

Kristina Terheiden

Feuchte- und Salztransport

**Charakterisierung der Interaktion zwischen
Porenfluid und porösem Bauwerkstoff**



Cuvillier Verlag Göttingen

**Feuchte- und Salztransport - Charakterisierung der Interaktion
zwischen Porenfluid und porösem Bauwerkstoff**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Kristina Terheiden

geb. am 01.02.74 in Offenbach/M.

Weimar 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2007

Zugl.: Weimar, Univ., Diss., 2007

978-3-86727-455-5

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2007

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2007

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-455-5

Kurzfassung

Das Ziel der Arbeit besteht darin, den Transport von Schadsalzen sowie deren Einfluss auf die in Bauwerkstoffen stattfindenden Feuchtetransportprozesse zu analysieren und zu quantifizieren. Die Einflüsse des Salzes auf Feuchtetransportprozesse werden für Befeuchtung, Trocknung und Dichtegradien charakterisiert. Ein wesentlicher Bestandteil der Charakterisierung diffusiver Ionentransportprozesse erfolgt, gestützt durch die Entwicklung von Messmethoden, zur Ermittlung von effektiven Diffusionskoeffizienten und Porenkennwerten. Bei der Modellierung von Ionendifusionsprozessen wird der Einfluss aus Porenmorphologie, Art und Konzentration der Porenlösung, Porensättigung, Temperatur sowie aus Kontaktbedingungen berücksichtigt. Für die numerische Simulation von Diffusionsprozessen in Mehrschichtsystemen und die Identifikation von Transportparametern wurde ein Programmsystem entwickelt, das zur Analyse und Optimierung von Transportprozessen und experimentellen Bedingungen eingesetzt werden kann. Die entwickelten Modelle und Methoden werden anhand zahlreicher experimenteller Untersuchungen verifiziert bzw. angewendet. Beispielhaft wurde für den Anwendungsfall Kompressenentsalzung der praktische Einsatz demonstriert. Die Effizienz dieser Verfahren konnte wesentlich gesteigert werden, da zugrundeliegende Transportmechanismen und zielführende Randbedingungen genauer spezifiziert wurden.

Abstract

The objective is the analysis and description of salt transport and influences of salt on the moisture transport in building materials. The influence of salts on the moisture transport is investigated in cases of wetting, drying and density gradients. To characterise the ion transport in building materials new methods for measuring transport and pore system properties are developed. The modelling of the ion diffusion considers the influence of the pore system, the kind and concentration of the pore solution, the pore-fluid content, the temperature and the contact conditions of materials on this process. The development of the program SPID enables the simulation and parameter identification of diffusive transport processes in multi-layered systems of building materials. It supports the prediction and optimisation of transport processes and experimental investigations. The extended theoretical background resulting in new models and methods is applied successfully on practical applications. Therefore the efficiency of restoration methods can be improved.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Problemübersicht.....	9
1.2	Einordnung und Zielstellung der Arbeit.....	10
2	Grundlagen des Eintrags und Transportes von Feuchte und Schadsalzen in Bauwerken bzw. Bauwerkstoffen.....	13
2.1	Eintrag, Transport und Wirkung von Feuchte und Schadsalzen im Bauwerk	13
2.2	Revitalisierungsmaßnahmen feuchte- und salzbelasteter Bauteile bzw. Bauwerke	15
2.2.1	Schadsalzreduzierung durch Sanierputzsysteme	16
2.2.2	Schadsalzreduzierung durch Opferputze.....	17
2.2.3	Schadsalzreduzierung durch Kompressen	17
2.2.4	Elektrochemische Schadsalzreduzierung	18
2.3	Möglichkeiten der Vorhersage von Schädigungsprozessen bzw. Revitalisierungsmaßnahmen	18
3	Charakteristische Kennwerte der Porenmorphologie von Bauwerkstoffen.....	19
3.1	Geometrische Modellierung des Porenraumes.....	19
3.2	Messverfahren zur Charakterisierung des Porenraumes.....	19
4	Mathematische Beschreibung des Transportes und der Speicherung von Feuchte und Salz in porösen Bauwerkstoffen.....	25
4.1	Allgemeines	25
4.2	Ausgewählte Ansätze zur Modellierung und Simulation von Transport- und Speicherprozessen in porösen Bauwerkstoffen	29
4.2.1	Feuchte- und Wärmetransport (Kießl)	29
4.2.2	Feuchte- und Wärmetransport (Künzel).....	31
4.2.3	Feuchte-, Luft-, Salz- und Wärmetransport (Grunewald).....	32
4.2.4	Diskussion	36
5	Modellierung und experimentelle Verfahren zur Bestimmung der Speicher- und Transportfunktionen von Feuchte und Salz	37
5.1	Feuchtespeicherung	37
5.2	Feuchtetransport.....	37
5.2.1	Dampftransport.....	38
5.2.2	Flüssigkeitstransport.....	39
5.3	Salzspeicherung	43
5.4	Salzlösungstransport	44
5.5	Salzionentransport.....	45
5.5.1	Ionendiffusion in freier Lösung.....	46
5.5.2	Diffusion in Baustoffen bzw. Bauwerkstoffen.....	49
5.5.3	Messmethoden zur Ermittlung von Diffusionskoeffizienten.....	51
5.6	Parameteridentifikation für den Einfluss von Grenzschichten auf den Feuchte- und Salztransport	57
6	Charakterisierung der verwendeten Bauwerkstoffe	59
6.1	Beschreibung der verwendeten Bauwerkstoffe.....	59
6.1.1	Sandsteine.....	59

6.1.2	Ziegel	62
6.1.3	Kompressen.....	63
6.1.4	Modellwerkstoff Glasfilterplatten	63
6.2	Bestimmung der Porenstrukturkennwerte	64
6.2.1	Porosität.....	64
6.2.2	Porenradienverteilung	65
6.2.3	Innere Oberfläche	67
7	Charakterisierung der Advektion	69
7.1	Flüssigkeitstransport infolge Befeuchtung.....	69
7.1.1	Verwendetes Mess- und Auswerteverfahren	69
7.1.2	Experimentelle Untersuchungen	70
7.1.3	Auswertung	71
7.2	Flüssigkeitstransport infolge Trocknung.....	75
7.2.1	Experimentelle Untersuchungen	75
7.2.2	Modell des Trocknungsverlaufes	75
7.2.3	Messtechnisch getrennte Erfassung des flüssigen und dampfförmigen Wasser- und Lösungstransportes	77
7.2.4	Einfluss unterschiedlicher Anfangs- und Randbedingungen auf den Trocknungsverlauf	80
7.2.5	Quantitative Beschreibung des Anteils des flüssigen und dampfförmigen Transportes am Gesamtfeuchtetransport.....	83
7.3	Flüssigkeitstransport infolge von Dichtegradienten	88
7.3.1	Abhängigkeit von der Porenmorphologie	88
7.3.2	Abhängigkeit von der Richtung des Dichtegradienten bezüglich des Schwerfeldes	89
7.3.3	Experimentelle Untersuchungen	90
8	Charakterisierung der Diffusion	95
8.1	Ausdiffusion	95
8.1.1	Experimentelle Anordnung	95
8.1.2	Auswertung der Experimente zur Bestimmung von effektiven Diffusionskoeffizienten	95
8.2	2-Scheiben-Anordnung	99
8.2.1	Experimentelle Anordnung und Durchführung	99
8.2.2	Anwendungsbeispiel.....	100
8.3	Impedanzspektroskopie	101
8.3.1	Experimentelle Anordnung und Durchführung	101
8.3.2	Überprüfung der Messanordnung	103
8.3.3	Bestimmung des Cole-Cole-Exponenten und der inneren Oberfläche	104
8.3.4	Bestimmung des Formationsfaktors	107
8.4	Ergebnisse und Diskussion der Untersuchung des diffusiven Ionentransportes.....	110
8.4.1	Einfluss der Bauwerkstoffe auf die Diffusion.....	110
8.4.2	Einfluss der Konzentration der Porenlösung auf die Diffusion	111
8.4.3	Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Diffusion	114
8.4.4	Einfluss der Temperatur auf die Diffusion	120
8.4.5	Modell zur Beschreibung der Ionendiffusion in porösen Bauwerkstoffen	122
8.4.6	Einfluss von Grenzflächen auf die Diffusion.....	123

9	Numerische Simulation und Parameteridentifikation von diffusiven Transportprozessen	129
9.1	Grundlagen des Programms für die Simulation und Parameteridentifikation von Ionen-Diffusionsprozessen (SPID)	129
9.2	Simulation mit SPID	132
9.3	Parameteridentifikation mit SPID	134
10	Experimentelle Untersuchungen zum revitalisierenden Ionentransport in Bauwerkstoffen im Anwendungsfall der Kompressenentsalzung	139
10.1	Dauernasse Komresse	140
10.1.1	Experimentelle Versuchsdurchführung	140
10.1.2	Ergebnisse	140
10.2	Abtrocknende Komresse	141
10.2.1	Experimentelle Versuchsdurchführung	141
10.2.2	Bestimmung der Konzentration der Porenlösung	142
10.2.3	Bestimmung des Schadsalzaustrages über die Standzeit der Komresse	143
10.3	Vergleichende Untersuchungen des dauernassen und abtrocknenden Kompressenauftrags	144
10.4	Einfluss des Kompressenmaterials	146
10.4.1	Experimentelle Untersuchungen zum dauernassen Kompressenauftrag	147
10.4.2	Experimentelle Untersuchungen zum abtrocknenden Kompressenauftrag	148
11	Zusammenfassung	153
12	Literaturverzeichnis	159

1 Einleitung

1.1 Problemübersicht

In Deutschland entstehen erhebliche Schäden an Neubauten und vor allem an bereits sanierten oder modernisierten Gebäuden. Dieses spiegelt sich in den von der Bundesregierung vorgelegten Bauschadensberichten von 1988 [1] und 1996 [2] wieder. Deutlich zeigt sich im Bauschadensbericht von 1996, dass ein erheblicher Anteil der für die Sanierung von vermeidbaren Bauschäden aufzubringende Kosten im Jahre 1992 (7,6 Mrd. DM) auf die Behebung vorangegangener schadhafter Sanierungs- bzw. Modernisierungsarbeiten (3,3 Mrd. DM) zurückzuführen ist. „Bauschäden bei Sanierungs- und Instandsetzungsarbeiten stellen somit ein nicht unerhebliches volkswirtschaftliches Problem dar“ [2]. Ein großer Anteil dieser Schäden wird dabei im Allgemeinen durch die Anwesenheit von Feuchte und in Kombination mit Schadsalzen verursacht. Dies kann zum Teil auf eine mangelnde Kontrolle und Qualität bei der Ausführung zurückzuführen sein. Vielmehr erscheint es jedoch wichtig, dass für eine nachhaltige Sanierung und Instandhaltung der Bausubstanz ein fundiertes Grundverständnis für die Komplexität der Interaktion zwischen den Bauwerkstoffen mit ihren mannigfaltigen chemischen Zusammensetzungen untereinander und mit den Umgebungsbedingungen vorliegt.

Der Eintrag von Feuchte und Schadstoffen aus der Umwelt in ein Bauwerk birgt bei wechselnden klimatischen Randbedingungen ein hohes Gefährdungspotential in sich. Durch die Anwesenheit von Feuchte können Ionen aus den unterschiedlichen verbauten Bauwerkstoffen herausgelöst werden. Des weiteren können Schadsalzionen auch von außen mit der Feuchte (mangelhafte Abdichtung im Dach-, Boden- bzw. Sockelbereich) eingetragen werden. Durch die Aufnahme von Feuchtigkeit und Schadstoffen sowie des Wechsels zwischen einsetzender Trocknung und wiederkehrender Befeuchtung kommt es zur Gradientenbildung von Feuchte und Salzen im Bauteil bzw. Bauwerk. Die Gradienten initiieren dann Feuchte- und Schadsalztransportprozesse. Der Transport, vom lateinischen transportare (hin-) überbringen hergeleitet, bedeutet in diesem Fall das Überbringen von Stoffen (z.B. Feuchte, Salz) und Energie von einem Ort zu einem anderen gemäß der initiierenden Gradienten. Wichtige Merkmale zur Charakterisierung der Transportprozesse sind dabei die Richtung und die Geschwindigkeit. Durch den Einfluss nicht isotroper, inhomogener und chemisch nicht inerter Bauwerkstoffe auf diese Transportprozesse müssen gleichzeitig z.B. Anisotropien der Transportkennwerte, Einflüsse von Grenzflächen und Wechselwirkungen zwischen der Porenlösung und den Porenwänden berücksichtigt werden. Der gezielte Einsatz des

Transportes, initiiert durch Gradienten, kann aber auch zur Revitalisierung durch z.B. Kompressenentsalzungen genutzt werden. Bei der Kompressenentsalzung können durch das temporäre Aufbringen einer salzfreien „Putzschicht“ und der jeweils gewählten Anwendungsform `dauernasse` oder `abtrocknende` Kompressen gezielt Gradienten erzeugt werden, welche zu einer Schadsalzreduzierung im belasteten Bauteil führen. Dies erfolgt in der Regel jedoch noch nicht mit einem nachhaltig zufrieden stellenden Ergebnis [2], da grundlegende Transportmechanismen und zielführende Randbedingungen nicht hinreichend geklärt sind. Das Potential einer wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit dieser Thematik wurde erkannt und spiegelt sich in zahlreichen Forschungsprogrammen und Richtlinien wieder (z.B. SFB 524: „Werkstoffe und Konstruktion zur Revitalisierung von Bauwerken“ (DFG), Schwerpunktprogramm SPP 1122: „Vorhersage des zeitlichen Verlaufes von physikalisch-chemischen Schädigungsprozessen von mineralischen Werkstoffen“ (DFG), WTA-Merkblatt 3-13-01/D: „Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen“).

1.2 Einordnung und Zielstellung der Arbeit

Die Vielfalt der in der Praxis auftretenden Schadensfälle durch Feuchte- und Schadsalzeinwirkungen an Denkmälern und Neubauten ist bereits über Jahre in der Literatur dokumentiert z.B. [3,4,5,6]. Viele Untersuchungen zur Sanierung von Feuchte- und Salzschäden wurden als Fallstudien an einzelnen Objekten bzw. Bauwerken durchgeführt. Sie geben Anhaltspunkte und Interpretationsmöglichkeiten der dokumentierten Untersuchungsergebnisse. Verallgemeinernde Aussagen für andersartig gelagerte Schadensfälle lassen sich daraus bislang jedoch nur schwer ableiten.

Eine andere Herangehensweise über die theoretische Beschreibung der zur Schädigung führenden Transport- und Reaktionsprozesse in Bauwerkstoffen wurde sowohl über die Beschreibung von Teilprozessen als auch der Verknüpfung von Teilprozessen zum Gegenstand zahlreicher Arbeiten [7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18]. Die Ansätze enthalten im Allgemeinen unterschiedliche Betrachtungsschwerpunkte und daraus resultierend auch leicht differierende Anwendungsgebiete. Dabei liegen die Schwerpunkte in Verwendung z.B. der folgenden Transportmodelle:

- Modelle, die hauptsächlich den Wassertransport in porösen Bauwerkstoffen beschreiben, sind in Arbeiten von z.B. Kießl [8], Krus [9], Künzel [10], Pel [11], Bednar [12] angegeben. Die Beschreibung des Salztransportes wäre mit diesen Modellen nicht möglich.

- Andere Modelle berücksichtigen den Salztransport hauptsächlich als sogenannten „Huckepack-Transport“ z.B. in Lunk [13], Volkwein [14], d.h. sie berücksichtigen den Transport der Salzionen mit dem Transportmittel Porenlösung.
- In einigen Arbeiten wird der Salzeinfluss auf Teiltransportprozesse untersucht und berücksichtigt [15, 16, 17, 18, 19], wobei die Konzentrations- und Feuchtigkeitsabhängigkeit bei der Bestimmung der diffusiven Transportkennwerte keine oder nur ansatzweise Berücksichtigung finden.

Die Genauigkeit der Vorhersage der Transportprozesse hängt dabei jedoch auch entscheidend von der Genauigkeit der experimentell zu bestimmenden Transportparameter ab. Entscheidend ist dafür die richtige Anwendung der Messmethode und deren Genauigkeit.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Transport der Schadsalze sowie deren Einfluss auf die im Bauwerk stattfindenden Feuchttransportprozesse zu analysieren und quantifizieren. Die Bearbeitung erfolgte dabei in fünf Schwerpunkten:

1. Beschreibung und Modellierung des Salztransports in porösen Bauwerkstoffen. Es wird der Salztransport in Abhängigkeit der Konzentration, der Temperatur und der Porensättigung untersucht. Der Einfluss der porenmorphologischen Vielfalt der Bauwerkstoffe auf die Salztransportprozesse wird anhand einer geeigneten Auswahl bundesweit üblicher Sandsteine und handelsüblicher Ziegel untersucht.
2. Charakterisierung und Quantifizierung des Salzeinflusses auf Feuchttransportprozesse. Es wird der Einfluss verschiedener Salze auf die Feuchttransportprozesse im Bauwerkstoff untersucht. Neben dem Einfluss der Veränderung der klimatischen Randbedingungen wird insbesondere auch der Einfluss der Porenmorphologie untersucht.
3. Bewertung und Entwicklung geeigneter Messmethoden zur Ermittlung von Transportkoeffizienten. Schwerpunkte bilden hierbei die experimentelle Anordnung, die Auswertung und die Detektion und Eliminierung möglicher Fehlerquellen.
4. Entwicklung einer Simulationssoftware zur Parameteridentifikation in Materialien, Materialkombinationen und Kontaktflächen. Für die Diffusion wird zur Verifikation experimenteller Versuchsanordnungen und zur Simulation sanierungstechnischer Fragestellungen im Labormaßstab die Software SPID (Simulation und Parameteridentifikation von Ionen-Diffusionsprozessen) entwickelt.

5. Die Optimierung einer Sanierungsmaßnahme, z.B. der Kompressenentsalzung. Das Erreichen eines effektiven und nachhaltigen Sanierungserfolges erfordert die Wahl geeigneter (Sanierungs-) Materialien und geeigneter verfahrenstechnischer Randbedingungen.

Die Anwendung wird mit zahlreichen Beispielen demonstriert und deren Wirksamkeit an experimentellen Untersuchungen vorrangig anhand der Kompressenentsalzung als schonendes Verfahren zur Schadsalzreduzierung in Bauwerkstoffen nachgewiesen.

2 Grundlagen des Eintrags und Transportes von Feuchte und Schadsalzen in Bauwerken bzw. Bauwerkstoffen

2.1 Eintrag, Transport und Wirkung von Feuchte und Schadsalzen im Bauwerk

Die Betrachtung des Feuchte- und Salzeintrages in ein Bauwerk ist besonders vor dem Hintergrund der möglichen Schädigung von essentieller Bedeutung. Dabei besteht das Schädigungspotenzial gerade in der Kombination der beiden Einflüsse von Feuchte und Schadsalz.

Für den Eintrag der Feuchte sind häufig Mängel in der Bauausführung verantwortlich. Dies können z.B. fehlende Dachüberstände oder mangelhafte Dachentwässerungssysteme sein. Aber auch fehlende Abdichtungen oder Drainagen im erdnahen Bereich ermöglichen das Eindringen der anstehenden Feuchte in das Bauwerk. Für die Aufnahme der Feuchtigkeit aus der Luft sind im Allgemeinen Kondensations- und Adsorptionsvorgänge verantwortlich.

Der Eintrag von Schadsalzen kann z.B. mit dem Wasser erfolgen, wobei das Salz meistens in gelöster Form mittransportiert wird. Gerade bei der Aufnahme des Salzes durch die Feuchtigkeit im Bodenbereich gibt es eine Vielzahl von möglichen Salzquellen z.B. Stallungen, Friedhöfe, Düngemittellager oder Streusalze im Bereich von Straßen. Es besteht auch die Möglichkeit, dass Schadstoffe aus der Luft durch die Feuchtigkeit gelöst oder mit dem Regen in gelöster Form in den Bauwerkstoff gelangen. Eine weitere potentielle Quelle für Schadsalze sind die Bauwerkstoffe selbst. Durch Feuchte im Bauwerkstoff ist es möglich Ionen herauszulösen. Diese können dann direkt durch Kombination mit anderen Ionen der Porenlösung oder nach dem Transport an eine andere Stelle im Bauwerk eine schädigende Wirkung hervorrufen.

Der Feuchte- und Salztransport im Bauwerk ist häufig durch eine Kombination bzw. Überlagerung verschiedener Transportprozesse gekennzeichnet. Die Möglichkeiten der gegenseitigen Beeinflussung sind dabei sehr vielfältig. Die Dominanz einzelner Transportmechanismen hängt dabei stark von den Bauwerkstoffeigenschaften, dem Zusammenwirken unterschiedlicher Materialien und den Anfangs- und Randbedingungen (z.B. Klima, Porensättigung, etc.) ab. Für die Untersuchungen der grundlegenden Abhängigkeiten ist es somit wichtig, einzelne Transportprozesse zu separieren.

Im Rahmen dieser Arbeit stehen die im Folgenden dargestellten Transportprozesse im Vordergrund der Untersuchungen:

- Diffusion als Ionentransportprozess infolge Konzentrationsgradienten
- Advektion als Feuchte- bzw. Lösungstransport infolge Befeuchtung und Trocknung
- Konvektion als Spezialfall der Advektion infolge Dichtegradienten.

Eine Dominanz von Advektion, Konvektion oder Diffusion (Ionendiffusion und Dampfdiffusion) kann dabei durch die unterschiedlichen Transportgeschwindigkeiten mit Hilfe der Pecletzahl Pe ermittelt werden [19, 20]. Analog kann dies auch für den Wärmetransport erfolgen.

$$Pe = \frac{vL}{D} \quad (2-1)$$

L	charakteristischer Längenmaßstab für den Transportprozeß	[m]
D	Diffusionskoeffizient	[m ² /s]
v	Geschwindigkeit	[m/s]

Bei $Pe > 1$ dominiert definitionsgemäß die Advektion, bei $Pe < 1$ die Diffusion.

Zur Erfassung der Auswirkungen dieser Prozesse auf den Gesamttransport ist neben der Modellierung der einzelnen Transportprozesse auch die Bereitstellung von Messmethoden zur Bestimmung der Transportkennwerte notwendig. Durch die Vielzahl der zuvor beschriebenen Möglichkeiten des Eintrages und Transportes von Feuchte- und Schadsalz kommt es immer wieder unter häufig zyklisch variierenden klimatischen Umgebungsbedingungen (große Luftfeuchte- und Temperaturdifferenzen) zu Schädigungen (Abb. 2-1). Eine wechselnde Trocknung und Befeuchtung von Bauteilen kann zu wiederkehrenden Kristallisations- und Lösungsprozessen im Bauwerkstoff und damit zu seiner Zerstörung führen. Die Temperaturen an z.B. einer Außenwand können dabei im Bereich von ca. -15 °C - +50 °C liegen. Die Luftfeuchte an einem Gebäude verändert sich im Bereich von ca. 20%-100% r.F..

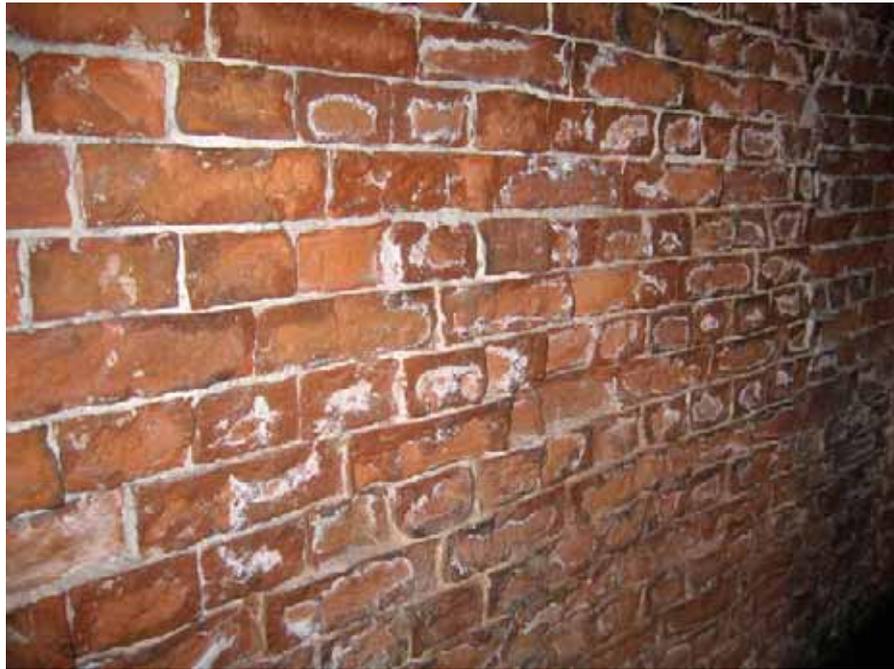


Abb. 2-1: Feuchte- und salzbelastete Wand

Die Schädigungen können dabei von einer meist anfänglich nur optischen Beeinträchtigung bis hin zur bauteil- bzw. bauwerkzerstörenden Wirkung führen. Häufig in der Praxis vorgefundenen bauschädliche Salze sind z.B. Natriumsulfat, Natriumchlorid, Calciumsulfat, Magnesiumsulfat und Calciumnitrat [26]. Um Schäden durch Salze bzw. ihren ursprünglichen Gradienten, welche Transportprozesse initiieren, entgegenzuwirken, muss besonders der Feuchteschutz beim Errichten der Gebäude hinreichend bemessen sein oder bei bereits entstandenen Schäden entsprechend nachgerüstet werden. Die Reduzierung von Schadsalzen kann dann nach der Behebung der Schadensursache durch geeignete Sanierungsverfahren, z.B. der Kompressenentsalzung, erfolgen.

2.2 Revitalisierungsmaßnahmen feuchte- und salzbelasteter Bauteile bzw. Bauwerke

Für eine nachhaltige Revitalisierung feuchte- und salzbelasteter Bauwerke ist die Analyse und Behebung der Ursache der erste notwendige Schritt, bevor weitere Sanierungsmaßnahmen folgen können. Eine dieser Sanierungsmaßnahmen ist die Schadsalzreduzierung, die schwerpunktmäßig in dieser Arbeit behandelt wird. Der Materialaustausch stellt eine Variante der Methoden zur Schadsalzreduzierung dar. Dabei werden die salzbelastete Materialteile ausgetauscht. Bei tragenden Bauteilen oder größeren Flächen bereitet diese Methode jedoch Schwierigkeiten. Weiterhin kann diese Methode auch zu Problemen bei denkmalgeschützten Gebäuden oder Bauteilen führen, da meistens keine oder nur geringfügige

Änderungen am Bauwerk vorgenommen werden dürfen. Eine grundsätzlich andere Herangehensweise liegt den Verfahren zur Schadsalzreduzierung durch gezielt initiierte Salztransportprozesse zugrunde. Dabei wird im Allgemeinen zwischen zwei Salztransportprozessen unterschieden. Zum einen erfolgt der Transport der Salzionen mit der Flüssigkeit (Advektion) und zum anderen infolge Eigenbewegung (Diffusion).

In der Praxis sind eine Vielzahl unterschiedlicher Entsalzungsverfahren bekannt. Eine Auswahl wird in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt. Die erste Gruppe von Verfahren (Abschnitte 2.2.1-2.2.3) hat den grundsätzlichen Ansatz gemein, dass zur Schadsalzreduzierung auf den salzbelasteten Untergrund eine unbelastete Entsalzungsschicht aufgebracht wird. Die Verfahren unterscheiden sich im Wesentlichen durch die vorgesehenen Standzeiten, Funktionsweisen und die stoffliche Zusammensetzung. Eine zweite Gruppe bilden die elektrochemischen Verfahren, in denen der Salztransport durch ein elektrisches Feld initiiert werden soll.

2.2.1 Schadsalzreduzierung durch Sanierputzsysteme

Die grundsätzliche Wirkungsweise der Sanierputzsysteme basiert auf der Schaffung eines großen Porenraumes in der Verdunstungszone des Putzes, so dass einer Schädigung durch das Wechselspiel zwischen Lösen und Auskristallisieren, Hydratation und Dehydratation im Porenraum entgegengewirkt wird. Häufig sind die Sanierputzsysteme zweischichtig aufgebaut. Die untere Schicht soll dabei kapillar aktiv für den Abtransport der schadsalzbelasteten Porenlösung dienen. Die obere Putzschicht hat die Funktion, bei hoher Porosität eine niedrige kapillare Leitfähigkeit zu besitzen, so dass eine Einlagerung der Schadsalze stattfinden kann, ohne Schädigungen hervorzurufen. Die Sanierputze dienen somit eher der Bewahrung einer visuell unzerstörten Oberfläche als der gezielten Schadsalzreduzierung des Mauerwerks. Dieser Hintergrund spiegelt sich auch in den Applikationsdauern wieder. Ein Sanierputzsystem ist darauf ausgelegt, mehrere Jahre eine Fassade optisch zerstörungsfrei zu halten. Bedingt durch die lange Standzeit dieser Systeme, in der sie vielen wechselnden klimatischen Randbedingungen ausgesetzt sind, kann kein dominanter Transportprozess ausgewiesen werden. Nähere Angaben zur Anwendung, Charakterisierung und Verarbeitung von Sanierputzen hat auch die Wissenschaftlich - Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) herausgegeben [22].

2.2.2 Schadsalzreduzierung durch Opferputze

Die Charakteristik der Opferputze wird meist durch die Funktion, die Standzeit und die Zusammensetzung des Putzes gebildet. Bei Opferputzen handelt es sich daher häufig um hydraulisch bzw. carbonatisch gebundene Putzmörtel [23], welche neben der Schadsalzreduzierung auch eine gestalterische Funktion besitzen. Planmäßig werden diese Putze jedoch nach dem Eindringen von Schadsalzen wieder entfernt. Durch die begrenzte Anwendungsdauer bei gleichzeitiger Schadsalzreduzierung stellt die Anwendung eines Opferputzes im Gegensatz zum Sanierputzsystem eher eine Sanierungsmaßnahme dar. Bei der Anwendung eines Opferputzes kann man davon ausgehen, dass der revitalisierende Transportprozess, bedingt durch die Technologie des Verfahrens, in der Regel von der Advektion dominiert wird.

2.2.3 Schadsalzreduzierung durch Kompressen

Kompressen dienen vorrangig der Schadsalzreduzierung in Bauwerkstoffen und besitzen keine gestalterische Funktion. Ihre Anwendung ist zerstörungsarm und auf die Dauer einer effektiven Schadsalzreduzierung begrenzt. Gewöhnliche Auftragstärken sind 2-5cm. Die Wirkungsweise der Komresse hängt von der gewählten Verfahrensweise ab. In der Baupraxis werden im Allgemeinen zwei Verfahrensweisen, die dauernasse und die abtrocknende Komresse, angewendet [24]. Bei der dauernassen Kompressenentsalzung wird auf den schadsalzbelasteten Untergrund eine Komresse aufgetragen, welche während der gesamten Standzeit nass gehalten wird. Um die Schadsalzreduzierung effektiv zu gestalten, sollte man dieses Verfahren nur anwenden, wenn der Untergrund feuchtegesättigt ist. Da sich auf diese Weise kein Feuchtegradient ausbilden kann, ist der dominante Transportprozess die Diffusion. Bei der Schadsalzreduzierung mit einer abtrocknenden Komresse wird auf den salzbelasteten Untergrund eine Komresse aufgetragen, welche während der Applikationsdauer abtrocknet. Durch das Abtrocknen der Kompressen können sich im Untergrund und der Komresse Feuchtegradienten ausbilden. Diese Gradienten führen im Zusammenspiel mit den Umgebungsbedingungen zum advektiven Transportprozess. Die Diffusion von Salzionen tritt unter realen Bedingungen meist parallel dazu auf. In der Regel dominiert jedoch die Advektion als grundsätzlich schnellerer Transportprozess. Ein Spezialfall bei der Kompressenentsalzung ist der konvektive Salzaustrag. Ein Anwendungsbeispiel für diesen Transport ist der Salzlösungsaustrag durch Druckgradienten. Dabei wird auf den Untergrund oder das Objekt ein Druckgradient aufgebracht, welcher den Flüssigkeitstransport hervorruft. Häufig werden die heraus-

transportierten Schadsalzionen durch eine Kompresse aufgefangen und mit dieser von dem betreffenden Objekt entfernt [25].

2.2.4 Elektrochemische Schadsalzreduzierung

Bei den elektrochemischen Entsalzungsverfahren soll der Salzgehalt in den schadsalzbelasteten Untergründen durch das Anlegen eines elektrischen Feldes reduziert werden. Dabei wird eine gegenseitige Beeinflussung von Schadsalz- und Feuchtetransport nicht ausgeschlossen. Die in der Praxis gängigen Verfahren sind das AET (Aktive Entsalzung und Trocknung)-, ETB (Entsalzen + Trocknen = Bausanieren)- und Kerasan-Verfahren. Bei allen Verfahren werden die Anoden meist stabförmig in das Mauerwerk eingebracht, während die Kathode in den Baugrund eingeschlagen wird. Für diese Schaltungen wird üblicherweise Gleichstrom verwendet. Die Spannungen betragen dabei bis zu 60 V [26]. Die Prozesse, welche durch diese Methoden im zu entsalzenden Untergrund hervorgerufen werden, werden unterschiedlich diskutiert. Erweiterte Aussagen zur Effektivität dieser Verfahren für eine gezielte Schadsalzreduzierung sind notwendig.

2.3 Möglichkeiten der Vorhersage von Schädigungsprozessen bzw. Revitalisierungsmaßnahmen

Für eine möglichst genaue Prognose des Verlaufes von Schädigungs- bzw. Revitalisierungsprozessen in Bauteilen bzw. Bauwerken ist die Berechnung stattfindender Speicher- und Transportprozesse von Stoffen und Energie von essentieller Bedeutung. Die Genauigkeit der Vorhersage hängt dabei unmittelbar vom gewählten rechnerischen Ansatz und den gewählten Modellen ab. Bei der Simulation dominanter Prozesse mit wenigen Einflussfaktoren können sicherlich schon vereinfachende Ansätze eine gute Genauigkeit erzielen. Auf einige unterschiedliche in der Literatur gegebene Ansätze zur Berechnung von Speicher- und Transportprozessen von Stoffen und Energie in Bauwerkstoffen, Bauteilen und Bauwerken wird daher noch einmal in Abs. 4.2 eingegangen.

3 Charakteristische Kennwerte der Porenmorphologie von Bauwerkstoffen

Die Ausbildung der Porenmorphologie ist materialspezifisch und hat einen großen Einfluss auf die in einem porösen Medium stattfindenden Speicher- und Transportprozesse. Dabei besitzen sowohl die geometrische Gestalt, der volumenmäßige Anteil der Poren als auch die Art und Ausbildung der spezifischen inneren Oberfläche einen unmittelbaren Einfluss. Zur quantitativen Erfassung dieser charakteristischen Größen werden in der Bauwerkstoffkunde verschiedene direkte oder indirekte Messverfahren verwendet, die in Abs. 3.2 näher vorgestellt werden.

3.1 Geometrische Modellierung des Porenraumes

Zur Analyse von Speicher- und Transportvorgängen in porösen Medien und bei der experimentellen Bestimmung charakteristischer Kennwerte der Porenstruktur wird auf verschiedene Modelle der Porenstruktur zurückgegriffen. Das Ziel der Wahl der Modelle ist die möglichst genaue Annäherung an die reale Porenstruktur.

Eine in der Bauphysik häufig angewendete Modellvorstellung des Porensystems basiert auf einem Bündel von Zylinderkapillaren. Dabei können die Zylinderkapillaren entweder parallel oder seriell angeordnet sein [17, 28, 19, 29]. Eine weitere Modellvorstellung, die aus der Genese der Sedimentgesteine abgeleitet ist, ist die Darstellung des porösen Feststoffgerüsts als Kugelpackung. Es wird davon ausgegangen, dass sich einzelne Bestandteile von Sedimentgesteinen zu einer idealen Kugelpackung verdichtet haben. Die geometrische Struktur der Hauptbestandteile Quarz, Feldspat, Carbonate und gesteinsbildende Minerale wird dabei als nahezu isometrisch angenommen. Durch ihre körnige Form unterschiedlicher Größe können sie somit als Teile einer Kugelpackung fungieren [30]. Eine weitere Möglichkeit zur geometrischen Charakterisierung des Porensystems bietet auch die Beschreibung durch fraktale Modelle [31, 32]. Da in der Geophysik und der Bauphysik viele Reaktionen und Transportvorgänge in unterschiedlichen Skalenbereichen des Porenraumes stattfinden, ist die Beschreibung des Porenraumes durch Volumen- und Oberflächenfraktale sehr vorteilhaft [31, 32, 33].

3.2 Messverfahren zur Charakterisierung des Porenraumes

Zur Charakterisierung der Porenstruktur eines Bauwerkstoffes kommen verschiedene Messverfahren zur Anwendung. Schwerpunkte werden im Folgenden auf die

experimentelle Bestimmung der Porosität und der spezifischen inneren Oberfläche gelegt.

Die Gesamtporosität bezeichnet den volumenmäßigen Anteil des Gesamtporenvolumens am Gesamtvolumen des porösen Körpers. Die Gesamtporosität beinhaltet sowohl die offene als auch die geschlossenen Porosität. Offen und geschlossen bezieht sich dabei auf die Zugänglichkeit dieses Porenraumes durch ein Fluid (gasförmig oder flüssig). Die Messung der Porosität kann mit direkten Messverfahren z.B. Bildanalyse oder auch indirekten Messverfahren z.B. Wasseraufnahme, Quecksilberintrusion erfolgen. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der spezifischen inneren Oberfläche und der Porosität bieten Adsorptionsverfahren. Einige dieser Messverfahren werden im Folgenden kurz beschrieben. Es ist zu berücksichtigen, dass die verwendeten Messverfahren und die daraus abgeleiteten charakteristischen Größen des Porensystems stark maßstabsabhängig sind. Bei den indirekten Verfahren kann das z.B. an der Partikelgröße des Messmediums liegen. Beispiele dafür sind aus der Geodäsie bei der Bestimmung der Länge von Küstenlinien oder Landesgrenzen bekannt [27].

1. Das Gasverdrängungspyknometer ermöglicht die Messung des Volumens von helium-undurchdringbaren Feststoffen oder Festkörpern. Hierbei wird unter einem definierten Druck und einer definierten Temperatur das in ein genormtes Gefäß einströmende Gasvolumen gemessen. Aus dem bekannten Gas- und Gefäßvolumen kann dann das Probenvolumen berechnet werden [34].
2. Bei der Messung einer Probe mit dem Pulverpyknometer kann ebenfalls ein Probenvolumen bestimmt werden. Das Messmedium ist pulverförmig. Mit diesem Verfahren ist es möglich, das Volumen eines porösen Feststoffes, welches von dem Pulver nicht durchdrungen werden kann, zu bestimmen [35]. Aus der Messung dieser unterschiedlichen Volumina mit dem Gasverdrängungspyknometer und dem Pulverpyknometer können die offene, die geschlossene und die Gesamt-Porosität berechnet werden.
3. Eine weitere Methode zur Bestimmung der offenen Porosität eines Bauwerkstoffes ist die Bestimmung des mit Wasser gefüllten Volumens. Dabei wird ein Probekörper durch kapillares Saugen mit Wasser gefüllt. Aus der Masse des aufgenommenen Wassers und der Dichte kann dann das kapillar füllbare Volumen und daraus die kapillar füllbare Porosität bestimmt werden. Weiterhin kann durch Auftriebswägung einer wassergesättigten Probe (Vakuumpenetration) das Volumen des Feststoffgerüsts inklusive geschlossener Poren gemessen werden. Die ermittelte Porosität entspricht dem dem Wasser zugängliche Porenvolumen.

4. Durch die Quecksilber- porosimetrie [36] werden in der Regel Porenradienverteilungen von porösen Feststoffen bestimmt. Bei dieser Methode können auch zusätzliche Informationen z.B. über die Rohdichte, die offene Porosität und die innere Oberfläche gewonnen werden. Da Quecksilber eine nicht benetzende Flüssigkeit ist, muss es unter Druck in das Porensystem eingebracht werden. Der Druck p , welcher aufgebracht werden muss um eine Kapillare zu füllen, ist über die Washburn-Gleichung mit äquivalenten Porenradius r dieser Kapillare, der Oberflächenspannung σ ($\sigma \sim 0,48 \text{ N/m}$) des Quecksilber und dem Randwinkel θ ($\theta \sim 45^\circ$) verbunden.

Washburn-Gleichung:

$$r = \frac{-2\sigma \cos\theta}{p} \quad \frac{3}{2}\pi > \theta > \frac{1}{2}\pi. \quad (3-1)$$

Aus der Menge des verbrauchten Quecksilbers in Korrelation mit dem angelegten Druck wird die Porenradienverteilung eines Bauwerkstoffes ermittelt. Der gemessene Druckbereich umfasst in der Regel 3,5 - 410 MPa. Das entspricht in etwa einem Porenradius von 0,001 - 450 μm . Anhand dieser Überlegungen wird deutlich, dass dieses Messverfahren nur für einen bestimmten Maßstab Gültigkeit besitzt. Es muss jedoch bei der Interpretation der Ergebnisse auch darauf geachtet werden, dass die Druckfestigkeit z.B. eines Ziegel lediglich bei ca. 12 - 25 MPa liegt.

5. Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung der spezifischen inneren Oberfläche stellt das BET (Brunauer, Emmett, Teller) - Verfahren [37] dar. Das Messprinzip beruht auf der Gasadsorption an Feststoffen. Dabei wird aus der Menge des verbrauchten Adsorptivgases die mit einer Adsorbat-Monoschicht bedeckte Oberfläche berechnet. Häufig wird als Adsorptivgas Stickstoff verwendet. Dabei wird die Adsorptionsisotherme aus mehreren Messungen bei unterschiedlichen Drücken ermittelt. Aus der meist als Fünf-Punkt-Messung durchgeführten Adsorptionsisotherme lässt sich die Monoschichtkapazität berechnen. Mit Hilfe dieser und der Kenntnis des Flächenbedarfs des Adsorptivgasmoleküls kann die spezifische innere Oberfläche berechnet werden [37]. Die kleinste mögliche Auflösung liegt bei diesem Verfahren im Bereich der Größe des Stickstoffmoleküls.
6. Ein „direktes“ Messverfahren ist die Bildanalyse. Durch die Erstellung eines digitalen Bildes der Probe kann dieses mit geeigneten Programmen bezüglich des Porenraumes ausgewertet werden. Mit Hilfe verschiedener Software-Module besteht dabei die Möglichkeit, den Porenraum zu vermessen oder be-

sondere Merkmale statistisch auszuwerten. Dieses Messverfahren ist von dem Auflösungsvermögen abhängig, das durch die Kamera und das Mikroskop bestimmt wird.

Bedingt durch die unterschiedlichen Wechselwirkungen der verschiedenen Messmedien im Kontakt mit dem Feststoffgerüst sind alle indirekten Messverfahren maßstabsabhängig. Um dieser Maßstabsabhängigkeit entgegenzuwirken gibt es in der Literatur Ansätze zur Modellierung des Porenraumes mit Hilfe fraktaler Betrachtungsweisen [27]. Schon 1961 erkannte Richardson bei der experimentellen Längenmessung unterschiedlicher Landesgrenzen und Küstenlinien eine Maßstabsabhängigkeit seiner Messwerte [27, 38]. Bei der doppelt-logarithmischen Auftragung der Länge der Küstenlinien über die verwendete Eichlänge erhält Richardson Geraden mit einer negativen Steigung.

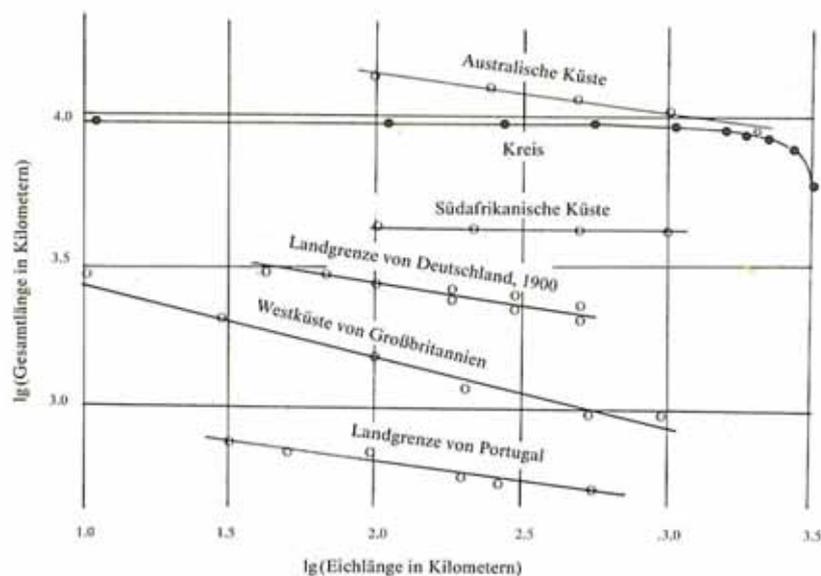


Abb. 3-1: Die empirischen Daten von Richardson über die Zuwachsraten der Länge von Küstenlinien entnommen aus [27]; Original in [38]

Mandelbrot interpretiert die Küstenlinien als fraktale Kurven und somit die Steigung als fraktale Dimension. Dieser Sachverhalt lässt sich anhand von Kurven leichter zugänglich darstellen Abb. 3-2.

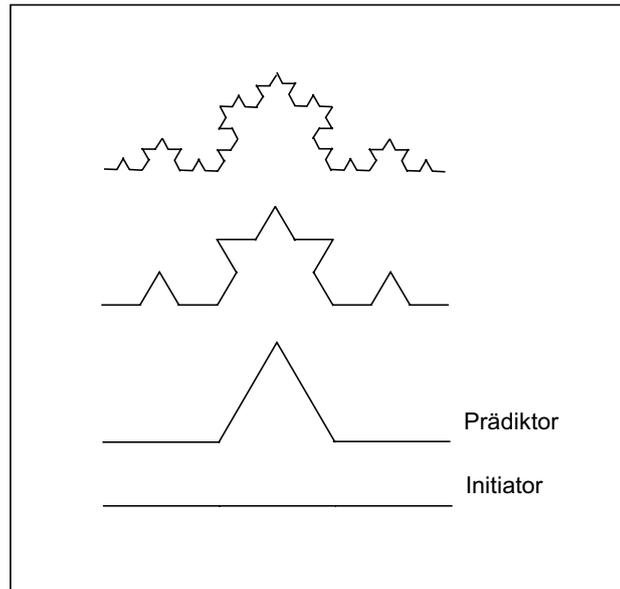


Abb. 3-2: Koch Kurve

Die Koch-Kurve wird aus einem Initiator und Prädiktor generiert. Der Initiator besteht aus einer Linie aus mehreren Segmenten. Der Prädiktor wird durch ein Polygon mehrerer verbundener Liniensegmenten zusammengesetzt. Bei dem Initiator wird nun begonnen jedes Liniensegment durch eine verkleinerte Kopie des Prädiktors zu ersetzen. Diese Vorgehensweise wird danach für jedes neu entstandenen Liniensegment wiederholt. Die Länge dieser Koch-Kurve kann in Abhängigkeit des Maßstabs ε wie folgt berechnet werden.

$$L(\varepsilon) = \varepsilon^{1-D} \quad (3-2)$$

Die fraktale Dimension D lässt sich wie bereits erläutert aus der Steigung der doppelt-logarithmischen Auftragung der gemessenen Länge über die Verfeinerung (Maßstab) ermitteln. Im Fall von selbstähnlichen Figuren kann die fraktale Dimension als synonym der Ähnlichkeitsdimension gesehen werden [27]. Die Ähnlichkeitsdimension kann dabei wie folgt aus der Anzahl der Liniensegmenten N und dem Verfeinerungsfaktor r (N) berechnet werden [27]

$$D = \frac{-\log N}{\log r(N)} = \frac{-\log N}{\log \frac{1}{r}} \quad (3-3)$$

Dabei kann zwischen der gewöhnlichen und fraktalen Ähnlichkeitsdimension unterschieden werden. Beispiel dafür ist die Verfeinerung eines Quaders im Gegensatz zur Koch-Kurve.

4 Mathematische Beschreibung des Transportes und der Speicherung von Feuchte und Salz in porösen Bauwerkstoffen

4.1 Allgemeines

Um rechnerische Voraussagen für den Transport und die Speicherung von Feuchte und Salz in porösen Systemen treffen zu können, sind verschiedene Ansätze bekannt, die oftmals aus der Hydrogeologie übertragen worden sind. Unter Verwendung von Kontinuumsmodellen, welche von einer Einphasigkeit der Materie ausgehen, können grundlegende Bilanzgleichungen auf mikroskopischer Ebene aufgestellt werden. Die Modellierung und Simulation auf mikroskopischer Ebene ist jedoch nicht immer vorteilhaft und zudem schwer zu verifizieren, da die Messverfahren des Transportes und der Speicherung häufig auf der Ermittlung makroskopischer Messgrößen basieren. Außerdem ist zu beachten, dass bei Betrachtung von Transport- und Speicherprozessen in porösen Körpern meist eine Mehrphasigkeit des Systems vorliegt. Im Allgemeinen besteht das betrachtete System dabei aus einem festen porösen Bauwerkstoff dessen Porenraum mit einem gasförmigen Medium (der Luft) und/oder einem flüssigem Medium (Wassers bzw. Salzlösung) und/oder einem festen Medium (kristallines Salz) gefüllt sein kann. Die mehrphasigen Systeme können unter anderem auch mit Hilfe eines Kontinuumsansatzes beschrieben werden [20, 16]. Grundlegende Ansätze zur Übertragung mikroskopischer Größen auf makroskopische Betrachtungsweisen finden sich z.B. in Bear und Bachmat [39]. Hierbei wird ein repräsentatives Elementarvolumen (REV) für die Übertragung von der mikroskopischen zur makroskopischen Betrachtungsweise verwendet. Es wird davon ausgegangen, dass innerhalb des REV jede Phase dem Kontinuumsbegriff genügt. Das REV wird genau so groß gewählt, dass Schwankungen auf mikroskopischer Ebene aus der Betrachtung herausfallen, lokale Veränderungen auf makroskopischer Ebene aber erfasst werden können [20]. Unter Beachtung unterschiedlicher Mittelungsvorschriften können somit Bilanzgleichungen auf makroskopischer Ebene aufgestellt werden. Um die Bilanzgleichungen jedoch geschlossen für die jeweiligen Transport- und Speicherprozesse lösen zu können, müssen sie durch konstitutive Gleichungen komplettiert werden. Somit ermöglicht die Modellierung der Bilanzgleichungen eine zeitliche Erfassung von Größen wie z.B. Wassergehalt, Temperatur.

Die allgemeine Vorgehensweise zur Aufstellung von Bilanzgleichungen wird im Folgenden kurz anhand einer beliebigen skalaren Größe a dargestellt [40, 41]. Bei der Betrachtung eines raumfesten Kontrollvolumens V kann sich a im Volumen nur

verändern, wenn ein Fluss J über die Oberfläche S stattfindet oder die Größe σ_a innerhalb des Volumens erzeugt oder vernichtet wird:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = - \int_{\partial V} J_a dS + \int_V \sigma_a dV \quad \text{mit } a = \int_V a' dV, \quad (4-1)$$

$$\int_V \frac{\partial a'}{\partial t} dV = \int_V (-\text{div} J_{a'} + \sigma_{a'}) dV. \quad (4-2)$$

Da Gleichung (4-2) für beliebig große Kontrollvolumina V gilt, gilt die folgende Gleichung:

$$\frac{\partial a'}{\partial t} = -\text{div} J_{a'} + \sigma_{a'}. \quad (4-3)$$

Diese Formulierung betrachtet ein orts- und raumfestes Kontrollvolumen und wird häufig als Eulersche oder lokale Betrachtungsweise bezeichnet [41, 40]. Weiterführend wird meist noch zwischen mikroskopischer und makroskopischer Betrachtungsweise unterschieden. Hierbei wird i.d.R. der Fluß $J_{a'}$ in einen konvektiven und diffusiven Anteil unterteilt

$$J_{a'} = J'_{a'} + a' \cdot v. \quad (4-4)$$

Der konvektive Anteil $a' \cdot v$ beschreibt den Transport einer bestimmten Menge der Größe a' mit der „mittleren“ Geschwindigkeit v im Volumenelement. Der diffusive Anteil $J'_{a'}$ beschreibt Transportprozesse, welche durch Prozesse in molekularer Dimension initiiert werden. Durch das Einsetzen der Gleichung (4-4) in (4-3) erhält man die folgende Gleichung:

$$\frac{\partial a'}{\partial t} = -\text{div}(J'_{a'} + a'v) + \sigma_{a'} = -\text{div}J'_{a'} - a' \text{div} v - v \text{grad} a' + \sigma_{a'}. \quad (4-5)$$

Durch das Einführen der substantiellen zeitlichen Ableitung vereinfacht sich die Gleichung auf den folgenden Ausdruck:

$$\frac{da'}{dt} = -\text{div}J'_{a'} - a' \text{div} v + \sigma_{a'}. \quad (4-6)$$

Diese Gleichung ermöglicht die Darstellung der Bilanzgleichung einer skalaren Größe in substantieller Form. Je nach Lage des Bezugssystems entstehen oder

entfallen noch zusätzliche Terme oder Teile dieser Terme in den Bilanzgleichungen. Zur Charakterisierung der unterschiedlichen Terme der Bilanzgleichungen können die Methoden der klassischen Thermodynamik irreversibler Prozesse herangezogen werden. Hierbei ist das Auftreten irreversibler Prozesse dadurch charakterisiert, dass sich das System nicht im Gleichgewicht befindet, jedoch den stationären Zustand bzw. Gleichgewichtszustand anstrebt. Die Entropieproduktion ist dabei das grundlegende quantitative Maß für die Irreversibilität. Die Ermittlung der Entropieproduktion kann über die Bilanzgleichung der Entropie erfolgen. Die Gibbsche Fundamentalgleichung [96] (4-7) bildet dabei unter der Annahme der Gültigkeit auch für die Zeitableitung die Grundlage der Entropiebilanzgleichung.

$$T dS = dU + pdV - \sum_i \mu_i dn_i$$

S	<i>Entropie</i>	[J]	
T	Temperatur	[K]	
U	innere Energie	[J]	(4-7)
p	Druck	[Pa]	
V	Volumen	[m ³]	
n_i	Stoffmenge der Komponente i	[mol]	
μ_i	chemisches Potential der Komponente i	[J/mol]	

Um die thermodynamischen Variablen und ihre Abhängigkeiten vom Gleichgewichtszustand in den Nichtgleichgewichtszustand übertragen zu können, wird für jedes Volumenelement lokales Gleichgewicht angenommen. Für die Erfüllung dieser Bedingung wird häufig ein repräsentatives Elementarvolumen eingeführt, welches in seiner Definition diese Rahmenbedingung beinhaltet. Unter Beachtung dieser grundlegenden Annahmen kann die Aufstellung der Bilanzgleichung der Entropie und die Entropieproduktion berechnet werden. Die Entropieproduktion erfasst verschiedene Anteile thermodynamischer Flüsse J_i und Kräfte X_i . Dabei sind die thermodynamischen Ursachen für die resultierenden Flüsse als Kräfte definiert. Für den Fall des Gleichgewichtes verschwindet die Entropieproduktion σ_E :

$$\sigma_E = 0. \tag{ 4-8}$$

Folglich muss die Summe der thermodynamischen Kräfte im Gleichgewicht Null sein. Um den funktionellen Zusammenhang zwischen den Flüssen und Kräften zu approximieren, kann nach [40] der Ansatz einer linearen Funktion gewählt werden:

$$J_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} \cdot X_j. \quad (4-9)$$

Da im Fall des Gleichgewichtes die Flüsse und damit auch die Kräfte Null werden müssen, können keine konstanten Glieder auftreten. L_{ij} ist die Koeffizientenmatrix der linearen phänomenologischen Koeffizienten. Die Flüsse sind direkt proportional zu den Kräften. Aus thermodynamischer Sicht bedeutet das, dass die Prozesse in der Nähe des Gleichgewichtes ablaufen. Durch die geringe Abweichung vom Gleichgewicht können alle Glieder der Reihe höherer Potenz vernachlässigt werden. Sind die phänomenologischen Koeffizienten linear unabhängig, so gilt die Onsagersche Reziprozitätsbedingung [16, 40]:

$$L_{ij} = L_{ji}. \quad (4-10)$$

Dies bedingt somit auch die Symmetrie der Matrix. Da irreversible thermodynamische Prozesse stets freiwillig ablaufen, nimmt die Entropie eines abgeschlossenen Systems zu (Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik) [96]. Da somit auch die Entropieproduktion größer gleich Null ist, müssen die folgenden zwei Ungleichungen gelten:

$$L_{ii} \geq 0 \quad (4-11)$$

$$L_{ii}L_{jj} - L_{ij}^2 \geq 0. \quad (4-12)$$

Finden Prozesse ohne Überlagerungseffekte („Kreuzeffekte“) von Flüssen und Kräften statt, so genügt die Bedingung (4-11), da solche Prozesse nur Koeffizienten auf der Diagonalen hervorrufen. Bei Transportproblemen gibt es aber auch Prozesse bei denen die Flüsse nicht der konjugierten thermodynamischen Kraft zuzuordnen sind. Beispiele dafür sind die beiden Überlagerungseffekte der Thermodiffusion (Soret und Dufour Effekt), für die ebenfalls die Bedingung (4-12) für die Koeffizientenmatrix erfüllt sein muss. Die Flüsse, welche aus Überlagerungseffekten resultieren, sind in der Regel jedoch wesentlich kleiner als die der Haupteffekte. Die Gültigkeit der Onsagerschen Reziprozitätsbedingung stellt im Fall der experimentellen Verifikation dieser Überlagerungseffekte einen großen Vorteil dar. Man kann die Ergebnisse des messtechnisch einfacher zugänglichen Prozesses auf den jeweils anderen Prozess übertragen.

