Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

Diplomarbeit

Master´s Thesis

zum Thema

Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Kalksandstein nach Injektion

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. DDr. Jürgen Dreyer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Clemens Hecht

E 206

Institut für Hochbau und Technologie

Zentrum für Bauphysik und Bauakustik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Petra Reinthaler

E 611 / 9925306

2084 Weitersfeld, Obermixnitz 7

Wien, im Mai 2005

Meinen Eltern, meiner Familie und Freunden gewidmet,
die mich in jeder Phase meines Studiums unterstützt haben.

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern des Instituts für Hochbau und Technologie - Zentrum für Bauphysik und Bauakustik an der technischen Universität Wien, unter der Leitung von Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. DDr. Jürgen Dreyer.
Besonderer Dank gilt meinem Diplomarbeitsbetreuer Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Clemens Hecht für die Unterstützung und Hilfestellung bei der Entstehung dieser Arbeit.

Desweiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts der Technologie der Baustoffe und Fertigteile, Fakultät für Bauwesen an der technischen Universität Brno herzlich bedanken. Im Rahmen meines Auslands-Semesters wurde mir unter der Leitung von Doc. RNDr. Ing. Stanislav Šťastník, CSc. die Möglichkeit geboten, in deren Labor zu arbeiten und fachliche Unterstützung und Hilfestellung jederzeit in Anspruch zu nehmen.

Zusätzlich möchte ich mich bei Herrn DI Ernst Illetschko für die Unterstützung und Motivation während meines ganzen Studiums herzlich bedanken.

Abstract

Refurbishments and renovations of buildings raise their importance with regard to building practice. The refurbishment of masonry, which is affected by capillary rising humidity, can be carried out with an additional horizontal moisture barrier. Therefore certain compounds are injected into the masonry, one of them is paraffin. Heated up, liquid paraffin is brought into the building material and fills its pores, to produce a capillary breaking layer.

The purpose of this thesis is the survey and judgement of effects concerning the durability of lime sand stone, caused by the injection with paraffin.

The first step is to analyse the materials lime sand stone and paraffin, with regard to their properties, conduct and use. Effects to the materials are assessed in order to choose several test procedures. Within these investigations, lime sand stones with different moisture conditions are used before they are treated with paraffin. Additionally, several ways to apply paraffin are tested.

Afterwards the specimens are put into water to raise moisture with capillary power. During this water burdening, changes of appearance and weight are observed and documented. After the minimum of 56 days in water, the specimens are tested with different procedures. Used procedures are electronic microscope, raster electron microscope, mercury intrusion porosimetry and differential thermal analysis.

At first results of the experiments are compared within the various test procedures. In the next step the system between pretreatment and appearance of damage will be attempted. The identification of causes for damages is limited to possible theories and reasons for connected effects. Furthermore, ideas and alternative experiments are mentioned.

Kurzfassung

In der Baupraxis gewinnen Sanierungen und Instandhaltungen von Bauwerken in zunehmenden Maß an Bedeutung. Bei aufsteigender Feuchtigkeit werden Sanierungen häufig durch die Herstellung einer nachträglichen Horizontalabdichtung durchgeführt. Diese Abdichtungsebene kann durch die Einbringung von Injektionsstoffen, unter anderem Paraffin, erreicht werden. Bei der Methode der Paraffininjektion dringt erwärmtes, flüssiges Paraffin in den Baustoff ein, schließt dessen Poren und erzeugt somit eine kapillarbrechende Schicht.

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Untersuchung und Beurteilung von Auswirkung einer Injektion mit Paraffin auf die Dauerhaftigkeit des Baustoffes Kalksandstein.

Der erste Teil beschäftigt sich mit den Materialien Kalksandstein und Paraffin, deren Eigenschaften, Verhalten und deren Verwendung. Es folgt eine Abschätzung der Auswirkungen einer Injektion von Paraffin in Kalksandstein und der damit verbundenen Veränderungen der Materialien, um sinnvolle Prüfmethoden zur Untersuchung der Probekörper wählen zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen werden Kalksandsteinproben unterschiedlicher Ausgangsbedingungen, bezogen auf Feuchtegehalt oder Temperaturbehandlung, mit Paraffin behandelt. Zusätzlich kommen bei der Art der Paraffineinbringung verschiedene Methoden zur Anwendung.

Anschließend werden die Proben einer kapillaren Wasseraufnahme unterzogen, Veränderungen, wie Aussehen und Gewichtszunahme, beobachtet und dokumentiert. Nach einer Wasserbelastung von mindestens 56 Tagen werden die Proben mit Hilfe zuvor ausgewählter Verfahren untersucht. Zur Anwendung kommen elektronisches Mikroskop, Raster-Elektronen-Mikroskop, Quecksilberporosimetrie, Röntgendiffraktometrie und Differential-Thermo-Analyse.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind zunächst innerhalb der Versuchsmethode gegenübergestellt und miteinander verglichen. Folglich wird versucht eine Systematik bzw. Zusammenhänge zwischen Vorbehandlung und Schadensbild herauszuarbeiten.

Die Identifizierung der Schadensursache beschränkt sich auf mögliche Theorien und Gründe für das Zusammenspiel mehrerer Ursachen. Weiters werden Vorschläge für nähere Untersuchungen genannt.

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung **1**

2 Einleitung, Grundlagen **2**

2.1 Allgemein . . . 2
2.2 Kalksandstein (KS) . . . 7
2.2.1 Verwendung . . . 7
2.2.2 Herstellung . . . 7
2.2.3 Materialeigenschaften . . . 8
2.3 Paraffin . . . 10
2.3.1 Paraffin im Bauwesen . . . 10
2.3.2 Paraffininjektion . . . 11
2.4 Schäden mit Sanierungsbaustoffen am Kalksandstein . . . 13
2.5 Verwendete Prüfmethoden . . . 14
2.5.1 elektronisches Mikroskop . . . 14
2.5.2 Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) . . . 14
2.5.3 Quecksilber-Porosimetrie . . . 16
2.5.4 Röntgendiffraktometrie (XRD) . . . 17
2.5.5 Differential-Thermoanalyse (DTA) . . . 17

3 Versuchsvorbereitungen **18**

3.1 Unterschiedliche Anfangsbedingungen . . . 18
3.2 Probengeometrie . . . 21
3.3 Probenherstellung . . . 22
3.3.1 Feuchtigkeitsgehalt vor der Paraffinaufnahme . . . 22
3.3.2 Art der Paraffinaufnahme . . . 23
3.3.3 Vergleich der Feuchte- und Paraffingehalte . . . 24

4 Versuchsdurchführung **26**

4.1 Wasserlagerung . . . 26
4.2 Saugrichtung . . . 26

4.3 Beobachtungen 28
4.3.1 Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen bei 80°C 28
4.3.2 Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen bei 120°C 30
4.3.3 Saugen mit Temperaturgradient 80°C 32
4.3.4 Saugen mit Temperaturgradient 120°C 35
4.3.5 Vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 80°C 37
4.3.6 Vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 120°C 40
4.4 Weiterführende Versuche 44
4.4.1 Injektion mit Silikonmikroemulsion 44
4.4.2 Einfluss der Trockungstemperatur 45
4.4.3 Variation der kapillaren Saughöhen 45

5 Versuchsauswertung **52**
5.1 Allgemein 52
5.2 Vergleich der Schadensbilder 52
5.2.1 Massenzunahme durch Wasserlagerung 54
5.2.2 Elektronisches Mikroskop 62
5.2.3 Raster-Elektronen-Mikroskop 64
5.2.4 Quecksilber-Porosimetrie 67
5.2.5 Röntgendiffraktometrie 69
5.2.6 DTA 70
5.3 Identifizierung der Schadensursache 73
5.3.1 Veränderung der Porenstruktur 73
5.3.2 Verseifung 73
5.3.3 Modifikation der CSH-Phasen 74

6 Zusammenfassung **76**

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen von Sanierungen zur Verhinderung von aufsteigender Mauerwerksfeuchtigkeit wird seit Jahren erfolgreich die thermisch induzierte Injektion von hinreichend erwärmten Paraffinen angewendet. Es handelt sich dabei um ein patentiertes Verfahren, welches den gültigen Merkblättern und Anforderungen verschiedenster Gremien, Ausschüssen u.ä. entspricht.
Schadensfälle sind z.Zt. nur vereinzelt und in Zusammenhang mit industriell hergestelltem Kalksandstein bekannt. Diese Arbeit widmet sich somit nur entsprechend produzierten Kalksandsteinen. Die Schäden treten im Übergangsbereich zwischen dem penetrierten und dem nicht penetrierten Material bzw. im penetrierten Material in Form von Rissen auf.
Nach dem aktuellen Stand der vorbereitenden Untersuchungen zu dieser Arbeit konnte nicht geklärt werden, welcher bzw. welche Prozesse die Schadensursache für die Schädigungen darstellen. Jedoch konnte bereits ein Zusammenhang zum vor der Injektion vorhandenen Feuchtigkeitsgehalt im Kalksandstein festgestellt werden.
Im Rahmen dieser Arbeit sind vorhandene Schadensbilder zu beschreiben, Möglichkeiten der Schadensbegrenzung von paraffinierten Kalksandstein zu bestimmen und wenn möglich, die Schadensursache(n) zu benennen.
Zu berücksichtigen ist, ob in der Literatur Schadensfälle mit anderen Injektionsstoffen bekannt sind und wie diese verhindert werden.

Die Untersuchungen teilen sich in zwei wesentliche Teile.
A) Im ersten Schritt erfolgt die Beurteilung der Grenzen für die Dauerhaftigkeit, d.h. wann und unter welchen Bedingungen tritt ein Schaden ein. Dabei ist die Paraffinaufnahme unter verschiedenen Randbedingungen zu variieren. Anschließend erfolgt analog dem realen Bauwerk die Wasseraufnahme durch kapillares Saugen in das mit Paraffin zuvor behandelte Material. Die anschließenden Veränderungen sind zu dokumentieren und systematisch zusammenzustellen.
B) Der zweite Schritt dient der Identifizierung der Schadensursache, d.h. was bewirkt die eingetretenen Schäden. Die anzuwendenden Messmethoden sind im Vorfeld auszuwählen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein Zusammenspiel mehrerer Ursachen zu den Schäden führt, so dass alle erkannten Möglichkeiten Betrachtung finden sollen.

2 Einleitung, Grundlagen

2.1 Allgemein

Erhöhte Feuchtigkeit des Baustoffes ist oft Ursache für unterschiedlichste Schadensprozesse, die Wirkungsmechanismen zur Beeinträchtigung der Nutzung und Funktionalität der Bausubstanz hervorrufen. Diese Schadensprozesse können unterschieden werden in physikalische, chemische und biologische Wirkungen.

Physikalische Prozesse entstehen durch Temperatureinflüsse, mechanische oder stoffliche Belastungen. Durch Vorhandensein der Feuchtigkeit verändert sich der Charakter dieser Prozesse und bewirkt zusätzlich Belastungen, wie Quellen und Schwinden, Phasenübergänge, Lösungs- und Kristallisationsvorgänge. Neben den erhöhten Belastungen werden auch physikalische Eigenschaften der Baustoffe beeinflußt.
Eindringende Feuchtigkeit kann darüber hinaus eine Reihe *chemische Prozesse* auslösen. In der Umwelt oder im Baustoff befindliche Schadstoffe können gelöst und transportiert werden. Erhöhte Konzentrationen führen zu chemischen Prozessen, die zu Festigkeitsverlusten der Bausubstanz, Ausblühungen und Abplatzungen führen.
Biologische Prozesse werden durch Bakterien, Algen, Flechten und Bewuchs hervorgerufen. Diese können nur auftreten, wenn die Lebensbedingungen durch einen bestimmten kritischen Feuchtigkeitsgehalt gegeben sind.

Auch wenn durch die genannten Prozesse keine sichtbaren Schäden auftreten, wird durch erhöhte Bauteilfeuchtigkeit die Behaglichkeit und Gesundheit für Menschen durch verschlechterte Wärmedämmwirkung des Baustoffes und höhere Luftfeuchtigkeit im Bauwerk negativ beeinflußt.

Ein häufiger Transportmechanismus von Wasser in Bauteile ist vom Erdreich aufsteigende Feuchtigkeit, welche durch Kapillarkräfte zustande kommt. Der Eintritt der Feuchtigkeit in das Mauerwerk kann durch vertikale oder horizontale Sperren verhindert werden. Wenn diese Abdichtung nicht vorhanden ist und dadurch Schäden auftreten, gibt es verschiedene Arten nachträglich zu sanieren. Unterschieden wird die Verringerung der Feuchtigkeitsbelastung durch Entwässerung, Temperieren,

Entlüftungsschächte, Drainage und Mauerwerkstrockenlegung, bei der nach [Dre03a] drei Verfahren zur Anwendung kommen:

- Mechanische Verfahren
  Die Wirkung basiert auf dem nachträglichen Einbau einer Abdichtungsebene. Häufig wird Mauerwerk durch dichtes Material ersetzt, beispielsweise durch Einlegen einer Sperrschicht in einen Sägeschlitz, Eintreiben von Edelstahlblechen, Verfüllen von Schlitzen oder Bohrlöchern.

- Elektrophysikalische Verfahren
  In einer wassergefüllten Kapillare kommt es in der Regel zu einer Ladungstrennung. Die Porenwand trägt die negative Ladung, die durch die positiv geladenen Ionen der Flüssigkeit kompensiert werden. Dadurch bildet sich ein Strömungspotential aus und das Wasser fließt in Richtung Kathode. Nachteile dieser Methode sind, dass die Spannung ständig aufrechterhalten werden muss und der hohe Wartungsaufwand, um das Mauerwerk vor einer neuerlichen Durchfeuchtung zu schützen [Dre03a]. Anwendungsgrenzen bilden Mauersalze, die den Wirkungsgrad des Verfahrens herabsetzen, und elektrisch leitfähige Einbauteile, an denen Korrosionserscheinungen auftreten [B33].

- Injektionsverfahren
  Bei den üblichen Injektionstechniken, wie Nachfüllverfahren, Behälterverfahren, Druckverfahren und Impuls/Sprühverfahren, werden Injektionsstoffe verwendet, die nach ihren Wirkprinzipien zu unterscheiden sind in:
  porenverschließende Systeme, bei denen die eingebrachten Mittel oder im Mauerwerk gebildeten Reaktionsprodukte die Kapillarporen der porösen Baustoffe verschließen;
  porenverengende Systeme, wobei die Injektionsstoffe den Porenquerschnitt verengen und somit das kapillare Saugvermögen herabsetzen;
  hydrophobierenden Systemen, die mit Kapillardepression der aufsteigenden Feuchtigkeit entgegenwirken;
  Kombinationssytemen,die die Wirkungsweisen der porenverengenden und der hydrophobierenden Systeme verbindet [B33].
  Diese Wirkungen können durch ein- oder mehrkomponentige, chemisch reagierende oder physikalisch härtende Injektionsstoffe erreicht werden. Basis für einen Injektionsstoff kann nach [WTA04] sein:
  Paraffin - hydrophobierend und porenverschließend;
  Polyacrylgel - porenverschließend und hydrophobierend;
  Silikonat - hydrophobierend;
  Alkalisilikat / Alkalimethylsilikonat - hydrophobierend;

Silikonmikroemulsion - hydrophobierend;
Siloxan - hydrophobierend;
Polyurethanharz - porenverschließend und hydrophobierend;
Epoxidharz - porenverschließend und hydrophobierend.

Unterschieden wird weiters in drucklose Injektion und Druckinjektion.
Für die *drucklose Injektion* eigenen sich niedrigviskose Injektionsstoffe, wie zum Beispiel Silikonate, Silane, Silikonmikroemulsion und hinreichend erwärmte Paraffine. Die Verteilung im Baustoff erfolgt ausschließlich über Kapillarkräfte. Der maximale Bohrlochabstand muss in Abhängigkeit von der Saugfähigkeit gewählt werden und darf 10 bis 12,5 cm nicht überschreiten. Der Durchmesser und die Schräglage hängen von der Wahl des Verfahrens ab.
Bei *Druckinjektion* wird maschinell ein Druck zur Verteilung des Injektionsstoffes im Baustoff erzeugt. Die Bohrlochanordnung kann ein- oder mehrreihig versetzt sein. Der Abstand der Bohrlochachsen (max. 10 - 12,5 cm) und die Neigung der Bohrkanäle wird je nach Verfahren festgelegt.
Vorbereitend für die Injektion können die Bohrlöcher gereinigt und anschließend mit elektrischen Heizstäben getrocknet werden. Dadurch wird die kapillare Saugfähigkeit des Materials wiederhergestellt und man erzielt bessere Erfolge.

In Abbildung 2.1 nach [Hau02][Vol03] werden die verschiedenen Feuchtigkeitsbereiche im Mauerwerk vor, während bzw. nach einer Injektion ersichtlich. Diese Betrachtung kann ausschlaggebend für die Wahl des Injektionsstoffes und zur Beurteilung der Wirkungsweise der Abdichtungsebene sein.

Der Fall (A) stellt das Mauerwerk im trockenen Zustand dar. Die aufsteigende Feuchte im Baustoff wird in Phase (B) deutlich. Das Ergebnis der Injektion ist ein dichter Horizont in der Wand. (C1) stellt die Injektion in das feuchte Mauerwerk dar, im Fall (C2) wird vor der Injektion eine Mauerwerkstrocknung vorgenommen. Nach dem erfolgreichem Abschluss der Sanierung stellt sich im Laufe der Zeit der Zustand (D) im Mauerwerk ein.

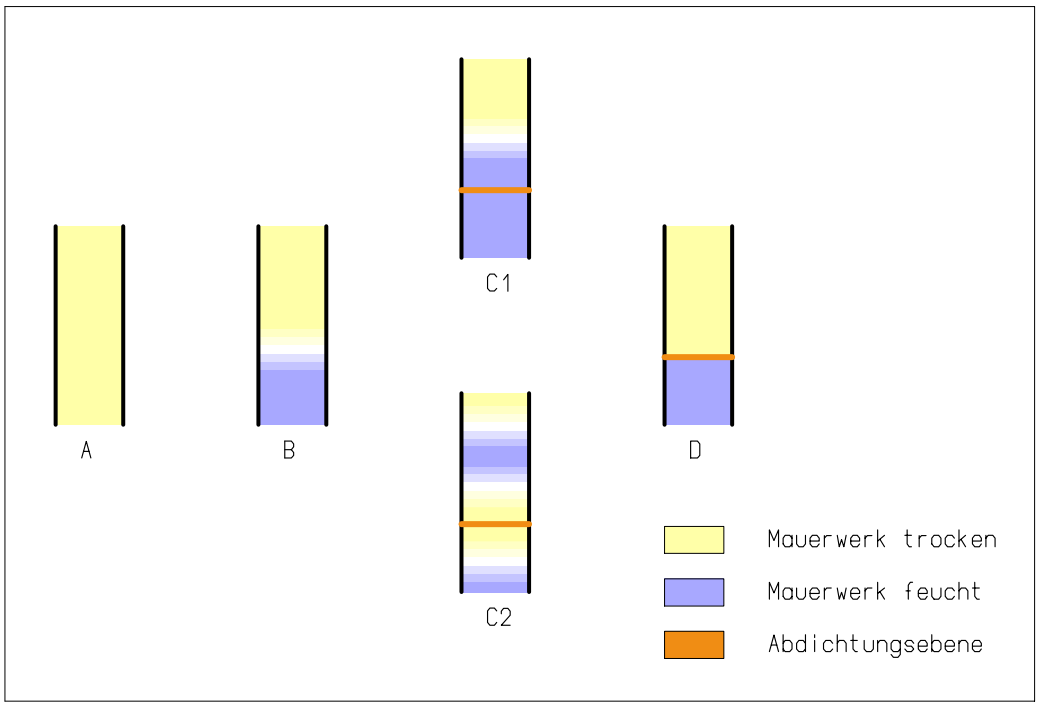

Abbildung 2.1: Feuchteverteilung nach Injektion

Bei einer Sanierung gegen aufsteigende Feuchtigkeit durch Injektion wird das Mauerwerksmaterial durch den Injektionsstoff chemisch und physikalisch beeinflußt. Das Material erfährt Änderungen in seinen Eigenschaften:

- Porenraum;
- Wasseraufnahme;
- Wasserdampfdiffusion;
- Wärmeleitfähigkeit;
- thermische und hygrische Längenänderung;
- Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit.

Die Beeinflussung der Festigkeit ist von mehreren Faktoren abhängig, einerseits von der Festigkeit des Injektionsstoffes und andererseits von der Eigenfestigkeit des behandelten Materials. Die Auswirkung fällt bei festen Material geringer aus, als bei einem Baustoff mit geringer Festigkeit. Ein weiterer Faktor ist die Wirkung des Injektionsstoffes. Bei porenverschließenden oder -verengenden Injektionsstoffen ist eine Erhöhung der Festigkeit festzustellen, da die zuvor luftgefüllten Poren sich nach der Injektion nur erschwert zusammendrücken lassen. Im Fall von Zug- und Biegezugspannungen wirkt sich die Verklebung festigkeitserhöhend aus.

Über Eigenschaftsänderungen in Porenräumen gibt [Maj04] Auskunft. Die Arbeit [Sau00] beschäftigt sich mit mechanischen und thermischen Materialeigenschaften von Baustoffen nach Paraffinbehandlung. [Hau02] erläutert die Auswirkungen von Injektionsstoffen auf die thermische Längenänderung einzelner Baustoffe, wo festgestellt wurde, dass sich besonders Paraffin wesentlich auf die Wärmedehnung auswirkt.
In [Vol03] wird die hygrische Längenänderung untersucht. Die Vermutung, dass durch reduzierte Wasseraufnahme nach Injektion die hygrischen Längenänderungen der Baustoffe verringert werden, kann nicht in allen Fällen bestätigt werden. Die hygrische Längenänderung ist abhängig vom untersuchten Material und verwendeten Injektionsstoff. Auffallend hoch mit $\varepsilon_H = 2{,}35$ mm/m war der Meßwert der hygrischen Dehnung bei Kalksandstein nach Paraffininjektion. Dieses Ergebnis hat dazu veranlasst, Kalksandstein nach Paraffininjektion näher zu untersuchen und mögliche Ursachen der Eigenschaftsänderungen aufzufinden. Vorerst werden die Materialien Kalksandstein und Paraffin vorgestellt und bezüglich ihrer Eignung als Baumaterialien und in Zusammenhang mit Mauerwerksinjektion betrachtet.

2.2 Kalksandstein (KS)

2.2.1 Verwendung

Kalksandsteine finden in Österreich kaum Anwendung, in Deutschland hingegen sind sie weit verbreitet. 1880 wurde ein Patent zur Erzeugung von Kalksandsteinen erteilt. Die Formgebung durch Pressen und die Hochdruckdampferhärtung ermöglichten Ende des letzten Jahrhunderts eine industrielle KS-Produktion.
Der Kalksandstein ist ein Mauerstein und den Ziegeln ähnlich. Er wird in mehreren Arten mit entsprechend unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt. Kalksandsteine werden für tragendes und nichttragendes Mauerwerk vorwiegend zur Erstellung von Außen- und Innenwänden verwendet. Die Steinarten gehen von Vollsteinen, Lochsteinen, Hohlblocksteinen bis hin zu Bauplatten, Planelementen, Verblender und Vormauersteinen.

2.2.2 Herstellung

Kalksandsteine sind ein Produkt aus den natürlichen Rohstoffen Kalk und kieselsäurehältigen Zuschlägen (quarzhaltiger Feinsand). Diese Komponenten werden nach innigem Mischen verdichtet, geformt und unter Dampfdruck erhärtet. Kalksandsteine werden nach der DIN 106 hergestellt und die Zuschlagsarten sollen der DIN 4226 Teil 1, bzw. Teil 2 entsprechen.[CDL$^+$94]
Die wesentlichen Stationen der Kalksandstein(KS)-Produktion sind nach [CDL$^+$94]:

1. Kalk und Sand werden in Silos gelagert und nach dem Gewicht dosiert. Die Rohstoffe werden im Mischungsverhältnis Kalk:Sand = 1:12 intensiv miteinander gemischt und über eine Förderanlage in einen Reaktionsbehälter geleitet.

2. Im Reaktionsbehälter löscht der Branntkalk zu Kalkhydrat ab.

3. Mit vollautomatisch arbeitenden Pressen werden die Steinrohlinge geformt.

4. Es folgt das Härten der Rohlinge unter geringem Energieaufwand bei Temperaturen von 160 bis 220°C unter Sattdampfdruck etwa vier bis acht Stunden. Beim Härtevorgang wird durch die heiße Dampfatmosphäre Kieselsäure von der Oberfläche der Sandkörner angelöst. Die Kieselsäure bildet mit dem Bindemittel Kalkhydrat kristalline Bindemittelphasen - die CSH-Phasen - die auf die Sandphasen aufwachsen und diese fest miteinander verzahnen.

5. Nach dem Härten und Abkühlen sind die Kalksandsteine gebrauchsfertig.

Die Abbildung 2.2 nach [KS005] macht die erläuterten Schritte des Produktionsschemas der KS-Herstellung ersichtlich.

