

Über den Einfluß von Fehlstellen hydrophobierter Außenwände auf den Feuchtehaushalt von Mauerwerken

**Dr.-Ing. M. Krus
Dipl.-Phys. A. Holm
Fraunhofer-Institut für Bauphysik
(Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis)**

Zusammenfassung

Durch eindimensionale rechnerische Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß nach einer Hydrophobierung des Außenwandbereiches ein Feuchtestau hinter der hydrophoben Zone aufgrund einer inneren Feuchtelast durch den Nutzer nicht zu befürchten ist, sofern durch die Hydrophobierung der Diffusionswiderstand um nicht mehr als 50 % erhöht wird. Der Einfluß von Fehlstellen in einer oberflächlich hydrophobierten Wand kann nur durch zweidimensionale Berechnungen erfaßt werden. Anhand von drei Beispielen wird der Einfluß einer Fehlstelle auf den Feuchtehaushalt und das damit verbundene Frostschadensrisiko rechnerisch untersucht. Dabei wird unterschieden, ob sich die Fehlstelle auf einer homogenen Ziegelwand (mit mittlerem Saugvermögen im kapillaraktiven Wandbereich) befindet oder -wie häufiger zu erwarten- im Bereich einer Mörtelfuge. Dabei wird auch der Einfluß einer Widerstandsschicht zwischen Mörtel und Ziegel dargelegt. Es wird gezeigt, daß zweidimensionale Berechnungen ein gut geeignetes Hilfsmittel sind, um die durch Fehlstellen hervorgerufenen hygrothermischen Effekte qualitativ und anschaulich darzustellen.

1. Einleitung

Der Wasserhaushalt der Gesteine nimmt bei den die Schadensmechanismen betreffenden Fragestellungen eindeutig eine Schlüsselstellung ein. Für fast alle Zerstörungsprozesse, seien sie physikalischer, chemischer oder biologischer Art, ist die Anwesenheit von Wasser eine Grundvoraussetzung. Ziel einer effektiven Konservierungsmaßnahme ist die Stabilisierung des heutigen Zustandes eines Denkmals unter weitestgehender Erhaltung der Originalsubstanz und, sofern möglich, eine möglichst starke Verlangsamung der wirksamen Schadensprozesse. Auf die Feuchte bezogen bedeutet dies, daß Schutzmittel den Feuchtehaushalt dieses Gesteins unter den vielfältigen vor Ort auftretenden klimatischen Randbedingungen nicht derart beeinflussen dürfen, daß dadurch der aufgetretene Schadensprozeß in seiner Wirkung verstärkt wird oder ein neuer Schadensmechanismus in Gang gesetzt wird.

Aus feuchtetechnischer Sicht wäre eine Maßnahme ideal, die den Feuchtegehalt des betreffenden Objektes den Anforderungen entsprechend reduziert. Eine Möglichkeit dazu ist, neben den natürlich immer an erster Stelle stehenden konstruktiven Maßnahmen zur Verbesserung des Regenschutzes, ein Einsatz hydrophobierender Schutzstoffe. Dabei ist aber zu beachten, daß eine Hydrophobierung des Gesteins immer mit einer Erniedrigung der möglichen Trocknungsgeschwindigkeit einhergeht. Es ist daher von großer Bedeutung, vor einer Hydrophobierungsmaßnahme für die betreffende Gebäudepartie neben dem Schlagregen auch den Einfluß aller weiteren Feuchtequellen zu erfassen [1]. Eventuelle Feuchteerhöhungen durch Dampfdiffusion von der Innenseite des Gebäudes her, aufsteigende Feuchte und eindringende Feuchte aufgrund bautechnischer Fehler einschließlich der Fehlstellen bei der Hydrophobierungsmaßnahme müssen ausreichend genau quantifiziert werden, um abwägen zu können, ob durch die Hydrophobierungsmaßnahme der Feuchtegehalt wie erwünscht gesenkt wird oder im Gegensatz dazu sogar erhöht werden könnte. Aus diesem Grund ist die Ermittlung der Feuchteverteilung an geeignet ausgewählten Bereichen der betreffenden Gebäudepartie unumgänglich.

Aus Wassergehaltsverteilungen können die Ursachen der Feuchtbelastung ermittelt werden, da Regenbelastung, aufsteigende Feuchte und Feuchteerhöhungen durch die Nutzung des Gebäudes zu unterschiedlichen Feuchtprofilen im Mauerwerk führen. Allerdings ist die genaue Erfassung der sich zeitlich verändernden Feuchteverteilungen am Objekt über längere Zeiträume hinweg oft nicht praktikabel oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand möglich. Durch moderne laborexperimentelle und rechnerische Untersuchungen läßt sich aber das Feuchteverhalten eines Bauteils in Abhängigkeit von

den Klimabedingungen voraussagen, sofern die Rechnung durch experimentelle Untersuchungen (z.B. Feilandbewitterung) ausreichend validiert [2-4] ist. Damit ergibt sich vor allem die Möglichkeit, für das zu schützende Objekt den Einfluß einer Nutzungsänderung oder einer Sanierungsmaßnahme auf das Feuchteverhalten zu bestimmen und damit das durch diese Maßnahmen zu erwartende Schadensrisiko abzuschätzen, bevor sie am Bauwerk durchgeführt werden.

2. Feuchtestau hinter dem hydrophobierten Wandbereich

Die häufigste Frage, die bezüglich Hydrophobierungen gestellt wird, ist inwieweit nach einer solchen Behandlung die durch die Innenraumnutzung in das Gebäude eingebrachte Feuchte zu einer Feuchteakkumulation hinter der hydrophobierten Zone führt. Auch wenn es hierbei nicht um Fehlstellen geht, sollten dazu doch Ergebnisse vorgestellt werden.

Tabelle 1 Für die Berechnungen verwendete hygrothermische Materialkennwerte aus der WUFI-Datenbank.