Diese Ansätze zur Herleitung von Bilanzgleichungen und Transportpotentialen bilden die Grundlagen für die folgende Diskussion der in der gängigen Literatur bestehenden Ansätze zur Modellierung und Simulation von Transport- und Speicherprozessen in porösen Bauwerkstoffen. Die beschriebenen Modellierungen

zeigen die unterschiedlichen Herangehensweisen und Lösungsansätze zur Beschreibung der komplexen Systeme mit ihren jeweiligen Gültigkeitsbereichen.

4.2 Ausgewählte Ansätze zur Modellierung und Simulation von Transport- und Speicherprozessen in porösen Bauwerkstoffen

Die rechnerische Behandlung von Feuchte-, Stoff- und Energietransportprozessen in porösen Materialien bzw. Bauwerkstoffen ist durch die Sichtweise unterschiedlicher Fachbereiche und den Fortschritt der Rechentechnik geprägt. Parallelen allgemeiner Formulierungen von Gleichungen für den Stoff- und Energietransport in porösen Materialien ergeben sich häufig zwischen der Thermischen Verfahrenstechnik, Trocknungstechnik, Fluidodynamik und Bodenkunde. Bei den im nachfolgenden dargestellten rechnerischen Ansätzen zur Bestimmung des Stoff- und Energietransportes in porösen Medien unterscheiden sich die gewählten Differentialgleichungssysteme durch die zugrunde gelegten Modelle, vor allem durch die treibenden Gradienten und die Definition der Transportkoeffizienten. Nachfolgend werden drei repräsentative Modelle nach Kießl [8], Künzel [10] und Grunewald [17] diskutiert. Während der Ansatz bei Kießl und Künzel eher systemorientierte für das Gleichungssystem des Feuchte- und Wärmetransportes erfolgt, wird bei Grunewald ein allgemeingültigeren Ansatz basierend auf den Methoden der irreversiblen Thermodynamik gewählt.

4.2.1 Feuchte- und Wärmetransport (Kießl)

In der Arbeit von Kießl [8] wird von einem kombinierten Ansatz zur Beschreibung des kapillaren und dampfförmigen Feuchtetransportes in mehrschichtigen Bauteilen ausgegangen. Es wird die gegenseitige Beeinflussung des Masse- und Wärmetransportes in den Bilanzgleichungen (4-13 und 4-14) formuliert. Die Definition der Transportkoeffizienten erfolgt als Fazit seiner Literaturstudie [7] in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Temperatur. Für den Dampftransport werden die Koeffizienten FDP und FDT und für den Kapillarwassertransport wird der Koeffizient FKU eingeführt. Die Erhaltungsgleichungen seiner Theorie sind somit wie folgt angegeben.

Feuchte

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w u + \xi \varphi c_s) = \rho_w \frac{\partial}{\partial x} \left(FKU \frac{\partial u}{\partial x} + FDP \frac{\partial \varphi}{\partial x} + FDT \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial x} \right) \quad (4-13)$$

ρ_W	Dichte (Wasser)	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
u	Stofffeuchte	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
φ	Luftfeuchte	$[-]$
c_s	Sättigungsdampfdichte	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ϑ	Temperatur	$[\text{°C}]$
ξ	Volumenanteil der Gasphase	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$

Wärme

$$\frac{\partial}{\partial t} \left\{ \rho_M c_{PM} \vartheta + \rho_W u \vartheta \left[c_{PE} + \kappa_{\vartheta_0} (c_{PW} - c_{PE}) \right] + r_S \rho_W u \kappa_{\vartheta_0} \right\} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + r_V \left[\rho_W \frac{\partial}{\partial x} \left(FDP \frac{\partial \varphi}{\partial x} + FDT \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial t} (\xi \varphi c_S) \right] \quad (4-14)$$

ρ_M	Dichte des porösen Materials	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
c_{PE}	Spezifische Wärmekapazität von Eis	$[\text{J}/(\text{kgK})]$
c_{PW}	Spezifische Wärmekapazität von Wasser	$[\text{J}/(\text{kgK})]$
c_{PM}	Spezifische Wärmekapazität des Materials	$[\text{J}/(\text{kgK})]$
κ_{ϑ_0}	Abminderungsfaktor für Gefriertemperaturunterschreitung	$[-]$
r_S	Spezifische Phasenumwandlungsenthalpie Wasser/Eis	$[\text{J}/\text{kg}]$
r_V	Spezifische Phasenumwandlungsenthalpie Wasser/Wasserdampf	$[\text{J}/\text{kg}]$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$[\text{W}/(\text{mK})]$
ξ	Volumenanteil der Gasphase	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$

Die beiden Variablen der Gleichungen sind die Temperatur ϑ und das Feuchtepotenzial φ . Durch die Einführung des Feuchtepotenzials wird eine Beschreibung des Wassertransportes über die Materialgrenzen hinweg ermöglicht. Der kapillare Flüssigkeitstransport wird in Abhängigkeit des Stofffeuchtegradienten (Stofffeuchte u $[\text{m}^3/\text{m}^3]$) definiert. Es kann somit kein Transport oberhalb der freien Sättigung beschrieben werden, da der Gradient verschwindet. Der Dampftransport wird mit einem diffusiven Ansatz beschrieben und berücksichtigt durch die Aufspaltung des Potenzialgradienten den Dampftransport infolge des temperaturabhängigen Luftfeuchtegradienten:

$$\dot{m}_D = D c_s \frac{\partial \varphi}{\partial x} + D \varphi \cdot \frac{dc_s}{d\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (4-15)$$

Der Wärmetransport über die Wärmeleitfähigkeit wird infolge des Temperaturgradienten beschrieben. Die Wärmeleitfähigkeit der Materialien in Abhängigkeit der Feuchte wird mit einem linearen Ansatz beschrieben. Die Wärmespeicherung wird im Material, im flüssigen Wasser und im Eis erfasst, jedoch nicht im Dampf. Weiterhin werden die Phasenumwandlungsenthalpien Eis-Wasser, Wasser-Dampf als Schmelz und Sublimationswärme berücksichtigt.

4.2.2 Feuchte- und Wärmetransport (Künzel)

Aufbauend auf der Arbeit von Kießl [8] werden bei Künzel [10] die Erhaltungsgleichungen für die Feuchte und Wärme mit den folgenden Differentialgleichungen beschrieben.

Feuchte

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\varphi} \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (4-16)$$

$\frac{dw}{d\varphi}$	Feuchtespeicherfähigkeit des Baustoffes	[kg/m ³]
w	Wassergehalt	[kg/m ³]
φ	relative Luftfeuchte	[-]
D_{φ}	Flüssigleitkoeffizient des Baustoffes	[kg/(ms)]
δ_p	Wasserdampfpermeabilität des Baustoffes	[kg/(msPa)]
p_{sat}	Wasserdampfsättigungsdruck	[Pa]

Wärme

$$\frac{dH}{d\vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \vartheta) + h_v \nabla \cdot (\delta_p \nabla (\varphi p_{sat})) \quad (4-17)$$

$\frac{dH}{d\vartheta}$	Wärmespeicherfähigkeit des feuchten Baustoffes	[J/m ³ K]
λ	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes	[W/(mK)]
ϑ	Temperatur	[°C]
h_v	Verdunstungsenthalpie des Wassers	[J/kg]

Als treibende Potentiale werden der Luftfeuchtegradient für den Flüssigkeitstransport und der Dampfdruckgradient für den Dampftransport gewählt. Durch die Wahl des Dampfdruckgradienten werden gleichzeitig auch nicht-isotherme Verhältnisse

berücksichtigt. In der Wärmegleichung wird die Wärmeleitung durch einen linearen feuchteabhängigen Ansatz und die Phasenumwandlungsenthalpie Dampf-Wasser erfasst. Die Wahl des Luftfeuchtegradienten als treibendes Potential für den Flüssigwassertransport berücksichtigt keinen temperaturbedingten Anteil dieses Transportes. Der Temperatureinfluss wird nur beim Sättigungsdampfdruck p_{sat} mit dem folgenden empirischen Ansatz [10] zur Beschreibung der Verdunstungsenthalpie und dem Feuchtetransport in der Gasphase berücksichtigt:

$$p_{sat} = 611 \cdot \exp\left(\frac{a \cdot \vartheta}{\vartheta_0 + \vartheta}\right) \quad (4-18)$$

mit

$$\begin{array}{lll} a = 22,44 & \vartheta_0 = 272,44 \text{ °C} & \vartheta < 0 \text{ °C} \\ a = 17,08 & \vartheta_0 = 234,18 \text{ °C} & \vartheta \geq 0 \text{ °C} \end{array}$$

Die Feuchteabhängigkeit des Dampftransportes wird durch eine Anpassung des Flüssigkeitstransportes berücksichtigt, welche durch die Messung des Dampfdiffusionswiderstandes in Abhängigkeit unterschiedlicher Feuchten berechnet wird. Die Verwendung des Luftfeuchtegradientens als Potential ist außerhalb des hygroskopischen Bereiches schwierig, da der Gradient dort gegen Null geht.

4.2.3 Feuchte-, Luft-, Salz- und Wärmetransport (Grunewald)

Für die Beschreibung des gekoppelten Feuchte-, Luft-, Wärme- und Salztransportes in kapillar porösen Baustoffen formuliert Grunewald einen Ansatz auf der Grundlage der phänomenologischen Thermodynamik [17]. Dabei wird das gesamte System in die drei Phasen fest (m), flüssig (l) und gasförmig (g) unterteilt. Für jede Phase gibt es zwei Komponenten. Die feste Phase bilden der poröse Baustoff und das kristalline Salz (p). Die flüssige Phase besteht aus Wasser (w) und gelöstem Salz (s). Die gasförmige Phase wird durch die trockenen Luft (a) und den Wasserdampf (v) definiert. Aus der Bilanzierung der Komponenten dieser drei Phasen im betrachteten System ergeben sich die folgenden vier Differentialgleichungen der Feuchtemassenbilanz, der Luftmassenbilanz, der Salzmassenbilanz und der Energiebilanz.

Feuchtemassenbilanz

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_w \theta_l + \rho_v \theta_g] = - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\rho_w v_k^{m_l} - j_{k,diff}^{m_s} - j_{k,disp}^{m_s}) \theta_l + (\rho_v v_k^{m_g} + j_{k,diff}^{m_v}) \theta_g \right] \quad (4-19)$$

ρ	Dichte der jeweiligen Komponente	[kg/m ³]
θ	Volumenanteil der jeweiligen Phase	[Vol - %]
v	mittlere Massengeschwindigkeit	[m/s]
$j_{k,diff}^{m_s}$	Salzdiffusionsfluss innerhalb der Flüssigphase	[kg/(m ² s)]
$j_{k,disp}^{m_s}$	Salzdispersionsfluss	[kg/(m ² s)]
$j_{k,diff}^{m_v}$	Wasserdampfdiffusionsfluss	[kg/(m ² s)]
σ_w	Dehydratationsrate	[kg/(m ³ s)]
σ_s	Lösungsrate	[kg/(m ³ s)]

Luftmassenbilanz

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_a \theta_g] = - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\rho_a v_k^{m_g} - j_{k,diff}^{m_v}) \theta_g \right] \quad (4-20)$$

Salzmassenbilanz

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho_s \theta_l + \rho_p \theta_p] = - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\rho_s v_k^{m_l} - j_{k,diff}^{m_s}) \theta_l \right] \quad (4-21)$$

Energiebilanz

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\rho_m u_m + \rho_p u_p \theta_p + \rho_l u_l \theta_l + (\rho_v u_v + \rho_a u_a) \theta_g] = \\ - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho_l u_l v_k^{m_l} \theta_l + (\rho_v u_v + \rho_a u_a) v_k^{m_g} \theta_g \right] \\ - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[j_{k,diff}^q + (h_s - h_w) j_{k,diff}^{m_s} \theta_l + (h_v - h_a) j_{k,diff}^{m_v} \theta_g \right] \end{aligned} \quad (4-22)$$

T	Temperatur aller Phasen	[K]
$u_i(T) = c_{T,i} T$	Innere Energie mit spez. Wärmekapazität $c_{T,i}$ der jeweiligen Komponente i	[J/kg]
$h_v(T) = c_{T,v} T + h_{evap}$	Wasserdampfenenthalpie mit spez. Wärmekapazität $c_{T,v}$ und Verdunstungsenthalpie h_{evap} von Wasserdampf	[J/kg]
$h_s(T) = c_{T,p} T + h_{diss}$	Enthalpie des gelösten Salzes mit Lösungsenthalpie h_{diss}	[J/kg]
$h_a(T) = c_{T,a} T$	Enthalpie der trockenen Luft mit spezifischer Wärmekapazität $c_{T,a}$ der Luft	[J/kg]
$\dot{J}_{k,diff}^0$	Wärmefluss	[W/m ²]
σ_u	Wärmeumwandlungsrate	[J/(m ³ s)]

Die Feuchtespeicherung eines Bauwerkstoffes wird über den gesamten Feuchtebereich mit Hilfe der Verknüpfung der Sorptionsisotherme und der Saugspannung beschrieben. Die direkte Verknüpfung zwischen den beiden Materialfunktionen erfolgt über die Kelvin-Gleichung:

$$p_c(\varphi) = \rho_w \cdot R_v \cdot T \cdot \ln(\varphi). \quad (4-23)$$

p_c	Kapillardruck	[Pa]
R_v	spezifische Gaskonstante für Wasserdampf	[J/kg K]
T	Temperatur	[K]
φ	relative Luftfeuchte	[-]

Die konstitutiven Flüsse der Bilanzgleichungen mit ihren treibenden Potentialen werden durch sechs weitere Gleichungen [17] beschrieben. Die in diesen Gleichungen enthaltenen Transportkoeffizienten müssen vorab bestimmt werden. Als Transportkoeffizienten des gekoppelten Feuchte-, Salz-, Luft- und Wärmetransportes verbleiben die Flüssigwasserleitfähigkeit $K_l(\theta, c_s, T)$ [s], die Luftpermeabilität $K_g(\theta, T)$ [s], der Wasserdampfdiffusionskoeffizient $D_v(\theta, T)$ [m²/s], der Salzdifusionskoeffizient $D_s(\theta, c_s, T)$ [m²/s], der Salzdispersionskoeffizient $D_{sd}(\dots)$ [kg/m²] und die Wärmeleitfähigkeit $\lambda(\theta, T)$ [W/m²K] [17].

Da eine getrennte messtechnische Erfassung des Flüssigkeits- und Dampftransportes ausgeschlossen wird, erfolgt eine Aufteilung der Transportkoeffizienten nach den treibenden Kräften. Die phasentrennten Transportkoeffizienten werden ursachengetrennt ermittelt. Über die hygroskopische und kapillare Feuchteleitfähigkeit unter isothermen und isobaren Bedingungen wird eine Phasentrennfunktion aufgestellt, so dass letztendlich die Transportkoeffizienten K_l , D_v und D_{vp}

der Bilanzgleichungen bleiben. Die Berechnung der Feuchtgetrennfunktion wurde von Grunewald durch Simulation bestätigt [17]. Methoden zur direkten experimentellen Verifikation sowie die Definitionen von Einflussfaktoren auf die Phasentrennfunktion sind bislang nicht bekannt.

Die Berücksichtigung des Salzeinflusses auf die stattfindenden Transportprozesse ist in der Salzmassenbilanzgleichung wiedergegeben. Es wird formal zwischen advektivem, dispersivem und diffusivem Salzfluß unterschieden, wobei in [17] auf den dispersiven Salzfluß nicht näher eingegangen wird. Der diffusive Salztransport wird durch den Salzdifusionskoeffizienten $D_s(\theta_l, c_s, T)$ charakterisiert. Dabei wird die Temperaturabhängigkeit mit einem Arrheniusansatz erfasst:

$$D_{sol}(c_s, T) = D_{r,sol}(c_s) \exp\left(\frac{E_A}{R} \frac{T - T_r}{T T_r}\right). \quad (4-24)$$

$D_{r,sol}$	Diffusionskoeffizient in freier Lösung	[cm ² /s]
D_{sol}	Diffusionskoeffizient in freier Lösung	[cm ² /s]
E_A	Aktivierungsenergie	[kJ/(K mol)]
R	Gaskonstante	[J/(K mol)]
T_r	Referenztemperatur	[K]
c_s	Konzentration Salzlösung	[mol/l]

Der Einfluss der Porenmorphologie und der Feuchtigkeit auf die Diffusion wird durch den effektiven Diffusionskoeffizienten $D_s(\theta_l, c_s, T)$ berücksichtigt:

$$D_s(\theta_l, c_s, T) = \frac{D_{sol}(c_s, T)}{\tau} \left(\frac{\theta_l}{\theta_{cap}}\right)^n. \quad (4-25)$$

D_s	effektiver Diffusionskoeffizient in freier Lösung	[cm ² /s]
τ	Tortuosität	[-]
n	Feuchteexponent	[n]
θ_l	Volumenanteil der Flüssigphase	[m ³ /m ³]
θ_{cap}	Kapillare Sättigungsfeuchte	[m ³ /m ³]

Der Einfluss des Salzes auf die Sorptionsisotherme wird wie folgt berücksichtigt:

$$\theta_l(\varphi, c_s, T) = \theta_l(\varphi) + c_s m_{sorp}(\varphi, T). \quad (4-26)$$

$\theta_1(\varphi)$	Sorptionsisotherme des Baustoffes ohne Salz	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
m_{sorp}	Wassersorption des Salzes	$[\text{kg}/\text{mol}]$

Außerdem werden Terme für Hydratation/Dehydratation und Kristallisation/Lösung sowie deren energetischen Auswirkungen in den Bilanzgleichungen berücksichtigt.

4.2.4 Diskussion

Die vorgestellten Lösungsansätze zeigen, dass Anforderungen an Realitätsnähe, Verfügbarkeit und Bestimmbarkeit von Transportkoeffizienten sowie bezüglich der Lösbarkeit der mathematischen Probleme bestehen. Ein Beispiel für die Schwierigkeiten der experimentelle Verifikation von Transportkoeffizienten ist die Zuordnung des Wassers zur flüssigen oder dampfförmigen Phase [17]. Häufig wird der Kapillartransportkoeffizient durch die Messung von Gesamtfeuchteprofilen (Dampf und Flüssigkeit) ermittelt [9, 10], wobei zu beachten ist, dass auch immer ein Anteil der Feuchtigkeit in der Dampfphase transportiert wird. Der Flüssigkeitstransport hat dabei einen dominanten Anteil, da er sehr schnell ist. Sobald der kapillare Transport jedoch sehr langsam wird z.B. durch die Porenmorphologie oder die Art der Porenlösung (Salzlösungen) gewinnt der Wassertransport in der Dampfphase an Gewicht. Somit müsste eine Vielzahl experimentell bestimmter Feuchteprofile ermittelt werden um allen Gegebenheiten Rechnung zu tragen. In dieser Arbeit wird daher eine Möglichkeit zur getrennten Messung von Feuchte bzw. Wasser in der dampfförmigen und flüssigen Phase vorgestellt. Die Anwesenheit von Salzen in porösen feuchten Bauwerkstoff ruft außerdem noch eine Vielzahl ungeklärter Einflüsse auf die Transport- und Schädigungsprozesse hervor. Grunewald [17] berücksichtigt im Gegensatz zu den Ansätzen von Kießl [8] und Künzel [10] bereits den Einfluss von Salzen in den aufgestellten Gleichungen. Der Mittransport von Salzionen in der Porenlösung wird z.B. von Volkwein [14] als „Huckepack-Transport“ berücksichtigt. Garrecht [19] untersucht unterschiedliche Salztransportprozesse, wobei der Einfluss der Salze nur bezüglich des Feuchtehaushaltes der Baustoffe erfasst wird. Zur Messung von Ionendiffusionskoeffizienten in Bauwerkstoffen bzw. Gesteinen wurden Arbeiten von Buchwald [15] und Giskow [18] durchgeführt. Während bei Giskow der Einfluss der porenmorphologischen Parameter diskutiert wird, liegt der Schwerpunkt bei Buchwald auf dem Vergleich unterschiedlicher Messmethoden.

5 Modellierung und experimentelle Verfahren zur Bestimmung der Speicher- und Transportfunktionen von Feuchte und Salz

Zur Charakterisierung von Speicher- und Transportprozessen von Feuchte und Salz in porösen Bauwerkstoffen gibt es verschiedenen Messverfahren, bei denen die Auswertung der Messwerte häufig unter Verwendung von unterschiedlichen Modellansätzen erfolgt. In den folgenden Unterkapiteln werden einige dieser Ansätze für die Speicherung und den Transport dargestellt.

5.1 Feuchtespeicherung

Häufig wird das Feuchtespeichervermögen eines porösen Bauwerkstoffes im Kontakt mit feuchter Luft als Sorption bezeichnet. Die Sorptionsisotherme ist die charakteristische Funktion dieses Feuchtespeichervermögens. Zur Bestimmung der Sorptionsisotherme wird die Feuchteaufnahme eines Bauwerkstoffes während der Lagerung bei unterschiedlichen relativen Feuchten bis zum jeweiligen Einstellen des Gleichgewichtszustandes gemessen [46]. Eine genauere Beschreibung der Vorgehensweise ist in der DIN EN ISO 12571 [46] angegeben. Im Bereich hoher Luftfeuchten ist dieses Messverfahren zur Bestimmung der Sorptionsisotherme jedoch durch eine rasche Feuchtezunahme nicht sehr genau. Für die Bestimmung der Sorptionsisotherme im Feuchtebereich oberhalb 95 % relativer Luftfeuchte ist es daher günstig auf ein anderes Messverfahren zurückzugreifen. Ein mögliches Verfahren ist die Saugspannungsmessmethode [9]. Die Verknüpfung der beiden Materialfunktionen, der Sorptionsisotherme und der Saugspannungsmesskurve, kann durch die Kelvin-Gleichung (4-23) realisiert werden. Die Kelvin-Gleichung gibt den thermodynamischen Gleichgewichtszustand zwischen der Flüssigkeit und dem Dampf in einer flüssigkeitsgefüllten Kapillare wieder. Die Sorptionsisotherme wird somit aus zwei sich überlappenden Materialfunktionen zusammengesetzt [9, 16]. Für salzbelastete Bauwerkstoffe wird bei Grunewald [17] eine aus zwei Anteilen überlagerte Sorptionsisotherme angegeben. Sie berechnet sich durch die Addition der „normalen“ (ohne Salzbelastung) Sorptionsisotherme und der Wassersorption des jeweiligen Salzes in Abhängigkeit der Luftfeuchte und Temperatur.

5.2 Feuchtetransport

Der Feuchtetransport in Bauwerkstoffen lässt sich im Allgemeinen in zwei unterschiedliche Anteile, den dampfförmigen und den flüssigen Transport aufteilen. Die

Schwierigkeit dieser Aufteilung liegt jedoch weniger in der getrennten mathematischen Erfassung als in der experimentellen Bestimmung der unterschiedlichen Anteile. Das Problem ist dabei die separate messtechnische Erfassung der Dampf- und Flüssigkeitsanteile am Gesamtfeuchte-transport [17].

5.2.1 Dampftransport

Der Transport von Wasserdampf kann durch verschiedene treibende Kräfte, den Dampfdruck-, den Gasdruck- und den Temperaturgradienten, hervorgerufen werden. Diese finden unterschiedliche Berücksichtigung in den Transportgleichungen. Der Einfluss der feuchteabhängigen Veränderung des Dampfdiffusionswiderstandes wird von Bednar [12] mit der folgenden Funktion bei der Ermittlung des Dampfmassenstroms berücksichtigt. Sie berücksichtigt gleichzeitig die sogenannte

Stefan'sche Diffusion $\frac{1}{1 - p/p_{ges}}$.

$$j_v = -\frac{1}{\mu(w)} \frac{D_0}{R_{H_2O} T} \frac{1}{1 - p/p_{ges}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\mu(w)} \frac{D_0}{R_{H_2O} T} \frac{p}{2T} \frac{1}{1 - p/p_{ges}} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5-1)$$

R	Gaskonstante	[J/(Kmol)]
T	Temperatur	[K]
j_v	Massenstromdichte	[kg/(m ² s)]
D_0	Diffusionskoeffizient von Wasser in Luft	[m ² /s]
μ	Diffusionswiderstandszahl des Baustoffes	[-]
p	Wasserdampfpartialdruck	[Pa]
$p_{ges.}$	Wasserdampfpartialdruck (gesättigt)	[Pa]

Auch Krus [9] und Künzel [10] berücksichtigen mit den folgenden zwei Ansätzen den Einfluss des Flüssigkeitsanteils in höheren Feuchtebereichen (> 50% r.F.) auf den Dampftransport. Dies erfolgt durch einen Flüssigtransportkoeffizienten, welcher aus der Differenz der Dampfdiffusionswiderstandszahl im niederen Feuchtebereich und im hohen Feuchtebereich ermittelt wird.

$$D_w = \frac{D_D p_s}{RT} \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu^*} \right) \frac{dw}{d\varphi} \quad (5-2)$$

D_w	Flüssigtransportkoeffizient	[m ² /s]
D_D	Dampfdiffusionskoeffizient in Luft	[m ² /s]
p_s	Sättigungsdampfdruck	[Pa]
w	Wassergehalt	[kg/m ³]
φ	relative Luftfeuchte	[-]
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]
μ^*	fiktive Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (mit Flüssigtransport)	[-]

$$D_\varphi(\varphi) = p_s \delta \left(\frac{1}{\mu^*(\varphi)} - \frac{1}{\mu} \right) \quad (5-3)$$

D_φ	Füssigleitkoeffizient	[kg/ms]
δ	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft	[kg/m s Pa]
p_s	Sättigungsdampfdruck	[Pa]
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]
μ^*	fiktive Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (mit Flüssigtransport)	[-]
φ	relative Luftfeuchte	[-]

Die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl erfolgt nach DIN EN ISO 12572 [47]. Die Thermoeffusion und der Transport infolge Gesamtdruckgradienten werden nicht berücksichtigt. Grunewald [16] hingegen beschreibt den phasentrennten Feuchtetransport über eine sogenannte Feuchtetrennfunktion.

5.2.2 Flüssigkeitstransport

Der Flüssigkeitstransport kann sowohl den reinen Wassertransport als auch den Salzlösungstransport umfassen, wobei der Einfluss gelöster Salze in den vorhandenen Modellen weniger Berücksichtigung findet. Einige Methoden zur Messung des Feuchtetransportes und ihre Auswertung bzw. die Ermittlung der entsprechenden Transportkoeffizienten werden im Folgenden kurz erläutert.

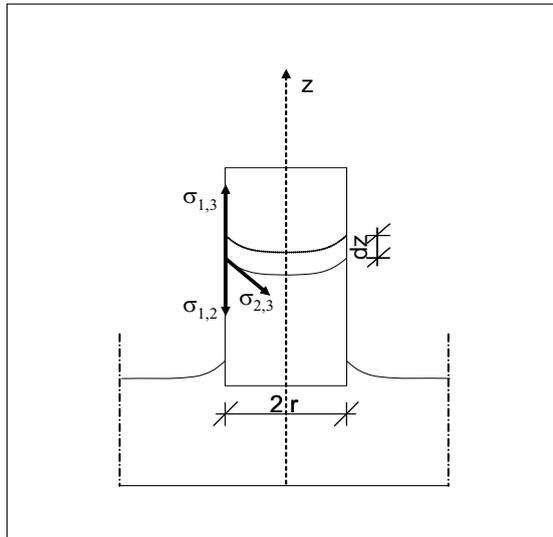


Abb. 5-1: Schematische Darstellung des Flüssigkeittransportes in einer Kapillare [51]

Für die Beschreibung der Wasseraufnahme bei teilweiseem Eintauchen gibt die DIN EN ISO 15148 [48] eine experimentelle Vorgehensweise und eine Auswertung vor. Eine andere Auswertung dieses Wasseraufnahmeprozesses bei teilweiseem Eintauchen der Probekörper kann z.B. durch Herleitung der Bewegungsgleichung eines Fluides in einer Einzelkapillaren nach [49, 50, 51] wie folgt durchgeführt werden.

Für die Beschreibung von Fluidströmungen eines newtonschen Fluides (Verhalten entsprechend dem Newton'schen Zähigkeitsgesetz) können die Navier-Stokes-Gleichungen (5-4) und die Kontinuitätsgleichung (5-5) herangezogen werden.

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \text{ grad } \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \text{ grad } p + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f} \quad (5-4)$$

u	Geschwindigkeit	[m/s]
t	Zeit	[s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
p	Druck	[Pa]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
f	Massenkraft	[m ² /s]
Δ	Laplace Operator	

$$\text{div } \vec{u} = 0 \quad (5-5)$$

Die Berücksichtigung innerer Spannungen des Fluides erfolgt durch die kinematische Viskosität $\nu = \frac{\eta}{\rho}$, welche als Quotient der dynamischen Viskosität (Zähigkeit) η und der Fluidichte ρ definiert ist. Das Fluid bewegt sich bei der folgenden Betrachtung im senkrechten Rohr. Durch die Annahmen, dass die Geschwindigkeit des inkompressiblen Fluides nur vom radialen Abstand und der Zeit abhängt und die Geschwindigkeit nur eine axiale Komponente besitzt, ergibt sich der wie folgt vereinfachte Ausdruck [49]:

$$\rho \dot{v} = -\rho g - p_z + \eta \Delta v. \quad (5-6)$$

η	dynamische Viskosität	$[(Ns)/m^2]$
g	Erdbeschleunigung	$[m/s^2]$

Durch die räumliche Mittelung erhält man den folgenden Ausdruck:

$$\rho \dot{\bar{v}} + \rho \cdot g + \frac{\bar{p}_z - \bar{p}_0}{z} + \eta \frac{8}{r_k^2} \bar{v} = 0. \quad (5-7)$$

r_k	Radius Kapillare	$[m]$
$p(z)$	Druck am Meniskus	$[Pa]$
$p(0)$	Druck an der Rohrmündung	$[Pa]$
z	Koordinate	$[m]$
x	Koordinate	$[m]$

\bar{v} gibt die mittlere Geschwindigkeit der Flüssigkeitssäule wieder, so dass auch die Bewegung des Flüssigkeitsmeniskus mit $\bar{v} = \dot{z}(t)$ in den folgenden Gleichungen wieder gegeben werden kann:

$$\rho \ddot{z} + \rho g \frac{\bar{p}(z) - \bar{p}(0)}{z} + \eta \frac{8}{r_k^2} \dot{z} = 0 \quad (5-8)$$

$$\rho z \ddot{z} + \rho g z + \bar{p}(z) - \bar{p}(0) - p_k + \eta \frac{8}{r_k^2} z \dot{z} = 0. \quad (5-9)$$

Für den Fall, dass die Trägheitskräfte gegenüber den Zähigkeitskräften zu vernachlässigen sind ergibt sich mit Hilfe der Annahmen $\bar{p}(z) = \bar{p}(0) = p_A$ die folgende Gleichung für den vertikalen Kapillartransport:

$$\eta \frac{8}{r_k^2} z \dot{z} + \rho g z - p_k = 0. \quad (5-10)$$

Die Lösung dieser Gleichung kann durch den folgenden funktionalen Zusammenhang wiedergegeben werden:

$$\frac{p_k r_k^2}{\eta \cdot 8 \cdot h^2} \cdot t = -\frac{z}{h} - \ln\left(1 - \frac{z}{h}\right). \quad (5-11)$$

Diese Gleichung verdeutlicht für den Flüssigkeitstransport in einer Kapillare den Zusammenhang zwischen dem kapillaren Sog p_k , der maximalen Steighöhe h und der zeitlich veränderlichen momentanen Steighöhe z in Abhängigkeit der dynamischen Viskosität η und des Kapillarradius r_k . Für die horizontale Kapillare (Richtung x) erhält man unter Vernachlässigung der Schwerekräfte durch die Berücksichtigung des horizontalen Weges und der horizontalen Geschwindigkeit den Ausdruck:

$$\eta \frac{8}{r_k^2} x \dot{x} - p_k = 0. \quad (5-12)$$

Die Lösung dieser Gleichung kann wie folgt angegeben werden:

$$\frac{p_k \cdot r_k^2}{\eta \cdot 8} \cdot t = \frac{1}{2} x^2. \quad (5-13)$$

Für das kapillare Saugen in einer horizontalen Einzelkapillare erhält man damit eine Wurzel-Zeit-Abhängigkeit im Bezug auf x .

Im Folgenden werden auszugsweise weitere Ansätze der bestehenden Literatur für die Bestimmung von Flüssigkeitstransportkoeffizienten vorgestellt. Für die Ermittlung von Flüssigkeitstransportkoeffizienten in Bauwerkstoffen wählen Krus [9] und Künzel [10] unterschiedliche Ansätze. Jedoch unterscheiden beide zwischen dem Flüssigkeitstransport im hygroskopischen und überhygroskopischen Feuchtebereich. Der Anteil im hygroskopischen Feuchtebereich wurde bereits in Abs. 5.2.1 dargestellt. Für den Flüssigkeitstransport im überhygroskopischen Bereich benutzt Künzel [10] einen feuchteabhängigen Ansatz unter Verwendung des Wasseraufnahmekoeffizienten, welcher anhand der DIN EN ISO 15148 [48] ermittelt werden kann:

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot (A/w_f)^2 \cdot 1000^{w/w_f - 1}. \quad (5-14)$$

D_{ws}	Kapillartransportkoeffizient für Saugvorgang [m^2/s]
A	Wasseraufnahmekoeffizient [$kg/(m^2s^{0,5})$]
w	Wassergehalt [kg/m^3]
w_f	freie Wassersättigung [kg/m^3]

Für die Verwendung dieses Ansatzes wird der Vorteil der Vereinfachung der Bestimmungsmethode des Wasseraufnahmekoeffizienten genannt.

Krus hingegen wählt für die Bestimmung des Kapillartransportkoeffizienten die Messung und Auswertung instationärer Feuchteprofile der Befeuchtungs- und Weiterverteilungsvorgänge nach dem folgenden Ansatz [9]:

$$D_w = -g_{w(x,t)} / \left(\frac{dW_{(x,t)}}{dx} \right). \quad (5-15)$$

D_w	Flüssigtransportkoeffizient [m^2/s]
w	Wassergehalt [kg/m^3]
$g_{w(x,t)}$	Flüssigmassenstromdichte [$kg/(m^2s)$]

Aus der Verwendung des Wassergehaltgradienten als treibendes Potential resultieren definitionsgemäß Einschränkungen im Feuchtebereich nahe der Sättigung, da der Gradient dort verschwindet.

Bednar benutzt zur Bestimmung der Feuchteleitfähigkeit im überhygroskopischen Bereich einen exponentiellen Ansatz, den er durch die Anpassung an die Messergebnisse der kapillaren Wasseraufnahme und eines Trocknungsexperimentes näher quantifiziert [12]:

$$\log \left(-K(p_{suc}) \frac{\delta p_{suc}}{\delta w} \right) = b_1 + b_2 \cdot w. \quad (5-16)$$

Ein Vergleich dieser unterschiedlichen Ansätze zeigt, dass die Ermittlung der Transportkoeffizienten nicht nur vom gewählten treibenden Potential, sondern auch von der gewählten Messmethode bestimmt wird.

5.3 Salzspeicherung

Die Salzspeicherung wird nur von Grunewald [17] beschrieben. Die Speicherung im Porensystem erfolgt durch Auskristallisation. Eine genaue Bestimmung der formellen Zusammenhänge liegt noch nicht vor.

5.4 Salzlösungstransport

Für die Beschreibung des Salz- bzw. Salzlösungstransport stellen die Advektion, die Konvektion, die Diffusion und die Dispersion die möglichen Transportmechanismen dar. Die Konvektion und Advektion führen zum gleichen physikalischen Transportprozess, haben jedoch unterschiedliche Ursachen. Die Konvektion ist dabei ein spezieller Fall der Advektion [20]. Im Fall der Diffusion handelt es sich um die Ionendiffusion. Die Dispersion entsteht durch den Transport im Porenraum. Das bedeutet, dass die Dispersion zum einen durch die Ausbildung eines Geschwindigkeitsprofils in der Pore oder durch den unterschiedlich schnellen Transport in Poren mit verschiedenen Porendurchmessern hervorgerufen wird [20]. Die Abschätzung des maßgeblichen Transportprozesses beim gleichzeitigen Auftreten advektiver und dispersiver bzw. diffusiver Transportprozesse kann über die Peclet-Zahl erfolgen [Abs. 2.1].

Einige der zuvor beschriebenen Transportprozesse z.B. der Flüssigkeitstransport haben auch auf den Salztransport einen maßgeblichen Einfluss. Beim Flüssigkeitstransport werden vorhandene gelöste Salzionen mit der Geschwindigkeit der Flüssigkeit transportiert. Dieser Mechanismus wird in dieser Arbeit als Advektion bezeichnet. Die Konvektion beschreibt einen meist in vertikaler Richtung verlaufenden Transportprozess, der durch Dichtegradienten hervorgerufen wird. Ursachen dieser Dichtegradienten können Konzentrations- oder Temperaturgradienten sein. Einige erste Ansätze zur Charakterisierung der Advektion sind z.B. bei Grunewald [17], Garrecht [19] und Larsen [52] zu finden. Grunewald beschreibt die Implementierung eines Modells für den Salztransport [17], liefert aber noch keine näheren Angaben zur Bestimmung der Transportkennwerte und der messtechnischen Verifikation des Einflusses des Salzes auf den advektiven Transport. Garrecht [19] berücksichtigt den Einfluss des Salzes auf die kapillare Flüssigkeitsleitfähigkeit über die Konzentrationsabhängigkeit der Oberflächenspannung, des Randwinkels und der Viskosität mit der folgenden Formel:

$$\frac{D_{\theta_{H_2O}}}{D_{\theta_{Lsg}}} = \frac{\frac{\sigma_{Lsg} \cos \delta_{Lsg}}{\sigma_{H_2O} \cos \delta_{H_2O}}}{\frac{\eta_{Lsg}}{\eta_{H_2O}}} \quad (5-17)$$

$D_{\theta_{H_2O}} / D_{\theta_{Lsg}}$	kapillare Flüssigkeitsleitfähigkeit Wasser/Lösung	$[m^2/s]$
$\sigma_{H_2O} / \sigma_{Lsg}$	Oberflächenspannung Wasser/Lösung	$[N/m]$
$\cos \delta_{H_2O} / \cos \delta_{Lsg}$	Cosinus des Randwinkels Wasser/Lösung	$[-]$
η_{H_2O} / η_{Lsg}	Viskosität Wasser/Lösung	$[kg/(s m)]$

Auch Larsen [52] verwendet im Rahmen seiner Dissertation für die Beschreibung des kapillaren Transports von Salzlösungen den Ansatz von Garrecht [19].

5.5 Salzionentransport

Die Ionendiffusion erfolgt unter isobaren und isothermen Bedingungen aufgrund eines makroskopischen Konzentrationsgradienten. Die stationäre Ionendiffusion kann dabei durch das erste Fick'sche Gesetz [53] beschrieben werden:

$$J = D \operatorname{grad} c . \quad (5-18)$$

J	Fluss	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})]$
D	Diffusionskoeffizient	$[\text{m}^2 / \text{s}]$
c	Konzentration	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

Der Fluss J ist derjenige Teilchenstrom der in einer bestimmten Zeit durch ein Einheitsquadrat fließt. Die instationäre Betrachtung von Diffusionsprozessen kann durch die Bilanzierung der Masse m in einem raumfesten Kontrollvolumen V hergeleitet werden [41]:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V c dV = \int_{\partial V} D \operatorname{grad} c dS . \quad (5-19)$$

Die Masse dieses Volumens V verändert sich nur dann, wenn ein Fluss durch die Oberfläche S des Kontrollvolumens stattfindet. Durch die Anwendung des Gauß'schen Integralsatzes und der Gültigkeit dieser Gleichung für beliebig kleine Kontrollvolumina folgt aus der Gleichung (5-19) das zweite Fick'sche Gesetz [41]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \operatorname{div} D \operatorname{grad} c . \quad (5-20)$$

Die Beschreibung der Ionendiffusion in der Porenlösung eines porösen Bauwerkstoffes kann im Allgemeinen auf der Grundlage der Ionendiffusion in der freien Lösung hergeleitet werden. Es muss jedoch der Einfluss der Porenmorphologie berücksichtigt werden, wobei in der Literatur oftmals nur geometrische Aspekte erfasst werden. Da in Bauwerkstoffen eine breite Variation chemischer Einflüsse besteht, ist es notwendig, diese zu identifizieren und quantitativ zu erfassen.

5.5.1 Ionendiffusion in freier Lösung

Die Diffusionskoeffizienten in freier Lösung können durch verschiedenen Ansätze charakterisiert werden, welche im Folgenden kurz dargestellt werden.

1. Die Verbindung des Diffusionskoeffizienten D mit der Viskosität der Lösung η wird durch die Stokes-Einstein Gleichung [54] beschrieben:

$$D = \frac{kT}{6\pi r \eta} \quad (5-21)$$

D	Diffusionskoeffizient	$[\text{m}^2/\text{s}]$
k	Boltzmann Konstante	$[\text{J}/\text{K}]$
T	Temperatur	$[\text{K}]$
η	Viskosität	$[(\text{Ns})/\text{m}^2]$
r	Radius der solvatisierten Ionen	$[\text{m}]$

2. Die Einstein-Smoluchowski Gleichung [54] geht von einer eher mikroskopischen Betrachtungsweise der Diffusion aus, um einen makroskopischen Transportparameter zu charakterisieren. Es wird eine statistische Betrachtungsweise für die Teilchenbewegung gewählt. Die Definition des Diffusionskoeffizienten D erfolgt mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Teilchens nach einer bestimmten Zeit t in bestimmter Entfernung x vom Ausgangsort.

$$D = \frac{x^2}{2t} \quad (5-22)$$

3. Ein Ausdruck für die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten D von der Leitfähigkeit λ einer Lösung kann über die Einstein Gleichung [54] und die absolute Mobilität u_{abs} als Nernst-Einstein Gleichung hergeleitet werden.

$$D_{\text{calc}} = u_{\text{abs}} kT \quad (5-23)$$

D	Diffusionskoeffizient	$[\text{m}^2/\text{s}]$
k	Boltzmann Konstante	$[\text{J}/\text{K}]$
T	Temperatur	$[\text{K}]$
u_{abs}	Absolute Beweglichkeit	$[\text{m}/(\text{Ns})]$

Wird dabei die absolute Mobilität über die Äquivalentleitfähigkeit λ_{eq} ermittelt, folgt für den Diffusionskoeffizienten der folgende Ausdruck:

$$D = \lambda_{eq} \frac{kT}{zeF}. \quad (5-24)$$

D	Diffusionskoeffizient	[m ² /s]
λ_{eq}	Äquivalentleitfähigkeit	[Sm ² /mol]
k	Boltzmann Konstante	[J/K]
T	Temperatur	[K]
F	Faraday Konstante	[C/mol]
e	Elementarladung	[C]
z	elektrochemische Wertigkeit	[-]

Somit ist es nun möglich bei bekannter Äquivalentleitfähigkeit λ_{eq} einer wässrigen Elektrolytlösung den Diffusionskoeffizienten der jeweiligen Ionen der Lösung zu berechnen. Beim Vergleich eines aus der Leitfähigkeit berechneten D_{calc} und eines gemessenen Diffusionskoeffizienten D wird jedoch ersichtlich, dass die Diffusionskoeffizienten zum Teil stark von einander abweichen. Ein Anhaltspunkt dafür gibt die Betrachtung der Konzentrationsabhängigkeit, der Leitfähigkeit λ und des Diffusionskoeffizienten D [54]:

$$\lambda_{eq} = \lambda_{eq}^0 - Ac^{\frac{1}{2}} \quad (5-25)$$

$$D = D_0 \left(1 - \frac{1}{2} Ac^{\frac{1}{2}}\right). \quad (5-26)$$

D	Diffusionskoeffizient	[m ² /s]
A	Konstante	[-]
λ_{eq}^0	Äquivalentleitfähigkeit (unendliche Verdünnung)	[(Sm ²)/mol]
D_0	Diffusionskoeffizient (unendliche Verdünnung)	[m ² /s]

Wie man an den Gleichungen (4-25 und 4-26) sieht, besitzen der Diffusionskoeffizient und die Leitfähigkeit unterschiedliche funktionale Abhängigkeiten von der Konzentration. Dabei erfolgt die Herleitung für die Leitfähigkeit über das Gesetz von Kohlrausch und für den Diffusionskoeffizienten über die Theorie von Debye-Hückel für die Berechnung von Aktivitätskoeffizienten. Eine Voraussetzung für die Anwendung der Nernst-Einstein Gleichung (5-24) ist, dass

dieselben Ionen, welche für die Leitfähigkeit verantwortlich sind, auch die Diffusion bestimmen müssen. Dies ist aber häufig nicht der Fall. Für die Leitfähigkeit sind lediglich geladene Teilchen von Bedeutung, während bei der Diffusion auch Ionenpaare, welche nach außen neutral sind, am Transport teilnehmen können. Das bedeutet, dass die Leitfähigkeit, die mit der Nernst-Einstein Gleichung auf der Basis von gemessenen Diffusionskoeffizienten berechnet wurde, immer größer ist als die gemessene Leitfähigkeit. In [54] geben Borucka *et al.* eine mathematische Herleitung für diesen Sachverhalt mit der folgenden Gleichung exemplarisch für Natriumchlorid an:

$$\lambda' = \lambda_{calc} - \frac{2zF^2}{RT} D_{NaCl}. \quad (5-27)$$

4. Um die Konzentrationsabhängigkeit ausgehend von einem Diffusionskoeffizienten bei unendlicher Verdünnung zu berechnen, kann folgender Ansatz verwendet werden [54], der die Aktivität berücksichtigt:

$$D = BRT \left(1 + \frac{d \ln f_i}{d \ln c_i} \right) \quad \text{mit } B = \frac{u_{abs}}{N_A}. \quad (5-28)$$

u_{abs}	absolute Beweglichkeit	[m/(sN)]
N_A	Avogadrosche Konstante	[1/mol]
R	Gaskonstante	[J/(Kmol)]
T	Temperatur	[K]
f_i	Aktivitätskoeffizient der Spezies i	[-]
c_i	Konzentration der Spezies i	[mol/m ³]

5. Die Berechnung der Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten lässt sich durch den Arrhenius-Ansatz darstellen. Für die Berechnung ist die Kenntnis der Aktivierungsenergie E_A und des Diffusionskoeffizienten D_0 notwendig [55]:

$$D = D_0 e^{-\frac{E_A}{RT}}. \quad (5-29)$$

D_0	Diffusionskoeffizient (unendliche Verdünnung)	[m ² /s]
E_A	Aktivierungsenergie	[J/mol]
R	Gaskonstante	[J/(K mol)]
T	Temperatur	[K]

Die Ermittlung dieser beiden Größen kann anhand des Arrhenius-Diagramms erfolgen [55]. In diesem Diagramm wird der Logarithmus des Diffusionskoeffizienten über den Kehrwert der Temperatur aufgetragen. Als Graph erhält man eine Gerade, deren Geradenfunktion sich aus der logarithmierten Gleichung (5-29) ergibt:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_A}{R} \cdot \frac{1}{T}. \quad (5-30)$$

Für die Umrechnung von Diffusionskoeffizienten bei einer gegebenen Temperatur zu einer anderen Temperatur bietet der Arrhenius Ansatz ebenfalls eine geeignete Möglichkeit.

Zur experimentellen Bestimmung der Diffusionskoeffizienten in freier Lösung gibt es mehrere verschiedene Messverfahren [53, 56]. Für die in Bauwerken und Bauwerkstoffen häufig vorgefundenen Schadsalzen sind in [57, 58] ausgewählte Diffusionskoeffizienten angegeben.

5.5.2 Diffusion in Baustoffen bzw. Bauwerkstoffen

Grundsätzlich ist der diffusive Transport im Bauwerkstoff langsamer als der in freier Lösung. Dieses Phänomen ergibt sich infolge verschiedener Einflüsse. Das Porensystem stellt ein rein geometrisches Hindernis für die Ionen dar und die Porenwände der meisten Bauwerkstoffe beeinflussen durch ihre Reaktivität den Transport der Ionen. Außerdem besteht unter Praxisbedingungen selten eine vollständige Porensättigung, so dass man auch unterschiedliche Feuchtegehalte berücksichtigen muss.

5.5.2.1 Einfluss der Geometrie und der Reaktivität der Porenwand

Zur Erfassung des geometrischen Einflusses des Porensystems auf die Diffusion von Ionen im Bauwerkstoff wird häufig die Tortuosität bzw. der Impedanzfaktor als Wegverlängerung bzw. Verwundenheit eingeführt [21, 15]. Die Tortuosität τ wird durch den Quotienten aus dem Diffusionskoeffizienten in freier Lösung D_{Lsg} und dem effektiven Diffusionskoeffizienten im Bauwerkstoff D_{eff} durch die folgende Gleichung dargestellt:

$$\tau = \frac{D_{Lsg}}{D_{eff}}. \quad (5-31)$$

Häufig wird die Tortuosität noch mit dem Formationsfaktor F und der Porosität ϵ über die Gleichung (5-32) gekoppelt [15, 59, 60], so dass auch für den Formationsfaktor eine rein geometrischer Einfluss zugrunde gelegt wird:

$$F = \frac{\tau}{\epsilon} = \frac{\sigma_{Lsg}}{\sigma_{eff}} = \frac{D_{Lsg}}{D_{eff}} \frac{1}{\epsilon}. \quad (5-32)$$

Der Formationsfaktor wird im Allgemeinen aus Bestimmungen der elektrischen Leitfähigkeit berechnet [61] und dann über die Nernst-Einstein Gleichung (5-24) mit dem Diffusionskoeffizienten verknüpft. Aus der Herleitung über die elektrische Leitfähigkeit wird deutlich, dass der Formationsfaktor generell konzentrationsabhängig ist. Das bedeutet, dass zur Bestimmung des Formationsfaktors als geometrische Einflussgröße dieser geometrische Einfluss separiert werden muss. Das Verhältnis des Formationsfaktors zur Tortuosität nach Gleichung (5-32) zeigt somit, dass bei konstanter Porosität ϵ auch die Tortuosität dieser generellen Konzentrationsabhängigkeit unterliegt.

5.5.2.2 Einfluss des Feuchtegehaltes

Für die Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Feuchtesättigung $\lambda_{eff(x\%)}$ gibt Archie [62] die folgende Gesetzmäßigkeit an.

$$\lambda_{eff(x\%)} = \lambda_{eff(100\%)} \cdot S_w^n \quad (5-33)$$

In dieser Gleichung ist $\lambda_{eff(100\%)}$ die Leitfähigkeit bei vollständiger Sättigung des porösen Materials, S der Feuchtesättigungsgrad und n der Feuchteexponent. Für die Diffusion lässt sich diese exponentielle Abhängigkeit ebenfalls bestätigen, so dass man die Gleichung 5-34 wie folgt übertragen kann.

$$D_{eff(x\%)} = D_{eff(100\%)} S_w^n \quad (5-34)$$

Die experimentell ermittelten Feuchteexponenten n sind für einige Bauwerkstoffe charakteristisch größer als eins z.B. Ziegel und für andere z.B. Sandsteine kleiner als eins. Die zugrunde liegenden Mechanismen für diese Verhalten sind allerdings weitgehend unbekannt.

5.5.3 Messmethoden zur Ermittlung von Diffusionskoeffizienten

Zur Ermittlung der Ionendiffusionskoeffizienten in Bauwerkstoffen ist es zweckmäßig, unterschiedliche Messmethoden in Betracht zu ziehen. Auf der einen Seite erfordern die Messbedingungen, z.B. nicht vollständige Porensättigung, die Wahl der Methode, und auf der anderen Seite kann man durch vergleichende Messungen mit unterschiedlichen Verfahren die Qualität der Messergebnisse erhöhen. Die Anwendungsbereiche unterschiedlicher Methoden sowie die notwendigen Anfangs- und Randbedingungen werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Für spezielle Lösungen der Diffusionsgleichung d.h. unter Einhaltung bestimmter Anfangs- und Randbedingungen, bieten Jost, Crank [53, 63] für gängige geometrische Formgebungen der Probekörper bereits analytische Lösungsansätze.