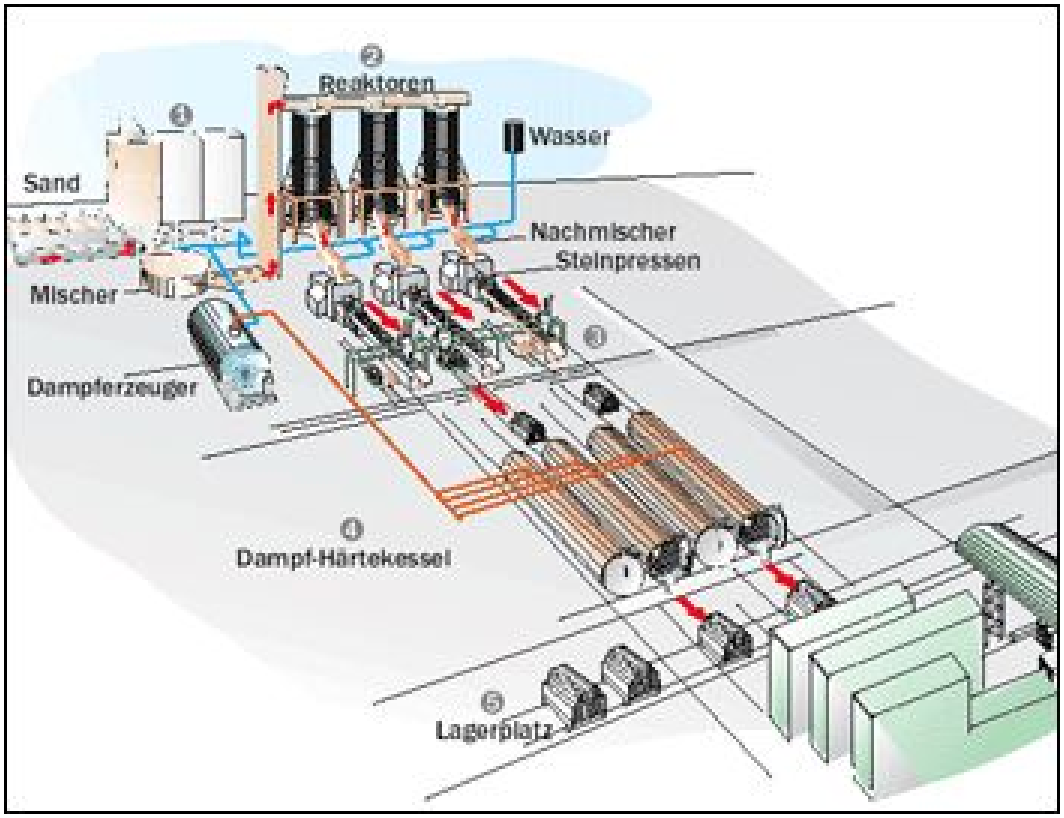

Abbildung 2.2: KS-Herstellung

2.2.3 Materialeigenschaften

Da sich die Abmessungen und Formen der Produkte beim Erhärtungsvorgang nicht mehr verändern, kann eine sehr hohe Maßgenauigkeit und engere Maßtoleranzen erreicht werden.
Kalksandsteine sind ausblühungsfrei aber sehr empfindlich gegen mechanische Beschädigung und Säuren, daher nicht geeignet für chemische Betriebe und aggressives Grundwasser. KS-Verblender und KS-Strukturs teine sind ohne Anstriche und Imprägnierungen witterungsbeständig. Werden deckende Anstriche und farblose Imprägnierungen zur Reduktion der Feuchtigkeitsaufnahme verwendet, so sollen nach [Wen04] folgende Eigenschaften durch die Hersteller garantiert sein:

- hohe Haftfestigkeit auf dem Untergrund;
- hohe Wasserdampfdurchlässigkeit $s_d \leq 0,4m$;
- geringe Wasserdurchlässigkeit;

- Alterungs- und UV-Beständigkeit;
- Beständigkeit gegen hohe Basizität (z.B. pH-Wert von 12,5 bei Mörtelwasser);
- Widerstandsfähigkeit gegen Pilz- und Algenbefall.

Für farblose Imprägnierungen sind Kieselsäure-, Silikonharz-, Silan-, und Siloxan-Imprägnierungen geeignet. Als deckende Anstriche sollten vorzugsweise Silikatanstriche verwendet werden. Diese Empfehlungen können auch [CDL+94] entnommen werden. Da Injektionsstoffe bei der Mauerwerksinjektion gegen aufsteigende Feuchtigkeit auf der selben Basis verwendet werden, sollten durch diese Stoffe keine Schäden am Kalksandstein auftreten.

Die einzelnen KS-Arten werden nach Rohdichte- und Festigkeitsklassen unterteilt. Namen und Anwendungsbereiche von Kalksandsteinen sind in der folgenden Tabelle 2.1 nach [Wen04] angeführt.

Kalksandsteine				Mauerwerk					DIN 1053		Anwendungs-bereich
		Festig-keits-klasse	Rohdichte-klasse	Wandicken [cm]	tra-gend	nicht tra-gend	Mör-tel 1)	Ausfüh-rung der Stoßfugen	Teil 1	Teil 2 (RM)	
Klein-, Mittelformate, Schichthöhe ≤ 12,5cm	KS Vollsteine	12-20-28	1,6-1,8-2,0	11,5-17,5-24 30-36,5	x	x	N	vermörtelt	x	x	Aussen- und Innenwände •hohes Tragvermögen •hoher Schallschutz •hoher Brandschutz •hoher Wärmeschutz in Verbindung mit Wärme-dämmplatten •rationelle Bauweise •Sichtmauerwerk
	KS L Lochsteine	12-20	1,2-1,4-1,6	11,5-17,5-24 30-36,5	x	x	N		x	x	
Grossformate Schichthöhe ≥ 25cm	KS-R Blocksteine	12-20	1,8-2,0	11,5-17,5-24 30-36,5	x	x	N	vorzugs-weise mörtelfrei verzahnt	x	x	
	KS-R (P) Planblock-steine	12-20	1,6-1,8-2,0	11,5-17,5-24 30-36,5	x	x	D		x	x	
	KS-PE Plan-elemente	20	1,8-2,0	11,5-15-17,5 20-24-30	x	x	D		x	x	
	KS L-R Hohlblock-steine	6-12	1,2-1,4-1,6	11,5-17,5-24 30-36,5	x	x	N		x	x	
	KS L-R (P) Planhohl-blocksteine	6-12	1,2-1,4-1,6	11,5-17,5-24 30-36,5	x	x	D		x	x	
	KS-P 7 Bauplatten	-	2,0	7	-	x	D	vermörtelt	-	-	nichttragende 2) leichte Innenw.

1) Mörtel: N = Normalmörtel; D = Dünnbetmörtel 2) Die Ausführung von nichttragenden,leichten Trennwänden ist in DIN 4103 geregelt

Tabelle 2.1: Namen und Kurzzeichen für Kalksandsteine,Anwendungsbereiche

Für die Zwecke der vorliegenden Arbeit wurden KS-NF 20-1,8 verwendet.
KS-NF bezeichnet die Steinart, in diesem Fall Vollstein Normalformat mit den Abmessungen 24/11,5/7,1 cm.
20 gibt die Festigkeitsklasse mit $20N/mm^2$ an und 1,8 die Rohdichteklasse mit $1,8kg/dm^3$.

2.3 Paraffin

2.3.1 Paraffin im Bauwesen

Der Begriff Paraffin wird aus dem lateinischen *"parum affinis"* abgeleitet und wird mit *"wenig verwandt, im Sinne von wenig zur Verbindung neigend"* übersetzt. Paraffin stellt in der Chemie die Bezeichnung für gesättigte Kohlenwasserstoffe (Alkane) dar. Fehlende funktionelle Gruppen in ihrer Molekülstruktur führen zur Reaktionsträgheit des Paraffins. Der symmetrische Aufbau bewirkt das Verschwinden des Dipolmoments, was die hydrophobe, das heißt "wasserfeindliche"Eigenschaft dieser Verbindung erklärt.

Paraffin wird hauptsächlich aus Erdöl und Erdgas gewonnen. Bei Raumtemperatur ist Paraffin fest, der Schmelzpunkt liegt bei etwa 55-60°C, je nach Produkttyp. Die temperaturabhängige Rohdichte beträgt bei einer Temperatur von 20°C ca. $0{,}9 g/cm^3$. Für vorliegende Untersuchungen wurde ein gängiges Industrieparaffin entsprechend der Anwendung verwendet.

Da bei der Verarbeitung von Paraffin keinerlei chemische Prozesse ablaufen noch Lösungsmittel verdunsten oder ähnliches, kann die Behandlung solange vorgenommen werden, bis eine ausreichende bzw. gewünschte Penetration erreicht ist. Nachdem die Molekülgröße des Paraffins sich in der Größenordnung von Wasser bewegt, darf daraus geschlossen werden, dass dieselben Porenbereiche verfüllt werden können; diese Vermutung kann auch durch [Maj04] bestätigt werden. Die Tiefenwirkung wird durch Warmbehandlung, durch Berieseln, Tränken oder Injizieren des Baustoffes mit Paraffin sichergestellt. Dabei unterscheidet man nach [Hec01] 3 Eintragsformen von erwärmten, flüssigen Paraffinen:

- Aufbringen von festem Paraffin in Form von Granulat, Pastillen oder Pulver auf horizontale Bauteiloberflächen, Erwärmung der Oberfläche durch thermische Strahlung, das so flüssige Paraffin dringt durch die Poren und Kapillaren in den oberflächennahen Bereich des Bauteils ein;
- Auftrag von flüssigem Paraffin auf die Oberfläche durch Sprühen, Bestreichen oder Spülen auf horizontale oder vertikale Flächen, da das Paraffin auf der gegenüber dem flüssigen Paraffin kalten Oberfläche sofort erstarrt, ist es erforderlich, die Materialoberfläche zum Eindringen des Paraffins auf einer Temperatur zu halten, bei der das Paraffin flüssig bleibt;
- Injektion des flüssigen Paraffins über Bohrlöcher in vollständigen Bauteilquerschnitten.

Die wichtigsten Eigenschaften des Paraffins sind die Hydrophobierung und Porenverstopfung. Die Eigenschaften variieren nach Anwendungsgebiet wovon folgende nach [Hec01] genannt werden können:

- in der Vorfertigung als Zuschlagsstoff, bzw, Zusatzstoff;
- Sanierung einschl. Grund- und Holzbau;
- Bauwerksabdichtung;
- Massivbau;
- Straßenbau;
- Holzindustrie;
- Korrosionsschutz;

2.3.2 Paraffininjektion

Die Paraffininjektion ist ein nachträgliches Verfahren zur Sanierung von feuchtem Mauerwerk. Mit der Injektion wird durch den Porenverschluss und die hydrophobe Wirkung des Paraffins eine kapillarbrechende Schicht hergestellt.
Im Unterschied zu übrigen Bohrlochinjektionsverfahren ist die Paraffininjektion unabhängig vom Durchfeuchtungsgrad des Mauerwerks einsetzbar und basiert auf einem rein physikalischen Prinzip.

Verfahren und Vorgangsweise

Die Ausführung erfolgt sinngemäß nach WTA-Merkblatt 4-4-04-D, Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit [WTA04] und dem WTA-Merkblatt 4-6-98-D, nachträgliches Abdichten erdberührter Bauteile.

1. Herstellen der Bohrlochinjektionskanäle im durchfeuchtetem Mauerwerk.
2. Austrocknen des zu injizierenden Mauerwerksquerschnitt mittels temperaturgeregelter elektrischer Heizstäbe. Durch die Austrocknung wird das kapillare Saugvermögen des Porensystems wieder hergestellt, bzw. verbessert.
3. Verfüllen des Porenraums mit Paraffin mittels:
   Vorratsbehälterverfahren
   Ist ein bestimmter Austrocknungsgrad des Mauerwerks erreicht, werden die Injektionsbehälter in die Bohrlöcher eingesteckt. Diese Behälter werden anschließend

mit Paraffin befüllt, das zuvor in einem Aufschmelzbehälter erwärmt worden ist. Der Baustoff nimmt das Paraffin durch kapillare Kräfte auf bis ein hoher Porenfüllungsgrad erreicht ist.

Pumpenverfahren

Das aufgeschmolzene Paraffin wird über Packer mit einer Pumpe im Niederdruckverfahren ($\ll 10 bar$) in das Mauerwerk injiziert. Dadurch können Lagerfugen und Hohlstellen mit Paraffin gefüllt werden. Von dort aus stellt sich eine gewisse Verteilung durch kapillare Kräfte ein, bis das Paraffin abkühlt und erstarrt. Diese Methode eignet sich vor allem für klüftige Bausubstanz, in der die Kapillarwirkung durch große Hohlräume unterbunden ist.

4. Nach Abschluss der Injektion werden die Bohrlöcher mit Mörtel formschlüssig verfüllt und eventuelle Paraffinrückstände an der Wandoberfläche entfernt.

Vor Beginn der Arbeiten sind die Parameter des Verfahrens, wie Materialverbrauch, Anordnung der Bohrlöcher und zusätzliche flankierende Maßnahmen, mittels Probeinjektionen festzulegen. Durch Überwachung dieser Parameter kann die Qualitätskontrolle erfolgen. Injektionen dieser Vorgehensweise bewirken nach rund 2 Jahren einen deutlichen Trocknungseffekt. Der kapillare Wassertransport sollte soweit eingeschränkt sein, dass der Baustoff bis zur umgebungsbedingten Ausgleichsfeuchte (=Gleichgewicht) abtrocknen kann.

2.4 Schäden mit Sanierungsbaustoffen am Kalksandstein

Aus Kurzfassungen von zahlreichen Publikationen in verschiedenen Literaturdatenbanken und Suchmaschinen (z.B. RSWB, Monudoc, Schadis) sind nur Eintragungen über Schäden am Kalksandstein zu beziehen, die sich hauptsächlich mit Schadensfällen an Fassaden und Sichtmauerwerk beschäftigen. Die Sanierungen und dabei auftretenden Probleme beschränken sich damit auf Putze und Anstriche.

Schäden am Kalksandstein sind auf Witterungseinflüsse, wie Regen und Frost, wie auch auf inkompatible Eigenschaften der verwendeten Beschichtungen und Imprägnierungen zurückzuführen. Durch unterschiedliche Dehnungen und Bewegungen, verursacht durch Wasseraufnahme oder Temperaturveränderungen, kommt es zu Abplatzungen. Zusätzlich kann Wasser zu unschönen Verfärbungen und Ausblühungen an der Oberfläche führen. Ursache für das Fehlschlagen der Sanierung waren meist zu dichte, zu feuchtigkeitsempfindliche oder falsch verwendete Materialien, sowie Aufbringen der Beschichtungen auf zu wenig ausgetrocknetes Kalksandsteinmauerwerk.
Diese Probleme und Mängel sind technisch, chemisch oder physikalisch erklärbar und auf die Eigenschaften der verwendeten Materialien zurückzuführen.
Diese Arbeit versucht einen Grund für das Fehlschlagen von Sanierungen durch Mauerwerksinjektion mit Paraffin aufzufinden. In der Praxis und aus Vorversuchen sind Schadensfälle an paraffinbehandelten Kalksandsteinen im Zusammenhang mit Wasserbelastung aufgetreten. Da nach Herstellung eines dichten Horizonts mittels Paraffininjektion an der Unterseite mit Wasserandrang zu rechnen ist (siehe auch Abbildung 2.1 auf Seite 5), besteht die Aufgabe darin, Grenzen der Anwendbarkeit zu finden und festzulegen.
Aus ersten Überlegungen ist die Ursache nicht eindeutig, da sich Paraffininjektion zur Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit in der Praxis sehr bewährt hat und Paraffin, als reaktionsträges Material, keine chemischen Reaktionen hervorruft.
Um festzustellen, wann und unter welchen Bedingungen eine Verwendung ohne Schaden möglich ist, wurde bei den Untersuchungen die Art der Paraffinaufnahme variiert. Betrachtet wurde die Aufnahme in unterschiedlich feuchte bzw. trockene Kalksandsteine mit verschiedenen Temperaturen und Temperaturgradienten des Paraffins (siehe Kapitel 3.1). Anschließend erfolgte Wasseraufnahme durch kapillares Saugen in das zuvor behandelte Material. Die Proben wurden beobachtet und eingetretene Schäden dokumentiert. Weiters wurde versucht durch unterschiedliche Messungen und Prüfungen Veränderungen im Material und mögliche Schadensursachen festzustellen.

2.5 Verwendete Prüfmethoden

Um die Schadensursache und Zusammenhänge identifizieren zu können wurden verschiedene Methoden zur Untersuchung der Probekörper gewählt. Die Reihenfolge richtet sich nach der Untersuchungsgenauigkeit - von äußeren, optischen Erkenntnissen bis hin zur Bestimmung der kristallinen und strukturellen Beschaffenheit. Eine optische Änderung in Struktur und Gefüge sowie die Verteilung von Paraffin im Kalksandstein soll durch elektronisches bzw. Raster-Elektronen-Mikroskop ersichtlich gemacht werden. Der Einfluss des Paraffins auf die Porenräumen kann mit der Quecksilberporosimetrie bestimmt werden. Weiters konnten Umwandlungen in den Bindemittelphasen des Kalksandsteins vermutet werden, um dem auf den Grund zu gehen, wurden Röntgendiffraktometrie und Differential-Thermoanalyse vorgenommen. Die Erkennung der CSH-Phasen ist auch bei REM möglich, aber die konkrete Bestimmung der verschiedenen kristallinen Formen, nur durch die Optik, ist mit großen Unsicherheiten verbunden.

2.5.1 elektronisches Mikroskop

Zu unterscheiden sind nach [EF61] Auflicht-Mikroskope für undurchsichtige Stoffe und Durchlicht-Mikroskope für durchsichtige und transparente Stoffe. Die Geräte unterscheiden sich grundsätzlich in der Beleuchtungseinrichtung. Im vorliegenden Fall wurde ein Auflicht-Mikroskop verwendet, bei dem das Licht von oben und seitlich auf die Probe gestrahlt und von dieser in das Objektiv reflektiert wird. Eine besondere Aufbereitung des Untersuchungsobjektes ist nicht erforderlich.

2.5.2 Raster-Elektronen-Mikroskop (REM)

Wie sichtbares Licht durch optische Linsen, lassen sich Elektronenstrahlen formal in gleicher Weise durch rotationssymmetrische magnetische Felder fokussieren und in Elektronenmikroskopen zur Abbildung eines Objektes verwenden. Da die Wellenlängen der Elektronenstrahlen wesentlich kleiner sind, läßt sich ein viel stärkeres Auflösungsvermögen erreichen. Das verwendete Gerät arbeitet mit dem Durchstrahlungsverfahren, wobei die Strahlung durch eine sehr dünne Beschichtung geht und dort charakteristisch durch Absorptions- und Streuvorgänge modifiziert wird. Untersucht werden Proben (Abbildung 2.3) mit einem Durchmesser in der Größenordnung von etwa 5 mm. Für das Durchstrahlungsverfahren wird Beschichtungsmaterial unter Vakuum verdampft (Abbildung 2.4) und dieses schlägt sich auf der Probe mit einer Schichtdicke von 20 ηm nieder. Je flacher der Einfallswinkel des Beschichtungsmaterials, desto geringer ist die Schichtdicke, und das Oberflächenrelief tritt durch Schattenwirkung

stärker hervor. Als Aufdampfsubstanzen kommen anorganische Stoffe wie Siliziumoxid und Schwermetalle wie Gold in Frage. In unserem Fall wurde eine Goldaufdampfung vorgenommen.

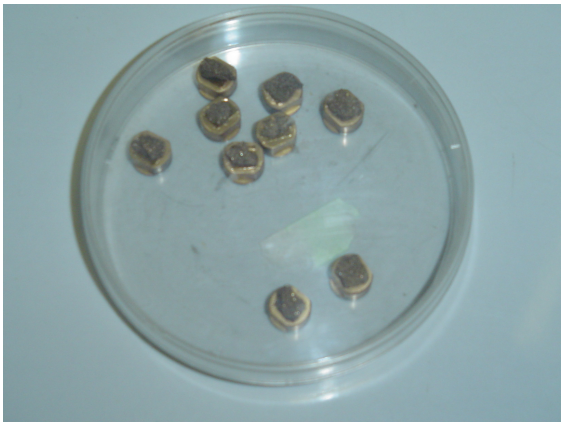

Abbildung 2.3: Probe für REM

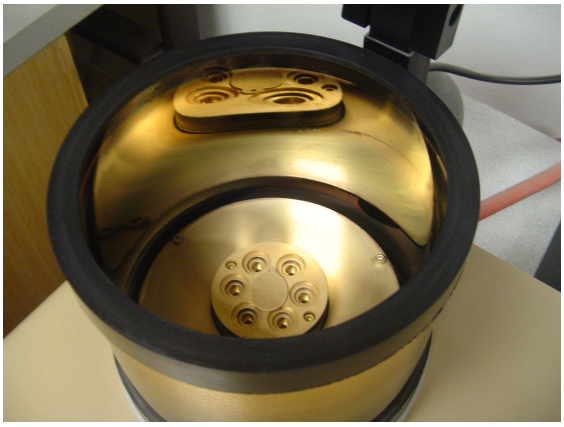

Abbildung 2.4: Gold-Aufdampfung

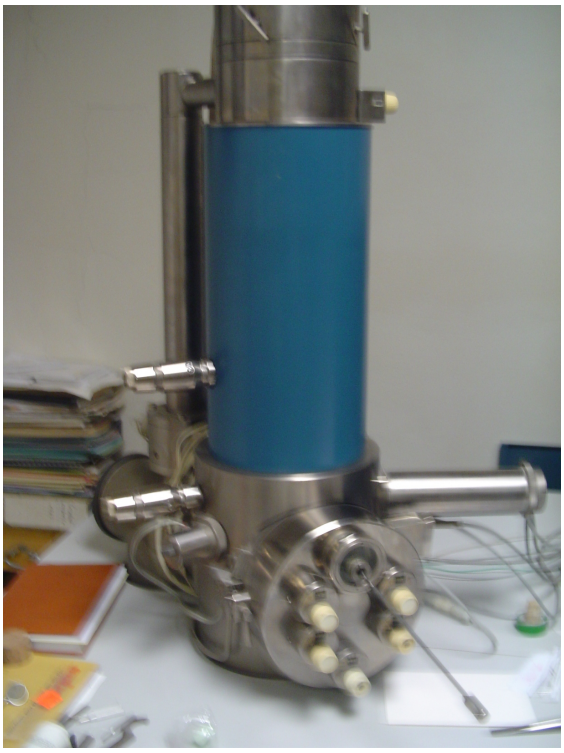

Abbildung 2.5: Vakuumerzeugung

Abbildung 2.6: Floureszenzschirm

Für die Untersuchung werden Elektronen von der Kathode emittiert und durch eine angelegte Spannung beschleunigt. Beim Durchgang durch das Objekt wird ein Bild aufgeprägt, über elektrostatische oder magnetische Linsen abgelenkt und auf dem Bildschirm vergrößert dargestellt. Wegen der starken Absorption der Strahlen durch die

Materie ist ein hohes Vakuum (Abbildung 2.5) erforderlich. Die Bilder können auf einem Floureszenzschirm (Abbildung 2.6) sichtbar gemacht und fotografisch festgehalten werden.
Durch die Bestrahlung mit Elektronen nehmen die Kontraste im Laufe der Zeit ab. Daher soll der "Beleuchtungsfleck"klein gehalten werden, für gute Wärmeableitung gesorgt sein, möglichst geringe elektronenoptische Vergrößerung und hohe lichtoptische Nachvergrößerung verwenden werden. Die Bestrahlungszeit ist kurz zu halten, deswegen sind fotografische Aufnahmen der Direktbeobachtung vorzuziehen [EF61, BHKS80].

2.5.3 Quecksilber-Porosimetrie

Die Quecksilberporosimetrie ist ein Verfahren zur Bestimmung der Porengrößenverteilung. Quecksilber, als nichtbenetzende Flüssigkeit, mit porösem Baustoff in Verbindung gebracht, kann durch seine große Oberflächenspannung nicht von den Poren aufgenommen werden. Durch Aufbringen eines äußeren Druckes ist es jedoch möglich den Widerstand zu berechnen und die Hohlräume des Materials zu verfüllen. Die physikalischen Zusammenhänge werden in der Washburn-Gleichung beschrieben:

$$p * r = -2 * \sigma * cos\varphi \qquad [N/m] \tag{2.1}$$

φ ist der Randwinkel und ist stoffabhängig; für Quecksilber liegt er zwischen 125° und 152°. Für Messauswertungen kann der Durchschnittswert von 141,3° angenommen werden.
σ ist die Oberflächenspannung des Quecksilbers und beträgt bei 25°C ca. 0,482 N/m, bei 50°C liegt der Wert bei 0,472 N/m. Bei Auswertungen kann die jeweilige Labortemperatur interpoliert werden.
p ist der aufgebrachte Druck und somit kann r, der gesuchte Radius, ermittelt werden. Für die Auswertung wurden folgende Annahmen getroffen:

- während der Analyse sind die Oberflächenspannungen und der Randwinkel des Quecksilbers konstant,
- es herrscht Gleichgewicht im System,
- Poren werden durch zylindrische Querschnitte idealisiert und
- und die Probekörper erleiden während dem Aufbringen des Druckes keine Deformation.

Es ist zu beachten, dass bei geringem aufgebrachten Druck, kleine Änderungen des Druckes große Änderungen des Porenradius bedeuten. Hingegen bewirkt bei hohen Drücken selbst eine große Schwankung des Druckes nur eine minimale Veränderung des Radius [Maj04].

