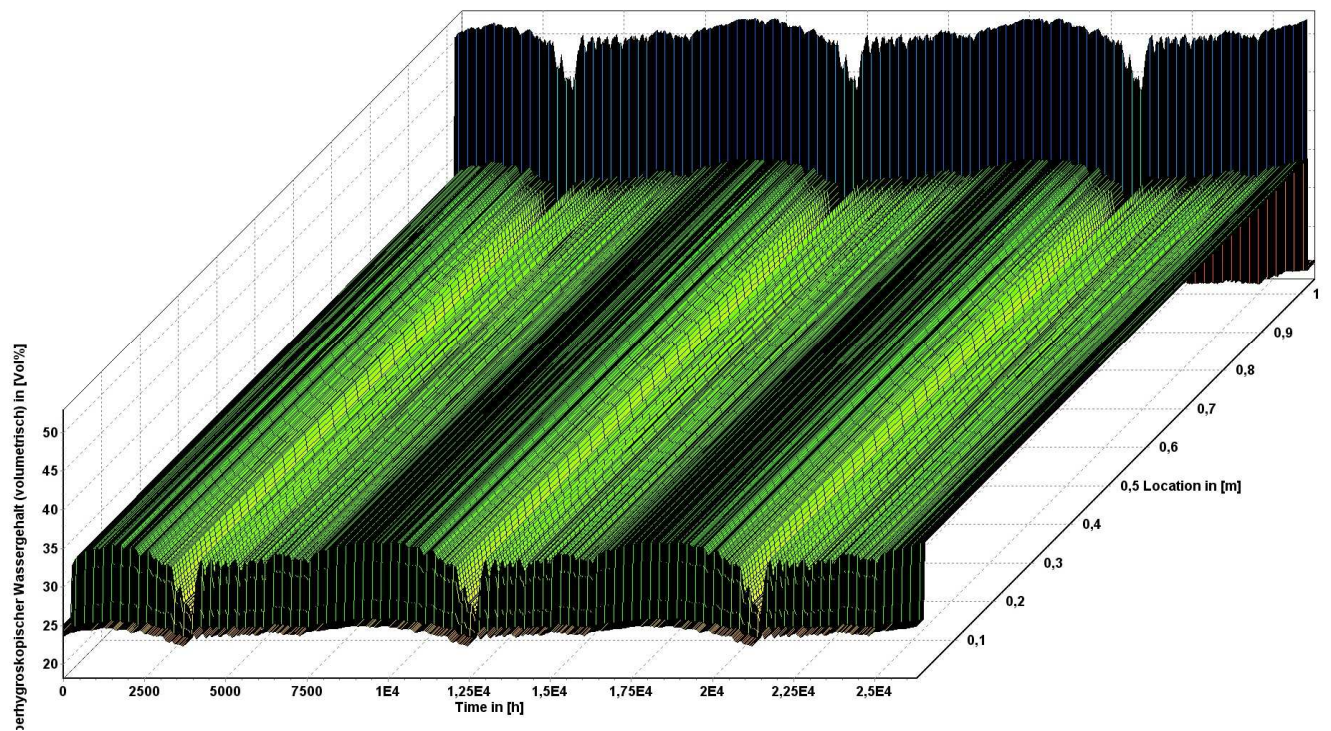


Abb. 81: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 80 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