5.5.3.1 Ausdiffusion

Die Messung der Ionendiffusionskoeffizienten mit Hilfe der Ausdiffusion aus einer Platte kann mit dem in der Abb. 5-2 dargestellten Versuchsaufbau realisiert werden, siehe auch [15].

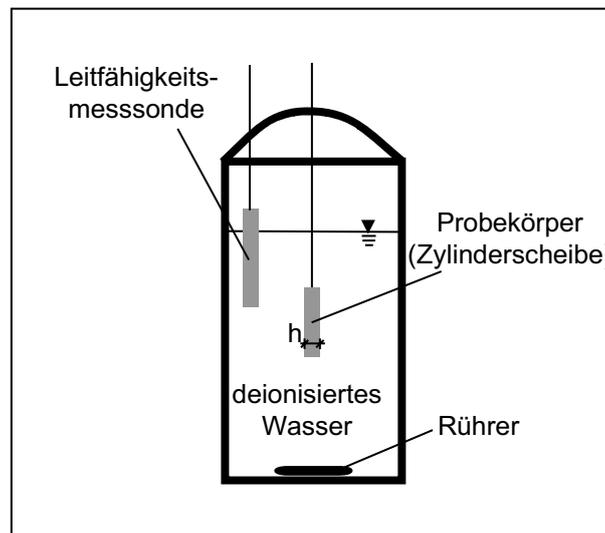


Abb. 5-2: Experimentell Anordnung der Ausdiffusion aus einer Platte

Für diese experimentellen Untersuchungen wird eine salzlösungsbeladene Zylinderscheibe mit der Dicke h und der Konzentration $c = c_0$ in ein mit deionisiertem Wasser gefülltes temperierbares Gefäß eingebracht. Über die Konzentrationsänderung in der die Scheibe umgebenden, als Ionensenke dienenden Lösung ($c=0$) kann unter Einhaltung der Anfangs- und Randbedingungen der Diffusionskoeffizient D wie folgt ermittelt werden [53].

$$\begin{aligned}
c &= c_0 \text{ für } 0 < x < h \text{ bei } t = 0, \text{ und} \\
c &= 0 \text{ für } x = 0 \text{ und } x = h \text{ und } t > 0
\end{aligned}
\tag{5-35}$$

Für die Diffusion aus einer Platte gilt die folgende Gleichung, wenn die Konzentration an den Oberflächen gleich Null gehalten wird:

$$c = \frac{4c_0}{\pi} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{1}{2\nu+1} \sin \frac{(2\nu+1)\pi x}{h} \exp \left(- \left[\frac{(2\nu+1)\pi}{h} \right]^2 D t \right).
\tag{5-36}$$

In dieser Gleichung stellt c die lokale Konzentration dar. Bei einer Messung wird jedoch in der Regel eher die gesamte bzw. mittlere von der Platte abgegebene Ionenmenge gemessen, so dass sich die Verwendung einer mittleren Konzentration \bar{c} empfiehlt:

$$\bar{c} = \frac{1}{h} \int_0^h c \, dx = \frac{8c_0}{\pi^2} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{1}{(2\nu+1)^2} \exp \left\{ - \left[\frac{(2\nu+1)\pi}{h} \right]^2 D t \right\}.
\tag{5-37}$$

Durch das Ersetzen der mittleren Konzentration \bar{c} durch die relative Konzentrationsänderung $\frac{\bar{c} - c_e}{c_a - c_e}$ kann die Gleichung (5-37) wie folgt vereinfacht werden:

$$\frac{\bar{c} - c_e}{c_a - c_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{1}{(2\nu+1)^2} \exp \left\{ - \left[\frac{(2\nu+1)\pi}{h} \right]^2 D t \right\}.
\tag{5-38}$$

Die Anfangs- und Endkonzentrationen der Lösung sind hier mit c_a und c_e angegeben. Für ein hinreichend großes t (Zeit) ergibt sich für das erste Glied eine gute Näherung mit der Gleichung (5-39):

$$\frac{\bar{c} - c_e}{c_a - c_e} \approx \frac{8}{\pi^2} \exp \left(- \frac{t}{\tau} \right) \quad \text{mit } \tau = \frac{h^2}{\pi^2 D}.
\tag{5-39}$$

Aus dieser Gleichung in logarithmierter Form lässt sich die Geradengleichung (5-41) ableiten:

$$\ln \left[\frac{\bar{c} - c_e}{c_a - c_e} \right] \approx \text{const.} - \frac{t}{\tau}, \quad \text{mit } \tau = \frac{h^2}{\pi^2 D}.
\tag{5-40}$$

Der schematische Verlauf dieser Gleichung ist in Abb. 5-3 dargestellt.

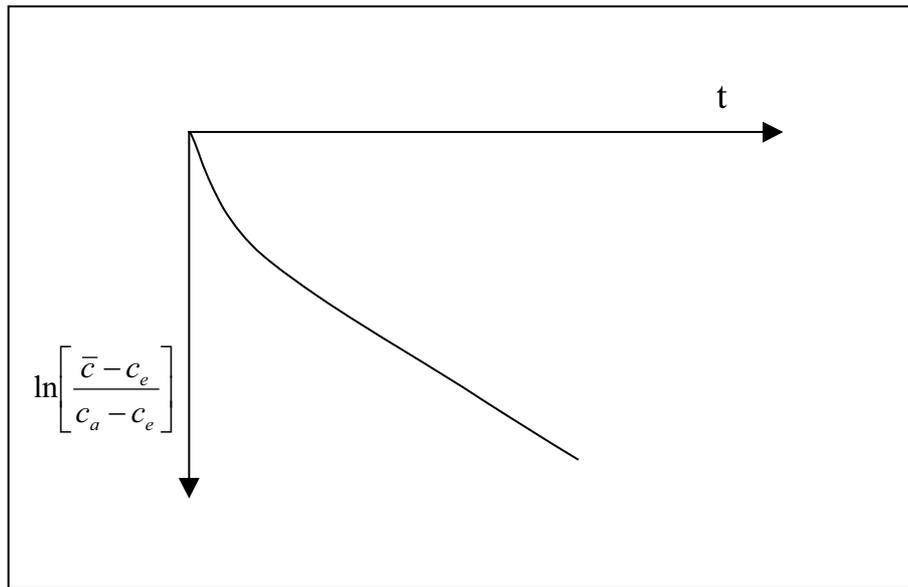


Abb. 5-3: Graphische Darstellung der Gleichung

$$\ln \left[\frac{\bar{c} - c_e}{c_a - c_e} \right] \approx a - bx \text{ mit } b = \frac{\pi^2 D}{h^2} \text{ und } a = \frac{8}{\pi^2} \quad (5-41)$$

Aus dem Anstieg b kann auf der Grundlage der zuvor dargestellten funktionellen Abhängigkeiten der Diffusionskoeffizient aus den Messwerten ermittelt werden.

$$D = \frac{b h^2}{\pi^2} \quad (5-42)$$

Die Ausdiffusion ermöglicht nur die Messung von Ionendiffusionskoeffizienten bei vollständiger Sättigung der Probekörper mit Salzlösung, da die Zylinderscheiben in die Umgebungslösung eingebracht werden und nur die Diffusion zugelassen werden soll. Um einen eindimensionalen Transport zu gewährleisten kann entweder eine Randabdichtung vorgenommen werden oder ein Verhältnis des Durchmessers zur Scheibendicke von mindestens 8:1 gewählt werden [64].

5.5.3.2 Sandwich-Anordnung

Die Sandwich-Anordnung stellt eine weitere Möglichkeit zur experimentellen Ermittlung von effektiven Diffusionskoeffizienten dar [15]. Durch die Anwendung dieser Methode wird im Gegensatz zur Ausdiffusion die Messung von feuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten möglich. Bei der Sandwich-Anordnung werden zwei Scheiben mit deionisiertem Wasser und eine Scheibe mit Salzlösung penetriert.

Die drei Scheiben gleicher Feuchte werden dann so miteinander kontaktiert, dass die salzlösungspenetrierte Scheibe in der Mitte angeordnet ist (Abb. 5-4).

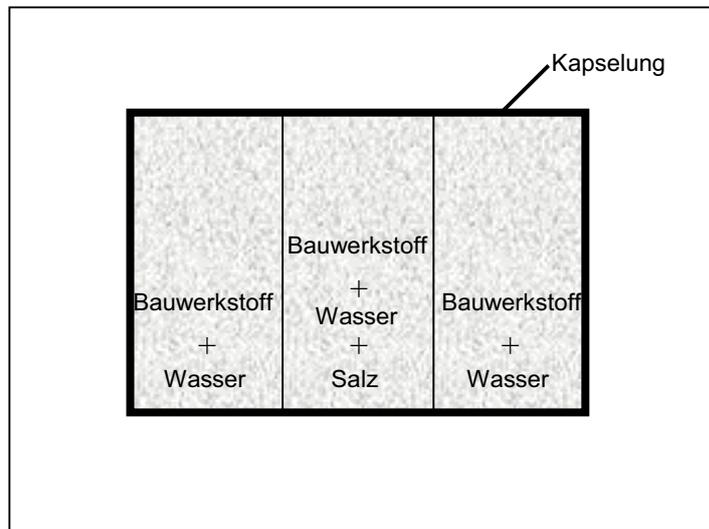


Abb. 5-4: Experimenteller Aufbau der Sandwich-Anordnung

Der zusammengesetzte Probekörper wird gekapselt, so dass keine Feuchtigkeit ausgetragen werden kann und das Auftreten von Advektion durch die Verdunstung an der Oberfläche verhindert wird. Die unterschiedlichen Feuchtegehalte können durch Impuls-Mikrowellen-Trocknung eingestellt werden. Bei dieser Methode ist jedoch zu beachten, dass sich bei Verdunstung des Wassers die Konzentration der Porenlösung erhöht. Die Bestimmung der Diffusionskoeffizienten ist somit nicht nur feuchte- sondern auch konzentrationsabhängig. Auch kann bei einer senkrechten Anordnung der Scheiben die Überlagerung der Diffusion durch Konvektion nicht ausgeschlossen werden. Die Auswertung des Versuches erfolgt anhand der am Versuchsende ermittelten Konzentrationsprofile der drei Scheiben. Nach [15, 84] kann ein gemeinsamer effektiver Diffusionskoeffizient für ein gegebenes Diffusionsmodell durch Fehlerminimierung bezüglich der Messwerte berechnet werden. Die separate Ermittlung der Diffusionskoeffizienten von Scheiben unterschiedlichen Materials wurde nicht diskutiert.

5.5.3.3 Impedanzspektroskopie

Die Impedanzspektroskopie bietet ebenso wie die Sandwich-Anordnung die Möglichkeit, Ionendiffusionskoeffizienten in Bauwerkstoffen in Abhängigkeit unterschiedlicher Feuchten zu ermitteln [15]. Die Methode basiert auf der Messung der elektrischen Eigenschaften der salzlösungsbeladenen Proben (Abb. 5-5). Während der Messung wird an die Proben eine sinusförmige Wechselspannung ange-

legt und das Responseverhalten der Probe ermittelt. Die Auswertung des Responseverhaltens erfolgt anhand eines Ersatzschaltbildes.

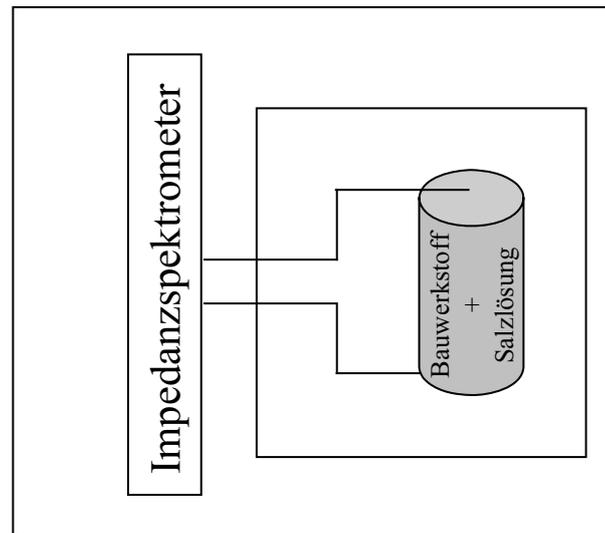


Abb. 5-5: Experimentelle Anordnung der Impedanzspektroskopie

Ein Ersatzschaltbild besteht aus einzelnen Elementen, die in Parallel- oder Reihenschaltung miteinander kombiniert sind und das elektrische Verhalten der Probe wiedergeben. Ideale Elemente eines Ersatzschaltkreises sind der ohmsche Widerstand, der kapazitive Widerstand und der induktive Widerstand. Die Parallelschaltung eines kapazitiven Widerstandes und eines ohmschen Widerstandes in einem Wechselstromkreis entspricht in der Darstellung als komplexe Impedanz einem Halbkreis dessen Mittelpunkt auf der Realachse liegt (Abb. 5-6).

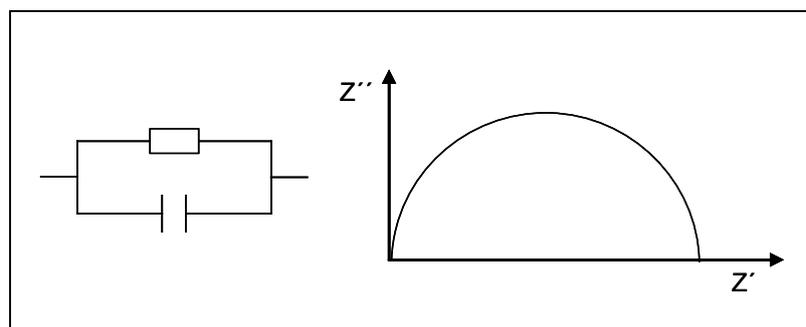


Abb. 5-6: Komplexe Impedanz Z'' der Parallelschaltung eines ohmschen Widerstandes und eines kapazitiven Widerstandes

Zur Beschreibung des elektrischen Verhaltens salzlösungspenetrierteter Bauwerkstoffe muss zur Auswertung der Messdaten ein geeignetes Ersatzschaltbild gefunden werden. Für zweiphasige Systeme sind in der Literatur [65] unter anderem

die beiden folgenden Modelle bekannt. Das Parallelschichtmodell geht von einer Parallelschaltung der beiden Phasen aus (Abb. 5-7).

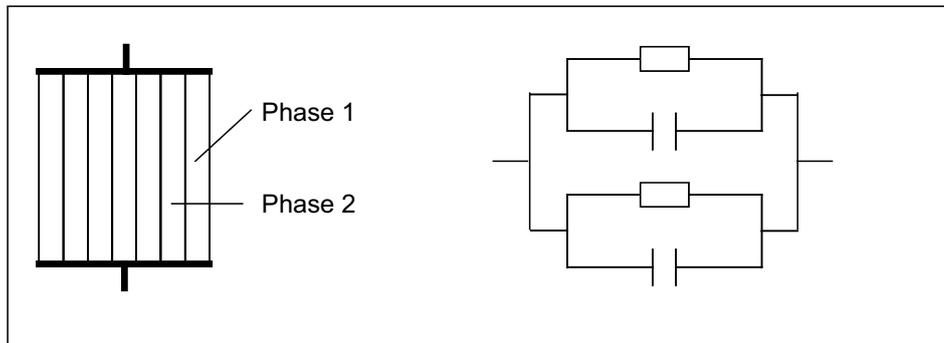


Abb. 5-7: Parallelschichtmodell mit Ersatzschaltbild

Durch das Ersatzschaltbild wird die Parallelschaltung der Phasen verdeutlicht. Im Diagramm der komplexen Impedanz ergibt sich für diese Schaltung ein Halbkreis mit dem Kreismittelpunkt auf der Achse des Realteils. Eine weitere Möglichkeit zur Modellierung eines zweiphasigen Systems ist durch das Serien-Schichtmodell gegeben. Bei diesem Modell sind die Schichten parallel zur Elektrode angeordnet (Abb. 5-8).

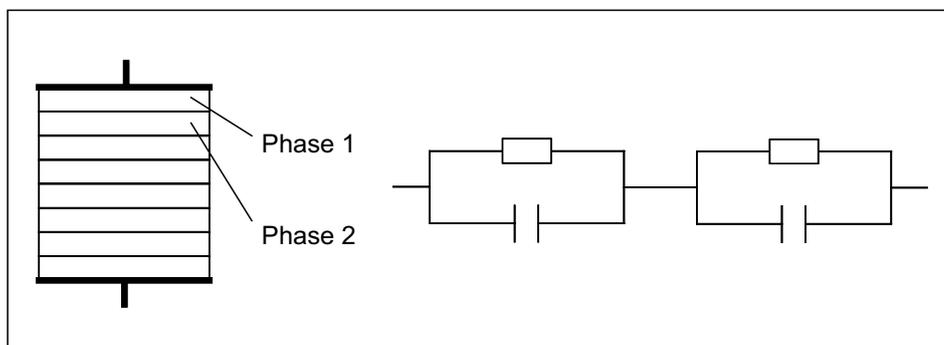


Abb. 5-8: Serienschichtmodell mit Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild zeigt in diesem Fall eine Reihenschaltung der beiden Phasen. Für die Darstellung als komplexe Impedanz erhält man in diesem Fall zwei Halbkreise auf der Realachse.

Die Messdaten von offenporigen salzlösungsbeladenen Proben zeigen in der Darstellung als komplexe Impedanz häufig einen gestauchten Halbkreis, dessen Kreismittelpunkt unterhalb der Realachse liegt. Um dieses nichtideale Verhalten beschreiben zu können, werden üblicherweise verteilte Elemente z.B. `constant phase element` (CPE) herangezogen [66, 67, 68, 69, 70]. Verteilte Elemente sind

empirische Elemente, deren mathematische Formulierungen dieses nichtideale Verhalten abbilden können. Neben der Berechnung dieses Verhaltens muss es jedoch auch eine physikalische Interpretation dieses Verhaltens geben. In der Literatur wird das nichtideale Verhalten der Elementen auf das Auftreten von Grenzflächeneffekten, Diffusionsprozessen und Inhomogenitäten zurückgeführt [70].

5.6 Parameteridentifikation für den Einfluss von Grenzschichten auf den Feuchte- und Salztransport

Für die Berechnung bzw. Vorhersage von Transportprozessen in Bauwerken genügt es nicht nur, den Transport in einem Bauwerkstoff zu betrachten. Da ein Bauwerk meistens aus einer Kombination mehrerer verschiedener Materialien besteht, müssen ebenfalls deren Verbunde untersucht werden. Zum einen können bei Materialverbunden verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften miteinander gekoppelt sein, zum anderen resultiert aus dem Verbund aber auch eine gemeinsame Grenzschicht. In der Literatur gibt es bislang nur wenige Ansätze, diesen Einfluss der Grenzschichten auf den Transport zu berücksichtigen. Eine Arbeit, die sich mit dem Einfluss der Grenzschichten auf den Feuchtetransport beschäftigt, ist die Dissertation von Brocken [71]. Als Feuchtebilanzgleichung wählt er den folgenden Ansatz unter Berücksichtigung eines gemeinsamen Flüssigkeits- und Dampftransportes.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(k\nabla P_c) \quad (5-43)$$

w	Wassergehalt	[kg/m ³]
t	Zeit	[s]
k	effektive Permeabilität	[s]
P_c	makroskopischer Kapillardruck	[Pa]

Auf der Grundlage dieser Gleichung bestimmt er die Permeabilität K_{if} der Grenzschicht mit der folgenden Gleichung.

$$K_{if} = -\frac{q_{if}}{P_{c,ii}(\theta_{l,ii}) - P_{c,i}(\theta_{l,i})} \quad (5-44)$$

q_{if}	Fluß durch die Grenzfläche	[kg/(m ² s)]
θ_l	Wassergehalt	[m ³ /m ³]
K_{if}	Permeabilität der Grenzfläche	[s/m]
P_c	makroskopischer Kapillardruck	[Pa]

Die Indizes if stehen für interface, während i bzw. ii die Materialschichten nummerieren. Dieser Ansatz geht davon aus, dass die Permeabilität der Grenzschicht für den Dampftransport und den Flüssigkeitstransport dieselbe ist. Die Bedeutung des Grenzschichteinflusses auf den Feuchtetransport wurde auch von Holm erkannt [72], jedoch nicht näher spezifiziert. In der Arbeit von Sadouki *et. al.* [73] gibt es erste Ansätze zum Ionentransport unter der Berücksichtigung des Einflusses von Grenzflächen.

6 Charakterisierung der verwendeten Bauwerkstoffe

Der poröse Bauwerkstoff besitzt einen großen Einfluss auf die in ihm stattfindenden Transportprozesse von Feuchte und Salz. Es ist daher wichtig die Porenmorphologie der Bauwerkstoffe zu analysieren und zu quantifizieren.

6.1 Beschreibung der verwendeten Bauwerkstoffe

Der Einfluss der charakteristischen Porenmorphologie eines Bauwerkstoffes kann sowohl rein geometrisch als auch chemisch-physikalisch geprägt sein. Für die Untersuchungen zum Feuchte- und Schadsalztransport erfolgte die Auswahl der Bauwerkstoffe vor dem Hintergrund der Vielfältigkeit der Porenstruktur und ihrem Einfluss auf die Transportprozesse. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wurden die folgenden Bauwerkstoffe gewählt:

- Sandsteine
- Ziegel
- Kompressen.

6.1.1 Sandsteine

Die Auswahl der Sandsteine erfolgte unter Berücksichtigung der Zusammensetzung und der Ausbildung der Gesteine. Dabei wurde eine große Variationsbreite der porenmorphologischen Kennwerte wie z.B. Porosität, Porenradienverteilung und mineralischer Zusammensetzung angestrebt. Die Sandsteine kommen aus unterschiedlichen Regionen in Deutschland mit einem Schwerpunkt in Thüringen. Die folgenden fünf Sandsteine (Gruppe I) wurden bzw. werden im Thüringer Raum abgebaut und als Baumaterial verwendet. Die Benennung der Sandsteine erfolgt in der Regel nach dem Bruchort. Die Kenntnis der porositäts- und transportbedingenden Kennwerte ist die Grundlage für die Einschätzung der Dauerhaftigkeit und Möglichkeiten der Sanierung bestehender Gebäude. Der in Abb. 6-1 dargestellte Oldislebener (OL) und Seeberger (SE) Sandstein sind kieselig gebunden. Der Oldislebener ist ein bräunlich beiger mittel- bis grobkörniger Sandstein. Der Seeberger Sandstein hingegen ist ein gelblich beiger Feinsandstein. Trotz des größeren Anteils an Grobporen besitzt der Oldislebener Sandstein eine geringere Porosität als der Seeberger Sandstein.

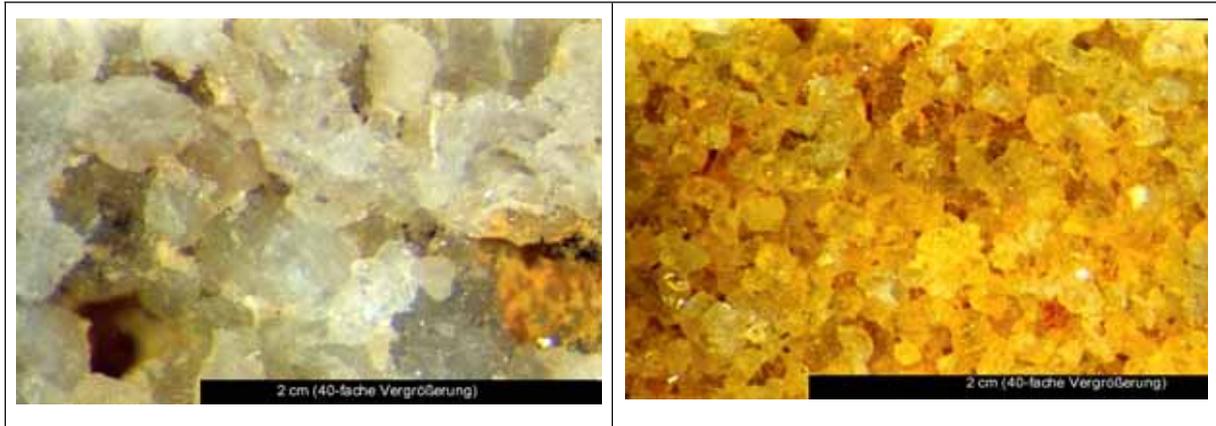


Abb. 6-1: Oldislebener (links) und Seeberger (rechts) Sandstein

Mit dem Kelbraer (KE), Bad Frankenhäuser (BF) (Abb. 6-2) und dem Vogelsberger Sandstein (VO) (Abb. 6-3) wurden drei Steine mit im Allgemeinen toniger Bindung gewählt (Abb. 6-2 und Abb. 6-3).

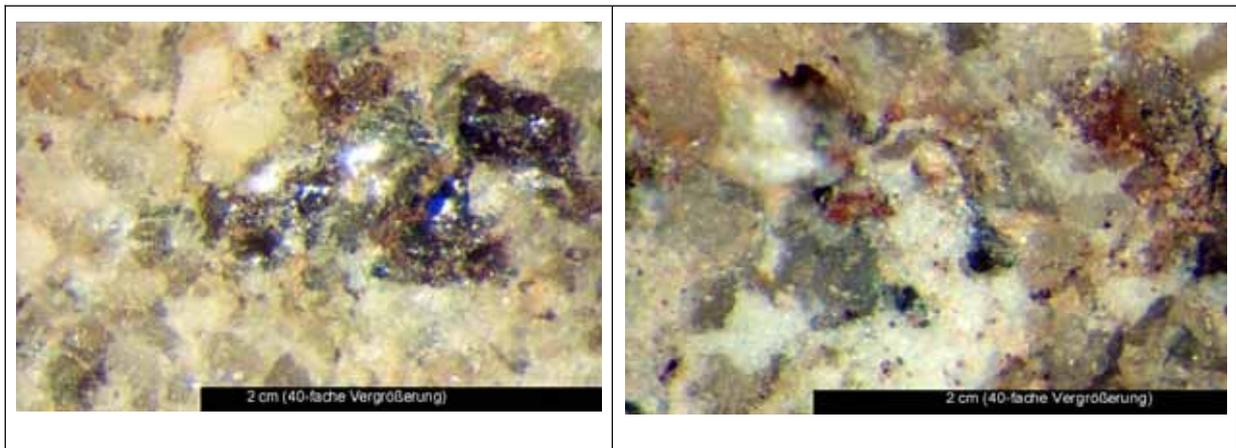


Abb. 6-2: Bad Frankenhäuser und Kelbraer Sandstein

Der Sandstein aus der Nähe von Bad Frankenhausen ist ein mittelkörniger Sandstein ohne nennenswerte Schichtungsmerkmale. Der Kelbraer Sandstein wird in der Nähe von Kelbra abgebaut und ist ein mittel- bis grobkörniger Sandstein.

Der Vogelsberger Sandstein stammt aus der Nähe von Köllda und weist eine feine bis mittelkörnige Struktur auf. Sowohl der Kelbraer Sandstein als auch der Vogelsberger Sandstein besitzen eine tonig-ferritische Bindung.

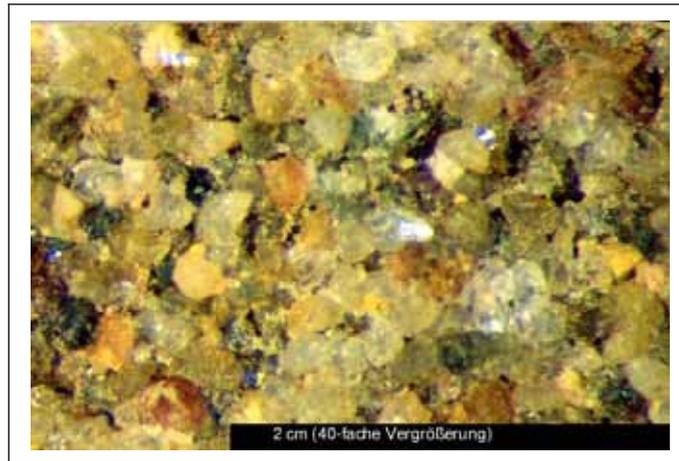


Abb. 6-3: Vogelsberger Sandstein

Des Weiteren wurden fünf Sandsteine aus dem übrigen Raum Deutschlands (Gruppe II) gewählt. Der Obernkirchener Sandstein (OK) ist ein feinkörniger, beige-weißer Sandstein aus dem Keuper aus Obernkirchen bei Hannover. Er hat eine kieselige Bindung und weist keine Schichtung auf (Abb. 6-4). Der Bucher Sandstein (BU) hingegen besitzt eine sehr deutliche Schichtung (Abb. 6-4). Er ist kaolinitisch gebunden und besitzt eine wesentlich gröbere Körnung. Der Steinbruch befindet sich in Buch bei Bamberg.



Abb. 6-4: Obernkirchener und Bucher Sandstein

Der Sander, Wüstenzeller (Abb. 6-5) und Rühthener Sandstein (Abb. 6-6) besitzen eine tonige Bindung. Der Sander Sandstein (SA) ist ein feinkörniger Quarzsandstein ohne Schichtung mit überwiegender toniger Bindung. Er ist aus dem Keuper und wird in Sand (Bayern) abgebaut.

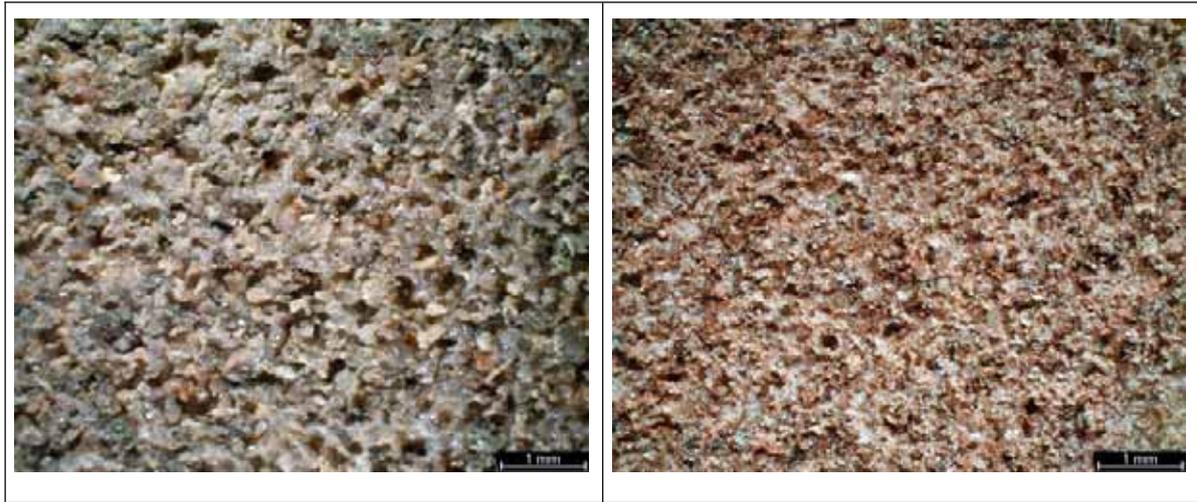


Abb. 6-5. Sander und Wüstenzeller Sandstein

Der Wüstenzeller Sandstein (WÜ) ist ein feinsandiger Quarzsandstein mit tonig-ferritischem Bindemittel (Abb. 6-5). Er ist aus dem unteren Trias und wird in Wüstenzell bei Würzburg abgebaut. Der Rüthener (RÜ) ist fein bis mittelkörnig und besitzt eine hellgrüngraue Farbe (Abb. 6-6). Er besitzt braun-orange punktartige Ausfällung von Eisenhydroxiden. Er zeigt keine Schichtung. Der Bruchort befindet sich bei Rüthen im Sauerland.

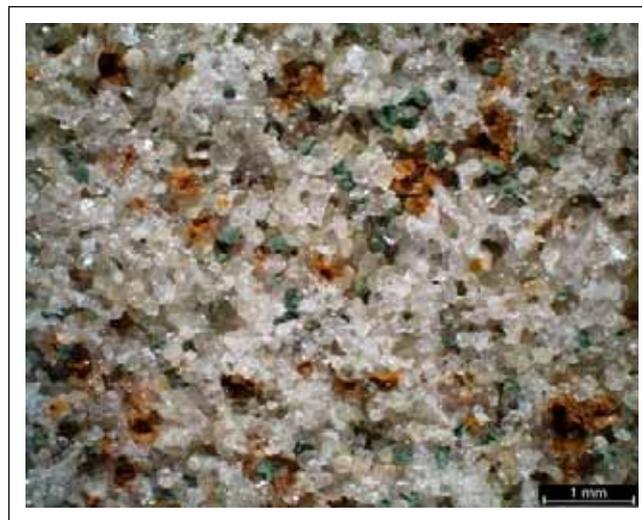


Abb. 6-6. Rüthener Sandstein

6.1.2 Ziegel

Für die Untersuchungen wurden handelsübliche extrudierte Vollziegel verwendet. Der Ziegel wies häufig schwarze Kerne auf und wurde deshalb in zwei unterschiedlichen Zonen (rot (r), schwarz (s)) charakterisiert (Abb.6-7). Die schwarzen Kerne entstehen durch Verbrennung organischer Substanzen bei begrenzter Oxidation. Dies wird häufig durch zu schnelle Aufheizraten und damit durch ein früh-

zeitig dichtes Gefüge in den Randzonen bewirkt. Der Einfluss einzelner Faktoren wie z.B. Anteil organischer Bestandteile und Pressdruck bei der Herstellung auf die Größe und Ausprägung dieser schwarzen Kerne wurde bereits von mehreren Autoren untersucht [z.B. 74, 75].



Abb.6-7: Ziegel (r), Ziegel (s)

6.1.3 Kompressen

Es wurden verschiedene Tonmineralien-Cellulose-Zuschlag Kompressen untersucht. Die Kompressen wurden aus Mischungen von Kaolin / Bentonit – Cellulose – Sand und aus Bentonit – Cellulose – Blähglas hergestellt. Dabei wurden die im Labor unter Verwendung von Sand als Magerungsmittel angemischten Kompressen stets im gleichen Volumenverhältnis der einzelnen Komponenten hergestellt. Die Raumteile betragen 1 : 1 : 6 für Bentonit : Cellulose : Sand. Als Anmachwasser wurde für die mit Sand gemagerten Mischungen ca. 20 m-% (Masseprozent) der Trockenmischung verwendet. Die Menge des Anmachwassers wurde je nach Verarbeitbarkeit gewählt. Ebenso kamen auch handelsübliche Bentonit – Cellulose – Sand – Kompressen zum Einsatz. Die Wahl der unterschiedlichen Materialien ist im Fall der jeweiligen Laboruntersuchungen angegeben.

6.1.4 Modellwerkstoff Glasfilterplatten

Als Modellwerkstoff wurden Glasfilterplatten aus DURAN® Borosilikatglas der Firma Schott verwendet. Die Glasfilterplatten besitzen die Porosität 5. Dies bedeutet, dass die Poren eine Nennweite von 1,0-1,6 µm haben. Bedingt durch ihren speziellen Herstellungsprozess besitzen sie ein sehr homogenes Porensystem. Die Verwendung von Glasfilterplatten ermöglicht zudem Paralleluntersuchungen mit gleichem Porensystem.

6.2 Bestimmung der Porenstrukturkennwerte

Für die Charakterisierung der rein geometrischen und chemisch-physikalischen Einflüsse auf die im Porensystem stattfindenden Transportprozesse ist es vorteilhaft, unterschiedliche Messmethoden parallel zu nutzen, um den Informationsgehalt zu vergrößern und mögliche Fehler bei der Bestimmung aufzudecken.

6.2.1 Porosität

Für die Berechnung der Porosität der verwendeten Baustoffe und Bauwerkstoffe wurde die Reindichte $\rho_{re, a}$ mit einem Gasverdrängungspyknometer (AccuPyc 1330) [34] an Pulverproben (Korngröße $< 63 \mu\text{m}$) [42] bestimmt. Die Rohdichte $\rho_{ro, g}$ wurde mit einem Pulverpyknometer (GeoPyc 1360) [35] an stückigem Probengut (Durchmesser $\sim 5\text{mm}$) über die Messung des vom Probengut verdrängten Volumens ermittelt. Für die Berechnung der offenen Porosität wurde eine weitere Rohdichte $\rho_{ro, a}$ mit dem Gasverdrängungspyknometer (AccuPyc 1330) an stückigem Probengut (Durchmesser $\sim 5\text{mm}$) bestimmt. Das ermittelte Volumen ist in diesem Fall das Volumen der Gesteinsmatrix, welche nicht vom Gas durchdrungen werden kann. Die Gesamtporosität und offene Porosität können anhand der zuvor genannten verschiedenen Volumen bzw. Dichten berechnet werden. Bei der Charakterisierung von wasserlöslichen Baustoffen ist die Ermittlung der Porositäten durch das AccuPyc und das GeoPyc besonders vorteilhaft, da das Messmedium kein Wasser ist. Es unterscheidet sich somit von dem eigentlichen Transportmedium Wasser bzw. Salzlösung, welches zu leichten Abweichungen in vergleichenden Messungen führen kann. Um trotzdem vergleichbare Ergebnisse für unterschiedliche Bauwerkstoffe zu erhalten, wurden alle Proben mit dem AccuPyc 1330 und dem GeoPyc 1360 gemessen. In der Tab. 6-1 sind die offenen Porositäten und die Gesamtporositäten der untersuchten Bauwerkstoffe aufgeführt. Für die Betrachtung von Transportprozessen im Porensystem ist jedoch hauptsächlich die offene Porosität von Interesse. Der Vergleich der offenen Porosität mit der Gesamtporosität kann zusätzlich Anhaltspunkte für die Vernetzung des Porensystems liefern.

Tab. 6-1: Porositäten der verwendeten Bauwerkstoffe

Bauwerkstoff	Gesamtporosität [Vol-%]	Offene Porosität [Vol-%]
Vogelsberger Sandstein	33,2 ± 1,2	31,0 ± 1,3
Seeberger Sandstein	23,9 ± 0,9	22,4 ± 0,3
Kelbraer Sandstein	20,1 ± 1,3	17,9 ± 1,2
Oldislebener Sandstein	16,5 ± 0,1	15,5 ± 0,4
Bad Frankenhäuser Sandstein	15,7 ± 2,9	11,2 ± 2,6
Rüthener Sandstein	24,6 ± 1,2	24,3 ± 1,2
Bucher Sandstein	24,6 ± 0,9	24,3 ± 0,5
Sander Sandstein	24,5 ± 0,5	23,9 ± 1,8
Obernkirchener Sandstein	20,2 ± 1,0	20,2 ± 1,0
Wüstenzeller Sandstein	16,4 ± 1,4	16,1 ± 1,3
Ziegel (s)	34,2	34,2
Ziegel (r)	28,5	28,5
Kompresse A	65,4	63,6
Kompresse B	66,1	63,9
Kompresse M	29,1	28,4
Kompresse K	31,4	30,3

6.2.2 Porenradienverteilung

Die Porenradienverteilung wurde durch Quecksilberdruckporosimetrie ermittelt. Die Auswertung dieser Messmethode basiert auf den Modellvorstellungen, dass das Porensystem eines Bauwerkstoffes aus zylindrischen Kapillaren besteht. Das Quecksilber wird für die Messung unter einem definierten Druck p in das Porensystem hineingepresst. Mit Hilfe der Washburn-Gleichung (3-1) kann somit durch Einsetzen des Benetzungswinkels Θ und der Oberflächenspannung γ von Quecksilber dem jeweiligen Druck p ein spezifischer Porenradius r zugeordnet werden [36]. Für Porensysteme, die stark von der geometrischen Struktur einer Zylinderkapillare abweichen, kann es bei Zugrundelegung dieser Modellvorstellung zu großen Abweichungen von der tatsächlichen Abmessungen der Porenöffnungen kommen. Die Ergebnisse der Messungen an den gewählten Bauwerkstoffen sind in den folgenden Diagrammen wieder gegeben. Die gewählte Darstellung ermöglicht einen ersten Vergleich der Bauwerkstoffe bezüglich ihres mittleren Porenradius.

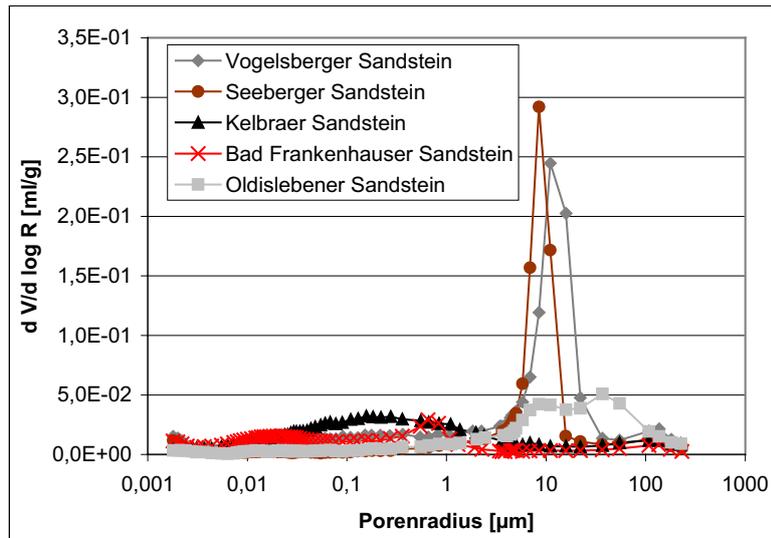


Abb. 6-8: Porenradienverteilung Sandsteine Gruppe I

Der Seeberger und der Vogelsberger Sandstein besitzen ein deutlich ausgeprägtes Maximum des mittleren Porenradiendurchmessers, wohingegen der Oldislebener Sandstein eine bimodale Porenradienverteilung besitzt. Der Bad Frankenhäuser und der Kelbraer Sandstein zeigen eine eher fein gegliederte Porenradienverteilung ohne ausgeprägte Maxima. Die Porenradienverteilungen der Sandsteine der Gruppe II zeigen fast alle ein ausgeprägtes Maximum. Ausgenommen davon ist der Sander Sandsteins mit einer bimodalen Verteilung der Porenradien.

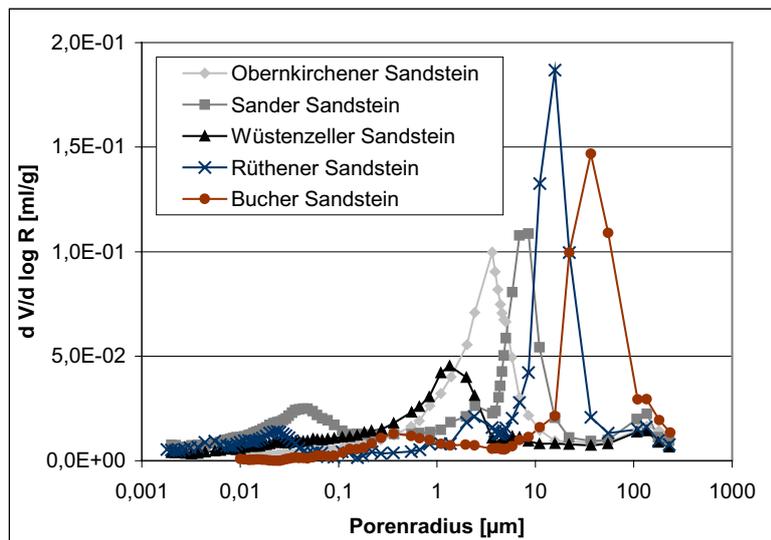


Abb. 6-9: Porenradienverteilung Sandsteine Gruppe II

Für den Ziegel wurden zur Untersuchung des Einflusses des Brennregimes auf die Ausbildung des Porensystems Messungen der Porenradienverteilungen in den unterschiedlich gefärbten Bereichen durchgeführt (Abb. 6-10).

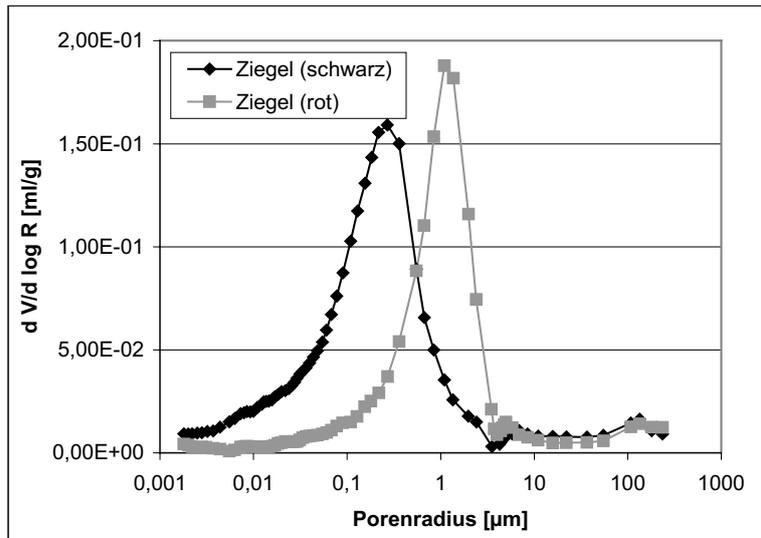


Abb. 6-10: Porenradienverteilung im Ziegel

Der qualitative Verlauf der beiden gemessenen Porenradienverteilungen ist ähnlich und weist in beiden Fällen ein deutliches Maximum auf. Im roten Bereich des Ziegels wurde jedoch ein größerer mittlerer Porenradius als im schwarzen Bereich ermittelt. Die Ermittlung der Porenradienverteilung für die Kompressen konnte auf Grund der geringen Druckfestigkeit nicht durchgeführt werden.

6.2.3 Innere Oberfläche

Eine häufig verwendete Messmethode zur Bestimmung der spezifischen inneren Oberfläche von Bauwerkstoffen ist das BET-Verfahren [37], ein Stickstoff-Adsorptionsverfahren nach Brunauer, Emmet und Teller. Bei dieser Messmethode wird die Menge an adsorbiertem Stickstoff bei einer definierten Temperatur durch den Druckabfall in der Messkammer gemessen. Anhand der bekannten Größe eines Stickstoffmoleküls kann dann unter Zugrundelegung einer monomolekularen Belegung der Oberfläche des Bauwerkstoffes die spezifische innere Oberfläche berechnet werden.

Der Vergleich der durch Stickstoffadsorption ermittelten inneren Oberfläche spiegelt die breite Vielfalt der Porenmorphologie der gewählten Sandsteine wider. Der Vogelsberger, der Kelbraer und der Bad Frankenhäuser Sandstein besitzen mit ca. $4 \text{ m}^2/\text{g}$ die größten inneren Oberflächen. Die inneren Oberflächen des Seeberger und des Oldislebener Sandsteins sind hingegen mit ca. $1\text{-}1,5 \text{ m}^2/\text{g}$ wesentlich kleiner. Dies lässt sich leicht anhand der Bindung der Sandsteine erklären. Die großen inneren Oberflächen der Sandsteine mit den ca. $4 \text{ m}^2/\text{g}$ sind hauptsächlich durch die Feingliedrigkeit der tonigen Bindung bedingt.

Tab. 6-2: Oberflächen der Bauwerkstoffe

Bauwerkstoff	Oberfläche _{BET} [m ² /g]
Vogelsberger Sandstein	3,98
Seeberger Sandstein	1,63
Kelbraer Sandstein	3,76
Oldislebener Sandstein	0,93
Bad Frankenhäuser Sandstein	3,74
Rüthener Sandstein	4,72
Bucher Sandstein	0,73
Sander Sandstein	4,96
Obernkirchener Sandstein	0,85
Wüstenzeller Sandstein	2,33
Ziegel (s)	5,30
Ziegel (r)	0,54
Kompresse A	52,28
Kompresse B	62,47
Kompresse M	3,31
Kompresse K	0,47

Die beiden Sandsteine aus Oldisleben und Seeberg sind silikatisch gebunden, unterscheiden sich jedoch in der Körnung. Daher resultiert auch in diesem Fall die größere innere Oberfläche aus der feineren Körnung des Seeberger Sandsteins.

Die Charakterisierung der Bauwerkstoffe über die Körnung, Bindungsart, Porosität, Porenradienverteilung und Oberfläche bietet erste Möglichkeiten zur Einschätzung von Transportgeschwindigkeiten von Feuchte und Ionen (Porenradien, Verknüpfung des Porensystems) und der chemischen Wechselwirkungen zwischen Porenlösung und Porensystem (Größe der Oberfläche, mineralische Zusammensetzung).

7 Charakterisierung der Advektion

Die Advektion bezeichnet einen Transportprozess von Feuchte und Salzen in einer Lösung. Dabei wird das Salz meist in gelöster Form mit der Feuchte transportiert. Für die Beschreibung des Feuchtetransportes in porösen Bauwerkstoffen ist es auch notwendig, Feuchtequellen bzw. -senken mit zu berücksichtigen. Verschiedenen Ursachen des Flüssigkeitstransportes wie z.B. Befeuchtung, Trocknung und Dichtegradienten in der Porenlösung werden im Folgenden analysiert und quantifiziert.

7.1 Flüssigkeitstransport infolge Befeuchtung

7.1.1 Verwendetes Mess- und Auswerteverfahren

Eine Möglichkeit zur experimentellen Charakterisierung des Feuchtetransports in porösen mineralischen Bauwerkstoffen im Kontakt mit einer anstehenden Lösung bietet die DIN EN ISO 15148 [48]. Diese Norm beschreibt die Bestimmung von Wasseraufnahmekoeffizienten A_w von Baustoffen und Bauprodukten im Kontakt mit anstehender Lösung. Dabei beschreibt der Wasseraufnahmekoeffizient die Wasseraufnahme des Probekörpers in Abhängigkeit der Saugfläche und der Wurzel der Zeit. Das Messverfahren und dessen Auswertung basiert auf kurzen Messzeiten bis zu 24 h.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen zum Kapillartransport von unterschiedlich konzentrierten Salzlösungen und Wasser an verschiedenen Bauwerkstoffen durchgeführt. Die Auswertung dieser Experimente erfolgte vor dem Hintergrund des im Abs. 5.2.2 dargestellten Lösungsweges der Bewegungsgleichung eines Fluides in einer Einzelkapillare [49, 50, 51]. Für die Herleitung ist dabei zwischen einer senkrechten und waagerechten Kapillare zu unterscheiden. Die Lösung dieser Bewegungsgleichung kann im Falle einer senkrecht stehenden Kapillare (Richtung z) mit dem Radius r_k durch den funktionalen Zusammenhang der Gleichung (5-11) wiedergegeben werden. Für $T = \frac{p_k r_k^2}{\eta \cdot 8 \cdot h^2} \cdot t = \frac{k}{h^2} \cdot t$ und $Z = \frac{z}{h}$ kann die Gleichung wie folgt vereinfacht werden.

$$T = -Z - \ln(1 - Z) \quad (7-1)$$

Im Vergleich dazu erhält man für die Lösung der Bewegungsgleichung (5-13) im Fall der horizontalen Kapillare (Richtung x) mit $T = \frac{P_k \cdot r_k^2}{\eta \cdot 8} \cdot t = k \cdot t$ folgende Beziehung.

$$T = \frac{1}{2} x^2 \quad (7-2)$$

Die Gleichungen (7-1 und 7-2) bilden somit die Grundlage der Auswertung der durchgeführten Experimente.

7.1.2 Experimentelle Untersuchungen

In den folgenden experimentellen Untersuchungen wurden Wasseraufnahmen senkrecht stehender Probekörper verschiedener Bauwerkstoffe im Kontakt mit unterschiedlich konzentrierten Lösungen durchgeführt. Die verwendeten Probekörper hatten dabei eine Länge von ca. 7 cm und einen Durchmesser von ca. 5 cm. Sie wurden für die Untersuchungen bis zur Massekonstanz bei 105 °C getrocknet. Anschließend wurden sie an der Mantelfläche versiegelt, so dass ein eindimensionaler Transport vorausgesetzt werden konnte. Der Beginn des kapillaren Transportes erfolgte durch das Eintauchen der einen Stirnfläche in die Lösung (Abb. 7-1). Die andere Stirnfläche wurde so versiegelt, dass Feuchtigkeit nicht aus der Umgebungsluft aufgenommen werden konnte. Die Untersuchungen erfolgten bei 25 °C.

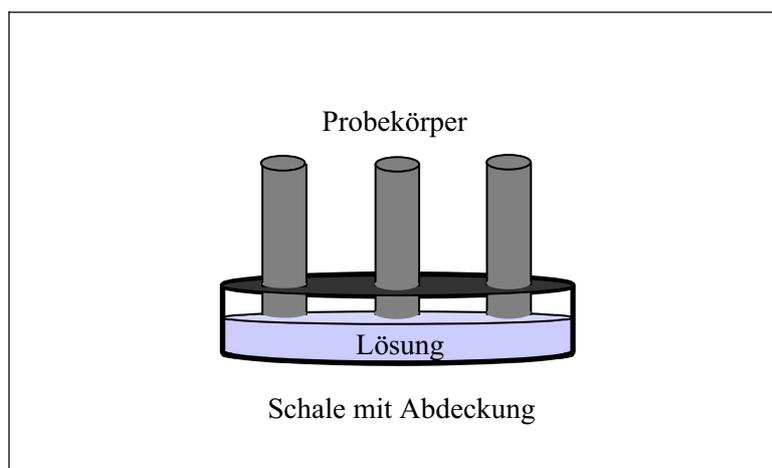


Abb. 7-1: Experimentelle Anordnung zur kapillaren Lösungsaufnahme

Um eine Veränderung der Konzentration der Lösung in der Schale zu verhindern, wurde diese bis auf die Eintrittsöffnungen für die Probekörper versiegelt. Auf

Grund der Homogenität der Probekörper und der guten Sichtbarkeit der Steighöhe der Lösung im Stein konnte die zeitabhängige Messung der Steighöhen mit Hilfe eines Metallmaßstabes erfolgen. Die Messergebnisse für den Sander Sandstein bei der Wahl einer gesättigten Magnesiumsulfatlösung sind als Steighöhe z über die Versuchsdauer in der folgenden Abbildung (Abb. 7-2) aufgetragen.

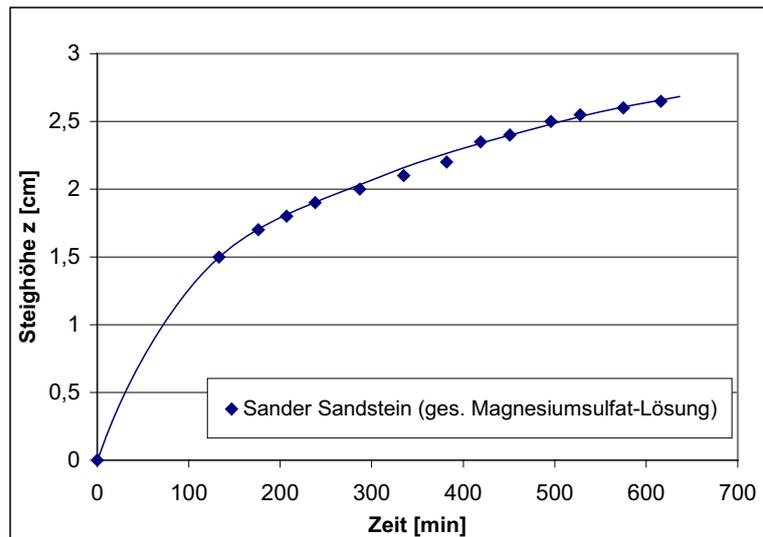


Abb. 7-2: Steighöhe z in Abhängigkeit der Zeit (Sander Sandstein)

7.1.3 Auswertung

Für die detailliertere Charakterisierung der erhaltenen Messkurve wird eine Auswertung mit einer Reihenentwicklung vorgenommen. Nach den zuvor getroffenen Annahmen für eine Kapillare wird von der folgenden Gleichungsform ausgegangen:

$$T = -Z - \ln(1 - Z) \quad (7-3)$$

Der letzte Term wird in Reihe entwickelt [50, 51],

$$\ln(1 - Z) = -\left(Z + \frac{Z^2}{2} + \frac{Z^3}{3} + \frac{Z^4}{4} + \frac{Z^5}{5} + \dots \right) \quad (7-4)$$

so dass

$$\frac{T}{Z^2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3}Z + \frac{1}{4}Z^2 + \frac{1}{5}Z^3 + \dots \quad (7-5)$$

folgt. Mit hinreichender Genauigkeit kann nach dem zweiten Glied die Reihe abgebrochen werden. Dies ist beispielhaft in Abb. 7-3 für den Sander Sandstein dargestellt.