2.5.4 Röntgendiffraktometrie (XRD)

Die Röntgendiffraktometrie ist eine Methode zur Bestimmung der Bestandteile von Kristallmengen in Festkörpern. Das Verfahren beruht auf der Tatsache, dass jeder homogene, kristalline Stoff für sein Raumgitter ein charakteristisches System von Röntgenreflexen liefert. Die Intensität der Strahlung wird von einem Detektor aufgenommenen und als Funktion des Streuwinkels im verwendeten Fall mittels Bandschreiber aufgezeichnet. Durch Vergleich des Reflexsystemes mit Beugungsdaten in Tabellen werden die Kristallarten qualitativ bestimmt. Die quantitativen Anteile der Kristalle können über die Integrale der Fläche unterhalb der aufgezeichneten Intensitätskurven ermittelt werden [BHKS80]. Das verwendete Gerät ist ein Vielkristalldiffraktometer, das mit Pulverpräparaten arbeitet. Für eine Untersuchung benötigt man 2 g Pulver, dazu mussten die Proben gemahlen und durch ein 0,090 mm-Sieb gesiebt werden. Um Einflüsse der Probenränder ausschließen zu können, wurde bei der Entnahme darauf geachtet, Mengen aus dem Inneren der Proben zu verwenden.

Vorteile dieses Verfahrens sind, dass die Bestimmung der Intensität und der Quantität von kristallinen Stoffen mit gleicher und ähnlicher Zusammensetzung möglich ist, weiters kann es auch ohne Kenntnis des genauen Aufbaus der Gemengebestandteile eingesetzt werden. Die Grenzen resultieren daraus, dass ähnliche Strukturen nur schwer unterschieden werden können und eine gewisse Mindestmenge zur Erfassung einzelner Phasen notwendig ist.

2.5.5 Differential-Thermoanalyse (DTA)

Die Differential-Thermoanalyse ist ein thermisches Verfahren zur Materialanalyse. Die DTA nutzt den charakteristischen Energieumsatz beim Phasenübergang zur qualitativen und quantitativen Analyse. Die Messung basiert auf einem Vergleich der Temperaturen der Probe und einer ausgewählten Referenzsubstanz in einer symmetrischen Messkammer. Dabei weist die Referenzsubstanz im zu untersuchenden Temperaturbereich keine Phasenübergänge auf. Bei konstanter Energiezufuhr (Wärme) durch den Ofen wird über Temperaturfühler die Temperatur in den beiden Kammern gemessen und die Differenz aufgezeichnet. Eine solche Temperaturdifferenz erscheint nur bei Phasenübergängen, aus dem Kurvenverlauf lassen sich somit Rückschlüsse auf die Zusammensetzung der Probe ziehen. Häufige Anwendungsgebiete sind die Untersuchung von mineralischen Stoffen, Ermittlung chemischer Verbindungen und Beimengungen sowie Identitätsprüfungen. Mit der DTA kann auch untersucht werden, ob eine Hydrophobierung auf Bauwerksoberflächen vorhanden ist [bam05].

3 Versuchsvorbereitungen

3.1 Unterschiedliche Anfangsbedingungen

Die Paraffinaufnahme der einzelnen Versuchsreihen erfolgte unter verschiedenen Randbedingungen. Es wurden Variationen beim Feuchtegehalt des Kalksandsteins vor der Paraffineinbringung und bei der Art der Paraffinaufnahme vorgenommen. Die unterschiedlichen Vorbehandlungen sollen Einflüsse auf die Verteilung des Paraffins im Kalksandstein und damit verbundene Auswirkungen auf die Haltbarkeit aufzeigen.
Die Ausgangsbedingungen sollen einen Bezug zur Praxis darstellen. Um den Zustand des Mauerwerks hinsichtlich des Wassergehalts und einer eventuellen Trocknung vor der Paraffininjektion zu erfassen, wurden folgende **Unterscheidungen des Feuchtegehalts** vorgenommen:

- Feuchtegehalt bei Raumklima
  Im Mauerwerk stellt sich je nach den Luftfeuchte- und Temperaturbedingungen der Umgebung eine Ausgleichsfeuchte ein. Bei der Herstellung einer Abdichtungsebene gegen aufsteigende Feuchtigkeit, tritt diese Situation kaum ein, da die Injektion in wasserbelastete Bauteile vorgenommen wird, um oberhalb dieser Ebene eine Austrocknung durch Verdunstung zu ermöglichen. Im Vergleich zu weiteren Versuchsreihen kann aber die Auswirkung von Wasser im Baustoff abgeschätzt werden.

- Feuchtegehalt bei 23°C/95%
  Durch Sorption kann das Mauerwerk, abhängig von Temperatur und relativer Luftfeuchte, Wasser aus der Luft aufnehmen. Gewählt wurde eine Lufttemperatur von 23°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 95%. Der Wassergehalt dieser Variante liegt zwischen dem Feuchtegehalt bei Raumklima und der kapillaren Sättigung.

- Thermische Vorbehandlung
  Es sollen Einflüsse der Trockungstemperatur berücksichtigt werden, da bei der Herstellung der Kalksandsteine kein Brennvorgang stattfindet. Um Vergleiche

aufstellen und die Auswirkungen abschätzen zu können, wurde unterschieden in die üblichen Paraffin-Injektionstemperaturen 80°C und 120°C.

- Kapillare Wassersättigung
  Der Wassergehalt bei kapillarer Wassersättigung ist durch die sogenannte Wasserkapazität des Baustoffs bestimmt. Die Wasseraufnahme erfolgt durch Kapillarkräfte ohne zusätzlichen Druck. Nur die kapillaraktiven Poren sind mit Wasser gefüllt, geschlossene und Sackporen enthalten Luft und verhindern einen weiteren Feuchtigkeitszutritt. Dieser Wassergehalt ist eine praxisrelevante Größe; da äußere Kräfte durch Winddruck oder stauende Feuchtigkeit meist nicht groß sind, nehmen Baustoffe bei Bewitterung und anderen Feuchtezufuhrprozessen in der Regel maximal einen Feuchtegehalt an, der der Wasserkapazität entspricht.

- Vollständige Wassersättigung
  Durch lange Unterwasser-Lagerung, Unterdruck an der Wasseroberfläche oder Erhitzen des Wasserbads auf Siedetemperatur, kann verbleibende Luft aus den Poren ausgetrieben werden und der Baustoff nimmt den maximalen Wassergehalt an. Dieser Wert entspricht etwa dem gesamten freien, von außen zugänglichen Porenraum des Baustoffes.

Der Feuchtegehalt des Baustoffes hat Einfluss auf die Verteilung des Paraffins. Wassergefüllte Poren wirken einerseits dem Eindringen von Paraffin entgegen, andererseits kann durch Verdampfen von Wasser während der Wärmebehandlung Unterdruck erzeugt und dadurch Paraffin eingesaugt werden. Zusätzlich spielt auch die **Art der Paraffineinbringung** eine wesentliche Rolle. Zur Untersuchung der Auswirkungen wurden folgende Variationen betrachtet:

- Kapillares Saugen im Ofen
  Durch gleiche Temperatur des Kalksandsteins und der Umgebung kann die volle kapillare Wirkung des Paraffins zur Wirkung kommen. Es werden optimale Bedingungen simuliert, die in der Praxis kaum zu erreichen sind.

- Kapillares Saugen mit Temperaturgradient
  Diese Variante versucht die Situation auf der Baustelle nachzustellen. Bei der Paraffininjektion erfährt nur das Mauerwerk in unmittelbarer Umgebung der Bohrlöcher durch die Heizstäbe einen Temperaturanstieg. Mit größerer Entfernung zu den Bohrlöchern nimmt auch die Temperatur ab, dadurch entsteht ein Temperaturgradient, der zu einer schnelleren Verfestigung des Paraffins führt. Die Viskosität nimmt ab und somit auch das Eindringvermögen des Paraffins in die Poren.

- Vollständiges Eintauchen in Paraffin
  Es wird versucht eine möglichst hohe Paraffinaufnahme zu erreichen, eventuell den gesamten freien Porenraum zu füllen. Durch vollständiges Eintauchen des Probekörpers in Paraffin kommt zusätzlich zur kapillaren Wirkung des Kalksandsteins noch Druck, erzeugt durch das flüssige Paraffin und die erhöhte Temperatur. Dieser Versuch ist für die Verwendung von Paraffininjektion am Bauwerk weniger interessant, kann aber möglicherweise zu neuen Erkenntnissen und Überlegungen führen.

Die genannten Variationen der Art der Paraffineinbringung wurden mit Temperaturen von 80 und 120°C durchgeführt. Durch die Verwendung der selben Temperaturen bei der Vortrocknung kann ein Zusammenhang zwischen der Feuchtevorbehandlung und der Paraffineinbringung hergestellt werden. Dadurch ist aus praktikabler Sicht eine Unverträglichkeit gewisser Vorbehandlungen gegeben - mit 80°C vorgetrocknetes Material erfährt eine Paraffinbehandlung bei 80°C. Eine Veränderung der Temperatur würde zusätzlichen technischen Aufwand erfordern und kommt in der Praxis nicht zur Anwendung. Auch die Aufnahme von Paraffin durch kapillares Saugen, in durch Sorption (23°C/95%) vorbehandelten Kalksandstein kann ausgeschlossen werden. Durch die erhöhten Temperaturen des Paraffins, würde das Sorptionswasser verdunsten und hätte keinen Einfluss auf die Paraffinverteilung.
Eine Übersicht der verschiedenen, verträglichen Ausgangssituationen der Probenbehandlungen ist in der Tabelle 3.1 zu finden. Jede dieser möglichen Varianten besteht aus 3 Probenstücken. Die Darstellung in Matrixform ermöglicht eine gute Übersicht, zusätzlich ist die weitere Bezeichnung der Versuchsreihen abzulesen.

Feuchtegehalt / Paraffin			Saugen				Sättigung	
			Ofen		Gradient			
			80°C	120°C	80°C	120°C	80°C	120°C
			1	2	3	4	5	6
trocken (RK)		1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
Sorption (23°C/95% Lf.)		2					2.5	2.6
therm. Vorbeh.	80°C	3	3.1		3.3		3.5	
	120°C	4		4.2		4.4		4.6
kapillare Sättigung		5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6
vollständige Sättigung		6	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6

Tabelle 3.1: Übersicht der Anfangsbedingungen

Aus den Bezeichnungen der Proben kann auf die Vorbehandlung geschlossen werden. So gibt die erste Ziffer den Feuchtegehalt vor der Paraffineinbringung an, die zweite die Art der Paraffinbehandlung. Ein Beispiel: 5.3 - Feuchtigkeitsgehalt entspricht der kapillaren Wassersättigung; Paraffinaufnahme erfolgt durch Saugen mit Temperaturgradient 80°C.

3.2 Probengeometrie

Versuchsmaterial ist ein KS-NF 20-1,8 mit den Abmessungen 24/11,5/7,1 cm. Die Stirnseiten des Originalsteins wurden entfernt, sodass nur Schnittflächen auftreten und die Versuche unabhängig von eventuell vorhergegangen Veränderungen des Materials durch Umgebungssituationen ablaufen. Aus diesem Stein konnten vier Probekörper mit den Abmessungen 11,5/7,1/4,9 cm gewonnen werden, wobei das Toleranzmaß 1 bis 2mm beträgt (siehe Abbildung 3.1).
Pro Versuchsreihe kommen drei Probenstücke zur Verwendung. Dabei wurde darauf geachtet, dass diese drei Proben nicht aus einem Stein gewonnen wurden, um Einflüsse und Schwankungen aus der Herstellung zu berücksichtigen.

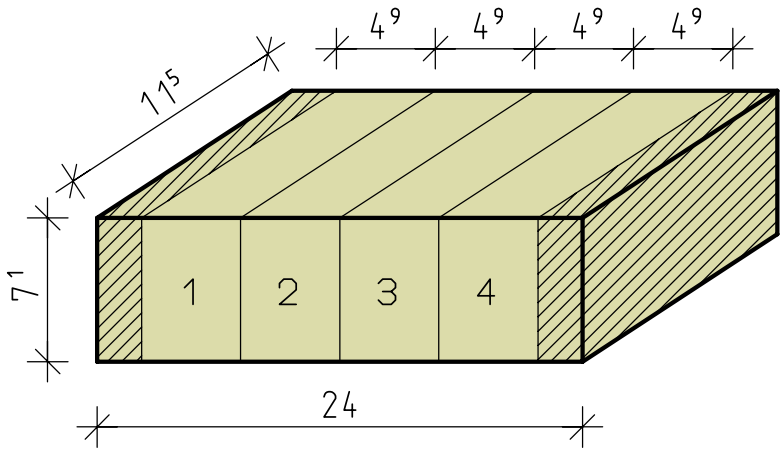

Abbildung 3.1: Probenzuschnitt aus KS - NF

3.3 Probenherstellung

3.3.1 Feuchtigkeitsgehalt vor der Paraffinaufnahme

Bevor die unterschiedlichen Feuchtegehalte eingestellt wurden, sind die Proben bei 60°C getrocknet worden, um das Trockengewicht jeder Probe zu erhalten. Die Trockungstemperatur wurde auf nur 60°C festgelegt (nicht wie üblich 105°C), um Einflüsse der Trocknungstemperaturen auf die CSH-Phasen des Kalksandsteins ausschließen zu können.

Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima

Nach dem Trocknen bei 60°C und anschließender Lagerung im Labor bei Raumklima (ca. 25°C und 40% relativer Luftfeuchtigkeit) stellte sich eine relative Feuchtigkeit zwischen 1,3 und 1,9 Masseprozent im Kalksandstein ein.

Feuchtegehalt bei 23°C/95%

Die Probenstücke wurden bei einer Raumtemperatur von 23°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95% über mehrere Wochen gelagert. Die konstante Temperatur konnte durch einen Klimaraum erreicht werden. Für die Sicherstellung der Luftfeuchtigkeit wurden abgeschlossene Behälter mit eingebauten Ventilatoren verwendet. Die Grundfläche des Behälters war mit Wasser bedeckt und die Steine waren oberhalb des Wasserspiegels auf einem Gitter gelagert, die Ventilatoren sorgten für Umluft und somit für die konstante Luftfeuchtigkeit um die Proben. Hierbei stellte sich ein relativer Feuchtegehalt zwischen 10,5 und 13,9 M% ein.

Trocknen bei 80°C bzw. 120°C

Die Trocknung erfolgte in einem thermostatgeregelten Trockenschrank mit den Temperaturen von 80 und 120°C. Die Temperaturbehandlung wurde mindestens 24 Stunden vorgenommen.

Kapillare Wassersättigung

Die getrockneten KS-Proben wurden in eine Wanne mit destillierten Wasser von ca. 2cm Tiefe gestellt (durch Nachfüllen konstant gehalten), wo sie bis zur freien Wassersättigung (Wasserkapazität) das Wasser aufsaugten. Die Wasserlagerung erfolgte bis zum Erreichen der Massenkonstanz, diese konnte angenommen werden, wenn sich zwischen 2 Wägungen im Abstand von 24 Stunden die Masse der Probekörper um maximal

0,1% änderte. Anzumerken ist, dass keine Abdichtung der Seitenflächen stattgefunden hat und somit Verdunstung über die Oberfläche nicht auszuschließen ist. Durch kapillares Saugen konnte ein relativer Wassergehalt von 14,3 bis 18,2 M% erreicht werden.

Vollständige Wassersättigung

Der Versuchsablauf der vollständigen Wassersättigung wurde in Anlehnung an [SW86] vorgenommen. Die Probenstücke wurden mind. 30 Minuten in bereits kochendes Wasser eingelegt. Wenn nach 30 Minuten keine Luftbläschen mehr aufstiegen, konnte die Probe aus dem Kochtopf entnommen werden, andernfalls wurde der Kochversuch verlängert, bis keine Bläschen mehr zu erkennen waren. Anschließend kühlten die Proben mindestens 15 Minuten in destillierten Wasser auf Raumtemperatur ab. Der bei diesen Versuch erreichte relative Wassergehalt liegt zwischen 20,0 und 23,4 M%.

3.3.2 Art der Paraffinaufnahme

Saugen bei 80°C bzw. 120°C

Die Proben mit dem zuvor eingestellten Feuchtegehalt werden in einer Wanne mit ca. 1cm Paraffin in einen temperaturgeregelten Ofen gestellt. Dabei erfolgt gleichzeitig mit der kapillaren Paraffinaufnahme eine Trocknung des Kalksandsteins. Nach 24 Stunden der Paraffinbehandlung wurde die Probe aus dem Ofen entnommen und zum Abkühlen bei Raumtemperatur gelagert. Durch die Fixierung der Behandlungsdauer konnten bei der Temperatur von 120°C höhere Saughöhen, als bei 80°C, erreicht werden.

Saugen mit Temperaturgradient 80°C bzw. 120°C

Die feuchtevorbehandelten Proben wurden auf einer thermostatgeregelten Herdplatte in angeheiztes Paraffin ca. 1cm eingetaucht und saugten über Kapillarwirkung das Paraffin an (siehe Abbildung 3.2). Der Temperaturgradient entstand dadurch, dass der Stein nicht vollständig aufgeheizt wurde, sondern dieser bei Raumtemperatur das heiße Paraffin saugte. Der Versuch ging über 8 Stunden, wobei zu Beginn die Verdunstung des im Kalksandstein enthaltenen Wassers, durch starke Bläschenbildung erkennbar war.

Vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 80°C bzw. 120°C

Das Probenstück wurde vollständig in flüssiges Paraffin eingetaucht und 5 Tage lang in den temperaturgeregelten Ofen gestellt (siehe Abbildung 3.3). Hierbei sollte die Probe

vollständig mit Paraffin bedeckt sein, sodass Wasser eventuell nicht entweichen und Paraffin nur teilweise in das Porensystem vordringen konnte. Es hat sich gezeigt, dass zu Beginn dieses Versuches Wasser aufsteigt und durch kräftiges Brodeln verdampft .

Abbildung 3.2: Vesuchsaufbau-Herdplatte (kapillares Saugen)

Abbildung 3.3: Versuchsaufbau-Ofen (vollständ. Eintauchen)

3.3.3 Vergleich der Feuchte- und Paraffingehalte

Die Tabelle 3.2 stellt die erzielten Feuchte- und Paraffingehalte der verschiedenen Versuchsreihen gegenüber. Angegeben sind jeweils der obere und der untere Wert der erreichten Gehalte in M%. Nach der Paraffinbehandlung und anschließender Abkühlung wurde das Gewicht der Proben gemessen und auf das Trockengewicht des Probenstücks bezogen. Bei Paraffinaufnahme durch vollständiges Eintauchen kann durch die Umhüllung der Probe mit Paraffin, eventuell eingeschlossenes Wasser nicht entweichen und das Ergebnis des Paraffingehalts beeinflussen.

Aus der Gegenüberstellung der Versuchsserien wird ersichtlich, dass bei der Einstellung der Feuchtegehalte, durch die verschiedenen Vorbehandlungsarten, eine gute Abstufung der relativen Feuchtigkeit erreicht wurde. Da diese Feuchtigkeitsbehandlung unabhängig von der späteren Art der Paraffinaufnahme abläuft, gelten die Werte jeweils für die gesamte Zeile.

Der Einfluss des im Kalksandstein enthaltenen Wassers vor der Paraffineinbringung kann durch die verschiedenen Paraffingehalte bei den selben Behandlungsarten bestätigt werden. Sehr deutlich wird dies bei der Serie vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 80°C. Feuchte Probenstücke nehmen wesentlich weniger Paraffin auf, als trockene. Das führt zu der Annahme, dass wassergefüllte Poren das Eindringen von Paraffin verhindern.
Dieser Effekt ist bei der Versuchsreihe vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 120°C nicht zu erkennen. Die Ursache kann darin gefunden werden, dass die Behandlungstemperatur über dem Siedepunkt von Wasser liegt.
Weniger wirkt sich der Einfluss des Feuchtegehalts bei der Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen aus, da das Wasser entweichen kann und somit die Poren für die Paraffinaufnahme frei werden.

Feuchtegehalt \ Paraffin			Saugen				Sättigung	
			Ofen		Gradient			
			80°C	120°C	80°C	120°C	80°C	120°C
Feuchtegehalt [M%]			Paraffingehalt [M%]					
trocken (RK)		1,3-1,9	3,4-3,5	6,1-8,2	3,4-4,3	5,2	15,7-16,1	12,1-16,2
Sorption (23°C/95% Lf.)		10,5-13,9					3,0-5,5	11,3-14,5
therm. Vorbeh.	80°C	0,0	3,9-4,4		4,0-4,6		15,7-16,5	
	120°C	0,0		10,4-13,8		5,5-5,7		14,9-16,5
kapillare Sättigung		14,3-18,2	3,0-3,9	4,9-5,4	3,7-4,1	4,4-4,9	3,5-3,8	12,5-13,0
vollständige Sättigung		20,0-23,4	3,0-3,5	5,8	4,7-5,7	5,4-6,0	3,1-3,2	11,4-15,9

Tabelle 3.2: Übersicht der Feuchte- und Paraffingehalte

4 Versuchsdurchführung

4.1 Wasserlagerung

Aus Schadensfällen und Vorversuchen hat sich gezeigt, dass der Schaden an den paraffingetränkten Kalksandsteinen erst im Zusammenhang mit Wasser auftritt. Zur Nachstellung dieser Wasserbelastung, lagen die paraffinpenetrierten Proben in einer Wanne mit destilliertem Wasser. Um Wasseraufnahme nur durch Kapillarkräfte zu sichern, wurde die Höhe des Wasserstands zwischen 1 und 2cm konstant gehalten. Während des laufenden Versuchs wurde in ungleichmäßigen Abständen das Wasser gewechselt, da sich an den Kalksandsteinen Lösungsvorgänge durch Ausblühungen abgezeichnet haben. Ein Beispiel von solchen Ausblühungen ist in Abbildung 4.1 ersichtlich. Durch längere Wasserlagerung hat sich zusätzlich Schimmelpilz an den Bereichen des unbehandelten Kalksandsteins gebildet, Teile die mit Injektionsstoff behandelt waren, zeigten keine dieser Erscheinungen.

Abbildung 4.1: Ausblühungen am KS

4.2 Saugrichtung

Die Proben wurden quer zur Paraffin-Saugrichtung ins Wasserbad gelegt, um eine Situation herzustellen, die möglichst nahe der Realität ist. Der paraffingetränkte Teil stellt den Injektionsbereich um ein Bohrloch dar, auf dessen Übergangszone getränkt/nicht getränkt kapillare Wassersättigung auftrifft (siehe auch Abbildung 2.1 auf

Seite 5).

In Abbildung 4.2 werden die Überlegungen für die Versuche deutlich gemacht. Wird Paraffin mittels Injektion in den Baustoff eingebracht, breitet sich dieses im Idealfall in Form konzentrischer Kreise um das Bohrloch aus. Im Mauerwerk können sich die Situationen a) an der Seitenwand bzw. c) an der Unterseite des Injektionsbereiches einstellen. Weniger Bedeutung hingegen hat b), dieser Zustand stellt sich in der Praxis nicht ein, da durch die Paraffininjektion kein Wasser in den angrenzenden Kalksandstein aufsteigen kann und damit keine Wasserbelastung in der Übergangszone getränkt/nicht getränkt auftritt. Für die Versuche sollte möglichst kapillare Wassersättigung des nichtinjizierten Teils erreicht werden, um Versuchsreihen ausfindig zu machen, die der Wasserbelastung standhalten. Aus diesem Grund wurde für die generellen Versuche die Lage, wie in Punkt a) dargestellt, gewählt. Um den Wassergehalt bestimmen zu können, ab welchem es zu Schäden am Kalksandstein kommt, wurde in weiteren Versuchen die Position c) mit verschiedenen Steinhöhen und somit unterschiedlichen Saughöhen gewählt (siehe Kapitel 4.4.3).

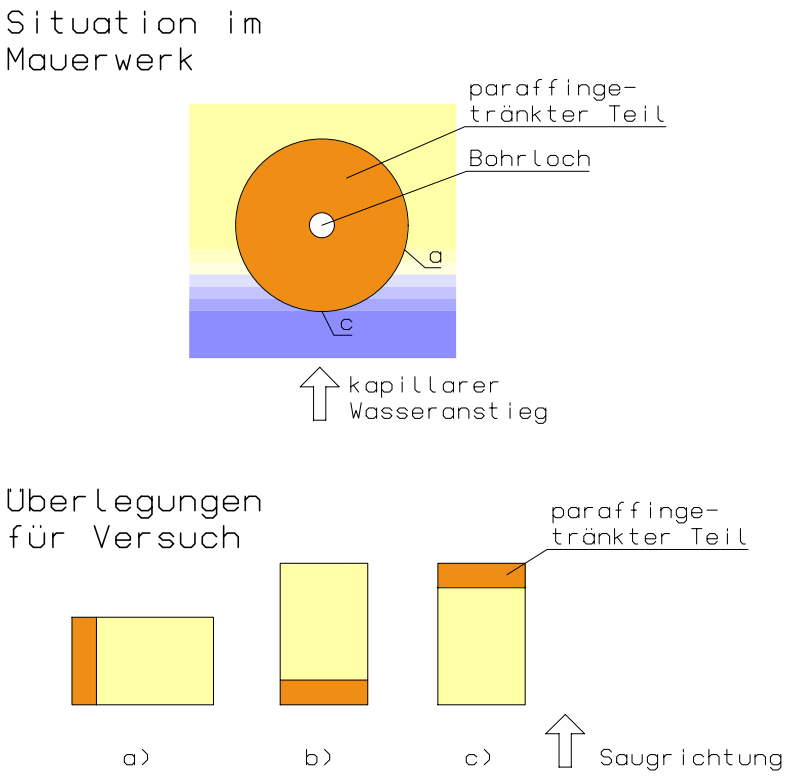

Abbildung 4.2: Lage im Wasserbad

4.3 Beobachtungen

Vor dem Einsetzen der Steine in das Wasserbad, wurde das Gewicht der Proben gemessen, während des laufenden Versuches wurde die Änderung des Gewichtes durch Wasseraufnahme aufgezeichnet. Ein rapider Anstieg in der Gewichtszunahme ist mit einem Auftreten eines Schadens an der Probe gleichzusetzen. Optisch erkennbare Veränderungen und Schäden wurden aufgezeichnet und in Tabellen nach ihrem zeitlichen Auftreten dargestellt.

