

Innovatives Verfahren zur Festigung von schwer konservierbaren umweltgeschädigten Sandsteindenkmalen und numerische geomechanische Simulation der Risiken



Abschlussbericht des DBU-geförderten Projektes



Projektträger

Technische Universität Bergakademie Freiberg
Institut für Geotechnik
Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau
Gustav-Zeuner-Str. 1
09596 Freiberg/S.

Technische Universität Dresden
Institut für Geotechnik
Professur für Angewandte Geologie
George-Bähr-Str. 1
01062 Dresden

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky (TU BAF)
Prof. Dr. rer. nat. Heiner Siedel (TU Dresden)

Projektkoordinator

Dipl.-Geol. Jörn Wichert (TU BAF)

Verfasser

Dipl.-Geol. Jörn Wichert (TU BAF):
Kap. 1-9, außer Kap. 4
Prof. Dr. rer. nat. Heiner Siedel (TU Dresden):
Kap. 1, 3, 4, 5, 7, 9
Dr.-Ing. Thomas Frühwirt (TU BAF):
Kap. 3, 5, 7
Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky (TU BAF):
Kap. 6, 8

Projektpartner

Atelier Erich Pummer GesmbH
Erich Pummer
(Steinbildhauermeister, Steinmetzmeister, Restaurator)
Nr. 165
A 3602 Rossatz-Wachau

Dipl.-Rest. Michael Eilenberger
Muldentalstr. 61
09623 Rechenberg-Bienenmühle, Holzhau

Landesamt für Denkmalpflege Sachsen
Schloßplatz 1
01067 Dresden

Amt für Kultur und Denkmalschutz Dresden
Königstr. 15
01097 Dresden

Ev.-Luth. Neustädter Friedhofsverband
Friedensstr. 2
01097 Dresden

Freiberg & Dresden im März 2015



Innovatives Verfahren zur Festigung von schwer konservierbaren umweltgeschädigten Sandsteindenkmalen und numerische geomechanische Simulation der Risiken

Abschlussbericht des DBU-geförderten Projektes



Inhaltsverzeichnis

1	Inhalt und Zielstellung des Vorhabens.....	7
2	Geschichte, Charakter und allgemeine Problematik des Inneren Neustädter Friedhofs	9
2.1	Die Geschichte des Friedhofs.....	9
2.2	Aktuelle Situation	11
3	Untersuchungen zum Ausgangszustand des Grabmals.....	15
3.1	Objektbeschreibung.....	15
3.2	Beschreibung des Cottaer Sandsteins	16
3.3	Übersicht der Untersuchungen.....	18
3.4	Schadensdokumentation.....	18
3.5	Gesteinstechnische Kennwerte	19
3.5.1	Ultraschallmessungen.....	19
3.5.2	Bohrwiderstandsmessungen.....	19
3.6	Feuchte- und Salzanalysen	19
3.6.1	Untersuchungsmethodik	19
3.6.2	Ergebnisse und Diskussion	24
4	Vorbereitende restauratorische Maßnahmen: Umsetzung und Entsalzung	30
4.1	Vorbereitung des Grabmals.....	30
4.2	Entsalzung	30
4.2.1	Durchführung und begleitende Probenahmen	30
4.2.2	Salzgehalte im Objekt nach Entsalzung mit dem VKV.....	32
4.2.3	Salzgehalte im Objekt nach abschließender Kompressenentsalzung	33
4.2.4	Effizienz der Entsalzung und Wirkmechanismen	35
4.2.5	Zusammenfassung.....	39

5	Voruntersuchungen an Probekörpern aus Cottaer Sandstein.....	41
5.1	Probekörper und Tränkung.....	41
5.2	Untersuchungsmethoden.....	43
5.2.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	44
5.2.2	Gesamtwasseraufnahme unter Atmosphärendruck.....	44
5.2.3	Hydrische Dehnung.....	44
5.2.4	Messung der Ultraschall-Geschwindigkeit.....	45
5.2.5	Ringbiegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul.....	45
5.2.6	Festigkeits- und Verformungseigenschaften des unbehandelten Sandsteins.....	45
5.3	Ergebnisse und Diskussion.....	45
5.3.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	46
5.3.2	Gesamtwasseraufnahme unter Atmosphärendruck.....	46
5.3.3	Hydrische Dehnung.....	49
5.3.4	Messung der Ultraschall-Geschwindigkeit.....	49
5.3.5	Ringbiegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul.....	49
5.3.6	Festigkeits- und Verformungseigenschaften.....	51
5.4	Untersuchungen zur Veränderung des Sandsteingefüges infolge der Festigung.....	51
5.4.1	Rasterelektronenmikroskopie.....	51
5.4.2	Messung der Porenradienverteilung.....	52
5.5	Simulation thermischer Beanspruchung.....	53
5.6	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	58
6	Simulation zur Rissprognose.....	60
6.1	Einführung.....	60
6.2	Erstellung eines geometrischen Modells.....	62
6.2.1	Mikroskopische Bildanalyse.....	63
6.2.1.1	Bildbearbeitung und Erzeugung eines Binärbildes.....	63
6.2.1.2	Analyse Formfaktoren.....	63
6.2.2	Geometrisches Modell: stochastischer Ansatz.....	66
6.2.3	Geometrisches Modell: bildanalytischer Ansatz.....	67
6.2.4	Geometrisches Modell: kornbasierter Ansatz.....	67
6.3	Thermische Simulation.....	72
6.3.1	Kalibrierung des Modells.....	72
6.3.2	Simulation der thermischen Belastung.....	74
6.3.3	Zusammenfassung.....	77

7	Festigung des Grabmals mittels Vakuum-Kreislauf-Verfahren.....	80
7.1	Einführung - Allgemeines zum Vakuum-Kreislauf-Verfahren.....	80
7.2	Festigung des Grabmals Richter	83
7.3	Untersuchungen zur Wirksamkeit der Festigung mit dem VKV	84
7.3.1	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ	84
7.3.2	Gesamtwasseraufnahme unter Atmosphärendruck	84
7.3.3	Hydrische Dehnung.....	84
7.3.4	Messungen der Wasseraufnahme mit Karsten-Prüfröhrchen	85
7.3.5	Messungen des Bohrwiderstands am Objekt	86
7.3.6	Messungen der Ultraschall-Geschwindigkeit an Bohrkernen	87
7.3.7	Ringbiegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul	88
7.4	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse	89
8	Simulation zum Vakuum-Kreislauf-Verfahren.....	93
8.1	Einleitung	93
8.2	Generieren des geometrischen Modells	94
8.3	Grundlagen zur Berechnung	94
8.3.1	Vorabrechnungen zu den Anfangs- und Randbedingungen.....	95
8.3.2	Testrechnungen zur den Anfangsbedingungen	96
8.3.3	Ergebnisse	97
8.4	Simulation am Grabmal.....	98
8.5	Schlussfolgerungen.....	98
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	100
	Schriftenverzeichnis.....	103
	Abbildungsverzeichnis.....	106
	Tabellenverzeichnis	111

1 Kapitel Inhalt und Zielstellung des Vorhabens

Die Stadt Dresden mit ihren zahlreichen historischen Friedhöfen und Grabdenkmälern aus Elbsandstein war bis 1989/90 einer hohen Schwefelbelastung von Luft und Regenwasser ausgesetzt, was oft zur intensiven Verwitterung oder Zerstörung historischer Sandsteinobjekte führte. Für die große Zahl der Grabdenkmäler fehlen nachhaltige Konservierungstechniken, da herkömmliche Oberflächentränkungen zur Festigung der zerstörten Oberflächen oft nicht die erforderlichen Eindringtiefen des Wirkstoffs erreichen.

Volltränkungsverfahren wie die Acrylharz-Volltränkung erforderten dagegen bisher einen aufwendigen Abbau, die Stabilisierung und den Transport der Objekte über weite Strecken, was neben höheren Kosten auch mit Risiken für die Substanz verbunden ist.

Daher wurde im nachfolgend beschriebenen Forschungsprojekt die Möglichkeit der in-situ-Tiefenimprägnierung im „Vakuum-Kreislauf-Verfahren“ (VKV) nach Vujasin an einem barocken Grabdenkmal aus Cottaer Sandstein untersucht.

Die in-situ-Tiefenimprägnierung wie auch die vorhergehende Entsalzung mittels VKV wurde von der Firma „Atelier Pummer“ aus Rossatz (Österreich) durchgeführt, die das Patent für dieses Verfahren besitzt. Im Erfolgsfall erreicht man eine „Musterlösung“ für umweltgeschädigte Kleindenkmale aus Cottaer Sand-

stein und kann die Palette möglicher Konservierungsverfahren für das vor allem im Osten Deutschlands weit verbreitete Bildhauergestein erweitern.

Das ausgewählte Objekt ist vom Material und Schadensbild her typisch für zahlreiche ähnliche historische Grabmale auf Friedhöfen in ganz Sachsen. Darüber hinaus steht das Gestein für einen schwer konservierbaren Sandsteintyp mit breiter Porengrößenverteilung und Tonmineralgehalten. Vom Landesamt für Denkmalpflege Sachsen wurde das Objekt aufgrund seiner Schäden als mit herkömmlichen Oberflächenbehandlungstechniken schwer konservierbar eingestuft und deshalb für die im Rahmen des Projektes durchgeführten Behandlungen freigegeben. In Abstimmung mit dem Landesdenkmalamt führten die TU Bergakademie Freiberg und die TU Dresden gesteintechnische und andere naturwissenschaftliche Untersuchungen zur Bewertung des Verfahrens durch. Dabei wurden die Projektpartner fallweise von anderen Einrichtungen mit speziellen Untersuchungsmethoden unterstützt:

Ultraschallmessungen und Bohrungen mit Bohrwiderstandsmessungen am Objekt wurden durch die Fakultät Bauingenieurwesen/Architektur, Lehrgebiet Baustoffe der HTW Dresden (Prof. Dr.-Ing. S. Pfefferkorn) durchgeführt. Das Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-An-

halt e.V. führte im Rahmen des Projektes Salzanalysen am Grabdenkmal Richter zur Charakterisierung des Vorzustandes durch und stellte darüber hinaus die Ergebnisse zur Kontrolle des Entsalzungseffektes zur Verfügung. Diese Zusammenarbeit fand ihren Niederschlag in einer bereits während der Projektlaufzeit veröffentlichten Publikation (Siedel et al., 2014). Für die Vermittlung zusätzlicher Analysen und fachliche Diskussionen sei hier besonders Dr. Ch. Franzen gedankt.

Nach einer Festigung von Steinfiguren kann es trotz gesteintechnischer Vor- und Begleituntersuchungen mitunter zu teilweise gravierenden Rissbildungen oder zu schaligen Ablösungen der Oberfläche kommen. Das Phänomen der Rissbildung betrifft sowohl früher verwendete also auch neu entwickelte Festigungsverfahren.

Die Ursachen und Mechanismen von verwitterungs- oder konservierungsbedingten Rissbildungen können noch nicht im Detail erklärt werden, weil zwar Einflussgrößen wie z.B. hygrisch und/oder thermisch induzierte Spannungen grundsätzlich bekannt sind, eine Quantifizierung aber noch nicht möglich ist. Dies führt einerseits zu Unsicherheiten bei der detaillierten Interpretation der Schadensursachen. Andererseits lassen aus gesteintechnischen Daten abgeleitete, erfahrungsbasierte qualitative Interpretationen und Prognosen keine in jedem Fall verlässlichen Voraussagen zu möglichen Rissentwicklungen oder Schalenbildungen nach einer Festigung zu.

Daher wurden neben den üblichen Materialkennwertuntersuchungen am Objekt und an Laborprüfkörpern gesteinsmechanische Simulationen durchgeführt, um Prognosen zum Materialverhalten, d.h. möglichen Rissentstehungen aufgrund der Festigung erstellen zu können.

Numerische Simulationen zielen auf Aussagen ab, ob und unter welchen Umständen Risse z.B. aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnung von Gestein und Festiger auftreten können. Mit den exemplarischen Simulationen sollen das grundsätzliche Anwendungspotenzial dieser Methode für die Denkmalpflege festgestellt und weitere Anwendungsszenarien definiert werden, zumal die Simulation auf andere Festigungsmethoden und -mittel sowie Gesteinsarten übertragbar ist.

Während der Durchführung des Projekts ergaben sich zusätzliche Fragen zur Höhe und der Verteilung des Unterdrucks im Grabmal während der Festigung sowie dessen Einfluss auf das Migrationsverhalten des Festigers. Deshalb wurden auch zu strömungsmechanischen Prozessen im Sandstein mit einer stark vereinfachten Geometrie des Grabmals einige numerische Testsimulationen durchgeführt. Mit diesen in Ansätzen vorgenommenen Simulationen sollte deren Potenzial als eine weitere Methode in der Denkmalpflege bzw. im Bauwesen abgeschätzt werden.

Die Projektverantwortlichen und -bearbeiter möchten an dieser Stelle der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für ihre großzügige Förderung des Forschungsvorhabens danken.

2

Kapitel

Geschichte, Charakter und allgemeine Problematik des Inneren Neustädter Friedhofs

2.1 Die Geschichte des Friedhofs

Die Geschichte des Inneren Neustädter Friedhofs begann 1731 auf einem Areal außerhalb der damaligen Stadtbefestigung (Abb. 1 auf Seite 10).

Die mit dem Brand vom 6. August 1685 einhergehende Zerstörung der Stadt nahm Kurfürst Friedrich August I., auch bekannt als August der Starke, zum Anlass, ihr einen barocken Grundriss zu geben. Dabei war u.a. eine Hauptachse geplant, die zwischen Schwarzem Tor und dem Blockhaus an der Augustusbrücke verlaufen sollte.

Der Kurfürst war nun damit konfrontiert, dass die Bürger in erstaunlich kurzer Zeit in genau dieser geplanten Hauptachse die vom Feuer zerstörte Dreikönigskirche wieder aufgebaut hatten.

August der Starke bestand aber auf der Beendigung des Weiterbaus und verfügte, auf dem Gelände des alten Friedhofes, am Rande der Hauptstraße, einen neuen Kirchenbau zu errichten. Es ist jene Dreikönigskirche, die der Besucher heute an der Hauptstraße auf der Neustädter Seite vorfindet.

Der Friedhof musste nun der neuen Kirche weichen

und folglich war für ihn ein neuer Ort nötig geworden. Um den Konflikt zwischen den Bürgern und dem „Bauherren“ zu lösen, finanzierte August 1731 einen

neuen Platz für den Friedhof außerhalb der Stadtmauer bei den Scheunenhöfen.

Nach den Plänen des Architekten Georg Maximilian von Fürstenhoff (1686-1753) entstand nun ein neuer und durch eine Sandsteinmauer eingefriedeter Friedhof. Zunächst hatte der Friedhof eine quadratische Grundfläche von 110 m Seitenlänge, wurde aber in den nächsten 150 Jahren zwei Mal nach Osten hin erweitert. Schon 25 Jahre später erwies er sich als zu klein, so dass im Jahre 1759 ein zweites Land erschlossen wurde. Ursache hierfür waren die Auswirkungen des Siebenjährigen Krieges: In der Schlacht bei Kesselsdorf westlich von Dresden im Jahre 1746 wurden über 400 gefallene Soldaten auf dem Friedhof beerdigt (Stein, 2002).

Die zunehmende Industrialisierung im 19. Jahrhundert und das damit verbundene Bevölkerungswachstum machten auch vor Dresden nicht halt, so dass im Jahr 1846 eine erneute Erweiterung erforderlich wurde. Der von einer Sandsteinmauer umfriedete Friedhof umfasst nun drei Länder mit einer Gesamtfläche von 3,5 ha (Abb. 2).

Die Karten in Abb. 1 verdeutlichen sehr gut die Entwicklung von einem ländlichen Friedhof des 18. Jahrhunderts außerhalb der damaligen Stadtbefestigung



1785



1881



1904



2014

Abb. 1 Städtische Entwicklung Dresdens und zugehörige Lage des Inneren Neustädter Friedhofs (Hist. Karten Privatbesitz, Karte von 2014 Openstreetmap).

bei den Scheunenhöfen hin zu einem Friedhof inmitten der Stadt, wie wir ihn jetzt vorfinden. Heute befindet sich der Friedhof in der Leipziger Vorstadt, an der Grenze zur Äußeren Neustadt (Abb. 4 auf Seite 13). Die schrittweise Erweiterung wird auch an der Formsprache der Grabdenkmäler und den verwendeten Materialien deutlich. In seiner Gesamtheit zeigt der Friedhof unterschiedlichste Typen von Grabmälern, von Skulpturen, Ädikulen, Exedren, Galvanoplastiken, Sarkophagen über Vasen und Schmuckurnen bis hin zu den heute verwendeten schlichten Grabsteinen (Abb. 3 auf Seite 12). Dabei kann man sehr gut beobachten, dass der Formenreichtum vom 18. Jahrhundert bis zur Jetztzeit zunehmend verarmt, was neben

finanziellen Gründen und zeitbedingten Stilauffassungen sicherlich auch durch eine rationalisierte Bestattungskultur unserer heutigen Gesellschaft bedingt ist. Entsprechend der Liste des Denkmalamtes findet man im ältesten Teil 91 denkmalwerte Grabstätten mit 30 Grabdenkmälern des Barock, Rokoko und des Zopfstils sowie neun zumeist barocke Grufthäuser und Wandgrabanlagen. Daneben finden sich auch aufwendige Grabmale mit für den Klassizismus typischen Architekturelementen und Totensymbolen wie nach unten weisende Fackeln oder Schmetterlinge. Dominierendes Gestein ist hier der Sandstein.

Im zweiten Land trifft man 59 Grabdenkmäler vornehmlich aus dem 19. Jahrhundert mit vor allem klas-

sizistischen Elementen an. Sie bestehen aus Kalkstein, Marmor, kristallinem Gestein wie Granit und Gabbro sowie Sandstein. Auf dem dritten Land sind Grabmale des 20. Jahrhunderts mit 14 Grabdenkmalen zu sehen. Zunehmend kommen hier vorformatierte Grabsteine und -platten zum Einsatz, was in einer gewissen gestalterischen Ernüchterung des Friedhofs resultiert. Gegenwärtig stellt sich der Innere Neustädter Friedhof als eine gewachsene funktionelle und gestalterische Einheit mit Parentationshalle, Kanzleigebäude, Torhaus und den erwähnten Grufthäusern sowie zahlreichen Grabdenkmalen dar. Hinzu kommen ein gliederndes Wegesystem, Handschwengelpumpen als Wasserentnahmestellen, zahlreiche weitgehend erhaltenen Einfriedungsgitter, Feldbezeichnungssteine sowie eine außerhalb stehende Stieleichenreihe (Landesamt für Denkmalpflege Sachsen, 2009).

Plänen von Christian Traugott Weinlig (1739-1799) zunächst als Kirchengruft errichtet wurde. Bemerkenswert hier ist, dass früher ein Klingelapparat für angeblich Scheintote diente.

Der Innere Neustädter Friedhof ist ein bau-, kunst- und ortsgeschichtlich bedeutender Begräbnisort auf dem zahlreiche bedeutende Personen bestattet sind. Hier ist u.a. der Hofbildhauer Johann Gottfried Knöffler (1715-1779) zu nennen, der als einer der Wegbereiter des Klassizismus betrachtet werden kann und in seiner Familiengruft auf dem ersten Land begraben liegt. Heinrich Christoph Jordan (1791-1860) und August Friedrich Christian Timaeus (1794-1875) gründeten in den Jahren 1823/25 die Chocoladen- und Cichorienfabrik in der Äußeren Neustadt und gelangten mit ihren Produkten zu Weltruf. Beide sind auf dem zwei-

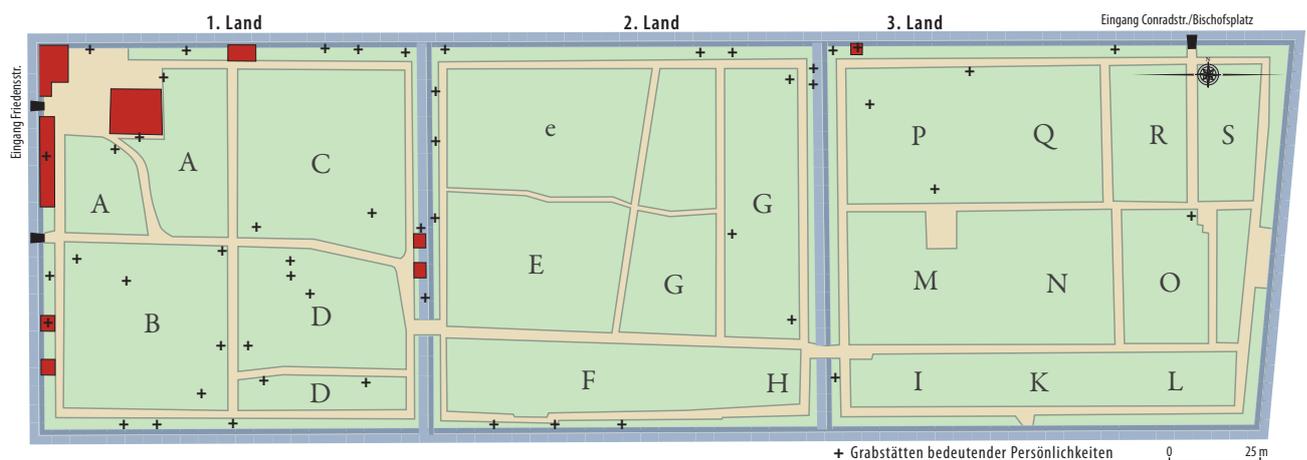


Abb. 2 Struktur des Inneren Neustädter Friedhofs

Neben dem Verwaltungsgebäude befand sich auf der Friedhofsmauer lange Zeit das Totentanzrelief, welches Kurfürst Georg der Bärtige (1471-1539) einst für das Georgentor von dem wohl aus Breslau stammenden Bildhauer Christoph Walther vermutlich im Jahre 1534 hatte anfertigen lassen. Christoph Walther ist seit 1517 in Annaberg (Erzgebirge) nachweisbar und schuf mehrere Werke in Meißen, die zeitlich in die Mitte der 1520er Jahre eingeordnet werden (Kiesewetter, 2000).

Heute befindet sich das aus der Renaissance stammende Relief vor Witterungseinflüssen geschützt in der Dreikönigskirche.

Dem zentralen Eingang auf der Friedensstraße gegenüber befindet sich die Feierhalle, die ab 1799 nach

ten Land begraben. Carl Friedrich von Rumohr (1785-1843) war deutscher Kunsthistoriker, Kunstsammler, Schriftsteller und Maler. Sein Grabmal ließ der dänische König Christian VIII. im Jahr 1846 nach Plänen von Gottfried Semper errichten. Durch die Bombardierung im Februar 1945 nahezu zerstört, wurde im Jahre 2010 auf dem dritten Land ein Replik eingeweiht.

2.2 Aktuelle Situation

Der enorme Denkmalreichtum besonders an barocken Grabmalen steht im Konflikt mit dem oft schlechten Zustand vieler Grabdenkmäler und Grufthäuser. Zwar konnte das Interior eines Großteils der Grufthäuser durch neue Dächer erstmal gesichert und das



A



B



C



D



E



F



G

Abb. 3 Barocke und klassizistische Grabmale (A, B, C, D) auf dem ersten Land sowie Grabmale des 20. Jahrhunderts auf dem zweiten Land (D; F) und drittem Land (E, G). Bis auf Foto D (Kalkstein) und Foto E (Kunststein) sind alle Objekte aus Sandstein.



Abb. 4 Orthofoto vom Inneren Neustädter Friedhof (Quelle: Landesvermessungsamt Sachsen)

Knöffler-Grufthaus in den 1990er Jahren restauriert werden, dennoch dominiert der sichtbare Verfall vieler wertvoller Grabmale.

Vor allem weil der Innere Neustädter Friedhof eine hohe Zahl an barocken Grabdenkmälern aufweist und hiermit einen Einblick in die barocke Grabmalkunst gestattet, ist eine schrittweise Restaurierung erstrebenswert. Seine urbane Position inmitten von dicht bebauten Gründerzeitquartieren weist dem Friedhof auch eine stadtökologische Bedeutung zu, da er zu den wenigen zusammenhängenden Grünflächen im Stadtteil zählt. Seine Funktion als „grüne Lunge“ wird sehr gut im Luftbild deutlich, auf dem die vielen großen und alten in Urbanität eingezwängten Baumkronen sichtbar sind (Abb. 4).

Der Friedhof zeigt einen Gehölzbestand vor allem aus Eschen, Eichen, Ginkgos, Buchen sowie Zypressengewächsen, die zusammen mit den Rasenflächen eine dichte Vegetation bilden und somit Lebensraum für Tiere und Pflanzen bieten. Es kann angenommen werden, dass es ursprünglich keinen gliedernden Baumbestand gab und es sich bei den heute vorhandenen Bäumen um hochgewachsene Grabbepflanzungen handelt.

Zu beobachten ist, dass die Anwohner den Friedhof zunehmend zum Verweilen und zum Spaziergehen nutzen oder ihn als Ort der Ruhe wahrnehmen.

Selbst Tagesmütter nutzen ihn mit Kindern, ohne dass ein moralisch-ethischer Konflikt mit seiner Bestimmung als Begräbnisort bzw. den eigentlichen Friedhofsbesuchern zu entstehen scheint (frdl. Mittl. Herr Mehmke).

Wie viele Friedhöfe, so ist auch der Innere Neustädter

Friedhof mit zunehmend weniger Bestattungen bzw. Grabstätten und hierdurch geringeren Einnahmen konfrontiert. Einerseits ist dies ein spezifisches Problem aufgrund der vergleichsweise jungen Bevölkerung im Stadtteil. Zum anderen sind die Ursachen sicherlich in der zunehmend ökonomisierten Beerdigungskultur zu finden, die zu Urnengemeinschaftsanlagen oder Gräbern mit einfachen kleinen Grabplatten führen. Für den Inneren Neustädter Friedhof resultiert dies in nur 70-80 Bestattungen pro Jahr, was einer mäßigen Auslastung von ca. 50 % entspricht und mit sinkenden Einnahmen verbunden ist (frdl. Mittl. Herr Mehmke). Zu einer weiteren, derzeit noch nicht absehbaren Veränderung könnten die sozialen Medien führen, die die Friedhöfe und die Trauerarbeit ins Internet verlagern. Beide Aspekte mögen befremdlich erscheinen, aber erste sichtbare Tendenzen hierzu sind schon im Gange (Sörries, 2013).

Sinkende Einnahmen wiederum bedeuten generell für alle Friedhöfe, dass die jeweiligen Friedhofsverwaltungen lediglich die Grundpflege und Einhaltung der Verkehrssicherheit gewährleisten können, dass man sich von Flächen zurückzieht oder über (Teil-) Schließungen nachdenkt.

Schließungen bedeuten letztendlich aber auch, dass historische Grabdenkmale verfallen und die (teil-) stillgelegten Friedhöfe mit einem oft hohen landschaftsarchitektonischen Wert als faktisch ungenutzte Flächen verbleiben.

Dennoch organisiert eine ehrenamtliche Initiative aus Anwohnern die Finanzierung von Restaurierungen von Grabdenkmälern, einfache Arbeiten wie das Freischneiden von Grabmalen sowie (studentische) Arbeiten, die sich mit friedhofsspezifischen Themen wie z.B. Grabpatenschaften auseinandersetzen.

Bei einer Grabpatenschaft übernimmt ein Pate die Kosten für die Restaurierung und/oder Sicherung eines historischen Grabmals und erhält dafür das Nutzungsrecht. Das Grab selbst ist kostenlos und erst bei der Beisetzung fallen Gebühren an.

Das Thema Grabpatenschaften ist im persönlichen Umfeld zwar weitestgehend unbekannt, wird aber bei Erwähnung durchaus positiv gesehen.

In den Gesprächen mit diversen Verantwortlichen und eigenen Erfahrungen wird sehr deutlich, dass das Thema Friedhöfe äußerst komplex sind. Zentrale Themen sind neue landschaftsplanerische Konzepte und ein Monitoring der Objektzustände u.a. zur Kostenreduzierung, um trotz sinkender Einnahmen die Denkmale in Verbindung mit der ökologischen Bedeutung zu bewahren.

3 Kapitel

Untersuchungen zum Ausgangszustand des Grabmals Richter (1701-1763)

3.1 Objektbeschreibung

Bei dem Grabdenkmal handelt es sich um das Grab von Johann Christoph Richter (1701-1763) und seiner zweiten Ehefrau Ursula Juliane (1705-1774).

Dieses sehr schöne Objekt barocker Sepulchrakultur ist 2,50 m hoch und umfasst zwei Putti, drei Inschriftkartuschen sowie zwei Engelsköpfe in Strahlenglorien als oberem Abschluss (Abb. 5). Es besteht aus Elbsandstein der Cottaer Varietät.

Obwohl die ursprüngliche Oberfläche zu großen Teilen nicht mehr vorhanden ist, waren die Inschriften weitestgehend zu entziffern:

Obere kleine Kartusche:

Selig / sind die Todten die in / Dem Herren sterben / Ja der Geist spricht, daß sie / ruhen von ihrer Arbeit und / ihre Wercke folgen ihnen nach. / /Offb./St. Joh: 30

Linke Kartusche:

Allhier ruhen die Gebeine des ... /
..... / Johann Christoph Richter /
gewesenen Doctoris und Rechts Consulents / war
geboren zu Neustadt bey Dresden den /
verehelichte sich zum erstenmahle mit Demois ... /
Christianen Concordien und nach deren /

zum zweytenmahle mit Frauen Ursulaen Julianen /
verwittwiht ge..esene Mittermeÿerin geb. / Sentheim
(?) und verließ dieses Zeitliche den / bris 1763,
in einem Alter von / .. Jahren 3 Monathen und .. Tagen.

Rechte Kartusche:

Unter diesem Grabmahle ruhet der ensteelte Körper
/ der im Herrn selig entschlafenen / Frauen Ursula-
en Julianen geb. Se.... / Sie erblickte das Licht dieser
Welt zu / Schlesien.den 2.. Dec 1705,verehelichte
sich zum ersten / mahle mit dem Königl.Pohln.
u. Churfürstl. Sächßisch / General Staabs Medico .. Jo..
ann Mittmeyer / zum zweytenmahle mit
dem .. vornehmen / Rechts=Consulenten Herrn Johann
Christoph Richter / Abermahls zu Wittwe, und starb in
der unge/Hoff- / nung einer dereinstigen ... ligen
Wieder..... / 13. May 1774 in einem Alter
von 68 / Jahren 5 Monaten 1 Woche und 3 / Tagen.

In den Unterlagen der Friedhofsverwaltung konnten weder Angaben zum Bildhauer noch zu möglichen Restaurierungen gefunden werden. Das Sterbejahr 1763 lässt vermuten, dass sich das Grabmal von Anfang an auf dem Inneren Neustädter Friedhof befand und nicht vom Friedhof der Dreikönigskirche transloziert wurde, da schon 1762 die ersten Bestattungen durchgeführt worden sind.



Abb. 5 Aktueller Standort mit Zustand 2012. Umsetzung und Fixierung des Grabmals auf ein Streifenfundament zur Stabilisierung für die anschließende Entsalzung und Festigung (rechts).

Bis zur Umsetzung im Rahmen des DBU-Projektes befand es sich auf dem 1. Land (Wandstelle links v. 52-53). Nach Abschluss des Projektes wird das Grabmal zu einem anderen Standort versetzt, um es so angemessener zu präsentieren und sichtbarer für Besucher zu machen (Abb. 6).

Dieses Vorgehen entspricht der grundlegenden Idee, die zahlreichen barocken Grabmale schrittweise als eine Art Freiraummuseum barocker Grabmalkunst der Öffentlichkeit zu präsentieren.

Aufgrund der intensiven Schädigung wurde das Grabdenkmal vom Landesdenkmalamt konservatorisch

aufgegeben, so dass es mit Einwilligung der Behörde für eine modellhafte Bearbeitung in diesem Projekt (einschließlich notwendiger zerstörender Untersuchungsmethoden) zur Verfügung stand.

Die zerstörenden Eingriffe wurden dennoch auf ein Mindestmaß reduziert, um möglichst viel originale Substanz zu erhalten.

3.2 Beschreibung des Cottaer Sandsteins

Das Grabmal besteht aus Cottaer Sandstein, einer Varietät des Elbsandsteins. Der Cottaer Sandstein ist vergleichsweise weich, was eine sehr gute Bearbeitbarkeit auch filigraner Elemente ermöglicht und ihn als Bildhauerstein begehrt macht.

Farblich schwankt er zwischen grau und gelblich bis bräunlich mit oft auftretenden schichtparallelen Flasern aus vorwiegend Tonmineralen mit mehr oder weniger organischer und ferritischer Substanz. Es handelt sich um einen feinkörnigen und überwiegend kieselig gebundenen Sandstein mit ca. 90 % Quarzkornanteil. Die Quarzkörner zeigen meist direkte Kornkontakte oder solche über kieseliges Bindemittel, können seltener (insbesondere im Bereich der Tonflasern) aber auch durch toniges Bindemittel miteinander verbunden sein (Abb. 7). Untergeordnet treten Glaukonit und Feldspat sowie seltener Glimmer auf.

In den Kornwickeln des Porenraumes befindet sich oft Feinkornanteil, der aus Quarz, Illit und vor allem

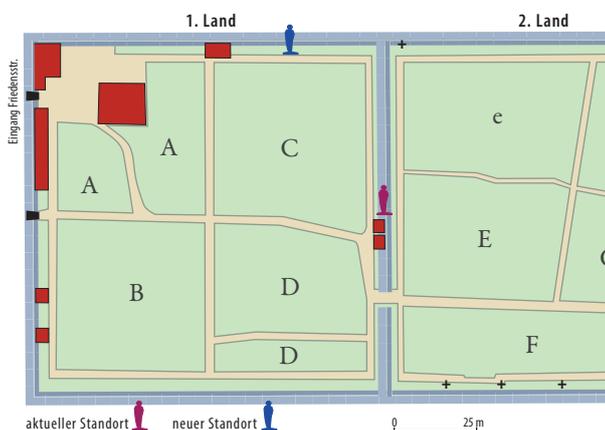


Abb. 6 Standort Grabdenkmal

gut auskristallisiertem authigenen Kaolinit besteht. Während der Diagenese wurde Feldspat hydrolytisch abgebaut, Kaolinit bildete sich neu und das freigesetzte SiO_2 bildete an Quarzkornoberflächen der Sandfraktion Anwachssäume, die vielfach das Bindemittel darstellen; auch direkte diagenetische Quarzkornverwachsungen kommen häufiger vor. Die Quarzkörner bildeten daher ein fest verbundenes Skelett (Grunert, 2007).

Der Cottaer Sandstein besitzt eine durchschnittliche Gesamtporosität von knapp 23 Vol.-% (Grunert, 2007), die der bildanalytisch in Dünnschliff A ermittelten etwa entspricht (Tab. 1). Messungen der Quecksilberdruckporosität ergeben eine Porenradienverteilung überwiegend im kapillaren Bereich, wobei die feinkapillaren und Mikroporen vor allem in tonmineralreichen Abschnitten des Sandsteins lokalisiert sind. Die Makroporen ($>> 100 \mu\text{m}$, wie in Abb. 7 oben durch blaue Anfärbung erkennbar) werden bei der Quecksilberporosimetrie nicht mit erfasst (siehe Abb. 8).

Tab. 1 Mittels Bildanalyse an Dünnschliffen ermittelte Porositäten vom Cottaer Sandstein.

Schliff	Porosität [%]
A	24,2
C	13,8
D	6,8

Dagegen können feine Poren optisch-mikroskopisch nicht mehr aufgelöst werden, so dass in tonmineralreichen Bereichen des Sandstein bei der bildanalytischen Ermittlung des Porenraum dieser systematisch unterschätzt wird (Schliff C, D in Tab. 1).

Die starken Schwankungen in Tab. 1 weisen klar darauf hin, dass es sich bei Cottaer Sandstein um ein relativ inhomogenes Material handelt. Obwohl ein hoher Anteil kapillar wirksamer Poren vorhanden ist, liegt die gemessene kapillare Wasseraufnahme pro Fläche und Zeit nur im unteren einstelligen Bereich (w -Wert in $\text{kg}/\text{m}^2 \text{h}^{-0,5}$).

Das Aufquellen von Kaolinit-Schichtstapeln („booklets“) bei Wasserzutritt kann zu kapillarblockierenden Effekten führen. Insofern gilt das Gestein auch als problematisch hinsichtlich konservierender Maßnahmen, die mit Flüssigkeitsaufnahme verbunden sind (Entsalzung, Festigung, Hydrophobierung).