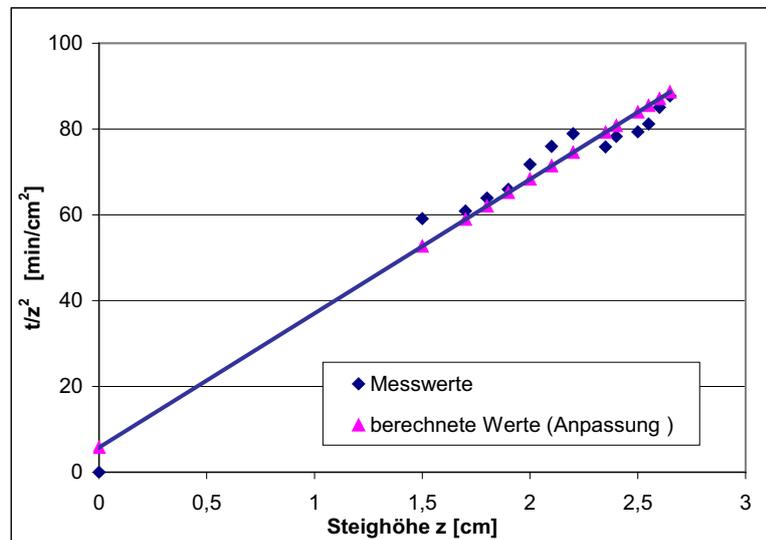


Abb. 7-3: Darstellung von t/z^2 in Abhängigkeit der Steighöhe z

Für $T = \frac{k}{h^2} \cdot t$ und $Z = \frac{z}{h}$ erhält man dann durch das Einsetzen in (7-5) die folgende

Abhängigkeit der Steighöhe z von $\frac{t}{z^2}$.

$$\frac{t}{z^2} = \frac{1}{2k} + \frac{1}{3kh} z \quad (7-6)$$

Anhand der ermittelten Parameter für die Steigung der Geraden und den Schnittpunkt mit der y-Achse (Abb. 7-3) lässt sich der berechnete Verlauf mit dem gemessenen Verlauf der Steighöhe z über die Zeit vergleichen (Abb. 7-4). Anhand der aufgetragenen Messwerte und den zuvor beschriebenen, berechneten Werten kann man erkennen, dass die gewählte Auswertung der Messdaten eine gute Näherung des Prozesses liefert. Die aus der Gleichung (5-11) ableitbaren Größen wie z.B. maximalen Steighöhe und Kapillarradius können jedoch nur bedingt auf reale Bauwerkstoffe angewendet werden. Das Zugrundelegen der Einzelkapillare als Modell bildet die Porenmorphologie des Bauwerkstoffes nur näherungsweise ab.

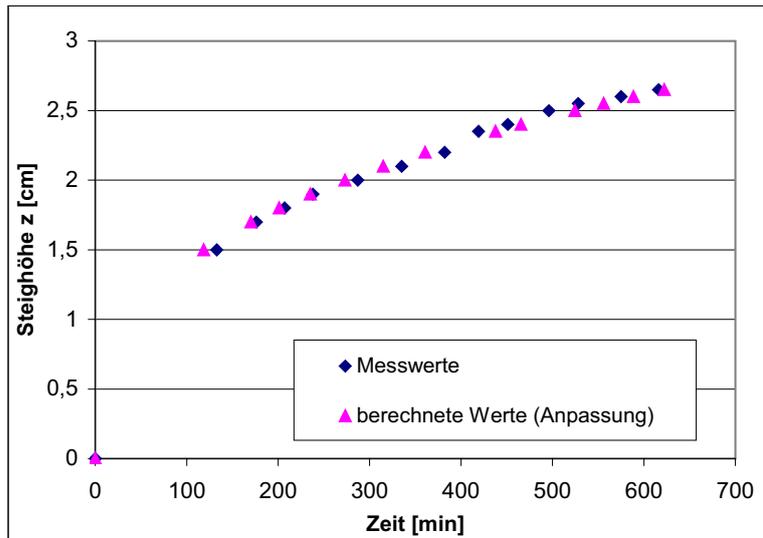


Abb. 7-4: Steighöhe z in Abhängigkeit der Zeit (Sander Sandstein)

Bei der Flüssigkeitsbewegung in der senkrechten Kapillare wurde also im Gegensatz zur waagerechten Kapillare der Schwereterm berücksichtigt. Die Darstellung der Ergebnisse für den Sander Sandstein beim Kontakt mit drei unterschiedlich konzentrierten $MgSO_4$ -Lösungen (0,5 molar (M), 1,5 molar, 3,0 molar) erfolgt in Abb. 7-5.

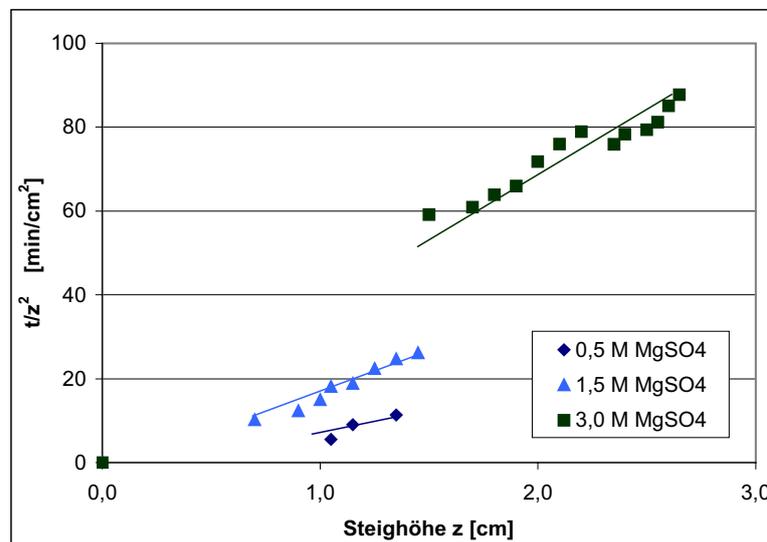


Abb. 7-5: Darstellung von t/z^2 in Abhängigkeit der Steighöhe z

Nach Gleichung (7-6) wird der Einfluss der Schwerkraft durch den Steigungsterm dieser linearen Gleichung berücksichtigt. Anhand der Abb. 7-5 kann man erkennen, dass mit zunehmender Konzentration der Porenlösung die Steigung zunimmt und damit deren Einfluss wächst. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit

zunehmender Konzentration der Lösung die Dichte ρ und die Zähigkeit η zunehmen. Die berechneten Werte der Steigungen sind in Tab. 7-1 enthalten.

Tab. 7-1: Ermittelte Steigungen

	Steigung [min/cm ³]
0,5 M MgSO ₄ -Lösung	7,77
1,5 M MgSO ₄ -Lösung	18,49
gesättigte MgSO ₄ -Lösung	31,26

Die Auftragung der Steigungen über die Konzentration der Porenlösung ist in Abb. 7-6 dargestellt.

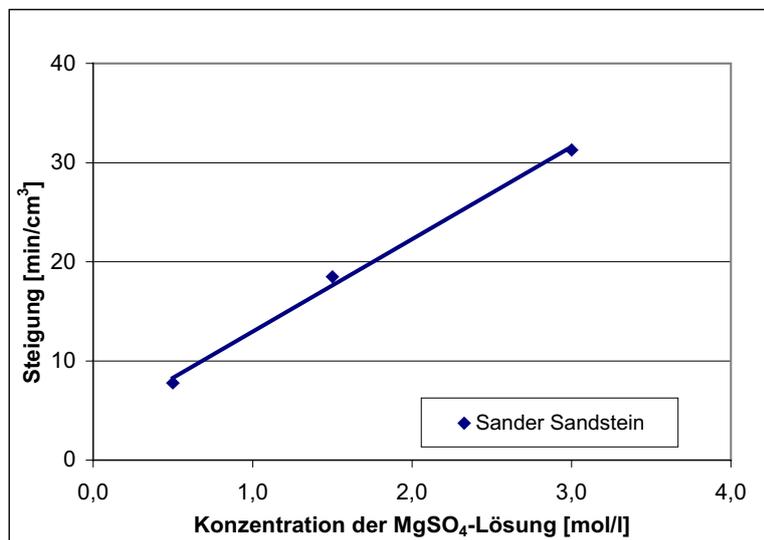


Abb. 7-6: Ermittelte Steigungen in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung

Die Zunahme der Steigung mit der Konzentration kann im untersuchten Bereich linear angenommen werden. Es wird dadurch deutlich, dass beim senkrechten kapillaren Saugen von Salzlösungen die Berücksichtigung des Schwerekraftterms eine wichtige Rolle spielt und gleichzeitig die Abweichung der Steighöhe von einer \sqrt{t} -Abhängigkeit stark abweicht. Je höher die Konzentration der Lösung, desto stärker weicht die Beschreibung des kapillaren Saugen von einer \sqrt{t} -Abhängigkeit ab.

7.2 Flüssigkeitstransport infolge Trocknung

Beim Flüssigkeitstransport infolge Trocknung wird im Folgenden der Umkehrprozess der Befeuchtung betrachtet. Es werden dem feuchten Bauwerkstoffen durch Lagerung in verschiedenen Klimata Feuchtigkeit entzogen.

7.2.1 Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Untersuchung der Trocknung kapillarporöser Bauwerkstoffe die in Abb. 7-7 dargestellte horizontale experimentelle Anordnung gewählt. Die für die Untersuchungen gewählten Probekörper waren zylinderförmig mit einem Durchmesser von ca. 5 cm und einer Länge von ca. 8 cm. Für eine gleichmäßige Penetration wurden die Probekörper in Wasser bzw. Salzlösungen getaucht. Zum Abdichten wurden die Mantelfläche und eine der Stirnseiten mit einer Latexhülle versehen. Die frei bleibende Stirnseite wurde im Experiment der Klimatisierung ausgesetzt.

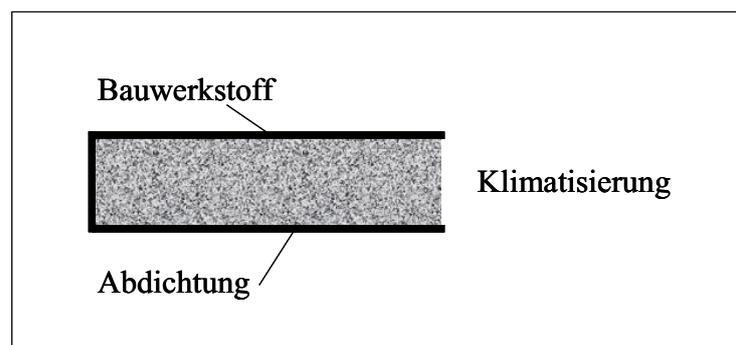


Abb. 7-7: Experimentelle Anordnung des Trocknungsversuches

Um die maßgebliche Einflussfaktoren der Trocknungsprozesse separieren und detektieren zu können, wurden die Art und Konzentration der Penetrations- bzw. Porenlösungen sowie das gewählte Klima variiert. Durch die Wahl verschiedener Bauwerkstoffe wurde der Einfluss der Porenmorphologie sowohl auf die Bindungs- und Transporteigenschaften als auch auf die Eigenschaften der Porenlösungen untersucht.

7.2.2 Modell des Trocknungsverlaufes

Die Auswertung des Trocknungsverlaufes wurde anhand der zeitlichen Abnahme der Masse der Probekörper vorgenommen. Ein typischer Verlauf der Trocknungskurve lösungsbeladener Bauwerkstoffe ist anhand der Messwerte für den Sander Sandstein in der Abb. 7-8 dargestellt.

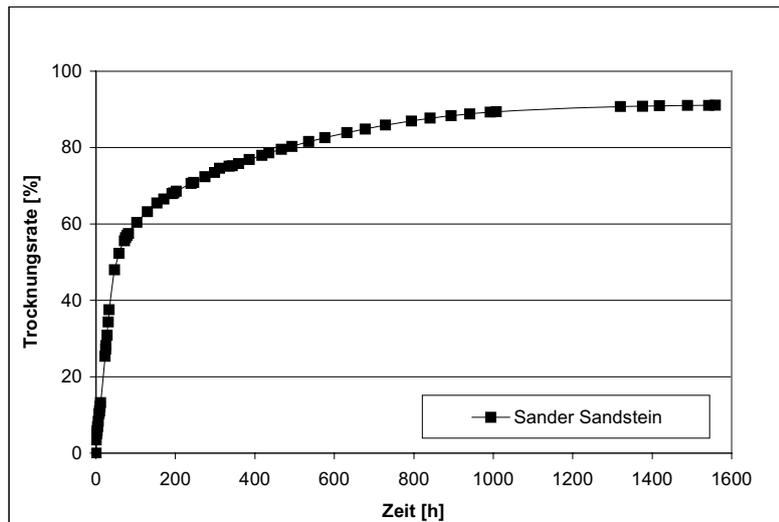


Abb. 7-8: Trocknungsverlauf des Sander Sandsteins mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung als Porenlösung

Für eine qualitative Beschreibung des Trocknungsverlaufes ist diese Darstellung jedoch oftmals ungünstig. Zur besseren Identifikation unterschiedlicher Trocknungsperioden bzw. -geschwindigkeiten ist eine Auftragung der Trocknungsrate über die Wurzel der Zeit vorteilhaft. Wie man in Abb. 7-9 erkennt, zeichnen sich in dieser Darstellung vier Perioden ab in denen der Kurvenverlauf nahezu linear ist. An den Periodengrenzen können deutliche Anstiegsunterschiede festgestellt werden.

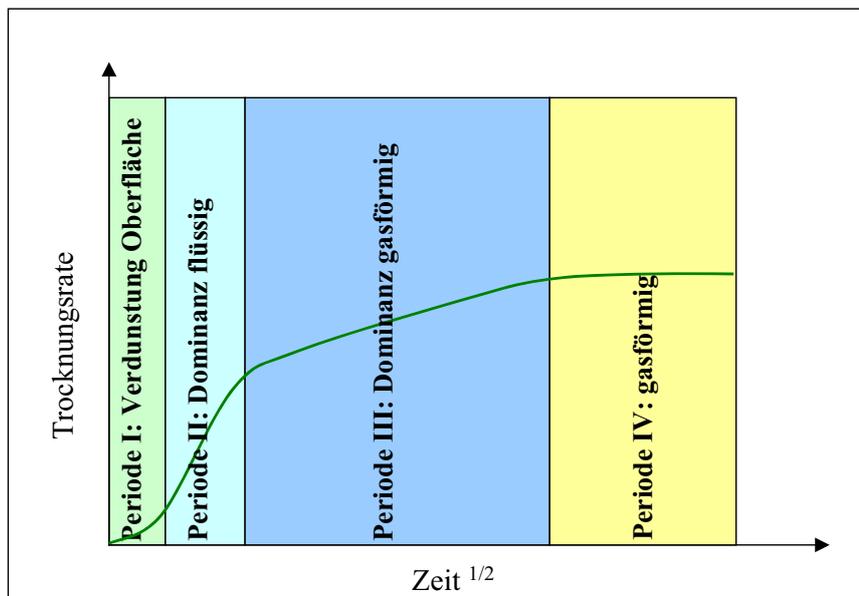


Abb. 7-9: Schematische Darstellung der vier Trocknungsperioden (Sander Sandstein)

Die sich hier abzeichnenden vier Perioden treten prinzipiell bei allen horizontalen Trocknungsprozesse von feuchte- und salzbelasteten kapillarporösen Bauwerk-

stoffen auf. In der Anfangsperiode ist die Trocknung durch die Verdunstungsrate an der Oberfläche der nicht abgedeckten Stirnseite gesteuert. In der zweiten Periode wird die Trocknung durch den Feuchtetransport in der flüssigen Phase maßgeblich bestimmt. Die an der Stirnfläche verdunstende Menge Feuchtigkeit wird aus dem Probekörperinneren zum größten Teil durch Kapillartransport nachgeliefert. Dieser Prozess bleibt solange aufrechterhalten, bis der Kapillartransport weniger Feuchte an die Oberfläche liefert, als dort verdunstet. In der dritten Periode verlagert sich dann der Verdunstungshorizont weiter in das Probekörperinnere, und der Dampftransport im Probekörper nimmt stark zu. In der vierten Trocknungsperiode dominiert dann der Dampftransport den Feuchtestrom, bis die Trocknung zum Erliegen kommt. Ähnliche Betrachtungsweisen der Trocknungsperioden sind auch in [12, 91] angegeben. Anhand der Betrachtung der physikalischen Transportprozesse in den einzelnen Perioden wird deutlich, dass die gewählte Darstellung in Abhängigkeit der Wurzel der Zeit sinnvoll ist. Der horizontale Kapillartransport und die Dampfdiffusion in konstantem Umgebungsklima besitzen bei ausreichender Feuchtesättigung des Bauwerkstoffes näherungsweise diese Abhängigkeit (s. auch (7-2)). Deshalb erscheinen in den ersten drei Perioden diese funktionellen Verläufe linearisiert. Lediglich in der vierten Periode ist dieser funktionelle Zusammenhang nicht mehr gegeben.

7.2.3 Messtechnisch getrennte Erfassung des flüssigen und dampfförmigen Wasser- und Lösungstransportes

Der in Abs. 7.2.2 dargestellte allgemeine Trocknungsverlauf kann auch für andere Sandsteine nachvollzogen werden. Beispielhaft ist dies für den Rüthener Sandstein, penetriert mit deionisiertem Wasser (W) oder 0,5 molarer Natriumsulfatlösung (S), in der Abb. 7-10 dargestellt. Als klimatische Randbedingungen wurden 40 % r.F. und 25 °C eingestellt.

Unabhängig von der Art der Porenlösung, Wasser (W) und Salzlösung (S), zeichnen sich die vier Trocknungsperioden mit ihren unterschiedlichen Trocknungsgeschwindigkeiten ab. Der generelle qualitative Verlauf ändert sich durch den Salzeinfluss nicht. Neben der Bestimmung des Trocknungsverlaufes des Probekörpers (s. Abs. 7.2.2) können auch die Anteile des Flüssigkeits- und Dampftransport am Gesamtfeuchtetransport quantitativ für die vier Trocknungsperioden bestimmt werden. Dazu wurde folgende experimentelle Vorgehensweise gewählt. Die Probekörper der jeweiligen Bauwerkstoffe wurden mit verschiedenen Salzlösungen penetriert.

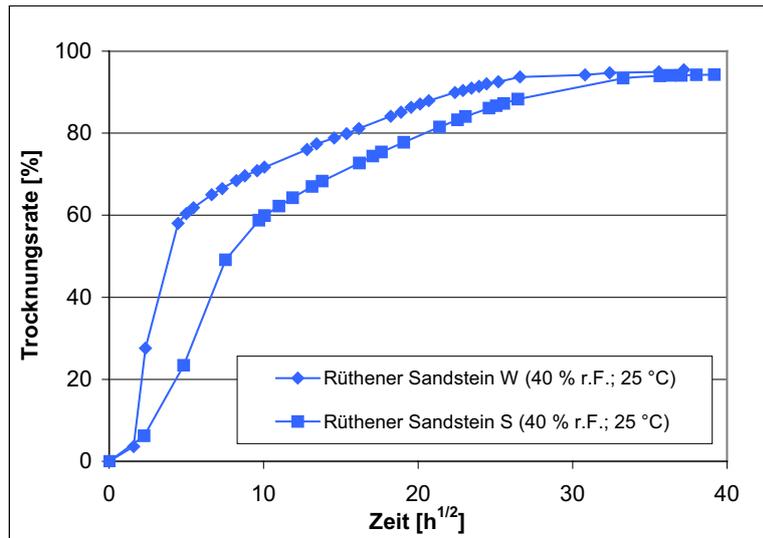


Abb. 7-10: Trocknungsverläufe für Rütthener Sandstein penetriert mit Wasser und 0,5 molarer Natriumsulfatlösung

Für eine zeitabhängige Analyse des Feuchte- und Salztransportes wurden parallel mehrere gleichartige Probekörper gestartet und nach gestaffelten Zeitpunkten ausgewertet. Die Feuchte- und Salzverteilungen wurden durch Probenteilung in Scheiben ermittelt. Die Messung der Wasserverteilung erfolgte gravimetrisch. Die Ionenkonzentration der Anionen und Kationen der einzelnen Probekörperscheiben wurde unabhängig voneinander anhand von Gesteinsmehleluaten durch ICP-Messungen (ICP-OES Optimas 3000 – Optische Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma) bestimmt.

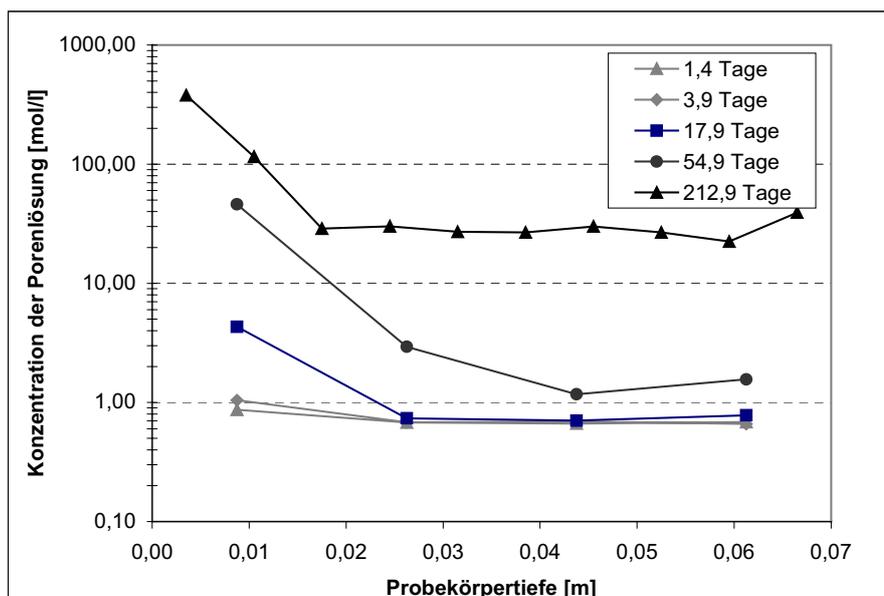


Abb. 7-11: Logarithmische Auftragung der Konzentration der Porenlösung im Ziegel über die Trocknungsdauer bei Penetration mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung (Startkonzentration)

Anhand der mittleren Ionenkonzentration und dem mittleren Wassergehalt jeder Probekörperscheibe konnte der Verlauf der Porenlösungskonzentration über die gesamte Probekörperlänge ermittelt werden. Dieses ist beispielhaft in Abb. 7-11 für verschiedene Zeitpunkte der Trocknung eines Ziegels, welcher mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung (Startkonzentration) penetriert wurde, dargestellt. Aus der zeitlichen Veränderung der Porenlösungskonzentration können die flüssigen und dampfförmigen Anteile des Gesamtfeuchtetransportes bestimmt werden.

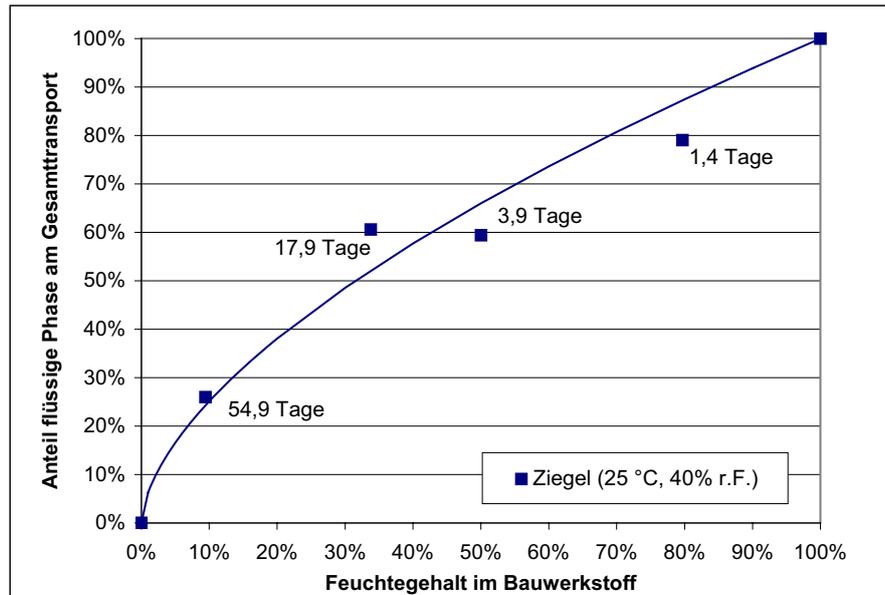


Abb. 7-12: Anteil der flüssigen Phase am Gesamtfeuchtetransport in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff bei Penetration der Probekörper (Ziegel) mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung

Die zusätzliche Aufkonzentration der Porenlösung an der Stirnfläche (Klimatisierung), welche aus der Verdunstung an dieser Fläche resultiert, ist dabei separat zu betrachten. Bleibt die Konzentration der Porenlösung im restlichen Probekörper über die Zeit gleich, wird die Porenlösung als Ganzes transportiert. Findet jedoch eine Aufkonzentration statt, wird ein Teil der Porenlösung als Wasserdampf transportiert. Die Addition des Anteils der Dampf- und der Flüssigkeitsphase ergeben somit den Gesamtfeuchtetransport. Der für die Trocknung des Ziegels (Abb. 7-11) ermittelte Anteil der flüssigen Phase am Gesamtfeuchtetransport ist in Abb. 7-12 dargestellt. Die Konzentrationserhöhung der Porenlösung ist somit ein direktes Maß für den Anteil des Dampftransportes am Gesamttransport. Wird das Salz nur als „Marker“ verwendet, so dass die für den Trocknungsprozess relevanten Eigenschaften der Porenlösung nur vernachlässigbar beeinflusst werden, können sogar die dampfförmigen und flüssigen Anteile des Wassertransportes nach der zuvor beschriebener Methode bestimmt werden. Kaliumsulfat ist als „Marker“ besonders geeignet, da die für den Trocknungsprozess maßgeblichen Eigenschaften einer

Kaliumsulfatlösung wie z.B. Dichte, dynamische Viskosität und Gleichgewichtsfeuchte (GGF) im schwach konzentrierten Bereich von denen des Wassers nur geringfügig abweichen. Selbst im hochkonzentrierten Bereich der Kaliumsulfatlösung ist diese Abweichung noch gering (Tab. 7-2) [46, 58, 43, 44, 45].

Tab. 7-2: Vergleich der Lösungseigenschaften z.B. Dichte, Viskosität und Gleichgewichtsfeuchte

	Dichte [kg/m ³]	dyn. Viskosität [mPa s]	GGF [%]
Wasser (20 °C)	1,0	1,003	100
Kaliumsulfatlösung gesättigt (20 °C)	1,082	1,142	97,59 ± 0,53

Auch die chemische Analyse der Anionen und Kationen im schwach konzentrierten Bereich der Kaliumsulfat ist bei einer maximalen Löslichkeit von 110g/l (20 °C) mit hoher Genauigkeit möglich.

7.2.4 Einfluss unterschiedlicher Anfangs- und Randbedingungen auf den Trocknungsverlauf

Für die Untersuchungen wurde die Art und Konzentration der Porenlösung, das Klima und die Porenmorphologie variiert. Beispielhaft ist die Trocknung des Sander Sandsteines unter Verwendung verschiedener Porenlösungen (deionisiertes Wasser, 0,5 molare und gesättigte Natriumsulfatlösung) und Klimata (40% r.F., 25 °C und 60% r.F., 25 °C) in Abb. 7-13 dargestellt. Die Abbildung Abb. 7-13 zeigt, dass die Konzentrationserhöhung der Porenlösung den stärksten Einfluss auf die Steigung in der zweiten Periode hat, wohingegen in der dritten Periode nur eine „parallele“ Verschiebung bewirkt wird. Das bedeutet, dass im Fall des dominierenden Kapillartransportes Lösungseigenschaften wie z.B. die Viskosität, die Oberflächenspannung und der Dampfdruck über Porenlösung maßgeblich sind. Auch die Wahl unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen zeigen einen signifikanten Einfluss, jedoch stärker für die salzhaltige Porenlösung als für das deionisierte Wasser. Dieses Verhalten stellt den Einfluss unterschiedlicher Differenzbeträge zwischen der Gleichgewichtsfeuchte der Porenlösung (Dampfdruck über der Lösung) und der Luftfeuchte des eingestellten Lagerungsklimas dar. Durch eine günstige Wahl experimenteller Bedingungen ist es möglich, den Einfluss der Viskosität und Oberflächenspannung der Porenlösung von dem Einfluss der Veränderung des Dampfdruckes über der Porenlösung auf den Trocknungsprozess getrennt zu erfassen.

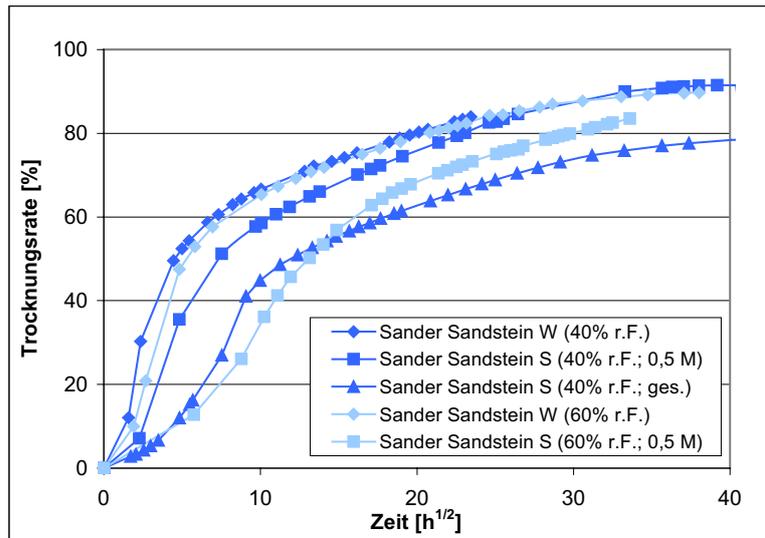


Abb. 7-13: Trocknungsverläufe des Sander Sandsteines unter verschiedenen Anfangs- und Randbedingungen

Der Einfluss der Porenmorphologie wurde anhand zweier Sandsteine untersucht. Verwendet wurden der Rühthener und der Wüstenzeller Sandstein. Die Probekörper wurden mit deionisiertem Wasser und 0,5 molarer Natriumsulfatlösung pene­triert und bei 40% r.F. und 25 °C getrocknet.

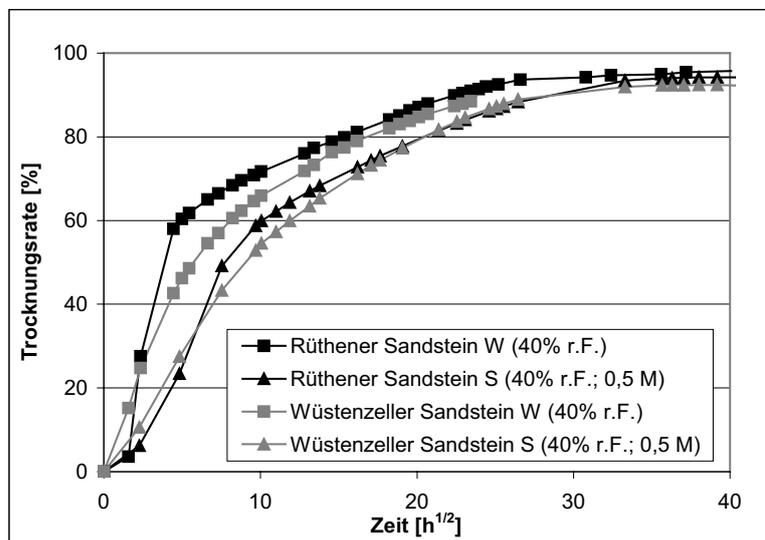


Abb. 7-14: Trocknungsverläufe des Rühthener und Wüstenzeller Sandsteines mit deionisiertem Wasser und 0,5 molarer Natriumsulfatlösung als Porenlösung (Klima: 25 °C, 40% r.F.)

Es ist ein sehr starker Einfluss der Porenmorphologie in der 2. Trocknungsperiode in der der Flüssigkeitstransport dominiert zu erkennen. Dies ist durch die größere kapillare Leitfähigkeit des Rühthener Sandsteines gegenüber dem Wüstenzeller zu begründen.

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Art der Porenlösung auf den Trocknungsprozess sind in der Abb. 7-15 die Trocknungsverläufe des Wüstenzeller Sandsteines bei einer Luftfeuchte von 40 % r.F. und unterschiedlichen Temperaturen aufgetragen. Die Probekörper wurden für diese experimentellen Untersuchungen mit gesättigter Natriumchloridlösung penetriert und bei 25 °C bzw. 40 °C getrocknet.

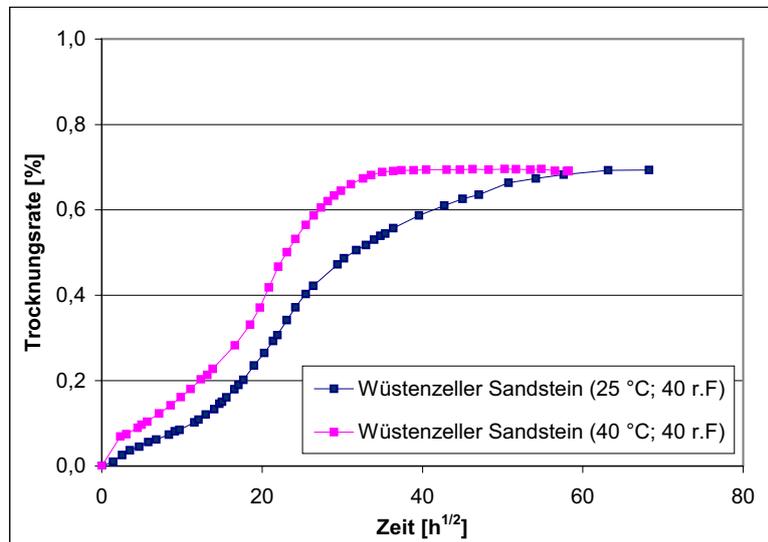


Abb. 7-15: Trocknungsverläufe des Wüstenzeller Sandsteines penetriert mit gesättigter Natriumchloridlösung bei 25 °C und 40 °C

Wie man erkennen kann, ist die Trocknung erwartungsgemäß bei 40 °C schneller als bei 25 °C. Der Endwert der Trocknungsrate ist jedoch in beiden Fällen etwa gleich, da die Löslichkeit von Natriumchlorid und die Gleichgewichtsfeuchte von gesättigten Natriumchloridlösungen nur sehr schwach von der Temperatur abhängen. Diese experimentellen Untersuchungen wurden parallel mit einer gesättigten Natriumsulfat-Lösung als Penetrationslösung bei gleichen klimatischen Randbedingungen durchgeführt (Abb. 7-16). Im Gegensatz zum vorigen Experiment wird eine schnellere und im Endwert höhere Trocknung bei 25 °C als bei 40 °C festgestellt. Dies resultiert wieder aus mehreren Eigenschaften gesättigter Natriumsulfatlösungen. Die Gleichgewichtsfeuchte einer gesättigten Natriumsulfatlösung bei 25 °C beträgt ca. 93 % r.F. bei 40 °C hingegen nur ca. 84 % r.F.. Der größere Differenzbetrag zwischen der Gleichgewichtsfeuchte der Porenlösung und der Luftfeuchte wie auch z.B. die geringere Viskosität der Lösung bei 25 °C tragen zur schnelleren Trocknung bei. Auch die Löslichkeit ist bei 40 °C wesentlich höher als bei 25 °C, welches eine weitere Erklärung für den höheren Endwert ist.

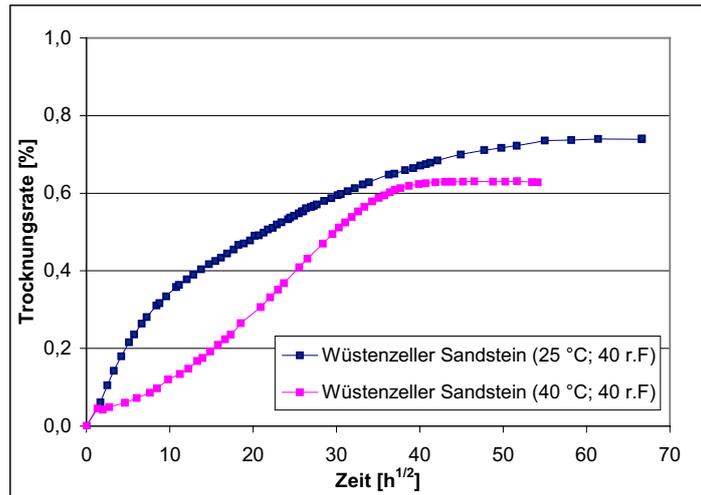


Abb. 7-16: Trocknungsverläufe des Wüstenzeller Sandsteines penetriert mit gesättigter Natriumsulfatlösung bei 25 °C und 40 °C

7.2.5 Quantitative Beschreibung des Anteils des flüssigen und dampfförmigen Transportes am Gesamtfeuchtetransport

Ein weiterer Aspekt der Auswertung experimenteller Untersuchungen zur Trocknung feuchter poröser Bauwerkstoffe nach der in Abb. 7-7 dargestellten Anordnung wird im Folgenden für drei unterschiedliche Bauwerkstoffe dargestellt. Durch die Analyse des Feuchte- und Salzgehaltes der Probekörper während der vier verschiedenen Trocknungsphasen wurden die Anteile des Flüssigkeits- und Dampftransportes am Gesamtfeuchtetransport quantitativ bestimmt (s. Abs. 7.2.3).

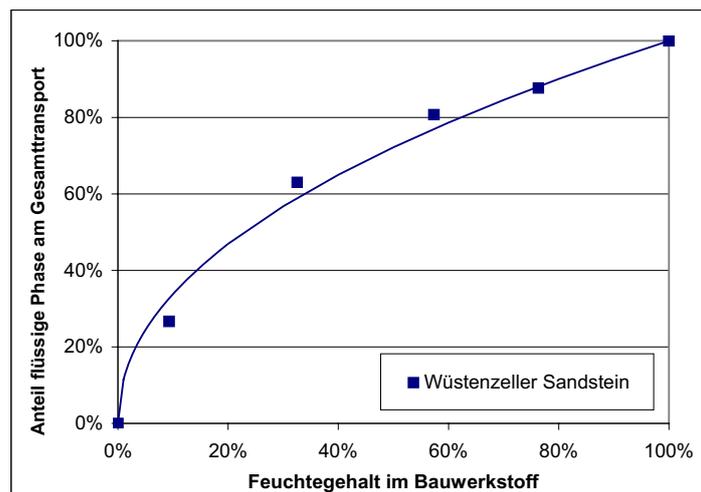


Abb. 7-17: Anteil der flüssigen Phase am Gesamtfeuchtetransport in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff bei Penetration der Probekörper mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung

Dieses ist exemplarisch für den Wüstenzeller Sandstein bei Penetration der Probekörper mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung und einer Trocknung bei 25 °C und

40% r.F. in der Abb. 7-17 dargestellt. Der Anteil des Flüssigkeitstransportes am Gesamttransport in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff kann mit einer Potenzfunktion beschrieben werden. In der Abb. 7-18 ist der Anteil des Flüssigkeitstransportes am Gesamttransport für drei unterschiedliche Bauwerkstoffe, welche mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung penetriert worden sind, dargestellt. Das Klima betrug 25 °C und 40% r.F..

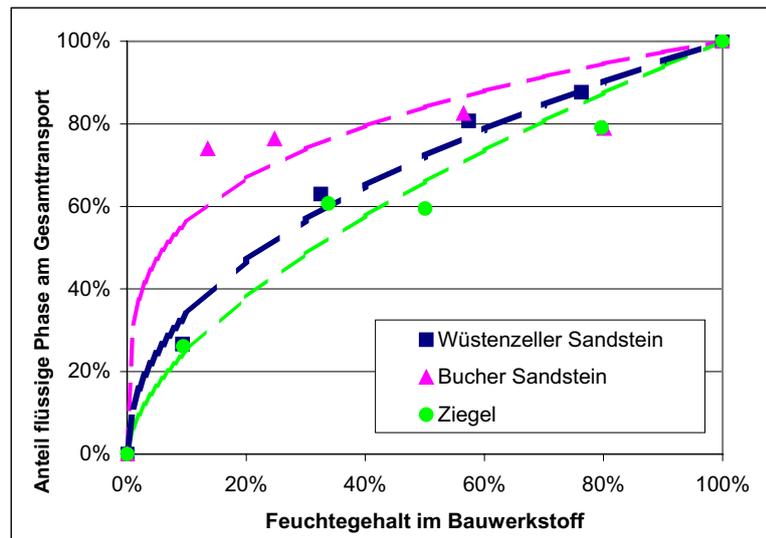


Abb. 7-18: Anteil des flüssigen Transportes am Gesamtfeuchte-transport in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff bei Penetration der Probekörper mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung

Der generelle Verlauf ist für alle Bauwerkstoffe durch Potenzfunktionen zu beschreiben. Etwas stärkere Schwankungen in den Messwerten sind auf die größeren Inhomogenitäten des Bucher Sandsteines und des Ziegels zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der Porenmorphologie, welche sich bei den drei gewählten Bauwerkstoffen wie in Abs. 6.1 erläutert unterscheidet. Zur Verdeutlichung dieses Einflusses der Porenmorphologie ist in der folgenden Abbildung (Abb. 7-19) noch einmal die relative Trocknung der Probekörper über die Zeit aufgetragen. Der Bucher Sandstein mit dem größten mittleren Porenradius hat die höchste Trocknungsgeschwindigkeit bzw. die beste kapillare Leitfähigkeit und damit auch den geringsten Dampfanteil am Gesamtfeuchte-transport. Die beiden anderen Bauwerkstoffe verhalten sich analog zum Bucher Sandstein in der Reihenfolge ihres mittleren Porenradius. Der Ziegel besitzt den kleinsten mittleren Porenradius, den langsamsten Flüssigkeitstransport und den größten Dampfanteil am Gesamtfeuchte-transport. Bei einem langsamen Flüssigkeitstransport erhält der ebenfalls langsame Wasserdampftransport somit ein stärkeres Gewicht.

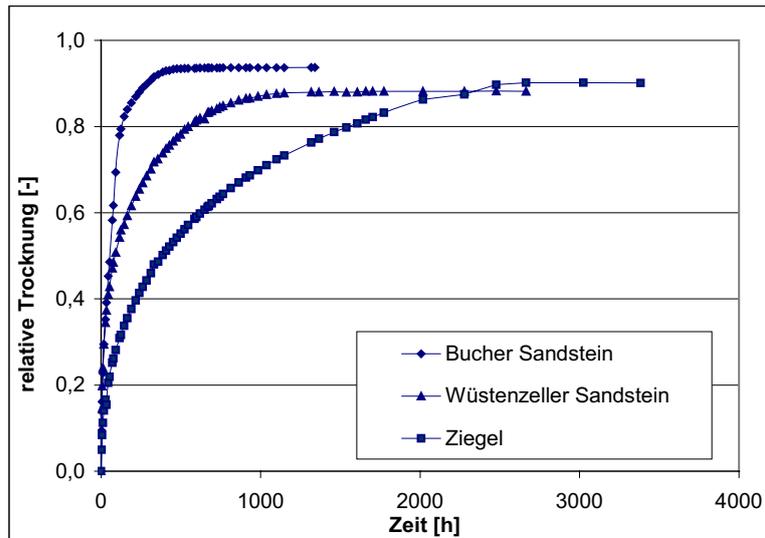


Abb. 7-19: Relative Trocknung der Probekörper in Abhängigkeit von der Zeit

Mit der Wahl einer anderen Konzentration der Penetrationslösung kann der Einfluss des Salzes auf die Anteile des Dampf- und Flüssigtransportes am Gesamtfeuchtetransport bei Trocknungsprozessen beurteilt werden.

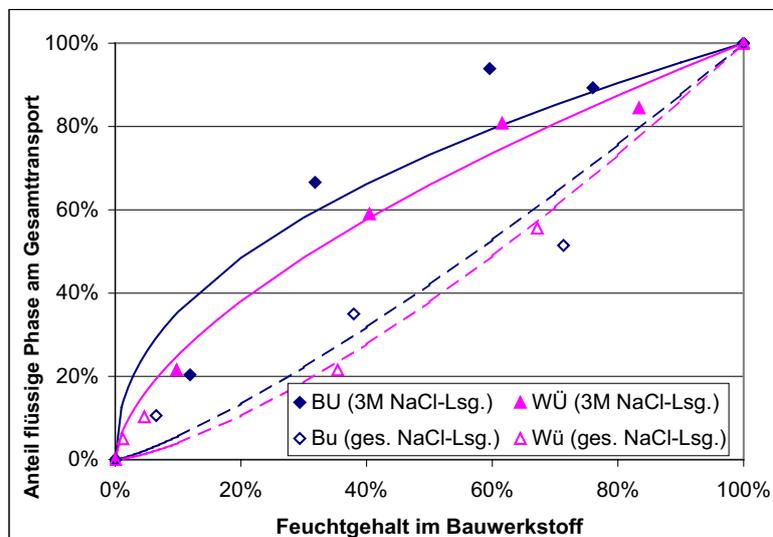


Abb. 7-20: Anteil des flüssigen Transportes am Gesamtfeuchtetransport bei Penetration der Probekörper mit Natriumchlorid-Lösungen unterschiedlicher Konzentration

Man erkennt in der Abb. 7-20, dass bei einer höher konzentrierten Salzlösung der Dampfanteil am Gesamttransport zunimmt. Dieses ist durch die Änderung der Lösungseigenschaften wie z.B. Viskosität und Oberflächenspannung aber auch durch die Veränderung der Gleichgewichtsfeuchte der Porenlösung (Dampfdruck) zurückzuführen (s. 7.2.4). Die Abb. 7-20 zeigt, dass der Einfluss der Porenmorphologie auch bei Veränderung der Konzentration bleibt.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Art der Salzlösung auf die Anteile der flüssigen und dampfförmigen Phase bei der Trocknung wurden mit Probekörpern des Wüstenzeller Sandsteines durchgeführt, welche mit gesättigter Natriumsulfatlösung penetriert worden waren. Die relative Luftfeuchte betrug 40% bei 25 °C und bei 40 °C. Der Anteil der flüssigen und dampfförmigen Phase am Gesamtfeuchte-transport im Fall der Trocknung bei diesen Klimata ist in Abb. 7-21 dargestellt. Der Anteil der Dampfphase am Gesamttransport ist bei 25 °C geringer als bei 40 °C. Dies ist dadurch begründet, dass der Flüssigkeitstransport bei 25 °C schneller als bei 40 °C ist, so dass der vergleichsweise langsame Dampftransport weniger Einfluss hat.

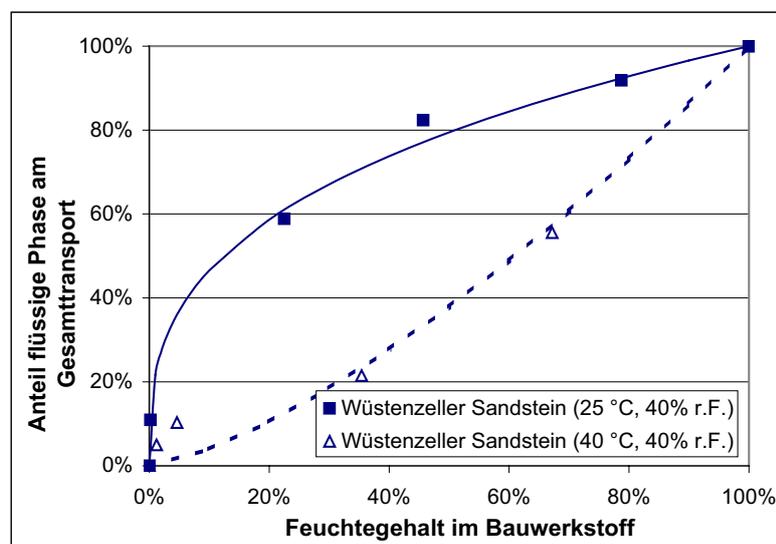


Abb. 7-21: Anteil des flüssigen Transportes am Gesamtfeuchte-transport bei Penetration der Probekörper mit gesättigter Natriumsulfatlösung bei unterschiedlichen Temperaturen

Bei den zuvor gezeigten Abbildungen zur Anteilsbestimmung zwischen flüssig und gasförmig in Trocknungsexperimenten wurde das Trocknungsverhalten durch die Überlagerung mehrerer Größen z.B. Oberflächenspannung, Viskosität und Dampfdruck bestimmt. Um jedoch den Einfluss der Lösungseigenschaften (Viskosität und Oberflächenspannung) von denen der Änderung der Gleichgewichtsfeuchte der Porenlösung (Dampfdruck) auf die Anteile der dampfförmigen und flüssigen Phase am Gesamtfeuchte-transport trennen zu können, wurden Probekörper des Sander Sandsteines mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung penetriert und in verschiedenen Klimata getrocknet. Bei gleichbleibender Temperatur und verschiedenen relativen Luftfeuchten, 40% r.F. und 60% r.F., wurden die Probekörper getrocknet (Abb. 7-22). Diese Abbildung zeigt, dass bei gleicher Salzlösung und damit gleichbleibenden Lösungseigenschaften, wie z.B. Viskosität, eine Verringerung der Dampfdruckdifferenz zwischen dem Porensystem des Bauwerkstoffes und dem Umgebungsklima eine Erhöhung des Dampfanteils am Gesamtfeuchte-

transport hervorruft. Durch den langsameren Flüssigkeitstransport bei 60% relativer Luftfeuchte verstärkt sich der Anteil des Dampftransportes am Gesamtfeuchtetransport und damit auch an der Trocknung.

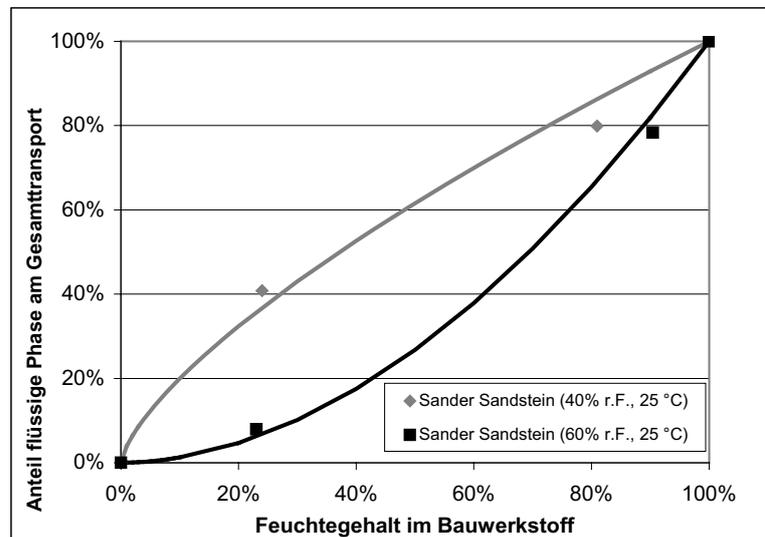


Abb. 7-22: Anteil des flüssigen Transportes am Gesamtfeuchtetransport bei der Trocknung des Sander Sandsteines penetriert mit gesättigter Natriumsulfatlösung bei unterschiedlichen Klimata (40% r.F., 25 °C und 60% r.F., 25 °C)

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass die Trocknung von wasser- bzw. salzlösungsbeladenen Bauwerkstoffen von diversen auch in ihren Wirkungen überlagerten Einflussfaktoren abhängig ist. Generell können folgende primäre Faktoren genannt werden:

- Änderung Salzgehaltes der Porenlösung (Oberflächenspannung, Dichte, Viskosität, Dampfdruck)
- Änderung des Klimas durch Temperaturänderung
- Änderung des Klimas durch Änderung der relativen Luftfeuchte
- Änderung der Porenmorphologie

Sekundär folgen dabei z.B. aus der Änderung des Salzgehaltes der Porenlösung Änderungen der Viskosität, der Oberflächenspannung, des Dampfdruckes etc. Die zuvor beschriebenen Untersuchungen ermöglichen den Einfluss dieser Faktoren auf Trocknungsverlauf zu bestimmen und durch geeignete experimentelle Anordnungen zu separieren. Ebenso ist es möglich durch die beschriebene experimentelle Anordnung und deren spezielle Auswertung den Wasser- bzw. Feuchtetransport phasenetrennt zu messen.

7.3 Flüssigkeitstransport infolge von Dichtegradienten

Die Konvektion bezeichnet Transportprozesse, welche durch Dichtegradienten hervorgerufen werden. Im Fall der konvektiven Feuchtetransportprozesse in Bauwerkstoffen werden die Dichteunterschiede meist durch Temperatur- und/oder Ionenkonzentrationsunterschiede hervorgerufen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden Dichteunterschiede durch Ionenkonzentrationsgradienten in der Porenlösung erzeugt. Bei der Untersuchung der Konvektion in Bauwerkstoffen muss im Gegensatz zur freien Lösung noch der Einfluss des Porensystems auf diesen Transportprozess berücksichtigt werden.

Zur Untersuchung des möglichen Auftretens von Konvektion kann der statische Fall der Navier-Stokes-Gleichung (5-4) für den Feuchtetransport in einer Kapillaren herangezogen werden.

$$\rho g z + \bar{p}(z) - \bar{p}(0) - p_K = 0 \quad (7-7)$$

Mit der Annahme $\bar{p}(z) = \bar{p}(0) = p_A$ vereinfacht sich dieser formelle Ausdruck so, dass diese konkurrierenden Drücke für das Auftreten der Konvektion gut sichtbar werden.

$$\rho g z = p_K \quad \text{mit} \quad p_K = \frac{2}{r_k} \sigma \cos \Theta \quad (7-8)$$

Sobald der Schweredruck der Lösung größer ist als der Kapillarsog tritt Konvektion auf.