	Homogene Ziegelwand	Kalkzementmörtel	Vollziegel
Rohdichte ρ [kg/m ³]	1900	1900	1650
Porosität ε [Vol.-%]	24	24	41
Freie Wassersättigung u_f [kg/m ³]	190		370
Sorptionsfeuchte u_{80} [kg/m ³]	18	45	9
Diffusionswiderstandszahl μ [-]	10	19	9,5
Wasseraufnahmekoeffizient w [kg/m ² √h]	6,7	9,5	17
Wärmeleitfähigkeit λ [kg/m ³]	0,6	0,8	0,6

Das vorliegende Beispiel beschreibt einen Extremfall: Die Außenseite einer Ziegelwand mit einer Dicke von lediglich 30 cm wird hydrophobiert, nachdem sich durch langjährige Bewitterung ein eingeschwungener Zustand mit hoher Wandfeuchte eingestellt hat. Auf der Innenseite wird durch die Nutzung ein extremes Innenklima erzeugt, das (bei sinusförmigem Jahresverlauf) im Sommer zu einer rel. Luftfeuchte von 80 % bei 23 °C Innentemperatur und im Winter zu 60 % bei 20 °C führt. Bei der Rechnung wurde davon ausgegangen, daß bis zu einer Tiefe von 2 cm hydrophobiert wurde und der Diffusionswiderstand der behandelten Zone im Vergleich zum Originalgestein um nicht mehr als 50 % erhöht wird. Die für die Rechnung eingesetzten Materialkennwerte stammen aus der WUFI-Datenbank. Für den hydrophobierten Mauerbereich

wurden die Transportkoeffizienten auf Null gesetzt und der Diffusionswiderstand um 50 % erhöht (siehe Tabelle 1).

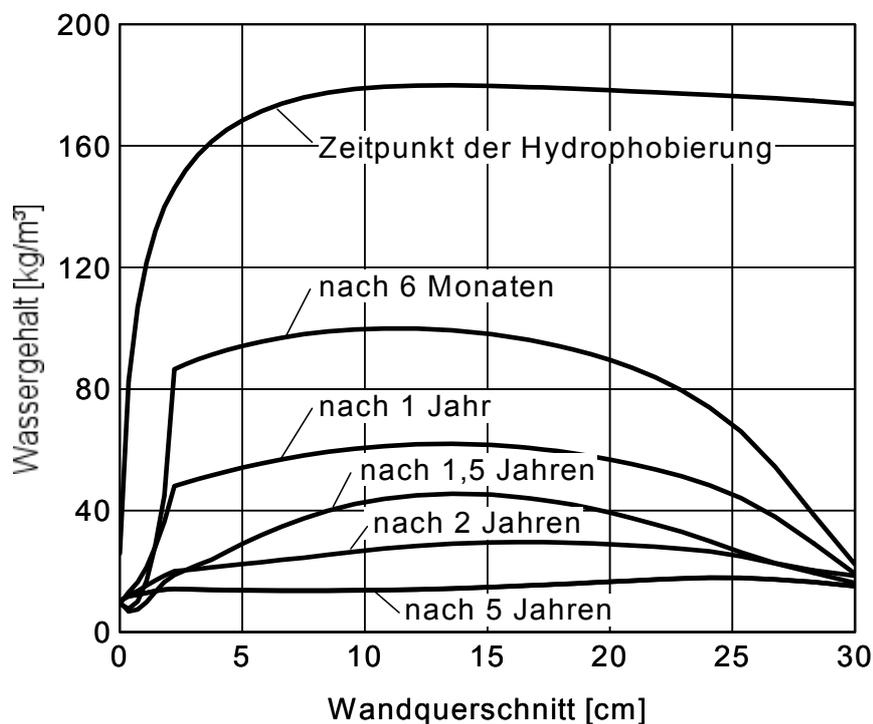


Bild 1 Wassergehaltsverteilungen zu verschiedenen Zeitpunkten nach einer Hydrophobierungsmaßnahme. Zum Zeitpunkt der Hydrophobierung lag in der 30 cm dicken Ziegelwand die eingezeichnete Wassergehaltsverteilung (ingeschwungener Zustand nach mehrjähriger Bewitterung) vor.

Aus den in Bild 1 dargestellten Ergebnissen wird erkennbar, daß die Wand trotz der extremen raumseitigen Feuchtebelastung, bei der es in den Wintermonaten auch zu Tauwasserbildung auf der Innenoberfläche kommt, nach der Hydrophobierungsmaßnahme über die Jahre hinweg langsam austrocknet. Dies bedeutet, daß der nutzungsbedingte Feuchtestrom von der Raumseite her keinen Hinderungsgrund für eine Hydrophobierungsmaßnahme darstellt, vorausgesetzt, die Behandlung führt nur zu einer akzeptablen Erhöhung des Diffusionswiderstandes.

3. Fehlstelle in einem hydrophobierten homogenen Mauerwerk

Im Gegensatz zu den im vorigen Kapitel dargestellten Untersuchungen läßt sich der Einfluß einer Fehlstelle rechnerisch nur mit Hilfe eines zweidimensionalen Programms zur Berechnung des instationären Wärme- und Feuchte- transports (WUFI-2D) untersuchen [5]. Zugrunde gelegt wird hierfür ein Wandausschnitt aus homogenem Ziegelmauerwerk mit einer Gesamtdicke von

42 cm und einer Höhe von 50 cm. Die Wand ist nach Westen orientiert, um vor allem die Schlagregeneinflüsse zu erfassen. Die für das jeweilige Material benötigten Kennwerte stammen ebenfalls aus der WUFI-Datenbank und sind Tabelle 1 zu entnehmen. Auch bei diesem Wandaufbau sind die ersten 2 cm der Wand hydrophobiert. In der Oberflächenmitte befindet sich eine horizontale Fehlstelle mit einer Dicke von 1 cm. Da zweidimensionale Rechnungen einen erheblich höheren Rechenaufwand bedeuten, wurde der Einfachheit halber als Startbedingung von einer hygrisch nicht eingeschwungenen Wand ausgegangen mit einer Ausgleichsfeuchte entsprechend 80 % r.F.