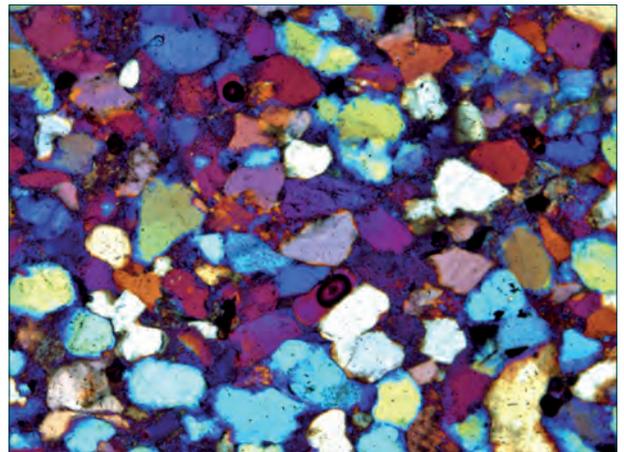
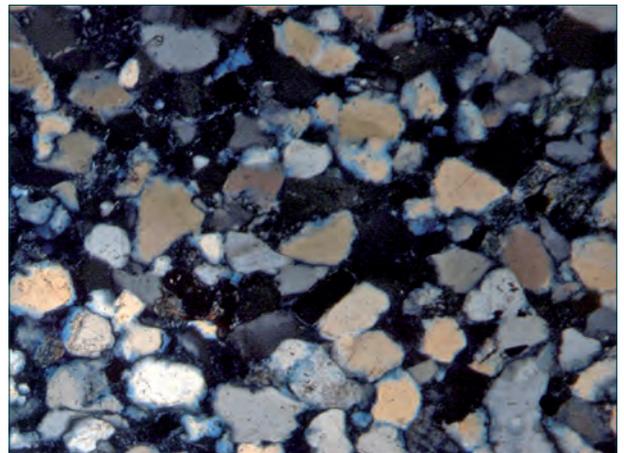
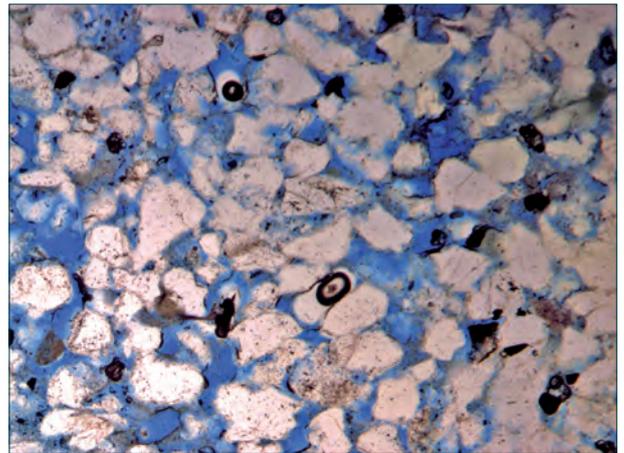


Abb. 7 Dünnschliff Cottaer Sandstein. Oben: blau gefärbtes Harz zeigt den Porenraum. Das mittlere Foto mit gekreuzten Nichols und das untere Foto (zusätzlich mit Lambda-Plättchen zeigen sehr schön die Quarzkörner mit direkten Kornkontakten oder kieseligen Anwachssäumen (Bildbreite = 1,3 mm).

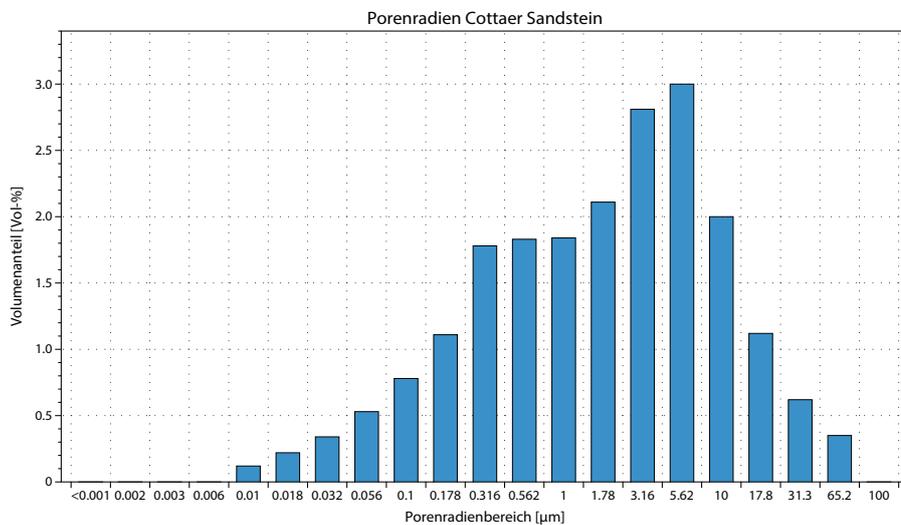


Abb. 8 Porenradienverteilung von Cottaer Sandstein.

3.3 Übersicht der Untersuchungen

Die Probenahmepunkte und Messungen am Grabmal sind in Abb. 11 auf S. 24 dargestellt und die jeweiligen Untersuchungen in Tab. 2 aufgelistet.

Basierend auf der Schadensdokumentation (vgl. 3.4) wurden an repräsentativen Stellen des Objekts Messungen mit zerstörungsfreien und zerstörenden Verfahren vorgenommen.

Zur Probengewinnung für Laboruntersuchungen wurden Bohrkern mit dem Durchmesser 5 cm von der Vorder- und Rückseite des Grabmals in verschiedenen Höhen entnommen. In unmittelbarer Nähe der Bohrkern erfolgte die tiefenabschnittsweise Gewinnung von Bohrmehl mit einem Spiralbohrer zur Salzanalyse. Bedingt durch den geringen Querschnitt des Grabmals (22 cm in 0,5 m Höhe, 21 cm in 1,22 m Höhe und 18 cm in 1,95 m Höhe) war die Gewinnung eines nahezu

vollständigen Tiefenprofils durch das Objekt in verschiedenen Höhen möglich.

3.4 Schadensdokumentation

Zunächst wurde eine Klassifizierung der Schadensphänomene entsprechend dem ICOMOS Glossar (Verges-Belmin et al. 2008) vorgenommen (Abb. 9 auf S. 21). Auffällig ist neben dem flächenhaften Auftreten der für Elbsandstein typischen schwarzen Patina der hohe Grad an Verlust der originalen Oberfläche, der überblicksartig in Abb. 10 auf S. 22 abgebildet ist.

Die detaillierte Schadensaufnahme (Abb. 10 auf S. 22) zeigte, dass für den Oberflächenverlust, insbesondere im Sockelbereich unterhalb des Volutenbogens, hauptsächlich das schichtungsparelle Abschuppen verantwortlich ist.

Tab. 2 Untersuchungen am Grabmal und angewandte Methoden (v.F./n.F. = vor/nach Festigung).

Parameter	Methode
Schadensdokumentation	entsprechend ICOMOS-Glossar (Verges-Belmin et al. 2008)
kapillare Wasseraufnahme v.F./n.F.	Karsten-Messungen an Oberflächen mit verschiedenen Erhaltungszuständen (Patina, Kruste, Relief)
US-Geschwindigkeit, dyn. E-Modul, Poissonzahl v.F./n.F.	Ultraschallprüfung
Wasserdampfdiffusionsfähigkeit (μ -Wert) und hydrische Dehnung v.F./n.F.	an ausgewählten Bohrkernabschnitten (Scheiben) für Ringbiegezugfestigkeit
Ringbiegezugfestigkeit v.F./n.F.	Prüfung von Bohrkernabschnitten (Scheiben, $d = 5$ cm, Dicke 5 mm) mit Geräteerweiterung an Prüfsystem MTS 20/M der TU BAF (Kozub, 2008).
Bohrwiderstandsmessungen v.F./n.F.	Gerät Durabo

Während in den Kartuschen das Abschälen schwarz patinierter Oberflächen zum teilweisen Verlust der Inschrift führte, sind flächige Abwitterungen v.a. im unteren Teil des Objekts durch Abschuppen bedingt. Dagegen resultierten das flächenhafte Auftreten von biogenem Bewuchs und, noch intensiver, schwarzer Patina (von abschälenden Bereichen abgesehen) in keinen sichtbaren Schäden.

In den Rücklagen treten untergeordnet Krusten und in einem Fall auch Salzausblühungen auf. Auch Schalenbildungen sowie Brüche sind nur vereinzelt festzustellen.

3.5 Gesteinstechnische Kennwerte

3.5.1 Ultraschallmessungen

Die Ultraschallmessung zu den Geschwindigkeiten der p-Wellen sowie die Messungen zum Bohrwiderstand wurden von Prof. Dr.-Ing. S. Pfefferkorn von der HTW Dresden vorgenommen.

Mit den Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten der p-Wellen an den vom Grabmal gezogenen Kernen sollten Informationen zu seinem Vorzustand gewonnen werden.

Mit einer Ausnahme wurden die Bohrkern senkrecht zur Schichtung gebohrt.

Die Bohrkern wurden bei 70 °C bis zur Massenkonzanz getrocknet und anschließend für die eigentlichen Messungen vorbereitet. Hierzu wurden jeweils zwei Messstrassen um 90° versetzt parallel zur Bohrachse aufgezeichnet. Die Ultraschallgeschwindigkeiten wurden in Abständen von 5 mm gemessen.

Niedrige Ultraschallgeschwindigkeiten entsprechen dabei geringen Werten für die gesteinsmechanischen Eigenschaften wie Festigkeiten und E-Modul.

Die Messungen erfolgten an beiden Trassen der Bohrkern jeweils parallel zur Schichtung, wodurch die gleichzeitig ermittelten Profile eines Bohrkerns nur geringe Streuungen aufweisen.

Der Bohrkern V1 wurde seitlich, also schichtparallel entnommen. Damit ergeben sich für die beiden Messstrassen jeweils unterschiedliche Orientierungen zur Schichtung und damit signifikant unterschiedliche Ultraschallprofile.

Die Ultraschallprofile gestalten sich im Ausgangszustand auf den ersten Blick recht ausgeglichen und ohne spektakuläre Sprünge. Die Schwankungen repräsentieren die natürlichen Eigenschaftsschwankungen des inhomogenen Sandsteins.

Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass das Niveau der Profile bei den BK 5 und BK 6 im vorderen Bereich bis ca. 3 bis 5 cm etwas angehoben erscheint.

Oberflächennah zeigen einige Bohrkern geringere US-Geschwindigkeiten bis 10 mm Tiefe (Abb. 12 auf S. 25).

3.5.2 Bohrwiderstandsmessungen

Die Bohrwiderstandsmessungen wurden mit einem Gerät des Typs DURABO durchgeführt. Dabei beruht das Messprinzip auf einem Bohrvorgang mit einem 3 mm-Bohrer bei konstanter Drehzahl und konstantem Anpressdruck. Die reziproke Eindringgeschwindigkeit in s/mm stellt den Bohrwiderstand dar. Je größer dieser ist, umso härter ist das beprobte Material.

An jedem Messpunkt (Abb. 11) wurden drei oder mehr Bohrungen ausgeführt und die dabei generierten Bohrwiderstandsprofile jeweils gemittelt. Bei den in Abb. 13 dargestellten Bohrwiderstandsprofilen zeigt sich eine leicht ansteigende Tendenz der Bohrwiderstände von der Oberfläche bis in eine Tiefe von ca. 2 cm, die einer strukturellen Entfestigung zugeschrieben werden kann.

Teilweise steigen die gemessenen Bohrwiderstandsprofile nach ca. 20 mm überdimensional an. Besonders augenfällig ist dies bei den Messungen der Punkte 2, 3, 4 und 5. Solche Erscheinungen können bei diesem Messverfahren auftreten, wenn der Stein erhöhte Materialfeuchten besitzt: Das Porenwasser führt zu Verklumpungen des entstehenden Bohrmehles, im Weiteren zu erhöhten Reibungswiderständen an der Wandung des Bohrloches und damit zu einem zu hohen gemessenen Bohrwiderstand (Pfefferkorn & Siedel, 1999).

3.6 Feuchte- und Salzanalysen

3.6.1 Untersuchungsmethodik

Zur Feststellung der Feuchte- und Salzverteilung im Objekt erfolgten Probenahmen durch abschnittsweise Profilbohrungen (0-1 cm, 1-2 cm und 2-4 cm Tiefe) mit einem Spiralbohrer (d = 10 mm) in verschiedener Höhe am Objekt (0,5 m, 1,22 m und 1,95 m) von der Vorder- und Rückseite her. Die Entnahmestellen sind in Abb. 11 dargestellt.

Die entnommenen Bohrmehlproben wurden in Metallbehälter abgefüllt und kurz nach der Entnahme (vor Ort) gewogen. Nach Trocknung im Trockenschrank bei 60 °C (bis zur Massekonstanz) wurden die Proben erneut ausgewogen und ihr Feuchtegehalt wurde aus der Differenz zwischen Masse der frischen Probe und Trockenmasse ermittelt (bezogen auf die Trockenmasse in M.-%). Obwohl Einflüsse durch den Bohrvorgang (Erwärmung!) bei der Gewinnung von Bohrmehl aus





Abbildung	Schadensbild	Abbildung	Schadensbild
A, B	Relief	H	Patina
C, D	Abschuppen	I, J	Schale
E, F	Ausbruch	K	Effloreszenz
F	Biologischer Bewuchs	L, M	Bruch
G	Kruste	N	Abschälen

Abb. 9 Klassifizierung der festgestellte Schadensphänomene entsprechend ICOMOS Glossar.

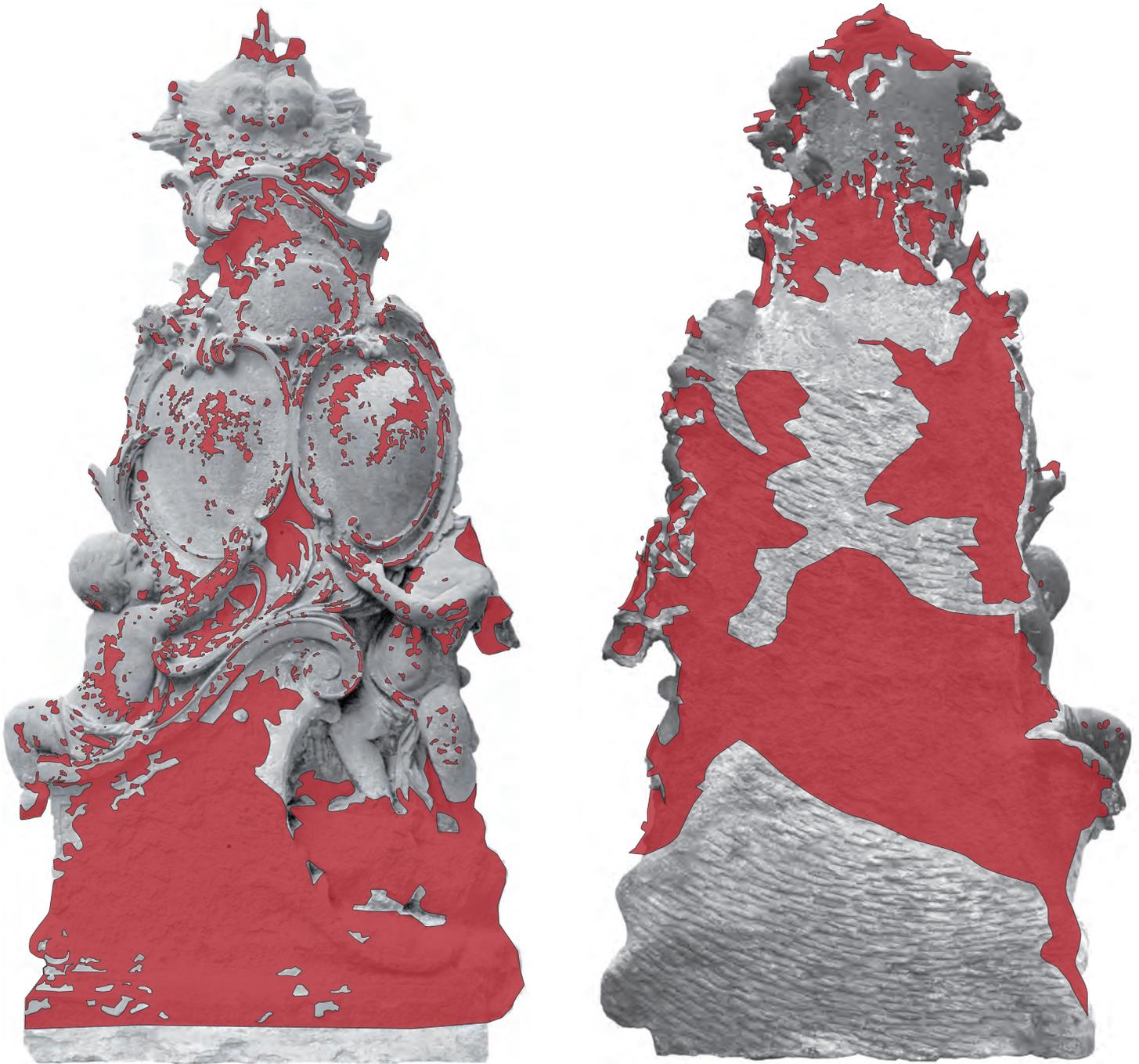
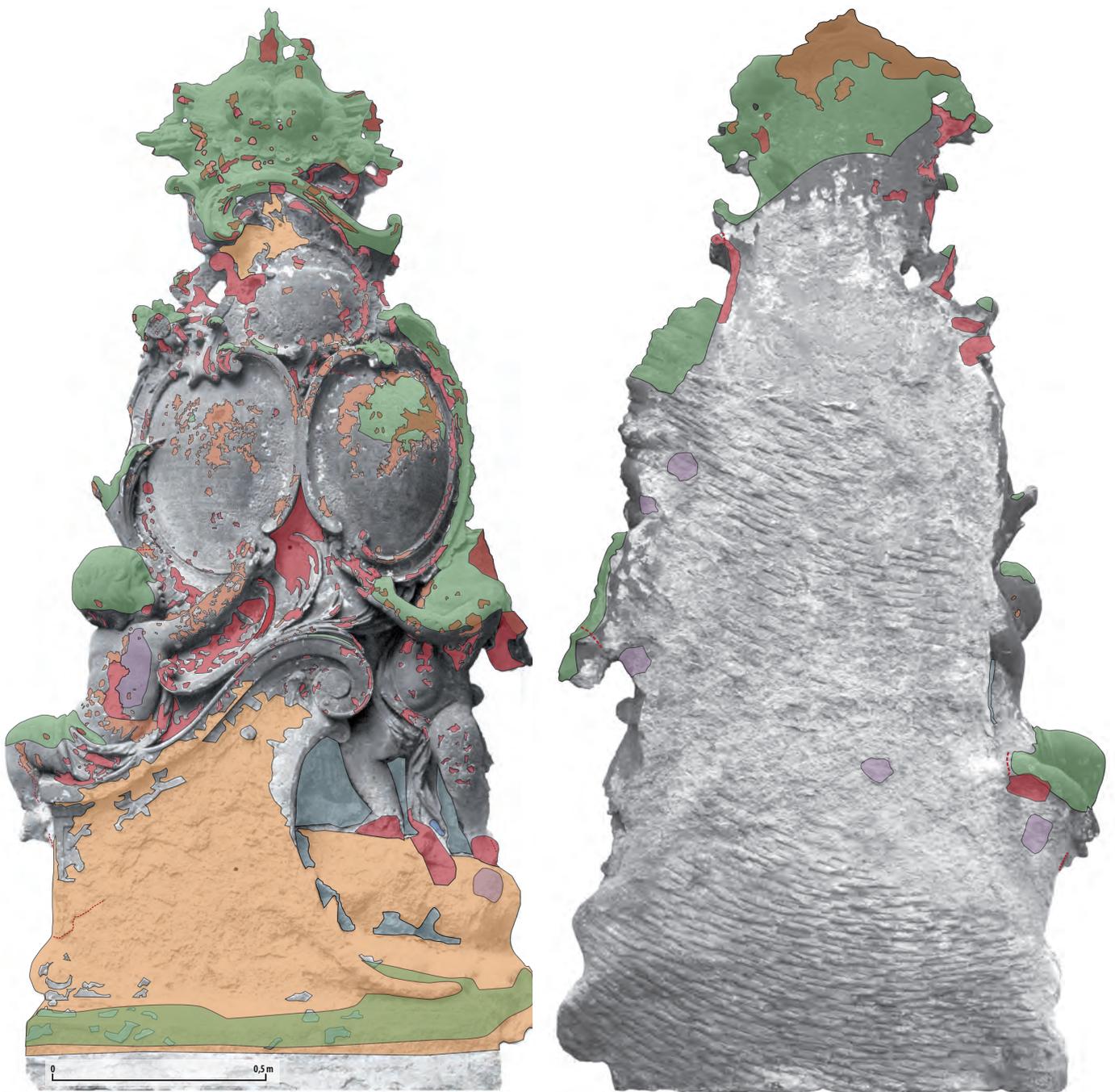


Abb. 10 Übersicht zum Verlust der originalen Oberfläche (links, rot) sowie detaillierte Schadenskartierung (S. 23). Aus Gründen der Übersicht wurde die Patina nicht eingezeichnet; sie ist an den dunklen Bereichen des Hintergrundfotos erkennbar.



- | | | | |
|---|--|--|--|
|  Ausbruch/Fehlstelle |  Schalenbildung |  Krustenbildung |  Salzausblühungen |
|  Abschuppen |  Bruch |  biogener Bewuchs |  Abschälen |

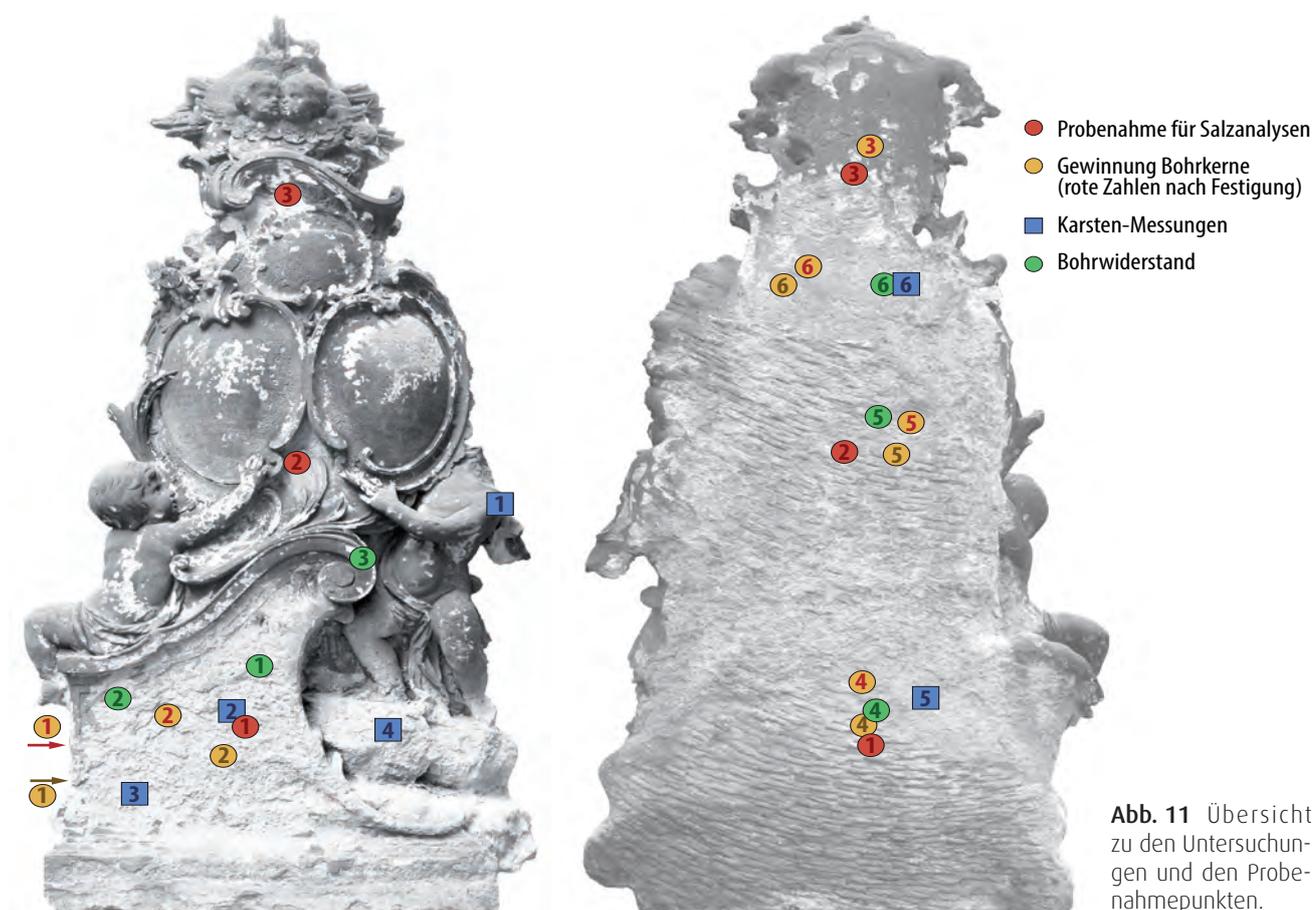


Abb. 11 Übersicht zu den Untersuchungen und den Probenahmeorten.

kleinkalibrigen Bohrungen (im Gegensatz zur Darrprobe an Bohrkernen mit größeren Durchmesser) nicht auszuschließen sind, ist so dennoch zumindest ein Vergleich der Feuchtigkeiten untereinander möglich. Gleichzeitig gibt der so ermittelte Feuchtegehalt eine Größenordnung für die Feuchte des Sandsteins zum jeweiligen Probenahmezeitpunkt und damit auch für die ungefähre Feuchtesättigung des Materials.

Die getrockneten Proben wurden zur Salzanalyse an das IDK übergeben, wo folgende Weiterbearbeitung stattfand: Die Proben wurden zunächst nach einem standardisierten Verfahren mit destilliertem Wasser eluiert. An den wässrigen Auszügen erfolgte die Gesamtbestimmung des wasserlöslichen Feststoffanteils durch Eindampfen der Probe sowie die quantitative Bestimmung wichtiger salzbildender Ionen.

Der Na^+ -Gehalt wurde dabei mit einer ionenselektiven Elektrode bestimmt, der Gehalt von K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} sowie SO_4^{2-} , NO_3^- und Cl^- wurde mit dem Gerät HACH DR/2000 Direct Reading Spectrometer nach Farbreaktionen mit Standardreagenzien fotometrisch ermittelt.

Die Gehalte löslicher Ionen und der Gesamtsalzgehalt werden in M.-% angegeben, bezogen auf die für die Elution eingewogene trockene Probenmasse.

3.6.2 Ergebnisse und Diskussion

Auf der Basis der ermittelten Salzgehalte im Sandstein erfolgte zunächst eine Bewertung der Salzbelastung des Objekts. Die Werte wurden dazu mit den Angaben zur Bewertung von Salzgehalten im WTA-Merkblatt 3/13/01D (2003) verglichen. Demnach traten insbesondere im oberflächennahen Bereich hinsichtlich der Sulfatbelastung hohe bis extreme Werte auf.

Die Nitratgehalte wiesen mittlere bis stellenweise (in 1,22 m Höhe) hohe Belastungen aus. Die Chloridgehalte können dagegen in überwiegender Mehrheit als gering bewertet werden. Korrelationen der ermittelten Kationen- und Anionengehalte ergaben einen signifikanten Zusammenhang zwischen den Ca- und den Sulfatgehalten (Abb. 14), was auf eine starke Präsenz des Salzes Gips hinweist. Zwischen Nitrat- und Magnesiumionen ist ebenfalls ein gewisser Zusammenhang zu beobachten.

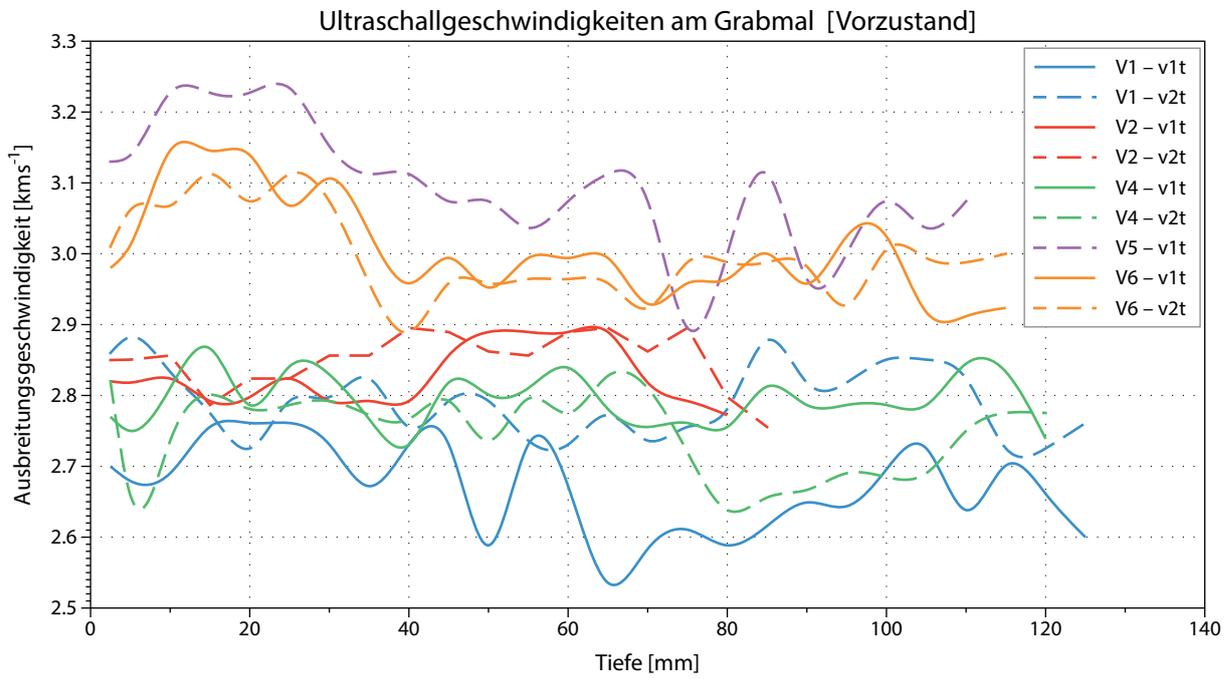


Abb. 12 Ultraschallgeschwindigkeiten der p-Wellen an Bohrkernen vom Grabmal vor der Festigung mittels VKV und KSE 300 E + 10 % Beschleuniger.

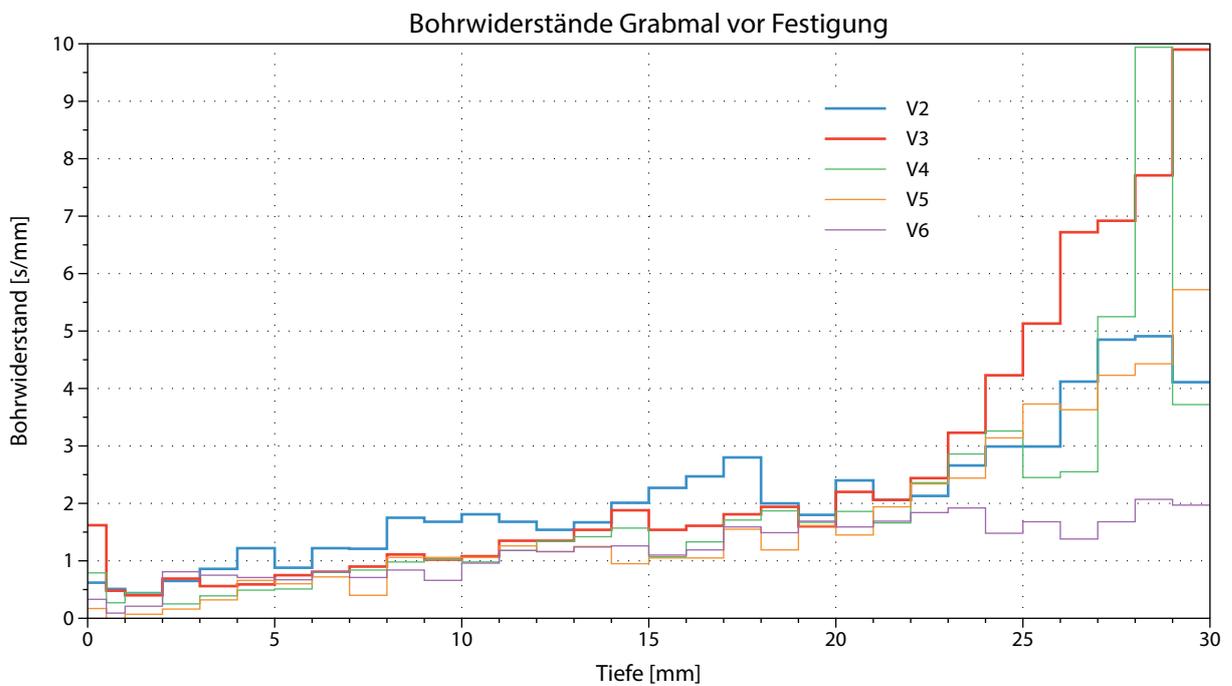


Abb. 13 Bohrwiderstände gemessen am Grabmal vor der Festigung mittels VKV und KSE 300 E + 10 % Beschleuniger.

Die Verteilung der löslichen Salze im Vorzustand zeigt im Höhen- und Tiefenprofil charakteristische Muster, die mit den Prozessen der Einwanderung aus Luft und Boden bzw. der Feuchte- und Expositionssituation des Denkmals in Zusammenhang gebracht werden können.

Die Verteilung des Gesamtgehaltes löslicher Bestandteile im Vorzustand ist in Abb. 15 dargestellt. Nahe der Oberfläche (bis 1 cm Tiefe) zeigen die Werte auf der Vorder- wie der Rückseite des Objekts starke Maxima, etwas tiefer ($> 1\text{ cm}$) fallen die Gehalte schnell deutlich ab, an der bewitterten Vorderseite bis auf höchstens 50% des Oberflächenwertes. Die oberflächennahen Belastungen mit löslichen Stoffen sind auf der Vorderseite bis in 2 cm Tiefe signifikant höher als auf der Rückseite.

Die ursprüngliche Aufstellungssituation des Objekts (Abb. 5 auf S. 16) stellt den Schlüssel zur Erklärung der vorgefundenen Verteilung löslicher Bestandteile in der Sandsteinplatte dar. Wie das linke und mittlere Bild in Abb. 5 auf S. 16 zeigen, war der schmale Zwischenraum zwischen Grabplatte und Sandsteinmauer in der ursprünglichen Aufstellung bis in ca. 1,50 Höhe mit abgefallenen Putzresten vom Wandverputz, Erde, verrottetem Laub etc. verfüllt. Ein Blick auf die Feuchteverteilung in der Platte (Abb. 16) macht deutlich, dass im bodennahen Profil durch den gesamten Querschnitt der Platte hohe Feuchtegehalte nachzuweisen sind, während in 1,22 m Höhe der Feuchtegehalt nahe der Rückseite höher ist als nahe der exponierten Oberfläche der Vorderseite. In 1,95 m Höhe, wo kein Verbund zwischen Wand und Grabplatte bestand, ist der Unterschied zwischen Vorder- und Rückseite nur noch sehr schwach wahrnehmbar. Generell kann festgestellt werden, dass der Feuchtegehalt in der Plat-

te von unten nach oben und von der Rückseite zur Vorderseite hin tendenziell abnimmt. Dieses Muster spricht für eine Belastung des Objekts durch aufsteigende Feuchtigkeit und eine Hemmung der Verdunstung auf der Rückseite des Grabmals, besonders dort, wo der Spalt zur Sandsteinmauer mit Fremdmaterial aufgefüllt ist.

Für die Diskussion der Salzgehalte ist in diesem Kontext eine separate Betrachtung verschiedener Ionen nützlich (vgl. Abb. 17 bis Abb. 19). Calcium und Sulfat weisen einzeln dargestellt kongruente Verteilungsmuster auf, so dass eine Zusammenfassung gerechtfertigt erscheint (Abb. 17), die die Verteilung der Salzverbindung Gips repräsentiert (vgl. auch Abb. 14 auf S. 26). Nitrat und Magnesium, die nur teilweise kongruente Verteilungsmuster zeigen, sind jeweils separat dargestellt (Abb. 18 und Abb. 19). Im Vergleich der Abb. 15 und Abb. 17 stellen sich zunächst die sehr ähnlichen Verteilungsmuster des Gesamtsalzgehaltes und des Gipses ($\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ Ionen) dar, die die hohen Anteile von Gips am Gesamtsalzgehalt im Sandstein belegen.

Die Nitrat- und Magnesiumgehalte zeigen eine deutliche Anreicherung in der mittleren Profilhöhe (1,22 m), und zwar mit einer von der bewitterten, nach Westen orientierten Oberfläche zur Rückseite hin tendenziell abfallenden Konzentration. Die dort gemessenen Nitrat-Gehalte müssen nach WTA-Merkblatt 3/13/01D (2003) durchweg als „mittel bis hoch“ klassifiziert werden. Die übrigen Profile weisen mittlere bis geringe Nitratbelastungen auf, die \pm gleichmäßig über den gesamten Querschnitt der Grabplatte verteilt sind. Die starke Anreicherung von Nitraten, als deren Herkunftsquelle hier der Boden gesehen werden muss, in mittlerer Höhe über dem Grund zusammen mit Sul-

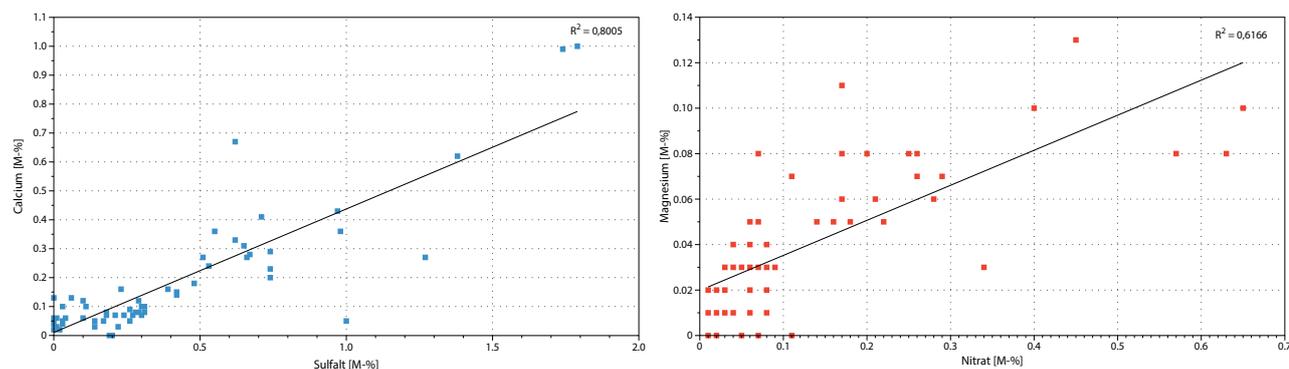


Abb. 14 Korrelation der Gehalte ausgewählter Ionen unter Berücksichtigung aller gemessenen Werte: (a) Sulfat und Calcium, (b) Nitrat und Magnesium.