7.3.1 Abhängigkeit von der Porenmorphologie

Wichtig ist bei der Betrachtung von konvektiven Transportvorgängen in porösen Bauwerkstoffen der Anteil an der Gesamtporosität, der sich selbständig durch Kapillarsog füllt. Wird der Bauwerkstoff darüber hinaus mit Flüssigkeit gefüllt, kann diese nicht mehr durch Kapillarsog im Porensystem gehalten werden.

Dieser Sachverhalt ist beispielhaft für eine Einzelkapillare mit 3 cm Länge, die mit gesättigter Natriumsulfatlösung gefüllt ist, berechnet worden. Für die Berechnung der Drücke wurde die Oberflächenspannung σ mit $72,75 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ und der Randwinkel θ mit 0° angenommen. Für Salzlösungen werden in der Literatur die Randwinkel zwischen $15^\circ < \theta < 35^\circ$ und Oberflächenspannungen σ im Bereich von $72,75 \times 10^{-3} - 82,55 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ angegeben [19, 13, 76, 77]. Der Einfluss der Salze auf die Oberflächenspannung und den Kontaktwinkel der Lösungen ist für die Be-

rechnung der Drücke nicht berücksichtigt, da es zu keiner großen Abweichung der Endergebnisse führt. Der berechnete Schweredruck und Kapillarsog sind in Abhängigkeit des Porenradius in Abb. 7-23 aufgetragen. Man sieht, dass der Betrag des Sogs und der des Drucks in der Kapillare bei einem Porenradius von etwa 400 μm gleich ist. Das heißt, für eine Salzlösung mit größerer Dichte verringert sich der Grenzradius. In Bauwerkstoffen ist das Porensystem natürlich abweichend von Zylinderkapillaren bzw. Einzelzylinderkapillaren. Die Modellvorstellung der Zylinderkapillaren dient hierbei lediglich zur besseren Veranschaulichung der grundlegenden Bedingungen, unter denen Konvektion auftreten kann.

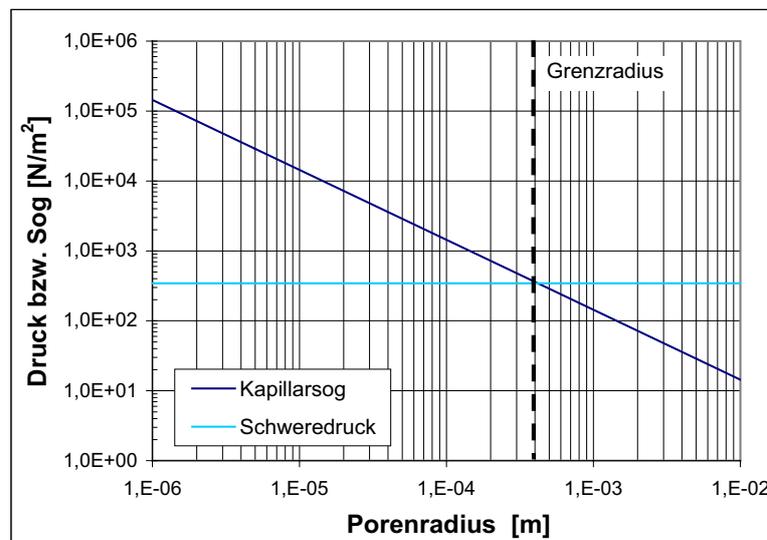


Abb. 7-23: Darstellung des Kapillarsoges und des Schweredruckes für eine mit gesättigter Natriumsulfatlösung gefüllten Kapillare

7.3.2 Abhängigkeit von der Richtung des Dichtegradienten bezüglich des Schwerfeldes

Untersuchungen zu konvektiven Einflüssen bei Transportexperimenten können anhand einer speziellen „2-Scheiben- Anordnung“ vorgenommen werden. Dabei kann durch die Wahl der Anordnung des Experimentes der Anteil konvektiven Transportes gesteuert werden. Bei der experimentellen Anordnung nach Abb. 7-24a befindet sich der Probekörper mit der Porenlösung geringerer Dichte über dem mit der Lösung größerer Dichte. Diese Anordnung ermöglicht ein rein diffusiven Ausgleich des Konzentrations- bzw. Dichtegradienten. Dagegen befindet sich bei der Anordnung der Scheiben nach Abb. 7-24b der Probekörper mit der Porenlösung geringerer Dichte unter dem mit der Porenlösung größerer Dichte. Hier erfolgt der Salztransport durch Diffusion und möglicherweise durch Konvektion.

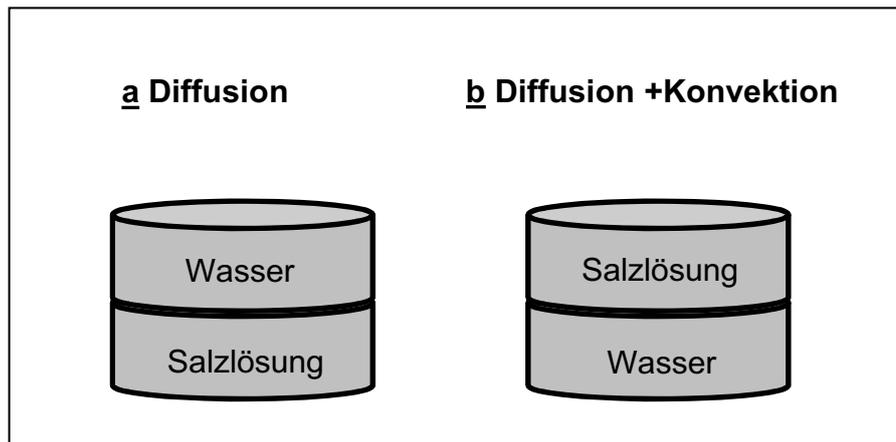


Abb. 7-24: Experimentelle Anordnung des Versuches zur Konvektion

Während der diffusive Transport im Bauwerkstoff unabhängig von der Anordnung auftritt, ist der konvektive Transport von der Richtung des Dichtegradienten zum Schwerfeld der Erde und der Porenmorphologie abhängig.

7.3.3 Experimentelle Untersuchungen

Die zwei in Abb. 7-24 dargestellten Versuchsanordnungen können direkt zur experimentellen Analyse von diffusiven und konvektiven Transportanteilen herangezogen werden. Durch den Vergleich der mit beiden Anordnungen ermittelten Transportkoeffizienten in verschiedenen porösen Bauwerkstoffen kann der Einfluss der Konvektion detektiert und quantifiziert werden.

Hierzu wurden Sandsteine und Ziegel nach Abs. 6.1 untersucht. Für die Untersuchungen wurden zylindrische Scheiben mit einem Radius von ca. 5 cm und einer Dicke von ca. 2 cm hergestellt. Diese wurden gleichmäßig und vollständig mit deionisiertem Wasser bzw. Natriumsulfatlösung verschiedener Konzentrationen penetriert und unter Druck zusammengefügt. Über die gesamte Versuchsdauer wurde dieser zusammengesetzte Probekörper luftdicht gekapselt, um eine Trocknung zu verhindern. Nach Beendigung des Experimentes wurden mit Hilfe von Bohrungen die Konzentrationsprofile in den Probekörpern bestimmt. Durch numerische Simulation wurden die Transportkoeffizienten bestimmt (Kap. 9). Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Konvektion und Diffusion mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung und deionisiertem Wasser bei vollständiger und gleichmäßiger Sättigung des Porensystems sind in der Abb. 7-25 zusammengefasst.

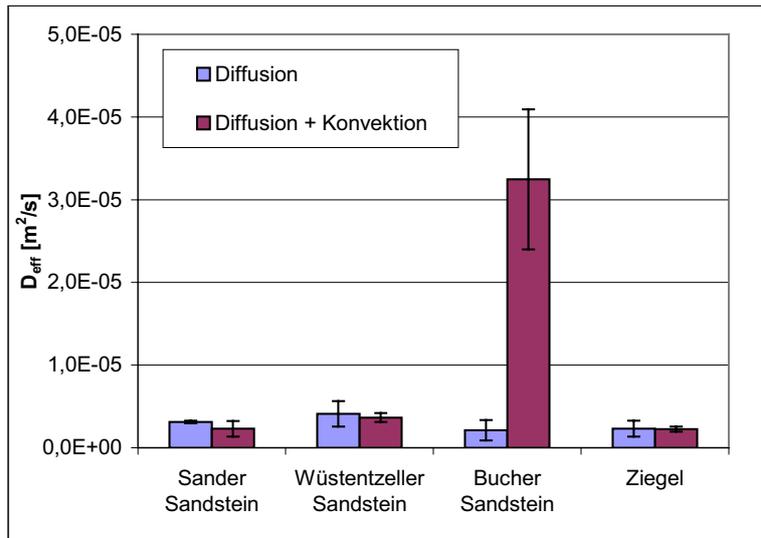


Abb. 7-25: Transportkoeffizienten bei 100 % Porensättigung mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung / deionisiertem Wasser

Der Sander, der Wüstentzeller Sandstein und der Ziegel zeigen nahezu gleiche Transportkoeffizienten für die unterschiedlichen experimentellen Anordnungen. Das bedeutet, dass bei diesen Bauwerkstoffen und gewählten Porenlösungen keine merkliche Konvektion auftritt. Die Porenradienmaxima liegen etwa zwischen 1 µm und 7,5 µm. Beim Bucher Sandstein hingegen sieht man, dass der ermittelte Transportkoeffizient nach Anordnung Abb. 7-24b signifikant größer ist als der nach der Anordnung Abb. 7-24a. Das bedeutet, dass bei gleicher Porenlösung das Porensystem dieses Bauwerkstoffes die Konvektion ermöglicht. Das Porenradienmaximum liegt beim Bucher Sandstein bei 36 µm. Dieser Wert ist kleiner als der in Abs. 7.3.1 berechnete Grenzradius von 500 µm für die gesättigte Natriumsulfatlösung. Da das Porensystem eines realen Bauwerkstoffes aber von Zylinderkapillaren abweicht ist das Auftreten von Konvektion auch unterhalb des Grenzradius denkbar. Des Weiteren liegt nur das Porenradienmaximum bei 36 µm. Das bedeutet, dass es auch Poren mit größeren Porenradien in diesem Bauwerkstoff gibt. Durch das vollständige Penetrieren der Probekörper mit Lösung wurden auch die Poren gefüllt, welche nicht durch Kapillarkräfte die Lösung aufnehmen. Dieses führt somit zum Auftreten von Konvektion. Der gleiche Versuch wurde mit einer anderen Konzentration der Porenlösung im Fall der Natriumsulfatlösung durchgeführt. Die Bauwerkstoffe wurden dabei mit 1,5 molarer Natriumsulfatlösung und deionisiertem Wasser vollständig und gleichmäßig penetriert. Die Ergebnisse der Ermittlung der effektiven Transportkoeffizienten sind in Abb. 7-26 dargestellt.

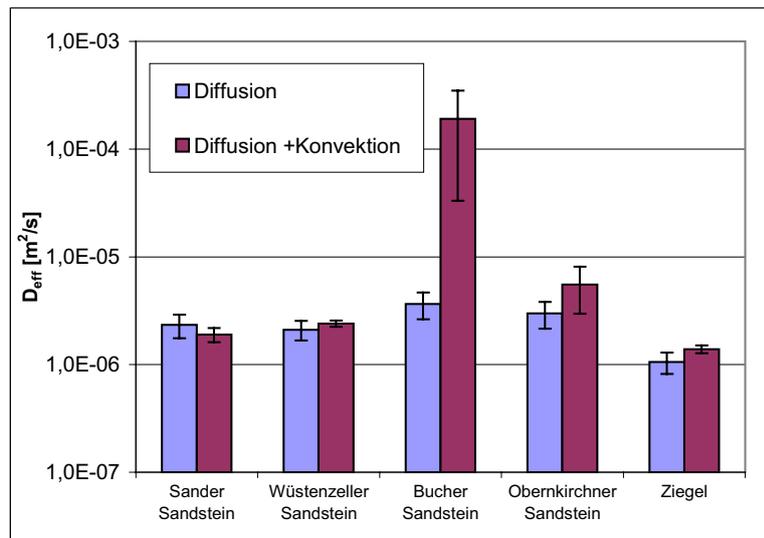


Abb. 7-26: Transportkoeffizienten bei 100 %Porensättigung mit 1,5 molarer Natriumsulfatlösung / deionisiertem Wasser

Beim Sander, Wüstenzeller, Obernkirchner Sandstein und Ziegel können auch unter diesen Bedingungen nahezu keine Veränderungen der Transportkoeffizienten in der Anordnung Abb. 7-24_b gegenüber der Anordnung Abb. 7-24_a festgestellt werden. Die Erhöhung der Lösungskonzentration führt nicht zum Auftreten von Konvektion. Das bedeutet, dass die Kapillarkräfte mindestens gleich den Schwerekräften sind. Beim Bucher Sandstein vergrößert sich der konvektive Anteil in Relation zum diffusiven Anteil deutlich. Dies ist auch erwartungsgemäß, da die Diffusionskoeffizienten in diesem Konzentrationsbereich etwa in der gleichen Größenordnung liegen und gleichzeitig die Dichte der Natriumsulfatlösung und damit der konvektive Anteil merklich ansteigt.

Im Folgenden sind die wichtigen Kriterien zum Entstehen von Konvektion in einem lösungsgefüllten, kapillarporösen Bauwerkstoff noch einmal zusammengestellt.

- Der Dichtegradient muss so verlaufen, dass der Transport in Richtung des Schwerefeldes erfolgen würde.
- Es müssen Poren oberhalb des Grenzradius gefüllt sein.
- Der Grenzradius ist abhängig von Lösungsparametern wie z.B. Oberflächenspannung, Dichte, Kontaktwinkel
- Unterhalb des berechneten Grenzradius kann auch Konvektion auftreten, da das Porensystem der Bauwerkstoffe in der Regel vom Kapillarmodell abweicht.
- Der mit Quecksilberdruckporosimetrie bestimmte Porenradius gibt jedoch einen guten Richtwert zur Abschätzung des möglichen Entstehens von Konvektion.

Weitere wichtige Aussagen lassen sich aus diesen Ergebnisse auch für die Planung und Durchführung anderer experimenteller Anordnungen für Transportprozessuntersuchung ableiten. Bei der Durchführung von Diffusionsexperimenten muss daher über bzw. in dem Bereich eines Feuchtegehaltes, der durch kapillares Saugen mit Flüssigkeit gefüllt werden kann, auf die möglicherweise auftretende Konvektion geachtet werden. Von den experimentellen Methoden ist davon besonders die experimentelle Anordnung der Ausdiffusion betroffen, da dort die Probekörper durch das Einbringen in die Umgebungslösung feuchtegesättigt sein müssen. Alle Poren mit einem größeren Radius als dem Grenzradius (Punkt des Gleichgewichtes des Soges und des Druckes) bedingen dann das „Auslaufen“ der Porenlösung, wenn die Druckverhältnisse in der Umgebungslösung dies ermöglichen.

8 Charakterisierung der Diffusion

Für die Untersuchungen der Ionendiffusion in porösen Bauwerkstoffen und der Bestimmung der effektiven Diffusionskoeffizienten werden für den jeweiligen Untersuchungsgegenstand verschiedene experimentelle Anordnungen gewählt. Die Wahl der Anordnung ist dabei abhängig:

- von der Feuchtesättigung des Porensystems
- vom Bauwerkstoff
- von der Möglichkeit des Auftretens der Konvektion (Art, Konzentration der Porenlösung, gewählter Bauwerkstoff, etc.)

Die in den folgenden Kapiteln dargestellten und verwendeten Methoden zeichnen sich besonders durch ihre einfache Handhabung und hohe Genauigkeit der Ergebnisse aus.

8.1 Ausdiffusion

Die experimentelle Anordnung eines Ausdiffusionsversuches wurde bereits in Abs. 5.5.3.1 dargestellt. Mit Hilfe dieser experimentellen Anordnung können effektive Diffusionskoeffizienten von Salzionen in Bauwerkstoffen bestimmt werden.

8.1.1 Experimentelle Anordnung

Als Probekörper wurden salzlösungspenetrierte, radialsymmetrische scheibenförmige Bauwerkstoffproben verwendet. Da die Proben zur Bestimmung der Ionendiffusionskoeffizienten in eine Umgebungslösung (deionisiertes Wasser) eingebracht werden, ist diese experimentelle Anordnung nur für die Bestimmung von Diffusionskoeffizienten bei vollständiger Porenfüllung geeignet.

8.1.2 Auswertung der Experimente zur Bestimmung von effektiven Diffusionskoeffizienten

Zu Beginn des Versuches wird der Probekörper vollständig und homogen über die Scheibendicke h ($0 < x < h$) mit der Salzlösung der Startkonzentration c_0 gesättigt ($c = c_0$ für $0 < x < h$ bei $t = 0$). Anschließend wird er in die Umgebungslösung mit der Konzentration $c = 0$ eingebracht. Die effektiven Diffusionskoeffizienten D_{eff} werden anhand der gemessenen Konzentrationen bzw. Leitfähigkeiten durch die Kenntnis der Steigung b und der Scheibendicke h wie folgt berechnet [53].

$$\ln \left[\frac{\bar{c} - c_e}{c_a - c_e} \right] \approx a - bx \quad \text{mit } b = \frac{\pi^2 D_{eff}}{h^2} \quad \text{und } a = \frac{8}{\pi^2} \quad \Rightarrow D_{eff} = \frac{bh^2}{\pi^2} \quad (8-1)$$

Dieser Zusammenhang kann durch graphische Darstellung der Messwerte verdeutlicht werden (Abb. 8-1). Unter günstigen Bedingungen, z.B. etwa gleicher Konzentrationsabhängigkeit der Diffusion und der Leitfähigkeit, kann der Diffusionskoeffizient direkt aus der elektrischen Leitfähigkeit ermittelt werden (Abb. 8-1). In dieser Abbildung sind die Ergebnisse eines Diffusionsexperimentes mit einer Glasfilterplatte (Porosität 5), welche mit 1,0 molarer Natriumsulfatlösung penetriert wurde dargestellt.

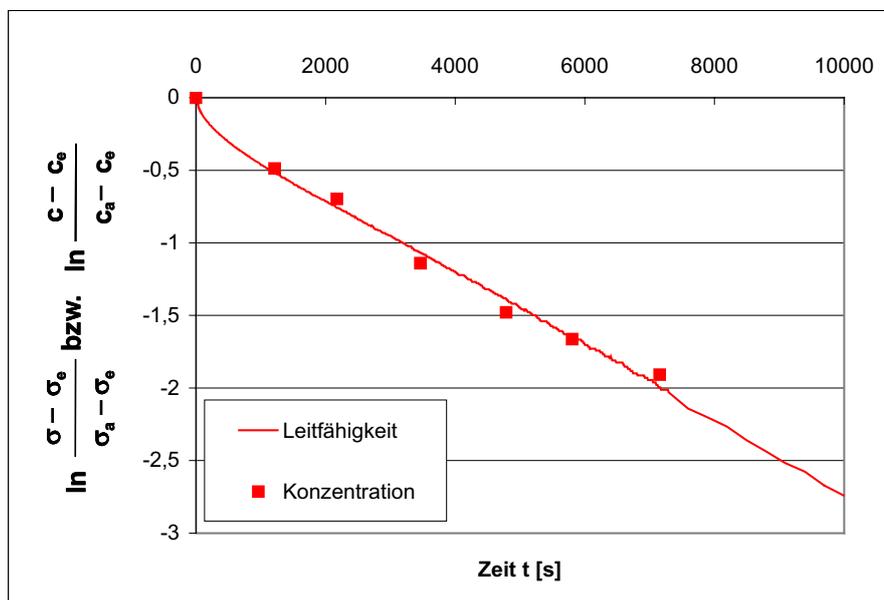


Abb. 8-1: Logarithmische Auftragung der Konzentration bzw. der Leitfähigkeit über die Zeit für eine mit 1,0 molarer Natriumsulfatlösung penetrierte Glasfilterplatte (Porosität 5)

Für eine mögliche Diskrepanz der Kurvenverläufe (z.B. Abb. 8-3) aus der Leitfähigkeit und der Ionenkonzentration gibt es verschiedene Ursachen:

- Es besteht bereits bei Diffusion in freier Lösung die Möglichkeit, dass nicht die Gesamtheit der diffundierenden Ionen zur Leitfähigkeit beiträgt. Bei höheren Konzentrationen der Elektrolytlösungen kann es durch kleiner werdende Abstände der Ionen zueinander und wirksam werdenden Coulombkräften zur Bildung von Assoziaten kommen. Diese wirken nach außen neutral und werden bei der Messung der Leitfähigkeit nicht erfasst [78].
- Die Leitfähigkeit ist in der freier Lösung nicht über den gesamten Konzentrationsbereich im gleichen Verhältnis wie die Diffusion von der Konzentration der Lösung abhängig (Abb. 8-2) [15; 54].

- c) Bei Diffusionsvorgängen im Bauwerkstoff kann zusätzlich das Herauslösen von Ionen aus diesem eine Veränderung der Konzentration der untersuchten Ionen in der Umgebungslösung hervorrufen und somit zu Verfälschungen der ermittelten Diffusionskoeffizienten führen. Dieser Einfluss kann lediglich vernachlässigt werden, wenn die Menge der herausgelösten Ionen klein ist im Verhältnis zur Menge der Ionen in der Penetrationslösung.

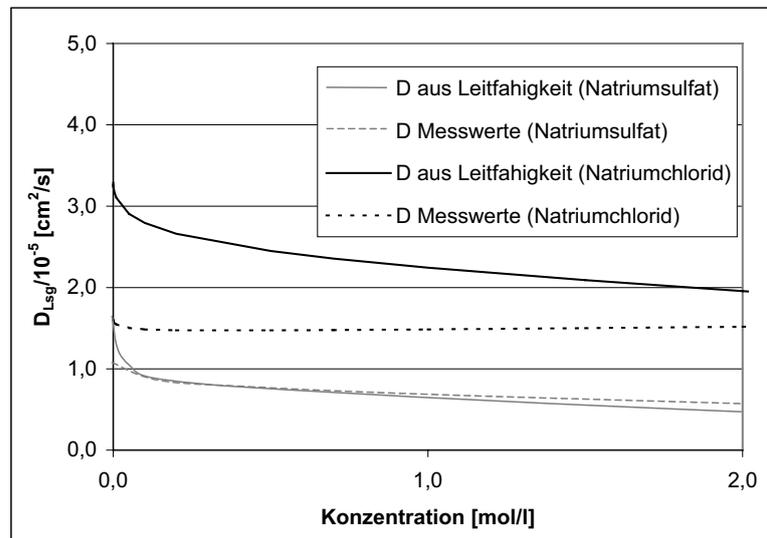


Abb. 8-2: Konzentrationsabhängigkeit der gemessenen (aus der Literatur) und aus der Leitfähigkeit (aus der Literatur) bestimmten Diffusionskoeffizienten für Natriumchlorid und Natriumsulfat in der freien Lösung [57, 15]

Um diese mögliche Einflüsse bei der Bestimmung der Diffusionskoeffizienten durch Messung der Leitfähigkeit der Umgebungslösung zu verdeutlichen, wird exemplarisch die Ermittlung der Diffusionskoeffizienten für eine 1 molare Natriumsulfatlösung im Bad Frankenhäuser Sandstein hergenommen. Da in diesem Fall auch andere Ionen (z.B. Ca^{2+} , K^+) aus dem Bauwerkstoff herausgelöst werden, kann die gemessene Leitfähigkeit nicht mehr nur den Ionen der Penetrationslösung zugeordnet werden. Dadurch entsteht eine Diskrepanz zwischen den Diffusionskoeffizienten, welche durch die Messung der Leitfähigkeit bzw. der Konzentration bestimmt werden (Tab. 8-1). Dieser Sachverhalt lässt sich mit der folgenden Abbildung noch einmal verdeutlichen (Abb. 8-3).

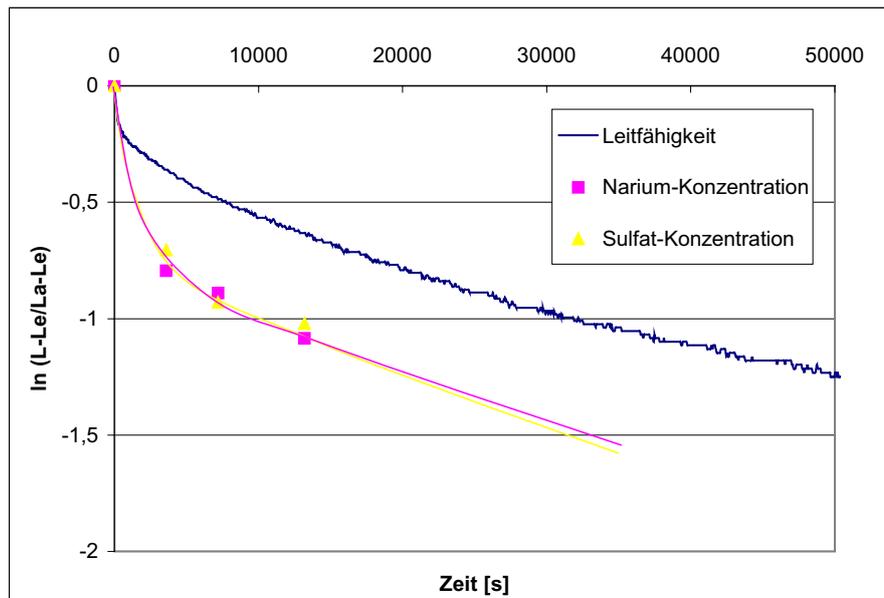


Abb. 8-3: Effektive Diffusionskoeffizienten 1 molare Natriumsulfatlösung im Sandstein (Bad Frankenhausen) ermittelt aus der Leitfähigkeit und der Ionenkonzentration

Durch die zusätzliche Erhöhung der Leitfähigkeit der Lösung ist der ermittelte Diffusionskoeffizient geringer als der anhand der Konzentration ermittelte (Tab. 8-1).

Tab. 8-1: Effektive Diffusionskoeffizienten 1 molare Natriumsulfatlösung im Sandstein (BF)

	D_{eff} (Leitfähigkeit)	$D_{\text{eff, Natrium}}$ (Konzentration)	$D_{\text{eff, Sulfat}}$ (Konzentration)
D [cm^2/s]	$0,41 \cdot 10^{-6}$	$0,97 \cdot 10^{-6}$	$0,79 \cdot 10^{-6}$

Eine stichprobenartige Kontrolle der Ergebnisse mit einer Messung der tatsächlichen Ionenkonzentration ist deshalb zu empfehlen.

Die dargestellte Messmethode zeichnet sich durch einen geringen experimentellen Aufwand und eine gute Genauigkeit aus. Kann jedoch nicht die Leitfähigkeit zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten herangezogen werden, muss die Ionenkonzentration in der Umgebungslösung bestimmt werden. Dadurch erhöht sich der experimentelle Aufwand geringfügig. Ein Nachteil dieser Messmethode ist, dass die Ionendiffusion nur bei vollständiger Sättigung des Probekörpers (Bauwerkstoffes) gemessen werden kann. Dies erhöht zudem die Wahrscheinlichkeit vom Auftreten der Konvektion neben der Diffusion. Zur Untersuchung der Diffusion in Abhängigkeit der Feuchtesättigung des Bauwerkstoffes müssen daher andere Messverfahren herangezogen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür der im Folgenden dargestellte 2-Scheiben Versuch (Abs. 5.5.3.2) und die Impedanzspektroskopie (Abs. 5.5.3.3) verwendet.

8.2 2-Scheiben-Anordnung

Die 2-Scheiben-Anordnung verhindert durch eine andere Anordnung der Probekörper im Vergleich zur 3-Scheiben-Anordnung [15] das Auftreten von Konvektion parallel zur Diffusion (Abs. 5.5.3.2). Zusätzlich wird durch die Wahl der zwei Scheiben der messtechnische Aufwand verringert. Die 2-Scheiben Anordnung stellt eine gute und einfach zu handhabende Messmethode für die Ermittlung von Ionendiffusionskoeffizienten bei unterschiedlichen Feuchtesättigungsgraden der Bauwerkstoffe dar.

8.2.1 Experimentelle Anordnung und Durchführung

Die gewählte experimentelle Anordnung ist in Abb. 8-4 dargestellt. Zur Ermittlung der effektiven Diffusionskoeffizienten werden zwei flüssigkeitspenetrierte Bauwerkstoffscheiben vorbereitet. Es ist zu beachten, dass die salzlösungsbeladene Scheibe unter der mit deionisiertem Wasser beladenen Scheibe angeordnet wird.

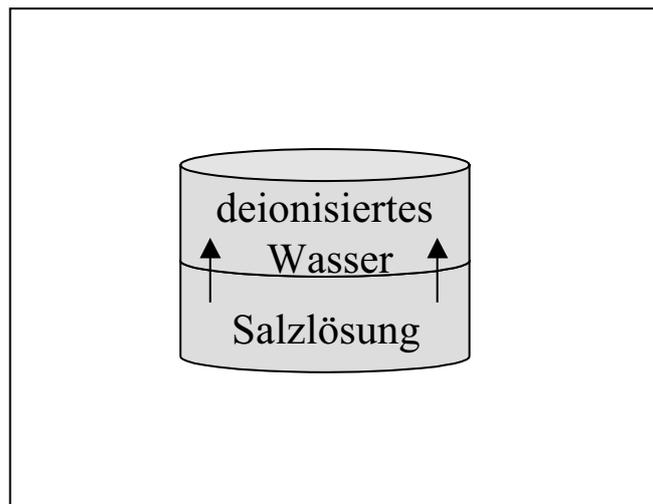


Abb. 8-4: Experimenteller Aufbau der 2-Scheiben Anordnung

Zur Optimierung der Kontaktbedingungen werden die beiden Scheiben unter konstanten Druck aufeinander gepresst. Während der gesamten Versuchsdauer ist dieser zusammengesetzte Probekörper luftdicht mit einem Latexüberzug gekapselt, um eine mögliche Trocknung zu verhindern. Dies gewährleistet die Betrachtung des rein diffusiven Transportes. Die Ermittlung der Diffusionskoeffizienten erfolgt durch die Bestimmung des Konzentrationsprofils am Ende des Versuches. Dabei wird das Konzentrationsprofil durch Bohrmehlproben ermittelt. Mit Hilfe des Simulationsprogramms SPID (Kap. 9) können die effektiven Diffusionskoeffizienten berechnet werden.

Ein Vorteil dieser Methode ist, dass die Ionendiffusionskoeffizienten bei unterschiedlichen Feuchtegehalten der porösen Bauwerkstoffe ermittelt werden können. Dieses wird dadurch ermöglicht, dass der Probekörper im Gegensatz zum Experiment der Ausdiffusion (Abs. 8.1) nicht in eine Umgebungslösung eingebracht werden muss. Zur Einstellung der jeweiligen Feuchtesättigung wurden die Proben mit deionisiertem Wasser feuchtesättigt, um den maximalen Feuchtegehalt zu ermitteln. Durch anschließende Trocknung werden sie für eine erneute Penetration mit der gewählten Porenlösung und Feuchtesättigung vorbereitet. Die Umrechnung der unterschiedlichen Massen der Porenlösungen bei gleicher Porenfüllung bedingt durch ihre unterschiedlichen Dichten erfolgt auf der Grundlage von Literaturwerten [57, 58]. Somit wird es möglich die Diffusionskoeffizienten zum einen in Abhängigkeit der Feuchtesättigung und zum anderen in Abhängigkeit der Konzentration zu ermitteln. Diese Methode bietet im Gegensatz zur Mikrowellentrocknung [15] den Vorteil, dass die Reduzierung der Porensättigung nicht mit einer Aufkonzentration der Porenlösung einhergeht.

8.2.2 Anwendungsbeispiel

In Abb. 8-5 ist der Einfluss einer Aufkonzentration der Porenlösung bei gleichem Feuchtegehalt dargestellt.

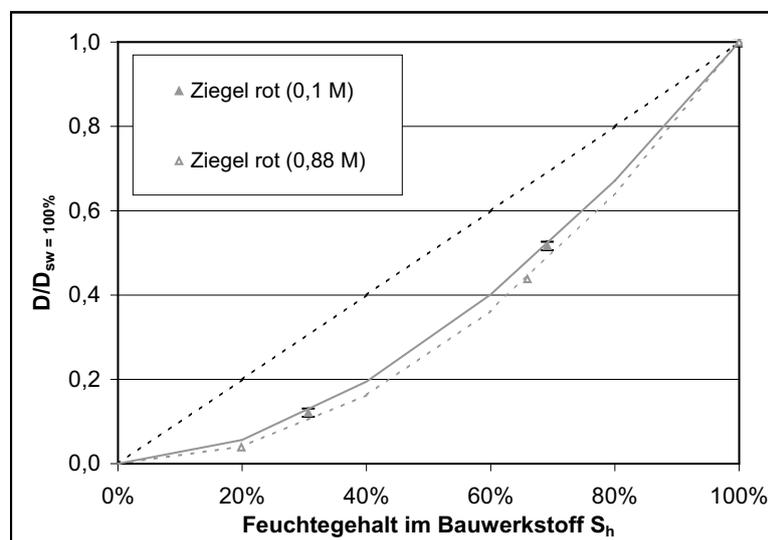


Abb. 8-5: Einfluss unterschiedlicher Methoden zur Einstellung der relativen Feuchtesättigung auf die ermittelten relativen Diffusionskoeffizienten

Der vergleichende Auftrag der ermittelten relativen Diffusionskoeffizienten zeigt, dass durch die höhere Konzentration der Porenlösung der Diffusionskoeffizient stärker mit der abnehmenden Feuchte abnimmt. Die höhere Konzentration stellt

eine zusätzliche Behinderung des Ionentransportes dar, deren Vernachlässigung die Berechnung von Diffusionskoeffizienten signifikant beeinflussen kann.

Ein Vorteil der 2-Scheiben-Anordnung liegt in der Möglichkeit, die Ionendiffusion bei unterschiedlichen Feuchtegehalten im Bauwerkstoff ohne das Auftreten von Konvektion messen zu können. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei dieser Methode die Diffusion direkt anhand der Ionenverteilung gemessen wird. Die Erstellung dieser Konzentrationsprofile bringt jedoch einen etwas höheren experimentellen Aufwand mit sich.

8.3 Impedanzspektroskopie

8.3.1 Experimentelle Anordnung und Durchführung

Die Impedanzspektroskopie ist eine weitere Methode zur Bestimmung feuchteabhängiger Ionendiffusionskoeffizienten in Bauwerkstoffen. Für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird ein Solartron 1260 verwendet (Abb. 8-6).



Abb. 8-6: Aufbau Messapparatur Impedanzspektrometer

Die salzlösungsbeladenen Probekörper befinden sich während des Messvorganges in einer luftdicht geschlossenen Messzelle, welche an das Impedanzspektrometer angeschlossen war. Die Kontaktierung zwischen den feuchtigkeitspenetrierten Probekörpern und den Kontaktstellen in der Messzelle wurde durch Plättchen aus Moosgummi realisiert, welche mit Leitsilber lackiert waren. Die vollstän-

dige Messapparatur ist in Abb. 8-6 dargestellt. Während der Messung wurde an die Proben eine sinusförmige Wechselspannung angelegt und das Responseverhalten der Probe ermittelt. Die Auswertung des Responseverhaltens kann mit verschiedenen Ersatzschaltbildern erfolgen [70]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das folgende Ersatzschaltbild mit verteilten Schaltelementen (Abb. 8-7) für offenporige salzlösungsbeladene Bauwerkstoffe gewählt.

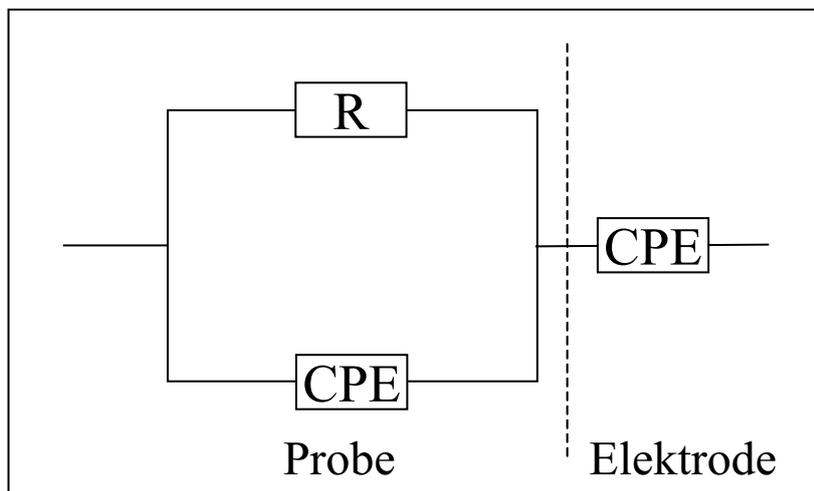


Abb. 8-7: Verwendetes Ersatzschaltbild

Die Verwendung von verteilten Schaltelementen erfolgt, wenn das Responseverhalten der Proben nicht mit einer endlichen Kombination von idealen Schaltelementen beschrieben werden kann.

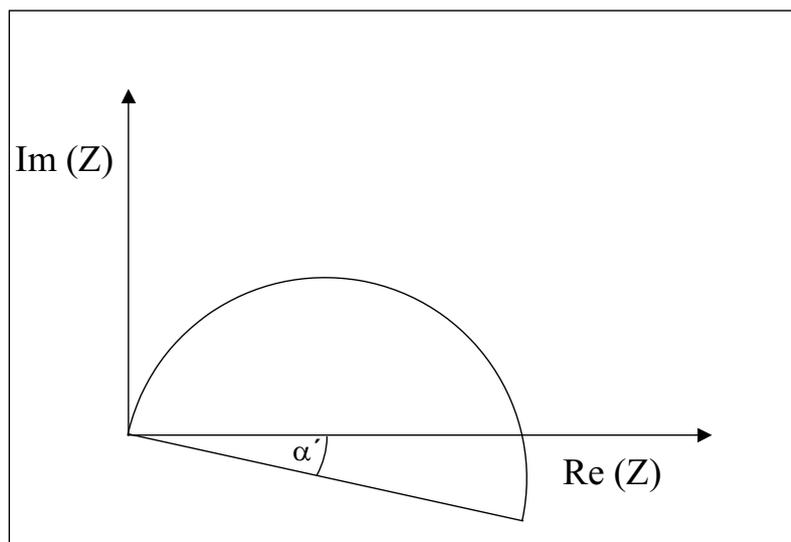


Abb. 8-8: Beispiel eines Z_{arc}

Die Nutzung solcher Elemente zur Auswertung impedanzspektroskopischer Messwerte (z.B. komplexe Impedanz) von feuchtehaltigen porösen Festkörpern ist

häufig beschrieben [70, 67, 69, 15]. Bei der Auftragung der komplexen Impedanz der salzlösungspenetrierten Probekörper in Abhängigkeit der Frequenz ergibt sich meist ein gestauchter Halbkreis, welcher auch als Z_{arc} bezeichnet wird (Abb. 8-8). Die Beschreibung dieses elektrischen Verhaltens des Z_{arc} kann durch die folgende Formel wiedergegeben werden.

$$Z_{arc} = \frac{R}{1 + A \cdot R(j\omega)^\varphi} \quad (8-2)$$

Dabei ist φ der Verteilungsexponent, welcher wie folgt vom Cole-Cole-Exponenten α und dem Senkungswinkel α' des gestauchten Halbkreises abhängt [70].

$$\alpha' = \frac{\pi}{2} \cdot (1 - \varphi) = \frac{\pi}{2} \cdot (-\alpha) \quad (8-3)$$

Die Ermittlung der Diffusionskoeffizienten erfolgt unter Verwendung der Nernst-Einstein-Gleichung (8-4) auf der Basis der gemessenen elektrischen Leitfähigkeit λ_{spez} der feuchte- und salzbelasteten porösen Bauwerkstoffe [15, 54].

$$D = \frac{\lambda_{spez} \cdot k \cdot T}{z^2 \cdot F \cdot e \cdot c} \quad (8-4)$$

λ_{spez}	spezifische Leitfähigkeit	[S/cm]
k	Boltzmannkonstante	[J/K]
T	Temperatur	[K]
z	elektrochemische Wertigkeit	[-]
F	Faradaykonstante	[C/mol]
e	Elementarladung	[C]
c	Konzentration	[mol/cm ³]

8.3.2 Überprüfung der Messanordnung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zur Bestimmung der feuchteabhängigen Diffusionskoeffizienten salzlösungsbelasteter Bauwerkstoffe Sandsteine und Ziegel mit unterschiedlich konzentrierten Salzlösungen bei verschiedenen Feuchtegehalten gleichmäßig penetriert. Als Probekörper wurden Zylinder mit einem Durchmesser von ca. 2 cm Durchmesser und ca. 1,5 – 5 cm verwendet. Da der Widerstand $R_{abs.}$ direkt proportional der Länge h und umgekehrt proportional zur Fläche A ist, ermöglicht die Wahl unterschiedlicher Längen der Probekörper die Messung der

elektrischen Leitfähigkeit poröser Bauwerkstoffe bei unterschiedlichen Konzentrationen der Porenlösungen im Rahmen des Messbereiches des Gerätes.

$$\lambda_{spez.} = \frac{1}{R_{abs.}} \frac{h}{A} \quad (8-5)$$

Die Konsistenz der gewählten Modelle und Messanordnungen bei der Variation der geometrischen Abmessung der Probekörper können anhand der probenspezifischen Leitfähigkeit $\lambda_{spez.}$ (Tab. 8-2) überprüft werden.

Tab. 8-2: Spezifische Leitfähigkeit $\lambda_{spez.}$ des Obernkirchener Sandsteins bei unterschiedlicher Probekörperlänge mit 0,01 molarer Natriumsulfatlösung

Länge der Probekörper [cm]	ca. 2	ca. 4
Spezifische Leitfähigkeit $\lambda_{spez.}$ [mS/m]	0,116 ± 0,001	0,113 ± 0,003

Die mittlere probenspezifische Leitfähigkeit aus jeweils drei Parallel-Messungen bleibt unabhängig von der Änderung der geometrischen Abmessungen im Rahmen der Schwankungsbreiten gleich. Die Einstellung der unterschiedlichen Feuchtegehalte erfolgte durch die in Abs. 8.2 beschriebene Methode.

8.3.3 Bestimmung des Cole-Cole-Exponenten und der inneren Oberfläche

Für die Untersuchungen zum Cole-Cole-Exponenten α wurden der Kelbraer Sandstein und der Obernkirchener Sandstein bei unterschiedlichen Feuchtegehalten mit 0,01 molarer Natriumsulfatlösung penetriert. Die aus den impedanzspektroskopischen Messungen ermittelten Cole-Cole-Exponenten sind in der folgenden Abbildung (Abb. 8-9) über den Feuchtegehalt im Bauwerkstoff aufgetragen. Die Auftragung des Cole-Cole Exponenten α über den Feuchtegehalt zeigt, dass es keine signifikante Änderung für die verschiedenen Feuchtegehalte gibt.

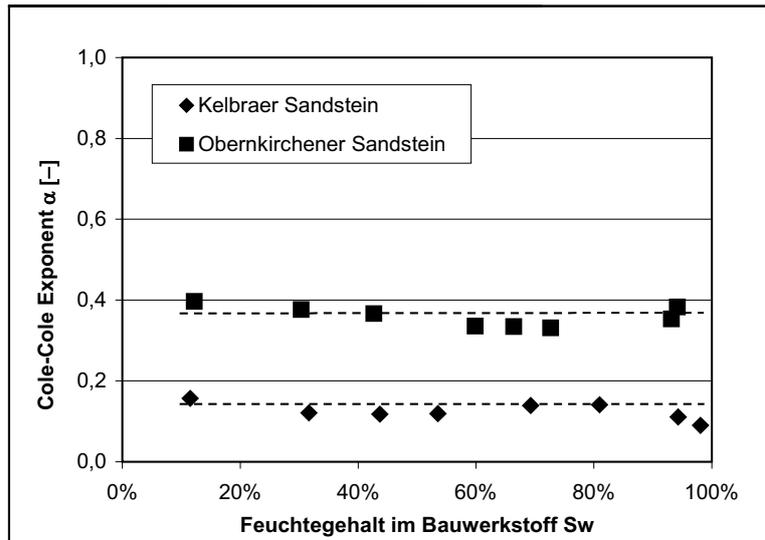


Abb. 8-9: Cole-Cole Exponent α in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes

Für die Untersuchung der Abhängigkeit des Cole-Cole Exponenten α von der Konzentration der Porenlösung wurden Probekörper des Obernkirchener Sandstein mit unterschiedlich konzentrierten Natriumsulfatlösungen penetriert. Es zeigte sich keine signifikante Abhängigkeit des Cole-Cole Exponenten α von der Konzentration der Porenlösung (Abb. 8-10).

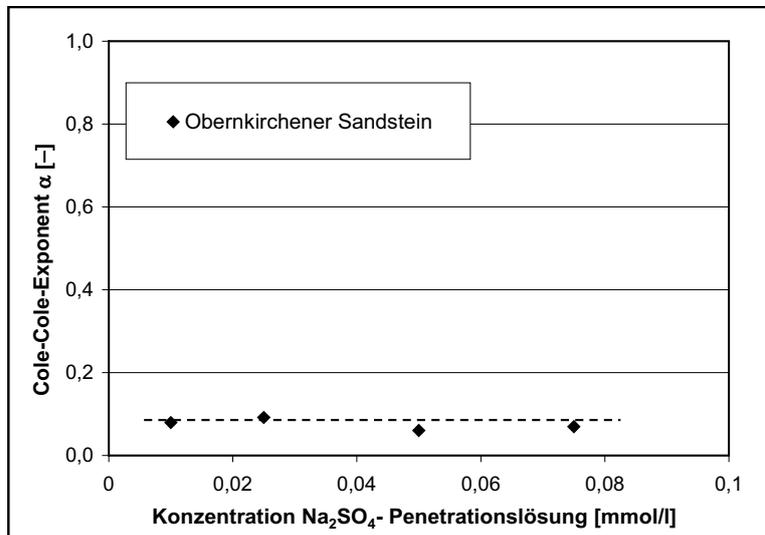


Abb. 8-10: Cole-Cole Exponent α in Abhängigkeit der Konzentration der Lösung

Da der Cole-Cole Exponent α nicht von der Konzentration der Porenlösung und dem Porenfüllungsgrad abhängt kann man schließen, dass er vorzugsweise von der speziellen Ausbildung der Porenmorphologie des Probekörpers abhängen müsste. Ein Kennwert der Porenmorphologie ist die spezifische innere Oberfläche, die ein indirektes Maß für die Strukturierung des Porenraumes ist. In Abb. 8-11 sind von verschiedenen Sandsteinen und einem Ziegel, welche mit 0,01 molarer

Natriumsulfatlösung penetriert sind, die Cole-Cole Exponenten α und die spezifischen innere Oberflächen aufgetragen.

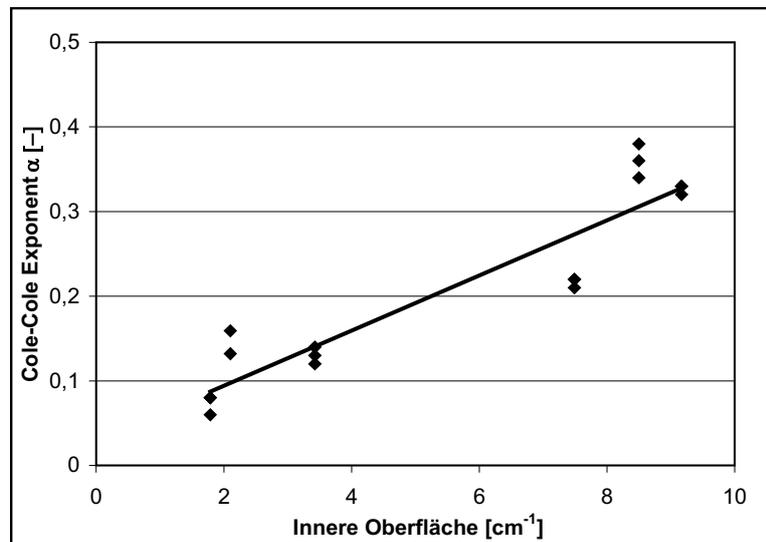


Abb. 8-11: Cole-Cole Exponent α in Abhängigkeit der spezifischen inneren Oberfläche

Durch die Auftragung des Cole-Cole Exponenten α gegen die spezifische innere Oberfläche wird die Abhängigkeit des Exponenten von der Porenmorphologie gut sichtbar. Die Sandsteine unterscheiden sich im Bindemittel, der Porosität und den Porenradienverteilungen. Es wird deutlich, dass mit der Zunahme der inneren Oberfläche auch der Cole-Cole Exponent α zunimmt. Dieses Verhalten bestätigt die Annahme, dass der Cole-Cole Exponent α sich direkt mit der spezifischen inneren Oberfläche korrelieren lässt. Auch im Bereich geophysikalischer Gesteinsuntersuchungen wurde von Kulenkampff [61] eine gesteinspezifische Abhängigkeit des Exponenten festgestellt. Die Abb. 8-11 zeigt somit, dass mit einer geringeren Strukturierung der Oberfläche der Cole-Cole Exponent α kleiner wird. Dies bedeutet, dass das Response-Verhalten der Probe gleichmäßiger wird. Es lassen sich damit durch die Ergebnisse der impedanzspektroskopischen Messungen Rückschlüsse auf die charakteristischen Größen der Porenmorphologie ziehen. Die funktionale Abhängigkeit des Cole-Cole-Exponenten α von der spezifischen inneren Oberfläche S_i kann für Sandsteine und für Ziegel unabhängig von der mineralischen Zusammensetzung durch die folgende lineare Gleichung wiedergegeben werden.

$$S_i = 30,7 \cdot \alpha - 0,9 \quad (8-6)$$

Somit kann auch durch impedanzspektroskopische Messungen feuchter Baustoffe deren spezifische innere Oberfläche bestimmt werden.

8.3.4 Bestimmung des Formationsfaktors

Eine weitere Charakterisierung der Porenmorphologie mit Hilfe der Impedanzspektroskopie kann durch den Formationsfaktor F erfolgen.

$$F = \frac{\sigma_{Lsg}}{\sigma_{eff}} = const. \quad (8-7)$$

Für die Untersuchungen zum Formationsfaktor wurden der Bucher, Sander, Wüstenzeller und Obernkirchener Sandstein mit vier verschiedenen Salzlösungen (Na_2SO_4 -, NaCl -, MgSO_4 - und MgCl_2 -Lösung) penetriert. Jede Salzlösung wurde dabei in vier verschiedenen Konzentrationen verwendet. Aus den impedanzspektroskopischen Messungen wurden die probenspezifischen effektiven Leitfähigkeiten ermittelt. Mit den Lösungsleitfähigkeiten aus der Literatur [57] können daraus die Formationsfaktoren ermittelt werden. Die auf diese Weise aus den experimentellen Untersuchungen ermittelten Formationsfaktoren sind in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung in der Abb. 8-12 dargestellt.

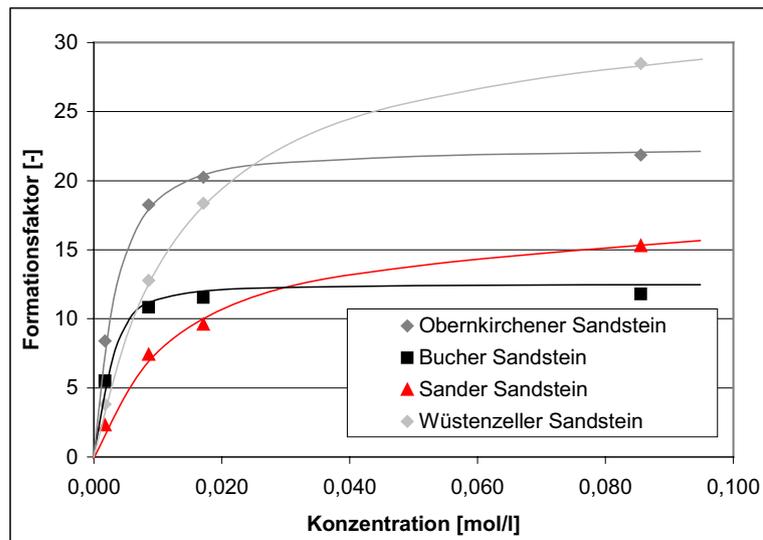


Abb. 8-12: Abhängigkeit des Formationsfaktors von der Konzentration der Porenlösung (NaCl)

Buchwald und Winsauer [15, 59] gehen dabei von einem konstanten Wert für den Formationsfaktor F aus. Die Auftragung des Formationsfaktors F über die Konzentration der Porenlösung λ_{PI} (Abb. 8-13) zeigt, dass dieser jedoch konzentrationsabhängig ist. Das bedeutet, dass dieser Faktor nicht nur von einem rein geometrischen Einfluss bestimmt wird. Die genaue Abhängigkeit ist jedoch trotzdem klar von der jeweiligen Art der Proben abhängig. Die Erklärung dieses Sachverhaltes lässt sich gut mit der Auftragung der Probenleitfähigkeit λ_{eff} über die Porenlösungsleitfähigkeit λ_{PI} verdeutlichen. Der funktionalen Zusammenhang dieser

beiden Größen lässt sich dabei in guter Näherung durch eine Gerade darstellen (Abb. 8-13).

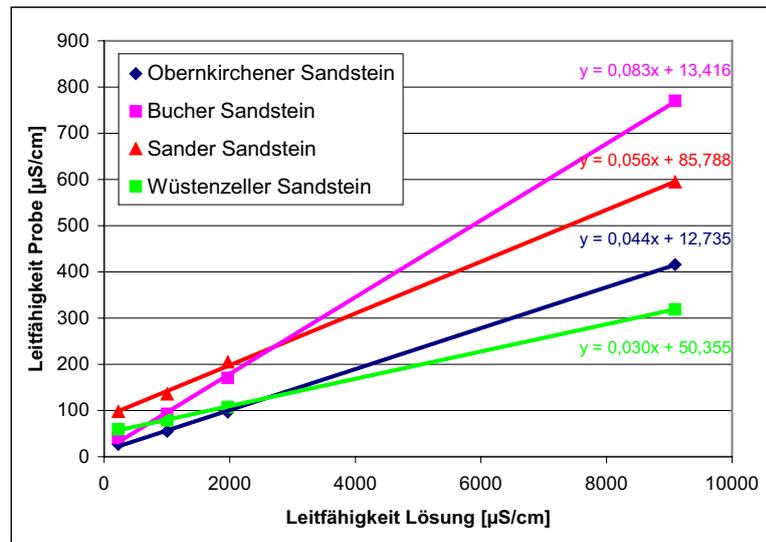


Abb. 8-13: Probenleitfähigkeit λ_{eff} in Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Penetrationslösung λ_{PI} (Natriumchloridlösung)

Ein Modell, welches den funktionalen Zusammenhang zwischen Probenleitfähigkeit λ_{eff} und Porenlösungsleitfähigkeit λ_{PI} wiedergibt, wurde z.B. von Waxman und Smits [79] für tonige Gesteine und von Rink und Schopper [80] in allgemeinerer Anwendung angegeben. Dieser Ansatz geht von einer Parallelschaltung der Volumen- und Grenzflächenleitfähigkeit aus (8-7).