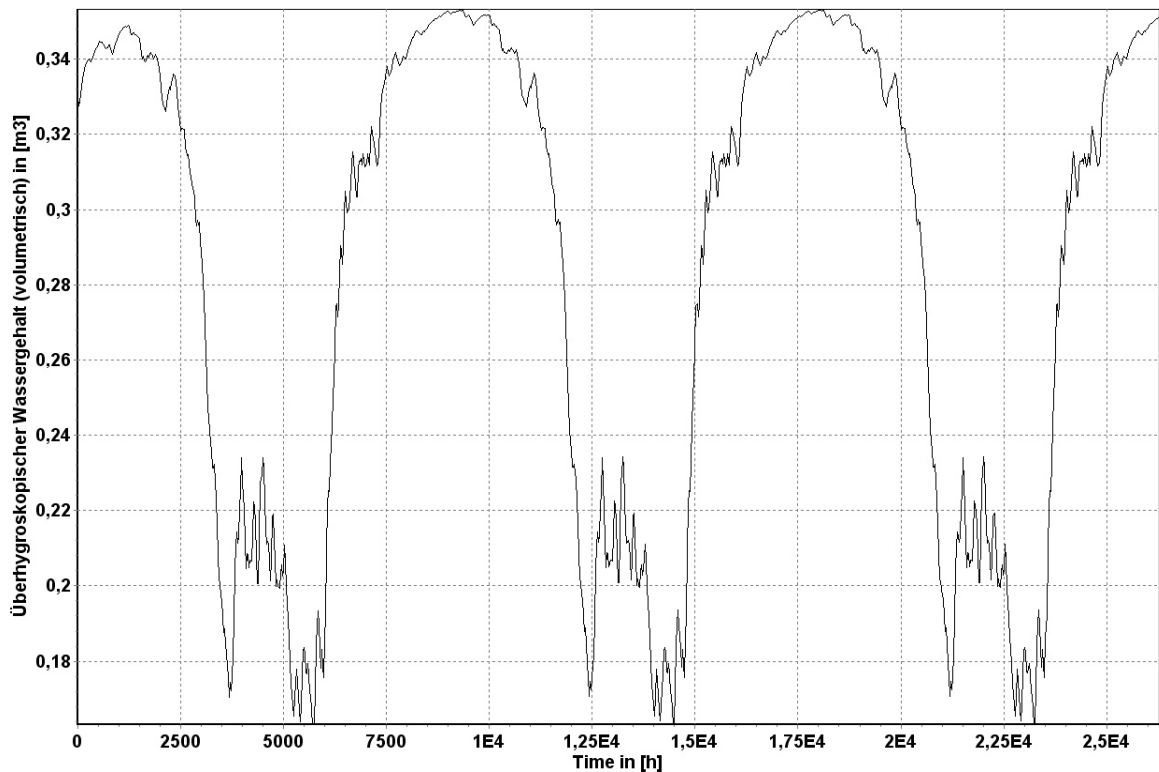


Abb. 82: Fall 6AD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten leicht erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 78 zu einer insgesamt geringeren Feuchtebelastung. Im Vergleich mit Abb. 58 ist eine leichte Trocknungsbehinderung durch den Innenputz erkennbar.