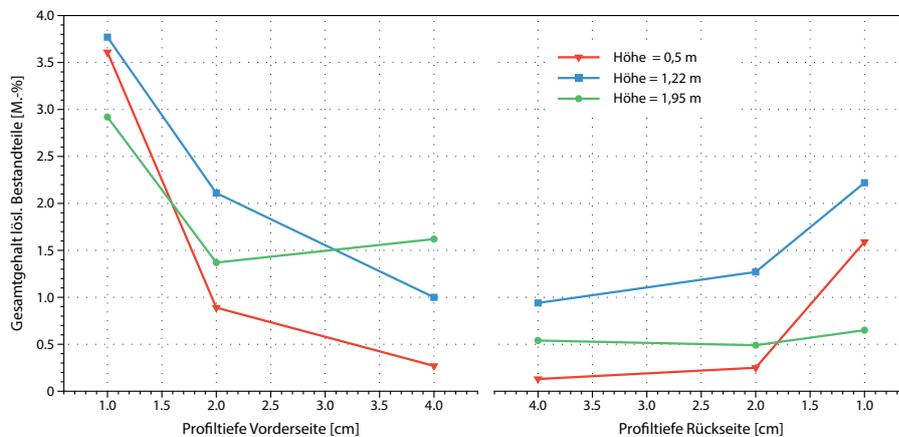


Abb. 15 Gesamtgehalt lösliche Bestandteile in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).

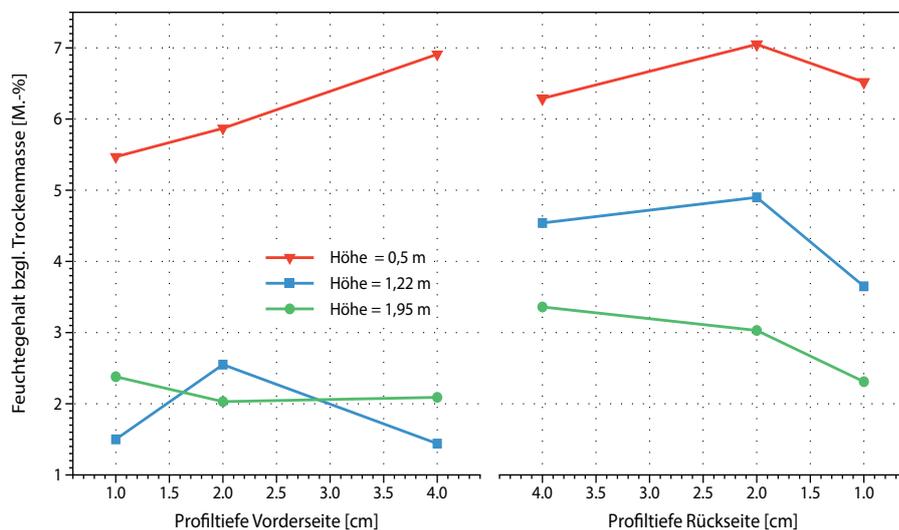


Abb. 16 Feuchteverteilung in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).

faten, ist typisch für durch aufsteigende Feuchtigkeit aus dem Untergrund erzeugte Salzverteilungsmuster (Arnold & Zehnder, 1989).

Verglichen mit der Feuchteverteilung des mittleren Profils (vgl. Abb. 16) zeigt die Nitratverteilung eine gegenläufige Tendenz: In (zeitweilig) trockneren Zonen an der bewitterten Oberfläche sind die leicht löslichen (Magnesium-) Nitrate stärker angereichert als im feuchteren Bereich zur Rückseite hin. Diese Verteilung im mittleren Tiefenprofil stellt nur eine „Momentaufnahme“ dar und ist vom Umgebungsklima und der Steinfouchte zur Zeit der Probenahme abhängig, beweist aber die feuchteabhängig hohe Mobilität leicht löslicher Nitrate, die in trockeneren Bereichen schnell durch die Verdunstung nitrathaltiger Porenlösung angereichert und fixiert werden können.

Eine stärkere Durchfeuchtung, z.B. durch ein Schlagregenereignis auf die Vorderseite, kann sie erneut auflösen und wieder stärker ins Steininneren hinein

verschieben. Die Nitratverteilung zeigt somit beispielhaft das Zusammenwirken von aufsteigender Feuchte aus dem Untergrund und kurzzeitigen, klimabedingten Feuchtwechsels bei der Verteilung der Salze im Sandstein.

Für mindestens einen Teil der vergleichsweise schwerer löslichen Gipse kann ebenfalls ein Eindringen mit der Grundfeuchte angenommen werden. Im Steininneren (> 1 cm von der Oberfläche) des bodennahen Profils ($h = 50$ cm) weisen die Sulfatgehalte einzeln betrachtet nur „mittlere“ Belastungen nach WTA-Merkblatt 3/13/01D (2003) auf; auch der Gesamtgehalt an Gips ist moderat. Das gilt in ähnlicher Weise für die Gipsgehalte im Steininneren (> 2 cm Tiefe) des mittleren Profilschnitts ($h = 1,22$ m). Ein Großteil des Gipses wandert, wenn er in gelöster Form mit der aufsteigenden Feuchte aus dem Untergrund transportiert wird, mit der Feuchtigkeit zur VerdunstungsOber-

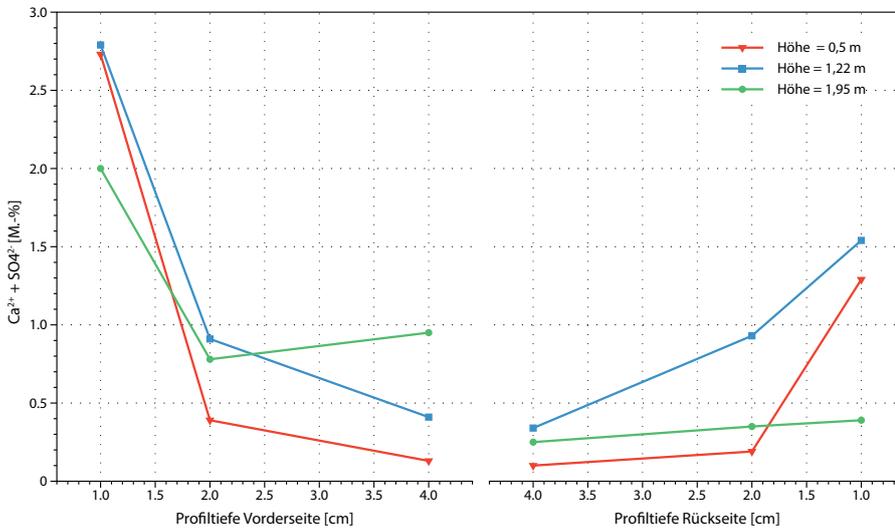


Abb. 17 Verteilung der Ionen Ca und Sulfat (Summe = Maß für den Gipsgehalt) in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).

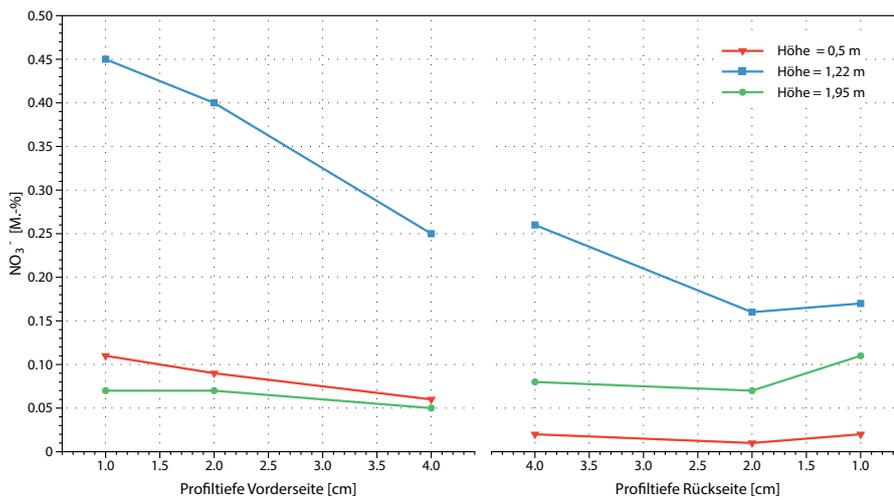


Abb. 18 Verteilung der Nitrat-Ionen in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).

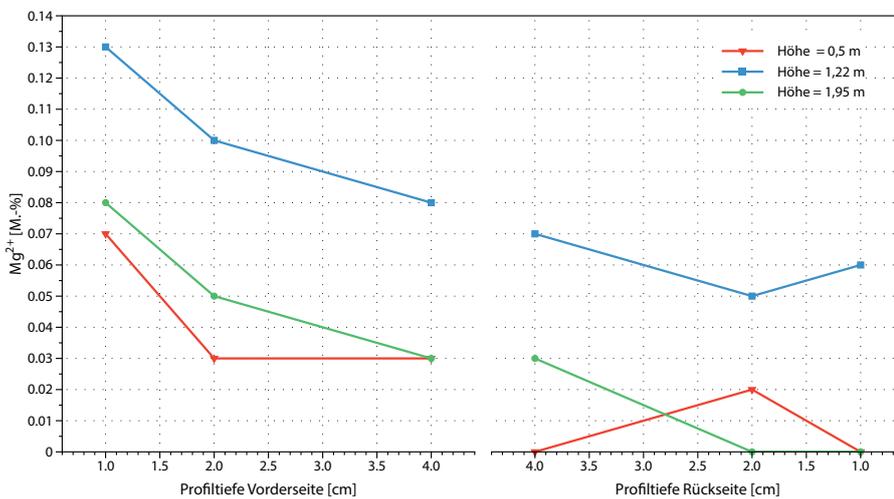


Abb. 19 Verteilung der Magnesium-Ionen in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).

fläche nahe oder auf der Steinoberfläche und wird bei Verdunstung des Lösungsmittels dort oberflächennah ausgefällt. Das schwer lösliche Salz Gips wird bei kurzzeitigen Schlagregenereignissen nicht so schnell wie die Nitrate wieder mobilisiert; seine Verteilungsmuster bleiben daher über längere Zeiträume auch bei Klimawechseln relativ stabil. So entstehen die beobachteten Verteilungen mit hohen, oberflächennahen Aufkonzentrationen.

Die Herkunftsquelle des Gipses bzw. des Gips bildenden Schwefels muss in Luft und Regenwasser gesehen werden. Dresden hat im 20. Jahrhundert über viele Jahrzehnte hohe Belastungen der Luft mit SO_2 aus anthropogenen Quellen erfahren (Siedel & Klemm 2000). Über den Niederschlag gelangten Sulfat-Ionen ins Erdreich und konnten mit der aufsteigenden Feuchte in den porösen Sandstein des Grabmals eindringen. Gleichzeitig erfolgte jedoch auch eine Ablagerung von Schwefel über „trockene Deposition“ direkt aus dem Luft- SO_2 an feuchten Sandsteinoberflächen. Letzterer Einfluss wird bei der Verteilung des Gipsgehaltes in der Grabplatte besonders am höchstgelegenen Profilpunkt ($h = 1,95 \text{ m}$) deutlich.

Der bei der Probenahme relativ trockene (Abb. 16) und mit Nitraten (Abb. 18) kaum belastete obere Abschnitt des Objekts liegt offensichtlich außerhalb des Grundfeuchteinflusses, enthält aber an der bewitterten, also zeitweilig stark durchfeuchteten Oberfläche extreme (ganz außen) bis hohe Sulfatgehalte nach WTA-Merkblatt 3/13/01D (2003), während die Gehalte an der Rückseite moderat sind. Der hier abgelagerte Gips muss der „trockenen Deposition“ zugeordnet werden. In den unteren Bereichen des Objekts muss davon ausgegangen werden, dass die trockene Deposition zusätzlich zum Transport von Ca- und Sulfat-Ionen aus dem Untergrund von der Oberfläche her

gewirkt hat, d.h. dass sich beide Gips bildenden Mechanismen überlagerten. Die geschwärzte Oberfläche („Patina“) an der bewitterten Seite weist auf einen intensiven Feuchteausaustausch über die Steinoberfläche hin (Siedel 2007), der Reaktionen mit dem Luft- SO_2 wohl begünstigt hat.

Summarisch kann festgestellt werden, dass das Objekt umweltbedingte, mittlere bis extreme Gipsbelastungen und abschnittsweise auch hohe Nitratbelastungen enthält. Diese bauschädlichen Salze sind mit großer Wahrscheinlichkeit auch Triebkräfte der auffälligen, aktiven Verwitterung im unteren Teil des Objektes (bis ca. 1,20 m Höhe, vgl. Abb. 5 auf S. 16 und Abb. 10 auf S. 22), wo ein Großteil der bearbeiteten Sandsteinoberfläche bereits zurückgewittert und verloren ist. Stichprobenartige, punktuelle Messungen der Wasseraufnahme mit dem Karsten-Prüfröhrchen auf der zurückgewitterten Steinoberfläche im unteren Teil der Grabplatte zeigten eine relativ geringe Wasseraufnahme und eine oberflächenparallele Ausbreitung der eindringenden Flüssigkeit („Hofbildung“ um das Röhrchen). W-Werte konnten wegen der Störeinflüsse nicht berechnet werden. Die massive oberflächennahe „Vergipsung“ setzt offenbar die Flüssigkeitsaufnahme über die betroffenen Oberflächen stark herab.

Aus den geschilderten Untersuchungen und dargestellten Ergebnissen ergibt sich die Notwendigkeit, vor der VKF eine Salzminderung der belasteten Oberflächen vorzunehmen, um die Schadstoffbelastung zu reduzieren und die Flüssigkeitsaufnahme über die Sandsteinoberflächen optimal zu gewährleisten.

4

Kapitel

Vorbereitende restauratorische Maßnahmen: Umsetzung und Entsalzung

4.1 Vorbereitung des Grabmals

Die flankierenden restauratorischen Arbeiten wurden von der Firma Michael Eilenberger (Holzhau, Erzgebirge) durchgeführt und umfassten die Umsetzung des Grabmals sowie dessen Fixierung auf einem Streifenfundament und anschließende Einhausung (siehe Abb. 5 auf Seite 16).

Vor dem Einsatz der Festigung im Vakuum-Kreislauf-Verfahren (VKV) wurden lose Bestandteile von der Oberfläche entfernt und deren Reinigung von Schmutzschichten und locker auflagernden Krusten durchgeführt.

4.2 Entsalzung

4.2.1 Durchführung und begleitende Probenahmen

Gips ist auf Grund seiner verhältnismäßig schlechten Löslichkeit ein Salz, das durch herkömmliche Entsalzungen mit auf die Steinoberfläche aufgelegten nassen Kompressen grundsätzlich relativ schwer zu entfernen ist (Siedel, 1996). Als aussichtsreichere Alternative wurde für das Grabmal Richter eine Entsalzung mit gerichtetem Feuchtestrom erwogen (vgl. WTA-Merkblatt 3/13/01D, 2003; Vergés-Belmin & Siedel 2005). Dabei wäre die Grabplatte mit der Rückseite horizontal in ein Wasserbad gelegt und an der

Frontseite Kompressenmaterial aufgelegt worden, um die Salze mit dem Kapillarstrom gerichtet in die Komresse zu bewegen. Da im Projekt das Vakuum-Kreislauf-Verfahren mit dem entsprechenden Equipment zur Verfügung stand, entschied man sich aber, die Möglichkeiten dieses Verfahrens bei einer Anwendung zur Entsalzung (vgl. Pummer 2007) auszutesten und mit umfangreicheren Untersuchungen zu begleiten, um die Eignung für den vorliegenden Fall kleinerer Objekte aus Cottaer Sandstein zu überprüfen.

Die Entsalzungsmaßnahme fand im Zeitraum vom 11. bis zum 19.06.2013 statt. Am 11.06. wurde das Objekt zunächst gesichert, indem die Oberflächen vollständig mit einem Vlies bedeckt wurden, das punktuell durch Heißkleber fixiert wurde und dazu diente, direkte mechanische Beanspruchungen der Oberflächen bei der anschließenden Behandlung zu verhindern, aber auch, um zwischen Steinoberfläche und Folie einen Zwischenraum zu schaffen, der der gleichmäßigen Umspülung des Objektes dienlich sein sollte (Abb. 20 links oben). Danach (12.06.) wurde das Objekt in reißfeste Folie eingepackt und die Nahtstellen wurden so verschweißt, dass die Folie das Objekt luftdicht einhüllte. In verschiedenen Höhen auf der Vorder- und Rückseite des Objekts wurden Packer mit Verschlüssen luftdicht in die Folienhaut eingesetzt, an die die Schläuche zur Zu- und Abfuhr des Wassers angekop-

pelt werden konnten (Abb. 20 unten links). Beginnend am 13.06.2013 wurde im durch Folie umhüllten Raum um das Sandsteinobjekt über Schlauchanschlüsse durch Abpumpen der Luft mit einer leistungsstarken Vakuumpumpe ein Unterdruck erzeugt. Dabei wurde bei langsamer Steigerung des Unterdruckes mit Drücken zwischen 150 und max. 600 mbar die großzügig bemessene Folie umhüllung vorsichtig an die Oberflä-

che des Objekts „anmodelliert“. Nach Erreichen eines entsprechend stabilen Unterdrucks in der Foliehülle wurde über Schlauchanschlüsse auf der Rückseite Leitungswasser aus einem Vorratsgefäß (temperiert auf 22 °C) in die Foliehülle eingelassen. Anschließend wurde das Leitungswasser aus der Foliehülle bei anhaltendem, von der Vakuumpumpe erzeugtem Unterdruck über Schläuche auf der Vorderseite wieder ab-



Abb. 20 Maßnahmen zur Entsalzung der Grabplatte, oben v.l.n.r.: Schutz der Oberfläche mit einem Vliesbelag vor dem Einschweißen in Plastikfolie; Apparatur zur Entsalzung; unten v.l.n.r.: in Folie eingeschweißte Grabplatte während des Entsalzungs Vorgangs (Ansicht von der Vorderseite mit Schlauchanschlüssen für die Wasserzufuhr); Auflage einer Zellstoffkompressen auf das nasse Objekt unmittelbar nach Entfernung der Plastikhülle im Anschluss an die Unterdruck-Entsalzung, aktive Trocknung aufgrund von Restfeuchte nach natürlicher Trocknung.

gepumpt, während durch Öffnen der Schlauchventile auf der Rückseite in Intervallen frisches Leitungswasser zugeführt wurde. Das salzbelastete abgezogene Wasser („Abwasser“) wurde in einem Gefäß abgetrennt, das zwischen Objekt und Vakuumpumpe in den Kreislauf eingebunden war. Durch einen Schaltmechanismus (Schließen und Öffnen von Ventilen) konnte der Unterdruck über ein zweites zwischengeschaltetes Gefäß zur Wasserabscheidung aufrechterhalten werden, während das erste, gefüllte Gefäß geleert wurde.

Diese Prozedur erfolgte an 7 Tagen täglich über etwa 9 Stunden. Über Nacht wurde die Vakuumanlage abgeschaltet. Die Menge des durchgesetzten Leitungswassers ist in Tab. 3 dargestellt. Während der Durchführung der Behandlung wurde die durchgelaufene Wassermenge täglich registriert. Weiterhin sind täglich Wasserproben (ca. 1,5 l) entnommen worden, die für die Messung von Leitfähigkeiten und Salzgehalt zurückgestellt wurden. Am 19.06.2013 wurde die Behandlung beendet. Danach wurde die Installation entfernt, das Objekt blieb jedoch noch in Folie gehüllt, um eine Austrocknung zu verhindern. Am 20.06.2013 erfolgte nach Entfernung der Umhüllung eine Probenahme in Form von Profilbohrungen unmittelbar neben den Profilen, an denen die Salzgehalte im Vorzustand ermittelt worden waren (zu den Probenahmepunkten und zur Methodik der Salzuntersuchungen s. Abschnitt 3.6 auf Seite 24). Danach wurde das Objekt mit einer feuchten Zellstoffkompressen (Arbocell BC 200) umhüllt, um die bei der Trocknung des nassen Objekts zur Steinoberfläche wandernden Salze aufzufangen und zu entfernen (Abb. 20, unten mittleres Bild). Die Abnahme der augenscheinlich trockenen Kompressen erfolgte am 25.07.2013 nach 5 Wochen Standzeit.

Tab. 3 Wasserdurchsatz bei der Entsalzung des Grabmals Richter vom 13. - 19. 06.2013.

Datum	Menge [l]
13.06.2013	750
14.06.2013	1.000
15.06.2013	1.000
16.06.2013	950
17.06.2013	1.000
18.06.2013	1.400
19.06.2013	1.550
Summe	7.650

Eine dritte Serie Profilbohrungen wurde am selben Tag durchgeführt, wiederum in unmittelbarer Nähe der bereits erfolgten Beprobungen. Gleichzeitig wurden im Bereich der Tiefenprofile Kompressenproben (100 cm²) zur Ermittlung der dort extrahierten Salz-mengen entnommen.

An den entnommenen Materialproben aus Steinobjekt, Kompressenzellstoff und benutztem Wasser wurden Bestimmungen der Gesamtsalzgehalte, teilweise auch einzelner Ionen vorgenommen, wie in Abschnitt 3.6 auf Seite 24 geschildert. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt, diskutiert und bewertet.

4.2.2 Salzgehalte im Objekt nach Entsalzung mit dem VKV

Die unmittelbar nach Entfernung der Folienhülle (vgl. Abschnitt 4.2.1) am 20.06.2013 entnommenen Bohrmehlproben sollen die Wirkung der Entsalzung mit dem VKV beschreiben. Um Feuchte- und Salzverteilungen über den nahezu gesamten, bis zu 22 cm dicken Querschnitt des Sandsteinobjekts zu erfassen, wurde im Vergleich zu den Messungen des Ausgangszustandes ein weiterer, tieferer Profilabschnitt (4-10 cm Tiefe) ausgebohrt. Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Abb. 21 bis Abb. 24 dargestellt. Der Gesamtsalzgehalt (Abb. 21) in den ersten beiden Tiefenzentimetern ist nach der Entsalzung mit dem VKV reduziert worden. Besonders die teilweise extrem hohen Gehalte im oberflächennahen Bereich (0-1 cm) sind nach dem ersten Entsalzungsschritt durchweg signifikant niedriger.

Die deutlichste Wirkung wird im unteren Bereich des Objekts (h = 50 cm) erzielt, wo der Gesamtsalzgehalt im gesamten Profil nur noch < 0,35 M.-% beträgt. Als Ursache können hier zum Einen gravitative Effekte diskutiert werden: In der „auf Spalt“ stehenden Grabplatte könnte auf der gesamten Oberfläche kapillar in den Stein eingedrungenes Wasser auf feinen Rissen parallel zur Schichtung des Sandsteins nach unten gesickert sein, so dass im unteren Bereich die Durchfeuchtung und damit Salz lösende Wirkung des Wassers besonders intensiv war. Insbesondere auf der Vorderseite im unteren Teil des Objekts, wo Schuppen- und Schalenbildung zum vollkommenen Verlust der Originaloberfläche geführt haben, könnte Sickerströmung zur dort beobachteten deutlichen Reduzierung der Salze bis in 2 cm Tiefe geführt haben. Zum anderen spielt möglicherweise auch die Situation nach dem täglichen Abschalten der Vakuumpumpe eine Rolle: Restwasser blieb über die Nachtstunden

in der Folienhülle und sammelte sich am Fuß des Objekts, wodurch ein deutlich längerer Kontakt des Wassers mit der dortigen Oberfläche intensiveres kapillares Einsaugen ermöglichte und gleichzeitig mehr Zeit für die Ionendiffusion bot. Es kann jedenfalls auch bei der Betrachtung der Feuchteverteilung im Sandstein gezeigt werden, dass die Durchfeuchtung des gesamten Querschnitts im unteren Bereich in einer nahezu idealen Weise gegeben war.

Die Durchfeuchtung liegt im unteren Abschnitt des Objekts zwischen 8 und 10 M.-% (Abb. 22). Nach Gru-

deutliche Reduzierung in Oberflächennähe (0-1 cm) festgestellt werden. Für Gips wird dies einerseits dem Ausdiffundieren von Calcium- und Sulfationen nach Lösung im Stein zugeschrieben, andererseits aber auch dem „Abwaschen“ von dünnen aufliegenden Gipskrusten. Bei Nitrat sind die Gehalte bis in 2 cm Tiefe ebenfalls verringert. Allerdings werden Erhöhungen der Nitratgehalte in größerer Tiefe (> 2 cm) festgestellt, am deutlichsten im Profil in 1,22 m Höhe, wo der Nitratgehalt im Objekt insgesamt am höchsten ist. Dies wird durch den Mittransport gelöster Salzio-

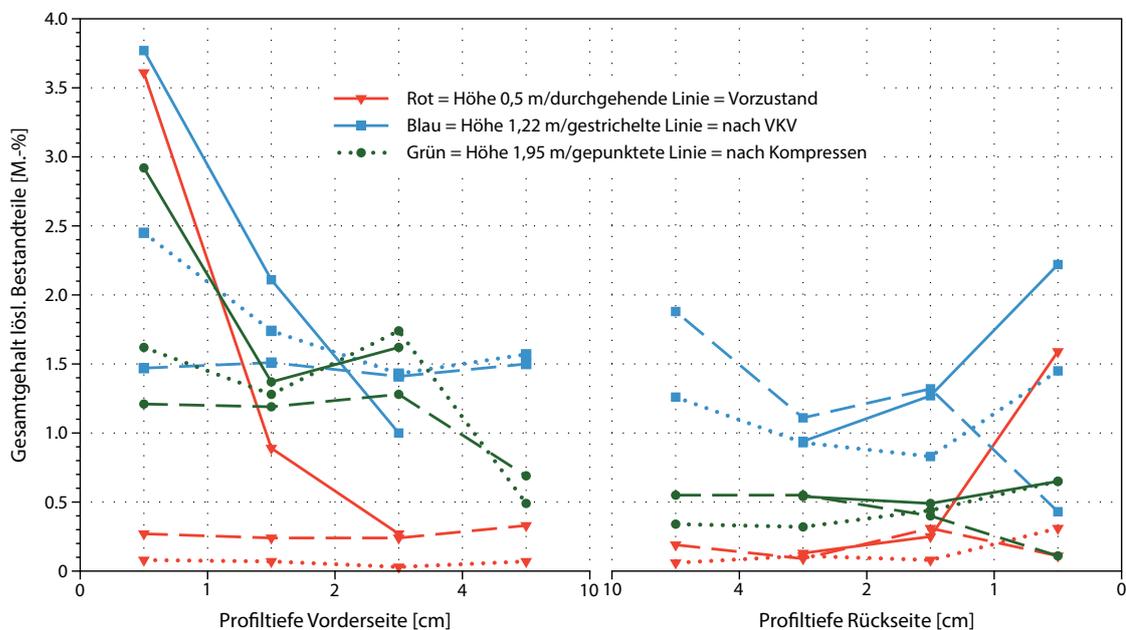


Abb. 21 Gesamtgehalt lösliche Bestandteile in der Grabplatte nach der Entsalzung mit VKV, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.-%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlsprobe. Die dargestellten Punkte bei 1, 1,5, 3 und 7 cm entsprechen jeweils den Mittelwerten für die Profilschritte 0-1, 1-2, 2-4 und 4-10 cm).

ner (1986) beträgt die durchschnittliche Gesamtwasseraufnahme von Cottaer Sandstein 8,89 M.-% ($n = 18$); die Werte schwanken zwischen 14,04 und 7,06. Der Durchfeuchtungsgrad des Objekts liegt also im unteren Bereich durchgehend nahe an der Sättigungsgrenze.

Dagegen zeigt sich im obersten Profil ($h = 1,95$ m) und im mittleren Abschnitt ($h = 1,22$ m) eine zum „Kern“ hin unvollständigere Durchfeuchtung, obwohl sich der Wassergehalt im Hohlraumgefüge des Sandsteins im Vergleich zum Vorzustand generell stark erhöht hat. Betrachtet man den Gipsgehalt (Abb. 23) und die Nitrat-Ionen (Abb. 24), kann in beiden Fällen eine

nen mit dem kapillar in den Sandstein eindringenden Wasser erklärt.

4.2.3 Salzgehalte im Objekt nach abschließender Kompressenentsalzung

Die Gesamtsalz- und die Feuchteverteilung nach 5-wöchiger Kompressenaufgabe ist in Abb. 21 und Abb. 22 dargestellt.

Der Feuchtegehalt im Objekt entspricht dabei in 1,95 m Höhe etwa dem vor Beginn der Maßnahmen, in 0,5 und 1,22 m Höhe ist er sogar etwas niedriger als zuvor.

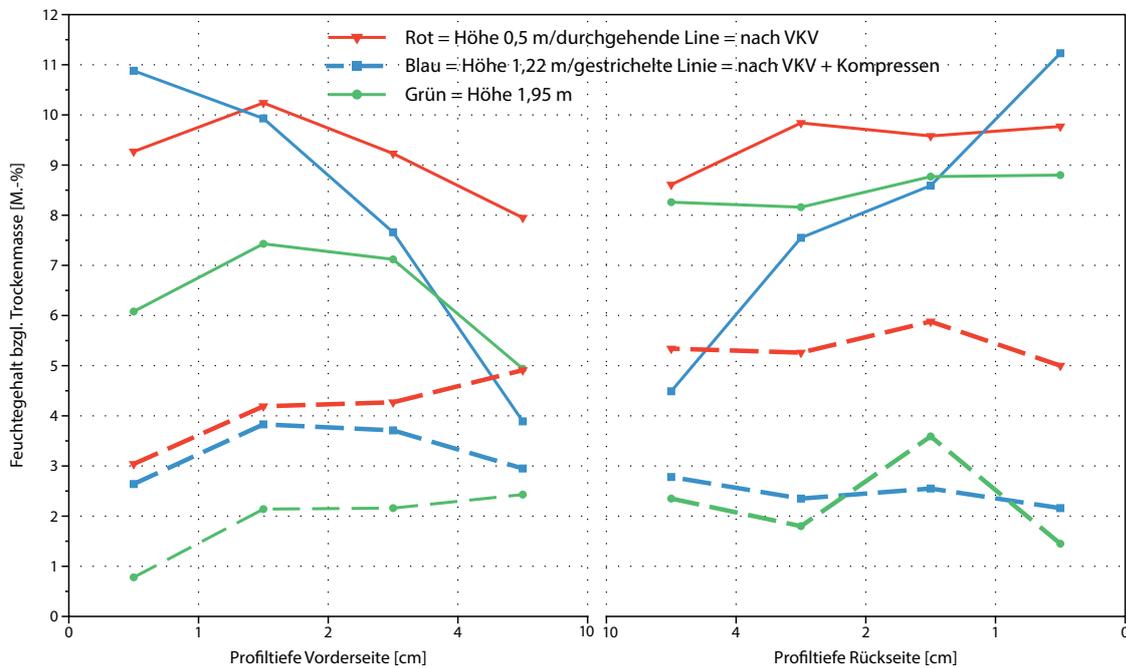


Abb. 22 Feuchteverteilung in der Grabplatte nach der Entsalzung mit VKV sowie anschließender Kompressenauf- lage, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.-%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe. Bohrmehlprobe. Die dargestellten Punkte bei 1, 1,5, 3 und 7 cm entsprechen jeweils den Mittelwerten für die Profilschritte 0-1, 1-2, 2-4 und 4-10 cm).

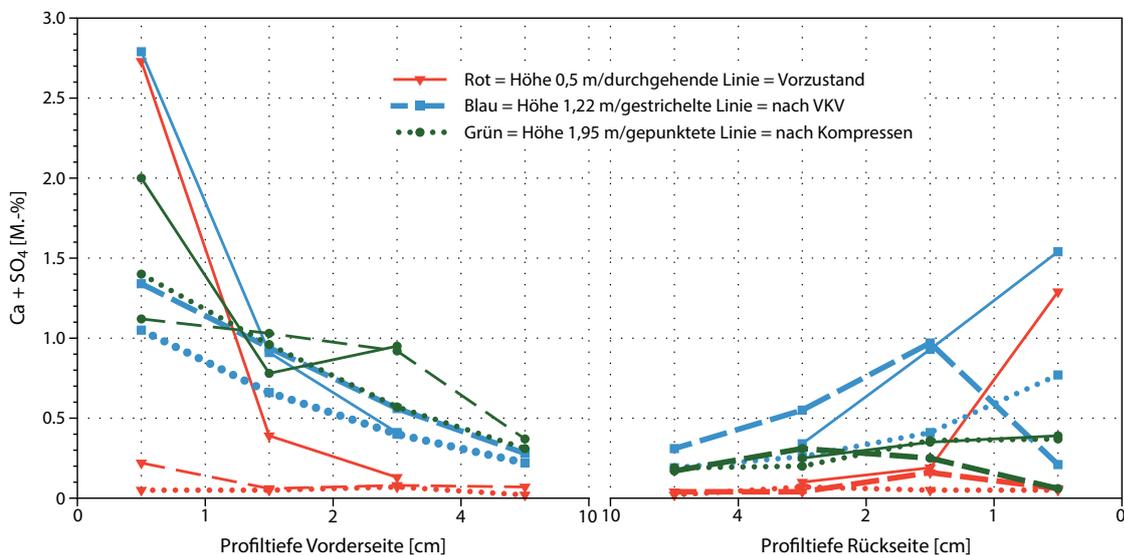


Abb. 23 Verteilung der Ionen Ca und Sulfat (Summe = Maß für den Gipsgehalt) in der Grabplatte nach der Entsal- zung mit VKV, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.-%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe. Die dargestellten Punkte bei 1, 1,5, 3 und 7 cm entsprechen jeweils den Mittelwerten für die Profilschritte 0-1, 1-2, 2-4 und 4-10 cm).

So kann geschlussfolgert werden, dass zum Zeitpunkt der Kompressenabnahme der Trocknungsprozess hin zu einem ausgleichfeuchten Zustand weitgehend abgeschlossen war.

Der Gesamtsalzgehalt im Profil in 0,5 m Höhe ist auf nahezu Null abgesunken, die Gehalte sind durchweg < 0,1 M.%, nur an der Rückseite ist der Gehalt im Oberflächenbereich mit 0,31 M.% noch etwas erhöht.

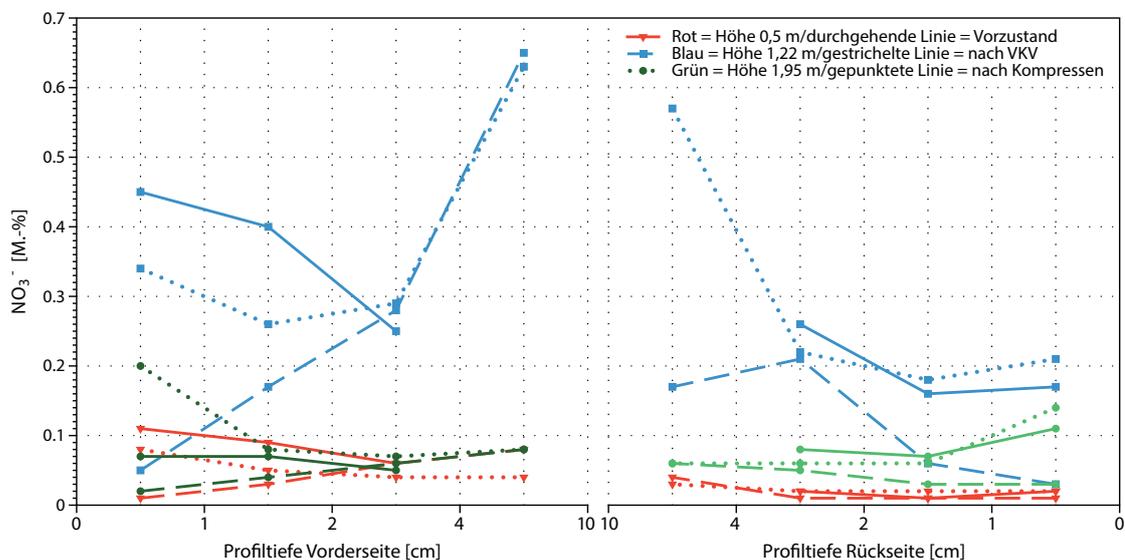


Abb. 24 Verteilung der Nitrat-Ionen in der Grabplatte nach der Entsalzung mit VKV, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.-%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe. Die dargestellten Punkte bei 1, 1.5, 3 und 7 cm entsprechen jeweils den Mittelwerten für die Profilschritte 0-1, 1-2, 2-4 und 4-10 cm).

Das Profil in 1,22 m Höhe zeigt im Vergleich mit dem Zustand unmittelbar nach dem VKV eine Erhöhung der Salzgehalte zur Oberfläche hin und eine leichte Abnahme zum Inneren hin.

Das Profil in 1,95 m Höhe hat sich nicht signifikant verändert, jedoch ist auch hier eine leichte Erhöhung der Gehalte nahe der Oberfläche im Vergleich mit dem Zustand nach dem VKV zu beobachten.