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_{\text{PI}}}{F} + \lambda_{\text{g}} \quad (8-8)$$

Das bedeutet, dass die physikalischen Prozesse durch die Gesteinsmatrix, die Porenlösung und die Grenzfläche zwischen Matrix und Porenlösung bedingt sind. Verursacht durch die Oberflächenladungen der Gesteine kommt es beim Kontakt mit der Porenlösung zum Aufbau von Doppelschichten. Ausgehend von dieser Modellvorstellung und den gemessenen Werten wird also deutlich, dass gerade im Bereich niedriger Konzentrationen der Anteil der Grenzflächenleitfähigkeit λ_{g} an der Probenleitfähigkeit λ_{eff} einen entscheidenden Einfluss besitzt. Bei höheren Konzentrationen und damit auch wesentlich höheren Probenleitfähigkeiten λ_{eff} wird dieser Anteil vernachlässigbar. Zum einen resultiert dies mit zunehmender Konzentration aus der abnehmenden Ausdehnung der Doppelschicht und zum andern aus der Abnahme des Oberflächenpotentials [78, 80].

Löst man die Gleichung (8-7) nach F auf und vergleicht sie mit dem Ansatz (5-33), so stellt man fest, dass der Unterschied in der Berücksichtigung der Grenzflächenleitfähigkeit λ_g liegt.

$$F = \frac{\lambda_{PI}}{\lambda_{eff} - \lambda_g} \neq \frac{\lambda_{PI}}{\lambda_{eff}} \quad (8-9)$$

Für niedrige Konzentrationen muss somit zur Bestimmung eines geometrischen Formationsfaktors F der Ansatz nach (8-8) berücksichtigt werden. Nur bei hohen Konzentrationen der Porenlösungen kann der geometrische Wert des Formationsfaktors F nach der Formel (5-33) ermittelt werden, da dann die Leitfähigkeit in Grenzflächennähe nur einen geringen Beitrag zur Probenleitfähigkeit λ_{eff} liefert. Aus Abbildung (Abb. 8-13) kann aus der Steigung der Geraden der Formationsfaktor F und aus dem Schnittpunkt mit der y-Achse die Grenzflächenleitfähigkeit λ_g ermittelt werden. Vergleicht man die verschiedenen Sandsteine mit gleicher Porenlösung, so erkennt man einen jeweils sandsteinspezifischen Verlauf dieser Geraden. Paralleluntersuchungen mit weiteren Salzlösungen (Na_2SO_4 -, MgSO_4 - und MgCl_2 -Lösung) zeigten stets einen nahezu gleichen Verlauf, so dass die Geradengleichungen der vier Sandsteine aus diesen Messungen mit den unterschiedlichen Salzlösungen als Mittelwerte angegeben werden können (Tab. 8-3).

Tab. 8-3: Funktion der Probenleitfähigkeit λ_{eff} in Abhängigkeit der Lösungsleitfähigkeit

Bauwerkstoff	Funktion
Bucher Sandsteine	$\lambda_{eff} = 0,080 \lambda_{PI} + 13,98$
Sander Sandsteine	$\lambda_{eff} = 0,055 \lambda_{PI} + 79,22$
Obernkirchener Sandstein	$\lambda_{eff} = 0,043 \lambda_{PI} + 10,73$
Wüstenzeller Sandsteine	$\lambda_{eff} = 0,029 \lambda_{PI} + 49,14$

Die Steigungen der Geraden nehmen mit der Porosität der Sandsteine ab.

Der geometrische Formationsfaktor, welcher aus den zuvor genannten Untersuchungen der vier verschiedenen Sandsteine ermittelt werden konnte, ist mit den jeweiligen Schwankungsbreiten angegeben (Tab. 8-4).

Tab. 8-4: Ermittelte Formationsfaktoren verschiedener Sandsteine

Probekörper	Formationsfaktor [-]
Bucher Sandstein	12,72 ± 1,47
Sander Sandstein	18,13 ± 1,11
Obernkirchener Sandstein	23,07 ± 1,15
Wüstenzeller Sandstein	33,92 ± 0,89

Die Formationsfaktoren der Sandsteine nehmen wie erwartet mit zunehmender Porosität ab.

Die Messmethode der Impedanzspektroskopie ist somit sehr vorteilhaft wegen des geringen experimentellen Aufwandes. Des Weiteren können auch wie zuvor beschrieben charakteristische Kennwerte der Porenmorphologie der Bauwerkstoffe (z.B. Formationsfaktor, innere Oberfläche) mit geringem Aufwand ermittelt werden. Ein Nachteil der Impedanzspektroskopie ist, dass die Ermittlung der Diffusionskoeffizienten über die Bestimmung über die Leitfähigkeit erfolgt.

8.4 Ergebnisse und Diskussion der Untersuchung des diffusiven Ionentransportes

Anhand der Beschreibungen der Messverfahren konnten einige verfahrensspezifische Einflüsse bei der Bestimmung effektiver Diffusionskoeffizienten aufgezeigt werden. Für die Bestimmung der Diffusionskoeffizienten in der Lösung und im Bauwerkstoff muss der Einfluss der Konzentrations-, Feuchte- und Temperaturabhängigkeit der Diffusion berücksichtigt. Diese Einflüsse werden in den folgenden Unterkapiteln näher charakterisiert und quantifiziert.

8.4.1 Einfluss der Bauwerkstoffe auf die Diffusion

Der Einfluss der Bauwerkstoffe auf die Ionendiffusion wird in der Literatur in der Regel durch den geometrischen Faktor der Tortuosität τ erfasst. Da die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit jedoch noch weitere Abhängigkeiten der Tortuosität gezeigt haben, wird die Tortuosität jeweils in den folgenden Kapitel mit aufgegriffen.

Für die experimentelle Ermittlung von Ionendiffusionskoeffizienten in wässrigen Lösungen sind die Abhängigkeiten dieser Koeffizienten von der Konzentration der Lösung bereits häufig untersucht und vielfach dokumentiert worden. Für die Ermittlung der Ionendiffusionskoeffizienten in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung im Porenraum poröser Bauwerkstoffe liegen jedoch nur vereinzelte

Ergebnisse vor [19, 15]. Um den messtechnischen Aufwand zu verringern, wird für eine rechnerische Ermittlung der effektiven Diffusionskoeffizienten im Bauwerkstoff die folgende Abhängigkeit angegeben [15, 81, 60].

$$\tau = \frac{D_{Lsg.}}{D_{eff.}} \quad (8-10)$$

Die Tortuosität τ wurde bislang als eine bauwerkstoffspezifische Konstante beschrieben. Häufig wird auch gerade im Zusammenhang mit der Messung der komplexen elektrischen Leitfähigkeit von feuchte- und salzgefüllten porösen Gesteinen über die Nernst-Einstein-Gleichung die folgende formelle Abhängigkeit zum Formationsfaktor geschaffen.

$$F = \frac{\tau}{\varepsilon} \quad (8-11)$$

Allerdings zeigten bereits die Untersuchungen (Abs. 8.3) zum Formationsfaktor, dass dieser über einen breiten Konzentrationsbereich der Porenlösung keinen konstanten Wert besitzt. Dies kann durch den folgenden Versuch untermauert werden.

8.4.2 Einfluss der Konzentration der Porenlösung auf die Diffusion

Zur detaillierteren Untersuchung der Konzentrationsabhängigkeit der Diffusion wurden durch Ausdiffusion effektive Diffusionskoeffizienten bei unterschiedlichen Konzentrationen der Porenlösungen und vollständiger Probensättigung bestimmt.

Die effektiven Ionendiffusionskoeffizienten in Bauwerkstoffen wurden dafür an Glasfilterplatten (GFP) mit einer definierten Porosität (Porosität 5) bestimmt. Sie wurden mit Natriumsulfatlösungen unterschiedlicher Konzentration penetriert. Der Ausdiffusionsversuch wurde bei 25 °C durchgeführt. Durch den Vergleich der Ergebnisse der Messungen der effektiven Diffusionskoeffizienten im Bauwerkstoff und der Diffusionskoeffizienten in der Lösung (Literaturwerte) in unterschiedlichen Konzentrationsbereichen konnten Konzentrationsabhängigkeiten nach Abb. 8-14 festgestellt werden.

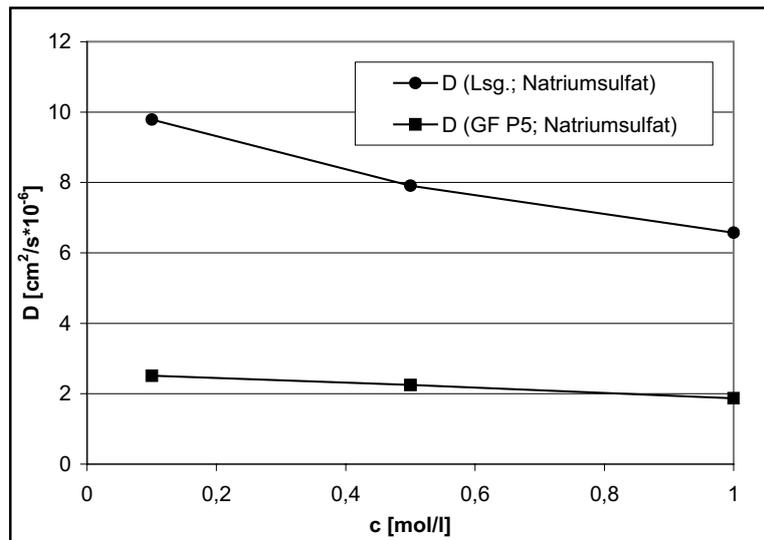


Abb. 8-14: Diffusionskoeffizienten von Natriumsulfat in der Lösung und im Bauwerkstoff

Es zeigt sich, dass die Diffusionskoeffizienten im Bauwerkstoff und in der Lösung nicht die gleiche Abhängigkeit von der Konzentration aufweisen. Dies bedeutet, dass somit auch die Tortuosität (8-9) keine rein geometrische Größe ist. Für die genaue Erfassung der diffusiven Prozesse im Bauwerkstoff besteht die Notwendigkeit, die Tortuosität für jeden Bauwerkstoff konzentrationsabhängig zu bestimmen. Beispielhaft sind in Abbildung Abb. 8-15 die konzentrationsabhängigen Tortuositäten zweier unterschiedlicher Materialien aufgetragen.

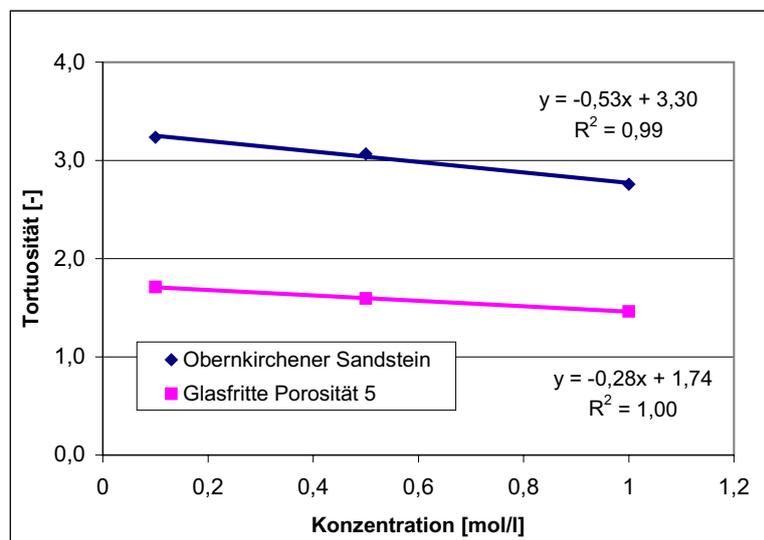


Abb. 8-15: Konzentrationsabhängige Tortuosität vom Obernkirchener Sandstein und der Glasfilterplatte (Porosität 5) bei Verwendung von Natriumsulfatlösung

Für diese Untersuchungen wurde der Obernkirchener Sandstein und eine Glasfilterplatte mit Natriumsulfatlösung unterschiedlicher Konzentration vollständig pe-

netriert. In Abb. 8-15 ist ersichtlich, dass für jeden Werkstoff eine materialspezifische Abhängigkeit der Tortuosität von der Konzentration besteht. Um den Einflusses der Penetrationslösung auf die Konzentrationsabhängigkeit der Tortuosität zu bestimmen, wurde der Ausdiffusionsversuch mit der Glasfilterplatte (Porosität 5, penetriert mit Natriumsulfatlösung) auch mit Natriumchloridlösung unterschiedlicher Konzentrationen durchgeführt (Abb. 8-16).

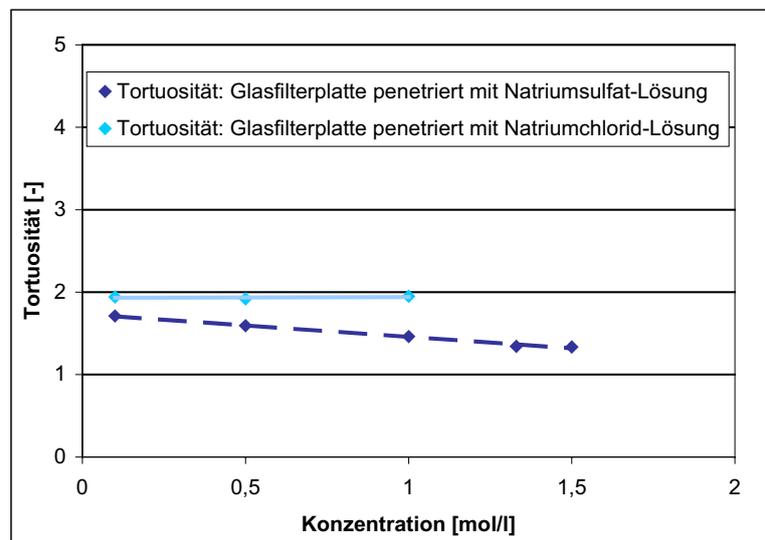


Abb. 8-16: Konzentrationsabhängige Tortuosität verschiedener Salze

Es zeigt sich beim gleichen Werkstoff somit auch ein lösungsspezifischer Einfluss auf die Tortuosität. Damit zeigen diese experimentellen Ergebnisse, dass parallel zum Formationsfaktor auch bei der Tortuosität eine Konzentrationsabhängigkeit vorliegt.

8.4.2.1 Konzentrationsabhängigkeit der Tortuosität und des Formationsfaktors

Die Abhängigkeit der Tortuosität und des Formationsfaktors von der Konzentration besteht jedoch nicht im gleichen Maße, so dass zwischen der Tortuosität und dem Formationsfaktor nicht über die Gleichung (5-32) umgerechnet werden kann. Es ist kein konstanter Faktor der Porosität, welcher zwischen dem aus der Leitfähigkeit bestimmten Formationsfaktor und der aus der Diffusion bestimmten Tortuosität liegt. Diese Verknüpfung wird zwar in der Regel über die Nernst-Einstein-Gleichung hergeleitet [15], dies ist aber auf Grund ihrer beschränkten Anwendbarkeit über einen weiten Konzentrationsbereich nur bedingt sinnvoll. Die Gründe für die Beschränkungen der Nernst-Einstein-Gleichung sind sehr vielschichtig. Eine Grundvoraussetzung für die Gültigkeit der Gleichung liegt in der Annahme, dass die gleichen Ionen, die an Diffusionsprozessen teilnehmen, auch die Leitfähigkeit

bestimmen (Abs. 8.1). Auch durch die Betrachtung der Konzentrationsabhängigkeit der Diffusion und der Leitfähigkeit unter Berücksichtigung nicht ideal verdünnter Lösungen wird eine weitere Einschränkung des Anwendungsbereiches der Nernst-Einstein-Gleichung deutlich (5-25, 5-26). Anhand der Gleichungen ist zu erkennen, dass die Konzentrationsabhängigkeit unterschiedlich erfasst wird und somit die äquivalente Leitfähigkeit und der Diffusionskoeffizient von unterschiedlichen Mechanismen beeinflusst werden. Auf Grund des eingeschränkten Anwendungsbereiches der Nernst-Einstein-Gleichung ist es nicht möglich, über den gesamten Konzentrationsbereich einer Salzlösung die Berechnung der Tortuosität nach (8-9) durchzuführen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Charakterisierung der Diffusion in einem porösen Bauwerkstoff lediglich auf der Basis der Tortuosität (8-9) nicht aussagekräftig ist, da die Tortuosität sowohl von der Art als auch der Konzentration der Porenlösung abhängt. Die Tortuosität nach (8-9) ist damit also kein rein geometrischer Faktor.

8.4.3 Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Diffusion

Die Untersuchungen zur Feuchteabhängigkeit der Diffusion wurden anhand von impedanzspektroskopische Messungen durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden fünf verschiedene Sandsteine und ein Ziegel gewählt. Die Messungen zur Ermittlung der Diffusionskoeffizienten wurden an zylindrischen Probekörpern unterschiedlicher Längen mit einem Durchmesser von etwa 2 cm vorgenommen.

8.4.3.1 Diffusion in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff unter Berücksichtigung der Porenmorphologie

Für die Untersuchungen des Einflusses der Porenmorphologie auf die im Bauwerkstoff stattfindenden Diffusionsprozesse bei variierendem Feuchtegehalt wurden in den Probekörpern der fünf verschiedenen Sandsteine unterschiedliche Feuchtegehalte eingestellt. Als Porenlösung wurde eine 0,01 molare Natriumsulfatlösung verwendet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zur besseren Übersicht anhand zweier Sandsteine, dem Seeberger und dem Vogelsberger Sandstein, in der Abb. 8-17 dargestellt.

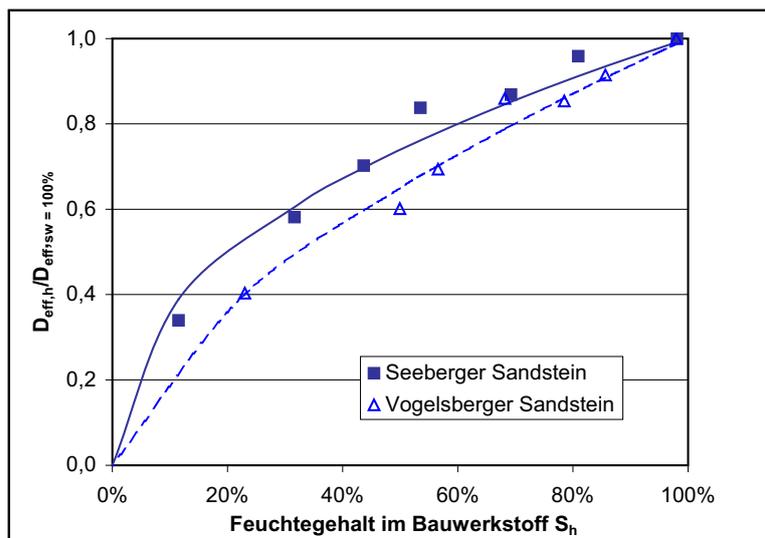


Abb. 8-17: Relative Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes am Beispiel des Seeburger und Vogelsberger Sandsteines

Die Auftragung der relativen Diffusionskoeffizienten über den Feuchtegehalt S_h der Sandsteine zeigt dabei einen sandsteinspezifischen exponentiellen Verlauf, so dass eine generelle Beschreibung durch die folgende Potenzfunktion [15, 62] möglich ist.

$$D_{eff,h} = D_{eff,SW=100\%} \cdot S_h^n \quad (8-12)$$

Der feuchteabhängige Diffusionskoeffizient $D_{eff,h}$ kann mit dem effektiven Diffusionskoeffizienten bei 100 % Feuchtesättigung $D_{eff,SW=100\%}$, der aktuellen Feuchtesättigung S_h und dem materialspezifischen Feuchteexponenten n bestimmt werden. Die durch diese Potenzfunktion ermittelten Feuchteexponenten der Sandsteine sind in der Tab. 8-5 aufgelistet.

Tab. 8-5: Feuchteexponent der Thüringer Sandsteine

	Feuchteexponent n
Oldislebener Sandstein	0,64
Kelbraer Sandstein	0,53
Bad Frankenhäuser Sandstein	0,57
Seeburger Sandstein	0,40
Vogelsberger Sandstein	0,67

Alle Feuchteexponenten der untersuchten Sandsteine liegen im Bereich von $0 < n < 1$. Die dennoch vorhandenen Unterschiede im Feuchteexponenten der

einzelnen Sandsteine werden noch einmal anhand der Darstellung in Abb. 8-17 deutlich. Die unterschiedlich starke Reduzierung der Diffusionskoeffizienten liegt, unter gleich gewählten experimentellen Bedingungen, in der spezifischen Porenmorphologie begründet. Durch die Unterteilung der durch Quecksilberdruckporosimetrie ermittelten Porenradien in grob, mittel und feine Porenradien können die Unterschiede des Porengefüges sichtbar gemacht werden (Abb. 8-18). Die Unterteilungen grob, mittel und feine Porenradien erfolgten dabei in den folgenden Porenradienbereichen nach Tab. 8-6.

Tab. 8-6: Klassifizierung der Porenradien

Klassifizierung Porenradien	Porenradien [μm]
grob	ca. 250 - 11
mittel	ca. 11 - 0,2
fein	ca. 0,2 - 0,005

Die prozentualen Anteile dieser Porenradienklassen für die Thüringer Sandsteine sind in Abb. 8-18 dargestellt.

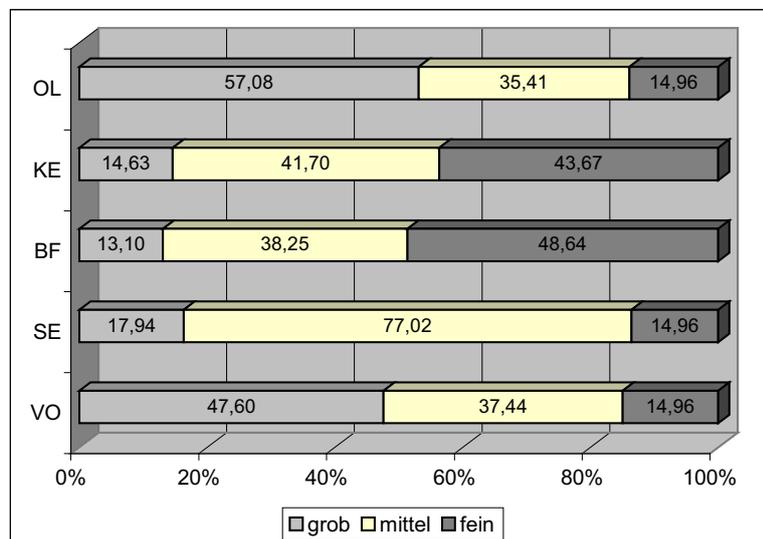


Abb. 8-18: Porenradienverteilung nach Klassifizierung grob, mittel, fein der Sandsteine (Gruppe I)

Betrachtet man die prozentualen Anteile der Porenradienklassen (grob, mittel, fein) dieser Sandsteine, so weisen jeweils der Vogelsberger und der Oldislebener Sandstein und der Kelbraer und Bad Frankenhäuser Sandstein eine ähnliche Verteilung auf. Der Seeberger Sandstein besitzt mit einem Anteil von 77 % den größten Anteil an mittleren Porenradien. Beim Vergleich der Feuchteexponenten

der Sandsteine mit den Porenradienverteilungen erkennt man, dass die Sandsteine mit ähnlichen Verteilungen auch ähnliche Feuchtexponenten aufweisen. Mit einem zunehmenden Anteil an Feinporen nimmt im Allgemeinen der Feuchtexponent ab. Beim Seeberger Sandstein ist diese Abhängigkeit lediglich näherungsweise erfüllt. Die schnellere Abnahme des Diffusionskoeffizienten mit der Abnahme des Porenfeuchtegehaltes kann mehrere Ursachen haben. Zum einen erfolgt die Reduzierung der Diffusionskoeffizienten durch die Unterbrechung von durchgehenden Transportpfaden und zum anderen durch die Immobilisierung der Ionen in der Lösung durch einen dünner werdenden Feuchtigkeitsfilm an den Porenwänden. Beide reduzierenden Faktoren sind abhängig von der Porenmorphologie des jeweiligen Bauwerkstoffes.

Ein weiteres Beispiel für den Einfluss der Porenmorphologie auf die Reduzierung des Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Feuchtesättigung des Porensystems eines Bauwerkstoffes bieten die experimentellen Untersuchungen anhand eines Ziegels. Ziegel besitzen häufig bedingt durch den Herstellungsprozess sogenannte schwarze Kerne. Schon geringe Anteile organischer Substanzen in der Ziegelmasse können bei behinderter Oxidation während der Aufheizphase im Herstellungsprozess zum Entstehen dieser schwarzen Kerne führen [74, 75]. Die folgenden Untersuchungen ermöglichten es, den Einfluss der schwarzen Kerne auf die Porenmorphologie und die Transportparameter zu bestimmen.

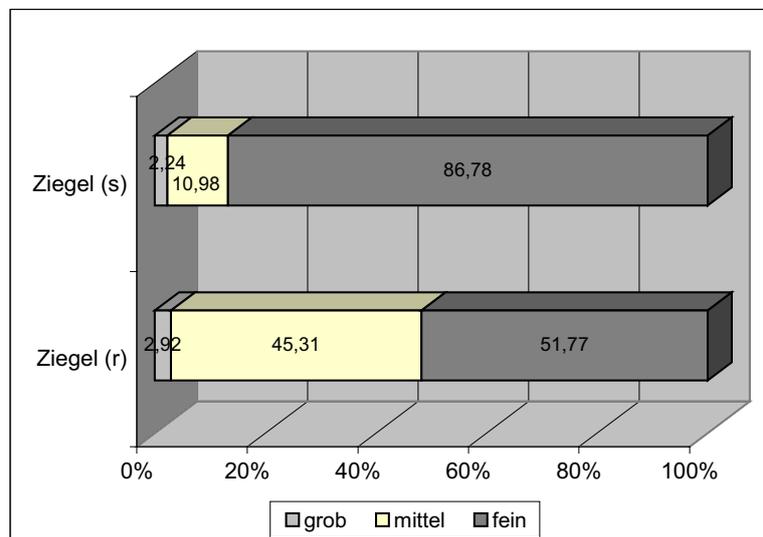


Abb. 8-19: Porenradienklassifizierung des Ziegels (r) und (s)

Mittels Quecksilberdruckporosimetrie werden die Porenradien bestimmt und diese in die Kategorien grob, mittel und fein unterteilt. Nach Abb. 8-19 erkennt man deutlich, dass der Ziegel im Bereich des schwarzen Kerns (s) einen deutlich größeren Anteil an Feinporen als im roten Bereich (r) besitzt. Die Gesamtporosität

des Ziegels (s) beträgt 34,2 % und ist damit größer als die des Ziegels (r) mit 28,5 %. Auch hier zeigt sich analog zu den Sandsteinen der gleiche Sachverhalt, dass mit einem höherem Vernetzungsgrad des Porensystems (Porosität und Porenradienverteilung) der Feuchteexponent kleiner wird (Abb. 8-20).

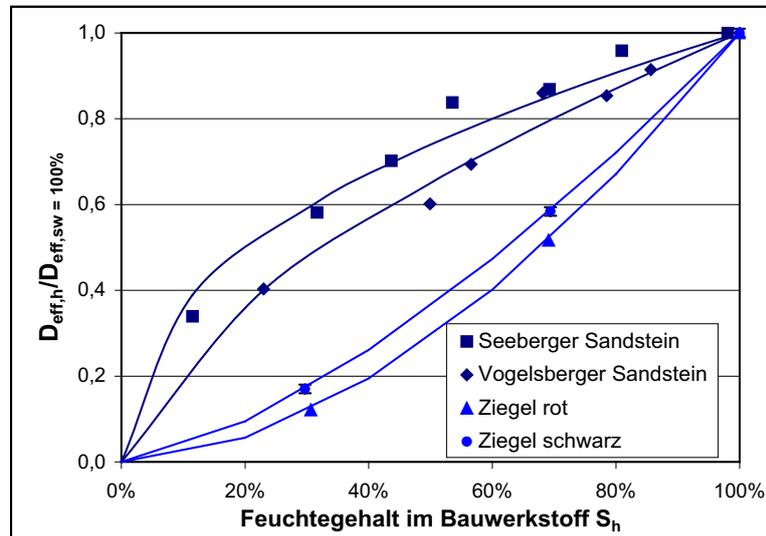


Abb. 8-20: Relative Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes S_h im Bauwerkstoff

Anhand der Sandsteine erkennt man jedoch, dass der Einfluss der Porenradienverteilung größer ist als der Einfluss der Porosität. In Abb. 8-20 wird deutlich, dass die natürlich entstandenen Sandsteine generell einen höheren Vernetzungsgrad des Porensystems aufweisen als die maschinell hergestellten Ziegel.

8.4.3.2 Diffusion in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff unter Berücksichtigung der Konzentrationsänderung der Porenlösung

Die Ionentransportprozesse bei unterschiedlichen Feuchtegehalten in Bauwerkstoffen zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Porenmorphologie. Gleichzeitig zeigt sich aber auch der Einfluss der Konzentration der Porenlösung auf diese Prozesse. Beide Einflüsse werden anhand des folgenden Experimentes deutlich. Der Ziegel (s) und (r) wurde mit 0,1 molarer und 0,88 molarer Natriumsulfatlösung penetriert. Die Darstellung der relativen Diffusionskoeffizienten nach Abb. 8-21 in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes zeigt, dass mit zunehmender Konzentration bei gleichem Feuchtegehalt der Feuchteexponent steigt. Die aus diesen Messwerten ermittelten Feuchteexponenten sind für unterschiedliche Konzentrationen der Porenlösungen und Ziegelbereiche in Tab. 8-7 wiedergegeben.

Tab. 8-7: Feuchteexponenten des Ziegel (s) und (r) in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung

	0,1 M Na ₂ SO ₄	0,88 M Na ₂ SO ₄
Ziegel (r)	1,79	1,98
Ziegel (s)	1,46	1,68

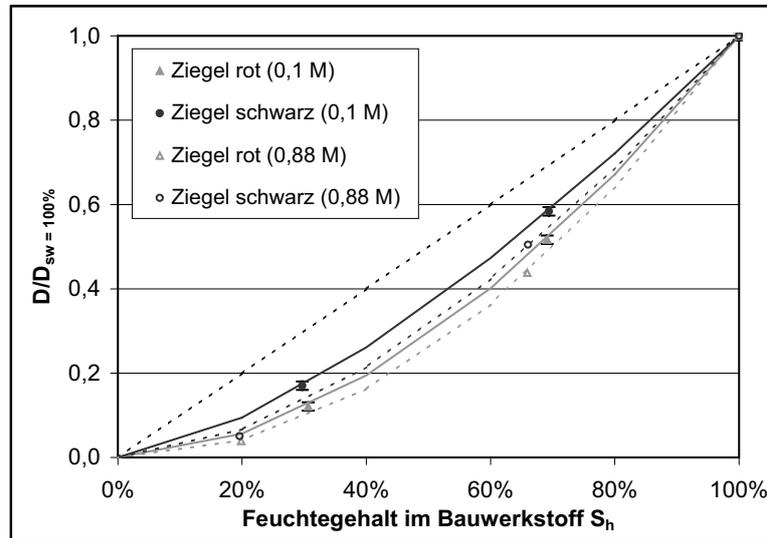


Abb. 8-21: Relative Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes und verschiedener Konzentrationen der Porenlösungen

Somit variiert der Feuchteexponent nicht nur in Abhängigkeit der Porenmorphologie sondern auch in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung. Zur Untersuchung des Einflusses der Art der Porenlösung wurden Probekörper des Obernkirchener Sandsteines mit Natriumchlorid- und Natriumsulfatlösung unterschiedlicher Konzentration penetriert. Die ermittelten Feuchteexponenten der Messungen sind in Tab. 8-8 dargestellt.

Tab. 8-8: Feuchteexponenten des Obernkirchener Sandsteins in Abhängigkeit der Art und Konzentration der Porenlösung

	Na ₂ SO ₄ -Lösung	NaCl-Lösung
0,01 M	0,53	0,45
0,075 M	0,71	0,57

Die Feuchteexponenten der Sandsteine zeigen eine deutliche Abhängigkeit sowohl von der Konzentration der Lösung als auch von Art der Lösung. Die allgemeine Formulierung des Feuchteexponenten muss also nach (8-12) erfolgen.

$$D_{eff,h} = D_{eff,SW=100\%} \cdot S_h^{(n_s+n_c)} \quad (8-13)$$

Dieser Ansatz berücksichtigt den Feuchteexponenten n_s bei unendlicher Verdünnung in Abhängigkeit der Porenmorphologie mit einem zusätzlichen Anteil n_c der Konzentration.

8.4.4 Einfluss der Temperatur auf die Diffusion

Die Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Diffusion wurden anhand einer Kaliumchloridlösung durchgeführt. Für die Untersuchung der Diffusion von Schadsalzen in porösen Bauwerkstoffen wurden Glasfilterplatten (GFP) der Porosität 5 mit Kaliumchloridlösung verschiedener Konzentrationen penetriert. Die Untersuchungen wurden mit dem Ausdiffusionsversuch nach Abs. 8.1 durchgeführt. Durch Temperierung des Untersuchungsgefäßes konnten die experimentellen Bedingungen variiert werden.

8.4.4.1 Temperaturabhängigkeit der Tortuosität

Die Überprüfung der Abhängigkeit der Tortuosität τ von der Temperatur erfolgte durch die Bestimmung der Tortuosität an Glasfilterplatten mit drei unterschiedlich konzentrierten Penetrationslösungen.

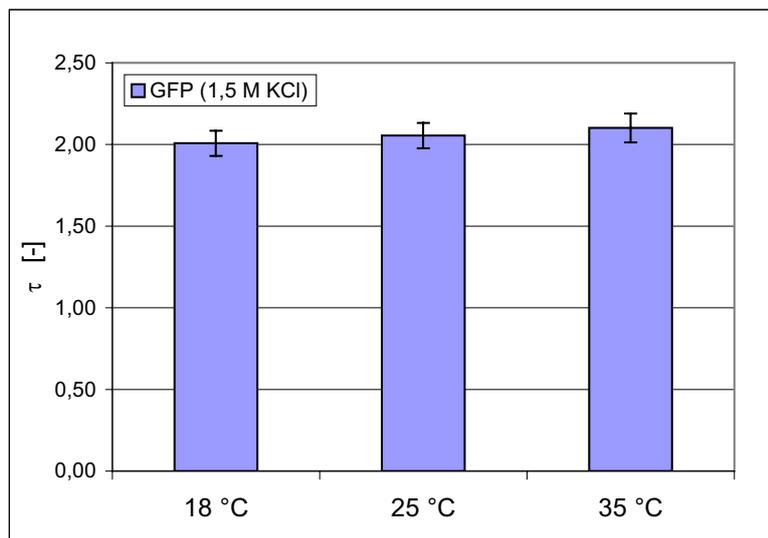


Abb. 8-22: Tortuosität τ in Abhängigkeit der Temperatur bei Penetration der Glasfilterplatten mit 1,5 molarer Kaliumchloridlösung

Beispielhaft zeigt Abb. 8-22 die Tortuositäten bei Penetration der Glasfilterplatten mit 1,5 molarer Kaliumchloridlösung. Die ermittelten Tortuositäten zeigten unter Berücksichtigung der Schwankungsbreiten keine Temperaturabhängigkeit.

8.4.4.2 Temperaturabhängigkeit der Ionendiffusion

Die Verwendbarkeit des Arrhenius-Ansatzes (Abs. 5.5.1) zur Beschreibung der temperaturabhängigen Ionendiffusion wurde sowohl für die Diffusion in der reinen Lösung als auch für die Diffusion im porösen Probekörper überprüft. Zur Überprüfung des Ansatzes in der reinen Lösung wurden Messwerte der Diffusionskoeffizienten der Literatur [57, 58] entnommen und entsprechend des Arrhenius-Ansatzes auf andere Temperaturen umgerechnet, siehe auch [122]. Die Ergebnisse sind in der Abb. 8-23 für verschiedenen Temperaturen über die Konzentration aufgetragen.

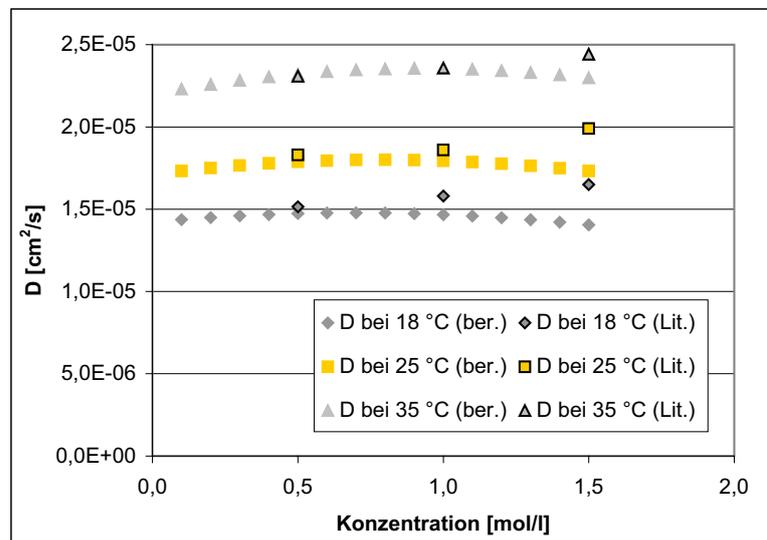


Abb. 8-23: Berechnete und gemessene Diffusionskoeffizienten in freier Lösung von Kaliumchlorid bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit der Konzentration der Lösung

Die Abweichung der berechneten Werte von den Messwerten liegt zwischen 2 % und 11 %. Die Berechnung der Diffusionskoeffizienten in porösen Materialien erfolgte bei Feuchtesättigung unter Berücksichtigung der Konzentrationsabhängigkeit der Tortuosität τ nach der folgenden Gleichung.

$$D_{eff}(c, T) = \frac{D_{Lsg.}}{\tau(c)} e^{-\frac{E_A}{RT}} \quad (8-14)$$

Die berechneten Werte der Diffusionskoeffizienten im Vergleich mit den gemessenen Werten aus den Diffusionsversuchen sind in der folgenden Abbildung (Abb. 8-24) dargestellt.

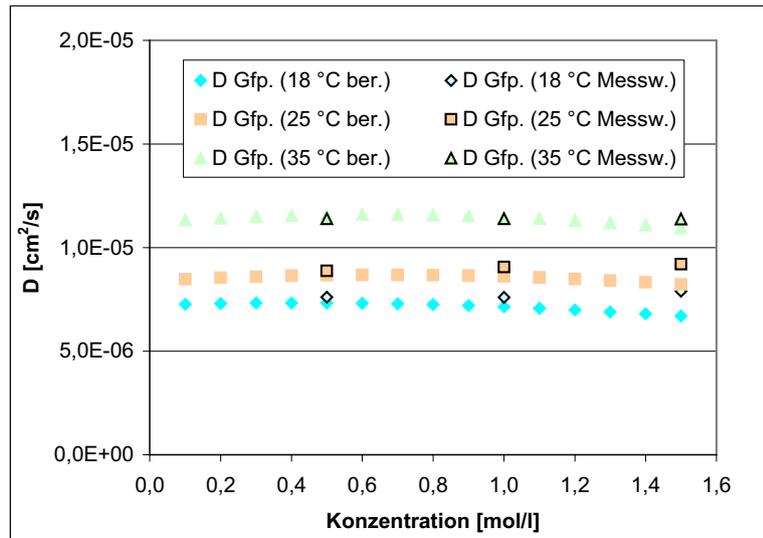


Abb. 8-24: Berechnete und gemessene Diffusionskoeffizienten von Kaliumchlorid bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung in GFP

Die Abweichungen der berechneten Werte von den gemessenen liegen zwischen 3 % und 8 %. Da die prozentualen Abweichungen in geringfügigen Größenordnungen liegen, kann der Arrhenius-Ansatz zur Berechnung der effektiven Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit der Temperatur herangezogen werden.

8.4.5 Modell zur Beschreibung der Ionendiffusion in porösen Bauwerkstoffen

Im Rahmen der zuvor vorgestellten Untersuchungen wurden die Einflüsse der Konzentration und Art der Porenlösung, des Feuchtegehaltes und der Temperatur auf die Ionendiffusionsprozesse in porösen feuchtehaltigen Bauwerkstoffen untersucht. Die experimentellen Untersuchungen zur Konzentrationsabhängigkeit zeigen, dass die Tortuosität kein geometrischer Faktor ist. Sie hängt von der Konzentration der Porenlösung ab. Für die Feuchteabhängigkeit ergibt sich eine Abhängigkeit des Feuchteexponentens vom Feuchtegehalt des Bauwerkstoffes und von der Lösungskonzentration. Die Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit zeigen, dass unter Berücksichtigung der Konzentrationsabhängigkeit der Tortuosität ein Arrhenius-Ansatz zur Berechnung der Diffusionskoeffizienten verwendet werden kann. Für die Berechnung effektiver Diffusionskoeffizienten $D_{eff}(S_h, c, T)$ in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff, der Konzentration der Porenlösung und der Temperatur auf der Basis eines bekannten Diffusionskoeffizientens in freier Lösung kann folglich die Gleichung (8-14) herangezogen werden.

$$D_{eff}(S_h, c, T) = \left(\frac{D_{Lsg.}}{\tau(c)} e^{-\frac{E_A}{RT}} \right) \cdot S_h^{(n_s + n_c)} \quad (8-15)$$

Die Untersuchungen der Arbeit bestimmen somit diesen neuen Ansatz der Modellierung des diffusiven Ionentransportes in porösen feuchtehaltigen Bauwerkstoffen.

8.4.6 Einfluss von Grenzflächen auf die Diffusion

Für die Untersuchung von Feuchte- und Salztransportvorgängen in Bauwerken sind die Bereiche, an denen verschiedene Bauelemente miteinander kontaktiert werden von besonderer Bedeutung. An diesen Stellen können sich die Materialeigenschaften sprunghaft ändern. Darüber hinaus hat die Beschaffenheit der Kontaktfläche einen charakteristischen Einfluss auf die stattfindenden Transportprozesse. Beispiele sind im Mauerwerksbau der Kontakt vom Mauerstein zum Mörtel oder der Kontakt vom Mauerstein und Mörtel zur Entsalzungskompressse.

Der Einfluss solcher Kontaktflächen auf den diffusiven Transport wurde im Folgenden an unterschiedlichen experimentellen Anordnungen untersucht. Der Kontakt des gleichen Materials (zwei Scheiben des Obernkirchener Sandsteines) wurde im 2-Scheiben Diffusionsexperiment und der Kontakt zweier unterschiedlicher Materialien für den Fall der Kompressenentsalzung eines Sandsteines untersucht. Die Auswertung der experimentellen Untersuchungen erfolgte mit Bohrmehlproben in unterschiedlichen Probekörpertiefen. Für die Parameteridentifikation der Diffusions- und Widerstandskoeffizienten wurde im Rahmen dieser Arbeit das Programm SPID (Simulation und Parameteridentifikation von Ionendiffusionsprozessen) [82] entwickelt und verwendet. Eine Beschreibung der Modelle von SPID wird in Kap.9 vorgenommen.

8.4.6.1 Grenzflächen zweier gleicher Materialien

Der Einfluss von Grenzflächen auf die Diffusion von Natrium- und Sulfationen in gleichartigen Bauwerkstoffen wurde mit der in Abs. 8.2 beschriebenen 2-Scheiben-Anordnung untersucht. Die Untersuchungen wurden dabei an einem Obernkirchener Sandstein durchgeführt. Als Penetrationslösung wurde für die eine Scheibe deionisiertes Wasser und für die andere Scheibe 0,5 molare Natriumsulfatlösung verwendet. Die Scheiben wurden vollständig und gleichmäßig penetriert. Die Kontaktierung erfolgte ohne Zwischeneinlagen jedoch mit konstantem Anpressdruck. Der Probekörper wurde vollständig gekapselt um eine Austrocknung zu verhindern. Nach 2,5 Tagen Versuchsdauer wurden die beiden Scheiben voneinander getrennt und das Konzentrationsprofil anhand von Bohrmehlproben ermittelt.

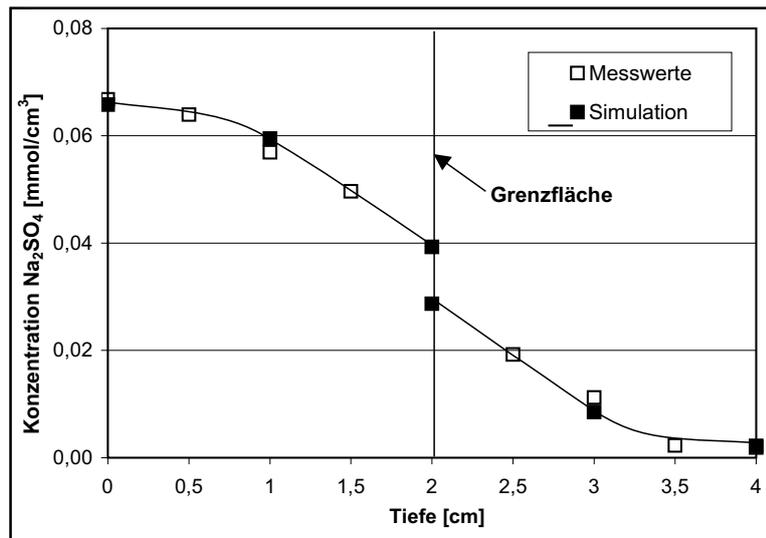


Abb. 8-25: Konzentrationsprofil des Natriumsulfates über die Probekörpertiefe

Die Parameter wurden durch Anpassung der Modellparameter an die Messwerte mit dem Programm SPID identifiziert. Der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} im Sandstein und der Widerstandskoeffizient R_{eff} der Grenzfläche konnten wie in Tab. 8-9 dargestellt ermittelt werden. Da der Widerstandskoeffizient von Null verschieden ist, liegt an der Grenzfläche zwischen den beiden Sandsteinprobekörpern ein Widerstand vor.

Tab. 8-9: Ermittelte Koeffizienten des 2-Scheiben-Experimentes

Koeffizienten	Einheit	Wert
D_{eff}	$[\text{cm}^2/\text{s}]$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
R_{eff}	$[\text{s}/\text{cm}]$	$6,2 \cdot 10^6$

Die Parameteridentifikation mit diesem Programm ermöglicht daher neben der Bestimmung der Diffusionskoeffizienten auch die direkte Ermittlung des Widerstandes der Kontaktfläche. Darüber hinaus kann SPID für die Optimierung von Kontaktbedingung für experimentelle Untersuchungen eingesetzt werden.

8.4.6.2 Grenzflächen zweier verschiedener Materialien

Für die Untersuchungen des diffusiven Transportes in zwei miteinander in Kontakt stehenden unterschiedlichen Bauwerkstoffen wurde der Obernkirchener Sandstein im Anwendungsfall der diffusiven Kompressenentsalzung gewählt. Die Untersuchungen wurden dabei an zylinderförmigen Probekörpern mit ca. 5 cm Durchmesser und ca. 10 cm Länge durchgeführt. Zur Realisierung der Belastung des Sand-

steins mit Schadsalzen wurde dieser mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung vollständig und gleichmäßig penetriert. Der Kompressenauftrag erfolgte als ca. 2 cm dicke Schicht. Zur Lagerung der Probekörper im definierten Klima (100 % r.F., 23 °C) wurde der gesamte Probekörper bis auf eine Stirnfläche gekapselt. Diese experimentelle Anordnung (Abb. 8-26) und Konditionierung ermöglichte die Realisierung eines eindimensionalen diffusiven Transportes.

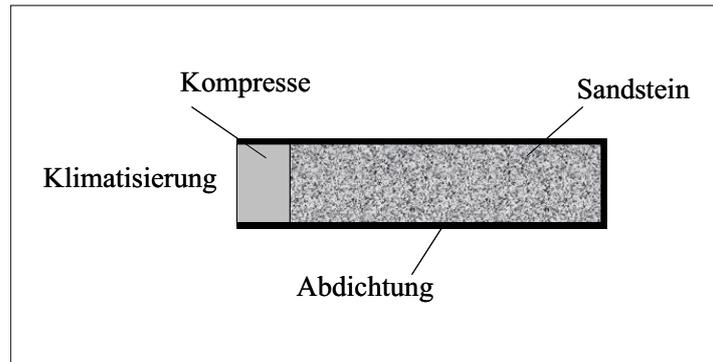


Abb. 8-26: Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus der Untersuchungen zur Kompressenentsalzung

Anhand von Beprobungen wurde das Konzentrationsprofil in der Kompresse und dem Sandstein ermittelt. Die Versuchsdauer betrug etwa 14 Tage. Bei der Auftragung der Konzentration in mmol/cm^3 über die Probekörpertiefe ergibt sich der folgende in Abb. 8-27 dargestellte unstetige Verlauf. Der Grund für den gegenläufigen Sprung liegt in der unterschiedlichen Porosität der beiden Materialien und dem Widerstand der Kontaktfläche.

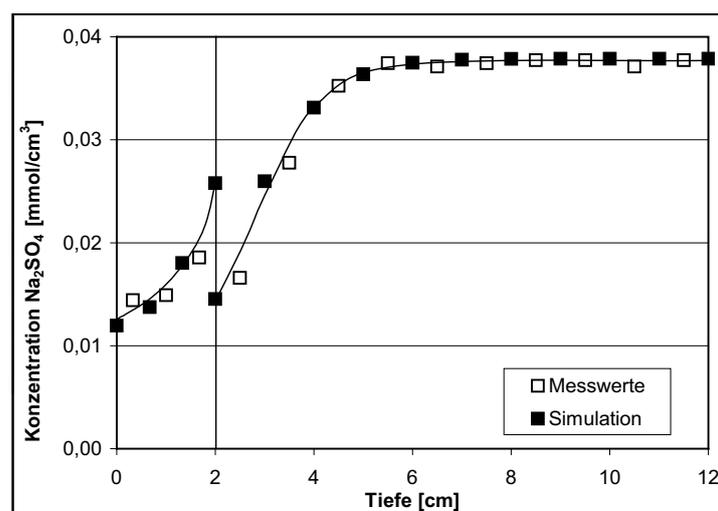


Abb. 8-27: Natriumsulfatkonzentration über die Probekörpertiefe

Der Sprung durch die unterschiedlichen Porositäten ist dadurch bedingt, dass die Komprese eine höhere Porosität als der Sandstein besitzt und somit der Salzgehalt pro Kubikzentimeter bei gleicher Konzentration der Porenlösung in der Komprese höher ist. Ebenso resultiert ein Sprung aus dem Widerstand in der Kontaktfläche, wie im Folgenden mit der Modellierung der Widerstandsschicht gezeigt wird. Das der Parameteridentifikation zugrunde liegende Modell des diffusiven Transportes ist in Abb. 8-28 dargestellt.

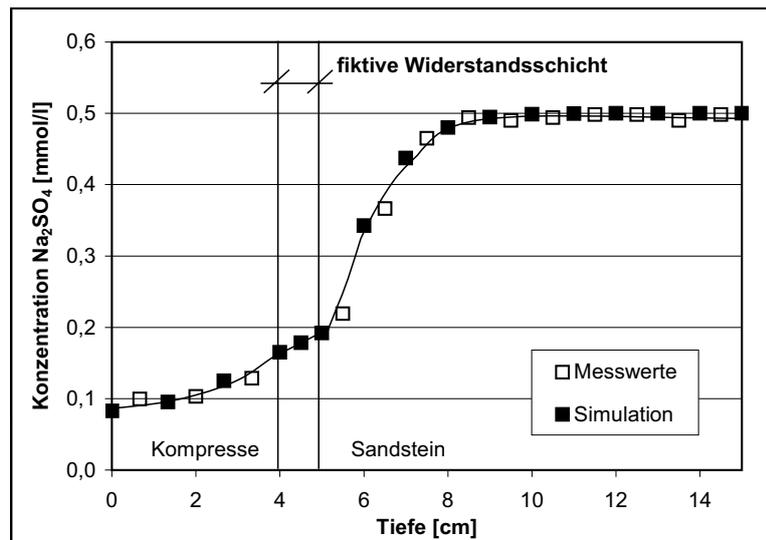


Abb. 8-28: Konzentration der Porenlösung über die Probekörpertiefe unter Zugrundelegung des modifizierten Modells

Der Sandstein wurde in diesem Fall als Referenzschicht nach Abs. 9.1 gewählt und die Komprese entsprechend ihrer Porosität modifiziert. Die Kontaktfläche zwischen Komprese und Sandstein wurde als Widerstandsschicht modelliert. Die durch Anpassung der Modellparameter an die Messwerte ermittelten Transport- und Widerstandskoeffizienten sind in Tab. 8-10 wiedergegeben.

Tab. 8-10: Ermittelte Koeffizienten des Entsalzungsversuches

Koeffizient	Einheit	Wert
$D_{\text{eff, Kompr.}}$	[cm ² /s]	$1,3 \cdot 10^{-5}$
$D_{\text{eff, Sandst}}$	[cm ² /s]	$2,6 \cdot 10^{-6}$
R_{eff}	[s/cm]	$1,5 \cdot 10^5$

Der effektive Diffusionskoeffizient von Natriumsulfat im Obernkirchener Sandstein bestätigt die berechneten Werte des 2-Scheiben-Versuches. Da der Transportkennwert der Widerstandsschicht von Null verschieden ist, liegt auch bei diesem

Versuch ein Widerstand vor. Im Vergleich mit Abs. 8.4.6.1 kann festgestellt werden, dass der Widerstand in der Kontaktfläche Kompressen/Sandstein geringer ist als in der Kontaktfläche Sandstein/Sandstein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es bei dem Auftrag der Kompressen auf den Sandstein zu einem besseren Verbund der Materialien kommt.

9 Numerische Simulation und Parameteridentifikation von diffusiven Transportprozessen

9.1 Grundlagen des Programms für die Simulation und Parameteridentifikation von Ionen-Diffusionsprozessen (SPID)

Für die Auswertung von Experimenten zur Ermittlung von Diffusionskoeffizienten und zur Analyse von diffusiven Transportprozessen in Bauwerkstoffen kann die als 2. Fick'sches Gesetz bekannte Diffusionsgleichung herangezogen werden [53]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (9-1)$$

Die numerische Lösung dieser Gleichung kann z.B. durch das Diskretisierungsverfahren nach Crank-Nicolson [41] erfolgen:

$$\frac{c_i^{n+1} - c_i^n}{\Delta t} = \theta D_{eff} \frac{c_{i-1}^{n+1} - 2c_i^{n+1} + c_{i+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + (1-\theta) D_{eff} \frac{c_{i-1}^n - 2c_i^n + c_{i+1}^n}{\Delta x^2}. \quad (9-2)$$

Für die Erfassung des eindimensionalen Transports wird das Kontinuum in Schichten der Stärke Δx und die Zeit in Zeitschritte Δt diskretisiert. Die betrachtete Ortskoordinate ist durch i und die aktuelle Zeit ist durch n gegeben.