Bild 2 zeigt, daß die Wand über die berechneten zwei Jahre nur geringfügige Feuchtegehaltsänderungen aufweist. Betrachtet man dagegen die örtliche Wassergehaltsverteilung zu zwei bestimmten Zeitpunkten nach einem Regenereignis im Sommer (Bild 3 links) und bei Frost im Winter (Bild 3 rechts) erkennt man, daß die zeitweise geringfügige Wassergehaltserhöhung im Bild 2 auf örtlicher extremer Feuchtegehaltserhöhung nahe der Fehlstelle beruhen. Gerade im Winter sind hohe Feuchtegehalte nahe der Außenoberfläche kritisch. Bild 4 zeigt das zu Bild 3 rechts gehörende Wassergehalts- und Temperaturprofil knapp oberhalb der Fehlstelle. Man erkennt, daß gerade in den Bereichen, in denen Frosttemperaturen auftreten, die höchsten Feuchtegehalte vorliegen. Allerdings liegen diese nur bei etwa halber Sättigung.

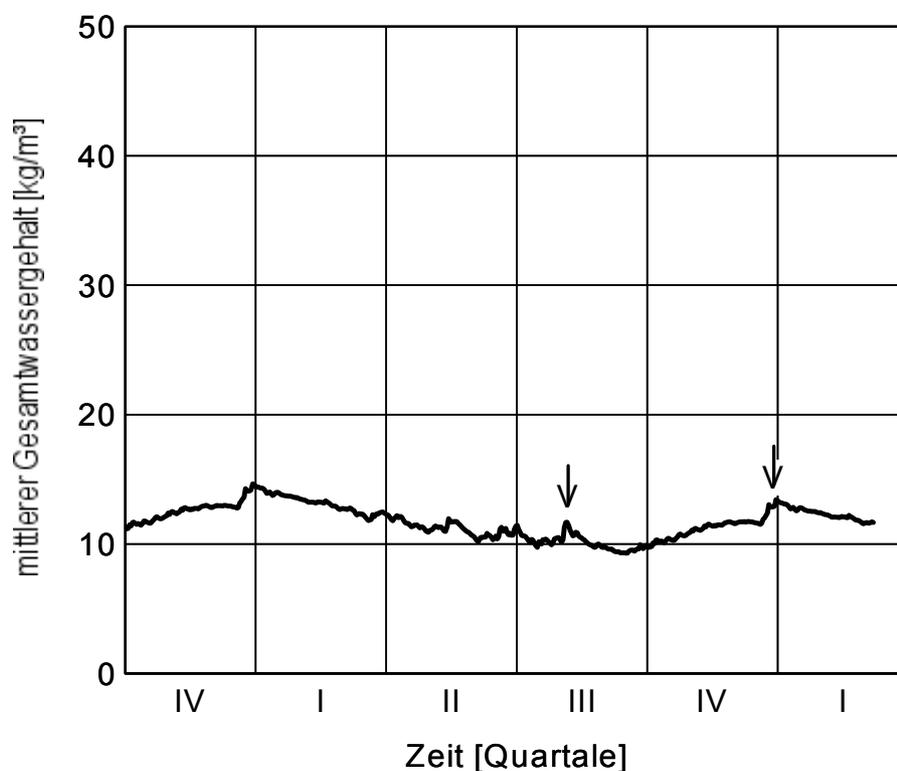


Bild 2 Zeitlicher Verlauf des mittleren Gesamtwassergehaltes des berechneten Wandausschnittes. Die Pfeile markieren die Zeitpunkte für die 2D-Darstellungen in Bild 3.

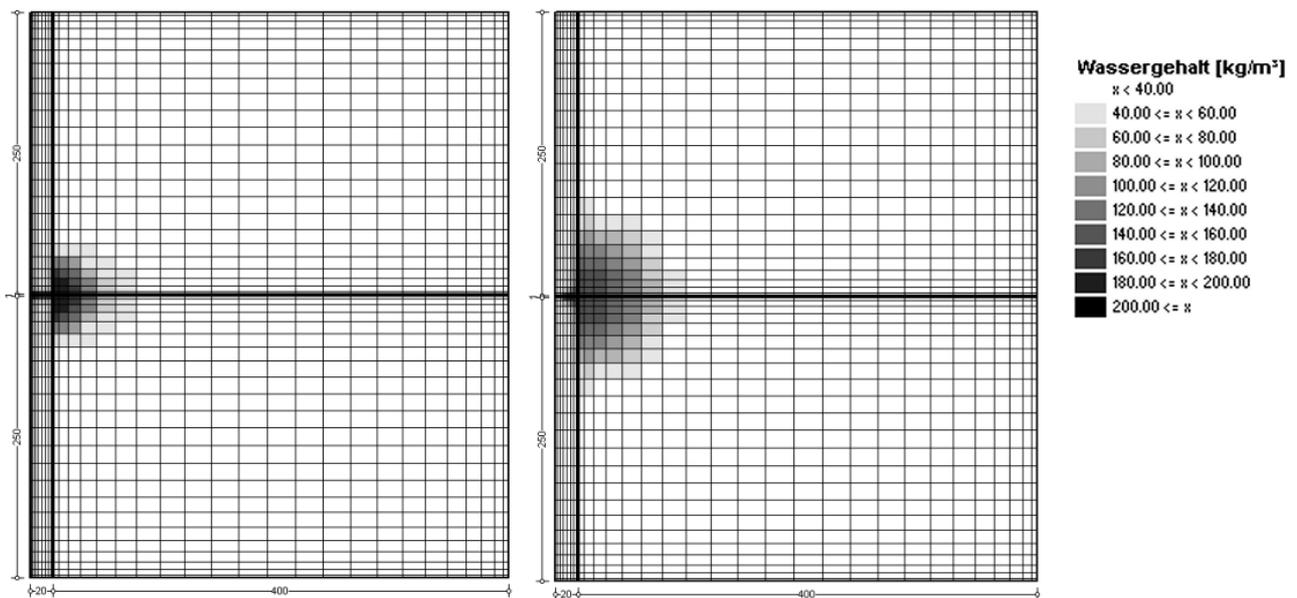


Bild 3 Darstellung der Feuchteverteilungen im berechneten Wandausschnitt zu den im Bild 2 gekennzeichneten Zeitpunkten im Sommer (links) und Winter (rechts).

