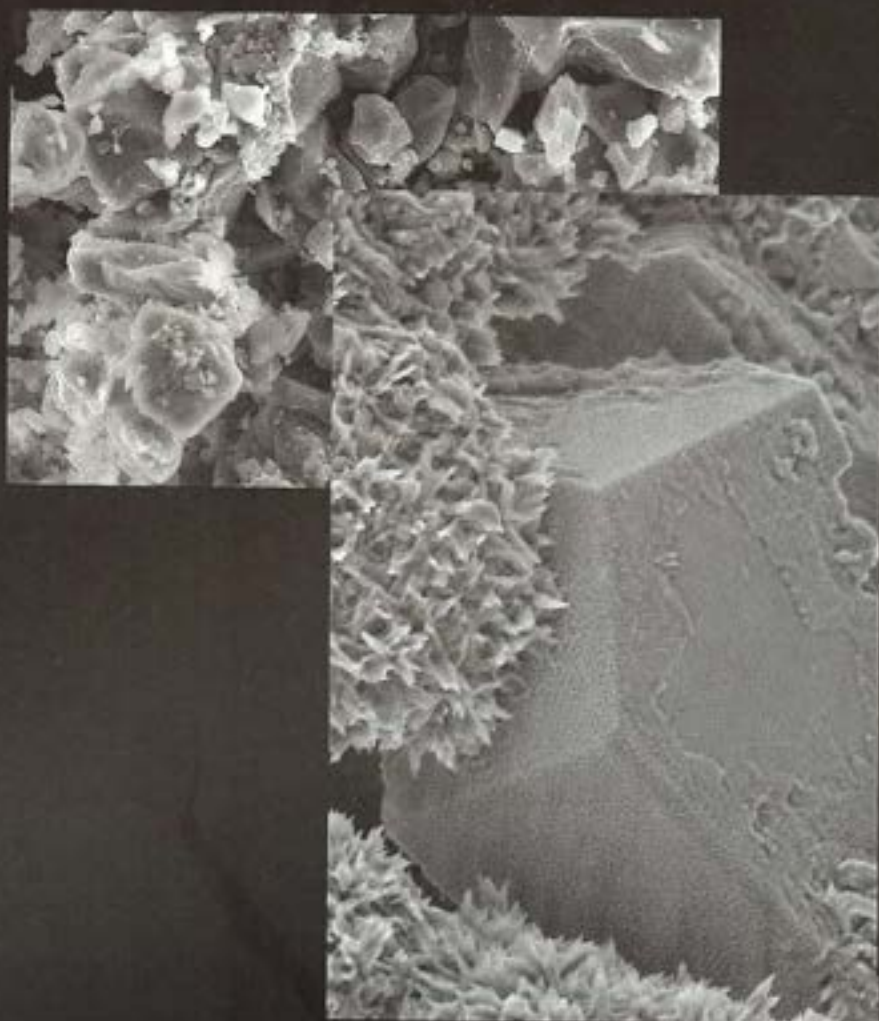


Thesis

F. A. Einger-Institut für Baustoffkunde

Beiträge zur Baustoff- Forschung 2001



Test Results on the Frost Resistance of Natural Stones 180 |

Wolfgang Erfurt, Wolfram Köhler, Jochen Stark Non-Tactile Ultra Sound Testing Techniques for Building Diagnosis 196 |

Wolfram Köhler, Wolfgang Erfurt, Kristina Terheiden Investigations on the Substance Transport in Building Materials by Means of Gravimetrically Verified Radar Measurement 204 |

Mykola Mokhort Geocements – The Structure Formation in the Hardening Process and Selected Examples of Usage 212 |

Pavel Kryvenko, Mykola Mokhort, Grigori Vozniuk Inorganic Cements for Building Materials 222 |

Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar

Die Zeitschrift veröffentlicht wissenschaftliche Arbeiten zu allen an der Bauhaus-Universität Weimar vertretenen Fachgebieten.

Der Vertrieb erfolgt in mehr als 40 Länder. Die Verlagsrechte liegen bei der Bauhaus-Universität Weimar.

Herausbergremium der Bauhaus-Universität Weimar:
Rektor Prof. Dr. phil. Walter Bauer-Wabnegg, Prof. Dipl.-Ing. Heike Büttner-Hyman, Prof. Dr. phil. habil. Lorenz Engell, Prof. Dr.-Ing. habil. Erich Raue, Prof. Dr. phil. habil. Karl Schawelka, Reiner Bensch, M. A., Dr. phil. Heidemarie Schirmer

Verlag:
Bauhaus-Universität Weimar, Universitätsverlag
D-99421 Weimar
Telefon +49 (0) 36 43/58 11 50
Telefax +49 (0) 36 43/58 11 56

Herausgeber:
Herausbergremium der Bauhaus-Universität Weimar,
Dipl.-Ing. Bernd Wicht

Redaktion:
Dipl.-Ing. Bernd Wicht
Dr. phil. Heidemarie Schirmer, v. i. S. d. P.