Die folgende Bezeichnung der Versuchsserien erfolgt nach dem Matrixsystem der Tabelle 3.1 , wobei die erste Ziffer den Feuchtegehalt beschreibt und die zweite die Art der Paraffinaufnahme. Maßgebend für die kommende Reihenfolge der Versuchsserien sind die Spalten der zuvor erwähnten Matrix. Das kann dadurch begründet werden, dass innerhalb der selben Art und Weise der Paraffinaufnahme der beste Vergleich der Proben möglich ist.

4.3.1 Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen bei 80°C

1.1 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima;
Paraffinaufnahme: Saugen bei 80°C

Die Steine zeigten bereits 24 Stunden nach Versuchsbeginn große Risse am Übergangsbereich paraffininjiziert/nicht injiziert. Der Bruch an dieser Stelle erfolgte ohne jegliche Kraftanwendung (siehe Abbildung 4.3).

1.1				
	Tag	7-1	7-2	7-3
1.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
2.6. 9:57	1	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.1: Beobachtungen 1.1

3.1 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 80°C;
Paraffinaufnahme: Saugen bei 80°C

Der Bruch am Übergangsbereich paraffininjiziert/nicht injiziert trat nach nur 24 Stunden auf, der paraffinpenetrierte Teil wies Risse auf. (siehe Abbildung 4.4).

3.1				
	Tag	1-4	2-4	3-4
1.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
2.6. 9:57	1	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.2: Beobachtungen 3.1

5.1 - Feuchtigkeit: kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Saugen bei 80°C

Bei zwei der drei Proben trat nach 24 Stunden der Bruch ein, das dritte Probenstück brach am 6. Tag der Wasserlagerung an der Grenze paraffininjiziert/nicht injiziert (siehe Abbildung 4.5). Wobei sich eine Veränderung bereits 32 Stunden nach Versuchsbeginn durch Quellen an der Oberseite, im Bereich des Paraffin-Übergangs abzeichnete. Von diesem Quellen ging dann der Riss aus, der schließlich zum Bruch führte.

5.1				
	Tag	10-3	11-3	9-3
1.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
2.6. 9:57	1	Bruch	Bruch	kein Schaden
2.6. 17:07	1			Riss an Oberseite, Quellen
...	...			...
7.6. 11:00	6			Bruch an Übergangszone

Tabelle 4.3: Beobachtungen 5.1

6.1 - Feuchtigkeit: vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Saugen bei 80°C

Die Steine brachen bereits 24 Stunden nach Versuchsbeginn an der Übergangszone der Penetration. Der paraffingetränkte Teil war mit Rissen übersät und der Bruch erfolgte ohne jegliche Krafteinflüsse.

6.1				
	Tag	2-1	3-1	4-1
1.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
2.6. 9:57	1	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.4: Beobachtungen 6.1

Bilder zur Serie Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen bei 80°C

Die gesamte Serie wies sehr ähnliche Schadensbilder auf, ausgewählte Beispiele zeigen Abbildung 4.3 bis 4.5. Die Proben brachen nach Verformungen und Rissen an der Übergangszone paraffininjiziert/nicht injiziert nach kurzer Lagerungszeit im Wasserbad. Es konnten auch Schäden durch Risse am paraffinpenetrierten verzeichnet werden, welche das Gefüge des Kalksandsteins zerstörten.

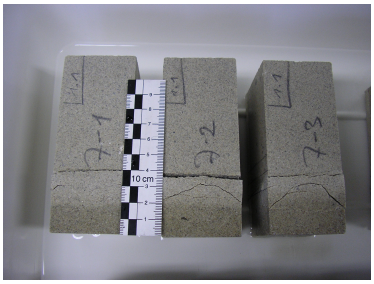

Abbildung 4.3: 1.1

Abbildung 4.4: 3.1

Abbildung 4.5: 5.1

4.3.2 Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen bei 120°C

1.2 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme: Saugen bei 120°C

Der Bruch trat bereits nach weniger als 24 Stunden an der Übergangszone paraffininjiziert/nicht injiziert nach dem Einlegen in destilliertes Wasser auf (siehe Abbildung 4.6).

1.2				
	Tag	24-1	25-1	15-2
28.6. 17:03	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
29.6. 9:24	1	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.5: Beobachtungen 1.2

4.2 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 120°C; Paraffinaufnahme: Saugen bei 120°C

Zwei Versuchsstücke brachen einen Tag nach Versuchsbeginn. Der dritte Stein zeigte einen Riss, von unten aufgehend, an der Übergangszone; der Bruch trat am zweiten Tag ein.

4.2				
	Tag	19-4	20-4	21-4
28.6. 17:03	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
29.6. 9:24	1	Bruch	Riss von unten	Bruch
30.6. 9:00	2		Bruch	

Tabelle 4.6: Beobachtungen 4.2

5.2 - Feuchtigkeit: kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Saugen bei 120°C

Probenstück Nummer 11-1 zeigte am ersten Tag nach Versuchsbeginn einen Riss an der Übergangszone, der zum späteren Bruch an dieser Stelle führte.
Am Probenstück Nummer 10-1 machten sich am ersten Tag eine Wölbung und ein feiner Riss an der Übergangszone bemerkbar. Am 7. Tag war der Riss angewachsen auf den vollen Umriss der Übergangszone, das Material hatte festes Gefüge, ein Bruch war auch mit leichter Kraftanwendung nicht möglich.
Probenstück Nummer 13-2 wies am 7. Tag leichtes Quellen an der Übergangszone auf, aber es trat bis zum Versuchsende kein weiterer Schaden auf (siehe Abbildung 4.7).

5.2				
	Tag	10-1	11-1	13-2
28.6. 17:03	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
29.6. 9:24	1	Dünner Riss, Bauch	Riss - Bruch	kein Schaden
...	...	...		...
5.7. 9:00	7	Durchgehender Riss		leichter Bauch
...	...	...		...
23.8. 9:45	56	Versuchsende		Versuchsende

Tabelle 4.7: Beobachtungen 5.2

6.2 - Feuchtigkeit: vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Saugen bei 120°C

Wie schon bei anderen Versuchsserien beobachtet, trat der Bruch bereits am ersten Tag nach Versuchsbeginn, an der Übergangszone paraffininjiziert/nicht injiziert, ein (siehe Abbildung 4.8).

6.2				
	Tag	3-2	4-2	5-2
28.6. 17:03	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
29.6. 9:24	1	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.8: Beobachtungen 6.2

Bilder zur Serie Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen bei 120°C

Die Schadensbilder wiesen starke Ähnlichkeiten auf, daraus kann geschlossen werden, dass bei Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen bei gleicher Temperatur des Kalksandsteins und der Umgebung, die vorhergegangene Feuchtigkeit keinen gravierenden Einfluss hat. Einzelne Bilder der zerstörten Proben sind in Abbildungen 4.6 bis 4.8 zu finden.

Abbildung 4.6: 1.2

Abbildung 4.7: 5.2

Abbildung 4.8: 6.2

4.3.3 Saugen mit Temperaturgradient 80°C

1.3 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme: Saugen mit Temperaturgradient 80°C

Die Schadensbilder der einzelnen Proben waren ident, lediglich der Zeitpunkt des Auftretens des Versagens unterschied sich. An der mit freiem Auge erkennbaren Dehnung des Übergangsbereiches gingen feine Risse auf, die das Materialgefüge lösten und in diesem Bereich Material absanden ließen. Weitere Wasseraufnahme führte zum Aufweiten der Risse und schlussendlich zum Bruch am Übergangsbereich paraffin-injiziert/nicht injiziert. Der paraffingetränkte Bruchteil war kompaktes Material und hatte keine Risse erfahren (siehe Abbildung 4.9).

1.3				
	Tag	21-1	22-1	23-1
1.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
2.6. 9:57	1	kein Schaden	Riss von unten	Riss von unten
3.6. 8:35	2	feiner durchgehender Riss, Quellen von unten, Absanden	Sprung unten, Absanden	Durchgehender Riss
...	...	...	...	...
8.6. 9:00	7	Risse, Sprünge	Risse, Sprünge	durchg. Riss
9.6. 9:00	8	Bruch	große Sprünge	durchg. Riss
14.6. 10:45	13		Bruch	Bruch

Tabelle 4.9: Beobachtungen 1.3

3.3 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 80°C; Paraffinaufnahme: Saugen mit Temperaturgradient 80°C

Der Riss ging von der Unterseite auf und führte kurz nach Versuchsbeginn an der Grenze paraffininjiziert/nicht injiziert zum Bruch. Das Gefüge des paraffingetränkten Teiles war zerstört und aufgesprengt (siehe Abbildung 4.10).

3.3				
	Tag	7-4	8-4	9-4
1.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
2.6. 9:57	1	Riss von unten	Riss von unten	kein Riss
2.6. 17:07	1	Riss	Riss	Riss
3.6. 8:35	2	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.10: Beobachtungen 3.3

5.3 - Feuchtigkeit: kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Saugen mit Temperaturgradient 80°C

Die Proben dieser Versuchsserie erzeugten unterschiedliche Schadensbilder. Während ein Probenstück zu Bruch ging, bestanden die beiden anderen die Wasserlagerung über 55 Tage. Es waren zwar Volumsveränderungen und Ablösen von sandigen Material erkennbar, daraus folgten aber keine weiteren Schäden. Der Paraffin-Bruchkörper der Probe 14-3 ist kompakt und das Gefüge ist nicht zerstört (siehe Abbildung 4.11).

5.3				
	Tag	12-3	14-3	9-2
1.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
2.6. 9:57	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
3.6. 8:35	2	kein sichtbarer Riss, Absanden	kein sichtbarer Riss, Quellen an unterer ÜZ, Absanden	kein Schaden
4.6. 9:45	3	kein Riss	kein Riss, Absanden	kein Schaden
7.6. 11:00	6	kein Riss	Bruch	kein Schaden
8.6. 9:00	7	kein Riss		kein Schaden
9.6. 9:00	8	leichter Bauch an ÜZ, geringes Bröseln		leichter Bauch an ÜZ, kein Bröseln
14.6. 10:45	13	keine Änderung		keine Änderung
...	...	...		...
26.7. 9:02	55	Versuchsende		Versuchsende

Tabelle 4.11: Beobachtungen 5.3

6.3 - Feuchtigkeit: vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Saugen mit Temperaturgradient 80°C

Alle drei Versuchsstücke zeigten dasselbe Verhalten während der Wasserlagerung; es trat eine leichte Volumsvergrößerung an der Übergangszone paraffingetränkt - nicht paraffingetränkt auf, aber weitere Schädigung durch Risse oder ähnliches war nicht zu erkennen.

6.3				
	Tag	1-1	5-1	1-3
1.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
2.6. 9:57	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
3.6. 8:35	2	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
4.6. 9:45	3	kein Schaden	geringes Absanden	geringes Absanden
7.6. 11:00	6	leichter Bauch an ÜZ	leichter Bauch an ÜZ	leichter Bauch an ÜZ
8.6. 9:00	7	keine Änderung	keine Änderung	keine Änderung
...	...	...	...	...
26.7. 9:02	55	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende

Tabelle 4.12: Beobachtungen 6.3

Bilder zur Serie Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen mit Temperaturgradient 80°C

Eine Gegenüberstellung ausgewählter Bilder der Serie kapillares Saugen mit Temperaturgradient 80°C ist in Abbildungen 4.9 bis 4.11 zu finden. Die Schadensbilder

waren ähnlich mit festem, kompakten Gefüge des paraffinpenetrierten Teils. Ausgenommen die Versuchsreihe 3.3, bei welcher das Gefüge des paraffingetränkten Teils aufgesprengt und zerstört war.

Abbildung 4.9: 1.3

Abbildung 4.10: 3.3

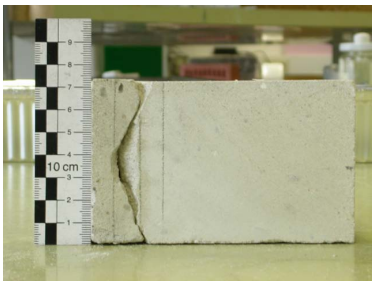

Abbildung 4.11: 5.3

4.3.4 Saugen mit Temperaturgradient 120°C

1.4 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme: Saugen mit Temperaturgradient 120°C

Der Bruch trat nach bereits einen Tag nach Beginn der Wasserlagerung an der Übergangszone auf. Der Bruch war klar an der Grenze des paraffingetränkten/nicht paraffingetränkten Bereiches, wobei der Teil mit Paraffin kompakte Gefügestruktur aufwies (siehe Abbildung 4.12).

1.4				
	Tag	25-2	15-3	16-3
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.13: Beobachtungen 1.4

4.4 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 120°C; Paraffinaufnahme: Saugen mit Temperaturgradient 120°C

Wie schon zuvor, trat der Bruch nach bereits einem Tag an der Übergangszone auf. Die Proben dieser Serie brachen klar an der Grenze des paraffingetränkten Bereiches und wiesen kompaktes, paraffinpenetriertes Material auf.

4.4				
	Tag	20-3	21-3	22-3
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.14: Beobachtungen 4.4

5.4 - Feuchtigkeit: kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Saugen mit Temperaturgradient 120°C

Im Gegensatz zu den vorhergegangenen Proben dieser Art der Paraffinaufnahme, war hier das paraffingetränkte Bruchstück nur noch loses Material, das Gefüge war vollständig zerstört (siehe Abbildung 4.13).

5.4				
	Tag	12-1	14-1	14-2
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	Absanden, keine Risse	Bruch, Sprengung der Paraffinzone	Bruch, Sprengung der Paraffinzone
14.7. 9:00	2	Aufbrechen Paraffinzone, Risse, Sprünge	Bruch	Bruch
15.7. 9:11	3	Bruch		

Tabelle 4.15: Beobachtungen 5.4

6.4 - Feuchtigkeit: vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Saugen mit Temperaturgradient 120°C

Der Riss, der zum Bruch führte, ging von unten an der Grenze paraffingetränkten/nicht paraffingetränkten Bereiches auf. Das paraffinbehandelte Material war mit Rissen übersät und konnte ohne nennenswerte Kraftanwendung gebrochen werden (siehe Abbildung 4.14).

6.4				
	Tag	6-2	6-3	5-3
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.16: Beobachtungen 6.4

Bilder zur Serie Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen mit Temperaturgradient 120°C

Unterschiede der Schadensbilder dieser Serie waren in der Schädigung des paraffinpenetrierten Teils zu erkennen. Während 1.4 und 4.4 kompaktes Bruchmaterial hatten, war bei 5.4 und 6.4 keine Bindung des Gefüges vorhanden. Abbildungen 4.12 bis 4.14 zeigen anschauliche Fotos dieser Serie.

Abbildung 4.12: 1.4

Abbildung 4.13: 5.4

Abbildung 4.14: 6.4

4.3.5 Vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 80°C

1.5 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 80°C

Starke Verformungen und breit aufgehende Risse, 8 Tage nach Versuchsbeginn, ließen große innere Spannungen vermuten. Die Rissbreiten lagen zwischen 5 und 10 mm. Das übrige Material besaß relativ gute Festigkeit.

1.5				
	Tag	8-1	8-2	8-3
7.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
8.6. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
9.6. 9:00	2	leichter Bauch an Wassergrenze, Bröseln	leichter Bauch an Wassergrenze, Bröseln	leichter Bauch an Wassergrenze, Bröseln
14.6. 10:45	7	Sprengung, Bröseln	Sprengung, Bröseln	Sprengung, Bröseln
15.6. 9:45	8	Zerstörung	Zerstörung	Zerstörung

Tabelle 4.17: Beobachtungen 1.5

2.5 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei 23°C/95%; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 80°C

In dieser Versuchsserie bestanden die Probekörper 65 Tage ohne besondere Vorkommnisse und Schäden. Es waren lediglich Verfärbungen des im Wasser befindlichen Teils zu erkennen, die von Unreinheiten und eventuellen Kalkauslösungen herrührten.

2.5				
	Tag	15-1	17-1	18-1
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
14.7. 9:00	2	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
15.9. 9:53	65	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende

Tabelle 4.18: Beobachtungen 2.5

3.5 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 80°C; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 80°C

Ähnlich wie schon bei 1.5 beobachtet, wurde das Gefüge von unten ausgehend gelöst, was sich, einem Tag nach Versuchsbeginn, durch Bläschenbildung und Absanden von Material bemerkbar machte. Folglich bildeten sich große Verformung mit breiten Spannungsrissen, bis zur vollständigen Zerstörung am 7. Tag.

3.5				
	Tag	4-4	5-4	6-4
7.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
8.6. 9:00	1	Bröseln, Bläschen an Unterseite	Bröseln, Bläschen an Unterseite	Bröseln, Bläschen an Unterseite
9.6. 9:00	2	starke Risse	starke Risse	starke Risse
14.6. 10:45	7	Zerstörung	Zerstörung	Zerstörung

Tabelle 4.19: Beobachtungen 3.5

5.5 - Feuchtigkeit: kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 80°C

Es waren während der Wasserbelastung von 56 Tagen keine erkennbaren Schäden und Auffälligkeiten zu verzeichnen.

5.5				
	Tag	10-2	11-2	13-3
7.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
8.6. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
9.6. 9:00	2	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
2.8. 9:15	56	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende

Tabelle 4.20: Beobachtungen 5.5

6.5 - Feuchtigkeit: vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 80°C

Diese Serie bestand die Wasserlagerung mit einer Dauer von 56 Tagen ohne erkennbare Schäden und Vorkommnisse.

6.5				
	Tag	6-1	1-2	2-2
7.6. 9:00	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
8.6. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
9.6. 9:00	2	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
2.8. 9:15	56	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende

Tabelle 4.21: Beobachtungen 6.5

Bilder zur Serie Paraffinaufnahme durch Vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 80°C

Zu Schäden und Rissen kam es nur bei den Versuchsreihen 1.5 und 3.5. Diese zeigten aber identes Schadensbild, große Verformungen und breite Risse (siehe Abbildungen 4.15 bis 4.17). Die anderen Proben dieser Serie bestanden die Wasserbelastung über den Beobachtungszeitraum ohne erkennbare Veränderungen, darum kann auf eine Abbildung in dieser Gegenüberstellung verzichtet werden.

Abbildung 4.15: 1.5

Abbildung 4.16: 3.5a

Abbildung 4.17: 3.5b

4.3.6 Vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 120°C

1.6 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Nach längerer Laufzeit des Versuchs gingen bei zwei Proben viele, kleine, unorientierte Risse auf. Das Material verlor seine Festigkeit und konnte ohne Kraftanwendung zerbrochen werden. Der dritte Stein dieser Serie bestand den Versuch ohne Schäden.

1.6				
	Tag	19-2	20-2	24-2
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
14.7. 9:00	2	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
16.8. 10:38	35	auffallende Gewichtszunahme	keine Änderung	auffallende Gewichtszunahme
17.8. 9:56	36	Gewichtssteigerung	keine Änderung	Gewichtssteigerung
...	...	...	...	...
25.8. 13:24	44	feine Risse	keine Änderung	feine Risse
26.8. 9:10	45	Risse	keine Änderung	Risse
...	...	...	...	...
30.8. 9:47	49	Risse	keine Änderung	Zerstörung
31.8. 9:53	50	Zerstörung	keine Änderung	
...	...		...	
15.9. 9:53	65		Versuchsende	

Tabelle 4.22: Beobachtungen 1.6

2.6 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei 23°C/95%; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

In dieser Versuchsreihe waren bei allen drei Proben, während einer Beobachtungszeit von 65 Tagen, keine Schäden und Auffälligkeiten zu erkennen.

2.6				
	Tag	16-1	19-1	20-1
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
14.7. 9:00	2	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
15.9. 9:53	65	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende

Tabelle 4.23: Beobachtungen 2.6

4.6 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 120°C; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Es waren während einer Wasserbelastung von 65 Tagen keine Veränderungen zu vermerken.

4.6				
	Tag	22-4	23-4	24-4
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
14.7. 9:00	2	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
15.9. 9:53	65	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende

Tabelle 4.24: Beobachtungen 4.6

5.6 - Feuchtigkeit: kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Ähnlich 1.6, zeigten sich bei zwei der drei Proben erst nach ca. einer Woche Risse am Versuchskörper. Kleine, fein verteilte Risse führten zur Auflösung des Gefüges und somit zur Zerstörung. Die dritte Probe ließ während dieser 65 Tage keine Schäden erkennen.

5.6				
	Tag	9-1	13-1	12-2
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
19.7. 16:29	7	keine Änderung	gr. Gewichtszunahme	keine Änderung
20.7. 8:55	8	keine Änderung	Gewichtssteigerung	keine Änderung
21.7. 9:19	9	keine Änderung	Risse unten	keine Änderung
22.7. 9:13	10	keine Änderung	starke Risse	keine Änderung
23.7. 8:57	11	keine Änderung	Zerstörung	keine Änderung
...	...	...		...
6.8. 8:58	25	gr. Gewichtszunahme		keine Änderung
9.8. 9:10	28	Gewichtssteigerung		keine Änderung
10.8. 14:00	29	Risse		keine Änderung
11.8. 10:55	30	starke Risse		keine Änderung
12.7. 13:13	31	Zerstörung		keine Änderung
...	...			...
15.9. 9:53	65			Versuchsende

Tabelle 4.25: Beobachtungen 5.6

6.6 - Feuchtigkeit: vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Schäden oder Risse an den Probekörpern waren während des Beobachtungszeitraums von 65 Tagen nicht zu verzeichnen.

6.6				
	Tag	17-3	18-3	19-3
12.7. 9:50	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
13.7. 9:00	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
15.9. 9:53	65	Versuchsende	Versuchsende	Versuchsende

Tabelle 4.26: Beobachtungen 6.6

Bilder zur Serie Paraffinaufnahme durch Vollständiges Eintauchen in Paraffin bei 120°C

Zu ähnlichen Schäden kam es bei den Versuchsreihen 1.6 und 5.6. Die Proben zeigten Verformungen und viele kleine Risse, die auf innere Spannungen hinwiesen und das Gefüge des Kalksandsteins zerstörten. Beispielbilder sind in Abbildung 4.18 bis 4.20 zu finden. Die weiteren Versuchsreihen in dieser Serie bestanden die Wasserbelastung ohne erkennbare Schäden, eine Abbildung in dieser vergleichenden Darstellung ist daher nicht erforderlich.

Abbildung 4.18: 1.6a

Abbildung 4.19: 1.6b

Abbildung 4.20: 5.6

4.4 Weiterführende Versuche

4.4.1 Injektion mit Silikonmikroemulsion

Silikonmikroemulsion (SMK) gehört zu den niedermolekularen Silanen und kann wegen ihrer kleinen Moleküle und ihrer ausgeprägten polaren Struktur besonders gut in feinporiges Material eindringen. Nach dem Verdunsten des Lösungsmittels (Wasser) wirkt die Imprägnierung hydrophobierend; Gasdurchlässigkeit und Diffundierbarkeit des Materials werden nicht beeinflusst. SMK ist dann unsichtbar und das Aussehen der Baustoffoberfläche wird nicht verändert [Wen04]. Für die Verwendung von SMK muss das zu injizierende Material trocken sein, andernfalls kann die Emulsion nicht eindringen.

Um einen Vergleich von Paraffin mit anderen Injektionsmaterialien aufstellen zu können, wurden Kalksandsteinproben mit Silikonmikroemulsion (SUPASEAL - W Imprägnierung) mit einer Wasserverdünnung von 1:10 behandelt.
Da SMK in feuchtes Material nicht eindringen kann, beschränkten sich Variationen zwischen den Versuchsreihen ausschließlich auf Wahl der Trockungstemperatur. Zur Trocknung und Herstellung der einzelnen Ausgangssituationen - Feuchtegehalt bei Raumklima, Trocknung bei 80°C und Trocknung bei 120°C - wurde nach dem selben Vorgang, wie zuvor erläutert (siehe Kapitel 3.3.1 auf Seite 22), vorgegangen.
Analog der Paraffinbehandlung wurden teilgetränkte (um unterschiedliches Materialverhalten an der Übergangszone penetriert/nicht penetriert untersuchen zu können) und vollständig in die Lösung getauchte Proben betrachtet. Die Teiltränkung erfolgte in einem Lösungsmittelbad von ca. 1cm Tiefe durch kapillares Saugen der Emulsion. Beim vollständigen Eintauchen in das Lösungsmittel kamen zusätzlich zu den kapillarwirkenden Kräften auch Drücke durch die Flüssigkeit. Beide Behandlungen wurden 6 Stunden lang vorgenommen, da nach dieser Zeit die Emulsion ausfällt und nicht mehr aufgenommen werden kann.

Eine Übersicht der verschiedenen Versuchsreihen ist in Tabelle 4.27 ersichtlich. Die Bezeichnung der Proben erfolgt nach dem selben Schema der Übersichtsmatrix der parffinbehandelten Versuchsstücke (siehe Seite 20).

Anschließend wurden die SMK-Proben wie die Paraffin-Proben in 1cm tiefes, destilliertes Wasser gestellt und über 50 Tage beobachtet. Während dieses Zeitraums wurden die Versuchsstücke regelmäßig gewogen und die Wasseraufnahme durch Massenzunahme aufgezeichnet. Durch die Wasserbelastung nach der SMK-Behandlung konnten keine erkennbaren Schäden, Verformungen oder Risse verzeichnet werden.

