

**Inhaltsverzeichnis**

**Zusammenfassung**

**Stefan Kiencke**

**Beanspruchungsmechanismen und  
kritischer Gehalt von Salzen in  
porösen Materialien**

**ISBN 3-89863-214-6**

**GCA-Verlag**  
**[www.gca-verlag.de](http://www.gca-verlag.de)**

Forschen und Wissen - Bauwesen

**Stefan Kiencke**

**Beanspruchungsmechanismen und kritischer  
Gehalt von Salzen in porösen Materialien**

D 830 (Diss. Technische Universität Hamburg-Harburg)

**GCA-Verlag  
Waabs 2006**

**Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

Copyright GCA-Verlag, Waabs 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1618-7873

ISBN 3-89863-214-8

GCA-Verlag der GCA mbH, Brunoslust 44, D 24369 Waabs  
Telefon 04352/911464 - Telefax 04352/911532  
Internet: [www.gca-verlag.de](http://www.gca-verlag.de) - eMail: [info@gca-verlag.de](mailto:info@gca-verlag.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Salze und deren Zustandssysteme</b> .....	<b>5</b>
2.1	Gleichgewicht zwischen Kristall und Lösung - Löslichkeiten.....	5
2.2	Keimbildung und Kristallisation von Salzen.....	7
2.3	Grenzflächenenergie zwischen Kristall(keim) und Lösung.....	10
2.4	Hygrisches Verhalten von Salzen – Gleichgewichtsfeuchte.....	12
2.5	Hydratsalze und deren Phasenumwandlungen.....	15
2.5.1	Das System Natriumsulfat – H <sub>2</sub> O.....	16
2.5.2	Das System Calciumsulfat - H <sub>2</sub> O .....	21
<b>3</b>	<b>Literaturübersicht zu Schadensmechanismen und Drücken von Salzen in porösen Systemen</b> .....	<b>24</b>
3.1	Literaturübersicht zum Phänomen des Kristallisationsdruckes .....	24
3.2	Ansätze aus der Literatur zu Schadensmechanismen und Drücken von Salzen in porösen Systemen.....	25
3.3	Bewertung bestehender Theorien und eigene Ansätze .....	27
3.3.1	Volumenänderungen bei Phasenumwandlungen von Salzen .....	27
3.3.1.1	Hydrostatischer Kristallisationsdruck.....	27
3.3.1.2	Hydratationsdruck.....	30
3.3.2	Der Lineare Kristallisationsdruck .....	32
3.4	Schlussfolgerungen zu den bestehenden Theorien .....	35
3.5	Experimentelle Ermittlung des Kristallisationsdruckes in der Literatur .....	35
3.6	Beanspruchung eines Porensystems durch Kristallisation – Beispiele in der Literatur .....	37
<b>4</b>	<b>Maximal mögliche Beanspruchung durch Kristalle</b> .....	<b>40</b>
4.1	Thermodynamische Beschreibung von Kristallen unter Druck.....	40
4.2	Grenzflächeneffekte in der Kontaktzone des Kristalls .....	43
4.3	Mechanische Stabilität eines Salzkristalls unter Druck .....	44
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b> .....	<b>45</b>
5.1	Übersicht der verwendeten Materialien .....	45
5.2	Übersicht der in den Versuchen verwendeten Salze.....	47
5.3	Übersicht der experimentellen Untersuchungen .....	47
5.4	Salzsprengeversuche mit Natriumsulfat.....	48
5.4.1	Versuchsbeschreibung der Natriumsulfatstrengtests .....	48
5.4.2	Der Mechanismus des Salzsprengetests .....	49
5.4.3	Salzsprengetest nach DIN EN 12370 .....	51
5.4.4	Modifiziertes Verfahren mit Gefriertrocknung .....	51
5.4.5	Salzsprengeversuche in hoher relativer Luftfeuchte.....	53
5.4.6	Salzsprengeversuche mit paralleler Dehnungsmessung.....	54
5.4.7	Bewertung der Ergebnisse .....	56
5.5	Salzakkumulationsversuche unter hydrophobierter Zone .....	57
5.6	Beschreibung der Salzakkumulationsversuche.....	59
5.6.1	Ergebnisse der Salzakkumulationsversuche .....	63