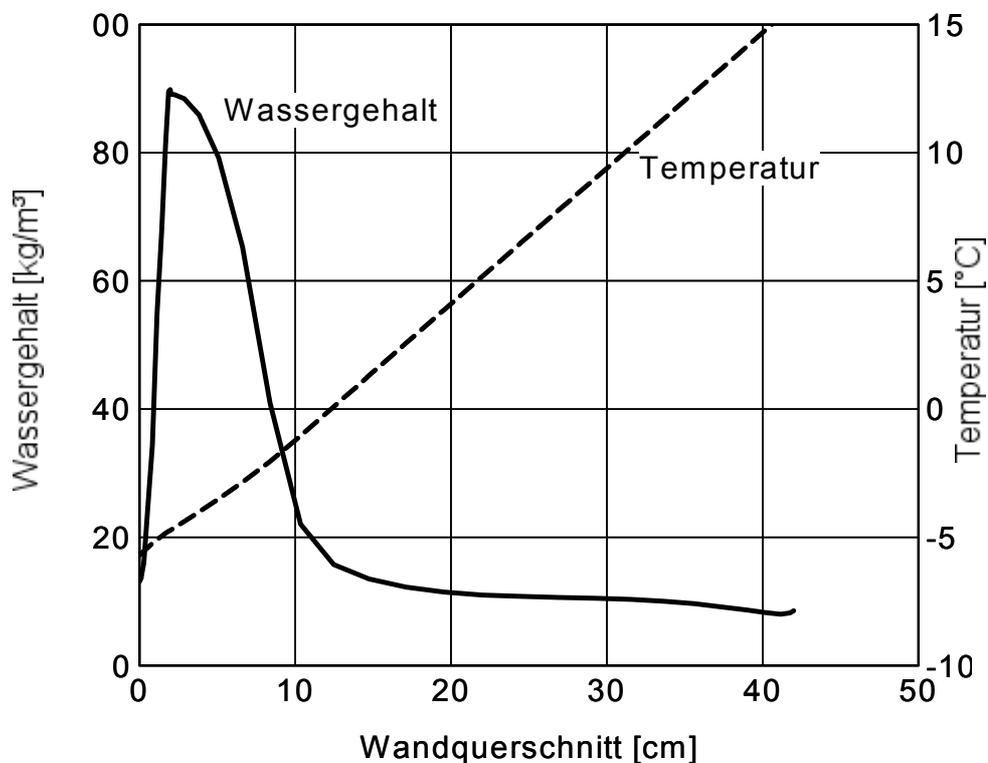


Bild 4 Wassergehaltsprofil (durchgezogene Linie) und Temperaturprofil (gestrichelte Linie) für einen horizontalen Schnitt knapp oberhalb der Fehlstelle zu dem in Bild 3 rechts dargestellten Zeitpunkt.

4. Fehlstelle im Mörtelbereich

Im Allgemeinen wird bei einer oberflächlich hydrophobierten Ziegelwand eine Fehlstelle vor allem im Mörtelbereich auftreten. Um einen Extremfall darzustellen wurde ein stark saugender Vollziegel, der ohne Hydrophobierung keinesfalls als Sichtmauerwerk verwendet werden könnte, und ein Mörtel mit ebenfalls hohem w-Wert verwendet. Die Kenndaten dieser Materialien sind in Tabelle 1 mit aufgelistet. Der Fugenmörtel mit einer Dicke von 1 cm liegt horizontal in der Mitte des Wandausschnittes (siehe Bild 6). Diese Materialkennwerte über die Fehlstelle (siehe Bild 5) führen zu einer sehr starken Wasseraufnahme, die über die berechnete zweijährige Bewitterungsdauer hinaus zu einer weiteren Feuchteaufnahme führen dürfte. Entsprechend ergeben sich auch in der zweidimensionalen Darstellung über große Bereiche hohe Wassergehalte, wobei in Bild 6 die Farbpalette bis auf 200 kg/m^2 ausgedehnt wurde. Bild 7 zeigt nahe der Fehlstelle im Ziegel fast wassergesättigte Bereiche bei Temperaturen deutlich unter Null Grad, so daß hier mit Frostschäden zu rechnen ist.

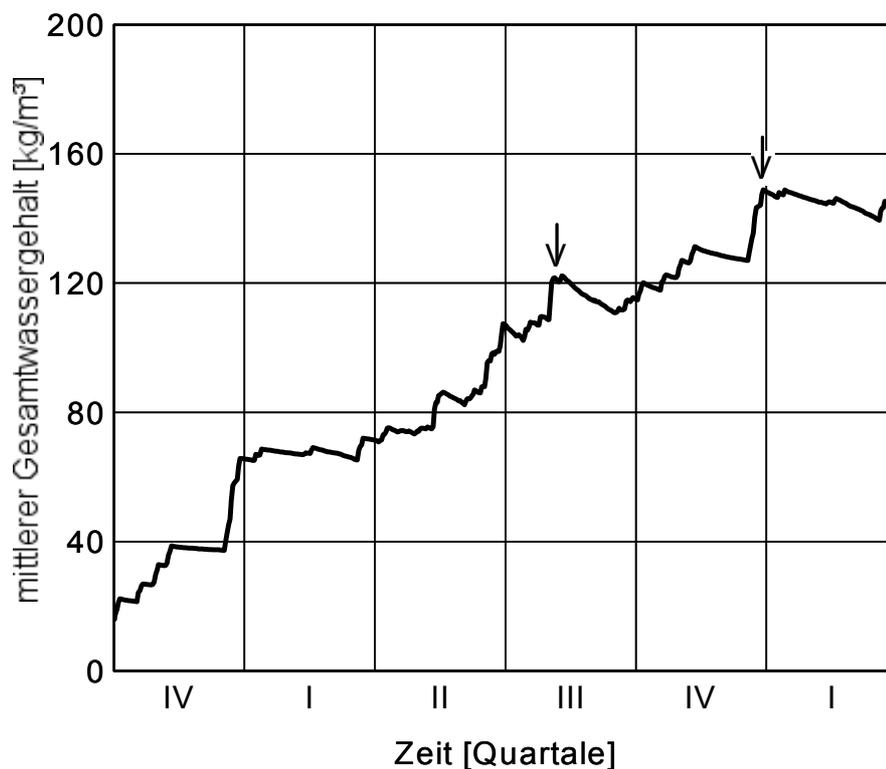


Bild 5 Zeitlicher Verlauf des mittleren Gesamtwassergehaltes des berechneten Wandausschnittes. Die Pfeile markieren die Zeitpunkte für die 2D-Darstellungen in Bild 6.