Feuchtegehalt / SMK			Saugen	Sättigung
			1	2
trocken (RK)		1	SMK 1.1	SMK 1.2
thermisch vorbeh.	80°C	2	SMK 2.1	SMK 2.2
	120°C	3	SMK 3.1	SMK 3.2

Tabelle 4.27: Übersicht der Anfangsbedingungen-SMK

4.4.2 Einfluss der Trockungstemperatur

Um Einflüsse der Trockungstemperatur auf den Kalksandstein erfassen zu können, wurden Steinproben mit Temperaturen von 80, 120 und 150°C getrocknet und anschließend in destilliertes Wasser gelegt. Da sich keine Schädigungen und Risse des Materials gezeigt haben, kann der Temperatureinfluss ausgeschlossen werden.

4.4.3 Variation der kapillaren Saughöhen

Aus ersten Beobachtungen konnte vermutet werden, dass die Schadensursache an der Höhe des relativen Wassergehalts zu suchen ist. Die Idee dieser Untersuchung bestand darin, aus dem Schadenszeitpunkt und dem kapillaren Wasseraufnahmekoeffizient den relativen Wassergehalt zu bestimmen, der zur Schädigung des Materials führt. Dazu wurden Probenstücke verschiedener kapillarer Saughöhen, von der Wasseroberfläche bis zur Übergangszone paraffininjiziert/nicht injiziert gemessen, untersucht.
Weiters war zu erkennen, dass die Haltbarkeit abhängig vom vorhergehenden Wassergehalt abhängig ist. Proben die vor der Paraffinaufnahme getrocknet waren, zeigten ein sehr ähnliches Schadensbild, ungeachtet der Trockungstemperatur. Deswegen konnten die Versuche auf die Feuchte-Vorbehandlungen - Feuchtegehalt bei Raumklima, kapillare Wassersättigung und vollständige Wassersättigung - reduziert werden. Die Herstellung dieser Zustände erfolgte unter den selben Bedingungen wie in Kapitel 3.3.1.

Die Probenhöhen wurden in 6, 8, 10 und 12cm unterteilt (Abbildung 4.21), wovon ca. 2cm paraffingetränkt waren. Die Paraffinaufnahme erfolgte bei 80°C und unter Temperaturgradienten (siehe auch Kapitel 3.3.2 auf Seite 23).

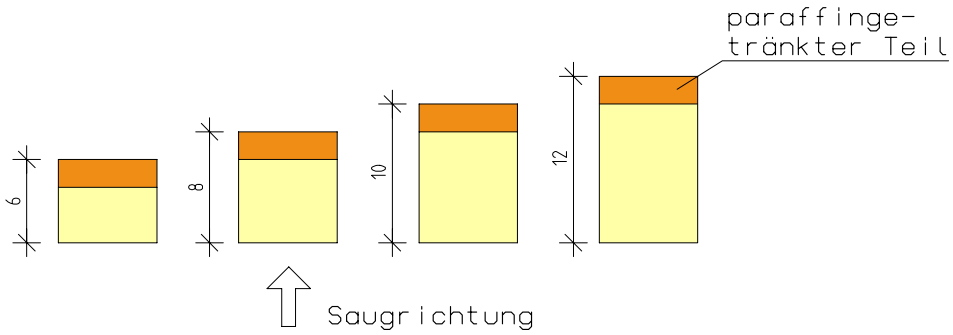

Abbildung 4.21: Variation der Probenhöhen

Die Bezeichnung der einzelnen Versuchsreihen erfolgt nach den selben Überlegungen wie auf Seite 20 und ist in der folgenden Tabelle 4.27 ersichtlich. Es wurden jeweils drei Probenstücke pro Versuchsreihe untersucht.

Feuchtegeh. / Höhe	Probenhöhe			
	6cm	8cm	10cm	12cm
trocken (RK)	TR.6	TR.8	TR.10	TR.12
kapillar gesättigt	KS.6	KS.8	KS.10	KS.12
vollst. gesättigt	VS.6	VS.8	VS.10	VS.12

Tabelle 4.28: Probenbezeichnung

Beobachtungen

Nach der Behandlung mit Paraffin wurden die Proben, wie in Abbildung 4.21 mit der paraffinpenetrierten Seite nach oben, in eine Wanne mit etwa 1 bis 2cm destilliertes Wasser gestellt. Die Massenzunahme durch Wasseraufnahme wurde gewogen, Beobachtungen verzeichnet und in Tabellenform nach zeitlichen Auftreten dargestellt.

Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima, H=6cm

Die Proben zeigten noch am Tag des Versuchsbeginns, an der Übergangszone paraffingetränkt/nicht paraffingetränkt Risse, Materialauflockerungen und Dehnungen.

TR.6				
	Tag	2.1-1	2.1-2	2.1-3
16.8. 10:21	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:03	0	Riss	Bauch, Absanden	Bauch, Absanden
17.8. 9:22	1	Riss	Bauch, Sprengrisse	Bauch, Sprengrisse
18.8. 9:45	2	Bruch	Bruch	Bruch

Tabelle 4.29: Beobachtungen TR.6

Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima, H=8cm

Schon weniger als eine Stunde nach Versuchsbeginn konnten an zwei Proben Risse und Schäden erkannt werden. Das dritte Versuchsstück verformte sich noch am selben Tag an der Übergangszone paraffinpenetriert/nicht paraffinpenetriert.

TR.8				
	Tag	7.1-2	7.2-2	8.1-2
16.8. 10:21	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 11:17	0	Riss	Riss, Bruch	kein Schaden
16.8. 17:03	0	breiter Riss		Bauch
17.8. 9:22	1	Bruch		Bruch

Tabelle 4.30: Beobachtungen TR.8

Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima, H=10cm

Bis auf sehr geringes, kaum bemerkbares Quellen trat nach 15 Beobachtungstagen kein Schaden auf.

TR.10				
	Tag	4.1-1	4.1-2	4.2-1
16.8. 10:21	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:03	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
...	...	...	...	...
31.8. 9:48	15	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden

Tabelle 4.31: Beobachtungen TR.10

Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima, H=12cm

Die Proben wiesen unterschiedliche Schadenszeitpunkte auf. Eine Probe ging noch am selben Tag zu Bruch eine andere kam am ersten Tag nach Versuchsbeginn zu Bruch. Die dritte zeigte nach drei Tagen die erste Schädigung, von der folglich der Bruch ausging.

TR.12				
	Tag	4.1-1	4.1-2	4.2-1
16.8. 10:21	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:03	0	Bruch	Riss	kein Schaden
17.8. 9:22	1		Bruch	kein Schaden
18.8. 9:24	2			kein Schaden
19.8. 9:37	3			Riss an ÜZ
23.8. 9:28	7			breiter Riss
24.8. 9:03	8			Bruch $\frac{1}{2}$ P-Zone
25.8. 12:49	9			Riss an vorh. ÜZ
26.8. 9:02	10			Bruch restl. P-Zone

Tabelle 4.32: Beobachtungen TR.12

Kapillare Wassersättigung, H=6cm

Erste Schäden traten am ersten Tag nach Versuchsbeginn auf, am zweiten Tag kam es zur Zerstörung der Probe.

KS.6				
	Tag	3.2-2	1.2-2	1.2-2
16.8. 10:06	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:11	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
17.8. 9:28	1	Ecke ausgebrochen	Riss an Ecke	Riss an Ecke
18.8. 9:45	2	Ablösen d. Ecken	Ablösen d. Ecken	Ablösen d. Ecken

Tabelle 4.33: Beobachtungen KS.6

Kapillare Wassersättigung, H=8cm

Erste Schäden waren am ersten Tag nach Versuchsbeginn zu erkennen, der weitere Schadenshergang der drei Proben war zeitversetzt.

KS.8				
	Tag	6.2-2	6.1-2	5.1-2
16.8. 10:06	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:11	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
17.8. 9:28	1	Bruch	kein Schaden	1 Ecke ausgebrochen
18.8. 9:45	2		feine Risse an ÜZ	keine Änderung
19.8. 9:58	3		deutl. Quellen	keine Änderung
23.8. 9:37	7		Ablösen d. Ecken	3 Ecken ausgebrochen

Tabelle 4.34: Beobachtungen KS.8

Kapillare Wassersättigung, H=10cm

Vorerst feine Risse, führten nach weiterer Wasseraufnahme zum Bruch an der Übergangszone (ÜZ) paraffininjiziert/nicht injiziert.

KS.10				
	Tag	3.2-1	3.1-2	3.1-1
16.8. 10:06	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:11	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
17.8. 9:28	1	kein Schaden	1 Ecke ausgebrochen	kein Schaden
18.8. 9:45	2	kein Schaden	Risse an vorh. Ecken	2 Ecken ausgebrochen
19.8. 9:58	3	Feine Risse an ÜZ	Ablösen aller Ecken	Ablösen aller Ecken
23.8. 9:37	7	Ablösen aller Ecken		

Tabelle 4.35: Beobachtungen KS.10

Kapillare Wassersättigung, H=12cm

Eine der Proben bestand den Versuch über einen Beobachtungszeitraum von 15 Tagen ohne Schaden. Die beiden anderen hatten nach 2 bzw. 3 Tagen Wasserbelastung feine Risse, die zum Bruch am Übergangsbereich führten.

KS.12				
	Tag	6.2-1	6.1-1	5.1-1
16.8. 10:06	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:11	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
17.8. 9:28	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
18.8. 9:45	2	kein Schaden	feiner Riss	kein Schaden
19.8. 9:58	3	feiner Risse	Ablösen 3 Ecken	kein Schaden
23.8. 9:37	7	Ablösen aller Ecken	keine Änderung	kein Schaden
24.8. 9:15	8		Quellen an ÜZ	kein Schaden
25.8. 12:55	9		Ablösen 4. Ecke	kein Schaden
...	...			...
31.8. 9:48	15			kein Schaden

Tabelle 4.36: Beobachtungen KS.12

Vollständige Wassersättigung, H=6cm

2 Tage nach Versuchsbeginn machten sich Schäden durch Risse an den Proben bemerkbar.

VS.6				
	Tag	2.2-1	2.2-2	2.2-3
16.8. 10:06	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:11	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
17.8. 9:28	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
18.8. 9:45	2	Risse im Paraffinteil	Risse im Paraffinteil	Ablösen der Ecken
19.8. 9:58	3	Abheben Paraffinteil	Ablösen der Ecken	

Tabelle 4.37: Beobachtungen VS.6

Vollständige Wassersättigung, H=8cm

Erste Schäden zeichneten sich nach bereits einem Tag nach Versuchsbeginn ab, anschließend lösten sich nach und nach die Ecken der paraffingetränkten Zone.

VS.8				
	Tag	8.2-2	9.1-2	9.2-2
16.8. 10:06	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:11	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
17.8. 9:28	1	1 Ecke ausgebrochen	kein Schaden	kein Schaden
18.8. 9:45	2	keine Änderung	Riss an ÜZ	kein Schaden
19.8. 9:40	3	2. Ecke abgelöst	Ablösen 2 Ecken	leichtes Quellen
23.8. 9:37	7	keine Änderung	3. Ecke abgelöst	deutl. Quellen
24.8. 9:15	8	keine Änderung	4. Ecke abgelöst	keine Änderung
25.8. 12:55	9	3. Ecke abgelöst		Ablösen aller Ecken

Tabelle 4.38: Beobachtungen VS.8

Vollständige Wassersättigung, H=10cm

Bei zwei Proben lösten sich zwei Ecken der paraffingetränkten Zone, die dritte Probe bestand den Versuch von 15 Tagen ohne Schaden.

VS.10				
	Tag	5.2-2	5.2-1	4.2-2
16.8. 10:06	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:11	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
17.8. 9:28	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
18.8. 9:45	2	Riss an ÜZ	kein Schaden	kein Schaden
19.8. 9:40	3	Ablösen 2 Ecken	feine Risse	kein Schaden
23.8. 9:31	7	keine Änderung	Ablösen 2 Ecken	kein Schaden
24.8. 9:09	8	keine Änderung	keine Änderung	kein Schaden
...	...	...	...	...
31.8. 9:50	15	keine Änderung	keine Änderung	kein Schaden

Tabelle 4.39: Beobachtungen VS.10

Vollständige Wassersättigung, H=12cm

Durch starkes Quellen machten sich die Schadensvorgänge im Material bemerkbar, die bis zu Rissen und Brüchen an der Übergangszone paraffininjiziert/nicht injiziert führten.

VS.12				
	Tag	8.2-1	9.1-1	9.2-1
16.8. 10:06	0	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn	Versuchsbeginn
16.8. 17:11	0	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
17.8. 9:28	1	kein Schaden	kein Schaden	kein Schaden
18.8. 9:45	2	kein Schaden	kein Schaden	Farbänderung an ÜZ
19.8. 9:40	3	kein Schaden	Aufquellen an Ecke	deutl. Aufquellen
20.8.	4	Verwinden an Oberfl.	keine Änderung	keine Änderung
23.8. 9:31	7	keine Änderung	Quellen an Kanten	keine Änderung
24.8. 9:09	8	seitl. Quellen	keine Änderung	keine Änderung
25.8. 13:03	9	Ablösen 1 Ecke	keine Änderung	Ablösen 3 Ecken
...	...	...	...	...
31.8. 9:50	15	keine Änderung	keine Änderung	kein Schaden

Tabelle 4.40: Beobachtungen VS.12

Ergebnisse

Grundsätzlich zeigten Proben der Serie - Feuchtegehalt bei Raumklima - schneller Schädigungen, mit Ausnahme der Proben mit der Steinhöhe 10cm (TR.10). Diese bestanden die Wasserbelastung ohne Risse und Verformungen. Nahezu alle Proben, ungeachtet der kapillaren Saughöhe und der Feuchtigkeitsvorbehandlung, erfuhren durch die Wasserbelastung Schäden.

Durch die Beobachtung der Proben und Vergleich der Schadenszeitpunkte konnte leider keine Systematik aufgestellt werden, da teilweise große Unterschiede innerhalb der Versuchsserien zu erkennen waren, deswegen wurden diese Versuche nicht weiter verfolgt.

5 Versuchsauswertung

5.1 Allgemein

Zur Identifizierung der Ursache des Versagens, wurden die zerstörten Proben mit denen verglichen, die die Wasserbelastung während des Beobachtungszeitraums ohne Schäden überstanden. Um nicht nur Aussagen über Vorbehandlungen, Beobachtungen und Art sowie Zeitpunkt des Schadens zu erhalten, wurden nähere Untersuchungen mit ausgewählten Prüfverfahren vorgenommen (siehe Kapitel 2.5). Diese dienten der Erkennung von Veränderungen im Material, bezogen auf unbehandelten Kalksandstein oder nicht zerstörter Proben gleicher Vorbehandlung. Deren Einfluss auf die Schadensursache musste untersucht und abgeschätzt werden.

5.2 Vergleich der Schadensbilder

Der Vergleich der Beobachtungen während der Wasserlagerung konzentriert sich auf den Zeitpunkt der ersten visuellen Schädigung an den Proben. Bei der Gegenüberstellung der Vorbehandlungen und der Schadenszeitpunkte, konnte kein eindeutiges System erkannt werden. In Tabelle 5.1 ist die Matrix der Vorbehandlungen mit den jeweiligen Schadenszeitpunkten in Tagen nach Beginn der Wasserbelastung übersichtlich dargestellt (Probenbezeichnung analog Tabelle 3.1, siehe Seite 20).
Die Angabe bezieht sich auf optisch erkennbare Veränderungen, meist durch Auftreten von Rissen. Da die Versuchsreihen aus jeweils 3 Proben bestehen, die teilweise unterschiedliches Verhalten zeigen, wurde bei der Angabe des Schadenszeitpunkts versucht, möglichst aussagekräftige Werte zu finden. So findet man in Tabelle 5.1 $\boxed{5.3}$ als eine intake Serie nach 56 Tagen, wobei eine Probe zerstört wurde. Da die beiden anderen, wie auch Proben der Serie $\boxed{6.3}$ keine Schäden aufwiesen, wurde die Vorbehandlung $\boxed{5.3}$ als intakt in die Tabelle aufgenommen.
Unterschiedliches Verhalten innerhalb der Versuchsserie zeigen auch die Vorbehandlungen $\boxed{1.6}$ und $\boxed{5.6}$, die der Tabelle als nicht intakt angegeben sind. Hierbei hat jedoch jeweils eine Probe die Wasserlagerung über 56 Tage bestanden. Die beiden zerstörten Proben der Serie $\boxed{1.6}$ zeigten zeitgleich erste Risse, darum kann eine eindeutige An-

gabe über den Schadenszeitpunkt gemacht werden. Anders bei Serie 5.6, hier wurde eine Mittelwert der Schadenszeitpunkte gewählt.

Erste Vermutungen, dass kapillares Saugen bei Temperaturgradient 80°C mit hohen Wassergehalt der Proben (siehe 5.3 und 6.3 in Tabelle 5.1) zu keinen Schäden führt, konnte in weiterführenden Versuchen, durch Variation der Saughöhen (Kapitel 4.4.3), nur insofern bestätigt werden, dass die Schäden zeitversetzt auftreten.

Feuchtegehalt / Paraffin			Saugen				Sättigung	
			Ofen		Gradient			
			80°C	120°C	80°C	120°C	80°C	120°C
			1	2	3	4	5	6
trocken (RK)		1	1	1	1	1	2	44
Sorption (23°C/95% Lf.)		2					56	56
therm. Vorbeh.	80°C	3	1		1		1	
	120°C	4		1		1		56
kapillare Sättigung		5	1	1	56	1	56	11
vollständige Sättigung		6	1	1	56	1	56	56

Tabelle 5.1: Schadenszeitpunkt in Tagen nach Beginn der Wasserbelastung - Matrixdarstellung

Anzumerken ist, dass Versuchskörper, die den Beobachtungszeitraum von mindestens 56 Tagen bestanden, durch fortlaufende Wasserlagerung an späteren Zeitpunkten zu Schaden kamen (siehe Tabelle 6.1).
Somit ist eine Zeitverzögerung und eventuell eine Verhinderung des Schadens durch die Wahl der Vorbehandlung zu erzielen.
Eine Paraffinaufnahme durch kapillares Saugen führt bei den gewählten Randbedingungen immer zu einem Schaden, unabhängig von der Vorbehandlung (ausgenommen Paraffinaufnahme durch Saugen mit Temperaturgradient 80°C). Nur eine vollständige Sättigung mit Paraffin kann bei entsprechenden Randbedingungen einen Schaden verhindern bzw. verzögern. Das Prozedere einer dementsprechend langen Paraffinbehandlung ist allerdings unpraktisch und unwirtschaftlich, somit für die Baupraxis wenig relevant.

5.2.1 Massenzunahme durch Wasserlagerung

Gemessen wurde die Massenzunahme während der Wasserlagerung mittels Wägung bei allen Versuchsserien. Ausgewertet wurden die Ergebnisse über Aufnahmekurven; Massenzunahme in Prozent, bezogen auf das Ausgangsgewicht aufgetragen über die Zeit.
Eindeutige Aussagen über die Aufnahme von Wasser können ausschließlich bei Versuchsserien getroffen werden, welche vollständig ins Paraffin eingetaucht wurden (Proben der Serien X.5 und X.6). Da bei teilgetränkten Proben auch mit Paraffin unbehandelter Kalksandstein Wasser aufnimmt, kann nicht unterschieden werden wieviel der paraffinpenetrierte Teil aufnimmt. Zusätzlich zeigten diese Versuchsreihen, ausgeschlossen 5.3 und 6.3, nach einem Tag Wasserlagerung Schäden. Durch das schnelle Auftreten der Schäden und somit der geringen Anzahl der Wägungen, konnten in diesen Fällen keine aussagekräftigen Aufnahmekurven entwickelt werden.
Aus diesem Grund beschränkt sich die Abbildung der unterschiedlichen Aufnahmekurven ausschließlich auf Versuchsserien, welche vollständig ins Paraffin eingetaucht wurden, und länger als 2 Tage die Wasserlagerung bestanden (d.h. bei 1.5 und 3.5 entfallen Aufnahmekurven - siehe Tabelle 5.1).
Die Reihenfolge der Versuchsserien erfolgt wieder nach den Spalten der Matrix der Vorbehandlungen - d.h. nach Art und Weise der Paraffinaufnahme. Die Art der Paraffinaufnahme macht sich an den Unterschieden der Aufnahmekurven bemerkbar:
Proben, die bei 80°C in Paraffin getaucht wurden, zeigen zu Beginn der Wasserlagerungen einen steilen Kurvenverlauf der Massenzunahme, der anschließend in einen flachen, stetigen Anstieg übergeht, insgesamt erreichen die Proben einen Massenzuwachs von rund 15 M%. Anders bei Serien der Behandlung mit 120°C, diese nehmen ebenfalls stetig, aber nur sehr wenig Wasser auf; die Massenzunahme liegt bei etwa 1 M%. Auffälligkeiten am Verlauf der Kurven, wie plötzlicher Anstieg, sind Hinweis auf Veränderungen und Schäden an den Proben. Einer auffallend hohen Gewichtssteigerung folgen, nach einigen Tagen, Risse und Sprünge - siehe auch Kapitel 4.3.
Anschließend sind Diagramme von Proben mit SMK-Behandlung dargestellt. Im Vergleich zu paraffinbehandelten Proben zeigt sich anfangs eine steilere Wasserzunahme, die allmählich flacher wird und sich einem Maximalwert von etwa 2,5 bis 3,0 M% annähert.

2.5 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei 23°C/95%; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 80°C

Wie in Abbildung 5.1 zu erkennen ist, bewegt sich nach anfangs rascher Wasseraufnahme, der Verlauf der Kurven zwischen 8 und 12 M%. Nach Abklingen der raschen Massenzunahme steigt der Wassergehalt bei allen 3 Versuchsstücken um je 2 M% weiter

an. Es treten keine Schäden bzw. Veränderungen auf.

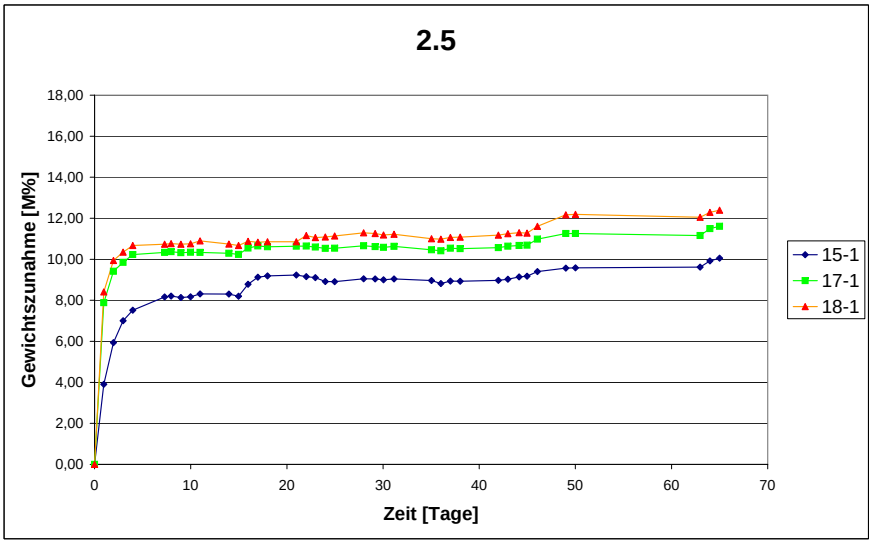

Abbildung 5.1: Massenzunahme durch Wasserlagerung 2.5

5.5 - Feuchtigkeit: kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 80°C

Der zu Beginn rasche Massenzuwachs klingt schon nach 2 Tagen ab und steigt dann stetig um 2M% an. Wie aus Abbildung 5.2 ersichtlich ist, zeigen alle 3 Proben ähnliches Verhalten; Schäden sind nicht zu verzeichnen.

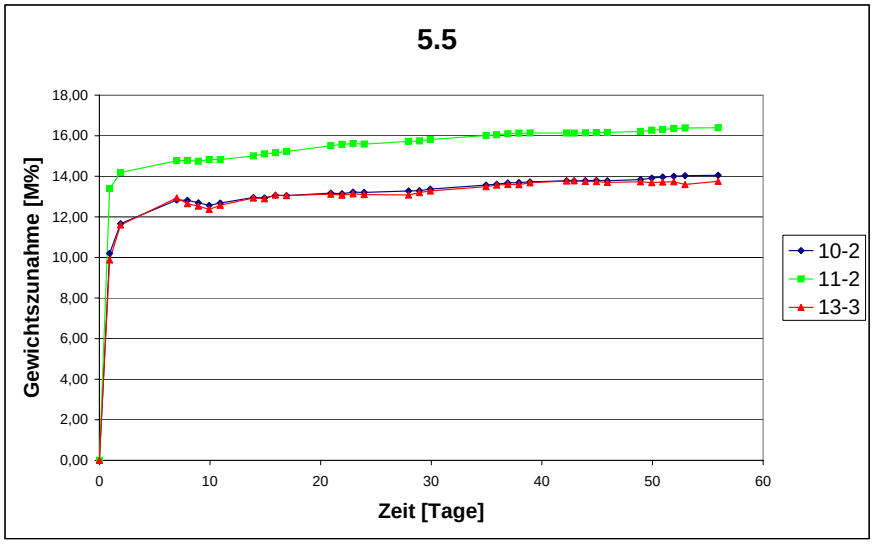

Abbildung 5.2: Massenzunahme durch Wasserlagerung 5.5

6.5 - Feuchtigkeit: vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 80°C

Abbildung 5.3 zeigt, dass am ersten Tag nach der Wasserlagerung von den Versuchsstücken eine große Wassermenge aufgenommen wird. Anschließend steigt die Gewichtszunahme, nach linearem Verlauf, um 2M%. Während des Beobachtungszeitraums waren an den Proben keine Schäden zu erkennen. Durch weitere Wasserlagerung wurden Schäden, zu späteren Zeitpunkten, deutlich.