Bezugsmöglichkeiten:
Die Zeitschrift ist käuflich oder über den internationalen Schriftentausch zu erwerben. Anträge auf Tauschbezug sind an die Bibliothek der Bauhaus-Universität Weimar, D-99421 Weimar, Weimarplatz 2, zu richten.
Abonnement- oder Einzelbezug besteht über den Verlag.

Erscheinungsweise:
6 Hefte im Jahr

Druck:
Gutenberg Druckerei Weimar

Basislayout:
Pieter Dompeling

Satz und Gestaltung:
Dr. phil. Heidemarie Schirmer

Redaktionsschluss:
Oktober 2001

These „aufgestellter [Lehr-, Leit]satz; (zu beweisende) Behauptung“. Das Fremdwort wurde im 16. Jh. aus griech.-lat *thesis* „das Setzen, das [Auf]stellen; aufgestellter Satz; Behauptung“ entlehnt (vgl. den Artikel *Thema*). – Das griech. Wort erscheint auch als Hinterglied in verschiedenen Präfixbildungen. Siehe hierzu im Einzelnen die Fremdwörter Hypothese, Prothese und Synthese.

1 Einführung

Eine wichtige Forderung für die weitere Entwicklung der Untersuchungsmethoden der Bauwerksdiagnostik wird durch den Wunsch nach einer dreidimensionalen Erfassung von Feuchte- und Salzverteilungen (Materialparameter) und der Beobachtung von Stofftransporten (Prozessmonitoring) im Bauteil definiert. Dieses Ziel kann sicher in späteren Jahren nur unter der Voraussetzung erreicht werden, dass es in der nächsten Zeit gelingt, geeignete Methoden zu entwickeln, um Feuchte und Salze in Bauwerkstoffen getrennt, zerstörungsfrei und schnell zu messen. Gerade im Hinblick auf die Revitalisierung von Bauwerken ist die zerstörungsfreie Bauwerksdiagnostik bei der Planung, Durchführung und Kontrolle von Sanierungsmaßnahmen von immenser Bedeutung. Regenerative Ionentransportprozesse ließen sich dabei nicht nur örtlich durch meist zerstörende Untersuchungen, sondern örtlich und zeitlich durch begleitende zerstörungsfreie Untersuchungen verfolgen.

Die aktuellen Untersuchungen wurden im Rahmen des SFB 524 *Revitalisierung von Bauwerken* an der Bauhaus-Universität in Weimar in den Teilprojekten B1 und B4 durchgeführt und sollen erste Möglichkeiten zur Erreichung des oben genannten Zieles aufzeigen. Der komplexe Charakter dieser Problematik macht die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Baustoffwissenschaftlern, Bauingenieuren, Chemikern und Physikern der Fakultät Bauingenieurwesen notwendig.

Die aktuellen Arbeiten konzentrieren sich auf folgende Schwerpunkte:

- Anpassung von bewährten Messsystemen an diese Messaufgabe,
- quantitative zerstörungsfreie Messung des Feuchtegehaltes eines porösen Bauwerkstoffes,
- quantitative zerstörungsfreie Messung des Salzgehaltes eines porösen Bauwerkstoffes.

Als geeignete Untersuchungsmethode wurde Georadar, GPR (Ground Penetrating Radar), ausgewählt. Für die ersten Untersuchungen ist es sinnvoll, die experimentellen Randbedingungen möglichst eindeutig zu wählen. Der zu untersuchende Bauwerkstoff sollte weitgehend homogen und inert sein. Wie auch bei anderen aus der Literatur bekannten Untersuchungen [1, 2] wurden zunächst zwei bekannte und häufig verbaute Sandsteine, der Oberröchner und der Seeberger Sandstein, ausgewählt. Für die Untersuchung der Salzproblematik erfolgten die Versuche zunächst mit Natriumsulfatlösung.

Resultierend aus den ersten Ergebnissen sind Versuchsreihen mit weiteren Sandsteinen, Beton und anderen Salzen in Vorbereitung.

2 Feuchte- und Salzmessung mit GPR

2.1 Physikalische Grundlagen

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in mineralischen Medien ähnelt dem Verhalten elastischer (seismischer) Wellen. Grundlegende Unterschiede bestehen im Vorhandensein des Leitfähigkeitsterms in der elektromagnetischen Wellengleichung und der starken Kopplung zwischen elektrischen und magnetischen Feldvektoren.