Mit Blick auf die Verteilung von Gips- und Nitratgehalt kann festgestellt werden, dass sie sich verschieden verhalten. In 50 cm Höhe ist der Gipsgehalt auf nahezu Null reduziert, in Höhe von 1,22 m und 1,95 m nimmt er von der Steinoberfläche zum Inneren hin nach der Kompressenabnahme kontinuierlich ab. Die Konzentrationen nahe der Oberfläche (0-2 cm Tiefe) sind, verglichen mit der Ausgangssituation vor Maßnahmebeginn, signifikant reduziert (Abb. 23).

Die Nitratgehalte nahe der Oberfläche haben sich, verglichen mit dem Zustand vor Kompressenaufgabe, wieder erhöht, während der hohe Salzgehalt im Inneren etwa gleich geblieben ist (Abb. 24). Wahrscheinlich haben sich infolge der Trocknung gelöste Ionen aus dem Steininneren in Richtung Oberfläche zurück bewegt. Dabei scheint der kontinuierliche advective Transport aus dem tieferen Steininneren während der zunehmenden Austrocknung der Grabplatte abgerissen zu sein.

Möglicherweise haben sich sogar gegenläufige Prozesse - tieferes kapillares „Nachsaugen“ Richtung

„Kern“ im feuchten Steininneren und kapillarer Transport zur abtrocknenden Verdunstungsfläche - zu Beginn der Trocknungsphase mit Kompressen überlagert.

Zumindest für die möglicherweise hygroscopischen Nitrate ist, abhängig von künftigen Umgebungsklimaten, eine weitere Umverteilung im Steininneren mit gleichmäßigerer Konzentrationsverteilung denkbar.

4.2.4 Effizienz der Entsalzung und Wirkmechanismen

Als Effizienz der Entsalzung wird der Vergleich des Gehalts der Salze im Stein vor und nach der Behandlung bezeichnet (Pel et al. 2010):

$$\varepsilon = \Delta m / m_0 \cdot 100 \% \quad (4.1),$$

mit Δm = Massedifferenz Salzgehalt vor/nach der Entsalzung, m_0 = Gesamtsalzgehalt im Stein vor der Entsalzung. Der dimensionslose Wert in Formel (1) gibt Auskunft über die erreichte Reduzierung des Ausgangssalzgehaltes, ist in der Praxis jedoch schwer zu bestimmen, weil eine vollständige Bilanz für das gesamte Objekt kaum zu erlangen ist.

In der folgenden Betrachtung werden deshalb zur Bewertung der Effizienz, bezogen auf die untersuchten Profilschnitte, die jeweiligen Salzgehalte im Stein in Masse-% vor und nach der Entsalzung in Beziehung

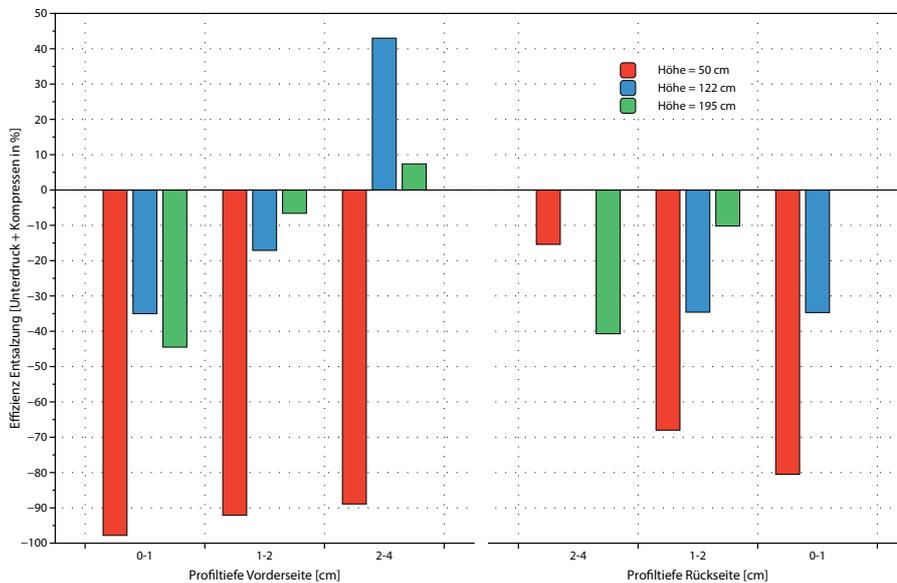


Abb. 25 Effizienz der Entsälzung mit VKV und anschließender Kompressenaufgabe, ermittelt in verschiedenen Höhen und Profiltiefen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M-%, bezogen auf den Ausgangssalzgehalt in M-%).

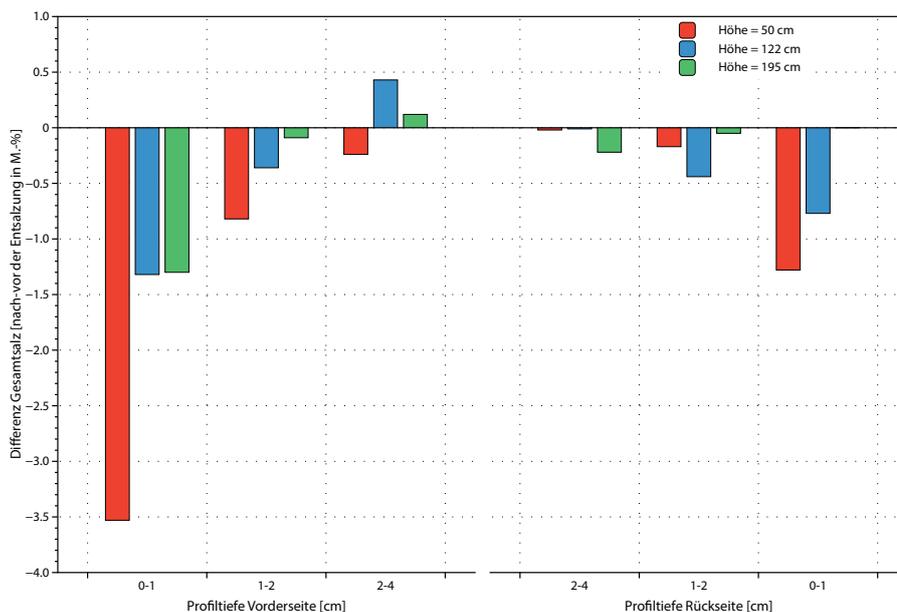


Abb. 26 Differenz zwischen Ausgangssalzgehalt und Salzgehalt nach Entsälzung mit VKV und anschließender Kompressenaufgabe, ermittelt in verschiedenen Höhen und Profiltiefen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M-%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).

gesetzt. Der resultierende Wert wird in den Diagrammen im Falle einer Reduktion der Ausgangsgehalte negativ, im Falle einer Zunahme des Salzgehalts im jeweiligen Profilabschnitt positiv dargestellt.

Abb. 25 zeigt zunächst eine Bewertung der Effizienz im o. g. Sinne. Dabei wird deutlich, dass das Ergebnis im unteren Bereich des Objekts ($h = 50$ cm) mit einer Effizienz von $> 89\%$ auf der Vorderseite hervorragend ist (d.h., mindestens 89% des ursprünglich vorhandenen Salzgehalts wurden entfernt). Auf der Rückseite ist die Effizienz in den vorderen Profilabschnitten > 68

$\%$, in 2-4 cm Tiefe deutlich geringer (15%). Berücksichtigt man jedoch die zum Inneren hin steil abfallenden Profile der Salzgehalte (vgl. Abb. 21 auf Seite 33) sowie die absolut gesehen geringen Gehalte in größeren Tiefen kann das Ergebnis immer noch als ausgezeichnet angesehen werden (Abb. 26 auf Seite 36).

In 122 cm und 195 cm Höhe ist die Effizienz deutlich geringer. In 122 cm Höhe konnte bis 2 cm Tiefe eine Reduzierung um weniger als 40% festgestellt werden. In größerer Tiefe (2-4 cm) ist die Reduzierung

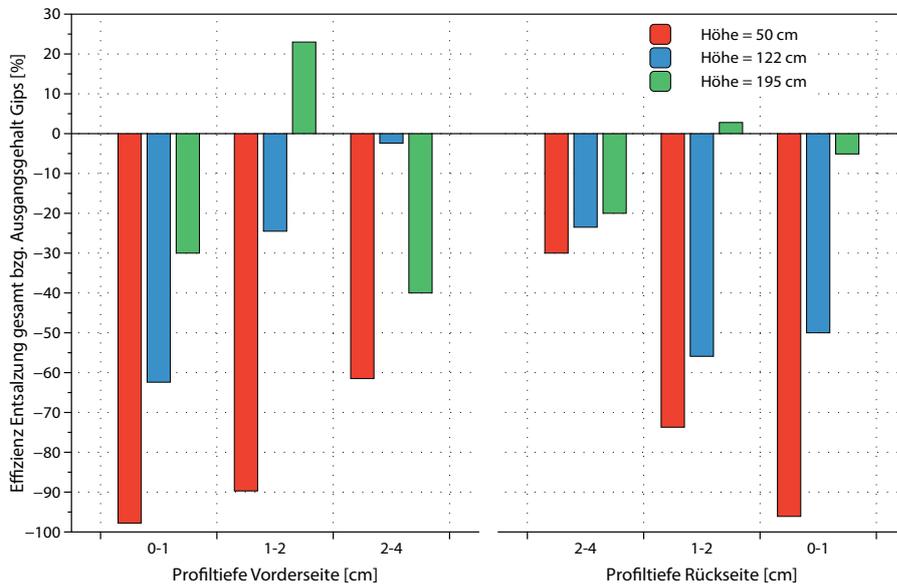


Abb. 27 Effizienz der Entsalzung mit VKV und anschließender Kompressenauflage bezüglich Gips (Ca + Sulfatgehalt), ermittelt in verschiedenen Höhen und Profiltiefen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in %, bezogen auf den Ausgangssalzgehalt in M.-%).

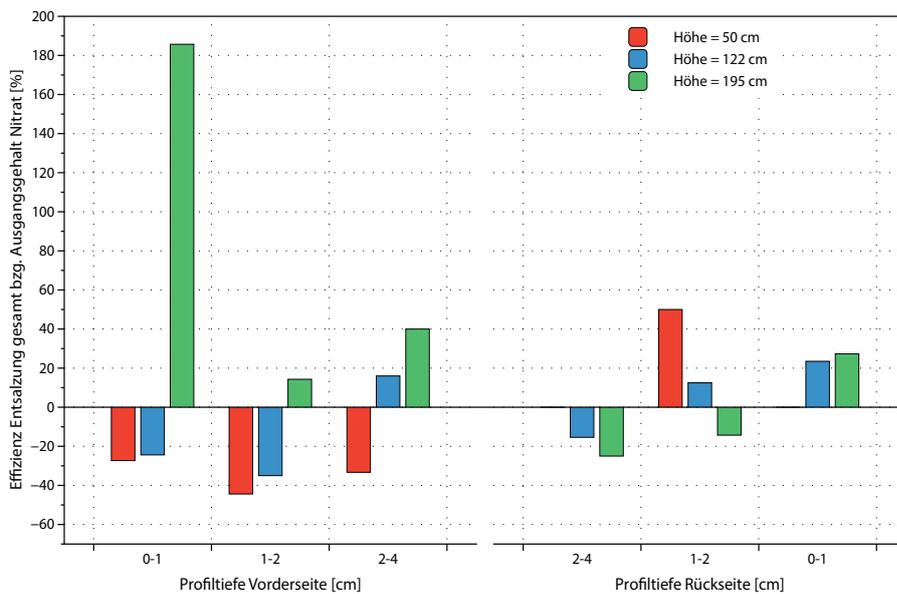


Abb. 28 Effizienz der Entsalzung mit VKV und anschließender Kompressenauflage bezüglich Nitrat, ermittelt in verschiedenen Höhen und Profiltiefen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in %, bezogen auf den Ausgangssalzgehalt in M.-%).

gleich Null bzw. der Salzgehalt stieg sogar an (Vorderseite). In 195 cm Höhe konnte der Gehalt auf der Vorderseite oberflächennah um über 40 % reduziert werden; die absolut gesehen geringen Gehalte in größeren Tiefen und auf der Rückseite haben sich nicht signifikant geändert.

Bewertungen hinsichtlich der Gips- ($\text{Ca} + \text{SO}_4^-$ Ionen) und Nitratgehalte sind in Abb. 27 und Abb. 28 dargestellt. Die Reduzierung des Gipsgehaltes in 50 und 122 cm Höhe bis zu einer Tiefe von 2 cm kann als hervorragend (50 cm) bis gut bezeichnet werden.

Zur Tiefe hin verringert sich zwar die Effizienz, aber auch die Ausgangsgehalte fallen in diese Richtung steil ab. Somit kann festgestellt werden, dass die Effizienz in den am stärksten belasteten Außenbereichen am höchsten ist. Vergleicht man die hier erreichten Ergebnisse mit den Resultaten von Entsalzungen mit verschiedenen Arten von Oberflächenkompressen (Zellulose, Zellulose-Ton-Sand-Gemisch), die an stark mit Gips belasteten Fassadenabschnitten des Dresdner Zwingers in den 1990er Jahren durchgeführt worden sind (Siedel 1996), so muss festgestellt werden, dass dort im günstigsten Falle nach drei Kompressen-

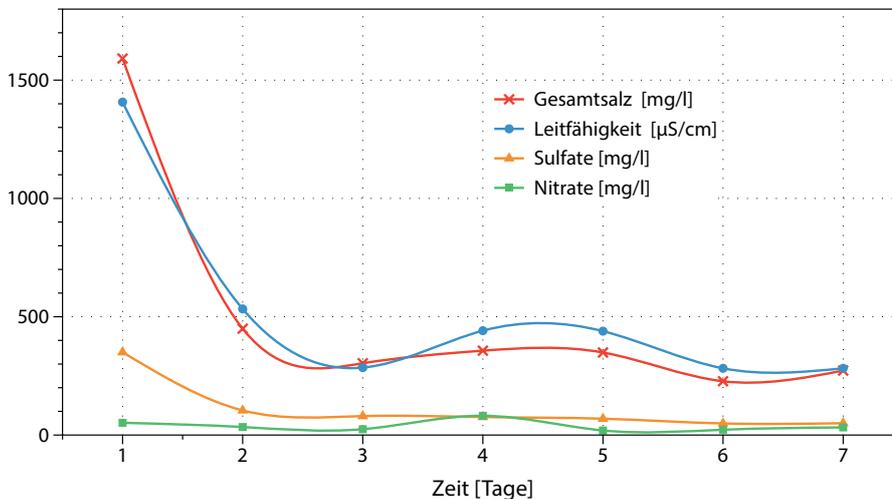


Abb. 29 Messung der Gesamtsalzgehalte, elektrischen Leitfähigkeiten, Sulfat- und Nitratkonzentrationen in Stichproben des „Abwassers“ aus der Entsalzung mit VKV..

zyklen nur eine Effizienz von 25 % erreicht worden ist. Hinsichtlich des schwer löslichen und somit schwer extrahierbaren Gipses kann das erreichte Ergebnis also als gut bezeichnet werden.

Für die Nitratsalze ist das Ergebnis widersprüchlich. Die geringen Nitratgehalte in 50 cm Höhe auf der Vorderseite des Objekts wurden nochmals deutlich reduziert, auf der Rückseite gehen die Ausgangsgehalte ohnehin gegen Null. Die ebenfalls geringen Ausgangsgehalte an Nitraten in 195 cm Höhe sind nach Abschluss der Entsalzung zur Oberfläche hin gewandert, eine stärkere Extraktion scheint nicht stattgefunden zu haben.

Im am stärksten belasteten Bereich in Höhe von 122 cm sind die Nitratgehalte auf der Vorderseite bis 2 cm Tiefe leicht reduziert worden, im Inneren dagegen angestiegen. Von der Rückseite her zeigt sich genau das entgegengesetzte Bild. Über die Wirkungsmechanismen während des Prozesses der Entsalzung geben die Untersuchungen von Stichproben des Salzgehaltes der „Abwasser“ aus dem Prozess und die laufende Kontrollen der elektrischen Leitfähigkeit dieser Wässer Auskunft.

Die täglich entnommenen Wasser-Stichproben (1,5 l) wurden mit den in Abschnitt 3.6 auf Seite 24 dargestellten Methoden auf Sulfat-, Nitrat- und Gesamtsalzgehalt untersucht. Während der ersten 5 Tage der Entsalzung wurden in kürzeren Abständen Messungen der elektrischen Leitfähigkeit am „Abwasser“ aus dem Entsalzungsprozess mit VKV durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in Abb. 29 und Abb. 30 dargestellt. Beide Abbildungen zeigen die hohen Salzgehalte (Gesamtsalz, Sulfat) im „Abwasser“ am ersten Tag. Vom zweiten Tag an sinkt der mit dem Wasser extrahierte

Salzgehalt auf ca. $\frac{1}{4}$ der Konzentration des ersten Tages ab und verbleibt etwa auf diesem Niveau. Der aus dem Grabmal extrahierte Nitratgehalt im Wasser ist von Beginn an deutlich geringer als der Sulfatgehalt (Abb. 29).

Daraus wäre zu schließen, dass die leichter löslichen Salze wohl mit der kapillar eindringenden Feuchtefront schnell advektiv ins Steininnere bewegt wurden (s. auch Abb. 24 auf Seite 35). Dagegen wanderten die sich langsamer lösenden, oberflächlich stark konzentrierten Gipse in stärkerem Maße diffusiv über kürzere Distanz in das neu eingeführte frische Wasser ein oder werden auch durch den permanenten Wasserfluss entlang der Oberfläche direkt „abgewaschen“ (vgl. Abb. 23 auf Seite 34). Dieser Effekt wurde mit sinkendem Konzentrationsgefälle an der Steinoberfläche (d.h. Abbau der zunächst sehr hohen Gipskonzentration) nach dem ersten Behandlungstag deutlich geringer (Abb. 29).

Interessant ist dabei aber, dass nach längeren Abschaltzeiten der Pumpe während des Vakuum-Kreislauf-Prozesses die Leitfähigkeit im kurz danach extrahierten Wasser wieder angestiegen war (Abb. 30). Dies war der Fall sowohl am frühen Morgen (8 Uhr), wenn das noch in der Foliehülle befindliche Restwasser abgepumpt und durch neues ersetzt wurde, als auch nach der Mittagspause (ca. 13 Uhr), als die Anlage kurzzeitig ebenfalls abgeschaltet wurde und das in der Hülle befindliche Wasser längere Zeit mit der Steinoberfläche im permanenten Kontakt war.

Auch diese Beobachtungen sprechen für eine stark durch diffusive Prozesse gesteuerte Salzextraktion, ähnlich, wie dies bei der Vollbadentsalzung der Fall ist (Franzen et al., 2013).

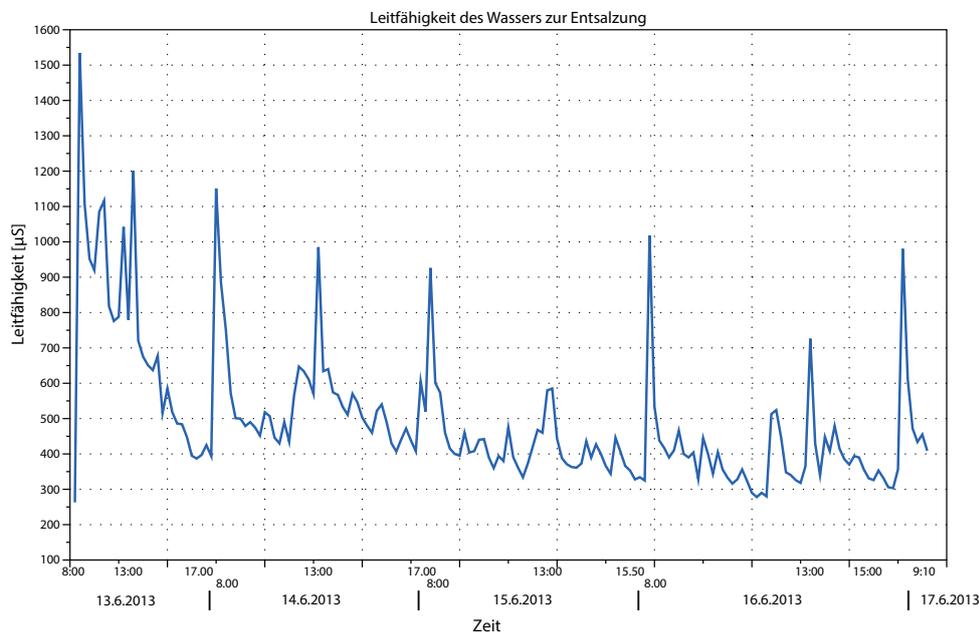


Abb. 30 An „Abwasser“ aus dem Vakuum-Kreislauf-Prozess gemessene elektrische Leitfähigkeiten während der ersten 5 Tage der Entsalzung mit VKV.

Die Porenstruktur des Cottaer Sandsteins mit einem Maximum der Porendurchmesser zwischen 0,1 und 10 μm erlaubt trotz des angelegten Unterdrucks offensichtlich kein „Durchspülen“ des Porenraums. Folgerichtig kann der advective Transport gelöster Salze zur Oberfläche nur in der Trocknungsphase, d.h. während der Kompressenbehandlung stattfinden.

Der Austrag gelöster Salze in der Trocknungsphase kann über die Salzgehalte in den aufgelegten Kompressen bewertet werden (Abb. 31). Der Salzgehalt der in verschiedenen Höhen, korrespondierend zu den Salzprofilen, entnommenen Kompressenproben (vgl. 4.2.1 auf Seite 30) ist in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Profilmessungen. Die niedrigsten Salzgehalte in Kompressen wurden in 195 cm Höhe gefunden, wo die Veränderungen der Salzgehalte in den Profilen vor und nach der Kompressenent-salzung niedrig waren (vgl. Abb. 21 auf Seite 33).

In den Profilschnitten in 50 cm Höhe, wo der Salzgehalt bereits nach dem VKV auf ein sehr niedriges Niveau abgesenkt werden konnte, ist der Extraktionseffekt in der Kompressen ebenfalls niedrig, führte aber im Stein zu einer Konzentration nahe Null (Abb. 21). Der beste Extraktionseffekt durch die abschließende Kompressenaufgabe wurde in Höhe von 122 cm erreicht, wo der Salzgehalt in den Kompressen bis zu doppelt so hoch war wie im unteren und oberen Bereich des Objekts.

4.2.5 Zusammenfassung

Die Behandlung des Grabmals Richter zur Entsalzung mit dem VKV und anschließender Kompressenaufgabe hat ein befriedigendes bis gutes Ergebnis gezeitigt. Vor allem hinsichtlich der hohen Gipsbelastung konnte in Oberflächennähe eine beträchtliche Salzminimierung erreicht werden. Schlechter ist dagegen die Effizienz des Verfahrens im Hinblick auf das leichter lösliche Nitrat. Der Entsalzungseffekt des VKV basiert nach den vorliegenden Ergebnissen vor allem auf dem Prinzip der Ionendiffusion.

Der oberflächennah stark angereicherte, schwer und deswegen nur langsam lösliche Gips kann in größerem Umfang diffusiv vom Stein in das genutzte salzarme Leitungswasser transportiert werden. Vorstellbar ist, dass der Lösungs- und anschließende Diffusionsprozess in der stark durchfeuchteten Außenzone des Sandsteins permanent stattfindet, sobald ein Wassergehalt im Porenraum nahe der Sättigungsfuchte erreicht wird.

Das leichter und schneller lösliche Nitrat wird dagegen mit der kapillar weiter ins Steininnere vordringenden Feuchtefront zu großen Teilen advektiv tiefer in das Steininnere transportiert.

Dort ist der Feuchtegehalt, insbesondere im mittleren und höheren Abschnitt des Objekts (122 cm und 195 cm Höhe), deutlich niedriger als in der Außenzone (vgl. Abb. 22 auf Seite 34). Nach Abschluss der VKV-Behandlung wird durch gegenläufige Prozesse (tieferes kapillares Eindringen / „Nachsaugen“ des Wassers

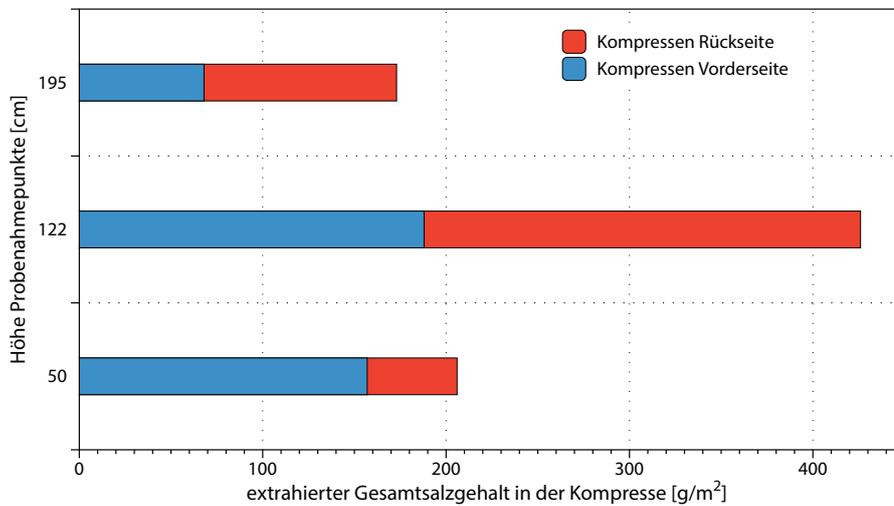


Abb. 31 Extrahierter Gesamtsalzgehalt in Kompressenproben, bezogen auf die wirksame Fläche der Kompressen, nach Abschluss der Kompressenentsalzung mit Zellstoffkompressen. Die Proben wurden im Bereich der Bohrprofile (vgl. Abb. 21 - Abb. 24) entnommen.

tief im Steininneren und gleichzeitig Rückverlagerung der Feuchte zur Oberfläche hin mit Beginn der Trocknungsphase) offenbar ein „Abreißen“ des advektiven Rücktransports von Nitrat hervorgerufen. Während im vorderen Teil des Profils (bis 2 cm Tiefe, vgl. Abb. 24 auf Seite 35) advektiv eine merkliche Rückverlagerung von Nitrat zur Oberfläche stattfindet, bleibt die hohe Konzentration in größerer Tiefe (4-10 cm) weitgehend erhalten.

Die Betrachtung der Dynamik des Entsalzungsvorganges (vgl. Abb. 29 und Abb. 30) legt nahe, dass hinsichtlich des hauptsächlich über Diffusion gesteuerten Entsalzungseffekts weitere Optimierungen des Ver-

fahrens möglich wären. Dies könnte etwa durch Intervalle geschehen, in denen vom zweiten Arbeitstag an die Absaugung des in der Folie befindlichen Wassers für längere Zeit (mindestens 1 Stunde) unterbrochen wird, um einen ungestörten Diffusionsprozess zu ermöglichen.

Insgesamt gesehen stellt die Entsalzung mit dem VKV eine interessante, aber auch relativ aufwändige Methode dar, die für hochwertigere und nicht abbaubare oder transportfähige Objekte im figuralen Bereich eine mögliche Behandlungsalternative bietet.

5

Kapitel

Voruntersuchungen an Probekörpern aus Cottaer Sandstein

5.1 Probekörper und Tränkung

Um das Eindringverhalten, die Verteilung und die Wirkung des Tränkstoffes im Cottaer Sandstein vor der Applikation am Denkmalobjekt abschätzen zu können, wurden Vorversuche an Probekörpern aus bruchfrischem Sandstein durchgeführt. Dazu sind Würfel mit der Kantenlänge 20 cm von den Sächsischen Sandsteinwerken Pirna GmbH aus Cottaer Sandstein der Varietät gwg (grau weiß gelb) gesägt worden. Sie wurden über mehrere Wochen bei Raumklima (65 % r. F. / 21 °C) konditioniert.

Als Tränkstoffe zur Festigung wurden elastifizierte Kieselsäureester(KSE)-Festiger der Firma Remmers gewählt, die in der restauratorischen Praxis am Cottaer Sandstein bereits seit mehr als einem Jahrzehnt gelegentlich verwendet worden sind. Zur Anwendung für die Tiefenimprägnierung mit dem VKV wurden die genutzten Festiger mit einem Erhärtungsbeschleuniger versetzt, der von der Firma Remmers in Löningen für das VKV entwickelt wurde. Er soll das „Auslaufen“ von KSE aus dem getränkten Objekt sowie überlange Reaktionszeiten der Flüssigkeit im Stein verhindern (Pummer 2007).

Vier Probewürfel wurden in Rossatz im Atelier Pummer jeweils einzeln luftdicht in Folie gehüllt und im

Juni 2013 mit dem VKV über ca. 6-8 Stunden mit verschiedenen Festigern bzw. Festigerkombinationen getränkt. Zwei weitere, mit Remmers 300E im gleichen Verfahren gefestigte Probekörper wurden unmittelbar nach der Behandlung aufgespaltet, um die erreichte Eindringtiefe des Festigers zu ermitteln (Abb. 32).

Die Behandlung mit Remmers 300E sollte dabei die am Objekt beabsichtigte Tränkung simulieren. Die beiden anderen Varianten mit vorkondensierten KSE (Remmers 500E und Mischung aus Remmers 300E und 500E) ließen grundsätzliche Aussagen zur Verwendung solcher Systeme mit größeren Molekülen am Cottaer Stein in Verbindung mit dem VKF erwarten und sollten die Voruntersuchung abrunden.

Zum Vergleich wurde schließlich ein weiterer Prüfkörper durch den Restaurator M. Eilenberger im „klassischen“ Verfahren allseitig von Hand von der Oberfläche her mit Remmers 300E gefestigt. Informationen zu den jeweiligen Behandlungen werden in Tab. 4 gegeben. Weiterhin wurden zwei Probekörper drucklos durch Immersion in KSE Remmers 300E behandelt, um die Eindringtiefe bei gleicher Behandlungszeit wie im VKV zu ermitteln (Abb. 33).

Nach der Tränkung wurden die Probekörper ca. 4 Monate bei Raumklima (65 % r. F. /21°C) gelagert, bevor aus den Würfeln der Proben K, P1 und E jeweils 8

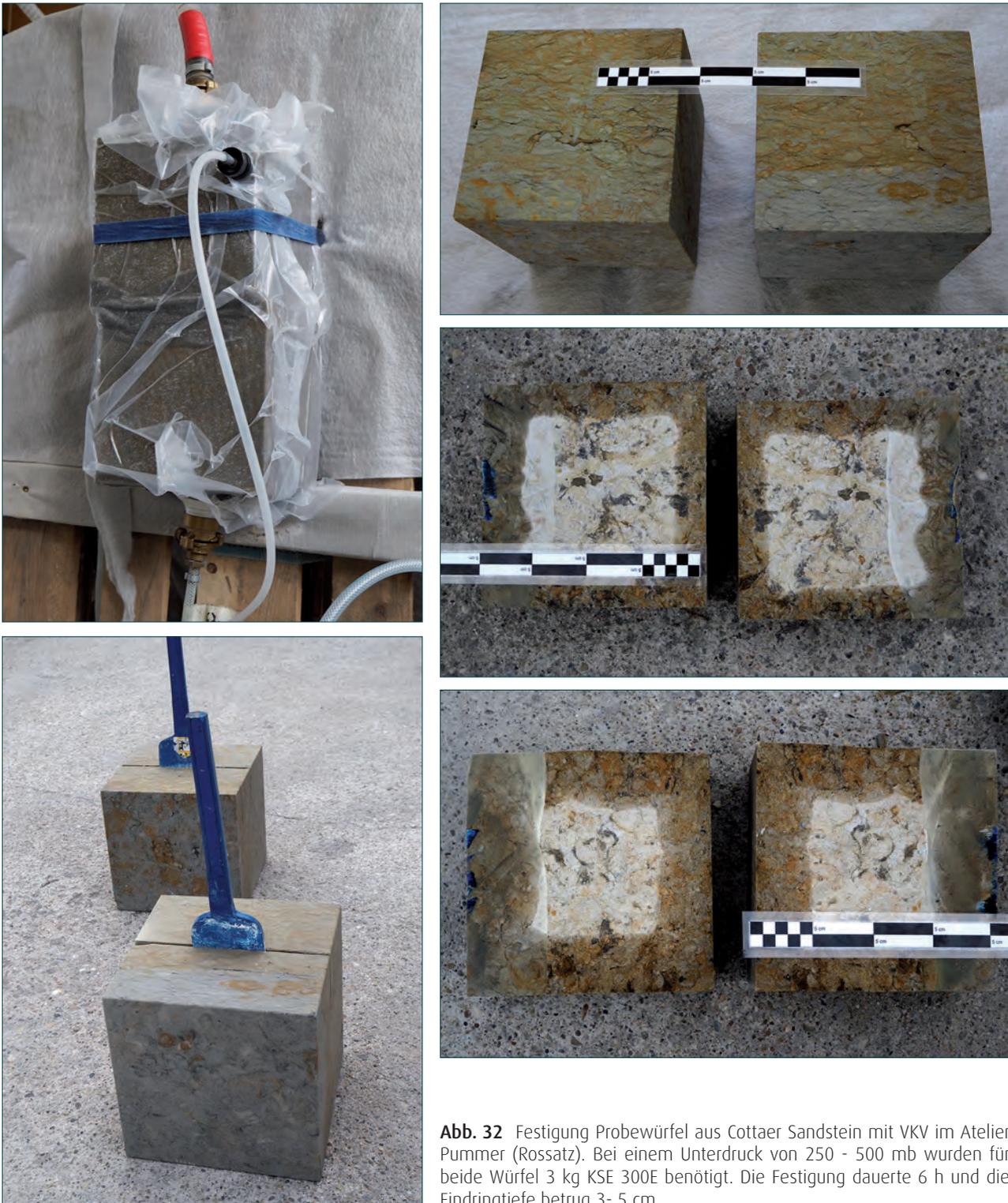


Abb. 32 Festigung Probewürfel aus Cottaer Sandstein mit VKV im Atelier Pummer (Rossatz). Bei einem Unterdruck von 250 - 500 mb wurden für beide Würfel 3 kg KSE 300E benötigt. Die Festigung dauerte 6 h und die Eindringtiefe betrug 3- 5 cm.

Bohrkerne mit dem Außendurchmesser 50 mm parallel und senkrecht zur Schichtung ausgebohrt worden sind (Abb. 34). Die Bezeichnungen der Bohrkerne finden sich in Tab.

5 auf S. 46. Gleichermäßen beprobt wurde auch ein unbehandelter Sandsteinwürfel (Probe U).

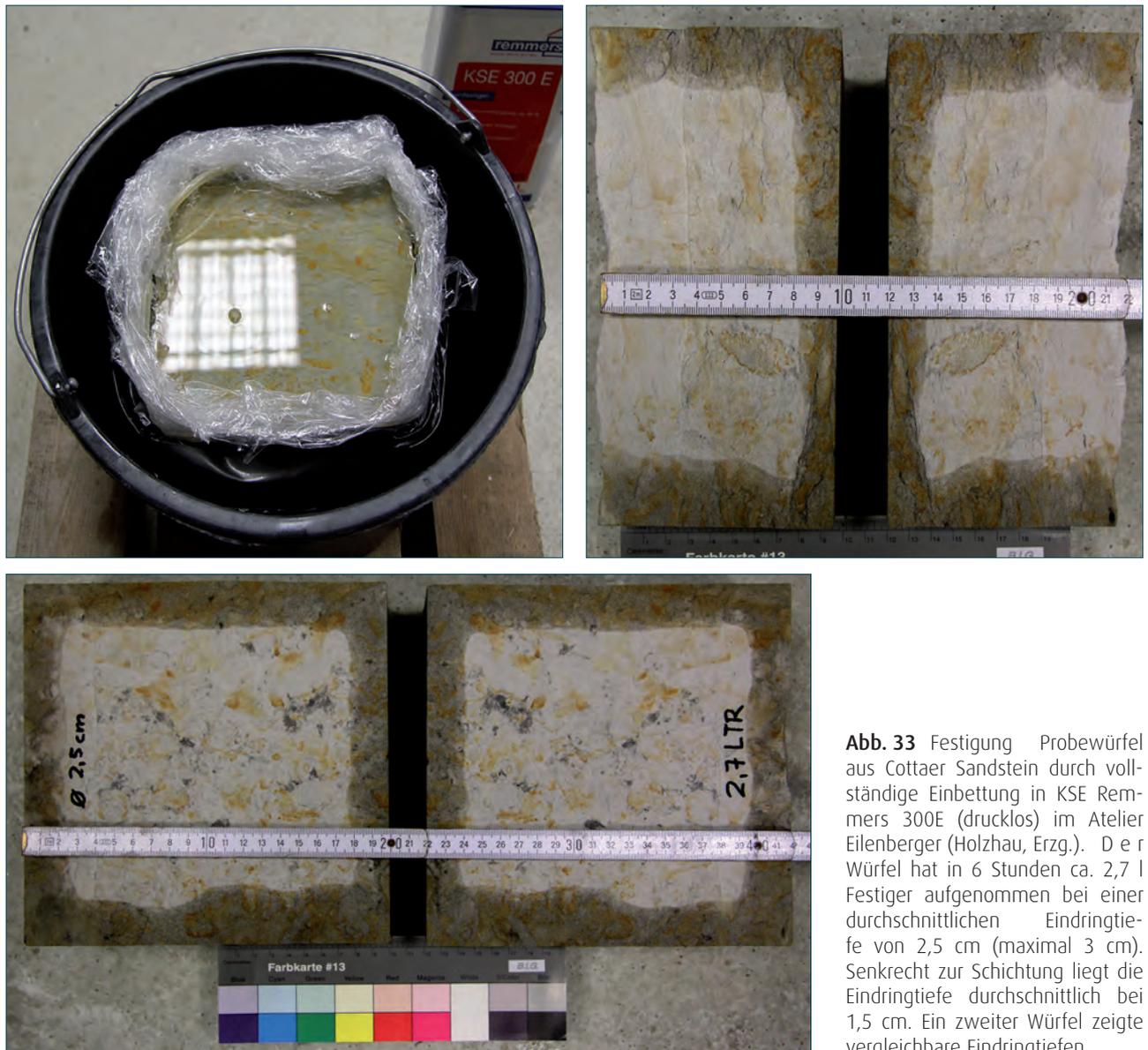


Abb. 33 Festigung Probewürfel aus Cottaer Sandstein durch vollständige Einbettung in KSE Remmers 300E (drucklos) im Atelier Eilenberger (Holzhau, Erzg.). Der Würfel hat in 6 Stunden ca. 2,7 l Festiger aufgenommen bei einer durchschnittlichen Eindringtiefe von 2,5 cm (maximal 3 cm). Senkrecht zur Schichtung liegt die Eindringtiefe durchschnittlich bei 1,5 cm. Ein zweiter Würfel zeigte vergleichbare Eindringtiefen.