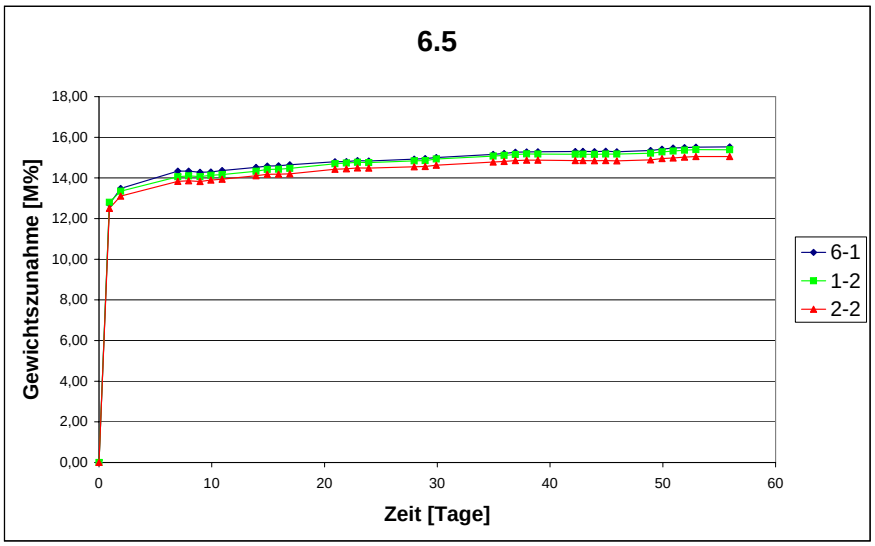

Abbildung 5.3: Massenzunahme durch Wasserlagerung 6.5

1.6 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Wie aus Abbildung 5.4 ersichtlich wird, erfolgt von Beginn an ein gleichmäßiger und nahezu linearer Massenanstieg. Der plötzliche, eindeutige Anstieg der Wasseraufnahme weist auf Veränderunge im Material hin. Risse bilden sich an den Proben und vergrößern den Porenraum, dadurch kann zusätzlich Wasser aufgenommen werden, die Kurve wird steiler, bis das Versuchsstück völlig zerstört ist. Der Anstieg der Wasseraufnahme bedeutet nicht gleichzeitiges Auftreten eines Schadens. Erste Risse konnten erst 9 Tage nach einer auffallenden Gewichtszunahme erkannt werden (siehe Tabelle 4.22).

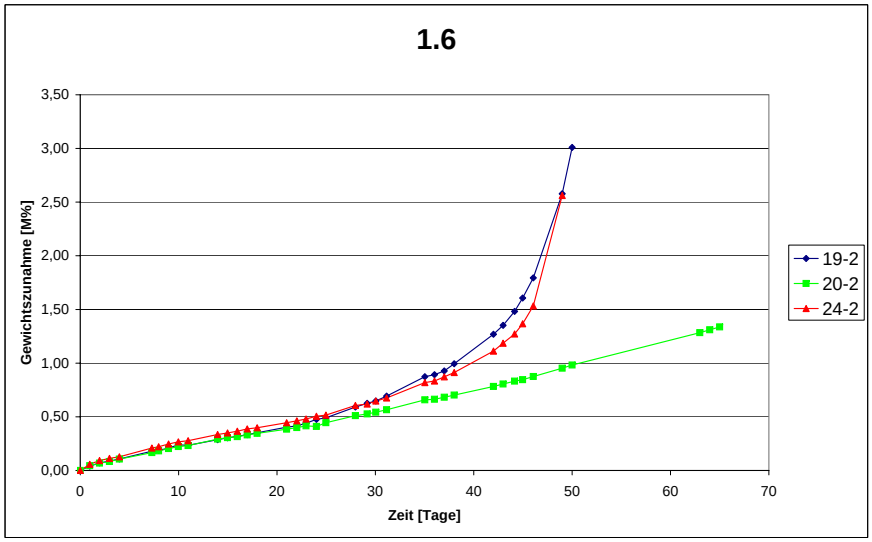

Abbildung 5.4: Massenzunahme durch Wasserlagerung 1.6

2.6 - Feuchtigkeit: Feuchtigkeitsgehalt bei 23°C/95%; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Die Kurven in Abbildung 5.5 verlaufen ähnlich und gleichmäßig. An den Proben waren keine Schäden zu verzeichnen. Die Gewichtszunahme steigt um etwa ein Prozent durch Wasseraufnahme. Die Proben weisen keine Schäden auf.

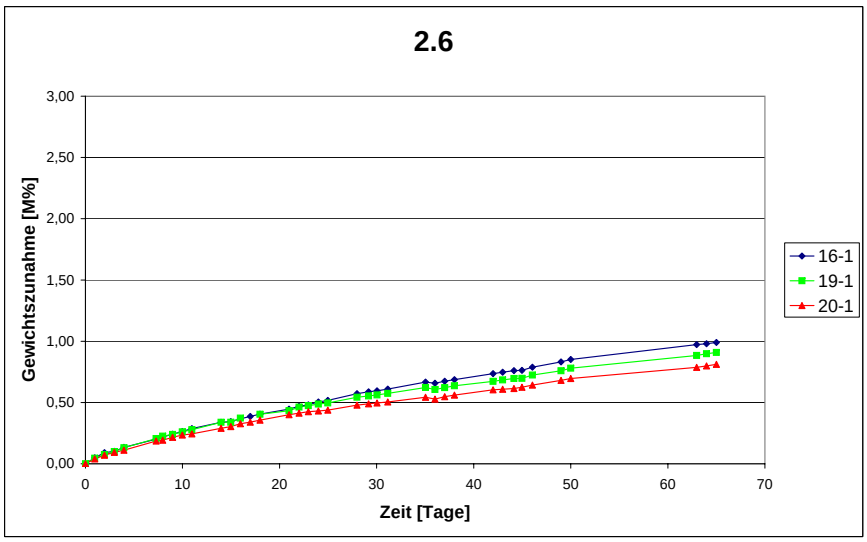

Abbildung 5.5: Massenzunahme durch Wasserlagerung 2.6

4.6 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 120°C; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Abbildung 5.6 zeigt während des Beobachtungszeitraums von 65 Tagen einen stetigen Anstieg der Wasseraufnahme, bis zu einen Wert von etwa 0,5 %. Schäden waren im beobachteten Zeitraum nicht erkenntlich, erst danach kam es zur Zerstörung der Proben durch fortlaufende Wasserbelastung.

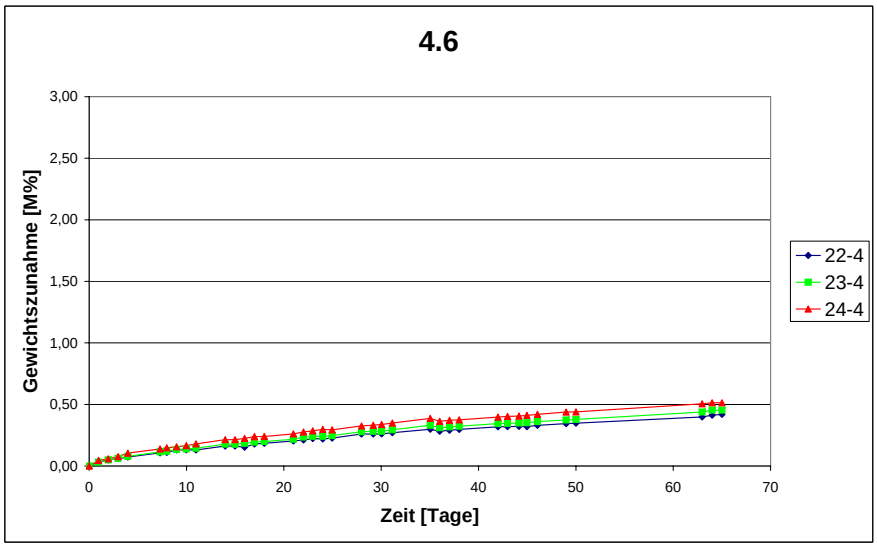

Abbildung 5.6: Massenzunahme durch Wasserlagerung 4.6

5.6 - Feuchtigkeit: kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Die Massenzunahme dieser Serie zeigt, im Vergleich zu weiteren Serien mit einer Paraffintränkung bei 120°C, von Anfang an einen deutlich steileren Anstieg. In der Abbildung 5.7 ist der Schadenszeitpunkt von zwei Proben, durch plötzlichen Anstieg der Wasseraufnahme klar zu erkennen. Der Schaden macht sich jeweils 2 Tage nach Beginn der deutlichen Massenzunahme bemerkbar. Das dritte Versuchsstück zeigte Schäden und Risse nach dem beobachteten Zeitraum, durch weiter andauernde Wasserlagerung.

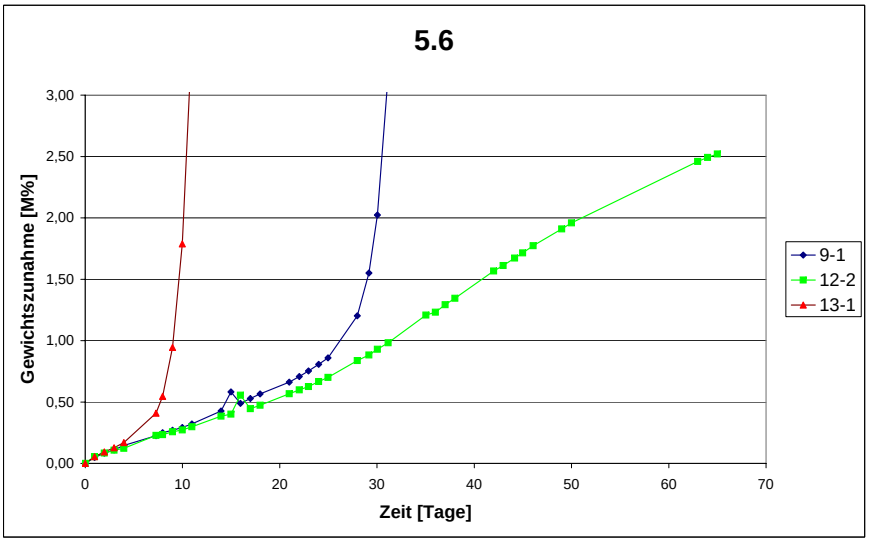

Abbildung 5.7: Massenzunahme durch Wasserlagerung 5.6

6.6 - Feuchtigkeit: vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme: Eintauchen bei 120°C

Wie in Abbildung 5.8 ersichtlich wird, steigt die Massenzunahme stetig an und ändert sich während der Wasserlagerung von 65 Tagen um zirka 0,6 %. An den Proben sind keine Schäden und Risse zu erkennen.

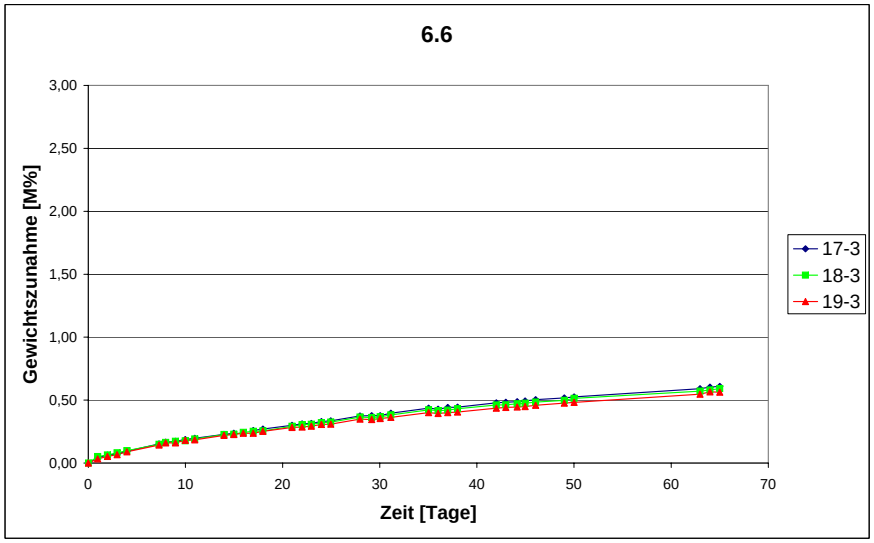

Abbildung 5.8: Massenzunahme durch Wasserlagerung 6.6

In Abbildung 5.9 und 5.10 sind Diagramme der Wasseraufnahme von Proben nach SMK-Behandlung dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass sich die Wasseraufnahme allmählich einem Maximalwert annähert, im Gegensatz zu paraffinbehandelten Proben, die einen stetigen, gleichmäßigen Anstieg aufweisen. SMK-Proben erfahren durch die Wasserbelastung, auch nach der Beobachtungszeit von 50 Tagen keine Schäden (siehe auch Kapitel 4.4.1). Die Abbildung beschränkt sich wie auch bei den paraffinbehandelten Proben auf jene, die vollständig in SMK eingetaucht waren, dadurch können aussagekräftige Aufnahmekurven gewonnnen werden.

SMK 2.2 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 80°C; SMK-Aufnahme: vollständiges Eintauchen

Bei 80°C temperaturbehandelte Proben wurde vollständig in Silikonmikroemulsion getaucht, dabei konnte ein SMK-Gehalt von 3,10 bis 4,40 M% erreicht werden. Durch anschließende Wasserlagerung und Messungen über 50 Tage, konnte die in Abbildung 5.9 dargestellte Massenzunahme ermittelt werden. Anfangs zeigt sich ein rascher Anstieg der Kurve, der dann gegen einen Grenzwert von ca. 2,0 bzw. 2,5 M% abflacht. An den Proben konnten auch nach der Beobachtungszeit keine Schäden oder Veränderungen erkannt werden.

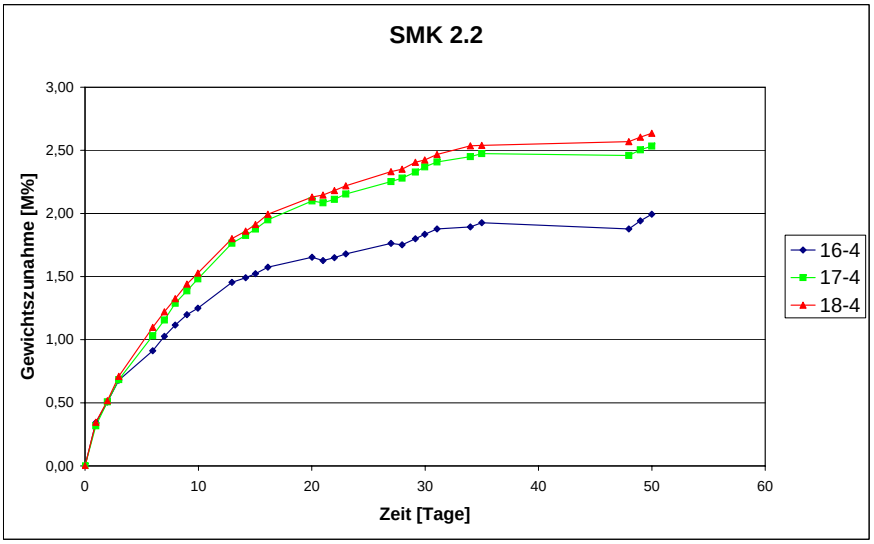

Abbildung 5.9: Massenzunahme durch Wasserlagerung SMK 2.2

SMK 3.2 - Feuchtigkeit: Trocknung bei 120°C; SMK-Aufnahme: vollständiges Eintauchen

Die Proben wurden mit einer Temperatur von 120°C vorbehandelt und anschließend in SMK getaucht. Durch die Behandlung über 6 Stunden stellten sich SMK-Gehalte von 3,10 bis 4,10 M% ein. Zu Beginn der Wasserlagerung nahmen die Proben rasch an Masse zu, die Kurve näherte sich dann langsam einem Maximalwert zwischen 2,0 und 3,0 M%. Der Verlauf der Massenzunahme ist in Abbildung 5.10 ersichtlich. Durch die Wasserbelastung wurden keine Schäden oder Veränderungen hervorgerufen.

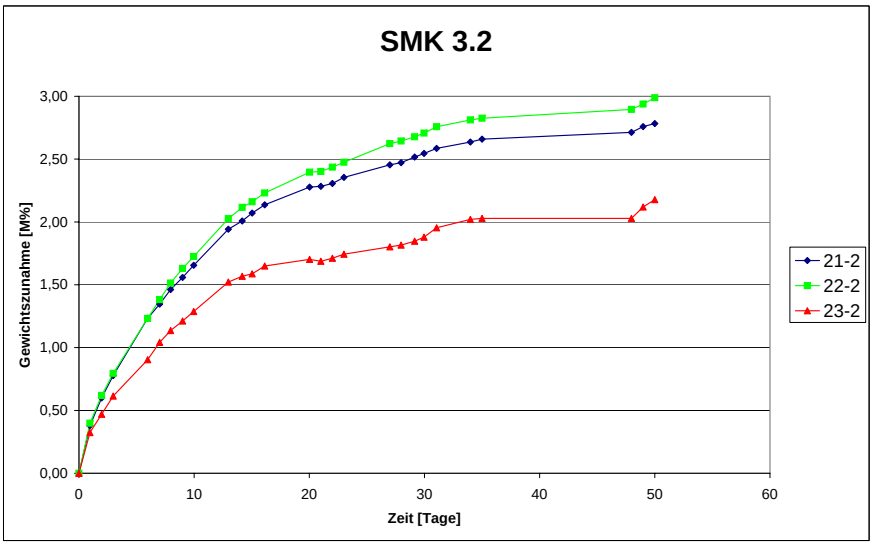

Abbildung 5.10: Massenzunahme durch Wasserlagerung SMK 3.2

5.2.2 Elektronisches Mikroskop

Die Aufnahmen mittels Auflichtmikroskop erfolgten unter keinem zuvor festgelegten Maßstab. Zur Erkennung der Vergrößerung wurde der Abstand eines Millimeters maßstäblich eingetragen. Die Untersuchung beschränkte sich nur auf einige ausgewählte Proben.

Der erste Vergleich beabsichtigt einen Unterschied zwischen einem unbehandelten Kalksandstein und einer paraffinbehandelten Probe zu erkennen. Für diese Gegenüberstellung wurden eine Referenzprobe REF und eine, bei 120°C, in Paraffin getränkte, zuvor vollständig wassergesättigte Probe 6.6, herangezogen. Der Paraffingehalt dieser Probe liegt bei etwa 13 %.

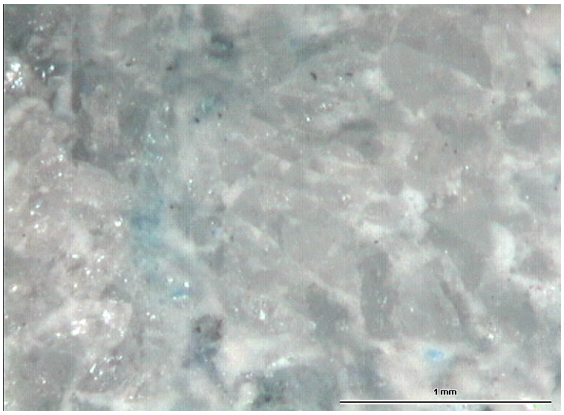

Abbildung 5.11: REF

Abbildung 5.12: 6.6

An den Proben in Abbildung 5.11 und 5.12 sind keine wesentlichen Unterschiede zu erkennen. Die verschiedene Farbgebung der Aufnahmen ist hauptsächlich mit der Änderung des Lichteinfalls des Mikroskops begründet. Paraffin ist nicht eindeutig festzustellen, da weiße Zwischenräume, die für Paraffin sprechen, auch an der Referenzprobe vorkommen. Allerdings verändert Paraffin durch die Erwärmung auf 120°C, seine zuvor weiße Farbe in einen Gelbton. Dadurch kann an den gelben Flecken in Abbildung 5.12 Paraffin erkannt werden.

Weitere Aufnahmen versuchen Veränderungen an Proben mit Schäden zu erkennen. Zu diesem Zweck wurden Versuchsstücke der selben Vorbehandlung - 1.6 Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 120°C - intakt mit nicht intakt - gegenübergestellt.

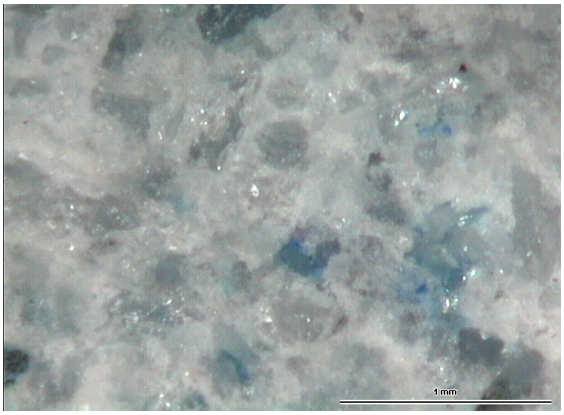

Abbildung 5.13: 1.6

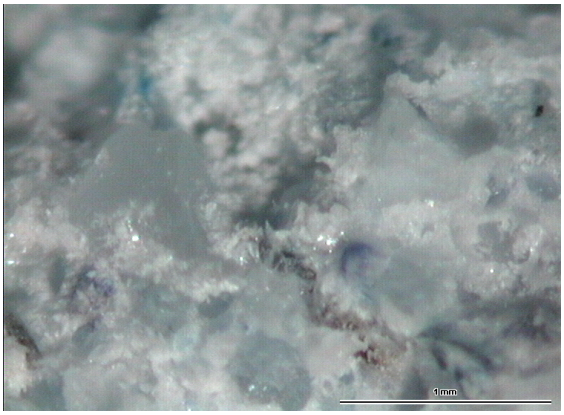

Abbildung 5.14: 1.6 nicht intakt

Der wesentliche Unterschied der Abbildungen 5.13 und 5.14 liegt in der Struktur der untersuchten Materialien. Es ist deutlich zu erkennen, dass die intakte Probe eine feste, kompakte Verbindung aufweist. Im Gegensatz dazu, sind an der zerstörten Probe spitze, kristalline Formen an den Sandkörnern ersichtlich. Die teilweise Unschärfe des Bildes der zerstörten Probe kommt daher, dass zur Untersuchung ein Bruchstück, und keine ebene Oberfläche verwendet werden musste.

Durch Schneiden oder Schleifen würde das brüchige Material, das in seinem Gefüge zerstört ist, völlig zerbröseln. Von den intakten Proben wurde mittels Steinsäge unter Wasserkühlung eine Scheibe abgeschnitten, und ohne weiteres Schleifen, unter dem Mikroskop betrachtet. Die Schnittfläche bildet eine ebene Oberfläche, die gut und scharf eingelesen werden kann.

5.2.3 Raster-Elektronen-Mikroskop

Zur Erzielung höherer Auflösungen und Vergrößerungen, wurde ein REM verwendet. Es wurde versucht, vergleichbare Vorbehandlungen mit unterschiedlichen Vergrößerungen gegenüberzustellen.

1. Vergleich einer Referenzprobe, mit einer Probe der Vorbehandlung - 1.5 Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 80°C - intakt und nicht intakt. Als Vergleichsmaßstab wurde vorerst 1:100 gewählt.

In Abbildung 5.15 und 5.16 ist zu erkennen, dass die Referenzprobe und die intakte, paraffinbehandelte Probe eine ähnliche Struktur aufweisen. Das Paraffin in 1.5 ist nicht eindeutig festzustellen. Im Gegensatz zu diesen beiden Aufnahmen zeigt Abbildung 5.17, die zerstörte Probe der Vorbehandlung 1.5, eine wesentlich weniger kompakte Struktur. Das Material wirkt klüftiger und kantiger.

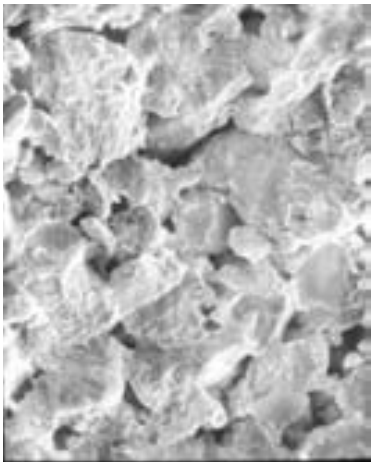

Abbildung 5.15: REF, 1:100

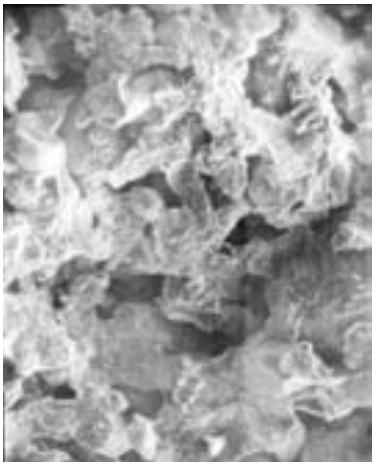

Abbildung 5.16: 1.5 intakt, 1:100

Abbildung 5.17: 1.5 n. intakt, 1:100

2. Selber Vergleich Referenzprobe - 1.5 intakt und nicht intakt mit der Vergrößerung 1:3000.

Durch die große Vergrößerung und der damit kleine Bereich der Aufnahme, nimmt die Vergleichbarkeit der Bilder deutlich ab. In Abbildung 5.18 bis 5.20 sind die spitzen, kristallinen Formen der CSH-Phasen zu erkennen, die auf den Sandkörnern aufreiten und für das Gefüge des Kalksandsteins verantwortlich sind. Abbildung 5.19 und 5.20 zeigen eine feinere und spitzere Struktur der CSH-Phasen, die möglicherweise nachträglich gebildet wurden, gegebenenfalls ist auch Paraffin erkennbar.