Als Lösung der Maxwell-Gleichungen ergibt sich für das elektrische Feld bei einem harmonischen Zeitansatz für die in z-Richtung fortschreitende, transversale ebene Welle [3]:

$$(1) \quad E(t) = E_0 e^{i(\omega t - \gamma z)} \quad [V \cdot m^{-1}]$$

mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ (in s^{-1}) und der komplexen Ausbreitungskonstante

$$(2) \quad \gamma = \alpha + i\beta \quad [m^{-1}]$$

α – Dämpfungsfaktor [m^{-1}] bzw. als Absorptionskoeffizient

$$\alpha' = 8,686 \alpha \quad [dB \cdot m^{-1}]$$

β – Phasenkonstante [m^{-1}]

Zur Beschreibung der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im Radarfall sind folgende Materialgrößen von Bedeutung:

$$(3) \quad \epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad \text{komplexe Dielektrizitätskonstante}$$

$$(4) \quad \epsilon_r^* = \frac{\epsilon^*}{\epsilon_0} \quad \text{komplexe relative Dielektrizitätszahl}$$

$$\text{mit } \epsilon_0 = 8,8544 \cdot 10^{-12} \text{ A s V}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

$$(5) \quad \tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon'} \quad \text{Verlustwinkel } \delta$$

Danach verhält sich $\tan \delta$ direkt proportional zur Leitfähigkeit σ und umgekehrt proportional zur Frequenz ω .

Für verlustarme Medien gilt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Radarwellen näherungsweise:

$$(6) \quad v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad [m \cdot ns^{-1}]$$

mit $c_0 = 0,2998 \text{ m ns}^{-1}$ für die Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Im Frequenzbereich zwischen 1 und 10 GHz zeigt ein trockener Baustoff keine messbaren Verluste, während die Verluste in Wasser besonders hoch sind. Daher ist dieser Frequenzbereich besonders geeignet, eine Korrelation zwischen dem Realteil der relativen Dielektrizitätszahl ϵ_r' bzw. der

Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Radarwellen und dem Feuchtegehalt P eines Baustoffes herzustellen:

$$(7) P = P(v) \quad \text{oder} \quad P = P(\epsilon_r') \quad [\text{Vol.}\%]$$

Die Absorption der Strahlung in einem Material ist die Funktion des dielektrischen Verlustes ϵ_d' und der Leitfähigkeit σ [4].

$$(8) e'' = \epsilon_d' + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}$$

Für die Absorption liefert bei niedrigeren Frequenzen (unter 1GHz) die ionische Leitfähigkeit σ den Hauptanteil, während bei höheren Frequenzen nur noch dielektrische Verluste ϵ_d' auftreten. Bei Frequenzen um 1 GHz sind demnach beide Anteile zu erwarten, die sich durch eine generelle Signaldämpfung messen lassen.

$$(9) \frac{A}{A_0} = e^{-d \cdot k} \quad \begin{array}{l} A - \text{Signalamplitude [-]} \\ A_0 - \text{Amplitude des ungedämpften Signals [-]} \\ d - \text{Dämpfungskonstante [l/mol]} \\ k - \text{Salzkonzentration [mol/l]} \end{array}$$

Dies ergibt die Möglichkeit, eine Korrelation zwischen der Salzkonzentration k und der gedämpften Signalamplitude A bei einer konstanten Messstrecke z zu ermitteln, ohne die feuchtebedingte Dämpfung getrennt messen zu müssen:

$$(10) k = k(A) \quad [\text{mol/l}]$$

Damit ergibt sich die Chance, bei einer Hauptmessfrequenz von 1 GHz durch getrennte Korrelationen der Materialfeuchte mit der Signalgeschwindigkeit und der Salzkonzentration mit der Signaldämpfung und einer konstanten Messstrecke beide Stoffkonzentrationen durch nur eine Messung zu erfassen.

In Tabelle 1 sind einige typische Werte aufgeführt, die von verschiedenen Autoren bei Frequenzen von 60 und 100 MHz an ausgewählten Stoffen ermittelt wurden [5].

2. 2 Experimentelle Voraussetzungen

Georadar (GPR) ist ein elektromagnetisches Impulsreflexionsverfahren (EMR), das auf ähnlichen Grundlagen wie die Reflexionsseismik und die Entfernungsmessung mit Sonar und Radar beruht [6]. Das für die geophysikalische Prospektion erarbeitete Verfahren wird ständig weiterentwickelt. Dies betrifft besonders seine Anwendung für Untersuchungsdimensionen unter einem Meter. Da Bauteile häufig Dimensionen unter 10 cm aufweisen, muss dieses Verfahren auch für diese Messstrecken sicher anwendbar gemacht werden. Hierfür sind hohe Signalfrequenzen notwendig, um die geforderte Auflösung im Zentimeterbereich zu erreichen. Daher kam eine kommerzielle Radarantenne mit einer Hauptfrequenz von 1 GHz zum Einsatz, die gleichzeitig der in 2. 1 begründeten Vorzugsfrequenz für Feuchte- und Salzmessungen entspricht.