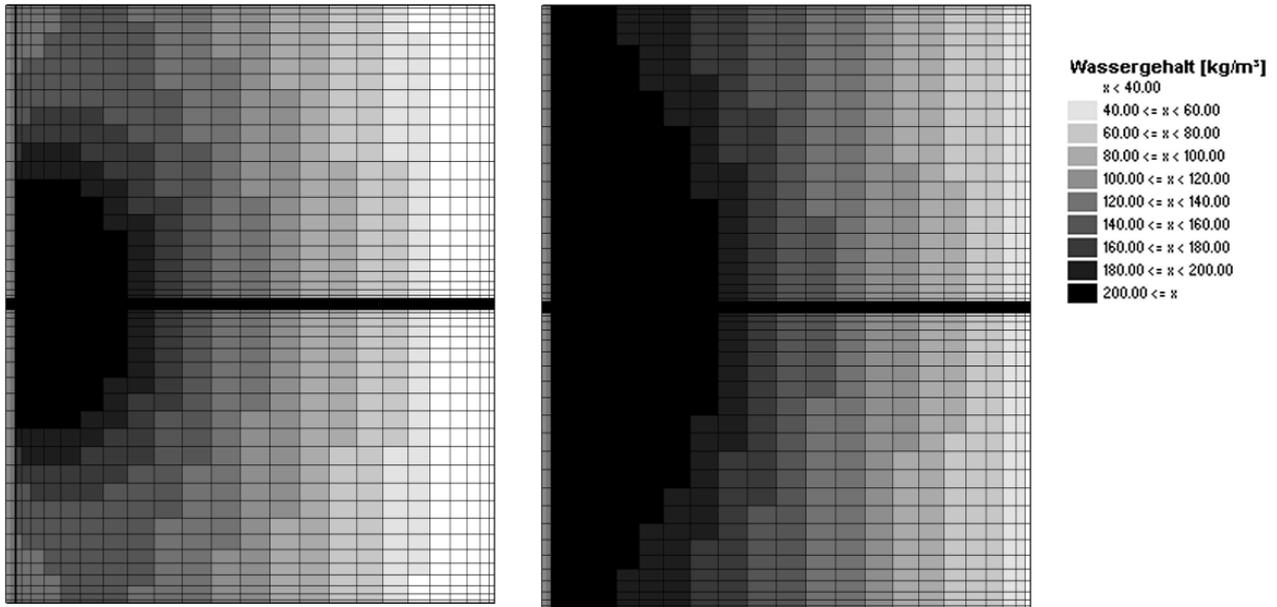


Bild 6 Darstellung der Feuchteverteilungen im berechneten Wandausschnitt zu den im Bild 5 gekennzeichneten Zeitpunkten im Sommer (links) und Winter (rechts).

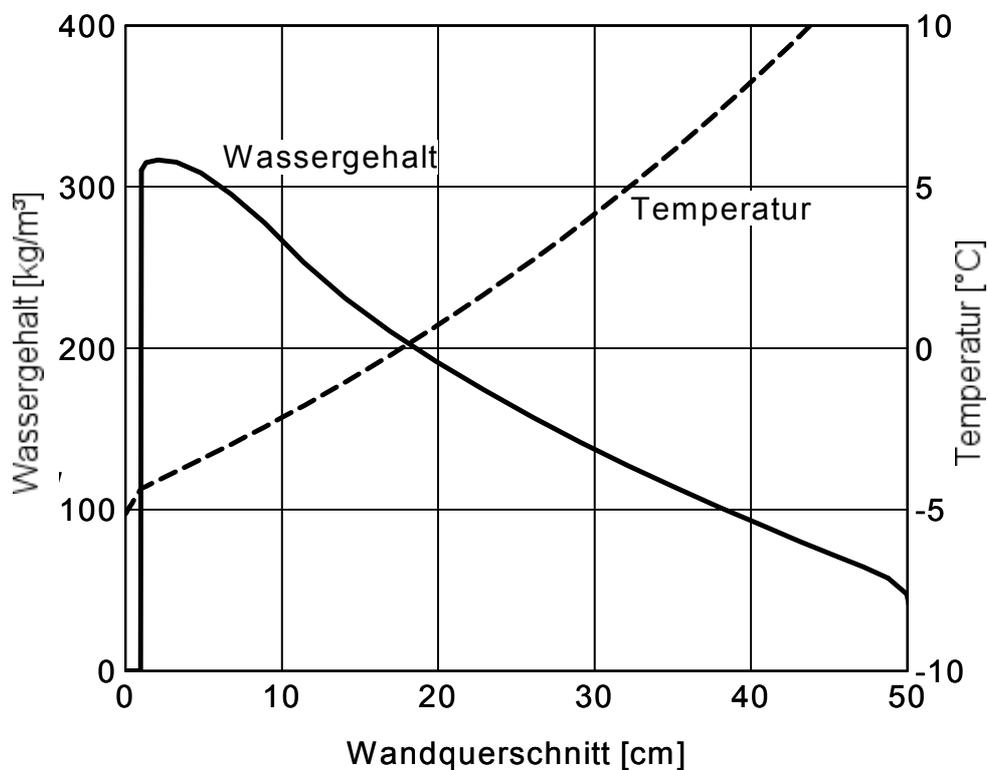


Bild 7 Wassergehaltsprofil (durchgezogene Linie) und Temperaturprofil (gestrichelte Linie) für einen horizontalen Schnitt knapp oberhalb der Fehlstelle zu dem in Bild 6 rechts dargestellten Zeitpunkt.

5. Einfluß einer Widerstandsschicht

Wie Untersuchungen [6] zeigen, bildet sich zwischen Mörtel und Mauerstein meist eine Widerstandsschicht, die für einen deutlich geringeren Feuchteübergang von Mörtel in den Mauerstein sorgt. (Dies ist meist auch der Grund, warum Wasserschlösser ohne große Probleme durch aufsteigende Feuchte existieren können). Die Widerstandsschicht wurde dabei in Form eines 1 mm dicken Mörtels mit den gleichen Materialkennwerten wie der verwendete Kalkzementmörtel aber um den Faktor 200 verminderten Kapillartransportkoeffizienten implementiert. Bei dem berechneten Wandaufbau ist die mittlere Mörtelfuge voll saugfähig (Fehlstelle); die anderen Mörtelfugen sind wie die Ziegel bis zu einer Tiefe von 2 cm hydrophobiert. Über jedem Mörtel befindet sich die beschriebene Widerstandsschicht. Bild 8 zeigt, daß dadurch die Wasseraufnahme über die Fehlstelle deutlich vermindert wird, wie auch aus den Flächenverteilungen in Bild 9 ersichtlich wird. Der Wassergehalt im Ziegel nahe der Fehlstelle beträgt nun im Winterfall maximal 220 kg/m^3 (Bild 10), so daß ein deutlich geringeres Frostschadensrisiko zu erwarten ist.