Abbildung 5.18: REF, 1:3000

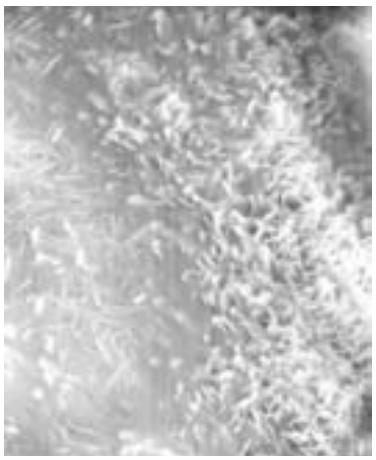

Abbildung 5.19: 1.5 intakt, 1:3000

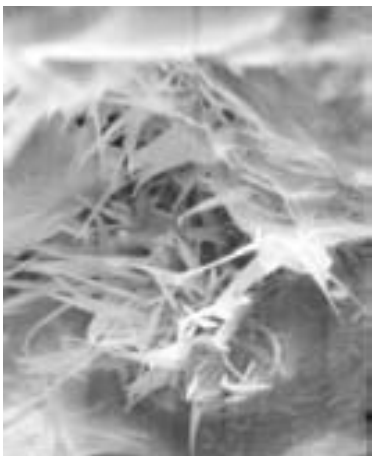

Abbildung 5.20: 1.5 n. intakt, 1:3000

3. Vergleich von einer Referenzprobe mit intakten und nicht intakten Proben der Vorbehandlung 1.6 Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 120°C, mit einer Vergrößerung von 1:1000.

An der Referenzprobe in Abbildung 5.21 sind spitze, aufreitende CSH-Phasen ersichtlich, die für das feste Gefüge des Kalksandsteins verantwortlich sind. In Abbildung 5.22 ist, an der weißen tropfenartigen Ausbildung, möglicherweise Paraffin zu erkennen. Im Gegensatz dazu findet man in Abbildung 5.23 eine blütenartige Struktur, die als nachträglich ausblühende Kalkphase gedeutet werden kann. Klare Unterschiede bzw. Auflockerungen des Gefüges sind in dieser Gegenüberstellung nicht erkennbar.

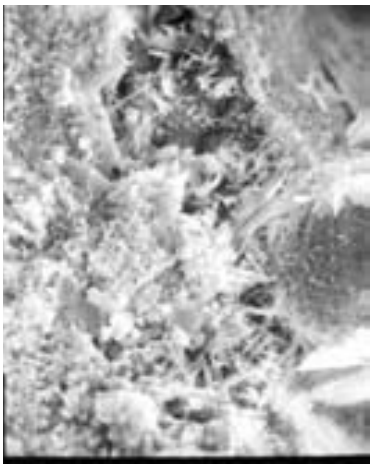

Abbildung 5.21: REF, 1:1000

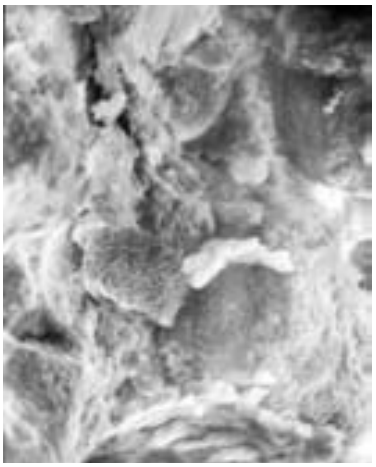

Abbildung 5.22: 1.6 intakt, 1:1000

Abbildung 5.23: 1.6 n. intakt, 1:1000

4. Vergleich von unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten im Maßstab von 1:2000 - 4.6 Trocknung bei 120°C; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 120°C - mit intakten bzw. nicht intakten Proben der Vorbehandlung 5.6 kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 120°C

Die Abbildung 5.24 bis 5.26 zeigen verschiedene Arten von CSH-Phasen. Ein Unterschied zwischen den verschiedenen Vorbehandlungen und dem zerstörten Material ist nicht eindeutig festzustellen. Die kristallinen Formen bilden sich ähnlich aus, an den gezogenen, weißen Teilen ist gegebenenfalls Paraffin erkennbar. Proben der Versuchsreihe 4.6 kommen nach dem Beobachtungszeitraum, durch fortlaufende Wasserlagerung zu Schaden. Eventuell sind Vorzeichen eines Schadensprozesses an der Aufnahme 5.24 bemerkbar.

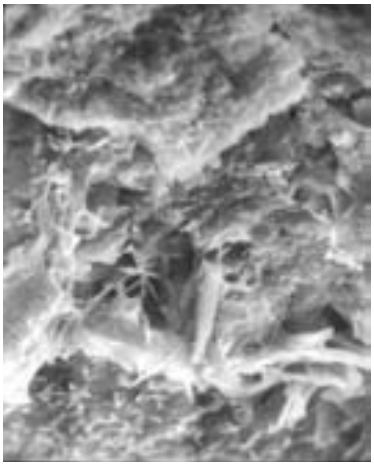

Abbildung 5.24: 4.6 intakt, 1:2000

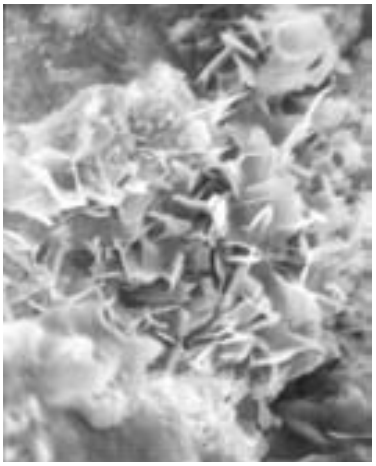

Abbildung 5.25: 5.6 intakt, 1:2000

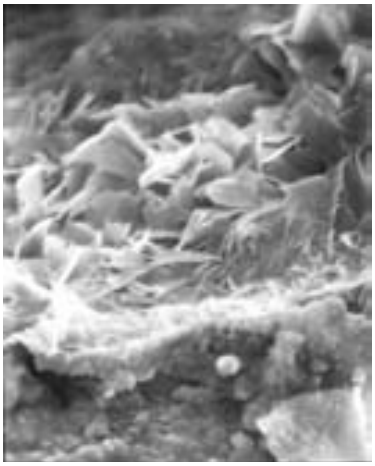

Abbildung 5.26: 5.6 n. intakt, 1:2000

5. Vergleich von Proben unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalts bei gleicher Art der Paraffinaufnahme - 5.5 kapillare Wassersättigung; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 80°C - 6.5 vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 80°C.
Weiters Vergleich von Proben gleichen Feuchtigkeitsgehalts und unterschiedlicher Art der Paraffinaufnahme - 6.5 vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 80°C - 6.6 vollständige Wassersättigung; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 120°C.
Der Vergrößerungsmaßstab ist 1:1500.

Es sind wiederum CSH-Phasen verschiedener Ausbildung zu erkennen, Einflüsse und Unterschiede durch die Vorbehandlung sind nicht klar abzugrenzen. Jedoch zeigt Abbildung 5.28 Ähnlichkeiten mit Abbildung 5.27, als auch 5.29. Der untere Teil der Aufnahme 6.5 kann dem rechten Bild 5.27, der Vorbehandlung 5.5 zugeordnet werden. Der obere Teil zeigt Ähnlichkeiten mit dem linken Bild 5.29 mit der Vorbehandlung 6.6.

Der Unterschied der Strukturen kann an der Verteilung des Paraffins im Kalksandstein liegen, welches möglicherweise in den Abbildungen zu erkennen ist. Weiters ist anzumerken, dass Proben der Serie 6.5 nach Ende der Beobachtungszeit zu Schaden kamen.

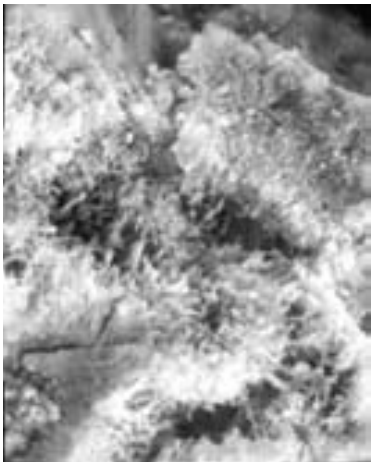

Abbildung 5.27: 5.5 intakt, 1:1500

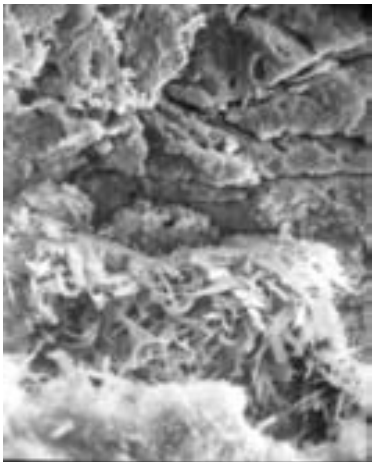

Abbildung 5.28: 6.5 intakt, 1:1500

Abbildung 5.29: 6.6 intakt, 1:1500

Die Aufnahmen durch das Raster-Elektronen-Mikroskop bestätigen nur, was schon rein visuell feststellbar war. Das heißt, kaputte Proben weisen verändertes bzw. zerstörtes Gefüge auf. Eine klare Aussage über die Paraffinverteilung und dessen Auswirkungen auf den Kalksandstein konnten aus diesen Untersuchungen nicht getroffen werden.

5.2.4 Quecksilber-Porosimetrie

Die Quecksilberporosimetrie gibt Auskunft über Materialkennwerte, wie kumulatives Porenvolumen und Porenradienverteilung. Durch den Verlauf der Porenradienverteilung kann das Wasseraufnahmeverhalten eines Materials erkannt und beurteilt werden, so sind Poren im Größenbereich von 10^{-7} bis $10^{-4}m$, sogenannte Kapillarporen, verantwortlich für kapillar wirkende Kräfte eines Baustoffs.

In Abbildung 5.30 ist eine Gegenüberstellung von unbehandelten Kalksandstein (ROH), 4.6 intakt (22-4 intakt) und 4.6 nicht intakt (23-4 nicht intakt) zu finden. Die Vorbehandlung 4.6 bedeutet Trocknung der Probe bei 120°C und anschließende Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 120°C.

Das gesamte kumulative Porenvolumen des unbehandelten Kalksandstein (ROH) liegt bei etwa $170mm^3/g$, durch die Behandlung mit Paraffin (22-4) wird dieses auf ungefähr $30mm^3/g$ reduziert, nach der Schädigung des Materials durch Wasserbelastung (23-4) steigt das gesamte Porenvolumen auf zirka $70mm^3/g$.

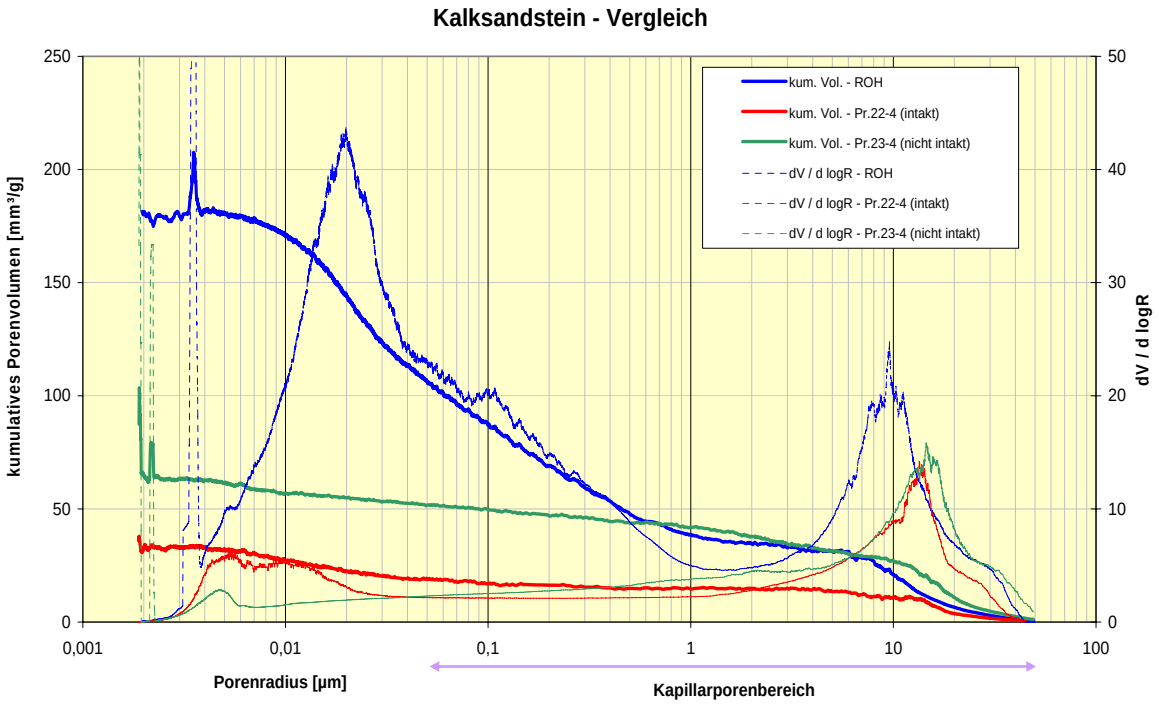

Abbildung 5.30: Porenradienverteilung; Vergleich von KS

Für den unbehandelten Kalksandstein existieren im Wesentlichen zwei Bereiche mit hohem Porenanteil. Der betragsmäßig höhere Anteil liegt im Feinporenbereich von $0,01\mu m$ bis $0,02\mu m$, der geringere bei $10\mu m$ im oberen Kapillarporenbereich. Die paraffinbehandelten Proben weisen nur einen Bereich mit hohem Porenanteil auf, der etwas verschoben, im Vergleich zum unbehandelten KS, bei ungefähr $15\mu m$ liegt.
Es "entstehen"keine zusätzlichen Poren bei der Tränkung mit Paraffin. Größere Poren, welche außerhalb des Messbereichs liegen, dadurch am Verlauf der unbehandelten Probe (ROH) nicht ersichtlich sind, werden durch die Behandlung mit Paraffin geschlossen bzw. verkleinert und verschieben sich in den gemessenen Bereich.

Da die Kurven der paraffinbehandelten Proben intakt und nicht intakt höhenversetzt, aber ähnlich verlaufen, liegt demnach der Unterschied nur in der Höhe des Porenvolumens und nicht in unterschiedlichen Radien. Somit wirkt der Schaden über den gesamten Kapillarporenbereich.

5.2.5 Röntgendiffraktometrie

Untersucht wurden ein unbehandelter Kalksandstein REF, eine zerstörte Probe 1.5X der Vorbehandlung Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 80°C und je eine intakte 1.6 und eine nicht intakte 1.6X Probe der Vorbehandlung Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 120°C.
Die Aufnahme erfolgte mittels Bandschreiber von einem Reflektionswinkel 2° bis 60°. Die Auswertung wurde mit Hilfe von Tabellen über den Reflektionswinkel vorgenommen. Ein Ausschnitt der aufgenommenen Funktion ist in Abbildung 5.31 ersichtlich.

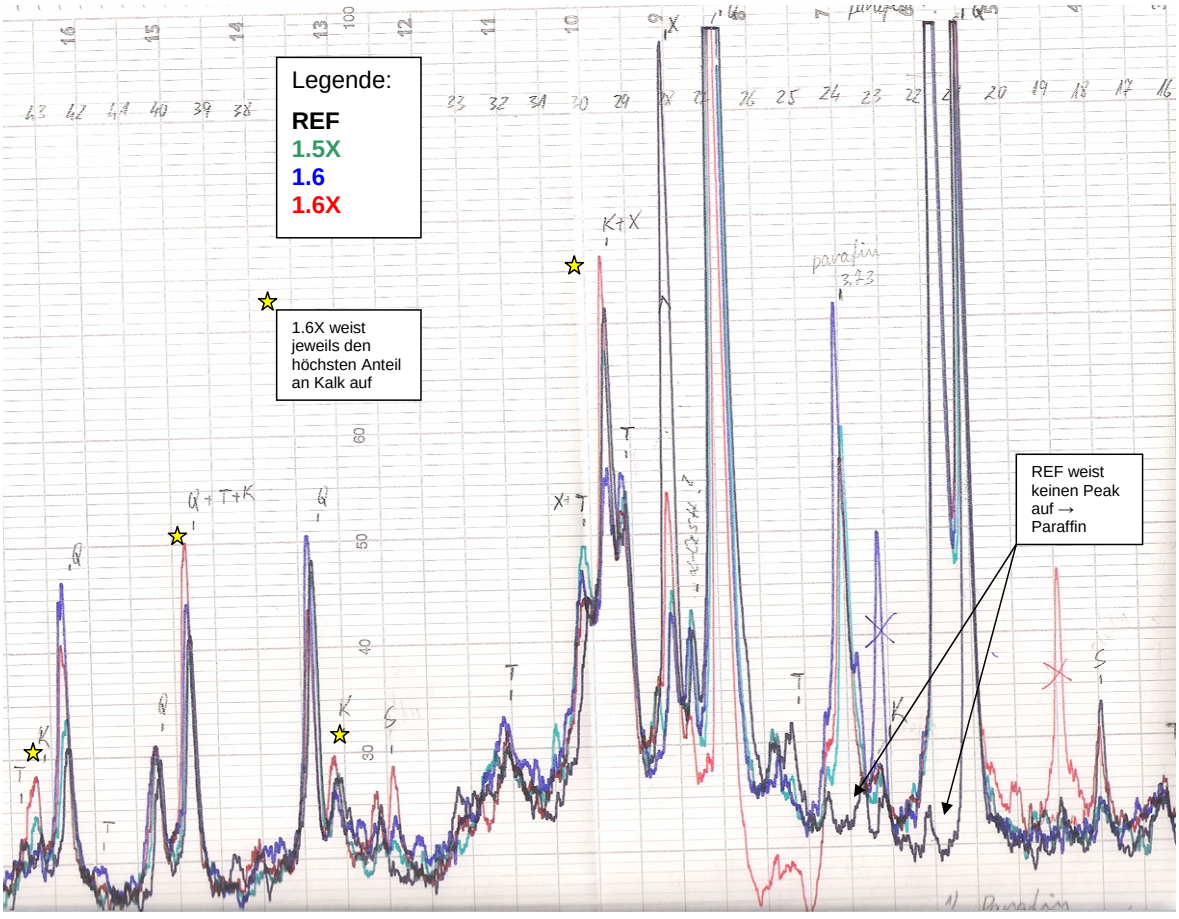

Abbildung 5.31: Röntgendiffraktometrie - Ausgabe

Die quantitative Menge eines Kristalls kann üblicherweise mittels Integration, der unter der Funktion liegenden Fläche, ermittelt werden. Diese Aufzeichnung liefert allerdings nur qualitative Aussagen, da kein Bezugswert bekannt ist.
Die ausgekreuzten Peaks bei etwa 19° und 23° sind als Messfehler identifiziert worden und gehen daher in keine Auswertung ein.
Identifizierte Bestandteile:

Paraffin

Q	Quarz	SiO_2
K	Kalzit	$CaCO_3$
T	Tobermorit	$C_5S_6H_5$
X	Xonolith	C_5S_5H
S	Muskovit	
CSH II	Kalziumhydrosilikat	

Grundsätzlich zeigen die untersuchten Proben Peaks an den selben Stellen, sie enthalten die selben Kristallarten. Ausgenommen die Spitzen bei etwa 22° und 24° - diese Ausschläge deuten auf Paraffin hin, welches in der Referenzprobe REF nicht enthalten ist. Diese Erscheinung ist außergewöhnlich, durch die amorphe Form des Paraffins wurde ein Peak an dieser Stelle nicht erwartet.
Alle weiteren Ergebnisse unterscheiden sich ausschließlich in der Höhe, das heißt in der Menge der jeweiligen Kristallart. Auffällig oft zeigt die zerstörte Probe 1.6X den größten Ausschlag bei Kalkkristallen. Dadurch kann angenommen werden, dass nachträglich zusätzliche CSH-Phasen gebildet werden. Durch den Umwandlungsprozess wird das Material in seinem Gefüge gestört und es kommt zu Schäden. Das Auftreten eines größeren Ausschlags bei Kalkkristallen, ist allerdings bei der ebenfalls zerstörten Probe 1.5X nicht zu bemerken.

5.2.6 DTA

Die Untersuchung mittels DTA wurde von Dritten, während meines Aufenthalts in Brünn, durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse ist mit einigen Unklarheiten verbunden. Somit kann nicht angegeben werden, ob die Prüfung unter Stickstoff oder Luft erfolgte. Weiters kann nicht festgestellt werden, welches Material Referenzmaterial war. Auf die Darstellung der Diagramme und Beschriftungen konnte kein Einfluss genommen werden. Dies ist einerseits bedauerlich, andererseits bin ich dankbar, dass diese Untersuchung vorhanden ist.

Ziel des Versuchs ist, Änderungen der Phasen im Material aufzufinden, die zur Schädigung der Proben führten. Analysiert werden Proben der Vorbehandlung 1.6 Feuchtigkeitsgehalt bei Raumklima; Paraffinaufnahme durch Eintauchen bei 120°C - intakt und nicht intakt.

Abbildung 5.32 zeigt Ergebnisse der Prüfung der intakten Probe. Die blau dargestellte Linie gibt den Verlauf der DTA wieder, die schwarze den der Thermogravimetrie (TG). Der Abfall der blauen Linie - DTA bei zirka 250°C deutet auf das Entweichen von Wasser und Paraffin hin. Der dadurch entstehende Massenverlust ist an der schwarzen Linie - TG zu erkennen. Der gemessene Wert von 19 %, beinhaltet den Paraffingehalt der untersuchten Probe von 12 %, plus zusätzlich entweichendes Wasser. Der gesamte Massenverlust von zirka 28 % enthält, eine vergleichsweise geringe Menge zusätzlicher Stoffe, die bei höheren Temperaturen entweichen. Auffälligkeiten wurden sonst keine bemerkt.

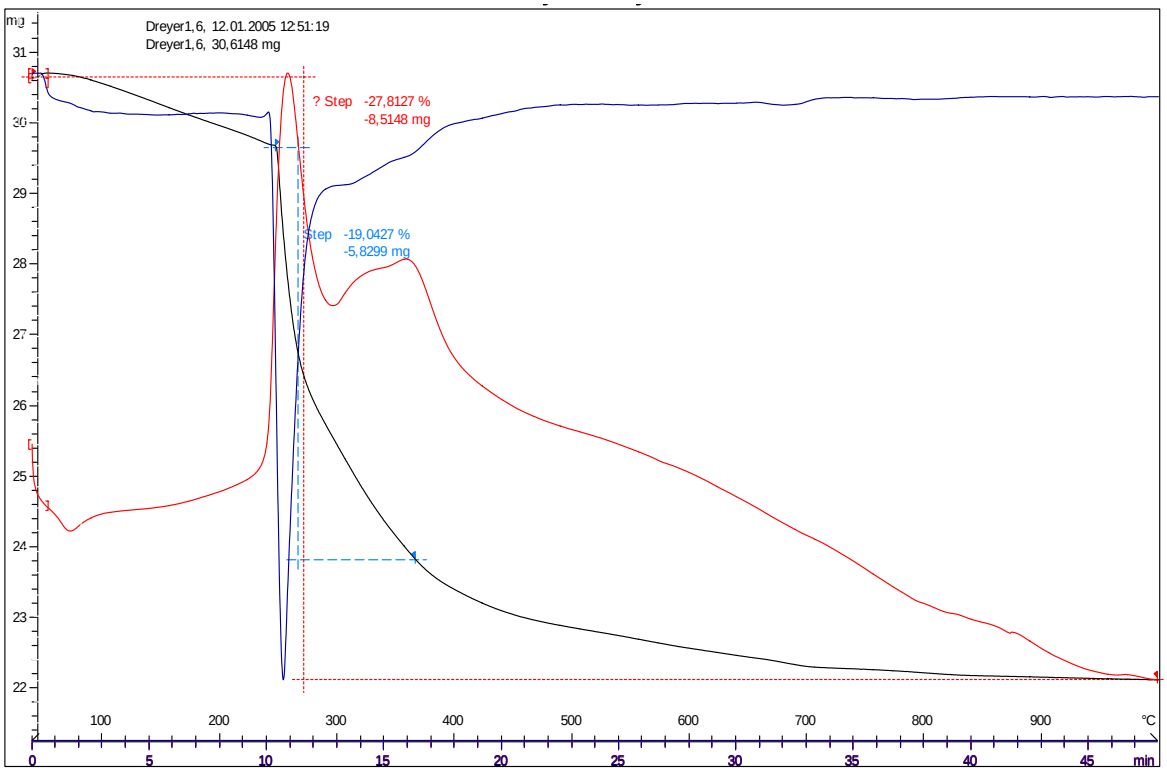

Abbildung 5.32: DTA-Analyse 1.6 intakt

In Abbildung 5.33 sind die Ergebnisse der zerstörten Probe 1.6 ersichtlich. Im Vergleich zu vorhergehenden Darstellung sind hier die Farben der Linien vertauscht. Am Verlauf der roten - DTA und der schwarzen Linie - TG ist wie oben zu erkennen, dass bei einer Temperatur von etwa 250°C Wasser und Paraffin entweicht. Am Vergleich des Massenverlusts von 23 % mit dem Paraffingehalt der untersuchten Probe von 16 %, kann entweichendes Wasser in seiner Menge abgeschätzt werden.
Zusätzlich kommt bei ungefähr 740°C ein weiterer Peak zum Vorschein. Ursache dafür könnte entweichendes Wasser der CSH-Phasen oder CO_2 sein. Da ein ähnlicher Knick der DTA in der Analyse der intakten Probe nicht zu erkennen ist, weist dies auf eine Modifikation der CSH-Phasen hin.