Das eingesetzte Radargerät SIR3 der Firma GSSI liefert ein analoges Signal, das digitalisiert auf einem Rechner gespeichert wird. Für die Messun-

Tabelle 1: Dielektrizitätszahl, Leitfähigkeit, Geschwindigkeit und Dämpfung einiger Materialien

| Material | Dielektrizitätszahl ϵ_r' [-] | Leitfähigkeit σ [m, m ⁻¹] | Geschwindigkeit v [mns ⁻¹] | Dämpfung α' [dB m ⁻¹] |
|------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| Luft | 1 | 0 | 0,2998 | 0 |
| Aqua dest. | 80 | 0,01 | 0,033 | 0,002 |
| Süßwasser | 80 | 0,5 | 0,033 | 0,1 |
| Meerwasser | 80 | 30.000 | 0,01 | 1.000 |
| trockener Sand | 3...5 | 0,01 | 0,15 | 0,01 |
| gesättigter Sand | 20...30 | 0,1...1 | 0,06 | 0,03...0,3 |
| Schluff | 5...30 | 1...100 | 0,07 | 1...100 |
| Ton | 5...40 | 2...1.000 | 0,06 | 1...300 |
| Kalkstein | 4...8 | 0,5...2 | 0,12 | 0,4...1 |
| Schiefer | 5...15 | 1...100 | 0,09 | 1...100 |
| Granit | 6 | 0,01...1 | 0,12 | 0,01...1 |
| trockenes Salz | ~ 6 | 0,001...0,1 | 0,125 | 0,01...1 |
| Eis | 3,18 | 0,01 | 0,168 | 0,02 |
| Öl, Asphalt | 2...3 | 0,01 | 0,19 | 0,01 |

gen von Langzeitserien (Prozessmonitoring), die mehrere Monate dauern, müssen reproduzierbare Messbedingungen garantiert werden. Dafür war es wichtig, die serienmäßig eingebauten Regler durch Präzisionsregler zu ersetzen. Gleichmaßen war es notwendig, die eingesetzte Aquisitions- und Signalauswertungssoftware REFLEXW 2.02 der Firma Sandmeier um spezielle Tools zu erweitern. Diese lassen den direkten Vergleich von Eichsignalen mit den aktuellen Messsignalen zu und unterstützen so die Reproduzierbarkeit der Messungen.

2.3 Versuchsdurchführung

2.3.1 Kalibrierung und Korrelationen

Für die ersten Untersuchungen wurden Sandsteinprüfkörper der Varietäten ausgewählt, von denen ähnliche Untersuchungen aus der Literatur bereits bekannt waren [7]. Die Voraussetzungen waren eine gute Homogenität, ein großer Porenraum und möglichst geringe Anteile von tonigen Bestandteilen. Es wurden zunächst der Obernkirchner und der Seeberger Sandstein gewählt. Die Abmessungen der Probekörper sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Da bei Radarmessungen in Profilrichtung an den Trennflächen erhebliche Reflexionen stattfinden, wurde bei den Messungen am Anfang und am Ende des Probekörpers jeweils ein 15 cm langes materialidentisches Sandsteinstück angesetzt,

Tabelle 2: Dimensionen der Sandsteinprobekörper

| Dimension [cm] | Obernkirchner Sandstein | Seeberger Sandstein |
|----------------|-------------------------|---------------------|
| Länge | 30 | 30 |
| Breite | 10 | 10 |
| Höhe | 8 | 10 |

um diese störenden Effekte zu reduzieren. Damit ergab sich eine Gesamtprofillänge von 60 cm. Gleichzeitig dienten die Signale der Randstücke zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit der Messungen, die sich über mehrere Monate erstreckten (Abb. 1).

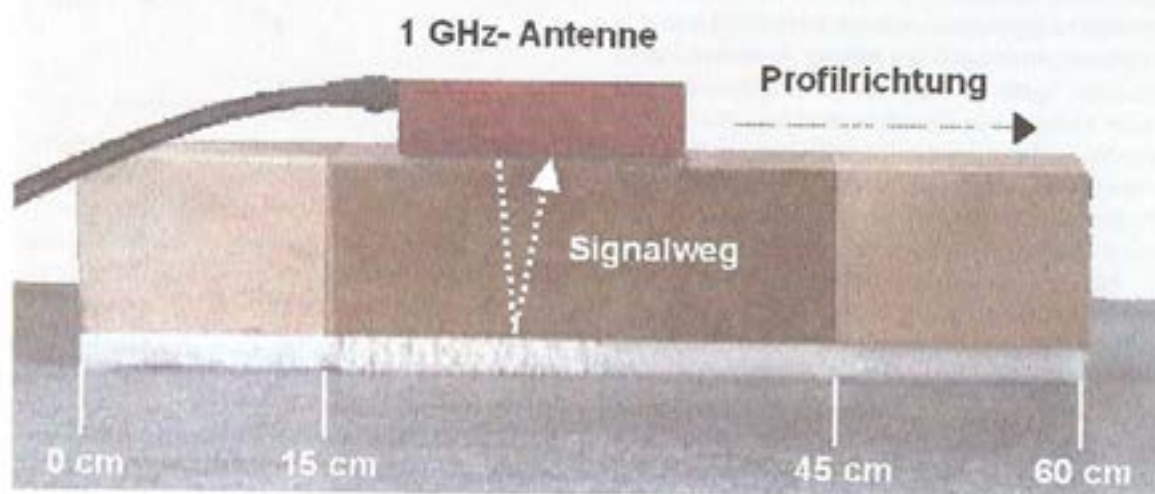
Die Radarwellen werden an der Rückseite des Probekörpers reflektiert. Der Signalweg ist konstant. Die Signallaufzeit ist feuchteabhängig, so dass das Signal bei höheren Materialfeuchten verzögert wird. Dies ist an einer Verschiebung der Rückwandreflexion hin zu längeren Signallaufzeiten t und damit zu kleineren Wellengeschwindigkeiten v und zu größeren Dielektrizitätszahlen ϵ_r' erkennbar.