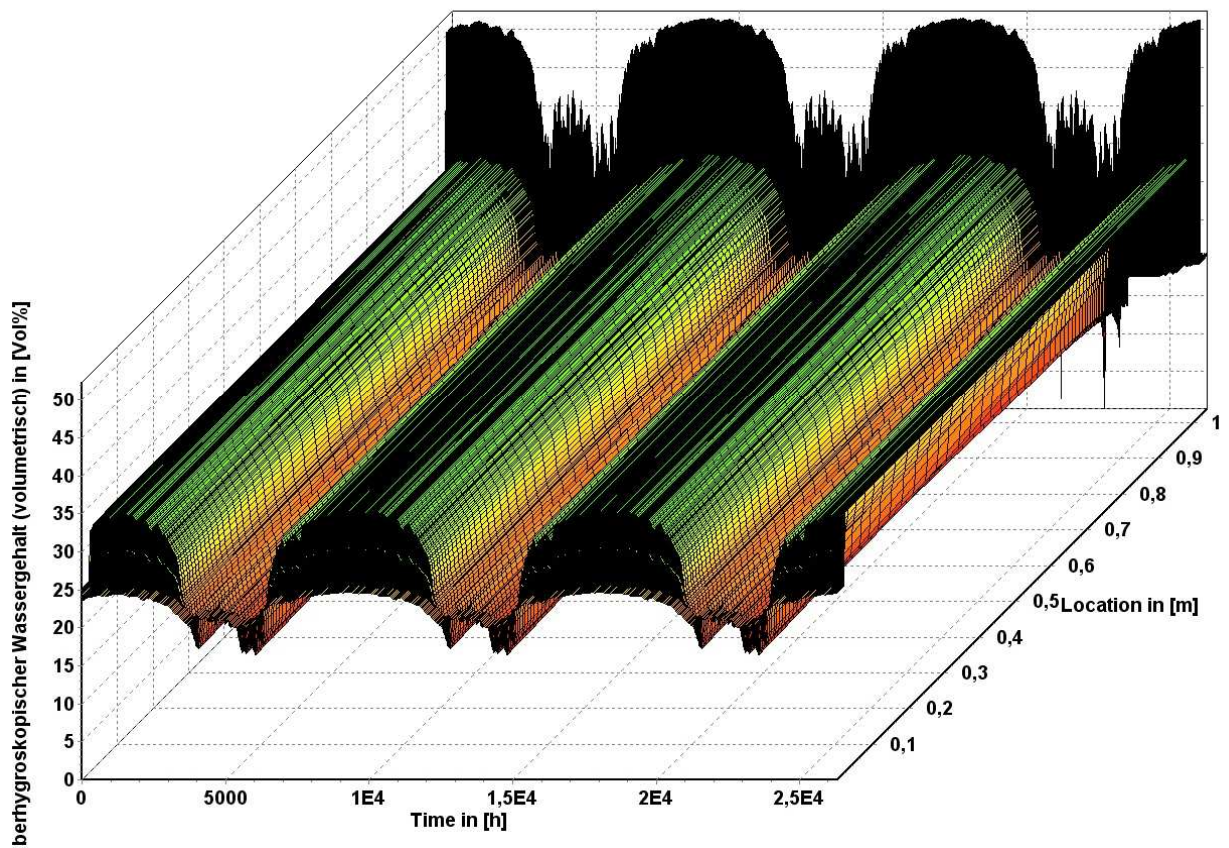


Abb. 83: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 82 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen. Während der Trocknungsperiode ist ein Feuchtgradient von außen nach innen erkennbar.