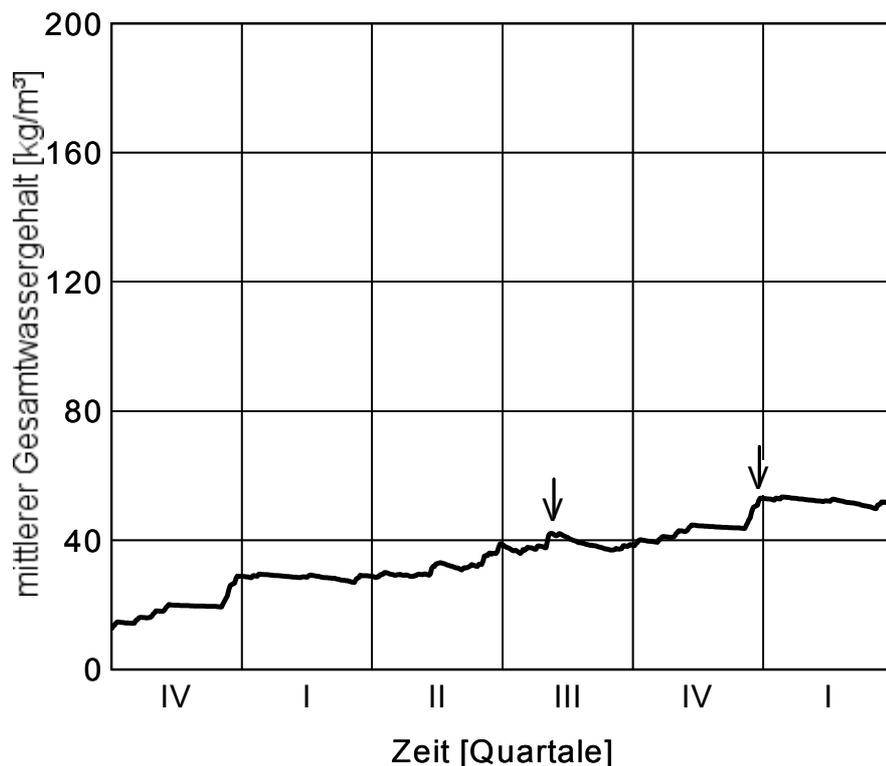


Bild 8 Zeitlicher Verlauf des mittleren Gesamtwassergehaltes des berechneten Wandausschnittes. Die Pfeile markieren die Zeitpunkte für die 2D-Darstellungen in Bild 9.

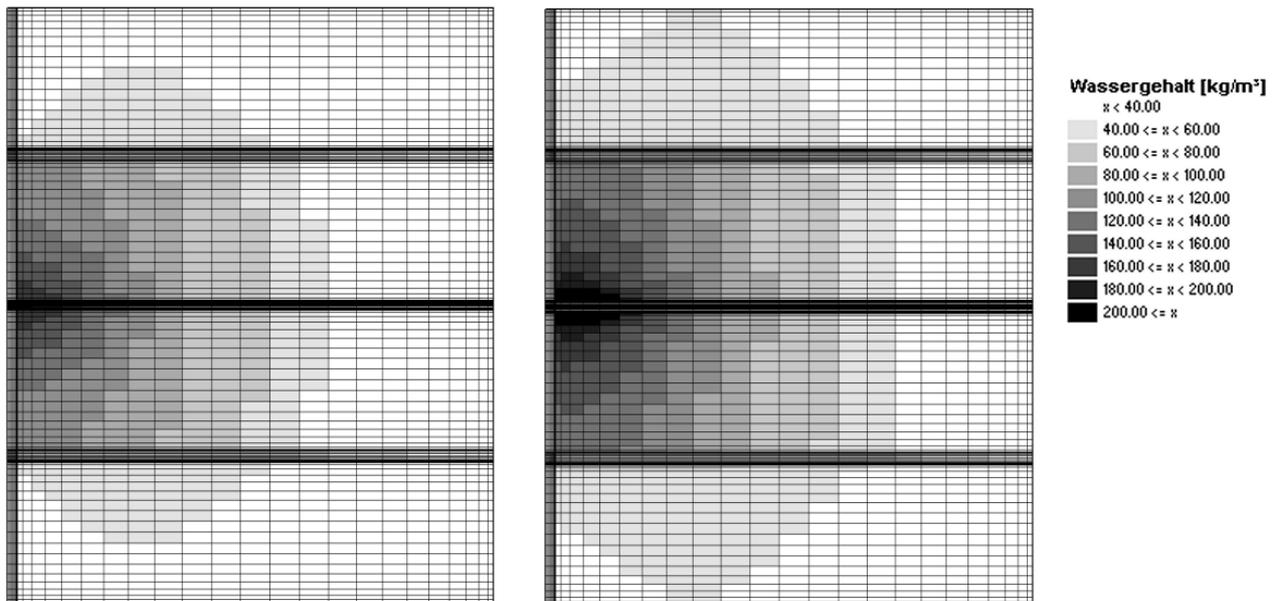


Bild 9 Darstellung der Feuchteverteilungen im berechneten Wandausschnitt zu den im Bild 8 gekennzeichneten Zeitpunkten im Sommer (links) und Winter (rechts).