5.2 Untersuchungsmethoden

Zur Bewertung der Tränkungen wurden für den Festigungserfolg maßgebliche hydrische und mechanische Parameter am gewonnenen Bohrkernmaterial untersucht. Um den Verlauf der Festigkeitsprofile und die Änderungen der hydrischen Eigenschaften des gefestigten Steins zu ermitteln, wurden die Bohrkern im Gesteinsmechanischen Labor des Instituts für Geotechnik der TU BAF senkrecht zur Längsachse in Abschnitte (Scheiben) von 5 mm Dicke zersägt. Dies ermöglicht eine ausreichend hoch auflösende Beschreibung der durch die Festigung hervorgerufenen Änderungen der Steineigenschaften (Sattler, 1992).

Außerdem können an solchen Proben vor der Zerstörung bei der Festigkeitsprüfung weitere zerstörungsfreie Messungen ausgeführt werden (Siedel & Siegemund, 2011).

Vor der Trennung sind an den Bohrkernen jeweils abschnittsweise Ultraschalllaufzeiten quer zur Längsachse (in zwei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen) gemessen worden.

An den erhaltenen Bohrkernscheiben wurden die nachfolgend aufgeführten technischen Gesteinskennwerte bestimmt (hydrische Kennwerte an der TU Dresden, mechanische Kennwerte an der TU BA Freiberg).

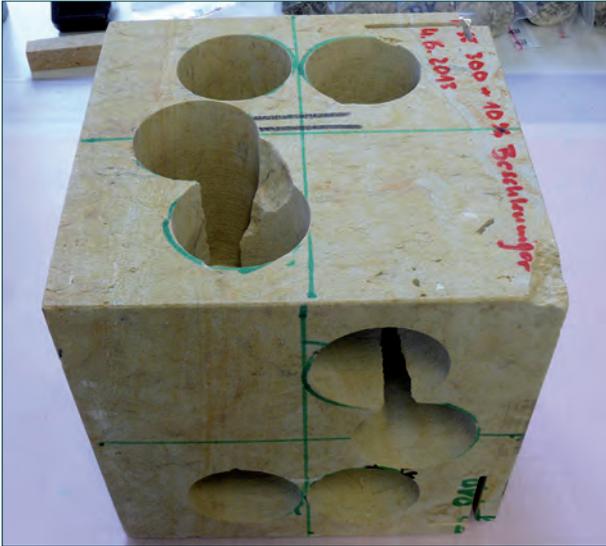


Abb. 34 Probekörper P mit ausgebohrten Prüfyzylindern, parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert.

5.2.1 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Die (dimensionslose) Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ (μ -Wert) gibt ein Maß dafür, um wie viel größer der Widerstand eines Materials gegen durchströmenden Wasserdampf verglichen mit einer gleich dicken, reinen Luftschicht ist. Er ist somit ein Maß für die „Atmungsaktivität“ des Gesteins, für seine Fähigkeit, Wasser in Dampfform durch das Gefüge passieren zu lassen.

Die Bestimmung erfolgte in Anlehnung an EN ISO 12572 im „wet cup“-Verfahren an den 5 mm dicken Sandsteinscheiben mit 50 mm Durchmesser. Zur Konditionierung der Feuchte wurde im Gefäß gesättigte KH_2PO_4 -Lösung verwendet (r. H. 96 % bei 20-25 °C), der umgebende Außenraum wurde im Klimaschrank bei r. H. 50 %, 21 °C konditioniert.

Der Gewichtsverlust im Gefäß wurde über jeweils 14 Tage verfolgt, der barometrische Luftdruck der Wetterstation Dresden-Klotzsche wurde dabei täglich registriert und der μ -Wert entsprechend EN ISO 12572 berechnet.

Aus 3 Messungen über je 24 Stunden wurde für jede Bohrkernscheibe ein Mittelwert für μ errechnet.

5.2.2 Gesamtwasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Die zur Messung der hydrischen Dehnung verwendeten Prüfkörper (Bohrkernscheiben) wurden im ausgleichsfeuchten Zustand vor dieser Messung



Abb. 35 Messung der hydrischen Dehnung an Bohrkernscheiben.

(Raumklima 21 °C / 65 % r.H.) und unmittelbar nach Beendigung des Versuchs und der Entnahme aus dem Wasser (nach 4 Tagen) ausgewogen. Die ermittelte Massedifferenz entspricht der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und wurde auf die Trockenmasse bezogen (Angabe in M.-%).

5.2.3 Hydrische Dehnung

Zur Messung der hydrischen Dehnung des Sandsteins wurden die Bohrkernscheiben in Edelstahl-Halterungen mit Präzisions-Messuhren (Fa. Hommel, Messgenauigkeit 0,01 mm) eingespannt und anschließend in Wasser vollkommen eingebettet (Abb. 35).

Die Messung der Längenänderung erfolgte über den Durchmesser der Bohrkernscheibe (50 mm) und wurde zu Beginn der Messungen in kürzeren (Minuten- / Stunden) Abständen, später täglich, d.h. im 24 h-Abstand registriert. Dabei zeigte sich, dass nach 4 Tagen ein Wert erreicht wurde, der sich auch bei längerer Messung (bis zu 7 Tagen) nicht mehr signifikant änderte. Dieser Wert wurde als maximale Dehnung bei Wassersättigung (hydrische Dehnung) angesehen und registriert. Bei Bohrkernscheiben aus den Bohrkernen 5-8 (Bohrkernachse parallel zur Schichtung) wurde die Schichtung bei der Messung jeweils genau senkrecht zur Messachse orientiert.

Tab. 4 Bedingungen der Behandlung von Prüfkörpern aus Cottaer Sandstein

Probe	Tränkstoff	Behandlungszeit	Verbrauch KSE [l]
K	Remmers 500E + 10 % Beschleuniger	9.50-16.00 Uhr 7.45-15.00 Uhr	5,2
P (n = 2)	Remmers 300E + 10 % Beschleuniger	8.00-16.00 Uhr	5,2 / 3,4
Q	Remmers 500E + Remmers 300E (1:1) +10 % Beschleuniger	8.20-15.30 Uhr	4,6
E	Remmers 300E	Von Hand mit Pinsel, nass in nass (allseitig), mehrfach bis zur Sättigung	
U	unbehandelt	-	-

5.2.4 Messung der Ultraschall-Geschwindigkeit

An den ausgebohrten Bohrkernen wurden vor der Teilung in Bohrkernscheiben Ultraschall (US)-Laufzeiten in zwei senkrecht aufeinander stehenden Richtungen quer zur Längsachse gemessen. Hierzu wurde ein Gerät der Firma Geotron verwendet. Die Herstellung der Probekörper erfolgte entsprechend den Empfehlungen der ISRM und DGGT. Die Maße der Zylinderproben haben eine Länge zwischen 115-125 mm und einen Durchmesser von 50 mm. Aus diesen Laufzeitmessungen der p-Welle kann mit Hilfe des Bohrkerndurchmessers die Ultraschallgeschwindigkeit berechnet werden. Die Methode ermöglicht eine relativ hohe Auflösung bei der Vermessung des Tiefenprofils (5 mm-Schritte) und ist zerstörungsfrei.

Die Ultraschallgeschwindigkeit ist ein Maß für die Festigkeitsänderungen durch Verwitterung oder die Behandlung des Sandsteins. Bei Zunahme der Festigkeit steigt auch die Ultraschallgeschwindigkeit an. Zu beachten ist hier allerdings grundsätzlich, dass auch erhöhte Feuchtegehalte im Porenraum (z.B. durch nicht ausreagierte Festiger) Erhöhungen der US-Geschwindigkeit erzeugen können.

5.2.5 Ringbiegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul

Die Bestimmung der Ringbiegezugfestigkeit und des E-Moduls an kleinen Bohrkernscheiben (Wittmann & Prim 1983, Sattler 1992, Kozub 2008) stellt eine denkmalgerechte Möglichkeit dar, mechanische Kennwertänderungen zu quantifizieren.

Innerhalb des Projekts wurde auf der Basis bereits existierender Geräte am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege bzw. an der FH Potsdam eine Zusatzeinrichtung zur Messung der Ringbiegezugfestigkeit

als Zusatzkomponente zum existierenden statischen Prüfsystem MTS 20/M am Institut für Geotechnik der TU BAF hergestellt und für die anfallenden Prüfungen verwendet.

5.2.6 Festigkeits- und Verformungseigenschaften des unbehandelten Sandsteins

An Bohrkernen aus unbehandelten Sandsteinwürfeln wurden zur Gewinnung von Daten für die numerische Simulation (Abschnitt 6 auf S. 64) Festigkeitswerte und Verformungseigenschaften von unbehandeltem Cottaer Sandsteins analysiert. Die Tests wurden entsprechend den Empfehlungen Nr. 1 und Nr. 10 der DGGT durchgeführt.

Die Verformungseigenschaften wurden als Sekantenmodul im Spannungsintervall von 40 und 60 % der Bruchlast innerhalb von Belastungs- und Entlastungszyklen bestimmt. Dabei waren die Zylinderproben jeweils parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert. Bei einaxialen Druckfestigkeitstests entstehen die Risse typischerweise im mittleren Bereich der Zylinderprobe, wo sich ein relativ homogener einaxialer Stress ausbildet. Axiale und laterale Deformationen wurden im mittleren Bereich der Proben gemessen, da sie hier weitestgehend ungestört sind.

5.3 Ergebnisse und Diskussion

Aus den Erfahrungen zahlreicher früherer Forschungsprojekte konnten empirische Regeln für die Konservierung verwitterter Steinuntergründe entwickelt werden. Dazu zählen auch Grenzwerte für die Änderung wichtiger gesteintechnischer Parameter infolge einer Festigungsmaßnahme (Snethlage & Wendler 1995, Snethlage & Pfanner 2013). Die Einhaltung dieser Werte soll garantieren, dass der behandelte Steinuntergrund nicht „überfestigt“ wird, dass keine

Tab. 5 Erläuterungen zu den aus den Sandsteinwürfeln ausgebohrten zylindrischen Prüfkörpern

	Prüfkörper-Index	
Orientierung	1 bis 4	Prüfkörperachse senkrecht zur Schichtung
	5 bis 8	Prüfkörperachse parallel zur Schichtung
Länge	1, 5	200 mm (vollständiges Profil)
	2,3,4,6,7,8	130 mm („Halbprofil“)

Blockaden des Feuchtetransports durch die behandelten Oberflächen entstehen oder Wassereintritt in die behandelte Zone zu einem verstärkten Quellen in diesem Bereich führt. Die in dieser Untersuchung ermittelten Kennwerte für den Cottaer Sandstein und deren gemessene Änderungen nach der Festigung werden daher mit den existierenden empirischen Grenzwerten aus der Literatur verglichen und vor diesem Hintergrund diskutiert.

5.3.1 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Ergebnisse der Messung von μ -Werten an Bohrkernscheiben sind in den Abb. 36 bis Abb. 38 dargestellt. Aus Gründen der Effektivität wurde bei durch US-Messungen (siehe Abschnitt 5.3.4 auf S. 49) detektierter begrenzter Eindringtiefe des Festigers (Oberflächenfestigung, Remmers 500 E) der innere, unverfestigte Bereich nicht vollständig vermessen.

Für die mit Remmers 300E verfestigten Prüfkörper wurde dagegen das vollständige Profil parallel und senkrecht zur Schichtung erfasst. Die Profilabschnitte (Bohrkernscheiben) sind jeweils 5 mm dick und wurden durch Sägeschnitte mit einem Schnittverlust von 3 mm getrennt.

Die μ -Werte der unbehandelten Sandsteine (in den Diagrammen zu sehen in der nicht vom Festiger erreichten inneren Zone) liegen größtenteils im Bereich zwischen 10 und 15 und damit im unteren Bereich der für Varietäten von Cottaer Sandstein bekannten Werte. Die Streuung der μ -Werte innerhalb ein und desselben Prüfkörpers (mit Maxima von 19 und Minima von 9) ist durch Gefügeinhomogenitäten (Tonanreicherungen, Hohlraumgefüge) bedingt. Deutlich sichtbar ist im Kontrast zum inneren Kern der Prüfkörper die Erhöhung der μ -Werte in der jeweils vom Tränkstoff erreichten Außenzone.

Bei der herkömmlichen Oberflächenbehandlung ist nur der Wert für den jeweils äußersten Kernabschnitt leicht erhöht, was auf eine geringe Eindringtiefe von

nur wenigen Millimetern hinweist. Bei der Trängung mit VKV und Remmers 500E wurden deutlich erhöhte Werte in Tiefen bis maximal 3 cm von der Oberfläche festgestellt, ebenso bei beim VKV mit Remmers 300E. Entsprechend der nachlassenden Konzentration des Tränkstoffes im Steingefüge fallen die Werte von außen nach innen kontinuierlich (Remmers 300E) oder relativ sprunghaft (Remmers 500E) ab.

Nach den Kriterien für die „zulässige“ Erhöhung des μ -Wertes bei einer Festigung wäre eine Erhöhung des μ -Wertes auf maximal 18 (20 % von Bezugswert 15, Sneathlage & Pfanner, 2013) bzw. 22 (50 % von Bezugswert 15, Sneathlage & Wendler, 1995) wünschenswert. Bei der Oberflächenfestigung wird dies etwa erreicht, beim VKV werden die Grenzwerte allerdings in den äußersten ca. 1,5 cm deutlich überschritten. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass hier kein entfestigter Stein behandelt wurde und dass auch der Wert für die Wasseraufnahme in der Außenzone stark verändert (reduziert) ist (s. u.).

Der beobachtete hohe Wasserdampfdiffusionswiderstand könnte durch die Resthydrophobie der noch nicht vollständig ausgehärteten KSE-Systeme verursacht sein.

5.3.2 Gesamtwasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Die Ergebnisse der Messung der Gesamtwasseraufnahme an Bohrkernscheiben der untersuchten Profile sind in den Abb. 39 bis Abb. 41 dargestellt.

Die Gesamtwasseraufnahme des ungefestigten Cottaer Sandsteins liegt zwischen 8 und 10 M.-%, bezogen auf das lufttrockene Ausgangsgestein. Bei allen untersuchten Prüfkörpern ist die Wasseraufnahme in den äußersten Bereichen (nahe der Oberfläche) etwas herabgesetzt.

Während das beim „klassisch“ von der Oberfläche getränkten Prüfkörper E nur tendenziell wahrnehmbar ist, ist die Reduzierung der Wasseraufnahme bei den mit VKV behandelten Prüfkörpern deutlicher erkenn-

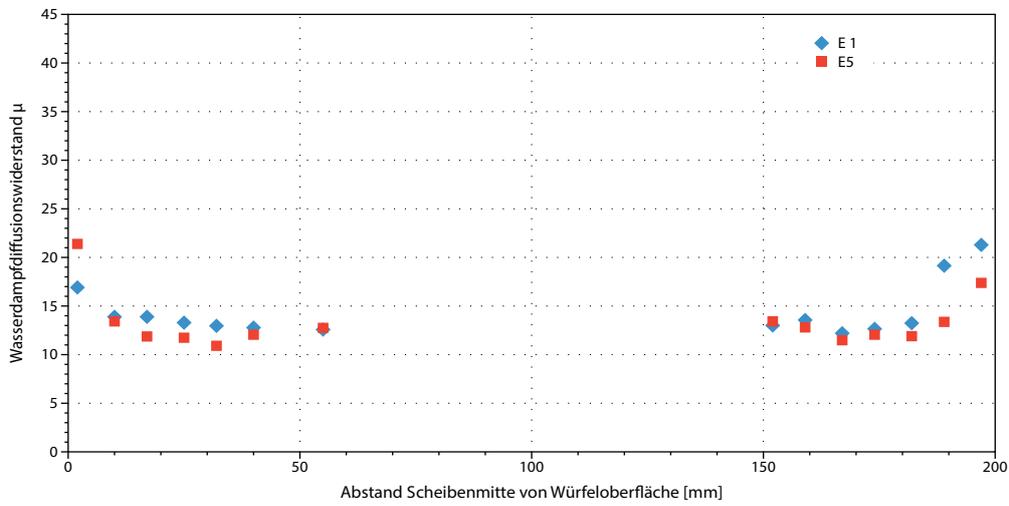


Abb. 36 Messung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl an den von der Oberfläche her gefestigten Prüfkörpern (E 1 Kernachse senkrecht ss, E 5 Kernachse parallel ss).

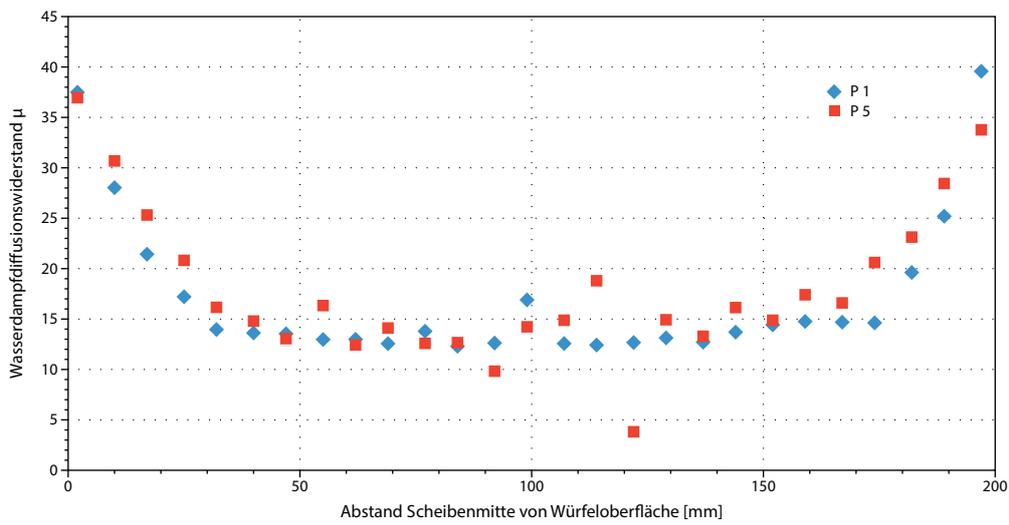


Abb. 37 Messung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl an den mit VKV und Remmers 300E gefestigten Prüfkörpern (E 1 Kernachse senkrecht ss, E 5 Kernachse parallel ss).

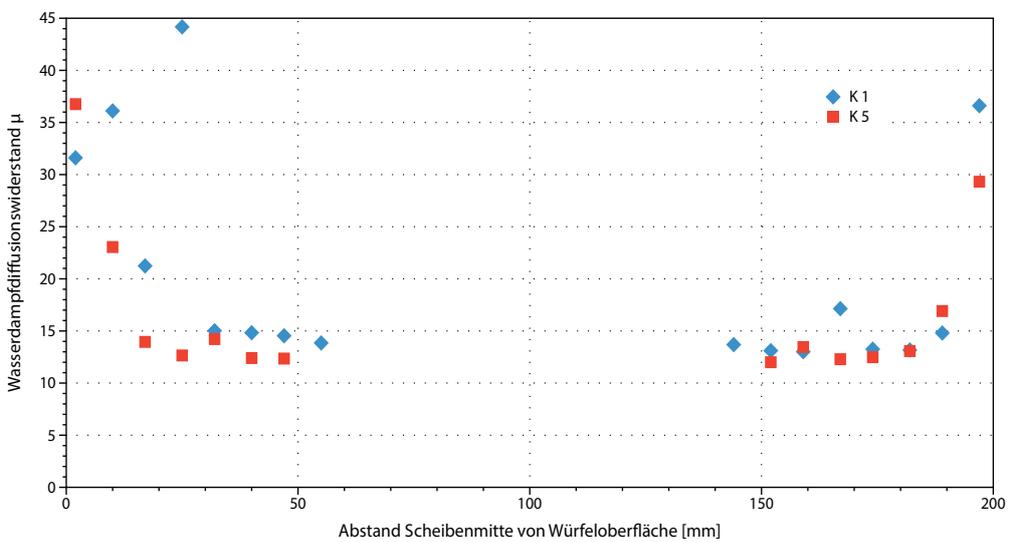


Abb. 38 Messung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl an den mit VKV und Remmers 500E gefestigten Prüfkörpern (E 1 Kernachse senkrecht ss, E 5 Kernachse parallel ss).

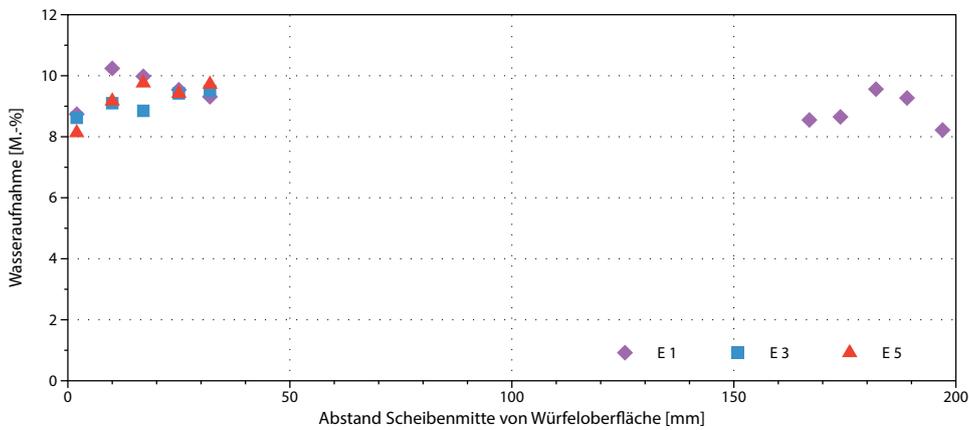


Abb. 39 Messung der Gesamtwasseraufnahme an den von der Oberfläche her gefestigten Prüfkörpern.

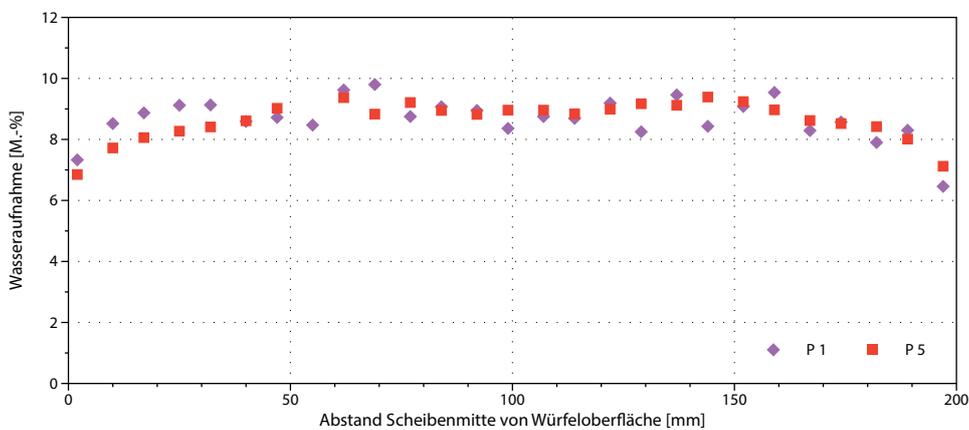


Abb. 40 Messung der Gesamtwasseraufnahme an den mit VKV und Remmers 300E gefestigten Prüfkörpern.

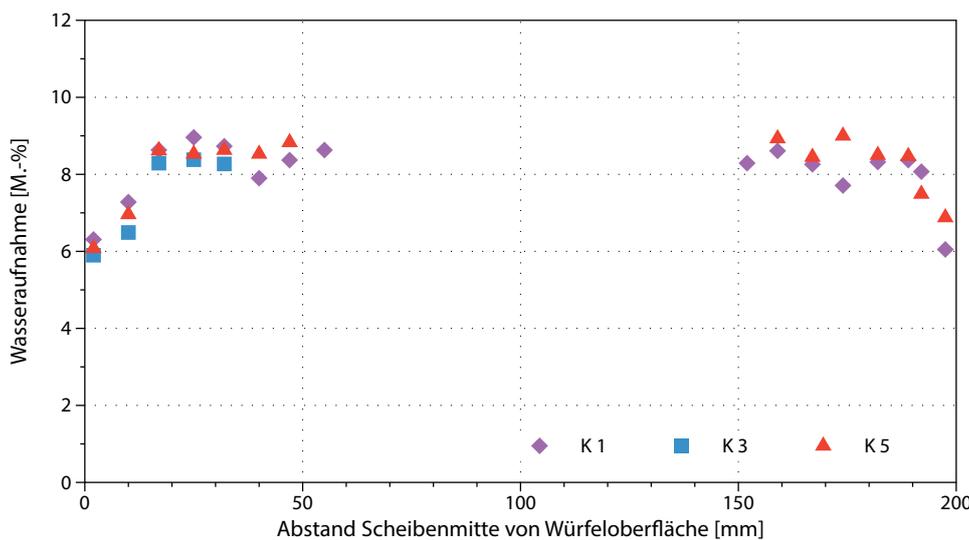


Abb. 41 Messung der Gesamtwasseraufnahme an den mit VKV und Remmers 500E gefestigten Prüfkörpern.

bar, am stärksten in den äußersten, oberflächennahen Bohrkernabschnitten.

Der Trend korreliert in etwa mit der Erhöhung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes und muss wahrscheinlich einer noch nicht vollständigen Aushärtung

des Festigers zugeschrieben werden. Das zeigte sich auch daran, dass der gesamte Probekörper (Würfel) in der Außenzone zum Zeitpunkt der Messungen (ca. 6 Monate nach der Festigung) noch ein hydrophobes Verhalten aufwies.

Mit der Pipette aufgesetzte Wassertropfen zeigten hohe Randwinkel und wurden nicht eingesaugt (Abb. 42). Aus diesem Grunde wurden auch keine Messungen der kapillaren Wasseraufnahme an den Kernen vorgenommen.

5.3.3 Hydrische Dehnung

Die Ergebnisse von Messungen der hydrischen Dehnung an Bohrkernscheiben der Prüfkörper sind in den Abb. 43 bis Abb. 45 dargestellt. Die Messwerte bilden die starke Streuung der hydrischen Dehnung in dem durch \pm schichtparallele Tonmineraleinlagerungen inhomogenen Sandsteingefüge ab. Einige Werte überschreiten sogar die kritische Grenze von Dehnungen über 1 mm/m, während in offensichtlich tonärmeren Abschnitten des Sandsteingefüges nur geringe Dehnungen von 0,2-0,4 mm/m erreicht werden. Die durch ungleichmäßige Dehnung auf engstem Raum verursachten Spannungen im Gesteinsgefüge können als wesentliche Ursache für die Verwitterung des Cottaer Sandsteins angesehen werden.

Eine verstärkende Auswirkung der Tränkung auf die hydrische Dehnung in den erreichten Außenzonen ist aus den Ergebnissen nicht ablesbar, was positiv bewertet werden kann.

5.3.4 Messung der Ultraschall-Geschwindigkeit

In Abb. 46 sind die Ergebnisse der US-Geschwindigkeitsmessungen an den Bohrkernen aus verschiedenen behandelten Probekörpern dargestellt. Die Ultraschallgeschwindigkeit der ungetränkten Bohrkernabschnitte (bei den behandelten Proben) liegen meist in Größenordnungen zwischen 2,7 und 2,9 km/s. Für den oberflächengetränkten Probekörper E zeigen die Werte einen signifikanten Anstieg der US-Geschwindigkeit in den äußersten beiden Kernabschnitten (bis etwa 10 mm Tiefe) auf maximal 3,1 bis 3,4 km/s, mitunter auch noch eine leichte Erhöhung bis 15 mm Tiefe. Der Abfall der US-Geschwindigkeit von der Oberfläche zu den inneren, ungefestigten Bereichen hin erfolgt mit einem steilen Gradienten.

Ähnliches ist bei Probekörper K (VKV; Remmers 500E) zu beobachten. Hier ist die US-Geschwindigkeit an der Oberfläche deutlich höher als bei der Oberflächenfestigung (bis 3,7 km/s) und die Wirtiefe etwas größer (bis maximal 30 mm), jedoch ist der Gradient von außen nach innen ebenfalls steil.

Die US-Geschwindigkeitsprofile der Bohrkernabschnitte aus Probekörper P (VKV, Remmers 300E) zeigen dagegen einen flacheren Gradienten bei Wirtiefen bis zu 50

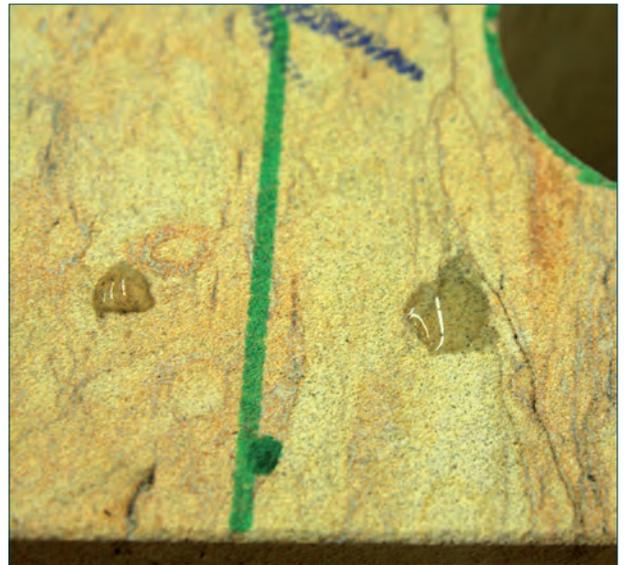


Abb. 42 Wassertropfentest an der Oberfläche des Prüfkörpers K, der im VKV mit Remmers 500E gefestigt wurde, 6 Monate nach der Festigung.

mm und maximalen US-Geschwindigkeiten bis zu 3,5 km/s in der äußersten Zone. Die gemessenen US-Profile korrespondieren gut mit den oben dargestellten Änderungen der hydrischen Kennwerte. Das ausgeglichene und hinsichtlich der Tiefenwirkung beste Profil zeichnet sich am Probekörper P (VKV, Remmers 300E) ab.

Die US-Messungen als indirekte Bestimmung von Eigenschaftsänderungen des getränkten Sandsteins bedürfen aber noch der Verifizierung durch direkte Festigkeitsmessungen.

5.3.5 Ringbiegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul

Die Untersuchungen zur Ringbiegezugfestigkeit und zum E-Modul an den getränkten Probekörpern erfolgten ca. 1 Jahr nach der Tränkung.

Die Ergebnisse sind als Mittelwerte an jeweils 4 Bohrkernen (je 2 senkrecht bzw. parallel zur Schichtung) in der Übersicht dargestellt (Abb. 47). Für Probekörper E wurde der Mittelwert aus Prüfungen an nur 3 Bohrkernen gebildet. Die Ergebnisse bestätigen den bereits mit den US-Geschwindigkeitsmessungen festgestellten Trend.

Die Oberflächenfestigung (Probekörper E) zeigt nur im äußersten Bohrkernabschnitt (bis 5 mm Tiefe) Wirkung, wo sich die Biegezugfestigkeit, verglichen mit dem unbehandelten Stein, fast verdoppelt.

Der entstandene Gradient des Festigkeitsverlaufs ist

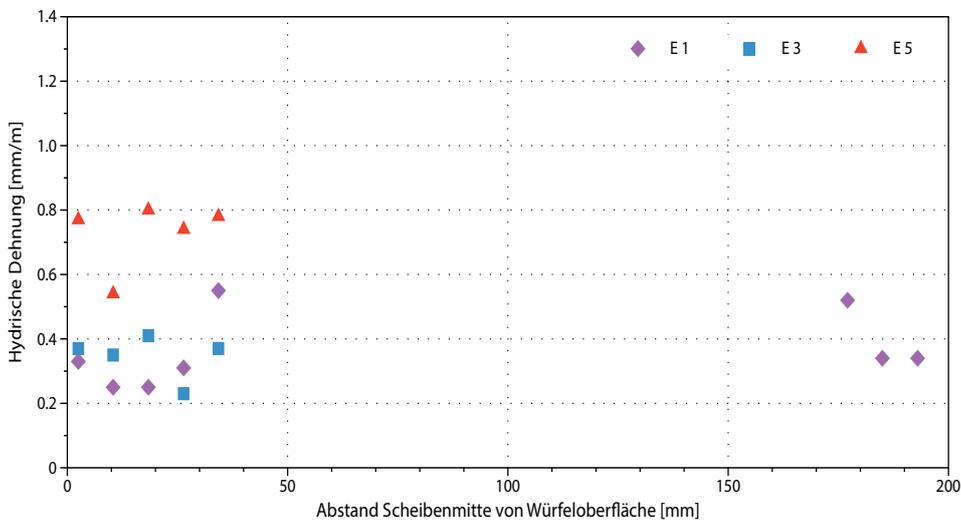


Abb. 43 Messung der hydrischen Dehnung an den von der Oberfläche her gefestigten Prüfkörpern.

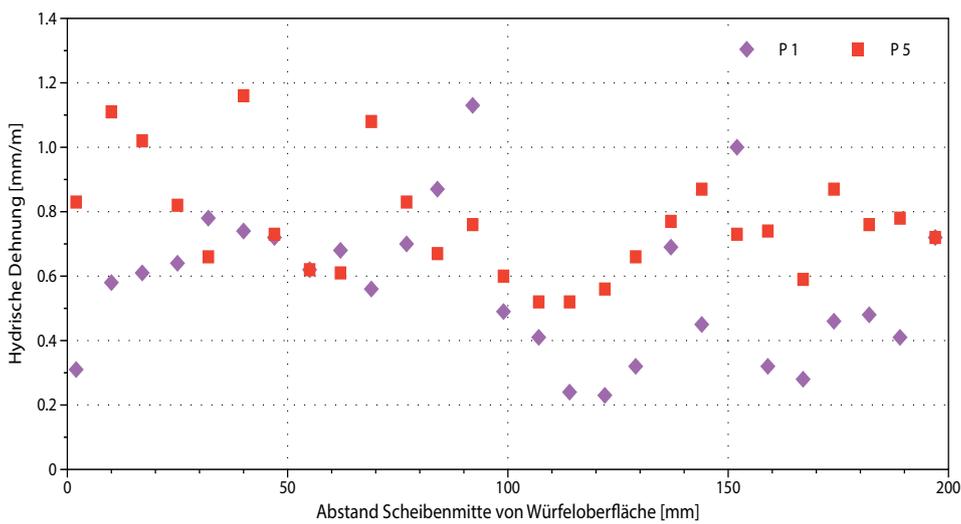


Abb. 44 Messung der hydrischen Dehnung an den mit VKV und Remmers 300E gefestigten Prüfkörpern.

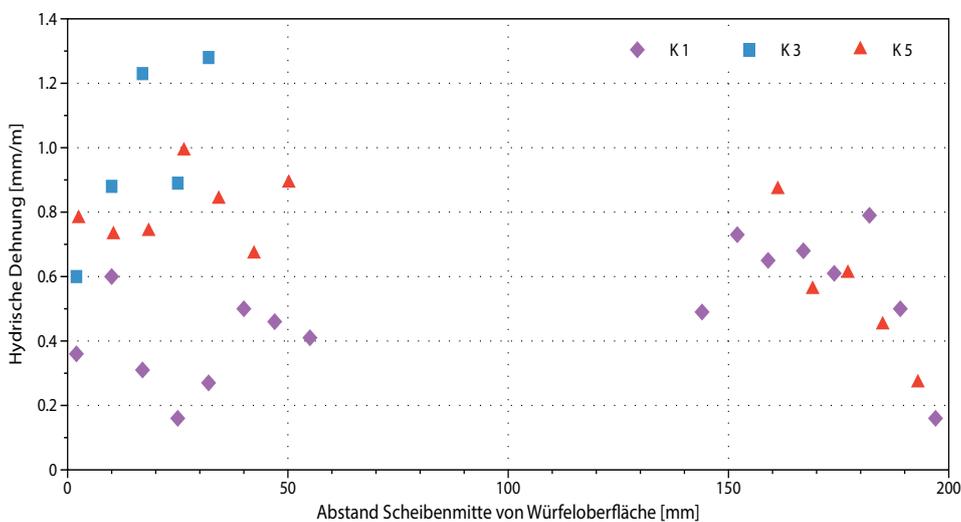


Abb. 45 Messung der hydrischen Dehnung an den mit VKV und Remmers 500E gefestigten Prüfkörpern.

sehr steil, genauso steil fällt der im durchfestigten Bereich erhöhte E-Modul zum Steininneren hin ab. Bedingt durch die erhöhte Eindringtiefe des Festigers beim VKV ist der Gradient des Festigkeitsanstiegs an der Steinoberfläche bei der Tränkung mit Remmers 500E (Probekörper K) etwas weniger steil als bei der Oberflächenbehandlung, allerdings sind sowohl Biegezugfestigkeit als auch E-Modul in den äußeren Profilabschnitten bis 10 mm Tiefe bei der Festigung mit dem vorhydrolysierten KSE erwartungsgemäß auch signifikant stärker angestiegen als bei der Oberflächen-tränkung mit Remmers 300E. Hier dürfte die höhere Gelabscheidung im Sandsteingefüge eine entscheidende Rolle spielen.