Die Signalamplitude ist bei einer Porenfüllung mit destilliertem Wasser kaum gedämpft und dient als Bezugssignal A_0 für die Bestimmung der Dämpfung bei den Messungen der salzbelasteten Proben.

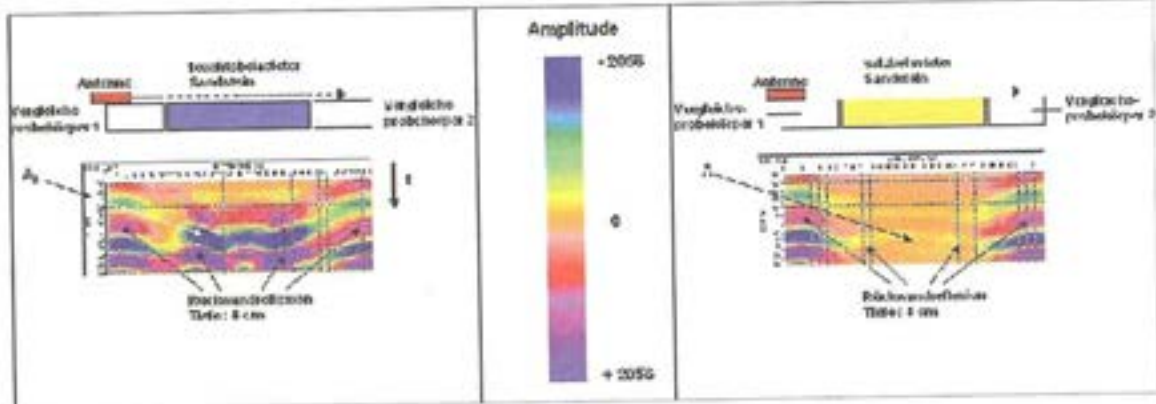
Befinden sich im Porenraum gelöste Salze, so ist die Signalamplitude A gedämpft. Je höher die Konzentration k der gelösten Salze ist, desto größer ist die Signaldämpfung A/A_0 . Somit haben die Versuchsserien Form und exemplarische Ergebnisse, wie in Abbildung 2 dargestellt.

An dem Diagramm der salzbelasteten Probe ist gut zu erkennen, dass das Signal eine verlängerte Laufzeit hat und erheblich gedämpft ist. Das bedeutet, dass aus einem Radargramm sowohl der Feuchte- als auch der Salzgehalt an jedem Punkt einer Profillinie ermittelt und berechnet werden kann. Voraussetzung dafür ist jedoch die Bestimmung der jeweiligen Korrelationen.

Für die Bestimmung der Feuchtekorrelation wurde an einem Probekörper aus Obernkirchner Sandstein während eines gravimetrisch kontrollierten Austrocknungsvorganges der Wassergehalt P [Vol.-%] und die über die Probenlänge gemittelte Wellengeschwindigkeit v [m/ns] gemessen.



1 | Schema der Radarmessungen an Sandsteinprüfkörpern



2 | Messschema der Feuchte- und Salzmessung durch die Bestimmung der Signallaufzeit t und der Signaldämpfung A/A_0

Die Korrelation des Messsignals mit der Salzkonzentrationen erfolgte anhand einer vollständig mit deionisiertem Wasser penetrierten und drei vollständig mit Salzlösung penetrierten Proben. Die drei mit Salzlösung penetrierten Proben unterschieden sich in ihrer Konzentration. Es wurde eine 0,05, 0,1 und eine 0,5 molare Na_2SO_4 -Lösung verwendet. Gemessen wurde die Amplitude A der Rückwandreflexion von den mit Salzlösung beladenen Proben. Als Referenzamplitude A_0 diente die Rückwandreflexion der mit deionisiertem Wasser penetrierten Probe. Als Probenmaterial für die Untersuchungen zur Salzkorrelationen wurde der Seeberger Sandstein verwendet.