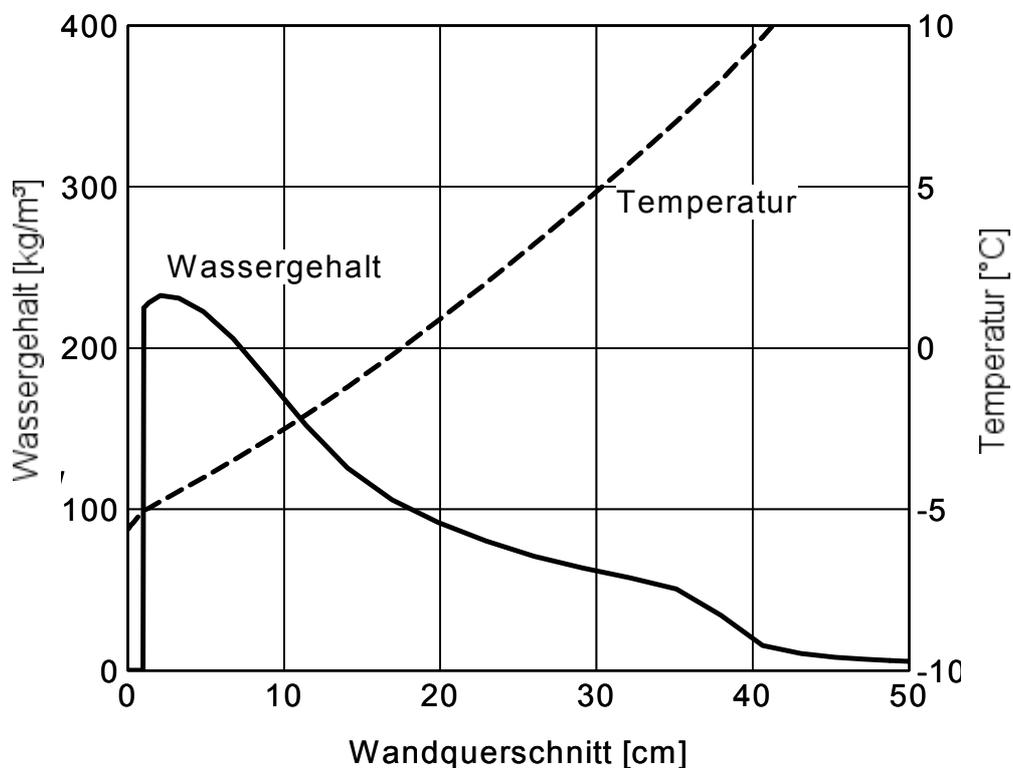


Bild 10 Wassergehaltsprofil (durchgezogene Linie) und Temperaturprofil (gestrichelte Linie) für einen horizontalen Schnitt knapp oberhalb der Fehlstelle zu dem in Bild 9 rechts dargestellten Zeitpunkt.

Meist wird bei einer Mörtelfuge eine Fehlstelle in Form eines Flankenabrisses auftreten. Dann ist aber zu erwarten, daß an dieser Stelle keine wirksame Widerstandsschicht mehr vorhanden ist. Im folgenden Beispiel werden dazu nur bei den Mörtelfugen ohne Fehlstelle Widerstandsschichten implementiert. Gemäß Bild 11 führt dies zu fast dem gleichen Verlauf des Gesamtwassergehaltes wie bei einem Aufbau ohne Widerstandsschichten (Bild 5). Es ergeben sich aber deutlich unterschiedliche Feuchteverteilungen (Bild 12 verglichen mit Bild 6). In die obere bzw. untere Steinlage dringt nur wenig Wasser ein, dafür aber um so tiefer in die der Fehlstelle benachbarten Steinlagen. Dies zeigt sich besonders im Wassergehalts- und Temperaturprofil nahe der Fehlstelle (Bild 13 verglichen mit Bild 7), so daß eine noch größere Frostschadensgefahr zu erwarten ist.

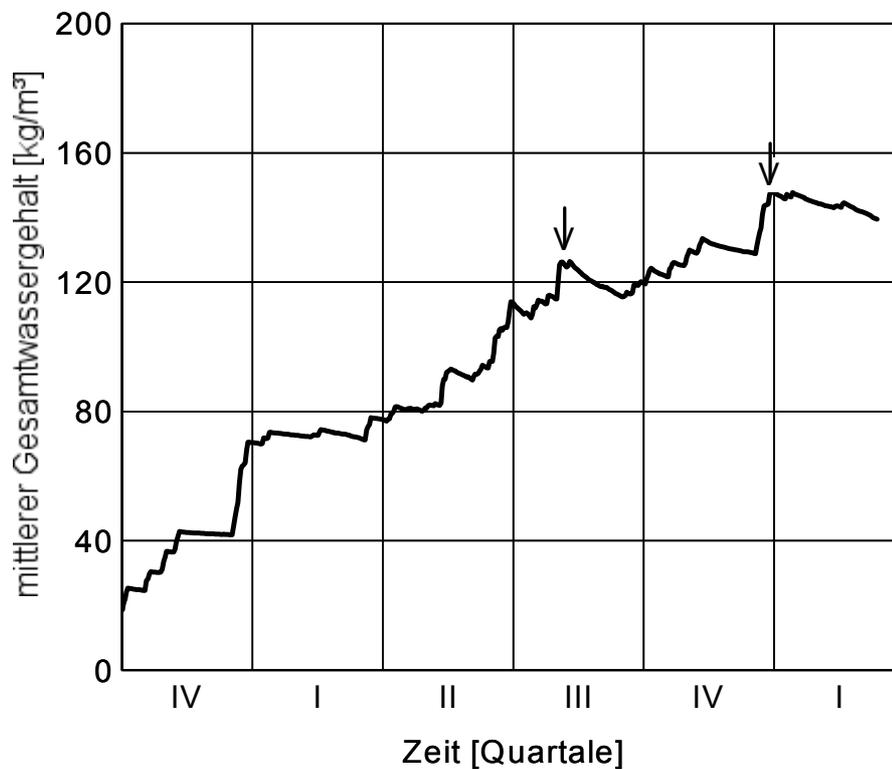


Bild 11 Zeitlicher Verlauf des mittleren Gesamtwassergehaltes des berechneten Wandausschnittes. Die Pfeile markieren die Zeitpunkte für die 2D-Darstellungen in Bild 12.