---

5.6.2	Zusammenfassende allgemeine Bewertung der Ergebnisse.....	69
5.7	Dehnungsmessungen an Ziegeln bei Kristallisation.....	71
5.7.1	Dehnungsmessungen an lösungsdotierten Ziegeln während der Trocknung.....	72
5.7.2	Dehnungsmessungen salzdotierter Ziegel in wechselnden Feuchten.....	75
5.7.3	Dehnungsmessungen in der Differenz-Temperaturanlage.....	80
5.7.3.1	Versuchsbeschreibung der Differenz-Temperaturanlage.....	80
5.7.3.2	Versuchsergebnisse - Kaliumnitrat.....	84
5.7.3.3	Versuchsergebnisse bei Dotierung mit Natriumsulfat.....	88
5.7.4	Bewertung der Ergebnisse aus der Differenz-Temperaturanlage .....	90
<b>6</b>	<b>Beanspruchungsszenarien und Schädigungsprozesse.....</b>	<b>93</b>
6.1	Kristallisation innerhalb eines lösungsgefüllten Porensystems .....	94
6.1.1	Kristallisation infolge Temperaturänderung einer Lösung.....	96
6.1.2	Kristallisation infolge Lösungsmittelverdunstung bei gleichzeitigem Lösungsnachschub.....	97
6.2	Kristallisation im Porensystem bei Lösungsmittelentzug ohne Lösungsnachschub .....	98
<b>7</b>	<b>Rechnerische Simulation der Beanspruchung und Ermittlung eines kritischen Salzgehaltes.....</b>	<b>101</b>
7.1	Simulationsrechnungen und Beanspruchungsmodelle in der Literatur .....	101
7.2	Eigenes Modell zur rechnerischen Simulation der Beanspruchung .....	102
7.3	Abbildung des Porensystems für die rechnerische Simulation.....	104
7.4	Anzahl und Verteilung der Kristallkeime im Porensystem .....	107
7.5	Algorithmus der rechnerischen Simulation .....	109
7.6	Vergleich zwischen Versuchsergebnissen und den Ergebnissen der rechnerischen Simulation .....	114
7.6.1	Der thermodynamische Gleichgewichtsdruck und der wirksame Druck .....	114
7.6.2	Rechnerische Simulation der Differenztemperatur-Versuche.....	118
7.6.2.1	Rechnerische Simulation der Versuche mit Kaliumnitrat.....	118
7.6.2.2	Rechnerische Simulation der Versuche mit Natriumsulfat .....	121
7.6.2.3	Bewertung der rechnerischen Simulation der Versuche .....	122
7.7	Sensitivitätsanalyse zum Beanspruchungsmodell.....	123
7.7.1	Einfluss der Anzahl der Porenklassen .....	124
7.7.2	Einfluss der Porenradienverteilungen und Porenform über Verhältnis L/D .....	125
7.7.3	Einfluss des Porenfüllungsgrades mit Lösung.....	127
7.7.4	Keimbildungsanzahl.....	128
7.8	Bewertung des Beanspruchungsmodells .....	129
7.9	Abschätzung eines kritischen, schädigungsauslösenden Salzgehaltes.....	130
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>134</b>
<b>9</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>138</b>

## **„Beanspruchungsmechanismen und kritischer Gehalt von Salzen in porösen Materialien“**

In der Praxis treten an porösen Materialien wie beispielsweise Natursteinen oder Ziegeln häufig Bauschäden auf, die in Verbindung mit Salzen entstehen.

Bisher sind für die Zerstörung baukeramischer poröser Materialien folgende drei Schädigungsmechanismen verantwortlich gemacht worden: Der *Hydrostatische Kristallisationsdruck* infolge Volumenzunahme bei Kristallisation aus einer übersättigten Lösung, der *Hydratationsdruck* als Folge einer Volumenzunahme beim Übergang eines Salzes in eine höhere Hydratstufe, und der *lineare Wachstumsdruck* aus dem gerichteten Wachstum eines Kristalls gegen ein begrenzendes Hindernis.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte anhand einer genauen Betrachtung der hier genannten Phänomene sowie zahlreicher Versuchsreihen herausgearbeitet werden, dass in der Praxis nur der lineare Wachstumsdruck als schadensrelevant zu betrachten ist. Der hydrostatische Kristallisationsdruck kann aufgrund sehr geringer Volumenänderungen nicht maßgebend sein. In Versuchen konnte zudem belegt werden, dass die Hydratation der untersuchten Salze über die Lösungsphase abläuft, so dass die Kristallisation des Hydrates einen linearen Wachstumsdruck erzeugen kann, aber damit keinen eigenständigen Schädigungsmechanismus darstellt.

Um schädigungsauslösende „kritische Salzgehalte“ zu bestimmen, wurden in experimentellen Untersuchungen Ziegelproben sowie Proben eines selbst hergestellten Modellwerkstoffes unter definierten Bedingungen so lange mit unterschiedlichen Salzen beaufschlagt, bis ein Versagen eintrat. Die so ermittelten Gehalte lagen je nach Salz und Material zwischen 2 und 6 Gew.-% und entsprechen Porenfüllungsgraden zwischen 15 und 65%. Die Versagenskonzentration eines Salzes hängt neben dem Material auch von den Umgebungsbedingungen ab, was zeigt, dass es keinen allgemeingültigen „kritischen Salzgehalt“ gibt.

In weiteren Versuchen wurden Probekörper mit Salzlösung beaufschlagt, wofür Salze verwendet wurden, deren Löslichkeit stark temperaturabhängig ist. Durch eine definierte Abkühlung in einem temperierbaren Bad in Verbindung mit einer präzisen Messung der Probentemperatur konnte der Zeitpunkt der Kristallisation durch die freiwerdende Kristallisationswärme bestimmt werden. Anhand der so gewonnenen Daten wurde die zu jedem Zeitpunkt gebildete kristalline Salzmenge berechnet. Parallel wurde die Probendehnung mittels Dehnungsmessstreifen aufgezeichnet, so dass ein Zusammenhang zwischen Kristallmenge und der daraus verursachten Verformung hergestellt werden konnte. Anhand der gewonnenen Versuchsdaten ist ein Beanspruchungsmodell entwickelt worden, mit dem sich aus den innerhalb eines Porensystems wirkenden mikroskopischen Kristallisationsdrücken eine makroskopische Schnittspannung berechnen lässt. Die für die rechnerische Simulation fehlenden bzw. unbekannt Parameter wurden mithilfe der Messergebnisse aus den Versuchen angepasst. Der Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und der rechnerischen Simulation lieferte eine gute Übereinstimmung. Eine anschließend durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass insbesondere die Anzahl und Verteilung der im Porensystem gebildeten Kristallkeime einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Belastung hat.

Die mithilfe dieses Modells berechneten kritischen Salzgehalte liegen im Bereich von 1 – 5 Gew.-% und damit in der Größenordnung der im Versuch ermittelten Versagenskonzentrationen bzw. Werten, wie sie bei salzgeschädigten Bauwerken vorzufinden sind.