2.3.2 Prozessmonitoring

An den oben beschriebenen Proben erfolgte die Beobachtung der Austrocknungsvorgänge nach der Beladung mit Wasser und den Salzlösungen. Dafür wurden nach der Beladung die Proben an fünf Seiten mit Epoxidharz abgedichtet, so dass der Austrocknungsvorgang nur durch die frei bleibende Stirnfläche stattfinden konnte. Damit war es möglich, die Feuchte- und Salzgradienten zu beobachten und zu messen. Es wurden die Messpunkte in Profilirichtung im Abstand von 2 cm ausgewertet. Die Messzeiten lagen am Anfang im Abstand von Stunden, später in Tagen und über mehrere Monate im Abstand von mehreren Wochen. Die laufenden Versuchsserien werden noch bis zum Ende des Jahres 2001 fortgesetzt und wurden um weitere Proben mit 0,1 molarer Salzlösungen von Natriumnitrat und Natriumchlorid ergänzt.

Für die Auswertung werden die bei den Eichungen ermittelten Korrelationen auf die zweidimensionalen Radarprofile angewendet, um die konkreten Feuchte- und Salzgehalte orts aufgelöst zu berechnen.

Bisher konnten die Messungen der Austrocknung an einer Probe des Obernkirchner Sandsteins, welche mit deionisiertem Wasser beladen war, abgeschlossen und ausgewertet werden. Die

Austrocknung erfolgt nach der Beladung in einem definierten Klima bei einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65%.

2.4 Untersuchungsergebnisse

2.4.1 Feuchtemessung

Die Radarmessungen an einer trocknenden Probe des Obernkirchner Sandsteins führten zu folgenden Zusammenhang zwischen Dielektrizitätszahl und Feuchtegehalt (Tabelle 3):

Tabelle 3: Dielektrizitätszahl und Feuchtegehalt

| Feuchte [Vol.-%] | Dielektrizitätszahl [-] |
|------------------|-------------------------|
| 0,00 | 3,95 |
| 14,96 | 12,55 |
| 14,60 | 12,36 |
| 13,57 | 8,28 |
| 6,30 | 7,70 |
| 2,63 | 7,28 |
| 1,67 | 7,00 |

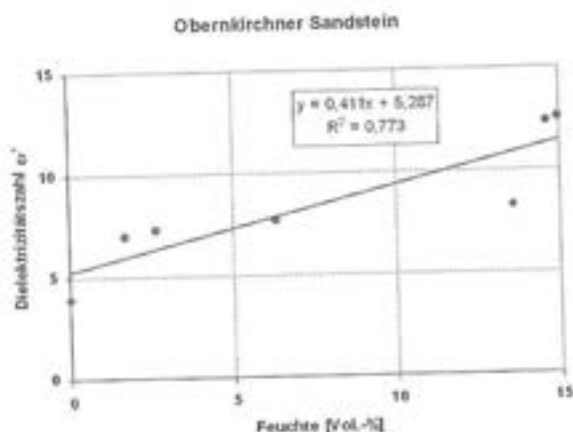
$$(11) \quad \epsilon_r' = 0,41P + 5,29$$

Damit ergibt sich für die Materialfeuchte folgende Beziehung (Abb. 3):

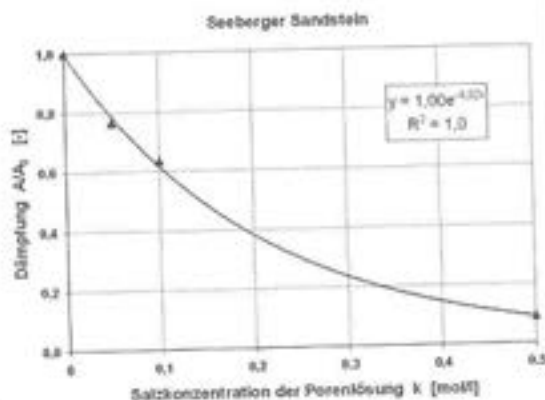
$$(12) \quad P = 2,43\epsilon_r' - 12,86 \quad [\text{Vol.-%}]$$

2.4.2 Salzmessung

Die Radarmessungen an den Seeberger Sandsteinproben, welche mit unterschiedlich konzentrierten Na_2SO_4 -Lösungen penetriert wurden, ergaben folgende Ergebnisse:



3 | Dielektrizitätszahl in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt



4 | Signaldämpfung in Abhängigkeit von der Salzkonzentration

Tabelle 4: Signaldämpfung in Abhängigkeit von der Salzkonzentration

| Konzentration k der Porenlösung [mol/l] | Signaldämpfung A/A_0 |
|---|------------------------|
| 0,00 | 1,00 |
| 0,05 | 0,77 |
| 0,10 | 0,64 |
| 0,50 | 0,09 |