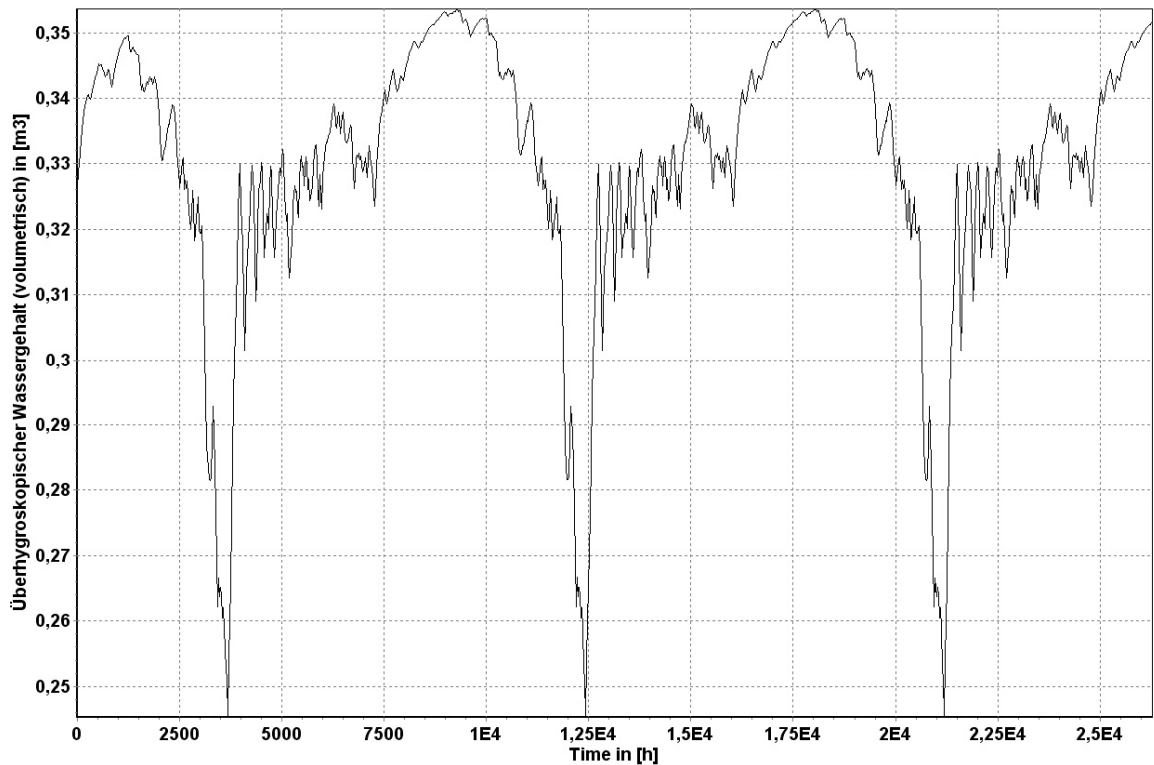


Abb. 84: Fall 6BD. Durchschnittlicher überhygroskopischer Wassergehalt im Bauteilquerschnitt, Regenbelastung gegenüber den Referenzdaten stark erhöht, Feuchte der Raumluft gegenüber dem Bestandsklima um 15% reduziert. Dies führt im Vergleich mit Abb. 80 zu einer insgesamt geringeren Feuchtebelastung. Im Vergleich mit Abb. 60 scheint der Innenputz die Trocknung zu behindern.

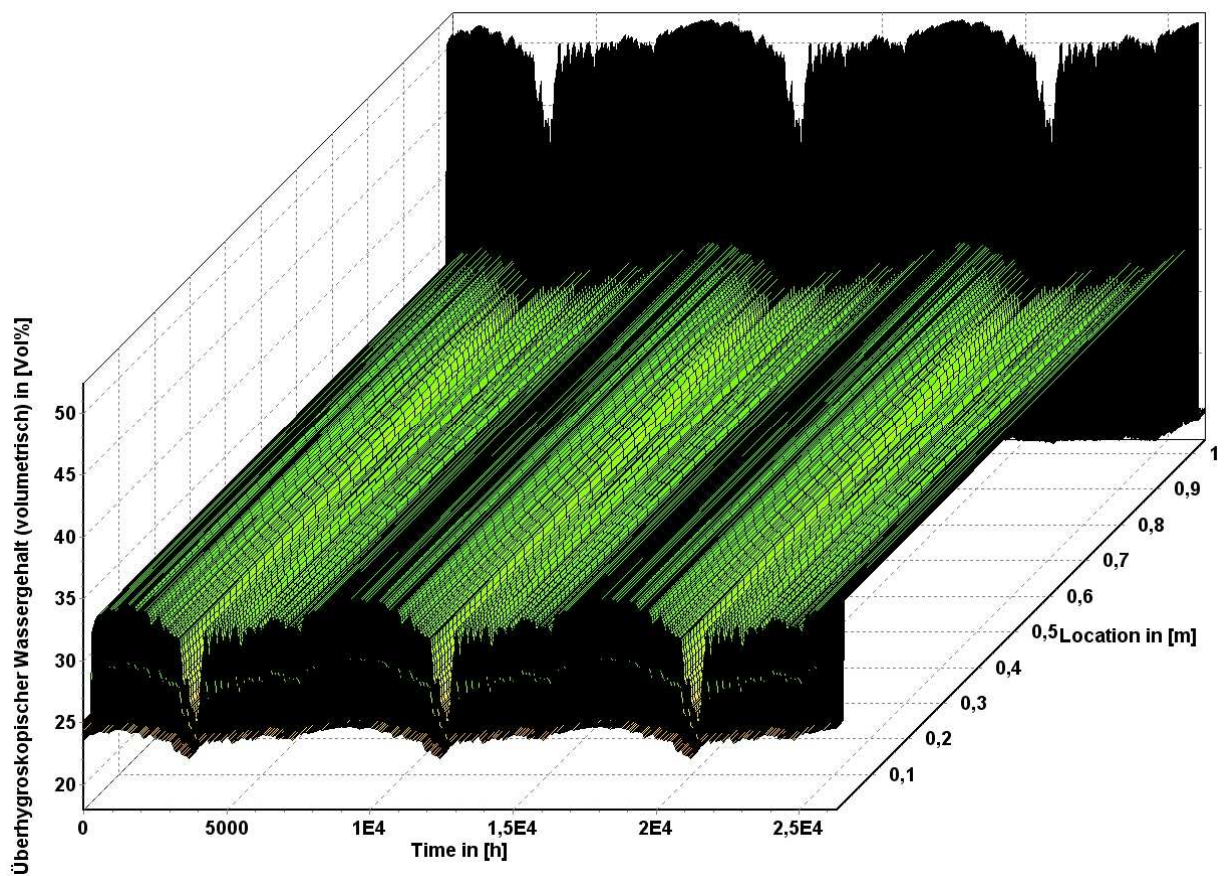


Abb. 85: Darstellung Simulationsergebnisse aus Abb. 84 über den Mauerquerschnitt von innen nach außen.