Die erhöhte Molekülgröße des vorhydrolysierten KSE Remmers 500E führt jedoch auch zu einer weniger tiefen Penetration des Tränkstoffs. Im Vergleich dazu erreicht das VKV mit Remmers 300E eine Festigkeits-erhöhung bis ca. 50 mm Tiefe und einen recht günstig erscheinenden Festigkeitsverlauf mit moderatem Gra-dienten von außen nach innen. Die Auswahl von Rem-mers 300E für die Festigung des Objekts erscheint da-mit gerechtfertigt, weil der Festiger für Cottaer Stein sowohl hinsichtlich Wirktiefe als auch Verlauf des Festigkeitsprofils die im Vergleich mit Remmers 300E die besseren Ergebnisse erwarten lässt.

5.3.6 Festigkeits- und Verformungseigen-schaften

Die Mittelwerte der „klassischen“ Festigkeiten sind in Tab. 6 zusammengefasst, während von Abb. 48 bis Abb. 50 Einzelwerte für die jeweiligen Festigkeiten dargestellt sind.

5.4 Untersuchungen zur Veränderung des Sandsteingefüges infolge der Festigung

Mit zusätzlichen Untersuchungen an Material, das je-weils von der Oberfläche (0-1 cm Tiefe) und aus dem Inneren der getränkten Probewürfel (ca. 10 cm Tiefe) gewonnen wurde, sollten Gefügeänderungen unter dem Einfluss der Tränkung visualisiert werden.

Dazu wurden kleine Bruchstücke für die Betrachtung unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) präpa-riert bzw. für eine vergleichende Untersuchung mit der Quecksilberdruckporosimetrie (Hg-Porosimetrie) bereitgestellt.

5.4.1 Rasterelektronenmikroskopie

Die Probestückchen mit rauen Bruchflächen wurden mit Leitkohlenstoff auf Aluminiumprobenträgern fi-xiert, mit Gold/Palladium bedampft und unter einem REM ZEISS EVO 50 mit Wolframkathode (20 kV, SE, Hochvakuum) untersucht.

Zunächst wurden die ungefestigten Gefüge des Cot-taer Sandsteins (Proben aus dem Innenbereich, un-behandelter Sandstein) betrachtet. Anschließend wur-den die sicher vom Festiger erreichten Außenzonen un-tersucht, um eventuell sichtbare Unterschiede zu dokumentieren. Einige Beobachtungen sind in den Abb. 51 bis Abb. 56 dargestellt. Die im Porenzement der Sandsteine bemerkten flächigen, SiO_2 -reichen Strukturen (besonders gut zu sehen in Abb. 52, Pro-bekörper P) suggerieren zunächst eine filmartige Ab-scheidung von Festiger im Gefüge der Sandsteine. Jedoch können solche Strukturen auch im frischen, un-behandelten Material dargestellt werden (Abb.

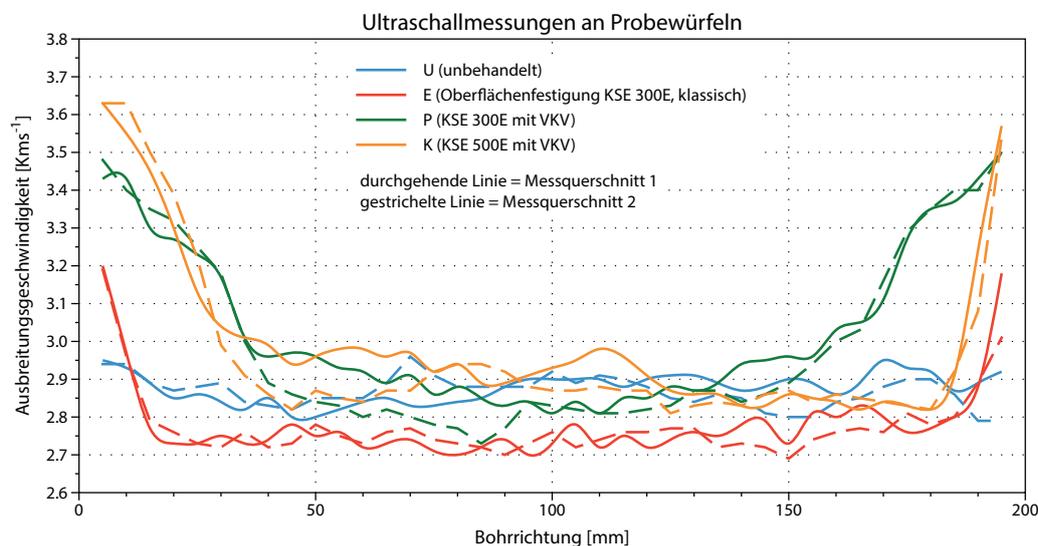


Abb. 46 Ultraschall-messungen der p-Wellen an ungefestigten und unterschiedlich gefestigten Probewürfeln (Mittelwerte).

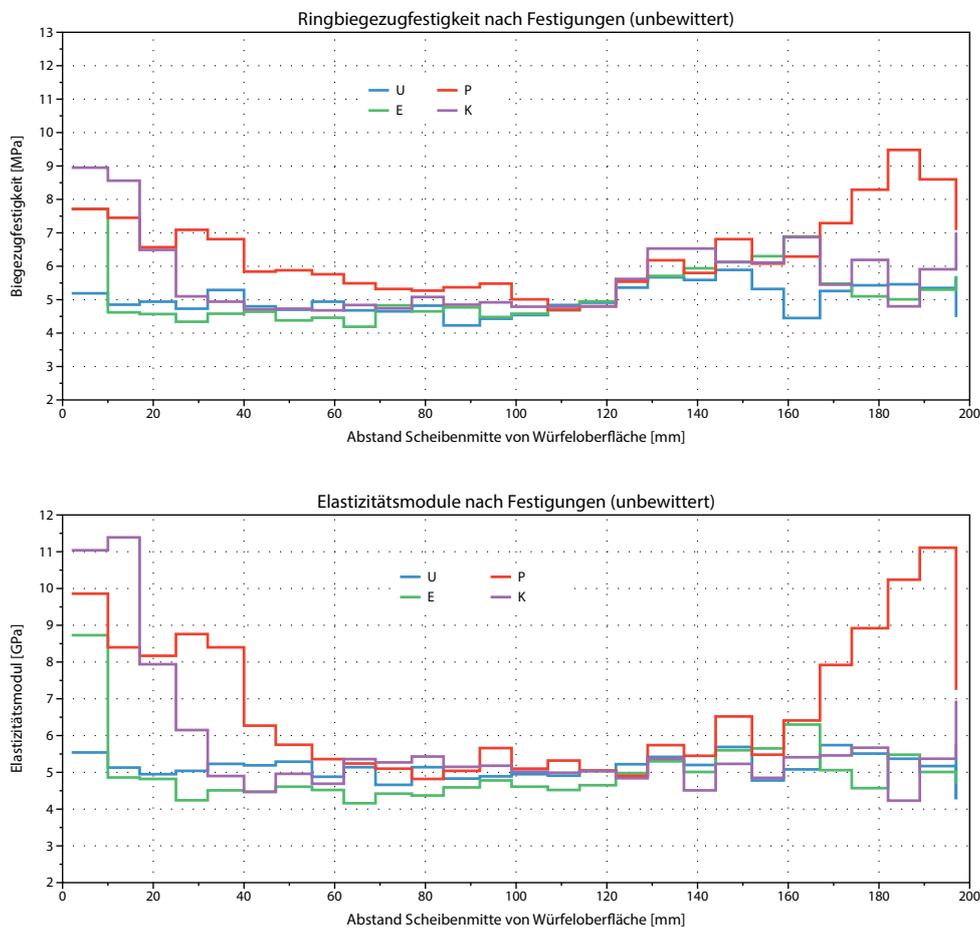


Abb. 47 Ringbiegezugfestigkeiten und E-Moduli von gefestigten und ungefestigten Prüfkörpern (jeweils Mittelwerte aus allen untersuchten Bohrkernen).

54). Auch sind bei starker Vergrößerung filmartige Überzüge mit „Menisken“ an den Kaolinit-Stapeln („booklet“-Strukturen) des unbehandelten Cottaer Sandsteins zu beobachten, die deshalb wohl als diagenetisch oder bei der Feldspatverwitterung freigesetztes, „natürliches“ SiO_2 angesehen werden müssen (Abb. 55).

Die klassischen, für die KSE-Festigung typischen Strukturen von SiO_2 -Gel mit Schwindrissen (Sattler, 1992) konnten nicht festgestellt werden. Primäre, filmartige SiO_2 -Strukturen im Gefüge des Cottaer Sandsteins machen das sichere Unterscheiden der durch die Festigung bedingten, wahrscheinlich ebenfalls filmartigen Gelabscheidungen unmöglich. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen sind als Instrument zum Nachweis der verwendeten Festiger im Gefüge des Cottaer Sandsteins deshalb nicht geeignet und wurden bei der Untersuchung der Objektproben auch nicht mehr angewendet.

5.4.2 Messung der Porenradialverteilung

Die Ergebnisse der Messungen von Porenradialverteilungen an behandelten und unbehandelten Proben sind in Tab. 7 dargestellt. Wegen der Inhomogenität des Sandsteins ist eine Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich des Effekts der Tränkung schwierig.

Die Gesamtporosität und der Median der Porenradialverteilung verändern sich mit der Tränkung nicht signifikant. Das bedeutet letztlich, dass das durch den Tränkestoff abgeschiedene SiO_2 -Gel die im unversehrteten Sandstein vorhandenen Porenräume nicht verstopft und korrespondiert mit den Beobachtungen im REM, wonach keine massigen Gelabscheidungen zumindest im Bereich oberhalb von Porengrößen mit Durchmessern von ca. $1 \mu\text{m}$ auftreten.

Stärkere Veränderungen im Porenbereich zwischen 100 und $10 \mu\text{m}$ (tendenzielle Abnahme bei den Proben K und P) bzw. 10 und $1 \mu\text{m}$ (tendenzielle Zunahme bei K und P) liegen im Schwankungsbereich des Materials, wie der Vergleich mit U zeigt, und können deshalb nicht als signifikant betrachtet werden. An den

Tab. 6 Ermittelte Mittelwerte vom Cottaer Sandstein, gemäß DGGT-Empfehlung Nr. 1

Parameter	Cotta unbehandelt	Cotta unbehandelt ⊥
E-Modul [GPa]	12,43	10,50
Poissonzahl [-]	0,11	0,09
einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	35,0	31,29
Spaltzugfestigkeit [MPa]	2,58	2,73
Kompressionsmodul [GPa]	5,31	4,27
Schermodul [GPa]	5,59	4,82
Dichte [kg/m ³]	2080	2080

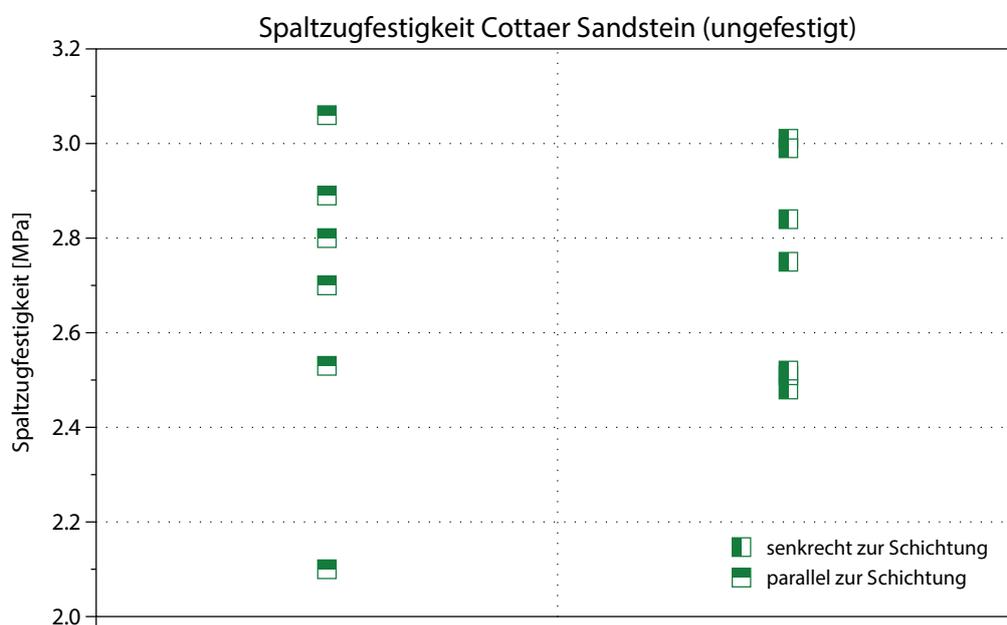
Objektproben sind deshalb keine weiteren Untersuchungen zu Veränderungen der Porosität mit der Hg-Porosimetrie durchgeführt worden.

5.5 Simulation thermischer Beanspruchung

Um das Dauerhaftigkeitsverhalten der getränkten Probekörper bei thermischer Beanspruchung zu testen, wurden ein unbehandelter Probewürfel (U) sowie ein mit Remmers 300E im VKV getränkter Probewürfel (P) und der mit einer Mischung aus Remmers 300E und 500E (Q, 1:1) im VKV behandelte Probewürfel einem Stresstest im Klimaschrank unterzogen. Das durchgeführte Programm der Belastung ist in Tab. 8 dargestellt. Alle Probekörper wurden 100 Zyklen mit jeweils einer Erwärmung und einer Abkühlung unter-

zogen. Zu Beginn der Belastung und in der Folge nach jeweils 8 Erwärmungs-Abkühlungs-Zyklen wurden die Probewürfel für 15 Minuten vollständig in Wasser getaucht. Die Temperaturen wurden so ausgewählt, dass sie den bauwerksrelevanten Bereich der Belastung abdecken. Das Tauchen der Proben sollte gelegentliche Schlagregenereignisse simulieren. Nach der Behandlung wiesen die Prüfkörper keine sichtbaren Veränderungen der Oberflächen, wie Abplatzungen oder Risse auf.

Um eventuelle, optisch noch nicht sichtbare Veränderungen/Schädigungen des Gefüges zu detektieren, wurden aus den in der Klimakammer behandelten Probekörpern wiederum Bohrkerne entnommen, senkrecht zur Längsachse in 5 mm-Scheiben zersägt


Abb. 48 Spaltzugfestigkeiten von ungefestigten Probekörpern aus Cottaer Sandstein.

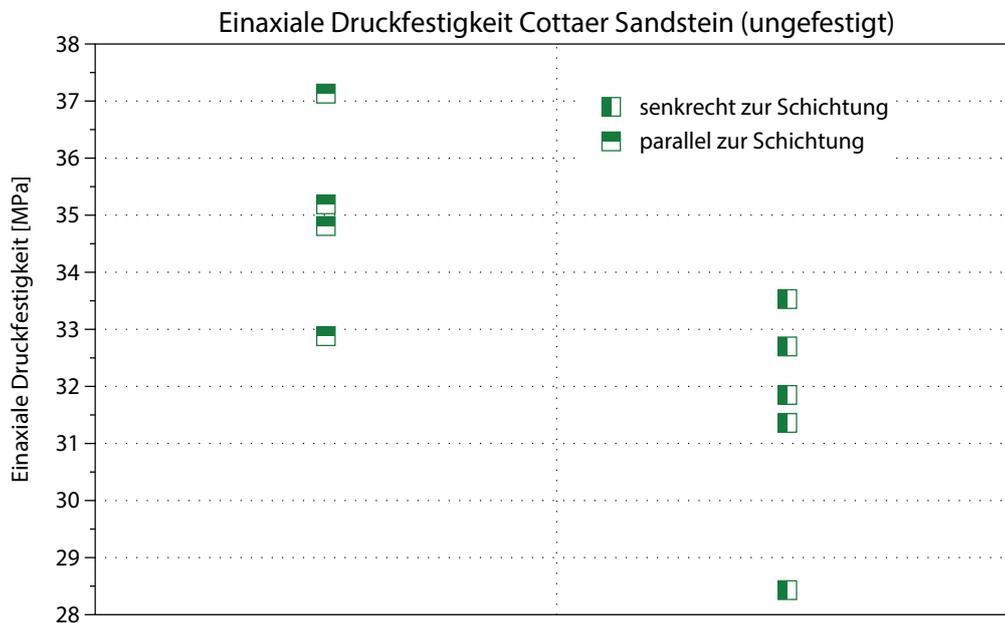


Abb. 49 Einaxiale Druckfestigkeiten von ungefestigten Probekörpern aus Cottaer Sandstein.

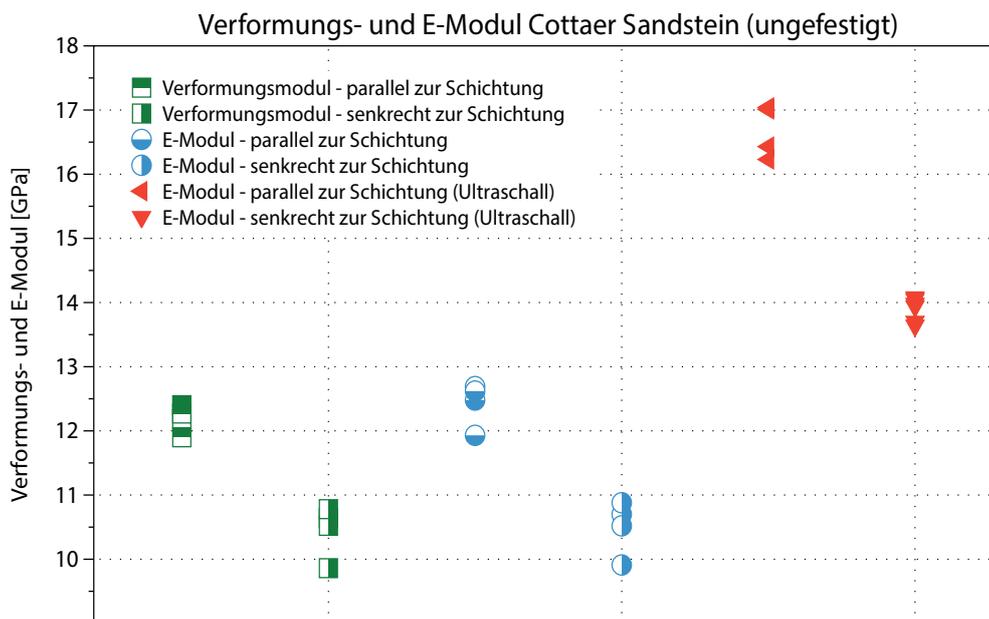


Abb. 50 Verformungs- und E-Moduli von ungefestigten Probekörpern aus Cottaer Sandstein.

und auf ihre Ringbiegezugfestigkeit und ihren E-Modul geprüft, wie in Abschnitt 5.2 auf S. 43 beschrieben. An jedem Würfel wurden je zwei Bohrkern parallel und zwei Bohrkern senkrecht zur Schichtung gezogen, wobei das gesamte Querschnittprofil (20 cm) erfasst worden ist. Signifikante Unterschiede zwischen den Werten für parallel bzw. senkrecht zur Schichtung ausgebohrte Probekörper waren nicht zu beobachten. Die in Abb. 57 und Abb. 58 dargestellten Ergebnisse stellen Mittelwerte aus allen Profilen eines Würfels ($n = 4$) dar. Vor der Aufteilung in Bohrkernscheiben ist an

den Kernen wiederum die Ultraschallgeschwindigkeit gemessen worden (Abb. 59).

Die Werte der unbewitterten Vergleichsproben (gefestigt und ungefestigt) für E-Moduli und Biegezugfestigkeiten erscheinen im Vergleich systematisch höher als die der thermisch bewitterten Proben. Allerdings liegen die Biegezugfestigkeitswerte für den nicht gefestigten Kern der Würfel und die ungefestigten Proben durchaus im für den Cottaer Sandstein üblichen Streubereich (zwischen 2,5 und 5,5 MPa).

So kann auch nicht völlig ausgeschlossen werden,

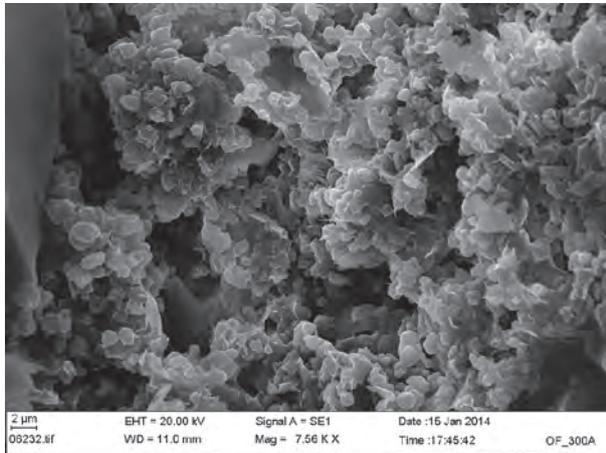


Abb. 51 REM-Aufnahme der behandelten Außenzone des Cottaer Sandsteins von Würfel E (Oberflächenbehandlung, Remmers 300E).

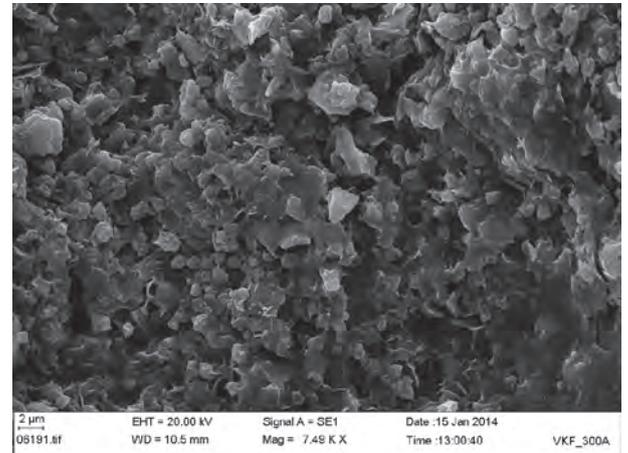


Abb. 52 REM-Aufnahme der behandelten Außenzone des Cottaer Sandsteins von Würfel P (VKV, Remmers 300E).

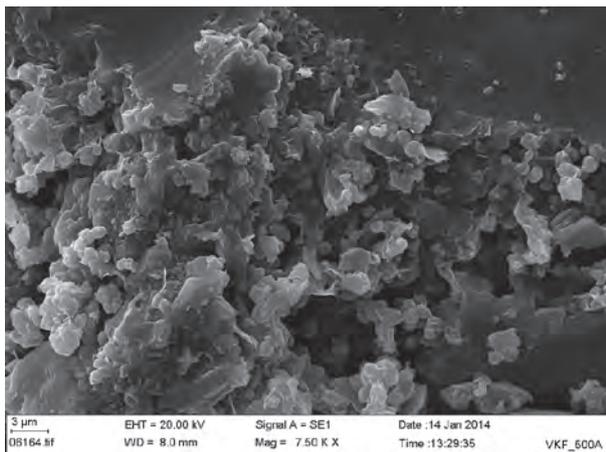


Abb. 53 REM-Aufnahme der behandelten Außenzone des Cottaer Sandsteins von Würfel K (VKV, Remmers 300E).

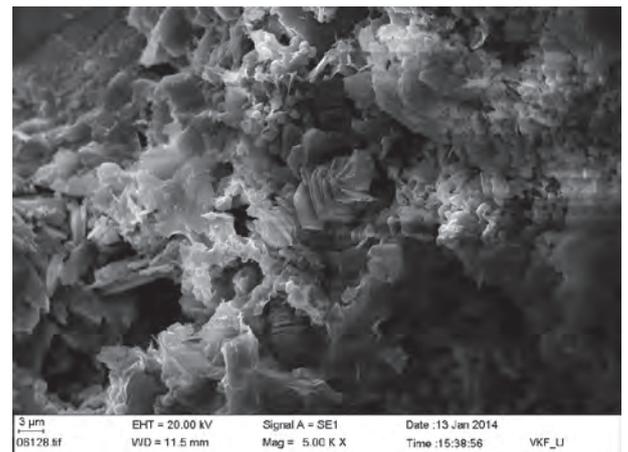


Abb. 54 REM-Aufnahme des Cottaer Sandsteins von Würfel U (unbehandelt).

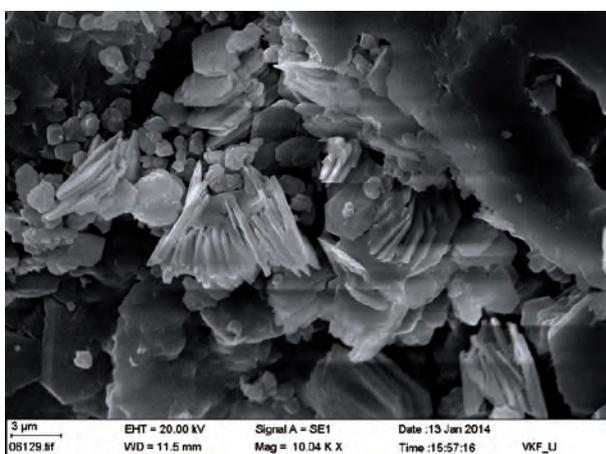


Abb. 55 REM-Aufnahme des Cottaer Sandsteins von Würfel U (unbehandelt).

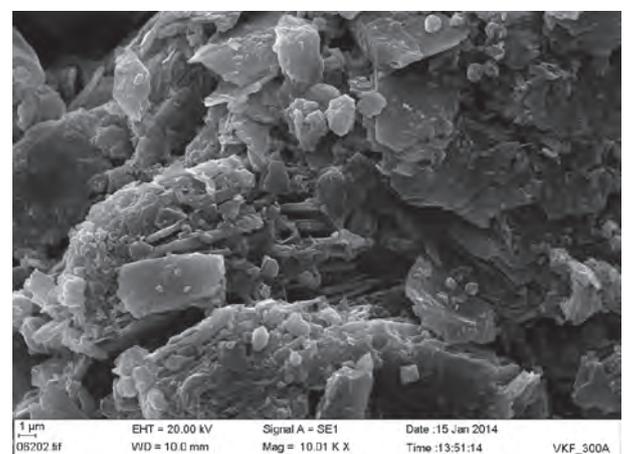


Abb. 56 REM-Aufnahme der behandelten Außenzone des Cottaer Sandsteins von Würfel P (VKV, Remmers 300E).

Tab. 7 Messungen der Porenradialverteilung am unbehandelten Probekörper (U) sowie an durchtränkten Außenzonen und der vom Festiger nicht erreichten inneren Zone der unterschiedlich behandelten Probewürfel.

Probenbezeichnung:	U	E - außen	P - innen	P - außen	K - innen	K - außen
Kum. Porenvolumen [mm ³ /g]	97.96	110.67	99.57	100.29	104.33	92.34
Mediandurchmesser D50 [µm]	1.37	2.91	1.61	1.71	1.76	1.86
Porosität [Vol.-%]	20.59	22.73	21.16	20.97	21.63	19.49
Rohdichte [g/cm ³]	2.10	2.05	2.13	2.09	2.07	2.11
Reindichte [g/cm ³]	2.65	2.66	2.70	2.65	2.64	2.62
Porengrößenbereich [µm]	Rel. Volumen [%]					
1000.0-562.3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
562.3-316.2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
316.2-177.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
177.8-100.0	0.00	0.46	0.02	0.61	0.04	0.48
Σ 1000 - 100	0.00	0.46	0.02	0.61	0.04	0.48
100.0-56.2	0.27	1.85	1.45	1.35	2.03	1.28
56.2-31.6	1.53	2.64	3.16	1.73	3.63	1.75
31.6-17.8	2.74	4.61	8.00	2.40	6.45	2.46
17.8-10.0	3.06	7.87	4.84	5.21	5.91	3.78
Σ 100 - 10	7.60	16.97	17.45	10.69	18.02	9.27
10.0-5.62	6.23	13.79	6.58	9.16	7.20	7.73
5.62-3.16	13.23	17.67	11.73	13.52	11.56	16.26
3.16-1.78	15.51	10.93	12.12	15.27	13.08	17.83
1.78-1.0	15.13	10.08	13.14	13.69	11.81	13.15
Σ 10 - 1	50.10	52.47	43.57	51.64	43.65	54.97
1.0-0.562	11.42	8.39	10.68	10.69	9.79	11.56
0.562-0.316	8.84	6.83	7.94	7.59	7.76	7.03
0.316-0.178	6.33	3.97	5.58	5.03	5.58	4.61
0.178-0.10	4.47	2.97	4.23	3.21	4.19	3.32
Σ 1 - 0.10	31.06	22.16	28.43	26.52	27.32	26.52
0.10-0.056	3.19	2.56	3.28	2.36	3.36	2.46
0.056-0.032	2.47	1.89	2.29	2.05	2.65	1.81
0.032-0.018	1.89	1.29	1.73	1.86	1.89	1.34
0.018-0.01	1.55	0.98	1.32	1.59	1.58	1.06
Σ 0,10 - 0,01	9.10	6.72	8.62	7.86	9.48	6.67
0.01-0.006	1.48	0.78	1.19	2.00	1.11	1.70
0.006-0.003	0.68	0.45	0.75	0.67	0.39	0.39
0.003-0.002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.002-0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ 0,01 - 0,001	2.16	1.23	1.94	2.67	1.50	2.09

dass die Varianzen durch natürliche Eigenschaftsstreuungen im Ausgangsmaterial verursacht sind. Beim E-Modul erscheinen die Unterschiede deutlicher. Unbewitterte und bewitterte Proben bilden mit ihren

Profilen gleichermaßen die Eindringtiefe der Festiger ab, wobei die erkennbaren Wirktiefen für oberflächenbehandelte und mit VKV getränkte Proben im bewitterten und unbewitterten Fall weitgehend kon-

Tab. 8 Programm der thermischen Belastung der Probewürfel im Klimaschrank (insgesamt 100 Zyklen Erwärmung-Abkühlung).

Erwärmung	Abkühlung	Befeuchten
auf 45 °C (bei 60 % r. F.), 6 Stunden halten	auf -25 °C (r. F. zwischen 60 und 70 %), 6 Stunden halten	15 min. Tauchen in ein Wasser-Vollbad, nach jeweils 8 Zyklen Erwärmung-Abkühlung

gruent verlaufen (Abb. 57 und Abb. 58, unten). Unterstellt man, dass die gemessenen geringeren Biegezugfestigkeiten und E-Moduli der künstlich durch thermische Wechsel bewitterten Proben ein Resultat dieser Nachbehandlung sind, kann weder bei den mit elastifiziertem KSE oberflächenbehandelten noch bei den tiefenimprägnierten Würfeln eine dramatische Veränderung des Profilverlaufs von Festigkeit oder E-Modul festgestellt werden. Insbesondere sind keine abrupten Abfälle von Festigkeit und E-Modul zu beob-

achten, die auf Rissbildungen in diskreten Tiefenzonen hinweisen. Das würde bedeuten, dass sich auch bei generellem Festigkeitsverlust des Gefüges durch starke thermische Wechsel im bauwerksrelevanten Bereich kein durch die Festigung bedingtes, vollständiges Versagen im imprägnierten Bereich oder in der Grenzzone zum ungefestigten Stein abzeichnet. In den US-Profilen ist bei einigen gefestigten Proben ein leichtes Absinken der US-Geschwindigkeit nahe der Oberfläche festzustellen, das allerdings in den Festig-

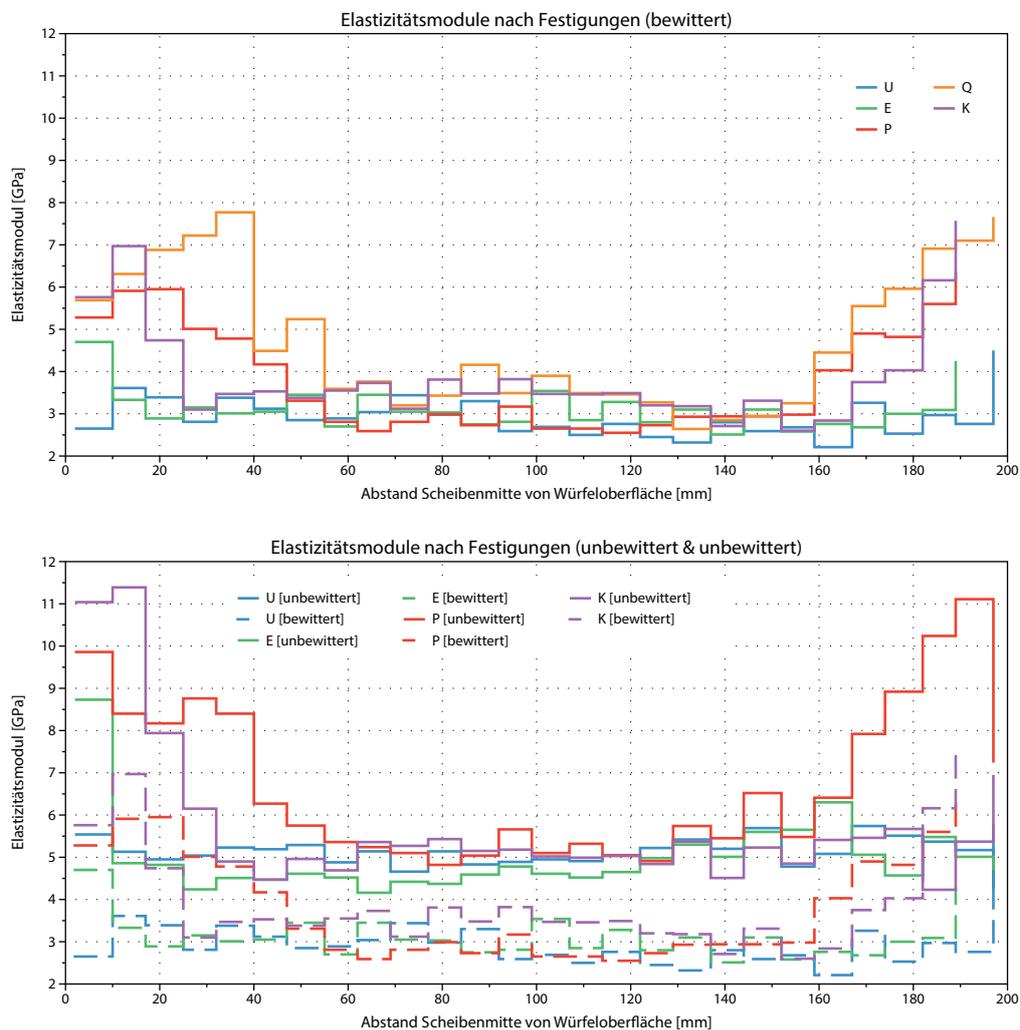


Abb. 57 E-Moduli für gefestigte und ungefestigte Bohrkernabschnitte (parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert) aus unbewitterten und bewitterten Probekörpern: U (unbehandelt), E (oberflächenbehandelt mit Remmers 300E), P (VKV mit Remmers 300E), K (VKV mit Remmers 500E) und Q (VKV mit Remmers 300E+500E).

keitsprofilen nicht in gleicher Weise abgebildet wird. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die durchgeführte Simulation wiederholter, starker thermischer Beanspruchung im Klimaschrank keine Hinweise auf eine negative Wirkung der mit elastifiziertem KSE gefestigten Oberflächen gibt.

5.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nach den durchgeführten Voruntersuchungen zur Festigung an bruchfrischen Probekörpern aus Cottar Sandstein lässt die Behandlung mit Remmers 300E und VKV am Objekt ein ausgeglichenes Festigkeitsprofil mit erheblich besserer Tiefenwirkung als die Oberflächentränkung erwarten. Dabei wird das von Snethlage & Pfanner (2013) formulierte Kriterium, dass eine Überfestigung maximal das 1,5fache der Ausgangsfestigkeit betragen darf und der Übergang in den unverfestigten Bereich fließend vorstatten

gehen soll, erfüllt. Um das Verhältnis des E-Modul-Anstiegs zum Festigkeitsanstieg (Snethlage & Pfanner 2013) abschätzen zu können, das ggf. auf eine „Versprödung“ der oberflächennahen Zone durch Überfestigung hinweist, wird das Verhältnis beider Parameter für die mit der Oberflächenbehandlung und mit dem VKV behandelten Prüfkörper in Abb. 60 auf S. 59 nochmals gesondert dargestellt. Ein unverhältnismäßig starker Anstieg des Elastizitätsmoduls im Verhältnis zur Biegezugfestigkeit ist demnach weder bei der Oberflächentränkung noch bei dem mit VKV getränkten Prüfkörper ersichtlich.