Diese Ergebnisse resultieren aus Messungen an vollständig feuchtegesättigten Proben direkt nach dem Penetrieren, d. h., die Salze befanden sich in Lösung. Somit ist also ein Fehlereinfluss durch Aufkonzentration der Lösung oder durch auskristallisierte Salze auszuschließen.

$$(13) \quad \frac{A}{A_0} = e^{-4,82k}$$

Damit ergibt sich für die Salzkonzentration folgende Beziehung (Abb. 4):

$$(14) \quad k = -0,207 \ln \left(\frac{A}{A_0} \right) \quad [\text{mol/l}]$$

2. 4. 3 Trocknungsdynamik

Aus den Laufzeitmessungen wurden mit Hilfe der gefundenen Korrelation die Feuchteprofile für die Probe während einer zweimonatigen Austrocknungsphase berechnet (vgl. Tab. 5). Abbildung 5 ist zu entnehmen, dass sich bei 0 cm die freie Fläche, über die die Verdunstung stattfinden kann, befindet. Der sich herausbildende Feuchtegradient ist gut zu erkennen. Die Schwankungen im mittleren Teil der Probe sind noch nicht erklärbar. Durch weitere Messserien muss untersucht werden, ob dieser Effekt auf Materialinhomogenitäten, prozessbedingte Schwankungen oder experimentelle Störungen zurückzuführen ist.

3 Diskussion und Ausblicke

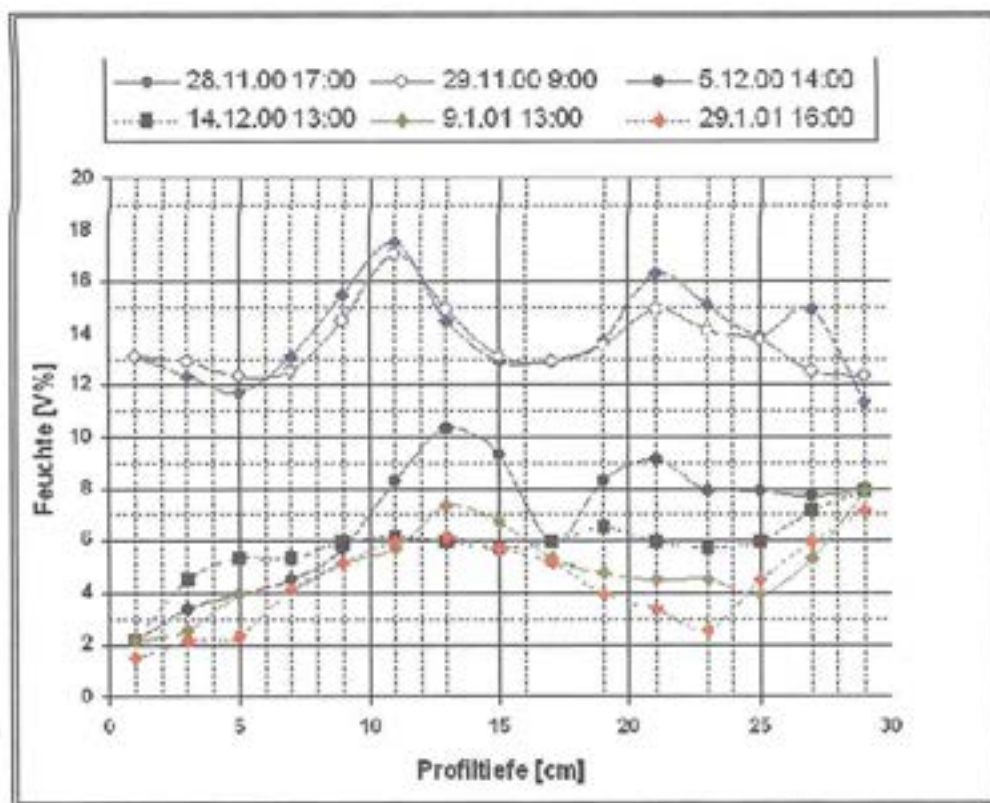
- Es ist möglich, mit Hilfe kommerzieller Radargeräte mit einer Messfrequenz von 1 GHz Feuchte- und Salzverteilungen in mineralischen Baustoffen zu detektieren.
- Die gefundenen Korrelationen zwischen Feuchte und Dielektrizitätszahl weichen nur wenig von ähnlichen Untersuchungen mit Messfrequenzen von 2,45 GHz ab.
- Die Korrelation zwischen der Salzkonzentration und der Signaldämpfung ist eindeutig, aber noch stark durch die experimentellen Randbedingungen geprägt. Dadurch ist ein direkter Vergleich mit anderen Untersuchungen noch nicht möglich.
- Das Monitoring von 2D-Stofftransporten ist quantitativ möglich.
- Die experimentellen Bedingungen können weiter vereinheitlicht werden, wodurch die quantitativen Aussagen der Messungen noch verbessert werden können.
- Die experimentellen Daten bieten die Möglichkeit, diese mit theoretischen Modellen zu vergleichen und so die theoretischen Modellierungen den experimentellen Daten anzunähern.
- Es bietet sich eine Erweiterung der Messungen z. B. auf andere Natursteine, Ziegel und Betone an.
- Es ist sinnvoll, weitere Salze in die Messungen mit einzubeziehen.