8.4.2.7 Bewertungsmatrix

Fragestellung	Vergleich					überhygroskopischer Wassergehalt des Mauererks			Langfristige Trocknung
	von			gegenüber		über den Mauerquerschnitt gemittelt		an der raumseitigen Oberfläche	
	Fall	Außenputz OH Hydrophobierung Innenputz Regen stark erhöht Raumklima		Fall	Außenputz OH Hydrophobierung Innenputz Regen stark erhöht Raumklima	Trockenperioden	Durchfeuchtungs- perioden	insgesamt	
Einfluss des Außenputzes	2AC	x		1AC		geringer	geringer	geringer	nein
	2BC	x	x	1BC	x	geringer	geringer	geringer	nein
	2AD	x		1AD	x	geringer	geringer	geringer	nein
	2BD	x	x	1BD	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
	5AC	x	x	4AC	x	geringer	geringer	geringer	nein
	5BC	x	x	4BC	x	geringer	geringer	geringer	nein
	5AD	x	x	4AD	x	geringer	geringer	unverändert	nein
	5BD	x	x	4BD	x	geringer	geringer	unverändert	nein
Einfluss der Hydrophobierung	3AC	x	x	2AC	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
	3BC	x	x	2BC	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
	3AD	x	x	2AD	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
	3BD	x	x	2BD	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
	6AC	x	x	5AC	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
	6BC	x	x	5BC	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
	6AD	x	x	5AD	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
	6BD	x	x	5BD	x	unverändert	unverändert	unverändert	nein
Einfluss des Innenputzes	4AC		x	1AC		höher	höher	geringer	nein
	4BC		x	1BC	x	höher	höher	geringer	nein
	4AD		x	1AD	x	höher	höher	geringer	nein
	4BD		x	1BD	x	höher	höher	geringer	nein
	5AC	x	x	2AC	x	höher	höher	geringer	nein
	5BC	x	x	2BC	x	höher	höher	geringer	nein
	5AD	x	x	2AD	x	höher	höher	geringer	nein
	5BD	x	x	2BD	x	höher	höher	geringer	nein
	6AC	x	x	3AC	x	höher	höher	geringer	nein
	6BC	x	x	3BC	x	höher	höher	geringer	nein
Einfluss eines trockneren Raumklimas	1AD		x	1AC		geringer	unverändert	geringer	nein
	1BD		x	1BC	x	geringer	geringer	geringer	nein
	2AD	x		2AC	x	geringer	unverändert	geringer	nein
	2BD	x	x	2BC	x	geringer	geringer	geringer	nein
	3AD	x	x	3AC	x	geringer	unverändert	geringer	nein
	3BD	x	x	3BC	x	geringer	geringer	geringer	nein
	4AD		x	4AC	x	geringer	unverändert	geringer	nein
	4BD		x	4BC	x	geringer	geringer	unverändert	nein
	5AD	x	x	5AC	x	geringer	unverändert	geringer	nein
	5BD	x	x	5BC	x	geringer	geringer	unverändert	nein
6AD	x	x	6AC	x	geringer	geringer	geringer	nein	
6BD	x	x	6BC	x	geringer	geringer	unverändert	nein	