Der bei den Vorversuchen festgestellte Effekt einer verringerten Wasseraufnahme und einer (zu) stark erhöhten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in den stärker durchtränkten Außenbereichen der mit dem VKV behandelten Sandsteine (ca. 6 Monate nach der Behandlung) scheint auf eine verzögerte Reaktion des

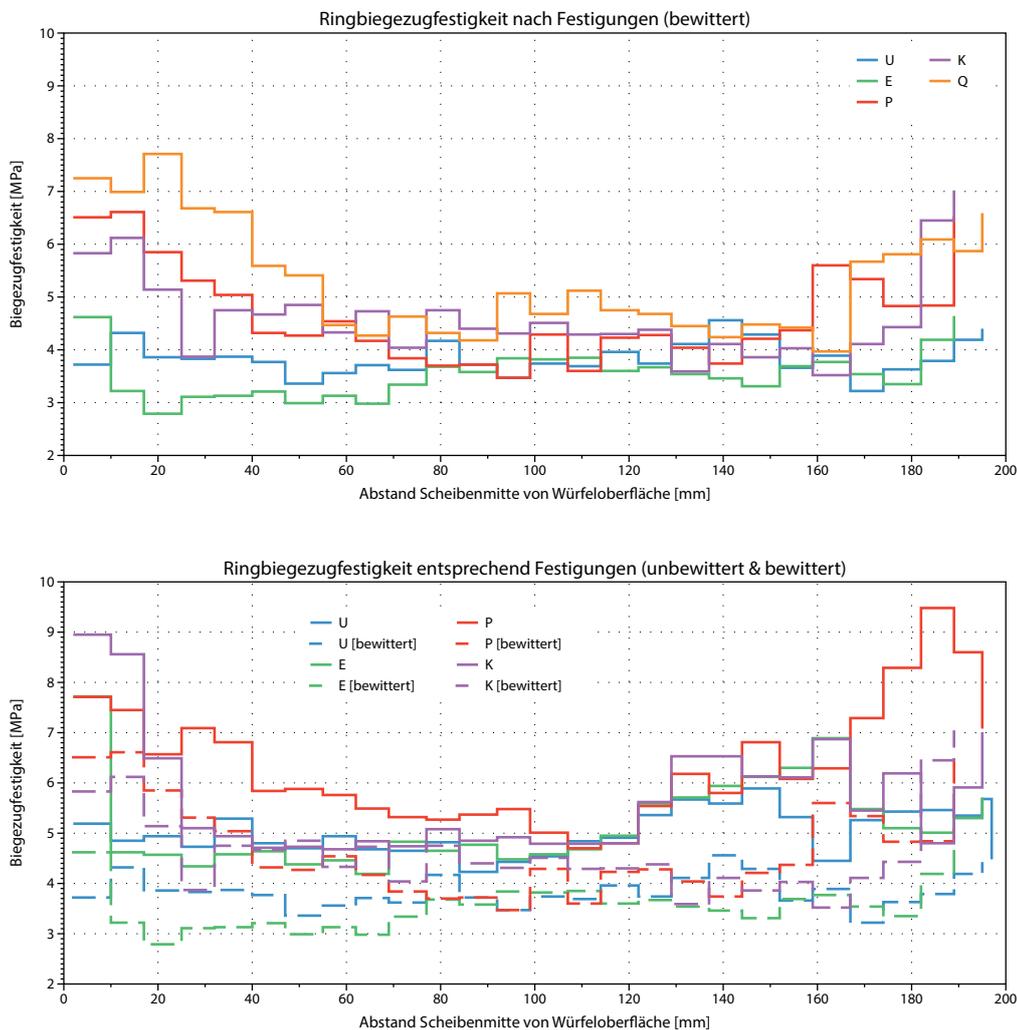


Abb. 58 Ringbiegezugfestigkeiten für gefestigte und ungefestigte Bohrkernabschnitte (parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert) aus unbewitterten und bewitterten Probekörpern: U (unbehandelt), E (oberflächenbehandelt mit Remmers 300E), P (VKV mit Remmers 300E), K (VKV mit Remmers 500E) und Q (VKV mit Remmers 300E+500E).

Festigers im Gefüge hinzudeuten. Es kann erwartet werden, dass sich diese Parameter nach dem vollständigen Ausreagieren des Festigers noch verbessern. Ein über längere Zeiträume verzögerter Abbau der Hydrophobie von KSE-gefestigten Oberflächen ist auch an Sandsteinobjekten beobachtet worden, die „klassisch“ im Oberflächenverfahren getränkt worden sind

und sollte zunächst nicht überbewertet werden. Eine Verstärkung der hydrischen Dehnung in den gefestigten Bereichen des Sandsteins ist nach den Vorversuchen nicht zu erwarten.

Nach den Ergebnissen stehen der geplanten Anwendung des VKV mit Remmers 300E am ausgewählten Objekt keine grundsätzlichen Bedenken entgegen.

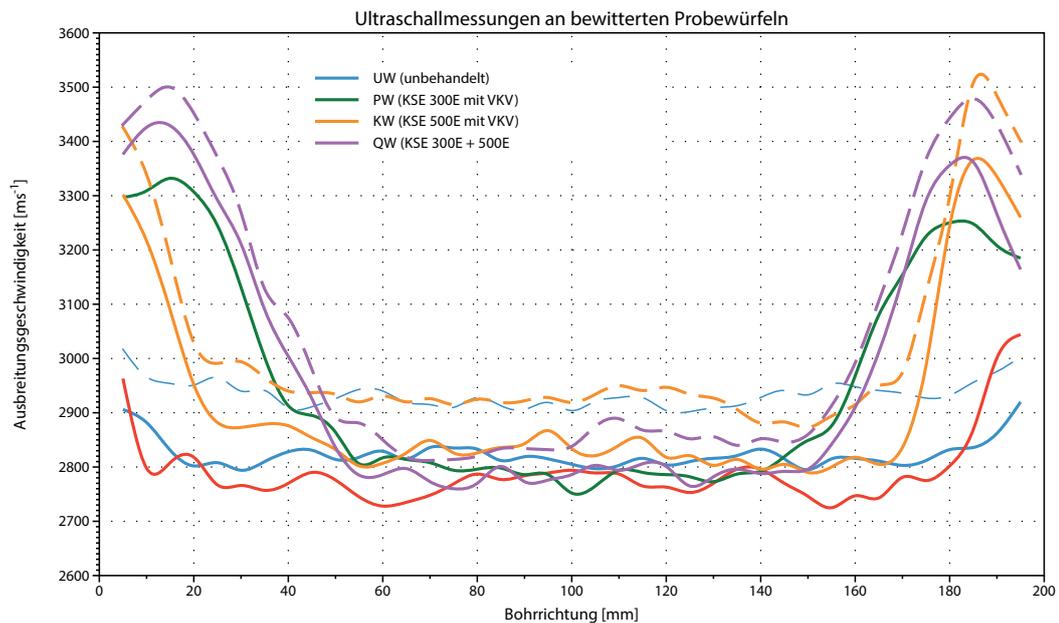


Abb. 59 Ultraschallgeschwindigkeiten der p-Wellen für gefestigte und ungefestigte Bohrkernabschnitte (parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert) aus bewitterten Probekörpern: UW (unbehandelt), EW (oberflächenbehandelt mit Remmers 300E), PW (VKV mit Remmers 300E), KW (VKV mit Remmers 500E) und QW (VKV mit jeweils 50% Remmers 500E+300E).

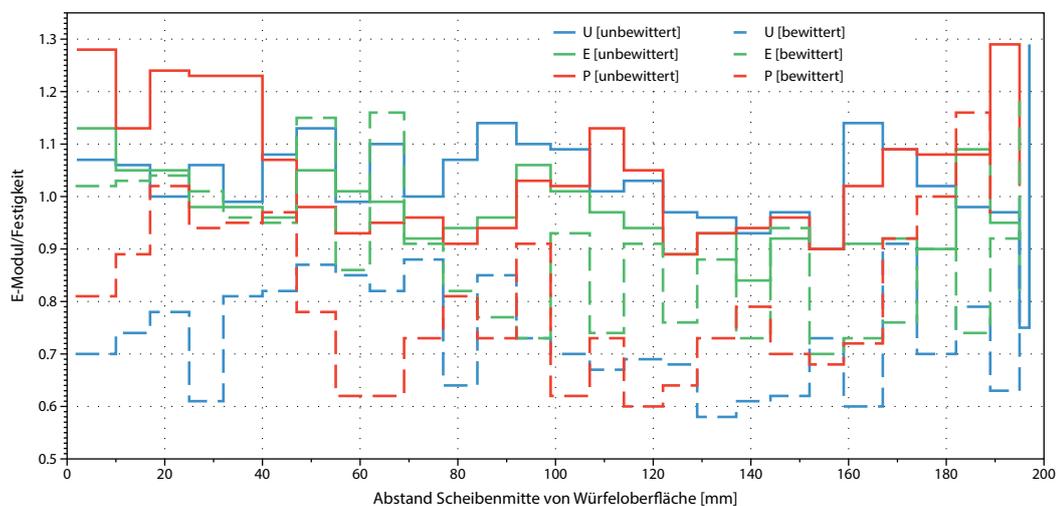


Abb. 60 Mittelwerte Quotient E-Modul/Biegezugfestigkeit für gefestigte und ungefestigte Bohrkernabschnitte (parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert) sowie unbewitterte und bewitterte Probekörper: U (unbehandelt), E (oberflächenbehandelt mit Remmers 300E) und P (VKV mit Remmers 300E).

6 Kapitel

Simulation zur Rissprognose

6.1 Einführung

Im Vergleich zu den Ingenieurdisziplinen wie z.B. dem Maschinenbau oder der Geotechnik wird die numerische Simulation auf dem Gebiet der Schädigung von Denkmälern aus Naturstein selten angewendet. Daher ist ein Aspekt im Vorhaben, herauszufinden, ob und in welcher Form die Simulation bestehende materialkundliche Untersuchungen ergänzen kann. Darüber hinaus ist es das Ziel, grundsätzliche Aussagen zum Potenzial dieser Methode für denkmalpflegerische Fragestellungen zu treffen und auch zukünftige mögliche Anwendungsbereiche darzustellen.

Der Nutzen der numerischen Simulation besteht darin, dass der mikromechanische Prozess im Detail nachvollzogen wird und der Einfluss der einzelnen Komponenten (Steifigkeiten, Festigkeiten, Kornformen und -verteilungen, thermische Ausdehnungskoeffizienten, Porosität, Wärmeleitfähigkeiten, Verfüllungsgrad der Poren, Temperaturverteilungen etc.) in einem potenziellen Schädigungsprozess quantifiziert werden kann. Die Simulationen werden exemplarisch durchgeführt, die Methodik allerdings ist übertragbar auf andere Festigungsmethoden und -mittel sowie Gesteinsarten.

In dem Vorhaben wurde das mechanische sowie

thermo-mechanische Verhalten nach einer Festigung modelliert und hier insbesondere mögliche Rissentstehungen und -ausbreitungen.

Die thermo-mechanischen Rechnungen erlauben Aussagen, ob und unter welchen Umständen der Festiger aufgrund der zum Gestein unterschiedlichen thermischen Ausdehnung Schädigungen durch Rissentwicklung hervorrufen kann bzw. in welchem Bereich sich der thermische Ausdehnungsgrad des Festigers bewegen kann, ohne Schädigungen hervorzurufen. Oberflächentemperaturen auf Gesteinen können unter Sonneneinstrahlung durchaus bis in die Größenordnung von 50-70°C gelangen. Dabei sind durch Schattenwirkung, Verbundelemente mit stark unterschiedlicher Wärmeleitung etc. auch starke Gradienten möglich. Die numerische Simulation kann sowohl homogene als auch extrem inhomogene Temperaturverteilungen aufgrund von Wärmeströmen betrachten.

Simulationen beinhalten naturgemäß einen Kompromiss zwischen der Detailauflösung des Modells und der damit verbundenen Rechenzeit. Es ist daher wichtig, vorher zu klären, welche Probleme man simulieren will, um nicht Modelle mit unnötig hohen Auflösungen zu generieren. Berücksichtigt man das nicht, können für Berechnungen schnell aus Stunden Tage oder gar Wochen werden, ohne dass zwangsläufig ein

höherer Erkenntnisgewinn daraus resultiert. Auch die Entscheidung ob 2d- oder 3d-Simulationen durchgeführt werden, muss auf Abwägungen zwischen Erkenntnisgewinn und Rechenzeit beruhen. Hier ist vorab zwischen Denkmalpflegern, Materialkundlern und den Modellierern klar zu definieren, welche Fragestellungen man klären möchte.

Dieses Vorhaben beschränkte sich auf das Generieren zweidimensionaler Modelle im Zentimeterbereich. Die numerische Simulation wurde mit dem Programm UDEC der Firma Itasca durchgeführt, wobei UDEC für „Universal Distinct Element Code“ steht. UDEC ist ein zweidimensionales numerisches Programm, welches

II zu realisieren. Mode I und II stehen für zwei unterschiedliche Arten der Beanspruchung von Rissen. Mode I umfasst die Beanspruchungen, die zum Öffnen der Risse führt (Zugrisse), während Mode II für die Beanspruchungen steht, die eine entgegengesetzte Verschiebung der Rissflanken verursachen (Scherrisse, vgl. Abb. 61).

Des Weiteren ist es möglich, Fluidströme durch Risse mittels hydro-mechanischer Kopplung zu betrachten. Hydro-mechanische Berechnungen können erweitert werden durch hydro-thermo-mechanische Kopplungen für die Simulation stationärer und instationärer Wärmeströme in Festkörpern und Fluiden.

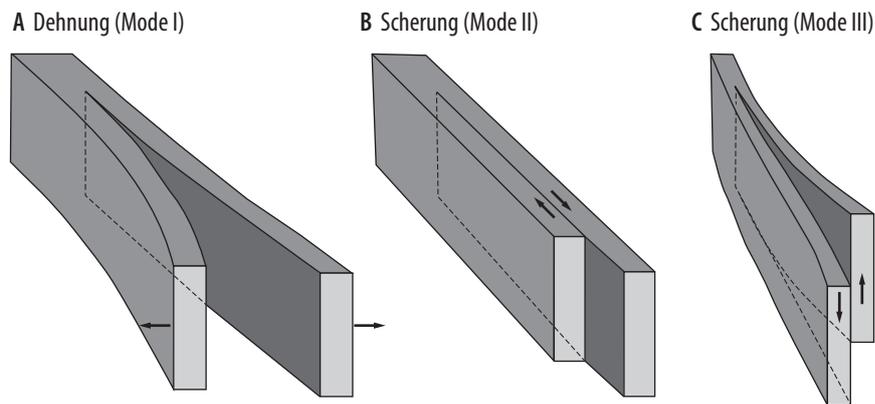


Abb. 61 Dehnung (A): Die Normalspannung ist senkrecht zur Rissebene; Scherung (B): entgegengesetzte horizontale Bewegungen; Scherung (C): Vertikale Verschiebungen quer zur Richtung der Rissausbreitung. (umgezeichnet nach Twiss & Moores, 1992).

auf der Distinkt Element Methode (DEM) für die Modellierung von Materialien im Diskontinuum basiert. DEM Modelle bestehen aus starren oder deformierbaren sowie voneinander getrennten und einzeln frei beweglichen Blöcken mit interner Vernetzung und verschiedenen Materialmodellen (z.B. visko-elastoplastisch) sowie Kontakten zwischen den Blöcken. Dies erlaubt eine flexible Abbildung der Materialkomponenten die im Falle des Cottaer Sandstein Porositäten, (Mikro-) Risse, Tonlagen sowie Quarzkörner und Bindemittel umfassen können. Klüfte und/oder Risse werden dabei als Grenzflächen zweier unterschiedlicher Blöcke angesehen und können Diskontinuitäten darstellen. Der modellmäßige Gegensatz ist das Kontinuumsmodell, in welchem z.B. das Grabmal als einfach zusammenhängender Festkörper betrachtet wird. Im Gegensatz zum klassischen Kontinuum ist es mit der DEM möglich, komplexe Simulationen z.B. zur Entwicklung, Ausbreitung, Vereinigung und der Interaktion von Rissen sowohl für den Mode-I und Mode-

Der Begriff der Distinkt Element Methode wurde durch Cundall & Strack im Jahre 1979 geprägt (Cundall & Strack In: Anonym, 2011), um auf bestimmte sogenannte Diskrete Element Methoden hinzuweisen. Diese nutzen deformierbare Kontakte und einen expliziten, d.h. zeitgesteuerten Berechnungsalgorithmus. Zum Prozessverständnis und der Bewertung einzelner Einflussgrößen ist es wichtig, den realen Prozess in Phasen bzw. dem realen zeitlichen Ablauf zu betrachten. Anhand des Beispiels in Abb. 62 soll verdeutlicht werden, was eine solche Modellierungsstrategie bedeutet.

Man nehme eine auf Spalt stehende Säule an, welche in einem Gebäude eine bestimmte Last zu tragen hat. Die physikalischen Parameter und Lasten sind bekannt. Eine einzelne statische Berechnung kommt dann zum Ergebnis, ob die Säule den Anforderungen entspricht oder nicht. Dabei spielt die Zeit keine Rolle. Möchte man dagegen wissen, wie sich die Säule auf-

grund von Verwitterungsprozessen z.B. in ihrer Festigkeit verändert, wird über die Zeit simuliert. Die numerische Simulation über die Zeit berücksichtigt die konkreten Risse von Beginn der Rechnung an und verfolgt die Rissentwicklung entweder als Echtzeitprozess oder zumindest in einzelnen Phasen als Prozess aufeinander abfolgender Zustände (Etappen).

Führt man diese Berechnung gleich zum Anfang des Bauens aus, d.h. mit einer intakten Säule, können Annahmen zu möglichen Rissbildungen und/oder Aufspaltungen getroffen werden. Diese Annahmen beruhen bestenfalls auf Erfahrungswerten oder Daten zum verwendeten Gestein. Im Gegensatz dazu kann man bei der Berechnung von einer schon geschädigten Säule das konkrete Verwitterungsverhalten und die damit verbundenen Änderungen in den Festigkeiten gleich zu Beginn einfließen lassen und so belastbare Aussagen zum Langzeitverhalten treffen.

Unabhängig von den geschilderten Ausgangsbedingungen können also mögliche weitere Schadensentwicklungen und in diesem Falle die Tragfähigkeit der Säule über die Zeit simuliert, d.h. prognostiziert werden. Und genau das ist das Wesen der über die Zeit ablaufenden Simulation, die auch die relevantere für denkmalpflegerische Fragestellungen ist.

Für die numerische 2d-Simulation sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

1. Aufbau eines geometrischen Modells mit interner Struktur. Dabei werden der Porenraum und Vorschädigungen (Mikrorisse etc.) berücksichtigt.
2. Erstellung der internen Block- und Netzstruktur des Modells, Zuweisung der Materialgesetze so-

wie der im Labor bestimmten Parameter für die einzelnen Phasen (Stoffkomponenten) der unbehandelten und gefestigten Proben.

3. Kalibrierung des Modells, um sicher zu stellen, dass das verwendete Modell das mechanische Verhalten korrekt widerspiegelt.
4. Numerische Simulationen mit verschiedenen Belastungsszenarien.

6.2 Erstellung eines geometrischen Modells

Das Erzeugen eines geometrischen Modells ist die Voraussetzung zur eigentlichen Simulation. Es gibt hierzu verschiedene Möglichkeiten:

- Klassische Modellerzeugung durch Voronoi-Blöcke mittels Zufallsgenerator (Punktprozess) auf Basis ermittelter oder geschätzter Verteilungsfunktionen für die Korn- und Porenverteilungen sowie initialer Defektverteilung;
- Einbindung Grauwerte mikroskopischer Bilder zugehörigen x, y - Koordinaten, die den wirklichen Porenraum sowie Körner weitestgehend abdecken (vgl. Abb. 68 auf S. 68);
- Kugelmodell, bei dem zufällig generierte Clumps den realen Kornformen weitestgehend entsprechen sowie das Korngrößenspektrum und den Porenraum abdecken.

Im Projekt wurden alle drei Methoden der Modellerzeugung angewandt, um anschließend den Aufwand und die Ergebnisse der Simulation zu vergleichen, d.h., festzustellen ob eine Modellerzeugung mit Vor-

Anfangsbedingungen: max. Temperaturen: -20 to 50°C, zwei Risse | Fall: kritische Oberflächenfestigung

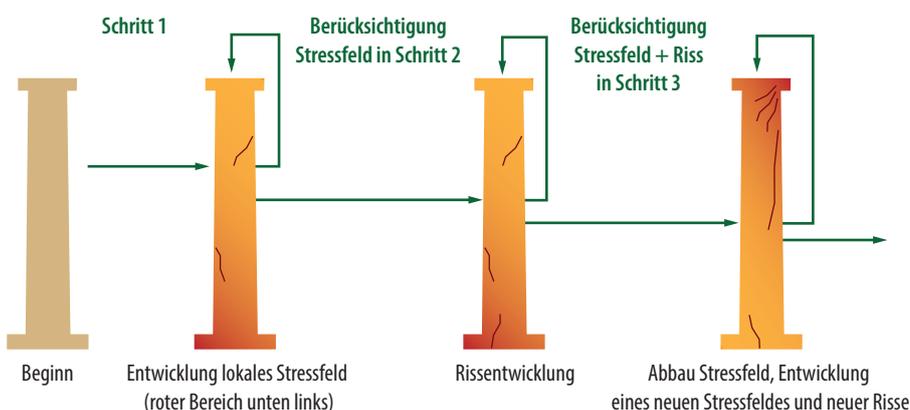


Abb. 62 Beispiel einer numerischen Simulation im Diskontinuum über die Zeit.

ono-Blöcken oder Kugeln gegenüber der mittels mikroskopischer Bilder ausreichend ist. Vorab wird auf die mikroskopische Bildanalyse eingegangen, da sie eine wichtige Rolle bei der Erzeugung geometrischer Modelle spielt und dies in dieser Form zum ersten Mal in Verbindung mit UDEC angewandt wird.

6.2.1 Mikroskopische Bildanalyse

Die Bildanalyse wurde an Dünnschliffen vom Cottaer Sandstein zur Quantifizierung der Quarzkomponenten und der Porosität vorgenommen. Es wurden bei den Quarzkörnern die Formfaktoren sowie bei der Porosität der prozentuale Anteil vermessen. Die skalierten RGB-Aufnahmen wurden mittels der Software Axiovision 4.7.2® am Polarisationsmikroskop Axioskop 40 - beides Carl Zeiss - von einem Direktbild gewonnen. Dem schloss sich die Bildbearbeitung an. Die eigentliche Bildanalyse wurde mit der in Java geschriebenen kostenlosen Anwendung „ImageJ“ durchgeführt. „ImageJ“ läuft auf allen gängigen Betriebssystemen (Mac OSX, Linux, Windows) und verfügt über zahlreiche Funktionen zur Bildbearbeitung und -analyse.

6.2.1.1 Bildbearbeitung und Erzeugung eines Binärbildes

Insbesondere bei sehr hohen Vergrößerungen sind im mikroskopischen Direktbild oft ungleichmäßige und nicht optimale Ausleuchtungen festzustellen, so dass Helligkeitsschwankungen (Rauschen) fast unvermeidlich sind. Daher erfolgte zuerst mittels eines Bildbearbeitungsprogramms eine Belichtungskorrektur. Dem schloss sich die Veränderung der Kontraste, Tonwertkorrekturen und vor allem Farbsättigungen an. Gerade bei dem mit blauem Harz ausgefüllten Porenraum ist die Erhöhung der Sättigung der blauen Farbe bei gleichzeitiger Reduzierung der anderen Farbsättigun-

gen ein sehr effizientes Verfahren (siehe Abb. 63). Man kann in „ImageJ“ zahlreiche Filter verwenden, die zudem modifiziert oder erweitert werden können. Die wichtigsten Filter sind Laplace, Median, Low- und Highpass, Robert's Cross, Gauss, Sobel und Kirsch. Zu den Arten und Wirkungen der einzelnen Filter sei auf Russ (2008) verwiesen. Wichtig ist vor allem, bei der Wahl des Filters immer zu beachten, dass trotz der Verminderung des Rauschens die Konturen erhalten bleiben.

Entsprach das bearbeitete Bild den zu vermessenden Komponenten, schloss sich die Erstellung eines Bildes an, welches die einzelnen Komponenten in unterschiedlichen Grauwerten darstellte. Diese Darstellung bietet die Möglichkeit, in UDEC einzelnen Körner aufgrund unterschiedlicher Grauwerte gegenseitig abzugrenzen und daraus ein geometrisches Modell zur numerischen Simulation zu generieren. Hier stellte sich heraus, dass das händische Nachzeichnen der Quarzkörner zwar einen höheren Zeitaufwand bedeutet, aber die Genauigkeit der Ergebnisse im Vergleich zur ausschließlich halbautomatischen Bildbearbeitung diesen rechtfertigt (siehe Abb. 68 auf S. 68). Bei der Porosität hingegen ist kein Nachzeichnen nötig.

Mit diesen Grauwertbildern wurden dann durch Segmentierung (Threshold) Binärbilder erzeugt, wobei je nach Einstellung entweder die schwarzen oder weißen Pixel den zu vermessenden Objekten entsprechen. Ein Binärbild ist die Voraussetzung für die Vermessung der Objekte.

6.2.1.2 Analyse Formfaktoren

„ImageJ“ besitzt zahlreiche Kernfunktionen zum Vermessen von Objekten. Diese Kernfunktionalitäten können durch Makros z.B. zur Berechnungen weiterer Kornparameter erweitert werden.

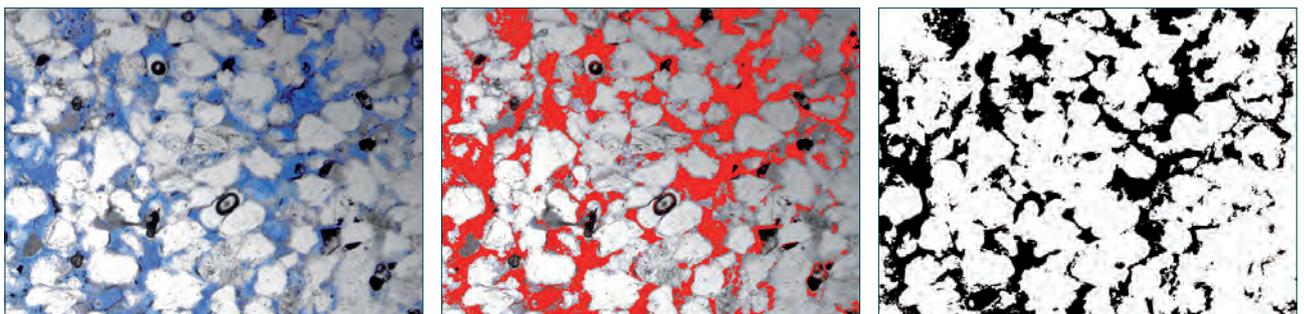


Abb. 63 Erstellung eines Binärbildes zur Messung der Porosität: Auf dem linken Foto ist das durch Bildbearbeitung betonte blaue Harz zu sehen. Das mittlere Bild zeigt die durch die Threshold Funktion in ImageJ separierte Porosität als Voraussetzung zur Erstellung eines Binärbildes (rechts).

Folgende Parameter wurden für die einzelnen Objekte vermessen:

- Fläche, Umfang
- Formfactor = $4 \text{ Pi} \cdot \text{Fläche}/\text{Umfang}^2$
- Achsenverhältnisse = (Nebenachse)/(Hauptachse)
- Solidity = Fläche/konvexe Fläche

Mit dem Makro „ConvexitySolidarity.txt“ wurden folgende Parameter berechnet:

- CH Perim = Umfang der konvexen Hülle
- CH Area = Fläche der konvexen Hülle

Das Makro kommt mit der Bildanalyse Software „Fiji“, einer Modifikation von „ImageJ“ und es darf angenommen werden, dass der Name des Makros eigentlich „ConvexitySolidity.txt“ heißen müsste.

In Abb. 64 sind die Messparameter dargestellt, die wiederum Ausgangswerte für weitere Parameterberechnungen sind.

Die Achsenverhältnisse bestimmen den Grad der Rundheit (bei „ImageJ“ als Roundness bezeichnet)

wobei 1,0 für einen perfekten Kreis steht und eine zunehmend elliptischere Form in Richtung 0,0 geht. Die Achsenverhältnisse sind nur bedingt für eine Kornformanalyse einsetzbar, d.h. bei ausschließlich elliptischen Objekten kann man Unterschiede messen und eine Objektklassifizierung vornehmen. Aber in der Regel sind die Körner von unregelmäßiger Gestalt, so dass zusätzliche bzw. andere Kornparameter herangezogen werden müssen.

Es gibt in der Literatur zahlreiche Ansätze zur Berechnungen einzelner Kornformparameter. Hier wird sich auf die Berechnungen von Heilbronner & Barrett (2013) bezogen, da sie mit der Bildanalyse Software „Image SXM“ arbeiten und dies für „ImageJ“ übertragbar ist. Bei den zusätzlichen Formfaktoren handelt es sich um ΔA und ΔP sowie $\text{radius } \Delta$:

Es werden CH Perim und CH Area vermessen und mit ihnen die jeweiligen Verhältnisse mit dem Umfang (= P) und Flächeninhalt (A) des realen Korns verglichen, wobei folgendes gilt:

$$\Delta P = P - \text{CH Perim} \text{ mit } \text{CH Perim} \leq P \quad (6.1)$$

$$\Delta A = \text{CH Area} - A \text{ mit } \text{CH Area} \geq A \quad (6.2)$$

Wir erhalten hiermit den Grad des „Längenunterschiedes“ sowie den Grad des „Flächenunterschiedes“ und können die o.g. Formparameter berechnen:

$$\text{deltP} = \Delta P / P \cdot 100 \% \quad (6.3)$$

$$\text{deltA} = \Delta A / A \cdot 100 \% \quad (6.4)$$

Die beiden Formfaktoren deltP und deltA sind voneinander unabhängig.

Verbindet man beide Parameter, bekommt man den Grad der Ausbuchtung nach folgender Berechnung:

$$\text{radius } \Delta = \sqrt{\text{deltA}^2 + \text{deltP}^2} \quad (6.5)$$

Zur Veranschaulichung der Relevanz der einzelnen Parameter für die Kornform dient Abb. 65 sowie das Diagramm in Abb. 66. In der ersten Reihe sind regelmäßige, ausschließlich konvexe Formen dargestellt; hier reichte die Analyse der Achsenverhältnisse, um Unterschiede festzustellen.

In der zweiten und dritten Reihe werden von einem Quadrat und vollkommenem Kreis ausgehend die Formen immer irregulärer, wobei zwischen Korn 11 und 12 sowie 16 und 17 nur die Kantenrundungen unterschiedlich und bei Nr. 13 und 18 noch zusätzlich Risse

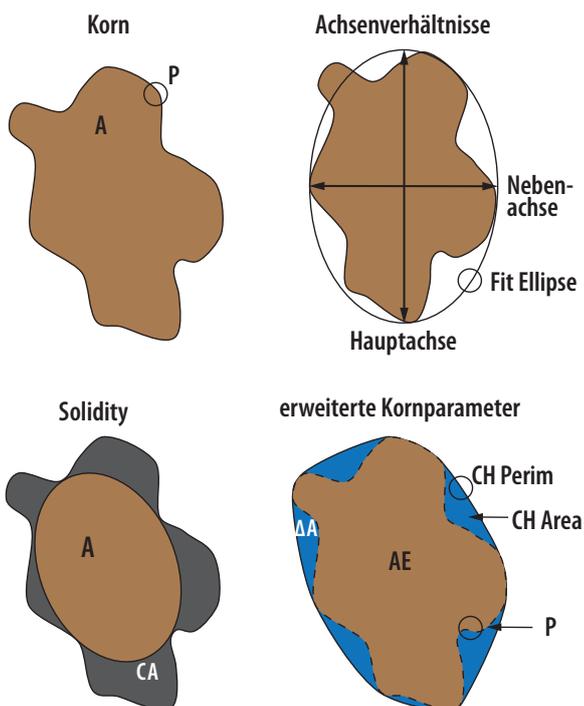


Abb. 64 Kornparameter und die jeweiligen Variablen.

vorhanden sind. In der vierten und fünften Reihe sind sehr unregelmäßige Formen dargestellt. Würde man ausschließlich die Achsenverhältnisse messen, würde man rein nach den Zahlenwerten keinen Unterschied feststellen (vgl. Tab. 9), denn die Messwerte des Quadrates (Nr. 9) und des vollkommenen Kreises (Nr. 14) sind mit allen anderen Kornformen nahezu gleich. Vergleicht man ΔP und ΔA , so sind die Werte von Korn 1 bis 9 jeweils Null, da es sich um ausschließlich konvexe Formen handelt und somit die konvexe Hülle dem Korn entspricht.

Die Formparameter greifen erst bei irregulären Kornformen. Im Diagramm in Abb. 66 wird deutlich, dass ΔP mehr Objekte mit Rissen abbildet, während ΔA Ausdruck der Ausbuchtung eines Objekts ist: Die Körner Nr. 13 und 18 haben hohe Werte für ΔP und geringe für ΔA . Im Gegensatz dazu hat das Korn Nr. 23 einen hohen ΔA Wert und moderaten ΔP Wert.

Die Körner 24 bis 27 sind stark irregulär mit zusätzlichen „Rissen“ für Korn 26 und 27.

Während sich ΔA zwischen Nr. 24/25 und Nr. 26/27 nur wenig unterscheidet, ist die Differenz für ΔP sehr deutlich.

Man kann daher sehr zügig Aussagen zu Kornformen von einer großen Anzahl an Körnern treffen und die Körner dementsprechend klassifizieren.

Die Kornformen wurden zuerst entsprechend der Formfaktoren ΔP vs. ΔA klassifiziert und anschließend nach der Elliptizität gruppiert (vgl. Tab. 10 und

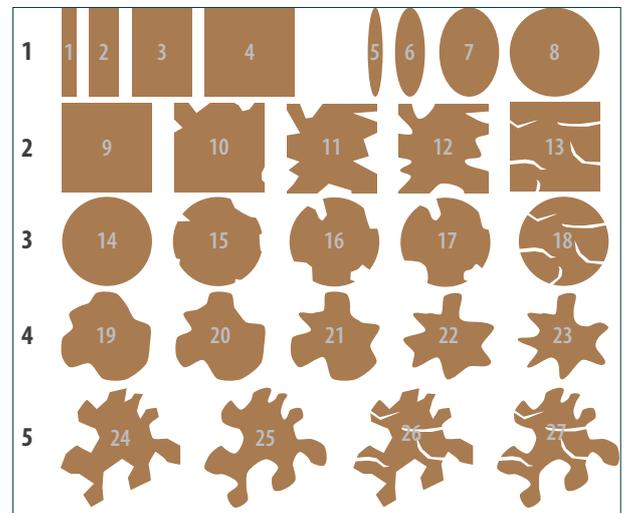


Abb. 65 Beispielformen zur Veranschaulichung verschiedener Kornparameter (nach Heilbronner & Barrett, 2013).

Tab. 11 auf S. 70).

Innerhalb der Gruppen wurden wiederum die Körner nach Korngröße sortiert, wofür der Äquivalenzdurchmesser verwendet wurde:

$$d_{equ} = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (6.6)$$

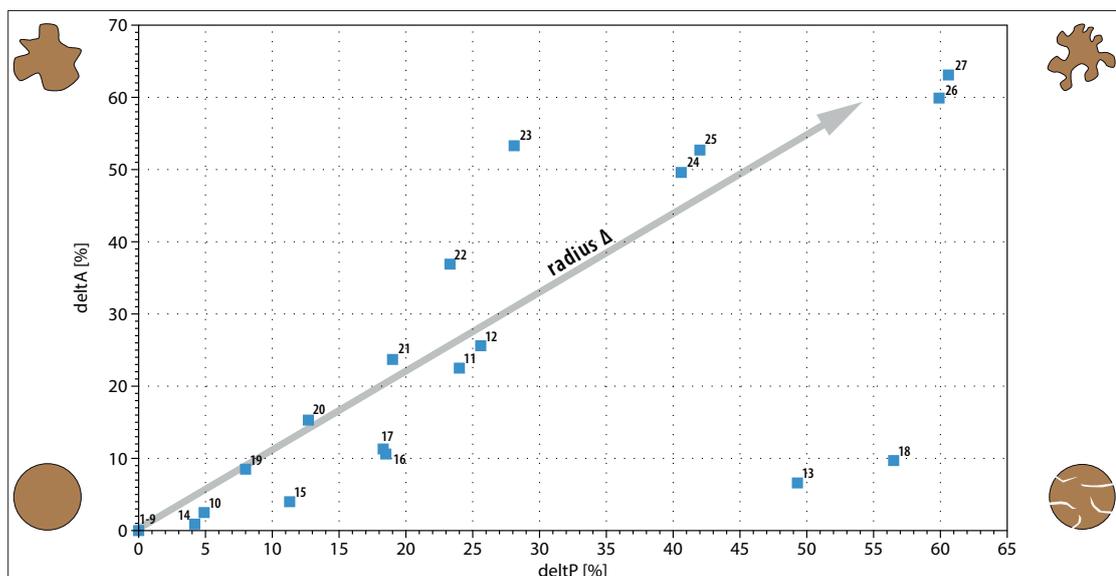


Abb. 66 Beispielformen bei Verwendung der Formfaktoren ΔP versus ΔA (nach an Heilbronner & Barrett, 2013).

6.2.2 Geometrisches Modell: stochastischer Ansatz

Zunächst wird die äußere Umrandung, d.h. der Block des Modells in den gewünschten Dimensionen definiert. Danach wird das Modell mit zufälliger Verteilung mit einem Netz von Voronoi-Blöcken gefüllt, wobei die Größe der Voronoi-Blöcke im Vergleich zu den realen Korngrößen deutlich kleiner sein muss. Anschließend werden einzelne Voronoi-Blöcke so gelöscht, dass einerseits die realen Porosität erreicht wird und andererseits gleichzeitig Voronoi-Blöcke so verschmolzen, dass diese der reale Korngrößen- und

Formverteilung entsprechen (Abb. 67). Dabei handelt um eine rein statistisch verteilte Zuweisung, die Korngrößen- und Formverteilung berücksichtigt. Somit wird ein stochastisch äquivalentes Modell erzeugt. Den verschmolzenen Voronoi-Blöcken werden nun die (analysierten) Gesteinsparameter zugewiesen und die Kontakte zwischen den Voronoi-Blöcken definiert, wobei den einzelnen Mineralkomponenten bzw. dem Bindemittel die entsprechenden Eigenschaften inkl. Mikrorisse zugeordnet werden.