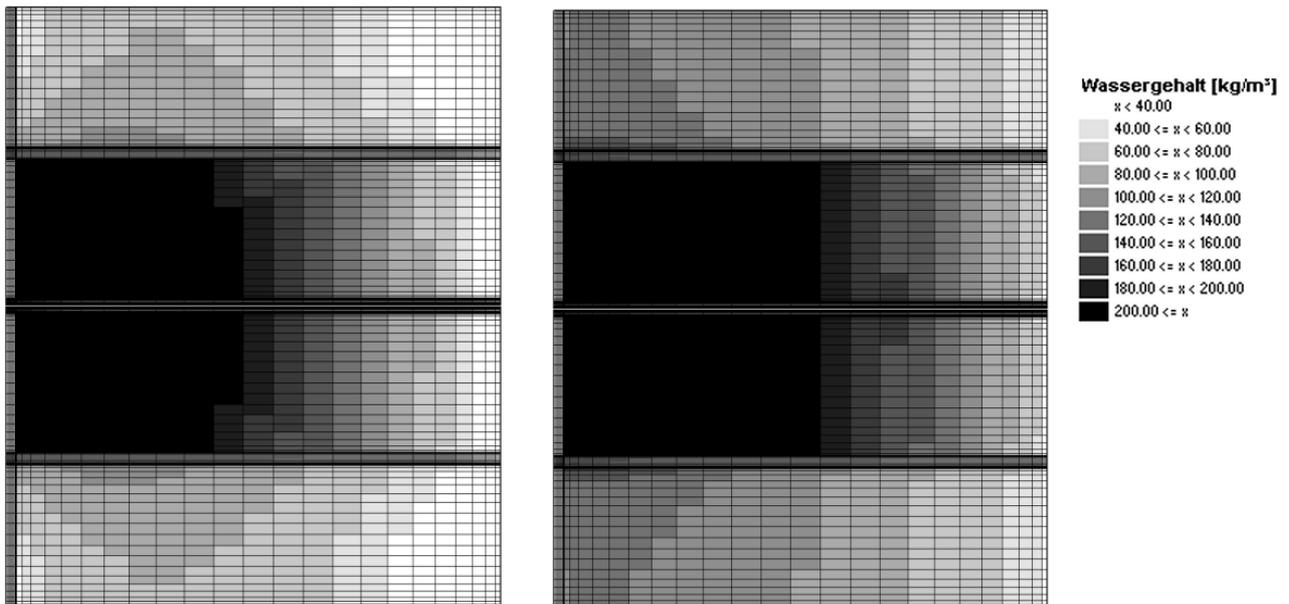


Bild 12 Darstellung der Feuchteverteilungen im berechneten Wandausschnitt zu den im Bild 8 gekennzeichneten Zeitpunkten im Sommer (links) und Winter (rechts).

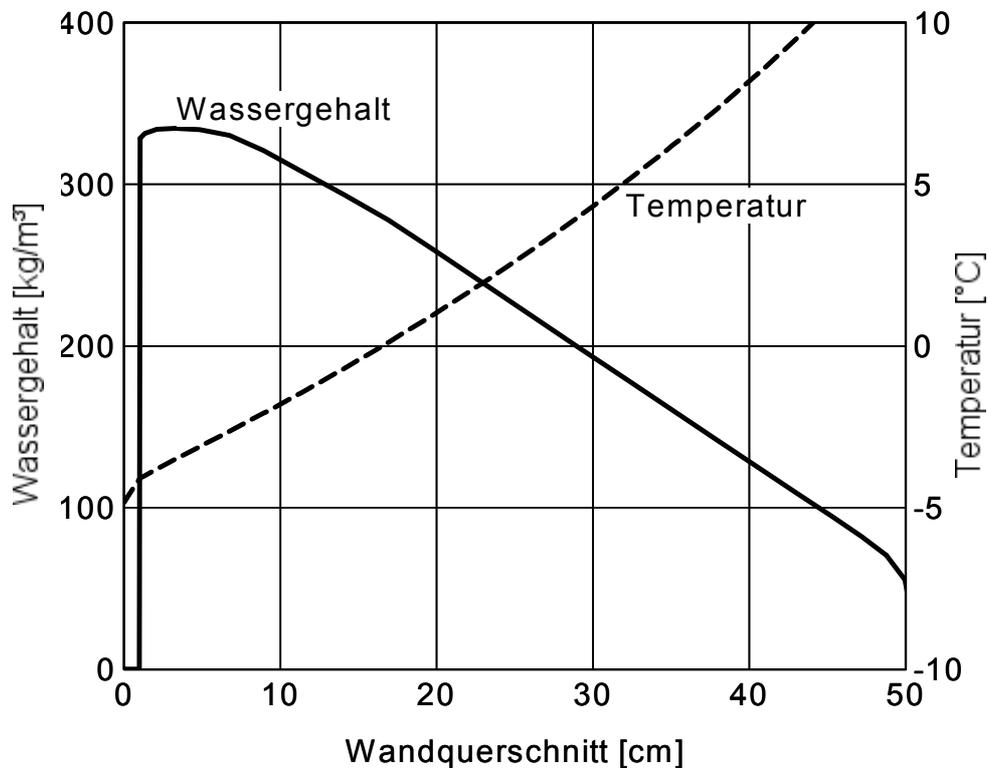


Bild 13 Wassergehaltsprofil (durchgezogene Linie) und Temperaturprofil (gestrichelte Linie) für einen horizontalen Schnitt knapp oberhalb der Fehlstelle zu dem in Bild 12 rechts dargestellten Zeitpunkt.

6 Literatur

- [1] Krus, M., Künzel, H.M., Kießl, K.: *Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk. Bauforschung für die Praxis*, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart (1996).
- [2] Künzel, H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Diss. Universität Stuttgart (1994).
- [3] Künzel, H.M., Krus, M.: *Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden*. Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinerfall-Steinkonservierung, Band 5 (1993), S. 19-25.
- [4] Kießl, K., Krus, M., Künzel, H.M.: *Weiterentwickelte Meß- und Rechenansätze zur Feuchtebeurteilung von Bauteilen. Praktische Anwendungsbeispiele*. Sonderdruck Bauphysik 15 (1993) H. 2, S. 61-67.
- [5] Holm, A., Krus, M.: *Zweidimensionale WUFI-Berechnungen zur aufsteigenden Feuchtigkeit*. 10. Hanseatische Sanierungstage, November 1999, S. 107-116.
- [6] Holm, A., Krus, M., Künzel, H.M.: *Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk*. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 2 (1996), H. 5, S. 375-396.