Tabelle 9 Vergleichende Bewertung der Simulationsergebnisse

8.5 Bestimmung feuchtetechnischer Materialkennwerte

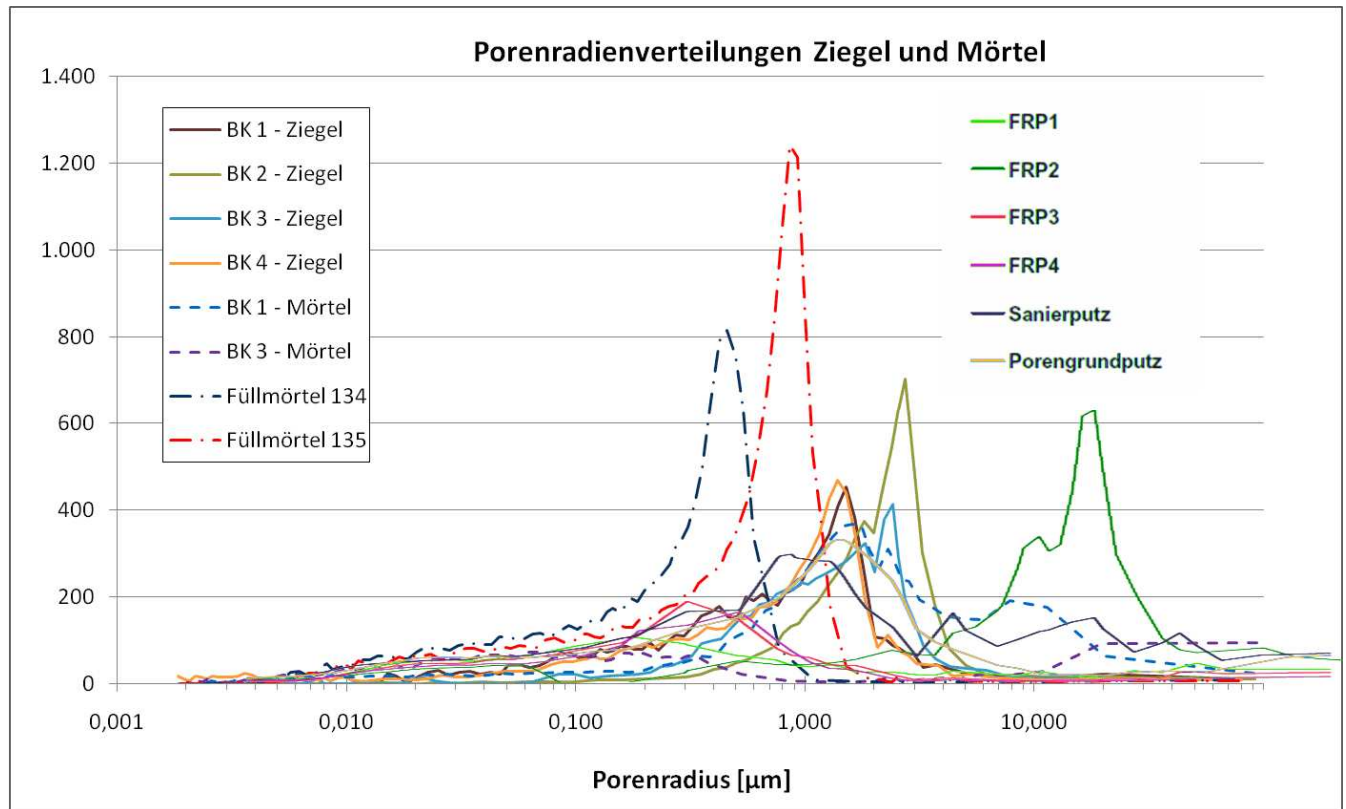


Abb. 86: Zusammenstellung der differentiellen Porenradienverteilung der am Fraunhofer Institut für Bauphysik Holzkirchen untersuchten Materialproben (Legende links), sowie der von Garrecht et al untersuchten Putze (Legende rechts, vgl. [Garrecht et al 2009, S. 49]. Zwischen Sanierputz und Porengrundputz, sowie den Ziegelproben BK1, 3 und 4 ist eine weitgehende Übereinstimmung der Porenradienverteilung gegeben. Im Bereich bis < 2000 nm ist das Porenvolumen der Ziegelproben BK2 und BK3 sogar geringer als das der beiden Putze. Hier wäre ein durch den Putz auf das Mauerwerk ausgeübter kapillarer Sog zu erwarten. Sehr viel weniger Übereinstimmungen gibt es bei den abgebildeten Feuchteregulierungsputzen: Das Porenvolumen von FRP2 überschreitet ab Porenradien von ca. 4000nm das Porenvolumen des Mauerwerks deutlich, im Mauerwerk ist dagegen der unterhalb dieser Grenze liegende Anteil von Poren mit höherer Saugspannung deutlich größer. Die Porenvolumina der Putze FRP1, sowie FRP3 und 4 liegen bis ca. 200 bzw. 700nm etwas über den Mauerwerksproben, bei den größeren Porenradien jedoch deutlich darunter.