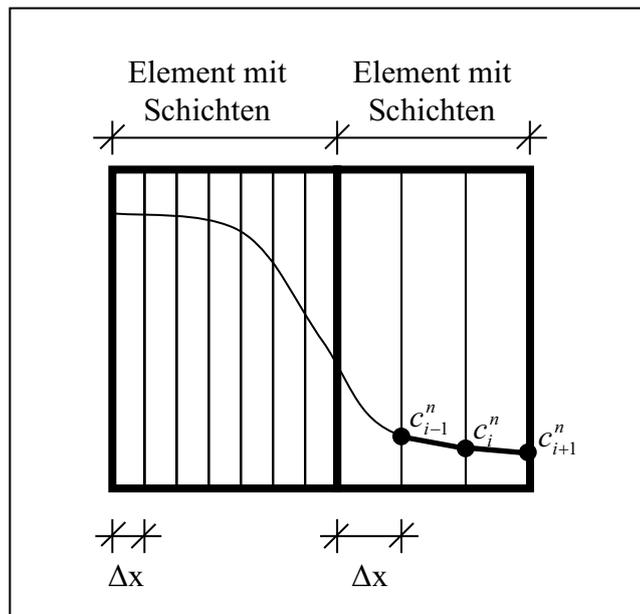


Abb. 9-1: Schichtenmodell des Programms SPID

Jede Schicht ist gekennzeichnet durch die Konzentrationswerte an den Schichtgrenzen. Der Verlauf der Konzentration wird über die Schichtdicke linear ange-

nommen. Mehrere Schichten werden zu einem Element mit gleicher Materialcharakteristiken zusammengefasst (Abb. 9-1), d.h. der Diffusionskoeffizient ist im Element konstant.

Gleichung (9-2) kann durch Modifikation von θ im Bereich von $0 < \theta < 1$ wahlweise implizit oder explizit formuliert werden. Bei $\theta = 0,5$ ist das Verfahren numerisch stabil [41]. Das aus Gleichung (9-2) entstehende Gleichungssystem liegt in Tridiagonalform vor und kann mit Methoden der linearen Algebra gelöst werden.

$$\left[\begin{array}{cccc} 1 + 2 \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} & - \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} & & \\ - \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} & \cdot & \cdot & \\ & \cdot & \cdot & - \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} \\ & & - \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} & 1 + 2 \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} c_i^{n+1} \\ c_{i+1}^{n+1} \\ \cdot \\ c_{i+n}^{n+1} \end{bmatrix} =$$

$$\left[\begin{array}{cccc} 1 - 2 \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} & \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} & & \\ \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} & \cdot & \cdot & \\ & \cdot & \cdot & \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} \\ & & \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} & 1 - 2 \frac{\Delta t \cdot D_{eff} \cdot \theta}{\Delta x^2} \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} c_i^n \\ c_{i+1}^n \\ \cdot \\ c_{i+n}^n \end{bmatrix}$$

Bei der numerischen Berechnung und Parameteridentifikation von Salztransportvorgängen sind die folgenden zwei Aspekte zu berücksichtigen:

- porenmorphologische Kennwerte der Bauwerkstoffe
- (nichtidealer) Kontakt zweier Materialien.

Unterschiede im Porenwassergehalt bedingt durch unterschiedliche Porositäten können im numerischen Lösungsalgorithmus durch die Einführung einer äquivalenten Schichtdicke h_i^* wie folgt berücksichtigt werden:

$$h_i^* = \alpha \cdot h_i \quad . \quad (9-3)$$

Hierbei ist α ein dimensionsloser Beiwert, der wie folgt definiert ist:

$$\alpha = \frac{K_i}{K_{ref}}. \quad (9-4)$$

Dabei ist h_i die Probendicke und K_i der Porenwassergehalt der Schicht i . K_{ref} bezeichnet den Porenwassergehalt einer Referenzschicht. Auf diese Weise werden alle Schichten bezüglich des Porenwassergehaltes homogenisiert. Das entstehende ideale Schichtensystem besitzt dann einen einheitlichen Porenwassergehalt, den Referenzgehalt K_{ref} . Prinzipiell kann K_{ref} frei gewählt werden. In der Regel wird K_{ref} aber gleich dem realen Porenwassergehalt eines der beteiligten Schichtenmaterialien gewählt. Die Referenzschicht kann willkürlich gewählt werden. Der nichtideale Kontakt zweier miteinander in Kontakt stehender Bauwerkstoffe bzw. Materialien kann durch die Einführung einer fiktiven Widerstandsschicht mit einer Einheitsdicke h_u berücksichtigt werden. Der Widerstandskoeffizient R_{eff} kann mit dem effektiven Diffusionskoeffizienten D_{eff} bezogen auf die Einheitsdicke h_u berechnet werden.

$$R_{eff} = \frac{h_u}{D_{eff}} \quad (9-5)$$

Diese beiden Aspekte sind in Abb. 9-2 schematisch dargestellt.

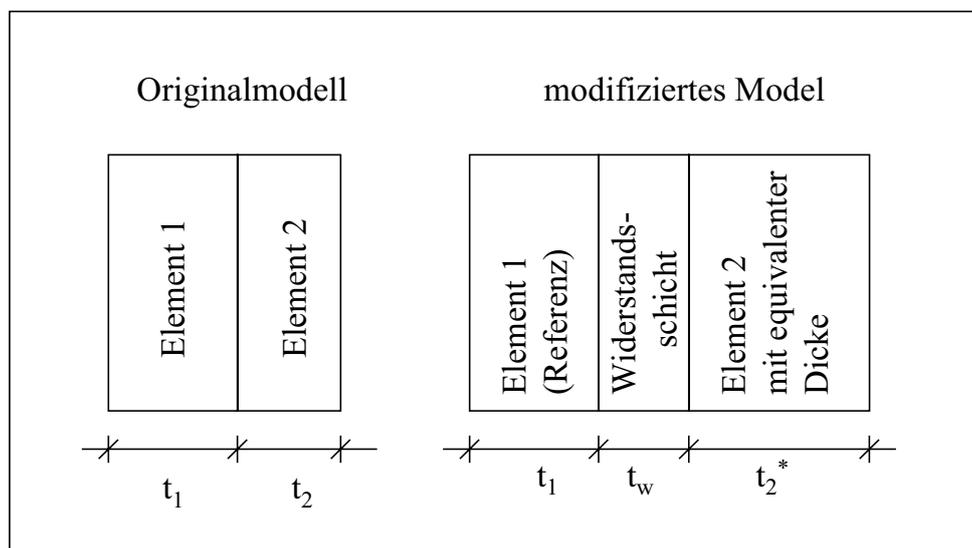


Abb. 9-2: Modifizierung des Systems

Durch die Verwendung dieser Ansätze ermöglicht das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Programm die Simulation und Parameteridentifikation diffusiver Ionen-transportprozesse in unterschiedlichen Materialien und Materialkombinationen unter Berücksichtigung von Widerständen an Kontaktflächen.

9.2 Simulation mit SPID

Die Simulation erfolgt auf der Grundlage des in Abs. 9.1 beschriebenen Modells unter Angabe des Anfangskonzentrationsprofils (Anfangskonzentration $c_0(x)$) und der bauwerkstoffabhängigen Diffusionskoeffizienten D_{eff} je Element. Ergebnis der Simulation ist das Endkonzentrationsprofil (Endkonzentration $c_{num}(x, c_0, t, D_{eff})$) zu einer gewählten Zeit t (s. Abb. 9-3).

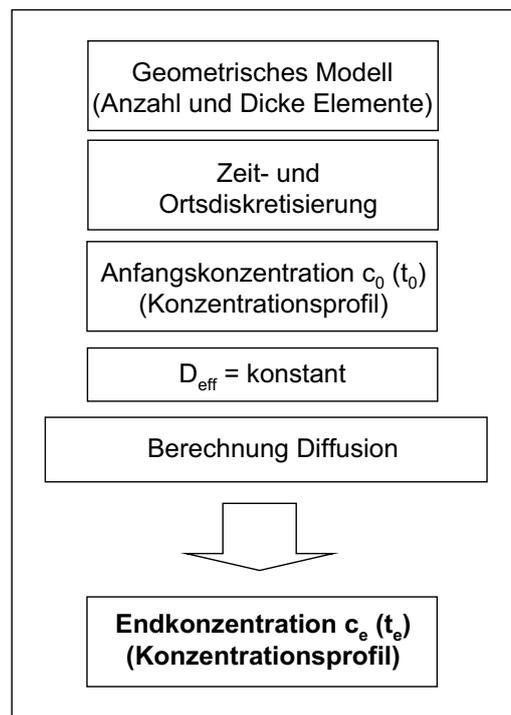


Abb. 9-3: Schematischer Programmablauf Simulation

Mit Hilfe bekannter Transportkennwerte ist es möglich, den Verlauf diffusiver Transportprozesse näherungsweise vorzubestimmen. Somit können für einen 2-Scheiben-Versuch mit der Startkonzentration von 0,5 molarer Natriumsulfatlösung und deionisiertem Wasser im Obernkirchener Sandstein die Konzentrationsprofile in Abhängigkeit unterschiedlicher Zeiten berechnet werden (Abb. 9-4). Die Konzentrationsprofile sind für eine experimentelle Dauer von 2,7 Stunden bis 27 Stunden aufgetragen. Die Berechnung erfolgte ohne Berücksichtigung eines Kontaktflächenwiderstandes.

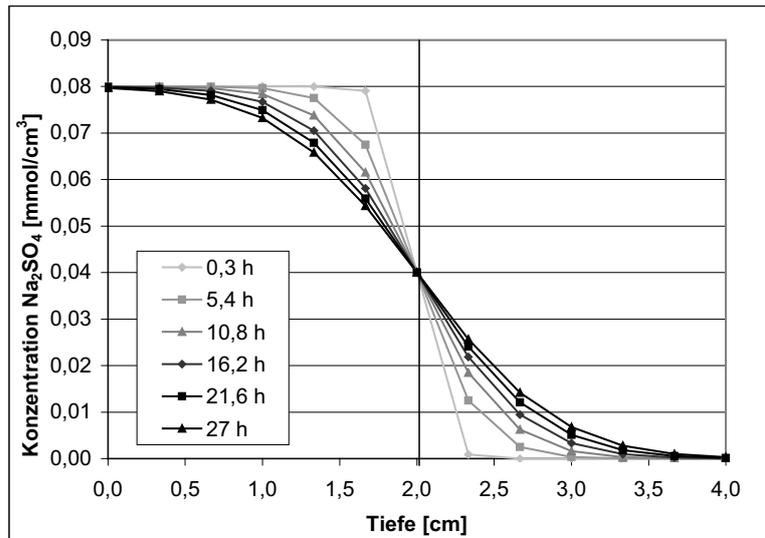


Abb. 9-4: Konzentrationsprofil Natriumsulfat am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit Simulation verschiedener Versuchsdauern

Die Auswirkungen unterschiedlich großer Kontaktflächenwiderstände im Fall eines 2-Scheiben Versuches z.B. bei mangelhafter Kontaktierung der zwei Scheiben sind in Abb. 9-5 dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht den Einfluss der Kontaktbedingungen auf den diffusiven Transport im Probekörper anhand von Konzentrationsprofilen. Die Simulation der Konzentrationsprofile erfolgte jeweils für eine Versuchsdauer von 27 Stunden.

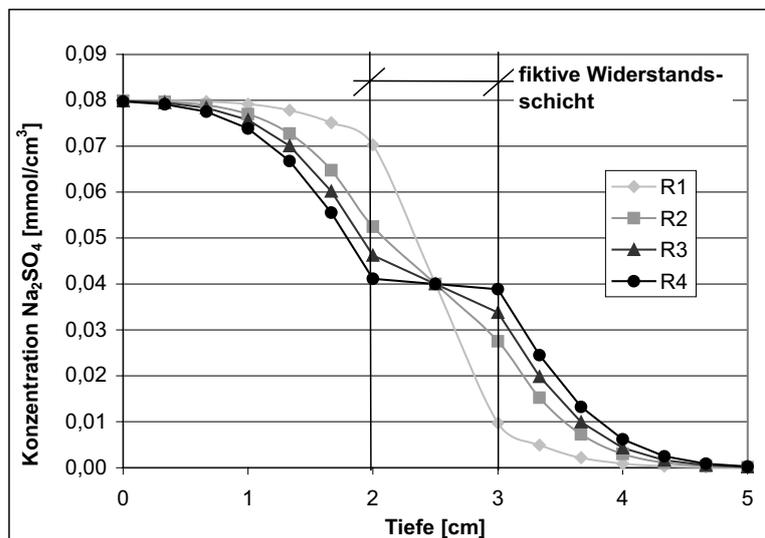


Abb. 9-5: Konzentrationsprofil Natriumsulfat am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit Simulation verschiedener Kontaktflächenwiderstände

Die Darstellung der Ergebnisse anhand des modifiziertem Modells mit der Kontaktfläche als Element der Einheitsbreite h_u zeigt die Abnahme des Widerstandes von $1,0 \cdot 10^6$ bis $5 \cdot 10^5$ s/cm in der Kontaktfläche (s. Tab. 9-1).

Tab. 9-1: Widerstände der Kontaktfläche

	[s/cm]
R1	$1,0 \cdot 10^6$
R2	$5,0 \cdot 10^6$
R3	$1,0 \cdot 10^5$
R4	$5,0 \cdot 10^5$

Bei der Darstellung der Ergebnisse im Originalmodell ergeben sich Sprünge im Konzentrationsprofil an der Kontaktfläche.

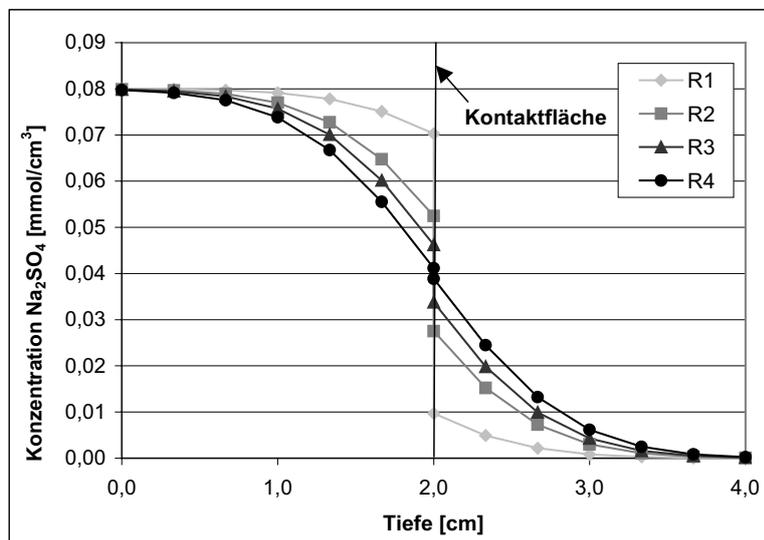


Abb. 9-6: Konzentrationsprofil Natriumsulfat am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit Simulation verschiedener Kontaktflächenwiderstände

Der größte Widerstand R1 bewirkt den größten Sprung im Konzentrationsprofil.

9.3 Parameteridentifikation mit SPID

Bei Kenntnis vom Anfangskonzentrationsprofil c_0 und vom Endkonzentrationsprofil zum Zeitpunkt t_e , z.B. aus Experimenten ($c_{exp}(x, c_0, t, D_{eff})$) können die zugehörigen effektiven Diffusionskoeffizienten D_{eff} identifiziert werden. Dazu wird ein geeignetes Simulationsmodell vorgestellt (s. Abs. 9.2). Diese Modell liefert Endkonzentrationsprofile $c_{num}(x, c_0, t, D_{eff})$ und kann innerhalb der folgenden Optimierungsaufgabe zur Identifikation der Diffusionskoeffizienten D_{eff} (s. Abb. 9-7) eingesetzt werden.

$$O(D_{eff}) = [c_{num}(x, c_0, t, D_{eff}) - c_{exp}(x, c_0, t, D_{eff})]^2 \rightarrow \text{Minimum}, \quad D_{eff} \geq 0$$

In diesem Optimierungsproblem werden die Anfangskonzentration c_0 und Zeitpunkt t als konstante Parameter behandelt. Zur Lösung des Problems kann z.B. ein Rastersuchverfahren eingesetzt werden. Dies ist für praktische Anwendungen ausreichend. Durch Verfeinerung des Suchrasters kann die Genauigkeit verbessert werden. Die Parameteridentifikation von diffusiven Transportprozessen kann exemplarisch in der 2-Scheiben-Anordnung illustriert werden.

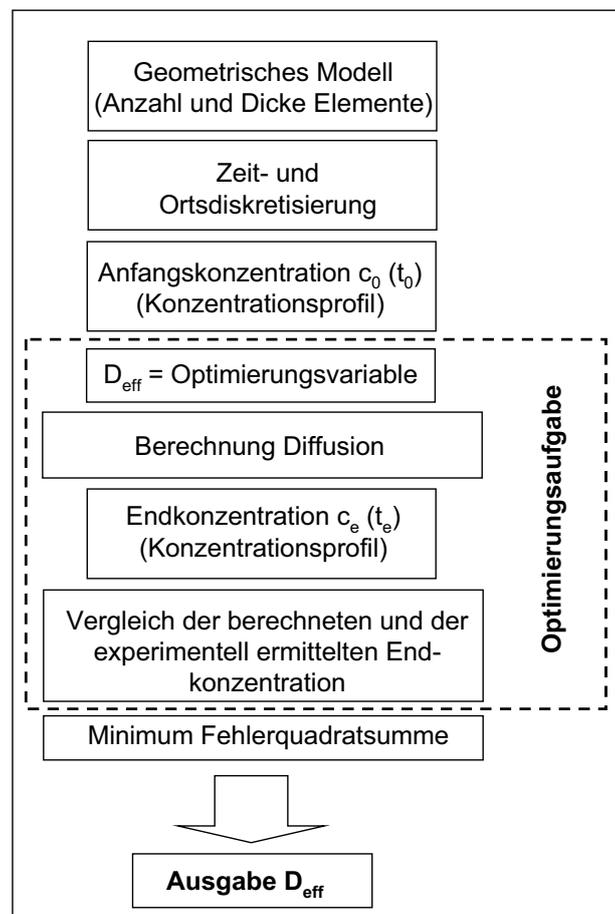


Abb. 9-7: Schematischer Programmablauf Parameteridentifikation

Die Abb. 9-8 zeigt das Konzentrationsprofil von Natriumsulfat im Obernkirchener Sandstein nach 2,5 Tagen. Dieses Anfangsprofil wurde durch die Penetration der beiden Scheiben mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung bzw. mit deionisiertem Wasser eingestellt.

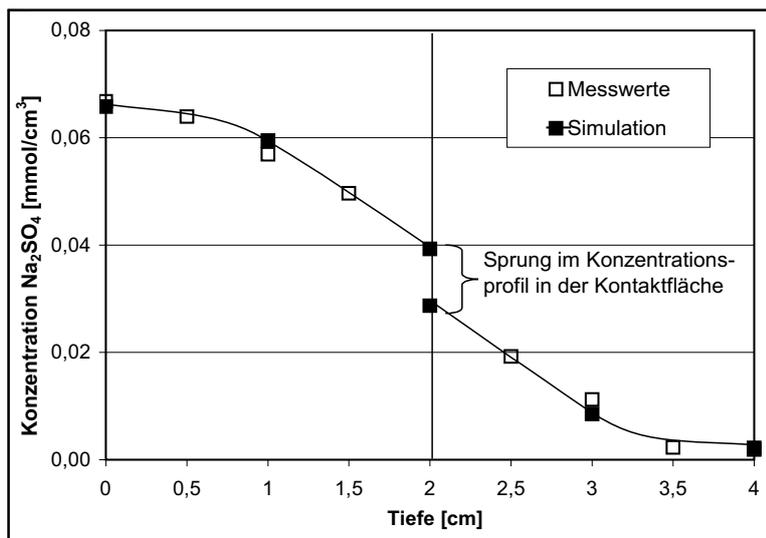


Abb. 9-8: Parameteridentifikation am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit anschließender Simulation (Konzentrationsprofil Natriumsulfat)

Anhand der Anfangskonzentration, der Versuchsdauer und des ermittelten Konzentrationsprofils im Probekörper zum Untersuchungszeitpunkt können die Transportparameter im Stein und in der Kontaktfläche identifiziert werden. Der durch Anpassung der Modellparameter an die Messwerte ermittelte Diffusionskoeffizient des Natriumsulfates im Sandstein beträgt $2,6 \cdot 10^{-6}$ [cm²/s] und der Widerstandskoeffizient $6,2 \cdot 10^6$ [s/cm].

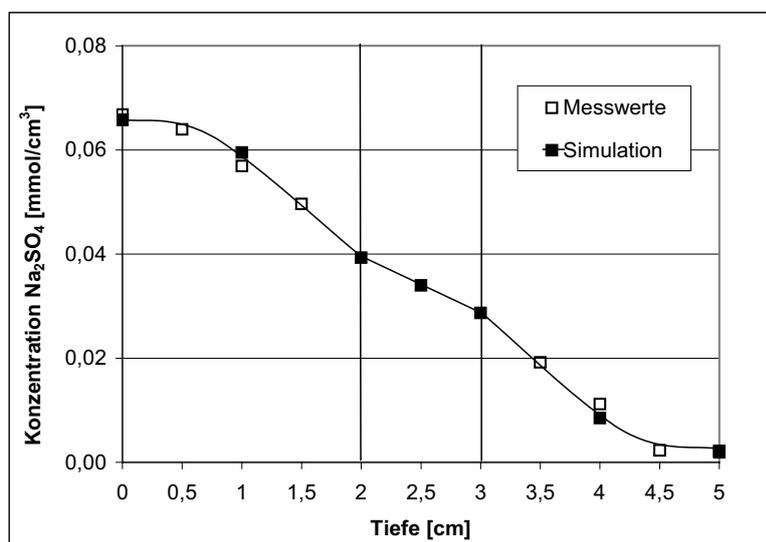


Abb. 9-9: Parameteridentifikation am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit anschließender Simulation und Darstellung der Widerstandsschicht (Konzentrationsprofil Natriumsulfat)

Eine anschließende Simulation des Prozesses mit den ermittelten Parametern verdeutlicht den Einfluss der Kontaktfläche (Abb. 9-8). Es zeigt sich ein Sprung im Konzentrationsverlauf. Der programmtechnische Hintergrund des Sprungs in der

Kontaktfläche lässt sich detaillierter durch die Darstellung der experimentellen Anordnung in der modifizierten Modelldarstellung zeigen (Abb. 9-9). Durch die Einführung einer Widerstandsschicht mit der Einheitsdicke h_u kann festgestellt werden ob ein Widerstand in dieser Schicht vorhanden ist. Da ein Transportkoeffizient von $D > 0 \text{ cm}^2/\text{s}$ für diese Schicht vorliegt, ist auch ein Widerstand dieser Schicht vorhanden.

Mit Hilfe des Programms für die Simulation und Parameteridentifikation der Ionendiffusion ist es somit möglich Transport- und Widerstandsparameter der Ionendiffusion in Bauwerkstoffen und Bauwerkstoffverbunden zu ermitteln. Durch die Verwendung des Programms zur Simulation ist zudem die Möglichkeit zur Vorhersage von Diffusionsprozessen der Ionendiffusion in einzelnen Materialien oder Materialverbunden gegeben.

10 Experimentelle Untersuchungen zum revitalisierenden Ionentransport in Bauwerkstoffen im Anwendungsfall der Kompressenentsalzung

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Abhängigkeit einzelner Prozesse von verschiedenen Anfangs- und Randbedingungen wie z.B. Klima, Porenlösung, Bauwerkstoff untersucht wurde, ist der Gegenstand dieses Kapitels vorrangig die Untersuchung der Anwendung der Kompressenentsalzung auf das zu entsalzenden Mauerwerk. Im Rahmen von Laboruntersuchungen wurden diffusive und advective revitalisierende Transportprozesse in Bauwerkstoffen untersucht. Die Schadsalzreduzierung erfolgte dabei durch Anwendung einer Kompressenentsalzung. Mit dem Aufbringen einer Komresse auf den schadsalzbelasteten Untergrund werden Ionenkonzentrations-, Druck- oder Dichtegradienten so eingestellt, dass der Schadsalztransport aus dem belasteten Untergrund in die Komresse erfolgt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Ausführungsform der dauernassen und der abtrocknenden Komresse untersucht.

Im Allgemeinen werden für die Kompressenentsalzung Materialien aus einer oder mehreren Komponenten verwendet. Für die Auftragung auf den schadsalzbelasteten Untergrund werden diese mit deionisiertem Wasser angemacht. Häufig handelt es sich bei den Komponenten um quellfähige Komponenten organischen Ursprungs wie z.B. reine Cellulose oder Papierpulpe. Diese quellfähigen Materialien werden dabei wegen ihrer hohen Wasseraufnahme und -rückhaltung gewählt. Außerdem können diese Materialien mit mineralischen Komponenten wie z.B. Tonen und/oder Tonminerale und inerten Füllstoffen (Quarzsand, Quarzmehl) kombiniert werden. Die Füllstoffe werden strukturbildend zur Erhöhung der Standfestigkeit, der Porosität und zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit eingesetzt [5]. Die Adsorptionseigenschaften der Tone bzw. Tonminerale werden oftmals als vorteilhaft für den Entsalzungsprozess angesehen [5]. Da bei der Kompressenentsalzung nicht der Austausch sondern die Absorption von Ionen im Vordergrund stehen sollte, bedarf es einer näheren Untersuchung der Wirkung dieser Bestandteile. Weiterhin ist der Einfluss der Komponenten auf die Transportprozesse bei dauernasser und abtrocknender Kompressenapplikation unzureichend theoretisch erfasst. Zur Untersuchung der Effektivität der Wirkungsweisen dauernasser und abtrocknender Kompressen, insbesondere vor dem Hintergrund der Wahl des Kompressenmaterials, wurden daher im Rahmen dieser Arbeit die folgenden Untersuchungen an Mauerwerksbaustoffen durchgeführt.

10.1 Dauernasse Kompresse

Die Anwendung einer dauernassen Kompresse ist im Allgemeinen nur bei feuchtesättigtem Untergrund sinnvoll. Der Schadsalztransport wird aufgrund der verhinderten Trocknung im Allgemeinen durch die Ionendiffusion dominiert. Durch das Aufbringen der schadsalzfreien Kompresse auf den schadsalzbelasteten Untergrund wird ein Ionenkonzentrationsgradient erzeugt. Der Schadsalztransport erfolgt maximal bis zum Konzentrationsausgleich. Als maßgebliche Einflussgrößen auf die Geschwindigkeit des Schadsalzaustrags ergeben sich die folgenden Faktoren:

- effektive Diffusionskoeffizienten der Schadsalzionen im Material (Untergrund, Kompresse)
- Konzentration und Art des Schadsalzes bzw. der vorliegende Ionen
- Konzentrationsgradient in der Kontaktfläche
- Widerstand in der Kontaktfläche
- Temperatur

10.1.1 Experimentelle Versuchsdurchführung

Im Rahmen der im Folgenden dargestellten experimentellen Untersuchungen wurde der Einfluss des Konzentrationsgradienten in der Kontaktfläche näher untersucht. Diese Untersuchungen geben Informationen für Sanierungspraxis zur notwendigen Anzahl von Kompressenwechsel und den erforderlichen Standzeiten der Kompressen. Für diese Untersuchungen wurden 30 cm lange Bohrkerne (Durchmesser ca. 5 cm) des Obernkirchener Sandsteins mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung vollständig und gleichmäßig penetriert. Der Kompressenauftrag der Bentonit-Cellulose-Sand-Kompresse erfolgte mit einer Schichtdicke von ca. 2 cm. Die experimentelle Anordnung wurde wie in Abb. 8-26 dargestellt gewählt. Die Kompressen wurden nach Standdauern von 5, 10 und 15 Tagen abgenommen und ausgewertet. Die ausgetragenen Ionen wurden durch Eluation des Kompressenmaterials gemessen.

10.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Schadsalzaustrages nach 5, 10 und 15 Tagen sind in der Abb. 10-1 dargestellt. Der Vergleich dieses Experimentes mit einer Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung. Vergleicht man die entfernte Schadsalzmenge nach 15 Tagen mit dreimaligem und nach 15 Tagen mit einmaligem Kompressenauftrag, so kann man feststellen, dass unter den gegebenen Bedingungen bei der diffusi-

ven Schadsalzreduzierung ein mehrmaliger Kompressenwechsel die Effektivität dieser Sanierungsmaßnahme steigert. Dieses lässt sich durch den mehrmalige Aufbau des Konzentrationsgradienten in der Kontaktfuge erklären.

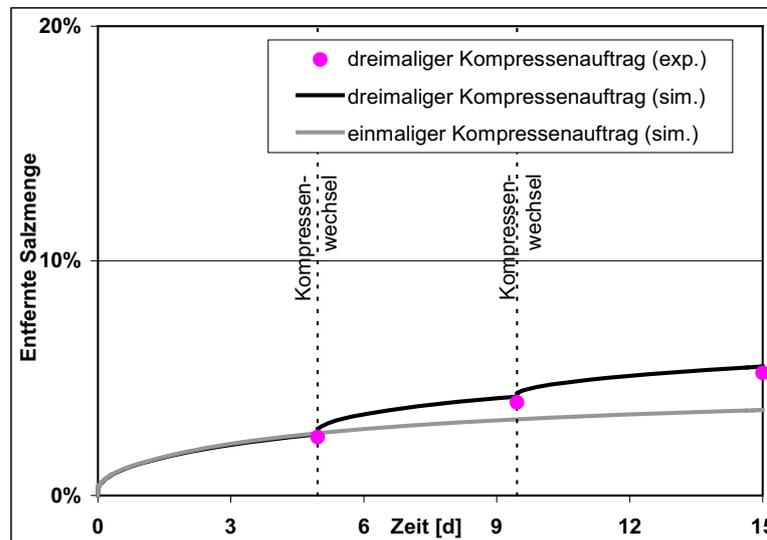


Abb. 10-1: Vergleich der Effektivität des dreimaligen und einmaligen Kompressenauftrags

10.2 Abtrocknende Kompressse

Der abtrocknende Kompressenauftrag lässt sich nur anwenden, wenn eine Trocknung durch die klimatischen Randbedingungen möglich ist oder dieses entsprechend durch zusätzlich Maßnahmen z.B. Belüftung ermöglicht wird.

10.2.1 Experimentelle Versuchsdurchführung

Zum besseren Vergleich der Effektivität des Schadsalzaustrages durch Diffusion und Advektion wurde die gleiche experimentelle Anordnung wie bei der diffusiven Schadsalzreduzierung (Abb. 8-26) gewählt. Die klimatischen Randbedingungen wurden mit 23° C und 65 % r.F. so gewählt, dass eine Trocknung stattfinden konnte. Für diese Untersuchungen wurden ebenfalls Bohrkerne des Obernkirchner Sandsteines (Länge: ca. 30cm; Durchmesser: ca. 5 cm) gewählt, welche mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung durch Tauchen in Lösung gleichmäßig zu 60 % der maximalen Porensättigung beaufschlagt wurden. Zum Versuchsbeginn wurde eine 2 cm dicke aus einem handelsüblichen Bentonit-Cellulose-Sand-Gemisch hergestellte Kompressse aufgetragen. Zur Bestimmung der Feuchte- und Salzprofile im Probekörper über die Zeit wurden vier Parallelproben zu Beginn und nach 3, 5, 15 und 112 Tagen analysiert.

10.2.2 Bestimmung der Konzentration der Porenlösung

Durch die Veränderung der Konzentration der Porenlösung verändert sich auch die Eigenschaft der Porenlösung. Zum einen verändern sich die transportbedingenden Eigenschaften des Fluides und zum anderen kann es zum Auskristallisieren des Salzes über der Löslichkeitsgrenze kommen. Bei Auskristallisation im Porensystem des zu entsalzenden Untergrundes wird der Transport und damit der Austrag des Schadsalzes beendet. Diese Untersuchungen sind somit unmittelbar notwendig, um die Effektivität und die verfahrenstechnischen Parameter dieser Sanierungsmethode zu bestimmen und zu optimieren.

Aus den zuvor beschriebenen Untersuchungen wurde mit Hilfe der ermittelten Feuchte- und Salzverteilungen in den Probekörpern die Konzentration der Porenlösung berechnet. Bei den in der Abb. 10-2 dargestellte Werten der Konzentration der Porenlösung handelt es sich um Mittelwerte einer 2 cm dicken Probekörperscheibe.

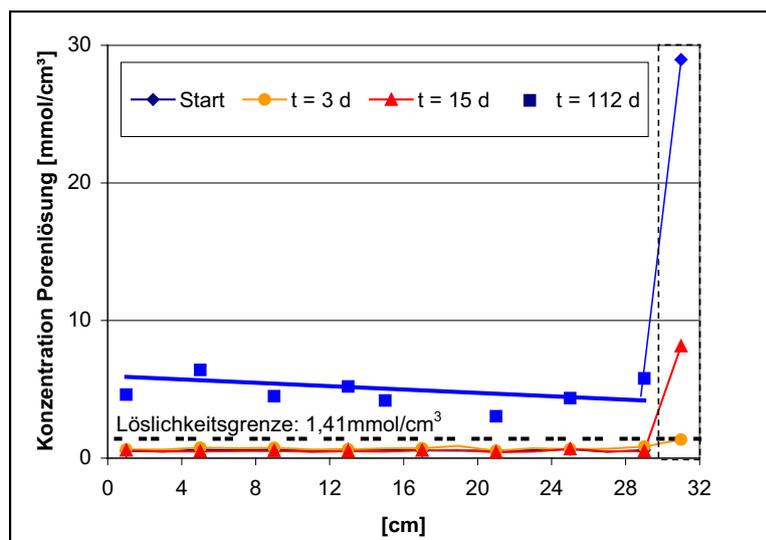


Abb. 10-2: Konzentration der Porenlösung im Probekörper über die Probekörpertiefe

Die Konzentration der Porenlösung liegt bis zur Anwendungsdauer von 15 Tage im Sandstein unter der Löslichkeitsgrenze von $1,41 \text{ mmol/cm}^3$. Nach 112 Tagen ist diese jedoch bereits überschritten. Die Porenlösung kann dann in übersättigter Form oder als teilweise oder vollständig auskristallisiertes Salz vorliegen. Der Unterschied dieser beiden Zustände bestimmt maßgeblich den Transport des Schadsalzes und damit auch die Effektivität der schadsalzreduzierenden Maßnahme.

10.2.3 Bestimmung des Schadsalzaustrages über die Standzeit der Kom- presse

Resultierend aus den zuvor vorgestellten experimentellen Untersuchungen wird in Abb. 10-3 die Schadsalzreduzierung über die Standzeit der Kom-
presse aus den gemessenen Salzverteilungen bzw. den summarischen Gehalten berechnet und dargestellt.

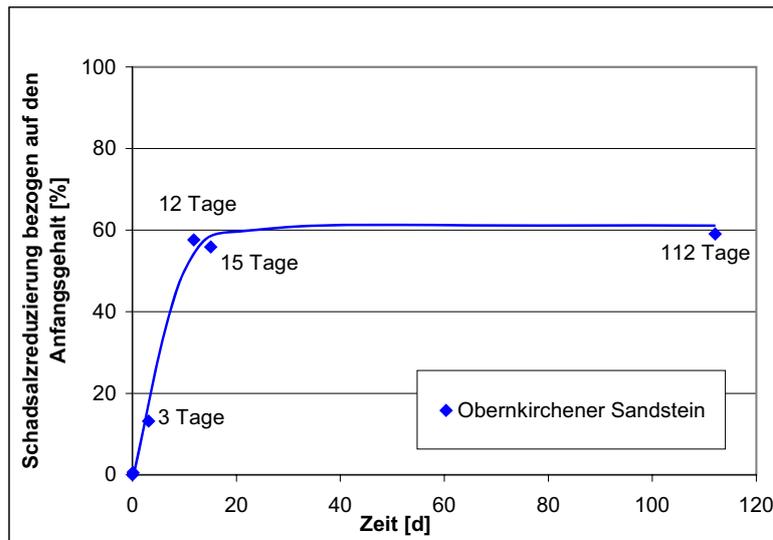


Abb. 10-3: Schadsalzaustrag über die Zeit

Abb. 10-3 zeigt, dass nach der Standzeit von 15 Tagen kein nennenswerter Schadsalztransport mehr erfolgt, siehe auch [115]. Dies kann dadurch bedingt sein, dass der gesamte Lösungstransport zum Erliegen gekommen ist. Andererseits kann es aber auch bedeuten, dass nur der flüssige Lösungstransport zum Erliegen gekommen ist und das Wasser der Porenlösung nur noch in der Dampfphase transportiert wird. Zur Klärung dieser beiden möglichen Ursachen ist in der Abb. 10-4 sowohl der Feuchtegehalt als auch der Salzgehalt im Obernkirchener Sandstein über die unterschiedlich langen Standzeiten der Kom-
presse aufgetragen. Wie man aus dieser Abbildung erkennen kann, verlaufen bis zu einer Standzeit der Kompressen von 15 Tagen der Feuchte- und Salztransport analog. Erst bei längeren Standzeiten liegen die Messwerte nicht mehr auf der Diagonalen. Dies bedeutet, dass weiter Feuchte in der dampfförmigen Phase ausgetragen wird, während der flüssige Transport und damit der Salztransport stagniert. Hier wird außerdem deutlich, dass der Salztransport bis 15 Tage maßgeblich durch Advektion bestimmt wird.

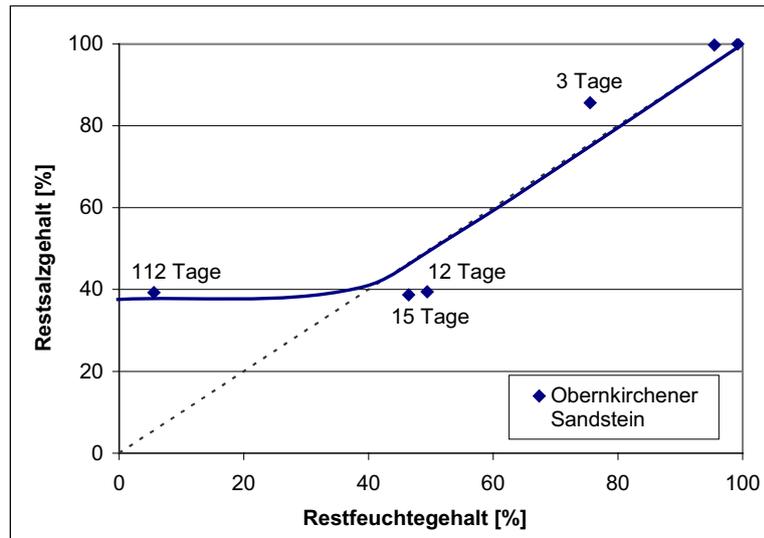


Abb. 10-4: Prozentualer Feuchte- und Salzgehalt am Ende unterschiedlicher Kompressen-Standzeiten

Im Gegensatz zum Transport im Sandstein wird bei der Kompressenentsalzung der Transport nicht mehr nur durch die Kennwerte des Sandsteines bestimmt. Auch die Kompressen mit ihren materialcharakteristischen Kennwerten bekommen in diesem Fall einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Transport im Sandstein.

10.3 Vergleichende Untersuchungen des dauernassen und abtrocknenden Kompressenauftrags

Um den advektiven Schadsalztransport (abtrocknender Kompressenauftrag) mit dem diffusiven Schadsalztransport (dauernasser Kompressenauftrag) vergleichen zu können, wurde der Schadsalzaustrag aus dem Obernkirchener Sandstein bei anfänglicher vollständiger Porensättigung mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung nach jeweils 15 Tagen Standzeit verglichen (10.1.1 und 10.2.1). Der Schadsalzaustrag beider verfahrenstechnischen Varianten ist über die Zeit in der Abb. 10-5 wiedergegeben. Anhand der entfernten Salzmenge ergibt sich, dass in diesem Fall die abtrocknende Kompressen mit der Advektion als Haupttransportmechanismus nach 15 Tagen wesentlich effektiver als die dauernasse Kompressen mit dem Haupttransportmechanismus der Diffusion ist. Bei der Schadsalzreduzierung durch Diffusion wird das Maß des Transportes maßgeblich durch den zur Verfügung stehenden Porenraum und die Diffusionskoeffizienten der Salzionen bestimmt.

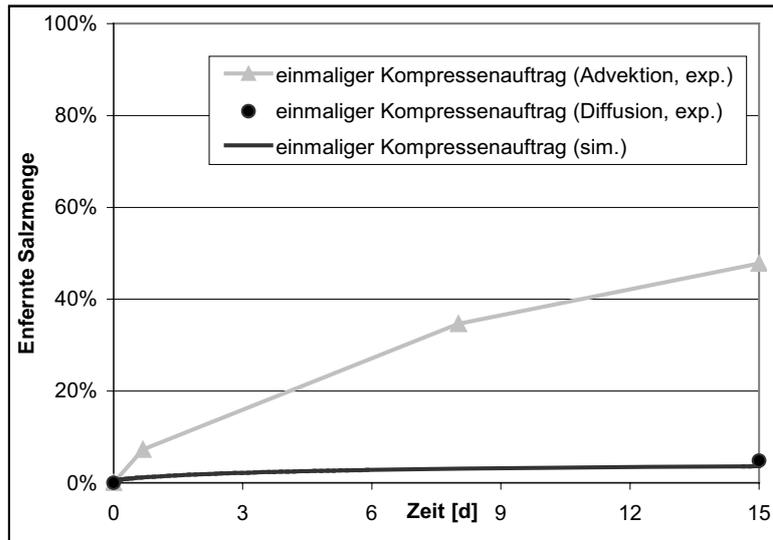


Abb. 10-5: Darstellung der aus dem Sandstein entfernten Salzmenge in Abhängigkeit der Standzeit

Um die effizienzsteuernden Einflüsse auch für den Schadsalztransport durch Advektion näher zu bestimmen, wurden die folgenden Untersuchungen an unterschiedlichen versalzten Untergründen durchgeführt. Es wurden zylindrische Probekörper des Obernkirchener und Bucher Sandsteines (Länge ca. 8 cm, Durchmesser ca. 5 cm) vollständig und gleichmäßig mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung penetriert und bei Versuchsbeginn mit einer etwa 2 cm dicken Kompressenschicht aus einer Bentonit-Cellulose-Blähglas-Kompresse beaufschlagt (Abb. 8-26).

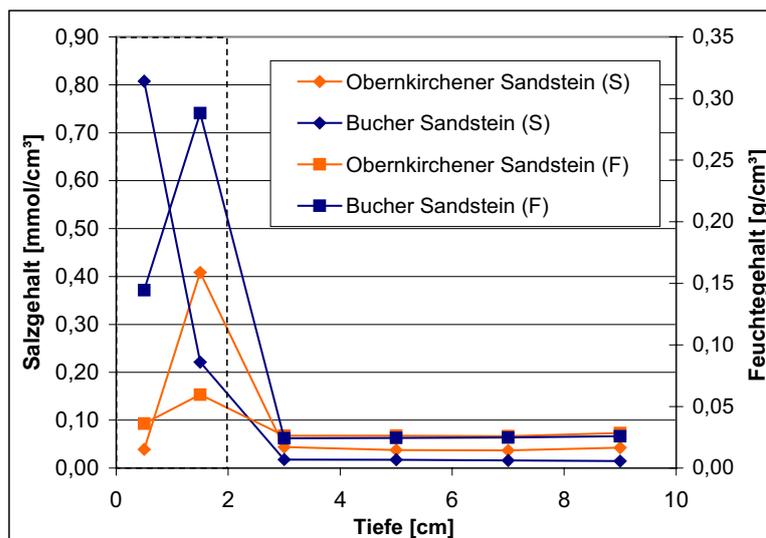


Abb. 10-6: Feuchte- und Salzgehalt im Sandstein und in der Kompressen nach zehn Tagen Entsalzungsdauer

Die Klimatisierung erfolgte bei 23 °C und 60 % r.F.. Nach zehn Tagen wurde der Feuchte- und Salzgehalt im Sandstein und in der Kompressen bestimmt (Abb.

10-6). Ein direkter Vergleich der Schadsalzreduzierung in beiden Sandsteinen ist mit dieser Darstellung vorerst nicht möglich, jedoch zeigt diese Abbildung gut die unterschiedliche Verteilung beider Anteile (Feuchte und Salz) über den gesamten Probekörper.

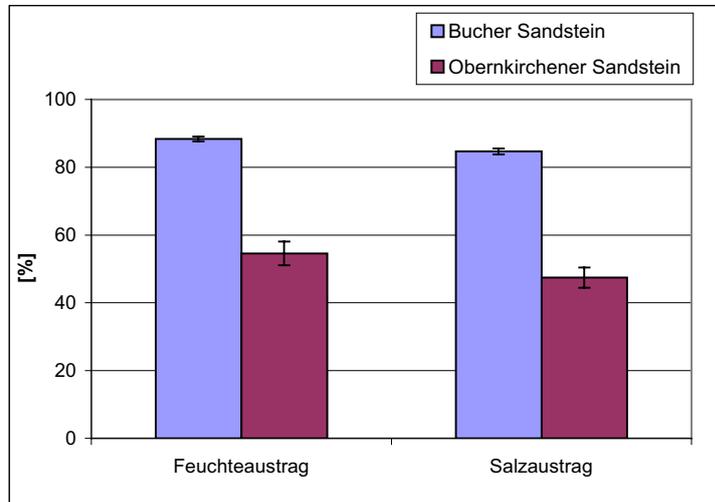


Abb. 10-7: Prozentualer Feuchte- und Salzausstrag nach zehn Tagen Entsalzungsdauer

Während die Feuchteverteilung für beide Probekörper qualitativ den gleichen Verlauf zeigt, ist der Verlauf der Salzverteilung im Bereich der Komresse unterschiedlich. Die Bedeutung dieses Unterschiedes für die Schadsalzreduzierung ist in Abb. 10-7 dargestellt. Man kann erkennen, dass der Feuchteausstrag nahezu parallel zum Salzausstrag erfolgt und somit maßgeblich von der Advektion als Transportprozess ausgegangen werden kann. Auf der anderen Seite erkennt man, dass nach zehn Tagen wesentlich mehr Feuchte und Salz aus dem Bucher als aus dem Obernkirchener Sandstein ausgetragen werden kann. Man sieht also deutlich, dass der Entsalzungserfolg von der Materialkombination abhängt. Da bei der Kompressenentsalzung der zu entsalzene Untergrund meist gegeben ist, liegt der entscheidende Parameter der Optimierung des Schadsalzaustrages in der Wahl des auf den jeweiligen Untergrund abgestimmten Kompressenmaterials.

10.4 Einfluss des Kompressenmaterials

Der Einfluss des Kompressenmaterials auf die regenerativen Transportprozesse der Kompressenentsalzung erfolgt am Beispiel der Schadsalzreduzierung mit dauernassen und abtrocknenden Kompressen.

10.4.1 Experimentelle Untersuchungen zum dauernassen Kompressenauftrag

Für die Untersuchungen zum Einfluss des Kompressenmaterials auf den diffusiven Schadsalztransport wurden Ziegelproben der Abmessungen 5 x 5 x 10 cm mit den vier verschiedenen in Tab. 10-1 angegebenen Salzlösungen vollständig und homogen versalzen.

Tab. 10-1: Penetrationslösungen der Untersuchungen zur diffusiven Kompressenentsalzung

Salzlösung	Diffusionskoeffizient [cm^2/s] [57]
0,5 M KCl-Lösung	$1,85 \cdot 10^{-5}$
0,5 M NaCl-Lösung	$1,47 \cdot 10^{-5}$
0,5 M MgCl_2 -Lösung	$1,06 \cdot 10^{-5}$
0,5 M Na_2SO_4 -Lösung	$0,95 \cdot 10^{-5}$

Die experimentelle Anordnung dieser Versuche wurde gemäß Abb. 8-26 gewählt. Bei Versuchsbeginn wurde die Komresse als 2 cm dicke Schicht auf den Ziegelprobekörper appliziert. Um den Einfluss des unterschiedlichen Kompressenmaterials zu untersuchen, wurde zum einen eine handelsübliche Bentonit-Cellulose-Sand-Komresse und zum anderen eine Kaolin-Cellulose-Sand-Komresse gewählt.

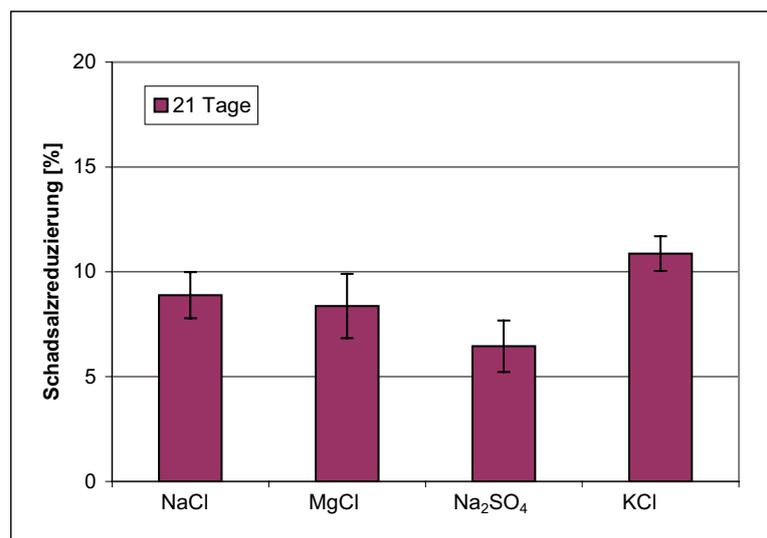


Abb. 10-8: Schadsalzaustrag bei Beaufschlagung des zu entsalzenden Ziegels mit einer dauernassen Kaolin-Cellulose-Sand-Komresse nach 21 Tagen Standzeit

Die Standzeit betrug 21 Tage bei einem Klima von 23 °C und etwa 100 % r.F.. Nach der Auswertung des Versuches konnte durch den Vergleich des in der Kom-

presse enthaltenen Salzes und des anfänglich durch Penetration in den Ziegel eingebrachten Salzes der prozentuale Schadsalzaustrag ermittelt werden. Der Austrag des Schadsalzes korreliert mit der Größe der Diffusionskoeffizienten. Die Auswertung des gleichen Experimentes mit der Bentonit-Cellulose-Sand-Kompresse zeigte nach 21 Tagen Standzeit der Kompressen den in Abb. 10-9 dargestellten Schadsalzaustrag.

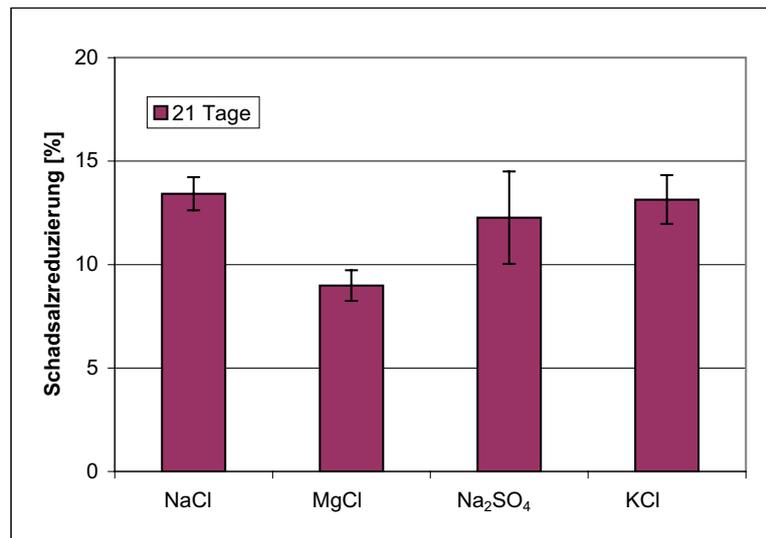


Abb. 10-9: Schadsalzaustrag bei Beaufschlagung des zu entsalzenden Ziegels mit einer dauernassen Bentonit-Cellulose-Sand-Kompresse nach 21 Tagen Standzeit

Der Schadsalzaustrag korreliert bei diesen Ergebnissen qualitativ nicht mehr mit den Diffusionskoeffizienten. Somit müssen die Wechselwirkungen der Ionen in der Porenlösung mit dem in der Kompresse enthaltenem Bentonit einen prägnanteren Einfluss auf den diffusiven Transport besitzen als die Unterschiede der Diffusionskoeffizienten. Es lässt sich jedoch im Allgemeinen feststellen, dass die ausgetragenen Schadsalzmengen bei der Bentonit-Cellulose-Sand-Kompresse im Durchschnitt höher sind als bei der Kaolin-Cellulose-Sand-Kompresse. Dies lässt sich durch das Adsorptionsverhalten des Bentonits erklären. Damit hängt der Schadsalzaustrag bei der dauernassen Kompressenentsalzung hauptsächlich von der Porosität, der Konnektivität des Porensystems und der Reaktivität Oberfläche der Porenwandungen der Kompresse ab.

10.4.2 Experimentelle Untersuchungen zum abtrocknenden Kompressenauftrag

Für die Untersuchungen zum Einfluss des Kompressenmaterials auf den maßgeblich advektiven Schadsalztransport (abtrocknenden Kompresse) wurden zwei Sandsteine und zwei Kompressen gewählt. Bei der Entsalzung durch eine ab-

trocknende Komresse muss im entscheidenden Maße die Porengeometrie als eine die Transportkennwerte beeinflussende Größe berücksichtigt werden. Für eine überschlägliche Einschätzung des dampfförmigen und flüssigen Feuchte-transportes bei den untersuchten Sandsteinen können die Dampfdiffusionswiderstandszahl (μ) und der Wasseraufnahmekoeffizient (w) herangezogen werden, da in den Experimenten zur Befeuchtung und zur Trocknung festgestellt wurde, dass die Sandsteine der Gruppe I und II mit großen Wasseraufnahmekoeffizienten auch besser Trocknungsfähigkeiten zeigten. Für den Fall des abtrocknenden Kompressenauftrages sind jedoch neben den Eigenschaft der einzelnen Materialien besonders die Eigenschaften der Materialkombinationen wichtig. Somit ist es notwendig, dass für eine effiziente Schadsalzreduzierung die Transportkennwerte des Kompressenmaterials für den jeweiligen Anwendungsfall optimal gewählt sind. Die gezielte Einstellung der Transportkennwerte des Kompressenmaterials wurde im Rahmen dieser Arbeit für Tonmineralien-Cellulose-Zuschlag-Kompressen untersucht. Die Kompressen wurden somit aus offenporigem Blähglasgranulat, Bentonit und Cellulose hergestellt. Nach einer Optimierung des offenporigen Blähglases in Bezug auf die transportspezifischen Kennwerte wurden zwei verschiedene Blähglasgranulate jeweils mit Bentonit und Cellulose gemischt. Die eingestellten Transportkennwerte w [48] und μ [47] sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

Tab. 10-2: Transportkennwerte w und μ der Kompressenmischung A und B und der Sandsteine

	w	μ
Kompressenmischung A	7,2	6
Kompressenmischung B	9,0	6
Bucher Sandstein	8,8	21
Obernkirchener Sandstein	1,2	23

Als versalzene Probekörper wurden der Bucher und der Obernkirchener Sandstein mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung vollständig und gleichmäßig penetriert. Die Komresse wurde als etwa 2 cm dicke Schicht nach Abb. 8-26 aufgetragen. Die Probekörper wurden bei 23 °C und 60 % r.F. gelagert. Nach zehn Tagen wurde der Salzgehalt im Sandstein und der Komresse durch Elution des getrockneten und aufgemahlene Probenmaterials bestimmt (Abb. 10-10).