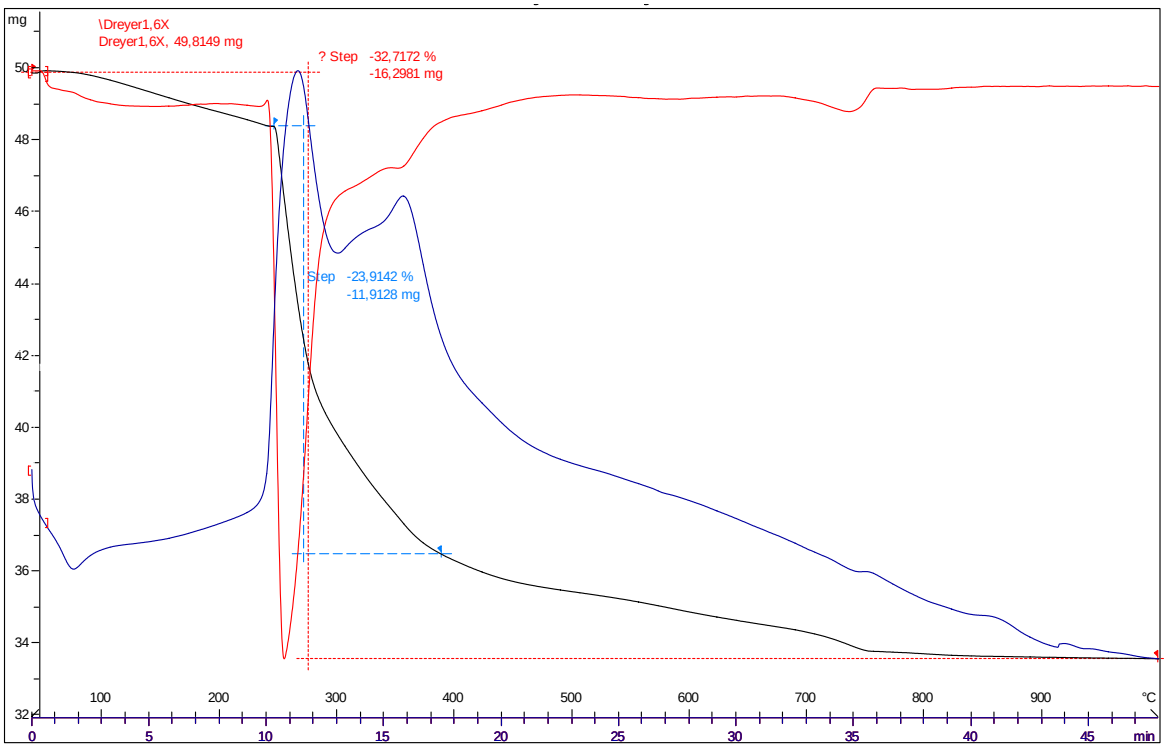

Abbildung 5.33: DTA-Analyse 1.6 nicht intakt

5.3 Identifizierung der Schadensursache

Nach bisherigen Stand der Untersuchungen kann eine eindeutige Aussage über die Schadensursache nicht getroffen werden. Vielmehr konnten verschiedene Theorien für mögliche Gründe der Inkompatibilität von Kalksandstein und Paraffininjektion aufgestellt werden. Keine der folgenden Theorien ist bestätigt, deswegen sind Einfluss und Auswirkungen in weiteren Versuchen zu prüfen und zu untersuchen.

5.3.1 Veränderung der Porenstruktur

Eine Schadensmöglichkeit, verursacht durch die Veränderung der Porenstruktur geht von hygrischen Volumsveränderungen aus.
Bei der Penetration mit Paraffin werden nicht alle Hohlräume verfüllt, bzw. kommt es zu einer Verschiebung der Porenradienverteilung (Quecksilberporosimetrie, siehe Abbildung 5.30). Über kleine Poren und Kapillaren gelangt das Wasser in das Material. Der Anteil ist sehr gering im Vergleich zu unbehandelten Material, aber eine Wasseraufnahme des paraffinpenetrierten Kalksandsteins ist durch die Messungen der Massenzunahme (siehe Kapitel 5.2.1) bestätigt.
Bei Wasseraufnahme quillt nahezu jedes gängige Baumaterial, unter anderem auch Kalksandstein (vergl. Messungen in [Vol03]). Durch die Verfüllung des Porensystems mit Paraffin steht wenig Raum zur Verfügung, um Volumsveränderungen durch Quellen aufzunehmen. Dadurch entstehende innere Kräfte führen zur Zerstörung.
Durch den Verschluss von mehr Poren, kann weniger Wasser bzw. nicht ausreichend Wasser für eine Volumsveränderung in den Kalksandstein eindringen, und das Gefügesystem bleibt intakt. Hierzu muss untersucht werden, ob sich die Paraffinverteilung von intakten und nicht intakten Proben unterscheidet, da die enthaltenen Paraffinmengen annähernd gleich sind (vergl. Tabellen 3.2 und 5.1 bzw. 6.1).

5.3.2 Verseifung

Unter Verseifung versteht man die Spaltung eines Esters in Alkohol und Carbonsäure im basischem Medium (pH-Wert > 9). Ester sind farblose, neutrale, brennbare Flüssigkeiten, die überwiegend in Wachsen auftreten.

$$\text{Ester} + \text{Wasser} \rightarrow \text{Alkohol} + \text{Säure}$$

Paraffin bringt Ester ein und im Kalksandstein entsteht durch das vorhandene Kalziumhydroxid und Tobermorit (Röntgendiffraktometrie, siehe Abbildung 5.31) ein basischer Zustand. Die Reaktionsträgheit des Paraffins wird durch die feine Verteilung

im Porensystem des Kalksandsteins herabgesetzt. Die feine Verteilung hat eine große Angriffsfläche zur Folge, so kann sich mit dem anstehenden Wasser eine Paraffinsuspension bilden, die zur irreversiblen Verseifung führt. Durch diese Reaktionen entstehen Kräfte und Drücke im Porensystem des Materials, die die Festigkeit des Kalksandsteins übersteigen und diesen in seiner Gefügestruktur schädigen.

Eine vom Paraffinerzeuger durchgeführte Extraktion ergab leichte Anzeichen für Oxidation (nachgewiesene Alkohol- und Ketongruppen), das deutet auf eine hohe thermische Belastung hin, welche bei der Paraffinaufnahme auch aufgebracht wurde. Die dabei aufgebauten chemischen Sauerstoff-Funktionen reichen nach dieser Auswertung zur Reaktion mit der Kalkmatrix jedoch nicht aus.

5.3.3 Modifikation der CSH-Phasen

Diese Theorie basiert auf dem Vorgang der Karbonatisierung. Aus Ergebnissen der Röntgendiffraktometrie und der DTA kann vermutet werden, dass im verwendeten Kalksandstein Freikalk $Ca(OH)_2$ vorhanden ist, der durch eindringendes Kohlendioxid CO_2 karbonatisiert:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + 2 * H_2O$$

Durch das Paraffin im Porensystem des Kalksandsteins wird die Bildung der Kristalle behindert, da wenig Expansionsraum vorhanden ist. Dieser Prozess hat einen Druckaufbau zur Folge, der zur Zerstörung des Gefüges führt. Der Schaden tritt während der Wasserbelastung auf, weil CO_2 im Wasser enthalten ist und dadurch schneller an den Freikalk gelangt, als ausschließlich durch Diffusion.

Die Möglichkeit, dass dies der Grund für die Zerstörung des Kalksandstein sein könnte, ist nicht widerlegt aber auch nicht bestätigt. Das schnelle Auftreten eines Schadens bei einigen Versuchsreihen (Schadenszeitpunkt 1 Tag nach Beginn der Wasserlagerung) spricht weniger für einen Karbonatisierungsvorgang, die Theorie sollte aber weiter verfolgt werden. Dabei sind folgende Punkte zu untersuchen und zu prüfen:

- Bestimmung von Freikalk;
  Ist Freikalk vorhanden und in welchem Ausmaß? Ist ausreichend CO_2 für eine Reaktion zur Verfügung?

- Untersuchung von Treiberscheinungen und Karbonatisierung;
  Hinweise für erhöhte Kalkbestandteile in zerstörten Proben sind durch die Röntgendiffraktometrie gegeben (siehe Abbildung 5.31). Es ist zu untersuchen, ob flüssiges Paraffin mit Kalksandstein reagiert oder Stoffe entstehen, die treibende Effekte verursachen können.

Weiters ist zu prüfen, ob eine Zerstörung durch Karbonatisierung zustande kommen kann. Demnach sollte theoretisch ein durchkarbonatisierter Kalksandstein mit Paraffin behandelbar sein, ohne später Schäden aufzuzeigen. Folgende Vorschläge für weitere Versuche sind gegeben:
- Unbehandelter KS wird mit Paraffin penetriert, anschließend unter CO_2-Zufuhr durchkarbonatisiert. Wenn die Karbonatisierung die Zerstörung beeinflußt, sollten auch Schäden ohne Wasserbelastung auftreten.
- Unbehandelter KS wird unter CO_2-Zufuhr durchkarbonatisiert, anschließend mit Paraffin penetriert. Danach folgt die Belastung durch Wasserlagerung. Hat die Karbonatisierung Einfluss auf die Zerstörung, dann sollten durch die Wasserbelastung keine Schäden auftreten.

- Reaktionen durch das flüssige Paraffin;
  Transportiert flüssiges Paraffin CO_2 ähnlich wie Wasser und kommt es dadurch zu einer erhöhten Belastung während der Paraffinbehandlung?

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht anhand verschiedener Messverfahren Zusammenhänge und Ursachen für Schäden an paraffinbehandelten Kalksandstein zu ergründen, Rahmenbedingungen und Grenzen zu finden, innerhalb derer eine Anwendung ohne schädliche Auswirkungen möglich ist.
Der Feuchtegehalt vor der Paraffineinbringung hat, nach Vergleich der Schadenszeitpunkte, Einfluss auf die Dauerhaftigkeit des Kalksandsteins. Ob die Verhinderung einer Schädigung durch einen bestimmten Feuchtegehalt bei der Paraffininjektion möglich ist, ist nicht erwiesen. Allerdings existieren Proben, die nach einer Wasserbelastung von zirka 300 Tagen (entspricht Zeitpunkt der Verfassung der Arbeit) noch keine Schäden aufweisen und der fortlaufenden Wasserlagerung unterzogen werden. Ergänzend zu Tabelle 5.1 auf Seite 53, sind in Tabelle 6.1 die bislang intakten Proben an den roten Feldern zu erkennen, die orangefarbenen kennzeichnen solche Versuchsstücke, die nach Ende der Beobachtungszeit durch die Wasserbelastung zerstört wurden (Probenbezeichnung analog Tabelle 3.1, siehe Seite 20). Da keine Aufzeichnungen mehr geführt wurden, kann eine genaue Angabe des Schadenszeitpunkts nicht gemacht werden.

Feuchtegehalt / Paraffin			Saugen				Sättigung	
			Ofen		Gradient			
			80°C	120°C	80°C	120°C	80°C	120°C
			1	2	3	4	5	6
trocken (RK)		1	1	1	1	1	2	44
Sorption (23°C/95% Lf.)		2						
therm. Vorbeh.	80°C	3	1		1		1	
	120°C	4		1		1		x
kapillare Sättigung		5	1	1		1		11
vollständige Sättigung		6	1	1		1	x	

Tabelle 6.1: Auftreten von Schäden nach Ende der Beobachtungszeit

Aus Abbildung 6.1 zeigt sich, dass sich hoher Wassergehalt und Paraffineinbringung durch Eintauchen, positiv auf die Dauerhaftigkeit auswirken. Allerdings kann diese Aussage nicht verallgemeinert werden, da die Versuchsserie 6.5 zerstört ist. Desweiteren zeigen die Versuchsserien 5.3 und 6.3 erstaunlich gute Haltbarkeit. Dieses Ergebnis hat zu weiterführenden Versuchen mit unterschiedlichen Saughöhen geführt (siehe Kapitel 4.4.3). Hierbei konnten keine konkreteren Aussagen und Ergebnisse erzielt werden. Zusammenfassend können keine Grenzen für Feuchte- und Paraffingehalt gezogen werden, da anzunehmen ist, dass noch Schäden an den intakten Proben, durch fortlaufende Wasserbelastung, auftreten.

Deutliche Unterschiede der Auswertungskurven zeigen sich bei der Massenzunahme (siehe Kapitel 5.2.1) durch Wasserlagerung bei Proben, die mit 80°C bzw. 120°C in Paraffin eingetaucht wurden. Nach einer Behandlung mit 80°C wird bei Wasserlagerung anfangs ein rascher Massenzuwachs deutlich, der nach ein bei zwei Tagen abklingt. Diese Erscheinung ist bei Proben, die bei 120°C in Paraffin eingetaucht wurden nicht zu erkennen. Weil bezüglich der Paraffingehalte keine wesentlichen Unterschiede bestehen, kann vermutet werden, dass bei der Tränkung mit 80°C, Paraffin hauptsächlich in oberflächennahen Bereichen enthalten ist. Durch eine nicht vollständig geschlossene Ummantelung kann Wasser eindringen, das innen befindliche Material nimmt rasch Wasser in einer Menge von etwa 10 bis 15 M% auf. Generell kann die Wasseraufnahme trotz Paraffintränkung begründet werden, indem Poren existieren, die während der Paraffinbehandlung ausschließlich zur Abführung von Wasser oder Luft verantwortlich sind. Solche Poren kommen mit Paraffin nicht in Berührung und werden nicht verstopft.

Die vorgenommenen mikroskopischen Aufnahmen nach Ende der Beobachtungszeit, bestätigten Unterschiede und Erkenntnisse, die schon rein visuell festzustellen waren. Zur Anwendung kamen elektronisches Mikroskop sowie Raster-Elektronen-Mikroskop. Paraffin war bei beiden Untersuchungen nicht eindeutig zu identifizieren, folglich konnte dessen Verteilung im Kalksandstein nicht beurteilt werden.

Die Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie führten zu Überlegungen bzw. Theorien, bei denen die Schadensursache an der Änderung der Porenradienverteilung liegt. Die Änderung des Porenvolumens durch die Behandlung mit Paraffin bzw. nach Auftreten eines Schadens wurde nachgewiesen. Weiters wurde erkannt, dass sich der Schaden über den gesamten Porenbereich wirkt, d.h. es existiert kein "kritischer Porenradius", der verhindert werden kann.

Die Auswertung und der Vergleich des Graphen der Röntgendiffraktometrie hat keine eindeutigen Unterschiede in der kristallinen Zusammensetzung der Proben ergeben, aber die Mengen der enthaltenen Verbindungen variierten. Das führte zur Annahme von neu gebildeten bzw. umgewandelten CSH-Phasen. Durch eine Analyse mittels DTA sollten nähere Informationen gewonnen werden.

Die Gegenüberstellung der DTA-Kurven einer intakten und einer nicht intakten Probe, der selben Versuchsserie ergab einen Unterschied im Temperaturbereich von zirka 740°C. Hierbei ist bei der nicht intakten Probe ein Knick in der Kurve zu erkennen, der bei der intakten nicht zu verzeichnen ist. Die Aussage, um welchen Stoff es sich dabei handelt, ist mit Unsicherheiten verbunden, vermutet wird CO_2 oder Wasser aus CSH-Phasen. Um genauere Ergebnisse zu erhalten werden weitere Versuche empfohlen.

Ausblickend auf weitere Untersuchungen soll der Inhalt dieser Arbeit als Grundlage und Hilfestellung für künftige Versuche dienen, um nähere Angaben über die Vorgänge und das Verhalten von paraffinbehandelten Kalksandstein zu erhalten. In weiterer Folge könnte eine Erklärung bzw. Ursache für das Auftreten von Schäden gefunden und vermieden werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1 Feuchteverteilung nach Injektion 5
2.2 KS-Herstellung 8
2.3 Probe für REM 15
2.4 Gold-Aufdampfung 15
2.5 Vakuumerzeugung 15
2.6 Floureszenzschirm 15

3.1 Probenzuschnitt aus KS - NF 21
3.2 Vesuchsaufbau-Herdplatte (kapillares Saugen) 24
3.3 Versuchsaufbau-Ofen (vollständ. Eintauchen) 24

4.1 Ausblühungen am KS 26
4.2 Lage im Wasserbad 27
4.3 1.1 30
4.4 3.1 30
4.5 5.1 30
4.6 1.2 32
4.7 5.2 32
4.8 6.2 32
4.9 1.3 35
4.10 3.3 35
4.11 5.3 35
4.12 1.4 37
4.13 5.4 37
4.14 6.4 37
4.15 1.5 40
4.16 3.5a 40
4.17 3.5b 40
4.18 1.6a 43
4.19 1.6b 43

4.20 5.6 . . . 43
4.21 Variation der Probenhöhen . . . 46

5.1 Massenzunahme durch Wasserlagerung 2.5 . . . 55
5.2 Massenzunahme durch Wasserlagerung 5.5 . . . 55
5.3 Massenzunahme durch Wasserlagerung 6.5 . . . 56
5.4 Massenzunahme durch Wasserlagerung 1.6 . . . 57
5.5 Massenzunahme durch Wasserlagerung 2.6 . . . 57
5.6 Massenzunahme durch Wasserlagerung 4.6 . . . 58
5.7 Massenzunahme durch Wasserlagerung 5.6 . . . 59
5.8 Massenzunahme durch Wasserlagerung 6.6 . . . 59
5.9 Massenzunahme durch Wasserlagerung SMK 2.2 . . . 60
5.10 Massenzunahme durch Wasserlagerung SMK 3.2 . . . 61
5.11 REF . . . 62
5.12 6.6 . . . 62
5.13 1.6 . . . 63
5.14 1.6 nicht intakt . . . 63
5.15 REF, 1:100 . . . 64
5.16 1.5 intakt, 1:100 . . . 64
5.17 1.5 n. intakt, 1:100 . . . 64
5.18 REF, 1:3000 . . . 65
5.19 1.5 intakt, 1:3000 . . . 65
5.20 1.5 n. intakt, 1:3000 . . . 65
5.21 REF, 1:1000 . . . 65
5.22 1.6 intakt, 1:1000 . . . 65
5.23 1.6 n. intakt, 1:1000 . . . 65
5.24 4.6 intakt, 1:2000 . . . 66
5.25 5.6 intakt, 1:2000 . . . 66
5.26 5.6 n. intakt, 1:2000 . . . 66
5.27 5.5 intakt, 1:1500 . . . 67
5.28 6.5 intakt, 1:1500 . . . 67
5.29 6.6 intakt, 1:1500 . . . 67
5.30 Porenradienverteilung; Vergleich von KS . . . 68
5.31 Röntgendiffraktrometrie - Ausgabe . . . 69
5.32 DTA-Analyse 1.6 intakt . . . 71
5.33 DTA-Analyse 1.6 nicht intakt . . . 72

Tabellenverzeichnis

2.1 Namen und Kurzzeichen für Kalksandsteine,Anwendungsbereiche . . . 9

3.1 Übersicht der Anfangsbedingungen 20
3.2 Übersicht der Feuchte- und Paraffingehalte 25

4.1 Beobachtungen 1.1 28
4.2 Beobachtungen 3.1 29
4.3 Beobachtungen 5.1 29
4.4 Beobachtungen 6.1 29
4.5 Beobachtungen 1.2 30
4.6 Beobachtungen 4.2 31
4.7 Beobachtungen 5.2 31
4.8 Beobachtungen 6.2 32
4.9 Beobachtungen 1.3 33
4.10 Beobachtungen 3.3 33
4.11 Beobachtungen 5.3 34
4.12 Beobachtungen 6.3 34
4.13 Beobachtungen 1.4 35
4.14 Beobachtungen 4.4 36
4.15 Beobachtungen 5.4 36
4.16 Beobachtungen 6.4 36
4.17 Beobachtungen 1.5 37
4.18 Beobachtungen 2.5 38
4.19 Beobachtungen 3.5 38
4.20 Beobachtungen 5.5 39
4.21 Beobachtungen 6.5 39
4.22 Beobachtungen 1.6 40
4.23 Beobachtungen 2.6 41
4.24 Beobachtungen 4.6 41
4.25 Beobachtungen 5.6 42

4.26 Beobachtungen 6.6 42
4.27 Übersicht der Anfangsbedingungen-SMK 45
4.28 Probenbezeichnung 46
4.29 Beobachtungen TR.6 47
4.30 Beobachtungen TR.8 47
4.31 Beobachtungen TR.10 47
4.32 Beobachtungen TR.12 48
4.33 Beobachtungen KS.6 48
4.34 Beobachtungen KS.8 48
4.35 Beobachtungen KS.10 49
4.36 Beobachtungen KS.12 49
4.37 Beobachtungen VS.6 50
4.38 Beobachtungen VS.8 50
4.39 Beobachtungen VS.10 50
4.40 Beobachtungen VS.12 51

5.1 Schadenszeitpunkt in Tagen nach Beginn der Wasserbelastung - Matrixdarstellung 53

6.1 Auftreten von Schäden nach Ende der Beobachtungszeit 76

Literaturverzeichnis

[B33] ÖNORM B3355. *Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk - Maßnahmen gegen aufsteigende Feuchtigkeit im Mauerwerk.* Teil 2. Auflage 1999.

[bam05] *http://www.bam.de.* 2005.

[BHKS80] O. Brümmer, J. Heydenreich, K.H. Krebs, and H.G. Schneider. *Handbuch; Festkörperanalyse mit Elektronen, Ionen und Röntgenstrahlen.* Fried. Vieweg und Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1980.

[CDL+94] Cordes, Diestelmeier, Linde, Martin, Meyer, and Raab. *Kalksandstein - Planung, Konstruktion, Ausführung.* Kalksandstein Information GmbH+Co KG, Hannover, Deutschland, 1994. 3. Auflage.

[Dre03a] J. Dreyer. *Skriptum - Bauphysikalische Bewertung von Sanierungskonzepten.* TU-Wien, Fakultät f. BI, Institut BBB, Fachbereich Bauphysik, 2003.

[Dre03b] J. Dreyer. *Skriptum - Bauphysikalische Diagnose.* TU-Wien, Fakultät f. BI, Institut BBB, Fachbereich Bauphysik, 2003.

[Dud97] Duden. *Das Fremdwörterbuch.* Dudenverlag, 1997. 6. Auflage.

[EF61] A. Erhardt and H. Franke. *Lueger Lexikon der Technik; Band 3; Werkstoffe und Werkstoffprüfung; A-Z.* Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1961. 4. Auflage.

[Hau02] D. Hauer. *Auswirkungen von Injektionsstoffen zur Horizontalabdichtung auf die thermische Längenänderung einzelner Mauerwerksbaustoffe.* Diplomarbeit, TU-Wien, Fakultät f. BI, Institut BBB, Fachbereich Bauphysik, 2002.

[Hec01] C. Hecht. *Bauphysikalische Bewertung ausgewählter Sanierungsvarianten unter besonderer Berücksichtigung von Paraffinen und kapillar leitfähigen Dämmstoffen.* Dissertation, TU-Wien, Fakultät f. BI, Institut BBB, Fachbereich Bauphysik, 2001.

[ISO01] ISOTEC. *Paraffininjektions-Richtlinie; Richtlinie für die Ausführung einer ISOTEC-Paraffininjektion gegen kapillare Feuchtigkeit in mineralischen Baustoffen, Merkblatt.* ISOTEC, Franchisesysteme GmbH., 2001. Stand 03/2001.

[KS005] *http://www.kalksandstein.de.* 2005.

[Maj04] R. Majdalani. *Bestimmung der Eigenschaftsänderung von Porenräumen nach Penetration von Injektionsstoffen.* Diplomarbeit, TU-Wien, Fakultät f. BI, Institut BBB, Fachbereich Bauphysik, 2004.

[Poe88] K. Poenicke. *Duden: Wie verfasst man wissenschaftliche Arbeiten?* Dudenverlag, 1988. Die Duden-Taschenbücher, Band 21; 2. neu bearb. Aufl.

[Sau00] G. Saulich. *Untersuchung mechanischer und thermischer Materialeigenschaften von Baustoffen nach Paraffinbehandlung.* Diplomarbeit, TU-Wien, Fakultät f. BI, Institut BBB, Fachbereich Bauphysik, 2000.

[SD97] Schüler-Duden. *Rechtschreibung und Wortkunde.* Dudenverlag, 1997. 5. Auflage.

[SW86] G. Staufenbiel and J. Wessing. *Bauphysik und Baustofflehre - Eine Einführung in Experimenten; Adhäsion, Porigkeit, Kapillarität.* Bauverlag GmbH., Wiesbaden und Berlin, 1986.

[Vol03] O. Vollgruber. *Untersuchungen zur hygrischen Längenänderung von Baustoffen vor und nach der Injektion zur Horizontalabdichtung.* Diplomarbeit, TU-Wien, Fakultät f. BI, Institut BBB, Fachbereich Bauphysik, 2003.

[Wen04] R. Wendehorst. *Baustoffkunde.* Vincentz Verlag, Hannover, 2004. 26. Auflage.

[WTA04] WTA. *4-4-04/D, Mauerwerksinjektion gegen kapillare Feuchtigkeit.* Wissenschaftlich technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, München, 2004.