Verfasser:

Dipl.-Ing. Wolfgang Erfurt
 F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
 Bauhaus-Universität Weimar
 Dipl.-Phys. Wolfram Köhler
 Labor für Bauwerksdiagnose, Archäometrie und Geophysik Potsdam
 Dipl.-Ing. Kristina Terheiden
 Professur Bauchemie
 Bauhaus-Universität Weimar

Tabelle 5: Aus Radarmessungen ermittelter Feuchtegehalt einer trocknenden Obernkirchner Sandsteinprobe zu unterschiedlichen Messterminen

| Profiltiefe [cm] | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 |
|------------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Messzeitpunkt | Feuchtegehalt [Vol.-%] | | | | | | | | | | | | | | |
| 28.11.00/17:00 | 11,9 | 11,4 | 11,1 | 11,9 | 13,1 | 14,2 | 12,6 | 11,8 | 11,8 | 12,2 | 13,6 | 12,9 | 12,3 | 12,8 | 10,9 |
| 29.11.00/9:00 | 11,9 | 11,8 | 11,4 | 11,5 | 12,6 | 14,0 | 12,8 | 11,9 | 11,8 | 12,1 | 12,8 | 12,4 | 12,2 | 11,5 | 11,4 |
| 5.12.00/14:00 | 6,0 | 6,7 | 7,0 | 7,3 | 7,9 | 9,3 | 10,4 | 9,8 | 8,0 | 9,3 | 9,7 | 9,1 | 9,1 | 9,0 | 9,1 |
| 14.12.00/13:00 | 6,0 | 7,3 | 7,7 | 7,7 | 8,0 | 8,1 | 8,0 | 7,9 | 8,0 | 8,4 | 8,0 | 7,9 | 8,0 | 8,7 | 9,1 |
| 9.1.01/13:00 | 6,0 | 6,2 | 7,0 | 7,1 | 7,6 | 7,9 | 8,8 | 8,5 | 7,7 | 7,4 | 7,3 | 7,3 | 7,0 | 7,7 | 9,1 |
| 29.1.01/16:00 | 5,7 | 6,0 | 6,1 | 7,1 | 7,6 | 8,0 | 8,1 | 7,9 | 7,6 | 7,0 | 6,7 | 6,2 | 7,3 | 8,0 | 8,7 |



5 | Änderung des Feuchteprofils während der Austrocknungsphase der Obernkirchner Sandsteinprobe OK 4

Literatur:

- [1] Kahle, M.; Illich, B., *Erkundung historischen Mauerwerks mit Radar*, in: Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen: *Werkstoffwissenschaften und Bausanierung*, Teil 1, Tagungsbericht des dritten Internationalen Kolloquiums 1993, S. 379–393
- [2] Hauenschield, C.; Knöchel, R.; Menke, F.; Leschnik, W., *Das dielektrische Verhalten von mineralischen Baustoffen zwischen 1 MHz und 4 GHz*, Feuchtetag '95 am 29. September in Berlin, BAM, Berlin 1995, S. 190–199
- [3] Blindow, N.; Richter, Th.; Petzold, H., *Georadar in Geophysik*; Hsg: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G.; BGR; Springer; Berlin, Heidelberg; 1997; S. 369ff.
- [4] Maierhofer, Ch; Brehmeier-Flick, B. Scharich, D., *Bestimmung des Feuchte- und Salzgehaltes mit ultrakurzen Mikrowellenimpulsen*, in: Tagungsband: Feuchtetag '95 am 29. September 1995 in Berlin, S. 27–37
- [5] Blindow, N.; Richter, Th.; Petzold, H., *Georadar in Geophysik*; Hsg: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G.; BGR; Springer; Berlin, Heidelberg; 1997; S. 374
- [6] Blindow, N.; Richter, Th.; Petzold, H., *Georadar in Geophysik*; Hsg: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G.; BGR; Springer; Berlin, Heidelberg; 1997; S. 369

- [7] Leschnik, W.; Schlemm, U., *Measurement of the Permittivity of Building Materials at 2,45GHz in Dependence on Moisture Content, Salt Content, and Temperature*, Proceedings of the 5. International Conference on „ElectromagneticWave Interaction eith Water and Moist Substances“ in Weimar 13.-16. May 2001, S. 274-281