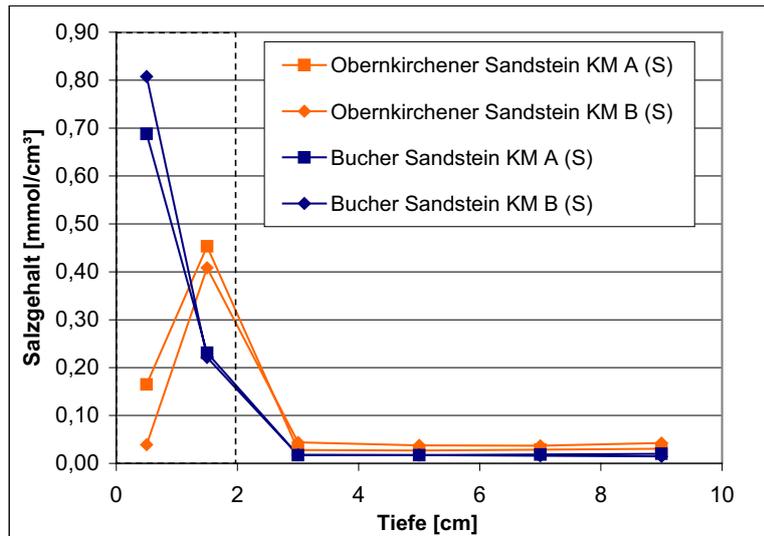


Abb. 10-10: Salzgehalt der Probekörper nach zehn Tagen Kompressenauftrag der Mischungen A und B auf dem Bucher und Oberkirchener Sandstein

Es ergibt sich trotz der verschiedenen Kompressen eine jeweils sandsteinabhängige Salzgehaltsverteilung. Die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Verläufe zeichnen sich sehr deutlich an der prozentualen Schadsalzreduzierung ab (Abb. 10-11).

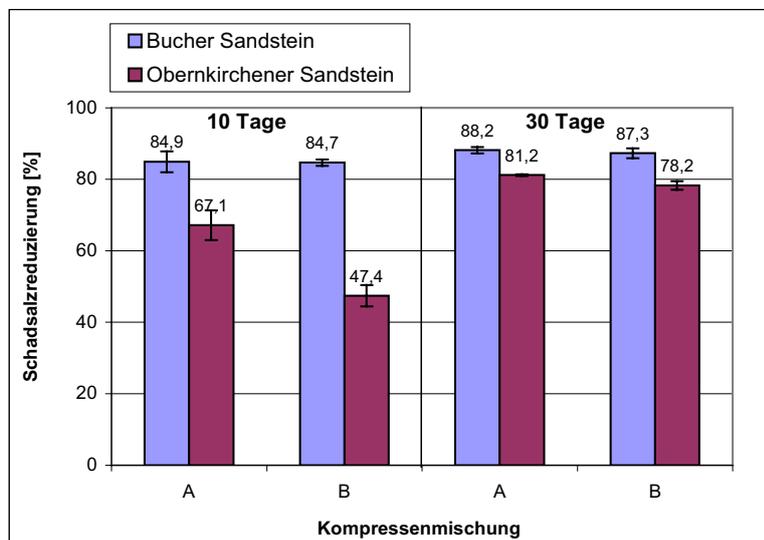


Abb. 10-11: Prozentuale Schadsalzreduzierung im Bucher und Oberkirchener Sandstein nach 10 und 30 Tagen durch den Auftrag von Kompressenmischung A und B

Man sieht deutlich, dass die Kompressenentsalzung beim Bucher Sandstein wesentlich effektiver ist als beim Oberkirchener Sandstein. Nach zehn Tagen ist der Unterschied jedoch wesentlich größer als nach 30 Tagen. Ebenso kann man feststellen, dass die unterschiedlichen Kompressenmischungen keinen Unterschied in der Schadsalzreduzierung des Bucher Sandsteines bewirken. Bei der Entsalzung

des Obernkirchener Sandsteins hingegen wird der Einfluss der unterschiedlichen Kompressenmischungen stärker deutlich. Die Kompressenmischung A reduziert den Schadsalzgehalt im Obernkirchener Sandstein wesentlich stärker als Mischung B.

Da beide Kompressen den gleichen Dampfdiffusionswiderstand besitzen, muss der Unterschied also in der Flüssigkeitsleitung der Kompressen und der Kombination der beiden jeweiligen Materialien liegen. Die Kompressenmischung A besitzt einen niedrigeren w -Wert als die Kompressenmischung B. Im Vergleich beider Sandsteine lässt sich feststellen, dass die kapillare Flüssigkeitsleitung der beiden Kompressen gut ist, aber nur in der Kombination mit dem Bucher Sandstein auch zu einer besseren Schadsalzreduzierung führt. Dieses lässt sich durch den Trocknungsprozess der Probekörper erklären. Beim Trocknungsprozess trocknet zuerst die Oberfläche des Probekörpers ab und initiiert damit den Lösungstransport aus dem Probekörperinneren. Dies geschieht solange, bis nicht mehr genügend Flüssigkeit aus dem Probekörperinneren nachgeliefert werden kann. Beim Obernkirchener Sandstein ist die Flüssigkeitsleitung im Gegensatz zur Kompressenmischung B vermindert, wodurch es zu einer Verlangsamung des Schadsalzaustrages kommt. Die Verdunstungsfront verlagert sich weiter in das Probekörperinnere. Es kommt zum Abtrocknen der Kompressen. Bedingt durch den hohen Dampfdiffusionswiderstand und die langsame Flüssigkeitsleitung des Obernkirchener Sandsteins bleibt der Verdunstungshorizont an der Kontaktfläche Kompressen / Sandstein (Abb. 10-10). Beim Bucher Sandstein hingegen erfolgt die Flüssigkeitsleitung in dem gleichen Maße der Flüssigkeitsleitung und der Verdunstung der Kompressen. Die Verdunstungsfront bleibt dabei in der Kompressenoberfläche, welches eine gute und einfache Entfernung des Schadsalzes mit der Abnahme der Kompressen gewährleistet. Diese Untersuchungen zeigen, welche Potenziale durch Einsatz von abgestimmten Kompressen erschlossen werden können. Dies kann auch zur Reduzierung der Standzeiten genutzt werden. Weitere Möglichkeiten der gezielten Einstellung von Transportkennwerten für Tonmineralien-Cellulose-Zuschlagskompressen sind in [83] angegeben.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Effektivität einer Schadsalzreduzierung durch das Verfahren der Kompressenentsalzung maßgeblich von der gewählten Verfahrensvariante eines dauernassen oder abtrocknenden Kompressenauftrages abhängig ist. Wichtig für die Abschätzung von Standzeiten und Effektivitäten eines Kompressenauftrages ist die Kenntnis der den jeweiligen Transportprozess beeinflussenden Parameter. Ebenso spielt die Wahl des Kompressenmaterials bzw. der Kombination Kompressen/Untergrund eine wichtige Rolle für die Durchführung einer effektiven und nachhaltigen Schadsalzreduzierung.

11 Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Charakterisierung des Transportes von Schadsalzen und deren Einfluss auf den Transport von Feuchtigkeit in porösen Bauwerkstoffen zu charakterisieren. Die qualitative und quantitative Erfassung von Transportprozessen ermöglicht die Entwicklung und Verifikation von Transportmodellen. Auf deren Grundlage können Einschätzungen zum Gefährdungspotential und zur effektiven und nachhaltigen Sanierung getroffen werden. Folgenden wesentliche Ergebnisse wurden erzielt.

1. Für die qualitative und quantitative Beschreibung des Salzeinflusses auf Feuchtetransportprozesse in porösen Bauwerkstoffen wurde der Feuchtetransport infolge Befeuchtung, Trocknung und Dichtegradienten untersucht:

Die experimentellen Untersuchungen zum Feuchtetransport in Bauwerkstoffen infolge Befeuchtung zeigten, dass die Herleitung der Bewegungsgleichung eines Fluides in einer Kapillare über die Navier-Stokes-Gleichungen und die Kontinuitätsgleichung zur Beschreibung der zeitabhängigen Feuchtigkeitsaufnahme eines kapillarporösen Bauwerkstoffes bei teilweisem Eintauchen mit guter Übereinstimmung angewendet werden kann. Weiterhin konnte durch die Untersuchungen festgestellt werden, dass für eine wirklichkeitsnahe Beschreibung des senkrechten Kapillartransportes von Salzlösungen ein Schwereterm im Modell berücksichtigt werden muss. Einzelne, aus der mathematischen Herleitung resultierenden, Kenngrößen für den Kapillartransport wie z.B. die maximale kapillare Steighöhe können jedoch nicht direkt auf den Bauwerkstoff übertragen werden. Diese Kenngrößen können maximal für vergleichende Aussagen herangezogen werden.

Beim Feuchtetransport infolge Trocknung treten vier charakteristische Trocknungsperioden auf. Innerhalb der vier Perioden unterscheidet sich die Trocknungsgeschwindigkeit durch die verwendeten Bauwerkstoffe, die Veränderung der klimatischen Randbedingungen und die Art und Konzentration der Porenlösung. Bei der Verwendung von Salzen in der Porenlösung kann in Trocknungsexperimenten der Anteil von dampfförmigem und flüssigem Feuchtetransport identifiziert werden. Durch die Messung der Konzentrationserhöhung der Porenlösung über die Trocknungsdauer können die Anteile des dampfförmigen und flüssigen Feuchtetransportes bestimmt werden. Dabei ist es notwendig, dass die Salze in der Porenlösung lediglich in geringer Konzentration als „Marker“ enthalten sind. Die Beeinflussung der Porenlösungseigenschaften ist dann bis zu einem hohen Trocknungsgrad vernachlässigbar gering. Durch diese neuartige Verfahrensweise ist es möglich, den flüssigen und dampfförmigen Wassertransport

getrennt zu messen. Die funktionelle Abhängigkeit des Anteils des flüssigen bzw. dampfförmigen Transportes am Gesamtfeuchte-transport kann näherungsweise durch eine Potenzfunktion beschrieben werden. Der Exponent dieser Funktion wird wiederum von der Art des Bauwerkstoffes, der Art und Konzentration der Porenlösung und den klimatischen Randbedingungen bestimmt.

Der Flüssigkeitstransport infolge Dichtegradienten wurde anhand der 2-Scheiben Anordnung untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass für das Entstehen von Konvektion die Richtung des Dichtegradienten im Schwerfeld von Bedeutung ist. Die Berechnungen des Grenzradius, ab dem Konvektion auftritt, wurden anhand der statischen Lösung der Navier-Stokes-Gleichung durchgeführt und konnten experimentell verifiziert werden. Es wurde festgestellt, dass es beim Vergleich des mittleren Porenradius mit dem Grenzradius auch unterhalb des Grenzradius zum Auftreten von Konvektion kommen kann. Dies ist dadurch begründet, dass der maximale Radius der gefüllten Poren eines Bauwerkstoffes für das Auftreten von Konvektion ausschlaggebend ist.

2. Die Charakterisierung diffusiver Ionentransportprozesse in porösen Bauwerkstoffen basiert auf theoretischen Diffusionsmodellen, die durch Experimente verifiziert wurden. Dazu erfolgte eine Bewertung und Entwicklung von Messmethoden zur Ermittlung von effektiven Diffusionskoeffizienten:

Die Ausdiffusionsmessmethode, welche auf der Messung der Ionendiffusion aus einer Bauwerkstoffscheibe in eine Umgebungslösung basiert, besitzt bei der Bestimmung der Diffusionskoeffizienten durch Leitfähigkeitsanalyse den Vorteil eines geringen experimentellen Aufwands. Dabei tritt i.A. das Problem auf, dass die Leitfähigkeit nicht im gleichen Maße von der Konzentration abhängt wie die Diffusion. Die Bestimmung der Diffusionskoeffizienten über die Ionenkonzentration ist deshalb oftmals genauer. Als Nachteil der Ausdiffusionsmessmethode stellte sich die Messvoraussetzung der vollständigen Probekörpersättigung heraus. Bei der in Abhängigkeit des Bauwerkstoffes und der Porenlösung neben der Diffusion auch die Konvektion auftreten kann.

Die Anwendung der vorgestellten 2-Scheiben Anordnung zeigte den Vorteil, dass bei beliebigem Feuchtegehalt im Bauwerkstoff die effektiven Diffusionskoeffizienten direkt durch Konzentrationsprofile bestimmt werden können. Durch die spezielle Anordnung der Probekörper kann auch das Auftreten von Konvektion verhindert werden.

Die Impedanzspektroskopie ermöglicht es Ionendiffusionskoeffizienten mit geringem experimentellen Aufwand bei verschiedenen Feuchtegehalten im Bauwerk-

stoff zu bestimmen. Der Nachteil dieser Messmethode besteht jedoch darin, dass effektive Diffusionskoeffizienten im Bauwerkstoff über die gemessene Gleichstromleitfähigkeit bestimmt werden müssen. Eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Konzentrationsabhängigkeiten der Diffusion und der Leitfähigkeit ist dann erforderlich. Andererseits ist das Verfahren geeignet, die funktionelle Abhängigkeit des Cole-Cole-Exponenten von der inneren Oberfläche des Bauwerkstoffes zu ermitteln. Dies ermöglicht eine einfache und schnelle Bestimmung der inneren Oberfläche eines Bauwerkstoffes. Für die Bestimmung des Formationsfaktors der Bauwerkstoffe wurde die spezifische Probenleitfähigkeit der salzlösungsbeladenen Bauwerkstoffe ermittelt. Durch die Messung der spezifische Probenleitfähigkeit bei unterschiedlichen Konzentrationen der Porenlösung eines Bauwerkstoffes konnte gezeigt werden, dass der Formationsfaktor konzentrationsabhängig ist. Durch Zugrundelegen einer Parallelschaltung von Volumen- und Grenzflächenleitfähigkeit kann dieses Phänomen erklärt werden. Gleichzeitig kann dieses Ersatzschaltbild zur Ermittlung der geometrischen Formationsfaktoren der Sandsteine benutzt werden. Der geometrische Formationsfaktor nimmt mit zunehmender Porosität ab.

3. Die Charakterisierung der Ionendiffusion in porösen Bauwerkstoffen wurde im Rahmen dieser Arbeit in Abhängigkeit der Porenmorphologie, der Konzentration der Porenlösung, der Porensättigung, der Temperatur und des Einflusses von Grenzflächen untersucht:

Die Untersuchungen zum Einfluss der Konzentration der Porenlösung auf die Ionendiffusion in Bauwerkstoffen zeigen, dass die Tortuosität keine rein geometrische Größe ist, sondern auch von der Konzentration der Porenlösung abhängt.

Die Abhängigkeit der effektiven Diffusionskoeffizienten vom Feuchtegehalt im Bauwerkstoff kann näherungsweise durch einen Potenzfunktionsansatz erfasst werden. Da der Exponent jedoch konzentrationsabhängig ist, muss eine erste Bestimmung mit unendlich verdünnter Salzlösung als Porenlösung erfolgen. Höhere Konzentrationen können durch einen additiven Term im Exponenten berücksichtigt werden.

Die Berechnung der Temperaturabhängigkeit der Ionendiffusionskoeffizienten im porösen Bauwerkstoff mit einem Arrheniusansatz zeigte eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen. Die Konzentrationsabhängigkeit der Tortuosität ist dabei ebenfalls zu berücksichtigen.

Experimentelle Untersuchungen zum diffusiven Ionentransport über Kontaktflächen zeigen Widerstände an diesen Flächen auf. Durch die Identifikation und

Quantifizierung dieser Widerstände können experimentelle Anordnungen und revitalisierende Sanierungsmaßnahmen entsprechend optimiert werden.

4. Für die Simulation von Diffusionsprozessen in Bauwerkstoffen und Bauwerkstoffverbunden sowie zur Identifikation von Transportparametern wurde das Programm SPID entwickelt:

Das Programm basiert auf der diskreten Modellierung von Diffusionsprozessen in im verbundstehenden homogenen Teilkörpern, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen können. Die transportspezifischen Übergangsbedingungen an den Schichtgrenzen können durch Einführung einer fiktiven Widerstandsschicht erfasst werden. Das Programm wurde zur Simulation von Verbunden von porösen Bauwerkstoffen z.B. Ziegel/Mörtel oder Sandstein/Kompresse verwendet. Dabei wurde eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen erzielt.

Des Weiteren kann das Programm zur Parameteridentifikation eingesetzt werden. Es ermöglicht die Bestimmung von Diffusionskoeffizienten in Bauwerkstoffen bzw. von Widerstandskoeffizienten an Schichtgrenzen. Dabei werden die Parameter des Modells so bestimmt, dass ein experimentell charakterisierter Diffusionsprozess bestmöglich abgebildet wird. Das so gewonnene rechnerische Modell kann zur weiteren Analyse und zur Optimierung von Materialkombination und Verbundbedingungen eingesetzt werden.

5. Zur Auswahl geeigneter Sanierungsmaßnahmen wurden experimentelle Untersuchungen zum revitalisierenden Ionentransport in Bauwerkstoffen durchgeführt. Dabei stand der Anwendungsfall der Kompressenentsalzung im Vordergrund:

Bei der dauernassen Kompressenapplikation zeigte sich, dass die Effektivität der Schadsalzreduzierung durch die Größe der Diffusionskoeffizienten, den Konzentrationsgradienten und den Widerstand in der Kontaktfläche bestimmt wird. Die Abhängigkeit von der Art und Konzentration des Schadsalzes sowie der Temperatur ist zusätzlich zu berücksichtigen. Weiterhin muss bei der Verwendung von Tonmineralien-Cellulose-Sand-Kompressen die Reaktivität der Tonmineralien beachtet werden. Für die Kaolin-Cellulose-Sand-Kompresse konnte ein direkter Zusammenhang zwischen der ausgetragenen Schadsalzmenge und der Größe des Diffusionskoeffizienten des Salzes in freier Lösung festgestellt werden. Dieser Zusammenhang konnte für die Bentonit-Cellulose-Sand-Kompresse nicht ermittelt werden. Dies lässt auf spezielle Austausch- und Adsorptionsprozesse der verschiedenen Salzlösungen mit dem Bentonit schließen.

Bei der abtrocknenden Kompressenapplikation wird die Effektivität des Schad-salzaustrages vom Anteil des Feuchtetransportes in der flüssigen Phase bestimmt, da Salze nur in gelöster Form transportiert werden können. Die Maximierung des Flüssigkeitsanteils am Gesamtfeuchtetransport ist das wesentliche Optimierungskriterium für die Wahl der Kompressenzusammensetzung. Durch die Verwendung von gezielt eingestelltem offenporigem Blähglasgranulat in einer Tonmineralien-Cellulose-Zuschlag-Kompresse können erstmalig speziell auf den zu entsalzenden Untergrund zugeschnittene Kompressen hergestellt und mit hoher Effektivität eingesetzt werden.

Die Erkenntnisse und entwickelten Methoden dieser Arbeit tragen zu einer erweiterten Charakterisierung des Einflusses der Salzionen auf Transportprozesse in feuchte- und salzbelasteten porösen Bauwerkstoffen bei. Die Entwicklung von speziellen Messmethoden zur Bestimmung von Transportkoeffizienten ist dabei von besonderer Bedeutung. Darüber hinaus konnte eine verbesserte Auswertung von Experimenten durch Einsatz numerischer Verfahren realisiert werden.

12 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau: Dritter Bericht über Schäden an Gebäuden, 1988
- [2] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau: Dritter Bericht über Schäden an Gebäuden (1992), 1996
- [3] Riederer, J.: Die Salzschiiden am Deutschen Dom in Berlin, Bautenschutz und Bausanierung 15, S. 54-56, 1992
- [4] Eggloffstein, P.; Auras, M.: Kompressenentsalzung – Ein Materialvergleich, Festschrift- Institut für Steinkonservierung e.V., Bericht Nr.10, S. 63-73, 2000
- [5] Schuh, H.; Ettl, H.: Entsalzung mit Kompressen in der Denkmalpflege, Bautenschutz und Bausanierung 15, S. 86-89, 1992
- [6] Arnold, A.: Salze - Lästige weiÙe Ausblühungen oder Hauptschadensursache?, Jahresberichte Steinzerfall und Steinkonservierung, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 1992
- [7] Kießl, K.; Gertis, K: Feuchtetransport in Baustoffen, Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen 13, Universität Essen Gesamthochschule, 1980
- [8] Kießl, K.: Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, Dissertation Universität Gesamthochschule Essen, 1983
- [9] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe – Theoretische Grundlagen und neue MeÙtechniken, Dissertation Universität Stuttgart, 1995
- [10] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation Universität Stuttgart, 1994
- [11] Pel, L.: Moisture Transport in porous building materials, Dissertation, Technische Universität Eindhoven, 1995
- [12] Bednar, Th.: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden – Weiterentwicklung der MeÙ- und Rechenverfahren, Dissertation Technische Universität Wien, 2000
- [13] Lunk, P.: Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösung in Beton, Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule, Aedificatio Verlag Freiburg Zürich, 1997

- [14] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton, Dissertation Technische Universität München, 1991
- [15] Buchwald, A.: Ionentransportprozesse zur Verminderung von Schadsalzgehalten in porösen, feuchten Mauerwerksbaustoffen, Dissertation Bauhaus-Universität Weimar, Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [16] Grunewald, J.: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillar porösen Baustoffen, Dissertation Technische Universität Dresden, 1997
- [17] Grunewald, J., Häupl, P.: Das Simulationsprogramm DELPHIN4 für gekoppelten Feuchte-, Luft-, Salz- und Wärmetransport in kapillarporösen Baustoffen - Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Bauphysik-Kalender, S. 379-434, 2003
- [18] Giskow, R.: Messungen von Diffusionsparametern an Sandsteinen: Ein Beitrag zur Frage des Stofftransportes in Sedimenten, Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 1987
- [19] Garrecht, H.: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk, Dissertation Universität Fridericiana Karlsruhe, Schriftenreihe des Institutes für Massivbau und Baustofftechnologie 15, 1992
- [20] Kolditz, O.: Strömung, Stoff- und Wärmetransport im Kluftgestein, Gebrüder Bornträger Berlin Stuttgart, 1997
- [21] Lege, Th.; Kolditz, O.; Zielke, W.: Strömung- und Transportmodellierung, Springer, Berlin, 1996
- [22] WTA-Merkblatt 2-2-91/D, Sanierputzsysteme, 1992
- [23] Hilbert, G.: Opferputze im weitesten Sinne, Verfahren zum Entsalzen von Natursteinen, Mauerwerk und Putz, WTA Schriftenreihe 8, Hrsg. Goretzki, L., Aedificatio Verlag, S. 70-76, 1996
- [24] WTA-Merkblatt 3-13-01/D, Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen, 2003
- [25] Friese, P.; Protz, A.: Entsalzung von Sandsteinsäulen am Schloss Belvedere in Potsdam mit dem Injektionskompressenverfahren, 12. Hanseatische Sanierungstage, S. 179-185, 2001
- [26] Weber, H.: Instandsetzung von feuchte- und salzgeschädigtem Mauerwerk, Baupraxis und Dokumentation, Band 8, Expert Verlag, 1993
- [27] Mandelbrot, B.: Die fraktale Geometrie der Natur, Akademischer Verlag, Berlin, 1987

- [28] Dullien, F. A. L.: Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, New York, 1979
- [29] Manegold, E.: Allgemeine und angewandte Kolloidkunde, Band 2, Straßenbau, Chemie und Technik, Heidelberg, 1958
- [30] Engelhardt, W. von: Der Porenraum der Sedimente, Springer, Berlin, 1960
- [31] Meng, B.: Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtetransportvorgängen, Aachener Beiträge zur Bauforschung, Band 3, Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1993
- [32] Riepe, L.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über den Einfluß der spezifischen inneren Oberfläche auf petrophysikalische und bohrlochphysikalische Parameter von Sedimentgesteinen, Dissertation Technische Universität Clausthal, Selbstverlag des Geophysikalischen Institutes, 1984
- [33] Pape, H.; Riepe, J.; Schopper, J., R.: A Pigeon-Hole Model for relating Permeability to Specific Surface, Log analyst, Society of Professional Well Log Analysts, Band 23, Houston Texas, 1982
- [34] Bedienungsanleitung Accupyc 1330
- [35] Bedienungsanleitung Geopyc 1360
- [36] DIN 66133: Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion, Beuth Verlag, 1993
- [37] DIN ISO 9277: Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach dem BET-Verfahren, Beuth Verlag, 2003
- [38] Richardson, L.F.: The Problem of Contiguity: An Appendix to Statistics of Deadly Quarrels, Pittsburgh, Boxwood Press, 1960
- [39] Bear, J.; Bachmat, Y.: Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht Boston London, 1991
- [40] Baranowski, B.: Nichtgleichgewichts-Thermodynamik in der physikalischen Chemie, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1975
- [41] Malcherek, A.: Numerische Methoden für Strömungen, Stoff- und Wärmetransport, Skript Institut für Strömungsmechanik und elektronischen Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover, 1998
- [42] DIN EN 1936: Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte der offenen Porosität und der Gesamtporosität (Prüfverfahren für Naturstein), 1999
- [43] D'Ans Lax: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Band 1, 4. Auflage, 1992

- [44] Näser, K.-H.; Lempe, D.; Regen, O.: Physikalische Chemie für Techniker und Ingenieure, 19. unveränderte Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1960
- [45] Benedix, R.: Bauchemie, Einführung in die Chemie für Bauingenieure, 2. Auflage, B. G. Teubner Verlag, 2003
- [46] DIN EN ISO 12571: Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften, Beuth Verlag, 2000
- [47] DIN EN ISO 12572: Baustoffe - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit, Beuth Verlag, 1997
- [48] DIN EN ISO 15148: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, Beuth Verlag, 2003
- [49] Girlich, N.: Ein Beitrag zum kapillaren Flüssigkeitstransport in Baustoffen, Dissertation Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, 1982
- [50] Hilbig, G; Girlich, N.: Bemerkung zum Flüssigkeitstransport in porösen Medien - Das \sqrt{t} -Gesetz, Bauphysik 6, 1984
- [51] Rudolph, R.: Kapillarer Flüssigkeitstransport in porösen Baustoffen, Versuch 1.7, Baustoffpraktikum Band 1, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Stark, J.; Krug, H. (Hrsg.), Bauhaus-Universität Weimar, 2000
- [52] Larsen, P.K.: *Desalination of painted brick vaults*, PhD-Thesis Technical University of Denmark, Department of Structural Engineering and Materials, Series R, No.52 1999
- [53] Jost, W.: Diffusion – Methoden der Messung und Auswertung, Verlag Dr. Dietrich Steinkopf Darmstadt, 1957
- [54] Bockris, J. O´. M.; Reddy, A. K. N.: Modern Electrochemistry 1, Ionics, Second Edition, Plenum Press, New York, 1970
- [55] Atkins, P.W.: Physikalische Chemie, 3. überarbeitete Auflage, Wiley-VCH, Weinheim, 2001
- [56] Seidl, J. J.: Diffusionskoeffizienten binärer und ternärer Elektrolytlösungen, Dissertation Universität Regensburg, 1995
- [57] Lobo, V. M. M.: Handbook of electrolyte solutions, Elsevier, Amsterdam, 1989
- [58] Zaytzev, I. D.; Aseyev, G. G.: Properties of Aqueous Solution of Electrolytes, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1992

- [59] Winsauer, W. O.; Shearin, H. M.; Masson, P. H.; Williams, M.: Resistivity of Brine-Saturated Sands in Relation to the Pore Geometry, Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, Houston Texas, Vol. 36, No. 2, S.253-277, 1952
- [60] Ullmann, W. J.; Aller R. C.: Diffusion coefficients in nearshore marine sediments, Limnological Ozeanography 27, S. 552-556, 1982
- [61] Kulenkampff, J.: Die komplexe Leitfähigkeit poröser Gesteine im Frequenzbereich von 10 Hz bis 1 MHz, Dissertation TU Clausthal, 1994
- [62] Archie, G. E.: The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers 146, New York, 1942, 54-62
- [63] Crank, J.: The Mathematics of Diffusion, Oxford Science Publication 2nd ed., 1975
- [64] Kriegel, R.; Kaps, Ch.: Bestimmung geometrieunabhängiger Stofftransportgrößen – ausgewählte Beispiele aus der Werkstoffchemie, Tagungsband GDCh-Fachgruppe Bauchmie, Siegen, 1999
- [65] Thomae, E.: Impedanzspektroskopie – Eine neue Methode zur Untersuchung der Kinetik ausgewählter Festkörperreaktionen, Dissertation Universität Essen Gesamthochschule, 1990
- [66] Bäumen, A.: Zur Auswertung impedanzspektroskopischer Messungen zur Bestimmung der Diffusionskoeffizienten von Alkalikationen in wasserhaltigen Zeolithen, Diplomarbeit Universität Essen Gesamthochschule 1991
- [67] Bäumen, A.: Zur Auswertetheorie impedanzspektroskopischer Messungen an wasser- und ionenhaltigen porösen Festkörpern, Dissertation Universität Essen Gesamthochschule, 1996
- [68] Wassner, K.: Konstruktion und Erprobung einer Meßzelle zur Impedanzspektroskopischen Untersuchung von wasserhaltigen Zeolithen, Diplomarbeit Universität Essen Gesamthochschule, 1991
- [69] Wassner, K.: Impedanzspektroskopische Untersuchungen von wasserhaltigen porösen Substraten, Dissertation Universität Essen Gesamthochschule, 1994
- [70] Macdonald, J. R.: Impedance Spectroscopy: Emphasizing Solid Materials and Systems, New York John Wiley & Sons, 1987
- [71] Broken, H. J. P.: Moisture Transport in Brick Masonry: The Grey Area between Bricks, Dissertation Technische Universität Eindhoven, 1998

- [72] Holm, A.: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes, Dissertation Universität Stuttgart, 2001
- [73] Sadouki, H.; Buchwald, A.; Wittmann, F.H.; Kaps, Ch.: Numerical Determination of Ion Diffusivity in Bricks Based on Non-Stationary Diffusion Experiments, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Jahrgang 5, Aedificatio Publisher, Heft 1, 1999
- [74] Otto, J.: Schwarze Kerne in keramischen Erzeugnissen, Keramische Zeitschrift, Jahrgang 31, Nr.2, S. 77-78, 1979
- [75] Hilker, E.: Zur Identifizierung und Verhinderung qualitätsmindernder Brennfehler, Ziegelindustrie (ZI), Heft 5, S:180-185, 1975
- [76] Landolt-Börnstein: Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie und Technik, 6. Auflage, 2. Band, 1985
- [77] Kohlrausch: Praktische Physik, 1982
- [78] Hamann, C. H.; Vielstich, W.: Elektrochemie, 3. Auflage, Wiley-Vch Verlag, 1998
- [79] Waxman, M. H.; Smits, L. J. M.: Electrical Conductivities in Oil-Bearing Shaly Sands, SPEJ 8, S. 107-122, 1968
- [80] Rink, M.; Schopper, J. R.: Interface Conductivity and its Implications to Electric Logging, Trans. 3rd Europ. Logg. Symp., London, Paper M and Trans. SPWLA 15th Ann. Logg. Symp. Paper J., 1974
- [81] Iversen, N.; Jørgensen, B. B.: Diffusion coefficient of sulfate and methane in marine sediments: Influence of porosity, Geochimica et Cosmochimica Acta 57, S 571-578, 1993
- [82] Terheiden, K.: SPID-Programm, Simulation und Parameteridentifikation von Ionen-Diffusionsprozessen, 2003
- [83] Kaps, Ch.; Terheiden, K.; Wiencke, K.: Kompressenputze zum Schadsalzaustrag aus Mauerwerken und Verfahren zur Herstellung; Offenlegungsschrift zum Patent DE 102 30 749 A1, 2004
- [84] Kriegel, R.: Win_Diff - a diffusion simulation program, 1999 (unveröffentlicht)
- [85] Nägele, W. et al.: Die Rolle der Salze bei der Verwitterung von mineralischen Baustoffen, WTA-Schriftenreihe 1, Freiburg Aedificatio, 1992
- [86] Terheiden, K.; Wiencke, K.; Kaps, Ch.: Kompressenentsalzung – Einfluss des Kompressenmaterials auf den regenerativen Schadsalztransport, Erhalten,

- Umnutzen und Ertüchtigen, H.-P. Leimer und F. H Wittmann (Hrsg.), Aedificatio Verlag, 2002
- [87] Terheiden, K; Müller, F.; Kaps, Ch.: Gerichteter Ionentransport in Entsalzungsversuchen an Sandsteinen, GDCh-Monographie Bd. 24, S. 108 – 112, 2001
- [88] Terheiden, K.; Kaps, Ch.: Sandsteine im Sanierungsprozess der Kompressenentsalzung - Laboruntersuchungen zur Diffusion und Advektion, 12. Hanseatische Sanierungstage, S. 155-166, 2001
- [89] Schwinger, R.: Charakterisierung des Ionentransportverhaltens von Sandsteinvarietäten, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2001
- [90] Aust, J.: Vergleichende Untersuchungen zu den Bewertungsmöglichkeiten der Salzbelastung von Bauwerken, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- [91] Krischer, O.; Kast, O.: Trocknungstechnik, Springer-Verlag Berlin, 1992
- [92] Meyer, Th.: Leitfähigkeitsmessungen mittels Impedanzspektroskopie an feuchte- und salzbelasteten porösen Mauerwerksbaustoffen, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2003
- [93] Scheidegger, A. E.: The Physics of Flow through Porous Media, University of Toronto Press, Third edition, 1975
- [94] Peitgen, H.-O.; Jürgens, H.; Saupe, D.: Fractals for the classroom, Introduction to fractals and chaos, Vol. 1, Springer, New York, 1991
- [95] Cussler, E. L.: Diffusion - Mass Transfer in Fluid Systems, Second Edition, Cambridge University Press, 1997
- [96] Graner, Th.: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Materialkombinationen auf die Funktionalität von Entsalzungskompressen, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2003
- [97] Schiecke, S.: Statistische Bewertung einer Messmethoden für die Ermittlung von Salz-Diffusionskoeffizienten, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2004
- [98] Lykow, A. W.: Transporterscheinungen in kapillar porösen Körpern, Akademie Verlag, Berlin, 1958
- [99] Tenner, U.: Charakterisierung verschiedener Bauwerkstoffe im Hinblick auf sanierungsrelevante Parameter, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2004

- [100] Kalbe, I.: Untersuchung des diffusiven Schadsalztransportes im Ziegel in Abhängigkeit verschiedener Salzlösungen und Kompressenmaterialien, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2004
- [101] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton, Basel, Birkhäuser, 2001
- [102] Terheiden, K.; Kaps, Ch.: Investigations of the moisture and concentration depending transport of deteriorating salt in masonry materials, 13th International Brick Block Conference, Amsterdam, 2004
- [103] Graner, Th.: Messung der Leitfähigkeit feuchte- und salzbelasteter poröser Bauwerkstoffe mittels Impedanzspektroskopie, Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2004
- [104] Hagedorn, Th.: Zum Einfluss offenporiger Zusätze auf die Wirkungsweise von Kompressen, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2004
- [105] Terheiden, K.: Investigations into the potential convective transport process in masonry materials depending on the moisture content and concentration of the pore solution, 10th Canadian Masonry Symposium, Alberta, 2005
- [106] Henning, O.; Knöfel, D.: Baustoffchemie, 6.Auflage, Verlag für Bauwesen, Wiesbaden und Berlin, Bauverlag, 2002
- [107] Gunske, Ch.: Untersuchung des Einflusses der Salzart und Salzkonzentration und der Porenmorphologie auf den Flüssigkeitstransport, Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2006
- [108] Geilert, S.: Untersuchung des Einflusses der Schadsalzart und der Porenmorphologie bei der Kompressenentsalzung an Sandsteinen, Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2006
- [109] Terheiden, K.: Experimental analysis of fluid and vapour transport processes depending on the moisture content and concentration of deteriorating salts against the background of different masonry materials, 10th Canadian Masonry Symposium, Alberta, 2005
- [110] Terheiden, K.; Kaps, Ch.: Revitalisierender Ionentransport in Mauerwerksbaustoffen - Einfluss der Feuchte- und Salzgradienten auf die Transportprozesse, 15. Internationale Baustofftagung, 2003
- [111] Müller, F.: Internationale Natursteinkartei, 3. Auflage, Ebner Verlag, Ulm, 1997
- [112] Stark, J.; Stürmer, S.: Bauschädliche Salze, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, 1996

- [113] Terheiden, K.; Kaps, Ch.: Comparison of experimental analysis and numerical simulations of ion transport through interfaces between building materials, MSR VI, Karlsruhe, 2003
- [114] Wiencke, K.: Wirkung der Kompressenkomponenten im Prozess der Entsalzung an Sandsteinen, Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- [115] Kriegel, R.; Terheiden, K.; Kaps Ch.: Simulation verfahrenstechnischer Grenzfälle der Kompressenentsalzung – Vergleich der numerischen Simulation mit experimentellen Daten von Labor-Messungen, Erhalten, Umnutzen und Ertüchtigen, H.-P. Leimer und F. H Wittmann (Hrsg.), Aedificatio Verlag, 2002
- [116] Kaps, Ch.; Terheiden, K.; Vogt, R.: Zur Bedeutung der aktuellen Porenfeuchte beim Salztransport im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen, 14. Hanseatische Sanierungstage, 2003
- [117] Kammer, H.-W.; Schwabe, K.: Thermodynamik irreversibler Prozesse, VCH-Verlagsgesellschaft, 1985
- [118] Köhler, W.; Erfurt, W.; Terheiden, K.: Untersuchungen zum Stofftransport in Baustoffen mittels gravimetrisch verifizierter Radarmessungen; Beiträge zur Baustoff-Forschung 2001, Thesis - Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar, 5./6. Heft, 47. Jahrgang, 2001
- [119] Terheiden, K.; Kaps, Ch.: Kompressenentsalzung – Wirksame Ionentransportprozesse und deren Randbedingungen; GDCh-Monographie Bd. 25, S. 148 – 150, 2002
- [120] Terheiden, K.; Kaps, Ch.: Experimental analysis of the influence of material characteristics on the ion transport in desalination processes; EUROMAT, Lausanne, 2003
- [121] Müller, F.: Gesteinskunde, 6. Auflage, Ebner Verlag, 2001
- [122] Grunewald, J.; Steiger, M.; Kaps, Ch.; Deckelmann, G.: Implementierung eines Modells für den Salztransport in kapillarporösen Bauwerkstoffen, Teilprojekt: Vogt, R.: Transportkoeffizienten Salzdifffusion, Kolloquium zum DFG-Schwerpunktprogramm Braunschweig, 2002
- [123] Heinz, A.: Grundlegende Untersuchungen für den Vergleich von Kompressenentsalzung und elektrochemischen Entsalzungsverfahren zur Schadsalzreduzierung im Mauerwerk, Studienarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2002
- [124] Kalbe, I.: Vergleichende Untersuchungen zur Effektivität elektrochemischer und diffusiver Entsalzungsmethoden an Modellmauern, Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 2005

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Feuchte- und salzbelastete Wand.....	15
Abb. 3-1:	Die empirischen Daten von Richardson über die Zuwachsrates der Länge von Küstenlinien entnommen aus [27]; Original in [38].....	22
Abb. 3-2:	Koch Kurve.....	23
Abb. 5-1:	Schematische Darstellung des Flüssigkeitstransportes in einer Kapillare [51]	40
Abb. 5-2:	Experimentell Anordnung der Ausdiffusion aus einer Platte	51
Abb. 5-3:	Graphische Darstellung der Gleichung	53
Abb. 5-4:	Experimenteller Aufbau der Sandwich-Anordnung	54
Abb. 5-5:	Experimentelle Anordnung der Impedanzspektroskopie.....	55
Abb. 5-6:	Komplexe Impedanz Z'' der Parallelschaltung eines ohmschen Widerstandes und eines kapazitiven Widerstandes.....	55
Abb. 5-7:	Parallelschichtmodell mit Ersatzschaltbild	56
Abb. 5-8:	Serienschichtmodell mit Ersatzschaltbild	56
Abb. 6-1:	Oldislebener (links) und Seeberger (rechts) Sandstein.....	60
Abb. 6-2:	Bad Frankenhäuser und Kelbraer Sandstein	60
Abb. 6-3:	Vogelsberger Sandstein.....	61
Abb. 6-4:	Obernkirchener und Bucher Sandstein	61
Abb. 6-5:	Sander und Wüstenzeller Sandstein	62
Abb. 6-6:	Rüthener Sandstein	62
Abb. 6-7:	Ziegel (r), Ziegel (s).....	63
Abb. 6-8:	Porenradienverteilung Sandsteine Gruppe I.....	66
Abb. 6-9:	Porenradienverteilung Sandsteine Gruppe II	66
Abb. 6-10:	Porenradienverteilung im Ziegel	67
Abb. 7-1:	Experimentelle Anordnung zur kapillaren Lösungsaufnahme	70
Abb. 7-2:	Steighöhe z in Abhängigkeit der Zeit (Sander Sandstein)	71
Abb. 7-3:	Darstellung von t/z^2 in Abhängigkeit der Steighöhe z	72
Abb. 7-4:	Steighöhe z in Abhängigkeit der Zeit (Sander Sandstein)	73
Abb. 7-5:	Darstellung von t/z^2 in Abhängigkeit der Steighöhe z	73
Abb. 7-6:	Ermittelte Steigungen in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung... 74	
Abb. 7-7:	Experimentelle Anordnung des Trocknungsversuches	75
Abb. 7-8:	Trocknungsverlauf des Sander Sandsteins mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung als Porenlösung.....	76
Abb. 7-9:	Schematische Darstellung der vier Trocknungsperioden (Sander Sandstein)	76
Abb. 7-10:	Trocknungsverläufe für Rüthener Sandstein penetriert mit Wasser und 0,5 molarer Natriumsulfatlösung	78
Abb. 7-11:	Logarithmische Auftragung der Konzentration der Porenlösung im Ziegel über die Trocknungsdauer bei Penetration mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung (Startkonzentration).....	78

Abb. 7-12: Anteil der flüssigen Phase am Gesamtfeuchtetransport in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff bei Penetration der Probekörper (Ziegel) mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung	79
Abb. 7-13: Trocknungsverläufe des Sander Sandsteines unter verschiedenen Anfangs- und Randbedingungen	81
Abb. 7-14: Trocknungsverläufe des Rühthener und Wüstenzeller Sandsteines mit deionisiertem Wasser und 0,5 molarer Natriumsulfatlösung als Porenlösung (Klima: 25 °C, 40% r.F.).....	81
Abb. 7-15: Trocknungsverläufe des Wüstenzeller Sandsteines penetriert mit gesättigter Natriumchloridlösung bei 25 °C und 40 °C	82
Abb. 7-16: Trocknungsverläufe des Wüstenzeller Sandsteines penetriert mit gesättigter Natriumsulfatlösung bei 25 °C und 40 °C	83
Abb. 7-17: Anteil der flüssigen Phase am Gesamtfeuchtetransport in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff bei Penetration der Probekörper mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung	83
Abb. 7-18: Anteil des flüssigen Transportes am Gesamtfeuchtetransport in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes im Bauwerkstoff bei Penetration der Probekörper mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung	84
Abb. 7-19: Relative Trocknung der Probekörper in Abhängigkeit von der Zeit	85
Abb. 7-20: Anteil des flüssigen Transportes am Gesamtfeuchtetransport bei Penetration der Probekörper mit Natriumchlorid-Lösungen unterschiedlicher Konzentration.....	85
Abb. 7-21: Anteil des flüssigen Transportes am Gesamtfeuchtetransport bei Penetration der Probekörper mit gesättigter Natriumsulfatlösung bei unterschiedlichen Temperaturen	86
Abb. 7-22: Anteil des flüssigen Transportes am Gesamtfeuchtetransport bei der Trocknung des Sander Sandsteines penetriert mit gesättigter Natriumsulfatlösung bei unterschiedlichen Klimata (40% r.F., 25 °C und 60% r.F., 25 °C).....	87
Abb. 7-23: Darstellung des Kapillarsoges und des Schweredruckes für eine mit gesättigter Natriumsulfatlösung gefüllten Kapillare.....	89
Abb. 7-24: Experimentelle Anordnung des Versuches zur Konvektion	90
Abb. 7-25: Transportkoeffizienten bei 100 % Porensättigung mit 0,5 molarer Natriumsulfatlösung / deionisiertem Wasser.....	91
Abb. 7-26: Transportkoeffizienten bei 100 %Porensättigung mit 1,5 molarer Natriumsulfatlösung / deionisiertem Wasser.....	92
Abb. 8-1: Logarithmische Auftragung der Konzentration bzw. der Leitfähigkeit über die Zeit für eine mit 1,0 molarer Natriumsulfatlösung penetrierte Glasfilterplatte (Porosität 5)	96
Abb. 8-2: Konzentrationsabhängigkeit der gemessenen (aus der Literatur) und aus der Leitfähigkeit (aus der Literatur) bestimmten Diffusionskoeffizienten für Natriumchlorid und Natriumsulfat in der freien Lösung [57].....	97

Abb. 8-3:	Effektive Diffusionskoeffizienten 1 molare Natriumsulfatlösung im Sandstein (Bad Frankenhausen) ermittelt aus der Leitfähigkeit und der Ionenkonzentration.....	98
Abb. 8-4:	Experimenteller Aufbau der 2-Scheiben Anordnung.....	99
Abb. 8-5:	Einfluss unterschiedlicher Methoden zur Einstellung der relativen Feuchtesättigung auf die ermittelten relativen Diffusionskoeffizienten.....	100
Abb. 8-6:	Aufbau Messapparatur Impedanzspektrometer	101
Abb. 8-7:	Verwendetes Ersatzschaltbild	102
Abb. 8-8:	Beispiel eines Z_{arc}	102
Abb. 8-9:	Cole-Cole Exponent α in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes.....	105
Abb. 8-10:	Cole-Cole Exponent α in Abhängigkeit der Konzentration der Lösung.....	105
Abb. 8-11:	Cole-Cole Exponent α in Abhängigkeit der spezifischen inneren Oberfläche	106
Abb. 8-12:	Abhängigkeit des Formationsfaktors von der Konzentration der Porenlösung (NaCl).....	107
Abb. 8-13:	Probenleitfähigkeit λ_{eff} in Abhängigkeit der Leitfähigkeit der Penetrationslösung λ_{PI} (Natriumchloridlösung)	108
Abb. 8-14:	Diffusionskoeffizienten von Natriumsulfat in der Lösung und im Bauwerkstoff	112
Abb. 8-15:	Konzentrationsabhängige Tortuosität vom Obernkirchener Sandstein und der Glasfilterplatte (Porosität 5) bei Verwendung von Natriumsulfatlösung	112
Abb. 8-16:	Konzentrationsabhängige Tortuosität verschiedener Salze	113
Abb. 8-17:	Relative Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes am Beispiel des Seeberger und Vogelsberger Sandsteines	115
Abb. 8-18:	Porenradienverteilung nach Klassifizierung grob, mittel, fein der Sandsteine (Gruppe I).....	116
Abb. 8-19:	Porenradienklassifizierung des Ziegels (r) und (s).....	117
Abb. 8-20:	Relative Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes S_h im Bauwerkstoff	118
Abb. 8-21:	Relative Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes und verschiedener Konzentrationen der Porenlösungen	119
Abb. 8-22:	Tortuosität τ in Abhängigkeit der Temperatur bei Penetration der Glasfilterplatten mit 1,5 molarer Kaliumchloridlösung	120
Abb. 8-23:	Berechnete und gemessene Diffusionskoeffizienten in freier Lösung von Kaliumchlorid bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit der Konzentration der Lösung	121
Abb. 8-24:	Berechnete und gemessene Diffusionskoeffizienten von Kaliumchlorid bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung in GFP	122
Abb. 8-25:	Konzentrationsprofil des Natriumsulfates über die Probekörpertiefe	124
Abb. 8-26:	Schematische Darstellung des experimentellen Aufbaus der Untersuchungen zur Kompressenentsalzung.....	125
Abb. 8-27:	Natriumsulfatkonzentration über die Probekörpertiefe	125

Abb. 8-28: Konzentration der Porenlösung über die Probekörpertiefe unter Zugrundelegung des modifizierten Modells	126
Abb. 9-1: Schichtenmodell des Programms SPID	129
Abb. 9-2: Modifizierung des Systems	131
Abb. 9-3: Schematischer Programmablauf Simulation	132
Abb. 9-4: Konzentrationsprofil Natriumsulfat am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit Simulation verschiedener Versuchsdauern	133
Abb. 9-5: Konzentrationsprofil Natriumsulfat am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit Simulation verschiedener Kontaktflächenwiderstände	133
Abb. 9-6: Konzentrationsprofil Natriumsulfat am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit Simulation verschiedener Kontaktflächenwiderstände	134
Abb. 9-7: Schematischer Programmablauf Parameteridentifikation	135
Abb. 9-8: Parameteridentifikation am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit anschließender Simulation (Konzentrationsprofil Natriumsulfat)	136
Abb. 9-9: Parameteridentifikation am Beispiel der 2-Scheiben-Anordnung mit anschließender Simulation und Darstellung der Widerstandsschicht (Konzentrationsprofil Natriumsulfat)	136
Abb. 10-1: Vergleich der Effektivität des dreimaligen und einmaligen Kompressenauftrags	141
Abb. 10-2: Konzentration der Porenlösung im Probekörper über die Probekörpertiefe	142
Abb. 10-3: Schadsalzaustrag über die Zeit	143
Abb. 10-4: Prozentualer Feuchte- und Salzgehalt am Ende unterschiedlicher Kompressen-Standzeiten	144
Abb. 10-5: Darstellung der aus dem Sandstein entfernten Salzmenge in Abhängigkeit der Standzeit	145
Abb. 10-6: Feuchte- und Salzgehalt im Sandstein und in der Komresse nach zehn Tagen Entsalzungsdauer	145
Abb. 10-7: Prozentualer Feuchte- und Salzaustrag nach zehn Tagen Entsalzungsdauer	146
Abb. 10-8: Schadsalzaustrag bei Beaufschlagung des zu entsalzenden Ziegels mit einer dauernassen Kaolin-Cellulose-Sand-Komresse nach 21 Tagen Standzeit	147
Abb. 10-9: Schadsalzaustrag bei Beaufschlagung des zu entsalzenden Ziegels mit einer dauernassen Bentonit-Cellulose-Sand-Komresse nach 21 Tagen Standzeit	148
Abb. 10-10: Salzgehalt der Probekörper nach zehn Tagen Kompressenauftrag der Mischungen A und B auf dem Bucher und Obernkirchener Sandstein	150
Abb. 10-11: Prozentuale Schadsalzreduzierung im Bucher und Obernkirchener Sandstein nach 10 und 30 Tagen durch den Auftrag von Kompressenmischung A und B	150

Tabellenverzeichnis

Tab. 6-1:	Porositäten der verwendeten Bauwerkstoffe	65
Tab. 6-2:	Oberflächen der Bauwerkstoffe.....	68
Tab. 7-1:	Ermittelte Steigungen.....	74
Tab. 7-2:	Vergleich der Lösungseigenschaften z.B. Dichte, Viskosität und Gleichgewichtsfeuchte	80
Tab. 8-1:	Effektive Diffusionskoeffizienten 1 molare Natriumsulfatlösung im Sandstein (BF)	98
Tab. 8-2:	Spezifische Leitfähigkeit $\lambda_{\text{spez.}}$ des Obernkirchener Sandsteins bei unterschiedlicher Probekörperlänge mit 0,01 molarer Natriumsulfatlösung	104
Tab. 8-3:	Funktion der Probenleitfähigkeit λ_{eff} in Abhängigkeit der Lösungsleitfähigkeit.....	109
Tab. 8-4:	Ermittelte Formationsfaktoren verschiedener Sandsteine.....	110
Tab. 8-5:	Feuchteexponent der Thüringer Sandsteine	115
Tab. 8-6:	Klassifizierung der Porenradien	116
Tab. 8-7:	Feuchteexponenten des Ziegel (s) und (r) in Abhängigkeit der Konzentration der Porenlösung.....	119
Tab. 8-8:	Feuchteexponenten des Obernkirchener Sandsteins in Abhängigkeit der Art und Konzentration der Porenlösung.....	119
Tab. 8-9:	Ermittelte Koeffizienten des 2-Scheiben-Experimentes	124
Tab. 8-10:	Ermittelte Koeffizienten des Entsalzungsversuches	126
Tab. 9-1:	Widerstände der Kontaktfläche	134
Tab. 10-1:	Penetrationslösungen der Untersuchungen zur diffusiven Kompressenentsalzung.....	147
Tab. 10-2:	Transportkennwerte w und μ der Kompressenmischung A und B und der Sandsteine	149

Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen und Abkürzungen

Indizes

Lsg	in der Lösung
eff	bezogen auf den Bauwerkstoff
0	bezogen auf unendliche Verdünnung

Symbole und Konstanten

A	Fläche
c	Konzentration
c_a, c_0	Anfangskonzentration
c_e, c_{num}	Endkonzentration
D	Diffusionskoeffizient
D_{eff}	effektiver Diffusionskoeffizient im Bauwerksstoff
D_{Lsg}	Diffusionskoeffizient in freier Lösung
E_A	Aktivierungsenergie
f	Massenkraft
F	Formationsfaktor
F	Faraday-Konstante
h	Höhe
J	Fluss
k	Boltzmann-Konstante
L	(charakteristische) Länge
L_{ij}, L_{ji}	Lineare phänomenologische Koeffizienten
p_c, p_k	Kapillardruck
p	Druck
R	allgemeine Gaskonstante, elektrischer Widerstand
R_{eff}	Widerstandskoeffizient an der Kontaktfläche
r_k	Kapillarradius
S	Oberfläche
S_i	innere Oberfläche
S_h	Feuchtesättigung
T	Temperatur
t	Zeit

u, v	Geschwindigkeit
V	(Kontroll-) Volumen
w	Wasseraufnahmekoeffizient
X_i	Thermodynamische Kraft
z	Ionenwertigkeit
ϵ	Porosität
η	dynamische Viskosität
φ	Relative Luftfeuchte
$\lambda_{\text{eff}}, \lambda_{\text{spez}}$	spezifische Probekörperleitfähigkeit
λ_{eq}	Äquivalentleitfähigkeit
λ_{PI}	Porenlösungsleitfähigkeit
λ_{g}	Grenzflächenleitfähigkeit
μ	Dampfdiffusionswiderstandszahl
ν	kinematische Viskosität
θ	Rand- bzw. Kontaktwinkel
ρ	Dichte
σ	Oberflächenspannung
σ_{a}	Quellen- und Senkenterm
σ_{e}	Entropieproduktion
σ_{eff}	Probekörperleitfähigkeit
σ_{Lsg}	Lösungsleitfähigkeit
τ	Tortuosität

Allgemeine Abkürzungen

CPE	Constant Phase Element
GGF	Gleichgewichtsfeuchte
GFP	Glasfilterplatte
M	molar