Tab. 9 Vergleich Parameter zur Erfassung und Klassifizierung von Kornformen

Label	AxR	Solidity	Circularity	Convexity	deltP [%]	DeltaA [%]	Radius Δ [%]
1	0,2	1	0,41	1,006	0,0	0,0	0,0
2	0,3	1	0,60	1,005	0,0	0,0	0,0
3	0,7	1	0,77	1,004	0,0	0,0	0,0
4	1,0	1	0,79	1,003	0,0	0,0	0,0
5	0,2	0,97	0,38	0,972	0,0	0,0	0,0
6	0,3	0,98	0,61	0,962	0,0	0,0	0,0
7	0,7	0,99	0,85	0,957	0,0	0,0	0,0
8	1,0	0,99	0,90	0,956	0,0	0,0	0,0
9	1,0	1	0,79	1,003	0,0	0,0	0,0
10	1,0	0,98	0,71	0,951	4,9	2,5	5,5
11	1,0	0,82	0,38	0,76	24,0	22,5	32,9
12	1,0	0,80	0,36	0,744	25,6	25,6	36,2
13	1,0	0,94	0,19	0,507	49,3	6,6	49,7
14	1,0	0,99	0,91	0,958	4,2	0,9	4,3
15	1,0	0,96	0,75	0,887	11,3	4,0	12,0
16	1,0	0,90	0,59	0,815	18,5	10,6	21,3
17	1,0	0,90	0,59	0,817	18,3	11,3	21,5
18	1,0	0,91	0,17	0,435	56,5	9,7	57,4
19	0,9	0,92	0,75	0,92	8,0	8,5	11,6
20	0,9	0,87	0,63	0,873	12,7	15,3	19,9
21	0,9	0,81	0,51	0,81	19,0	23,7	30,3
22	0,9	0,73	0,40	0,767	23,3	36,9	43,7
23	0,9	0,65	0,32	0,719	28,1	53,3	60,2
24	0,9	0,67	0,21	0,594	40,6	49,6	64,1
25	0,9	0,66	0,20	0,58	42,0	52,7	67,3
26	0,9	0,63	0,09	0,401	59,9	59,9	84,7
27	0,9	0,61	0,09	0,394	60,6	63,1	87,5

6.2.3 Geometrisches Modell: bildanalytischer Ansatz

Bei diesem Ansatz wird ein mikroskopisches Bild verwendet, in dem die Grauwerte den jeweiligen Komponenten entsprechen. Es wurden die für die Bildanalyse erstellten Bilder verwendet, die im Gegensatz zu normalen S/W-Gefügebildern einen sehr eingeschränkten Grauwertbereich besitzen und zu einer höheren Genauigkeit des zu generierten Modells führen (Abb. 71).

Von dem Gefügebild werden von jedem Pixel der entsprechende Grauwert und die zugehörigen Koordinaten in „ImageJ“ analysiert und als Textdatei gespeichert. In den beiden mittleren Graphiken in Abb. 68 ist dargestellt, wie die Koordinaten für jeden Grauwert gewonnen werden.

In UDEC wird nun ein Block erstellt, der den Maßen der mikroskopischen Aufnahmen (hier 1,3 x 0,97 mm) entspricht und der anschließend mit einem Zufallsgenerator mit sehr kleinen Voronoi-Blöcken gefüllt wird. Die Datei mit den Koordinaten/Grauwerten wird nun in UDEC geladen, um den Voronoi-Blöcken die entsprechenden Grauwerte zuzuweisen.

In der mittleren rechten Darstellung in Abb. 68 sieht man im Hintergrund das erwähnte Netz aus Voronoi-Blöcken (schwarz), wobei die schwarzen Punkte dem Zentrum des jeweiligen Voronoi-Blocks entsprechen. Das in Rot darübergelegte Raster repräsentiert die Grauwerte, wobei das Plus den Mittelpunkt eines Pixels darstellt.

Prinzipiell muss man sich zwei Ebenen vorstellen: eine Ebene mit Voronoi-Blöcken und eine Ebene mit einer Datei, die die Grauwerte und zugehörigen x-y Koordinaten enthält. Bildlich gesprochen liest UDEC Reihe für Reihe ab und weist jeden Grauwert diejenigen Voronoi-Blöcke zu, deren Schwerpunkte innerhalb dieses Pixels liegen (rote Pfeile in mittlerer rechter Darstellung). Somit werden die Voronoi-Blöcke immer einem Grauwert zugeordnet, der wiederum für ein Korn oder die Porosität steht.

Die farbigen Polygone stellen die verschmolzenen Voronoi-Blöcke dar, die z.B. einem Korn oder Porenraum entsprechen. Aufgrund des sehr engmaschigen Voronoinetzes bildet das generierte geometrische Modell praktisch 100%ig die Realität ab (Graphik unten links in Abb. 68). Diesen verschmolzenen Voronoi-Blöcken werden nun die entsprechenden Parameter zugewiesen sowie die Kontakte zwischen den Voronoi-Blöcken definiert.

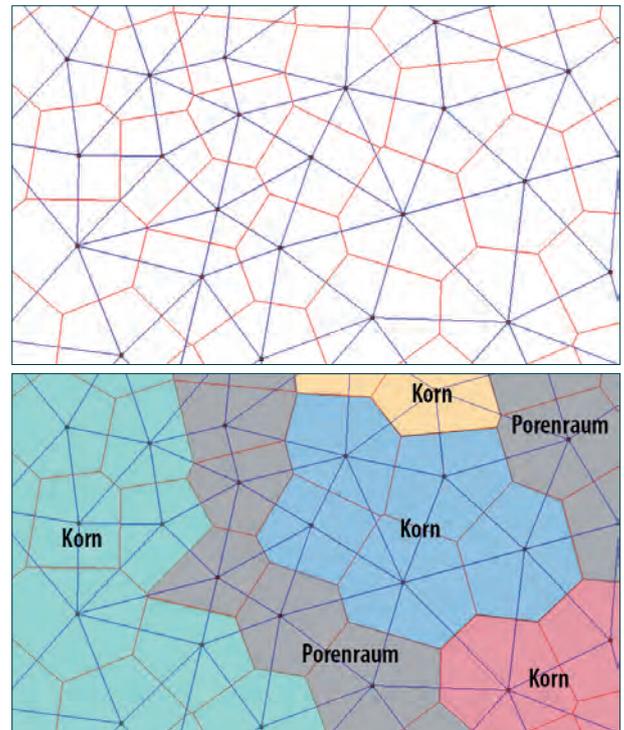


Abb. 67 Aus Punkten werden über eine Delaunay Triangulation (blaue Linien) Voronoi-Blöcke (rote Linien) generiert, um die Voronoi-Blöcke entsprechend dem Porenraum und den Gesteinskörnern zu verschmelzen (untere Graphik).

6.2.4 Geometrisches Modell: kornbasierter Ansatz

Bei einem Modell auf Partikelbasis werden mit mehreren sich überdeckenden Partikeln sogenannte Clumps erstellt, die die realen Kornformen abbilden sollen. Generiert werden die Clumps im Itasca Programm PFC 2D. Dabei sind sowohl die Anzahl der Partikel, deren Überlappungen und Größe als auch die Zahl der generierten Clumps variabel.

Abb. 69 zeigt diesen Vorgang schematisch: Zuerst wird ein kreisförmiges Partikel in einer „Box“ erzeugt, um dann von vordefinierten Clumps mit gleicher Fläche und gleichem Koordinatenursprung, aber zufälliger Orientierung, ersetzt zu werden. Dabei werden sämtliche Informationen, d.h. x,y-Koordinaten der Mittelpunkte, Radius sowie die Information zum Materialtyp in einer Textdatei gespeichert. Anschließend wird diese Datei in UDEC eingelesen, d.h. den Voronoi-Blöcken zugeordnet und sogenannte Cluster generiert. Zuerst wird ein Partikel mit einer definierten x,y-Koordinate und einem gegebenen Radius generiert (Abb. 70). Dem schließt sich das Erzeugen eines zweiten Partikels mit zufälliger Position und zufälligem Radius an.

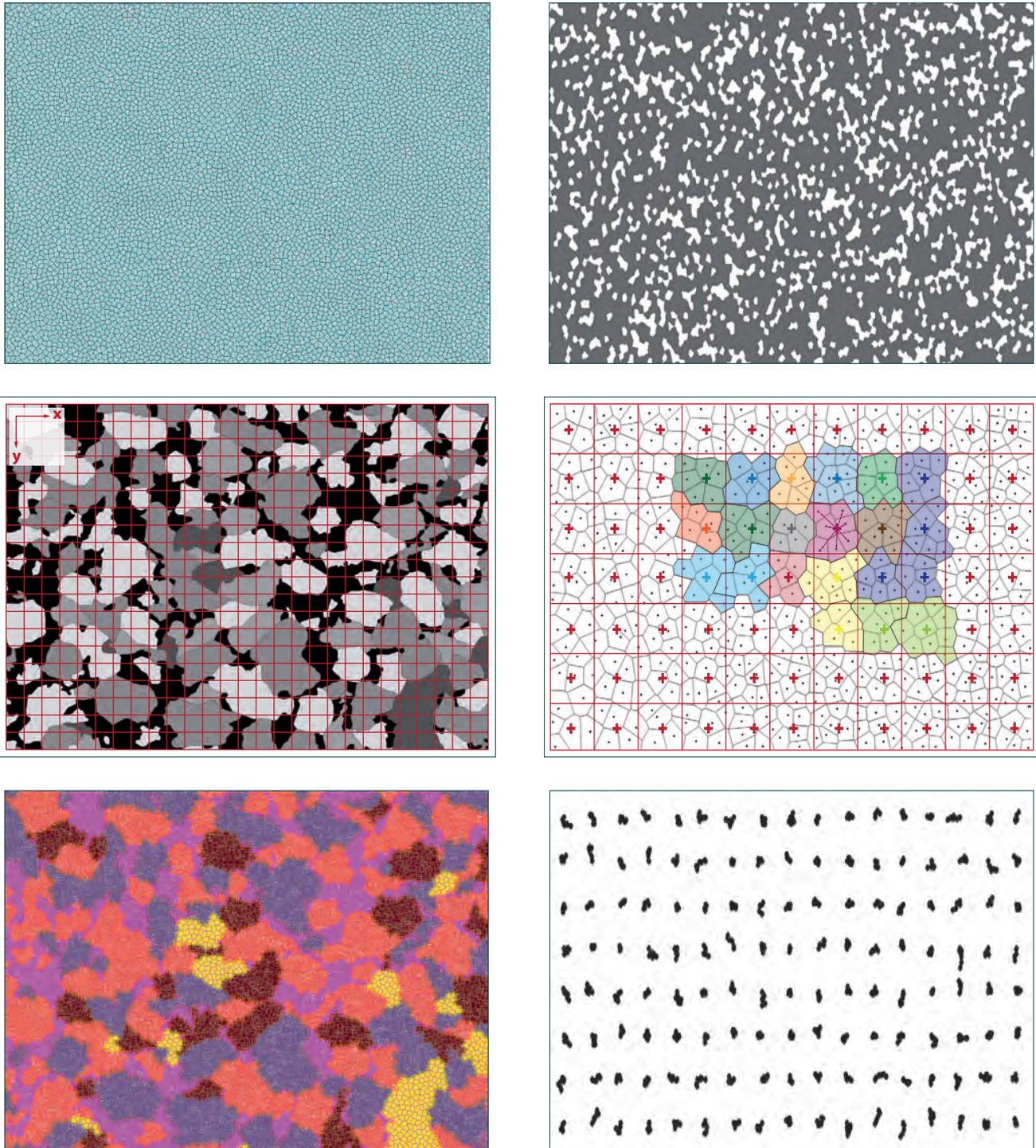


Abb. 68 Obere Reihe: Vernetzung mittels Voronoi-Blöcke (links) und statistische Zuweisung Porosität (rechts) | Mittlere Reihe: Grauwertbild für den Import in UDEC sowie zur Erstellung von Binärbildern (links). Prinzipdarstellung zur Erstellung eines Modells auf Basis von Grauwerten (rechts). | Untere Reihe: Generation des geometrischen Modells durch Import der Grauwerte in UDEC (links). Ausschnitt von zufällig generierten Clumps mit 200 Kombinationen aus jeweils 7 Kugeln (rechts).

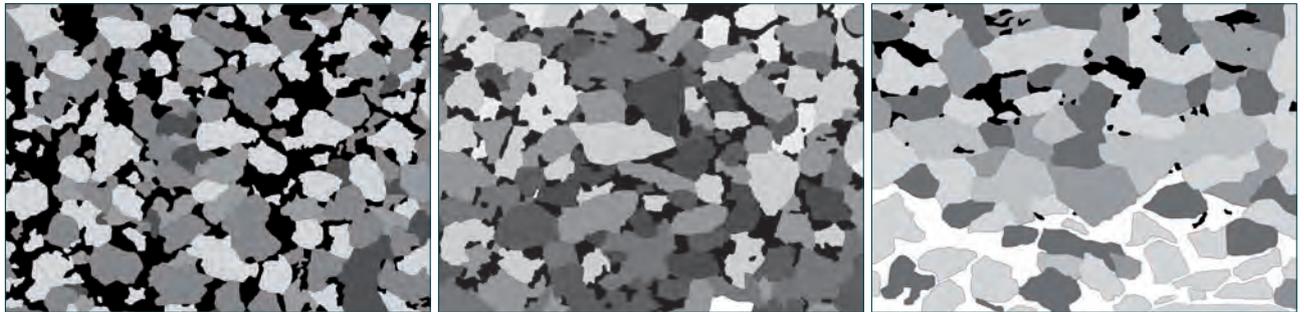


Abb. 71 Zum Generieren geometrischer Modelle verwendete Grauwertbilder mit unterschiedlichen Porositäten und Gefügen (schwarz = Porosität, weiß = Tonlage, grau = Quarzkörner).

Der Winkel ist der Winkel zwischen der Horizontalen und der Kontaktlinie beider Partikelmittelpunkte und ist wie folgt definiert:

$$\phi = 2\pi \cdot \text{Urand} \quad (6.7)$$

$$D = 2R \cdot \text{Urand} \quad (6.8)$$

Wobei Urand ein gleichverteilter Wert ist mit $0 \leq \text{Urand} \leq 1$.

Die Kreismittelpunkte des nächsten Partikels errechnen sich aus folgenden Formeln:

$$x = D \cdot \cos \quad (6.9)$$

$$y = D \cdot \sin \quad (6.10)$$

Auch das dritte Partikel wird entsprechend diesem Prinzip generiert. Um zu gewährleisten, dass die generierten Clumps dem realen Korngrößenspektrum sowie Kornformen entsprechen, wurden die Clumps bildanalytisch vermessen.

Der Generierungsmechanismus von Clumps zu einem geometrischen Modell ist in Abb. 72 dargestellt. Die Clumps reagieren während der Simulation als starren-

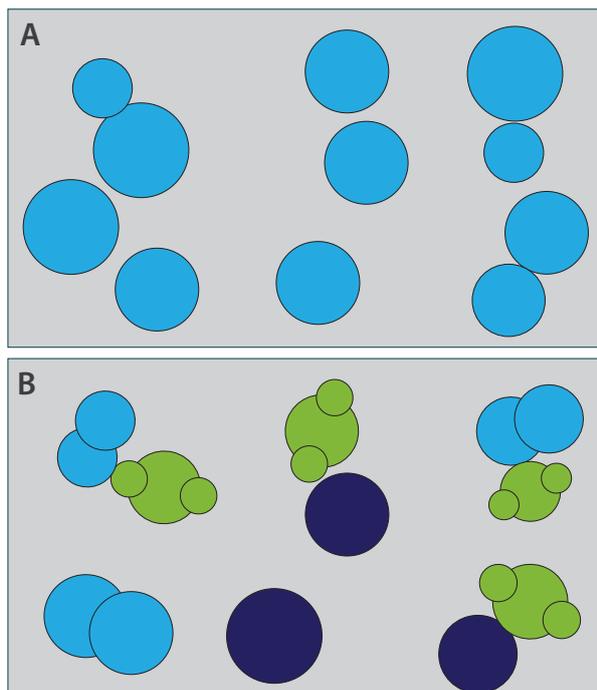


Abb. 69 Generierte Partikel werden durch Clumps ersetzt.

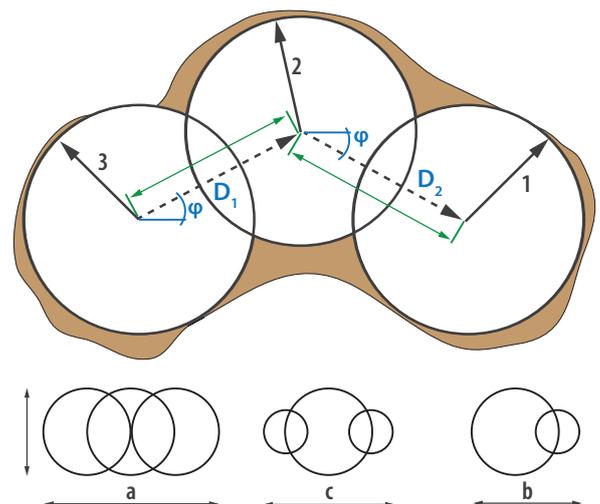


Abb. 70 Ablauf bei der Generation eine Clump-Kombination aus drei Partikeln. Partikel 1 besitzt eine definierte Position, Partikel 2 und 3 sind beliebig generiert. Die Kombination bildet annähernd das reale Korn im Hintergrund ab.

Untere Reihe mit einfachen Kombinationen: [a] Clump aus drei überlappenden Partikeln mit gleichem Durchmesser, [b] Clump aus einem großen und zwei kleinen Partikeln, [c] Clump aus einem großen und einem kleinen Partikel.

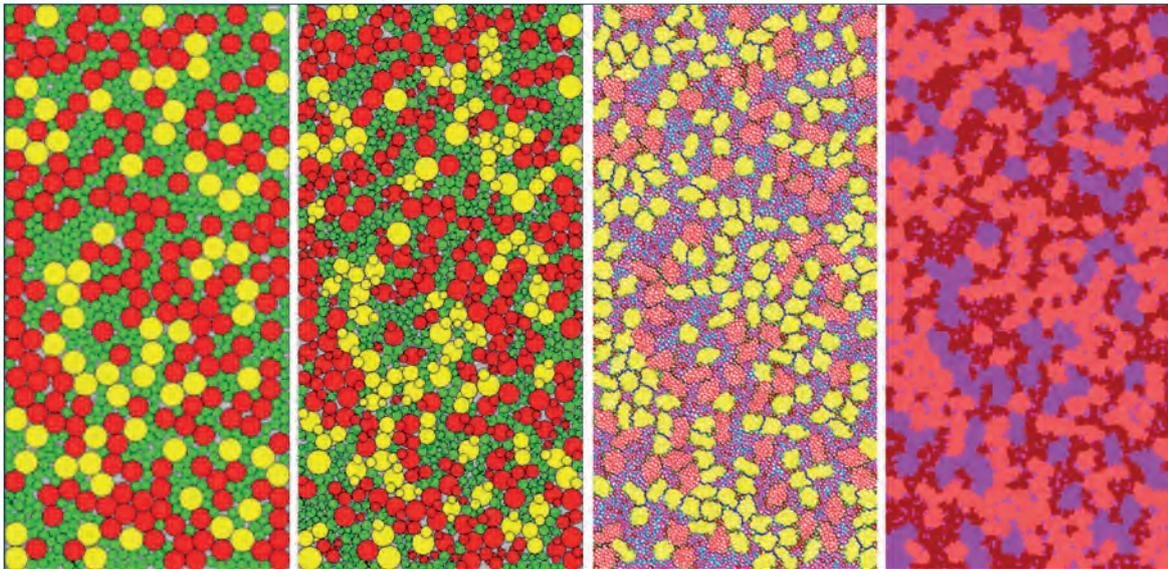


Abb. 72 Generation eines geometrisches Modells auf Kugelbasis: [a] Partikel; [b] Ersetzen der Partikel durch Clumps; [c] Geometrisches Modell durch Import der Textdatei in UDEC, hier dargestellt die Normale Steifigkeit der Kontakte; [d] Darstellung der Materialeigenschaften der Blöcke.

Körper, d.h. die Form verändert sich nicht, sie können nicht zerreißen und es wirken keine Kräfte an den internen Kontakten.

Um auch bei späteren Simulationen nicht immer wieder geeignete Clumps generieren zu müssen, können in PFC 2D „Kornform-Bibliotheken“ für das jeweilige Gestein und seine Varietäten erstellt werden. Dabei wird auch das Korngrößenspektrum berücksichtigt. Um Clumps zu generieren, die die realen Kornformen

so weit wie möglich abdecken, wurden jeweils 200 Clumps aus fünf, sechs, sieben sowie neun Partikeln generiert, anschließend bildanalytisch vermessen und mit den Kornformen verglichen.

Es stellte sich heraus, dass die Clumps der 7er-Kombination den größten Teil der Kornformen abdecken (Abb. 73). Es stellte sich aber auch heraus, dass bestimmte Bereiche überhaupt nicht abgedeckt werden konnten bzw. nur mit einem hohen Aufwand mittels Kombinationen aus 10 bis 15 Partikeln.

Die in Abb. 68 rechts unten gezeigten Clumps wurden zusätzlich zu den ΔA - und ΔP -Werten auch entsprechend ihrer Elliptizität gruppiert (Tab. 10 und Abb. 73). Der Vergleich der Anzahl der Objekte in den jeweiligen Elliptizitätsgruppen ermöglichte die Anzahl der Clumpformen denen der Kornformen anzupassen (Tab. 11). Dabei können die generierten Kugelformen wie eine Objektbibliothek genutzt werden, um diese für den Aufbau des geometrischen Modells zu nutzen. Beides, das Erstellen der Clumps und die Bildanalyse, sind zwar sehr schnelle und einfache Verfahren, aber die Auswahl der Clumps erwies sich als ziemlich zeitaufwendig. Ein Grund hierfür liegt in dem Zufallsgenerator, durch den man - Nomen est omen - keinen Einfluss auf die generierten Kornformen hat. Da Clumps zufallsgeneriert sind, ist hier nicht das Ziel, dass die Kugeln 1:1 der Realität entsprechen. Dies wird in der geometrischen Modellerstellung anhand der Grauwerte realisiert.

Tab. 10 Elliptizitätsgruppen

Gruppe	Achsenverhältnis	Gruppe	Achsenverhältnis
1	0,0 - 0,19	4	0,6 - 0,79
2	0,2 - 0,39	5	0,8 - 1,0
3	0,4 - 0,59		

Tab. 11 Klassifizierung nach ΔA vs. ΔP und der Anzahl der Körner und Clumps in der jeweiligen Elliptizitätsgruppe (in Gruppe 1 weder Körner noch Clumps).

Gruppe	2	3	4	5
Clumps	3	51	98	47
Schliff A	7	30	63	27
Schliff C	7	23	44	16
Schliff D	7	35	28	20

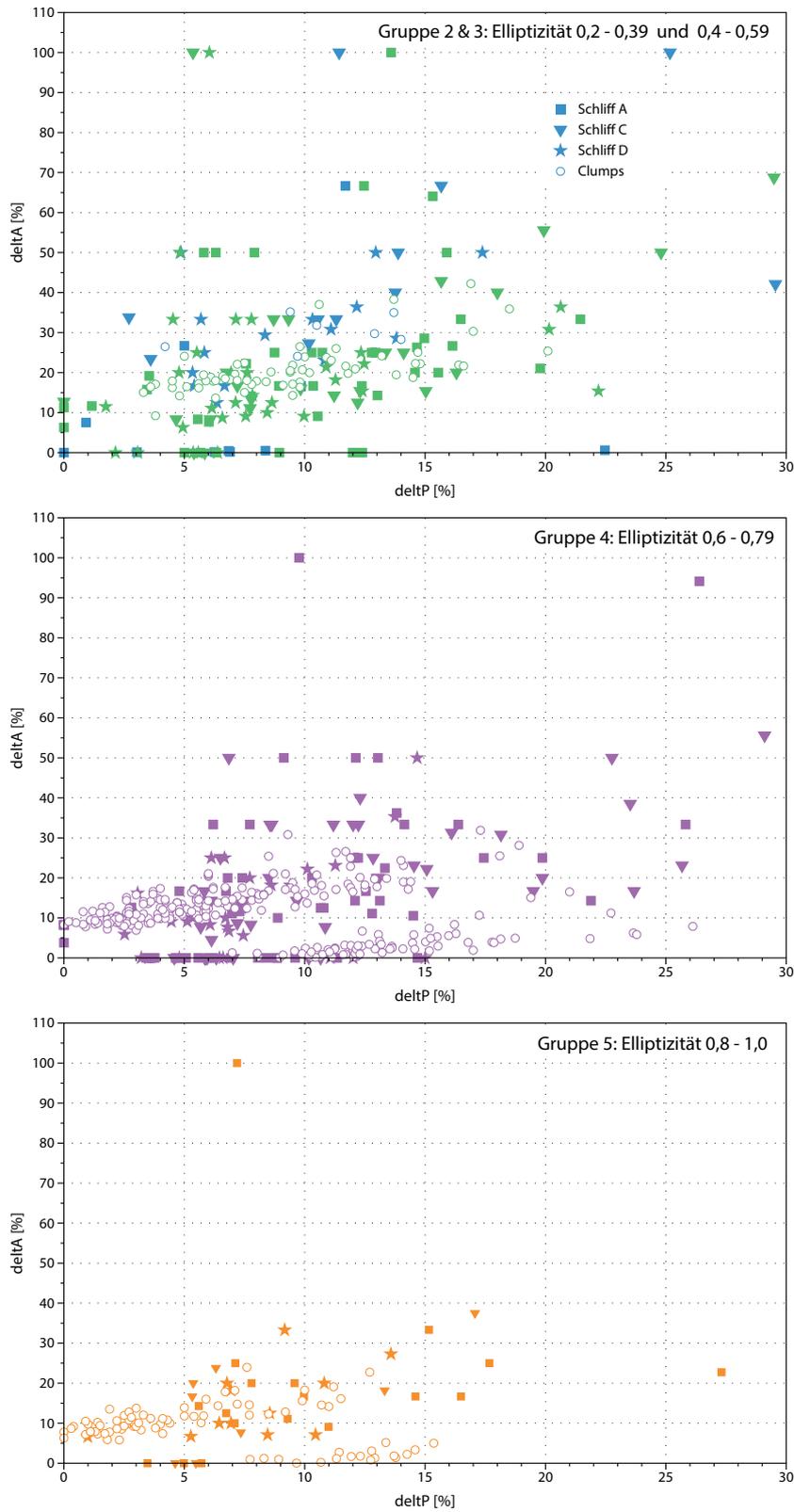


Abb. 73 Vergleich deltaA und deltP der Körner und Kugelkombinationen (clumps aus 7 Kugeln) entsprechend der Elliptizitätsgruppen (hier grün = Gruppe 3, blau = Gruppe 4; Symbole bleiben bei allen Diagrammen gleich).

6.3 Thermische Simulation

6.3.1 Kalibrierung des Modells

Die Kalibrierung des generierten Materialmodells ist die Voraussetzung für die nachfolgende Simulation. Mit der Kalibrierung des Modells wird sichergestellt, dass diese das mechanische Verhalten des Materials, hier Cottaer Sandstein, korrekt widerspiegelt. Bei der Modellgeneration wurde der stochastische Ansatz gewählt, da mit diesem Ansatz in einer akzeptablen Zeit von bis zu drei Tagen simuliert werden kann (vgl. 6.2.2 auf S. 66). Es wurden Materialmodelle vom unbehandelten und gefestigten Cottaer Sandstein generiert.

Dem jeweiligen Modell werden die im Labor analysierten Parameter zugewiesen (Tab. 12), wobei sich der Kompressionsmodul (K) und Schermodul (G) wie folgt errechnet:

$$K = E/3(1-2\nu) \quad (6.11)$$

$$G = E/2(1+\nu) \quad (6.12)$$

mit E als E-Modul und ν als Poissonzahl.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die gesteinsmechanischen Kennwerte von den Probewürfeln stammen, da vom Grabmal nicht ausreichend Probenmaterial entnommen werden konnte. In Abb. 74 ist die Voronoivernetzung sowie die Materialmatrix (blau) mit dem Porenraum (weiß) des Materialmodells dargestellt.

Bei einer 2d-Simulation muss der tatsächliche prozentuale Anteil des Porenraums im Modell reduziert

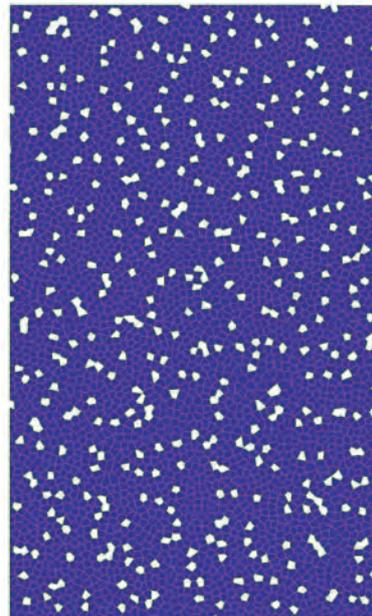


Abb. 74 Vernetzung und Materialmodell mittels stochastischer Zuweisung: Matrix (blau) und Porenraum (weiß). Die Modellgröße beträgt 10 x 6 cm.

werden. Grund hierfür ist, dass in der Realität die Spannungen in einem dreidimensionalen Raum verteilt sind. Würde man in der 2d-Simulation dem Materialmodell den gleichen Porenraumanteil zuweisen, würden die Ergebnisse verfälscht.

Zur Kalibrierung der Materialmodelle mit einer Größe von 6 x 10 cm wurden einaxiale Druck- und Zugversuche in UDEC durchgeführt. Die Kalibrierung wird an dieser Stelle für den unbehandelten Cottaer Sandstein exemplarisch gezeigt. Die Verläufe der Spannungen versus Verschiebungen sind für den einaxialen Druck-

Tab. 12 Parameter Cottaer Sandstein zur Kalibrierung und Simulation (eigene Laborwerte, außer wenn anders angegeben).

Parameter	Cotta unbehandelt \perp	Cotta gefestigt \perp
E-Modul [Pa]	10,50E+9	12,89E+9
Poissonzahl [-]	0,09	0,12
einaxiale Druckfestigkeit [Pa]	31,29+E6	45E+6
Kompressionsmodul [Pa]	3,88E+9	5,6E+9
Schermodul [Pa]	3,24E+9	3,83E+9
Reibungswinkel [°] - angesetzt	30	30
Kohäsion [Pa] - angesetzt	8,6E+6	13E+6
Dichte [kg/m ³]	2080	2080

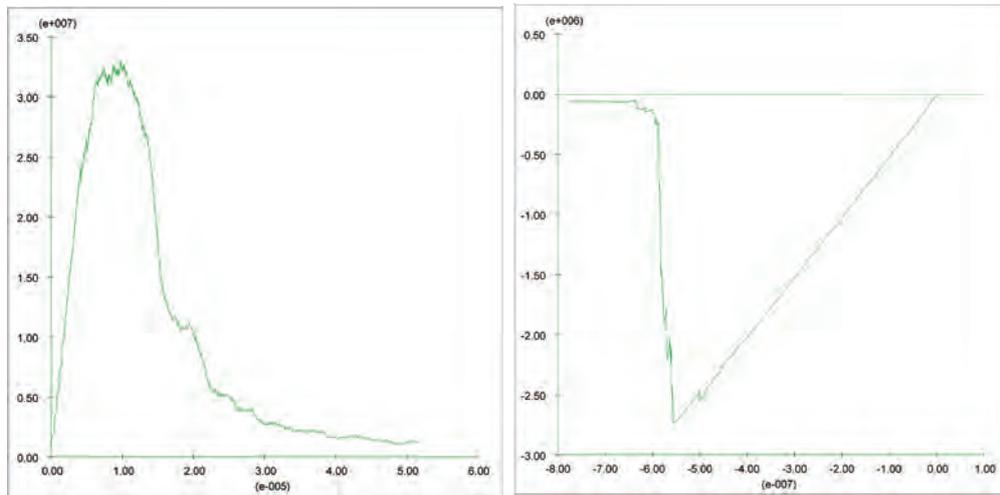


Abb. 75 Links: Spannung [Pa] versus axiale Kopfverschiebung [m] (einaxialer Druckversuch). Rechts: Zugspannung [Pa] versus axiale Kopfverschiebung [m] (einaxialer Zugversuch).

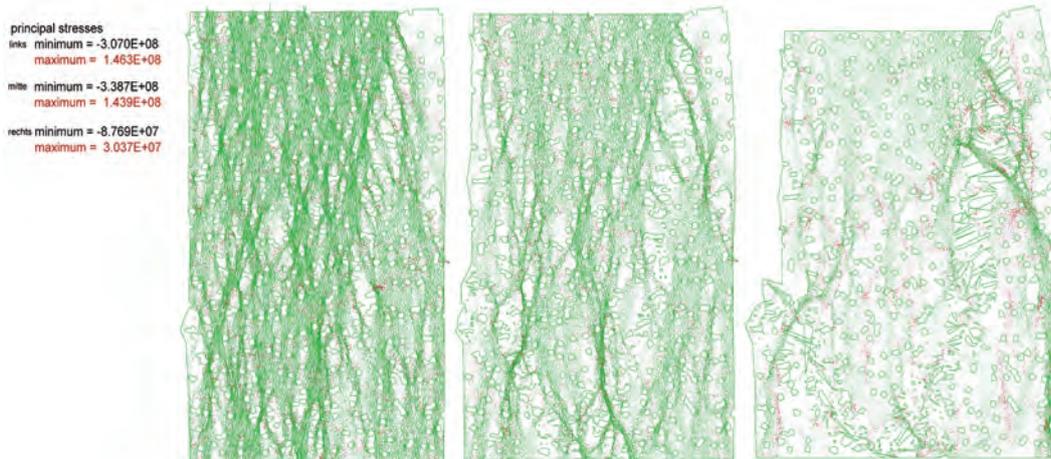


Abb. 76 Modell mit vertikalen Hauptspannungsvektoren im einaxialen Druckversuch.

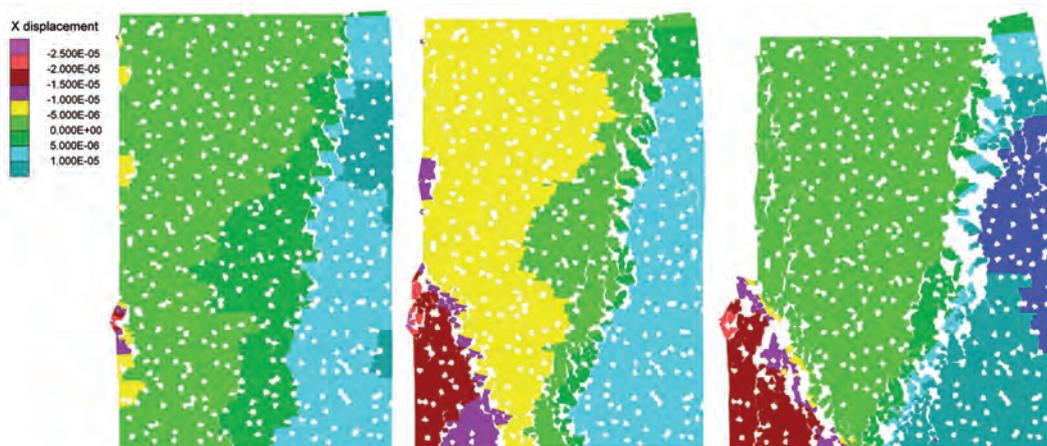


Abb. 77 Modell mit Materialstruktur und Horizontalverschiebungen im einaxialen Druckversuch.

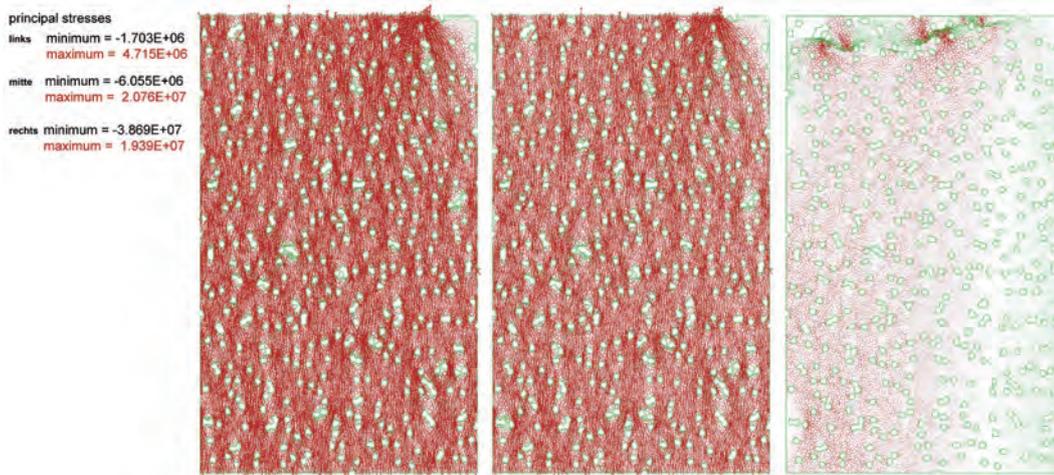


Abb. 78 Modell mit vertikalen Hauptspannungsvektoren im einaxialen Zugversuch.

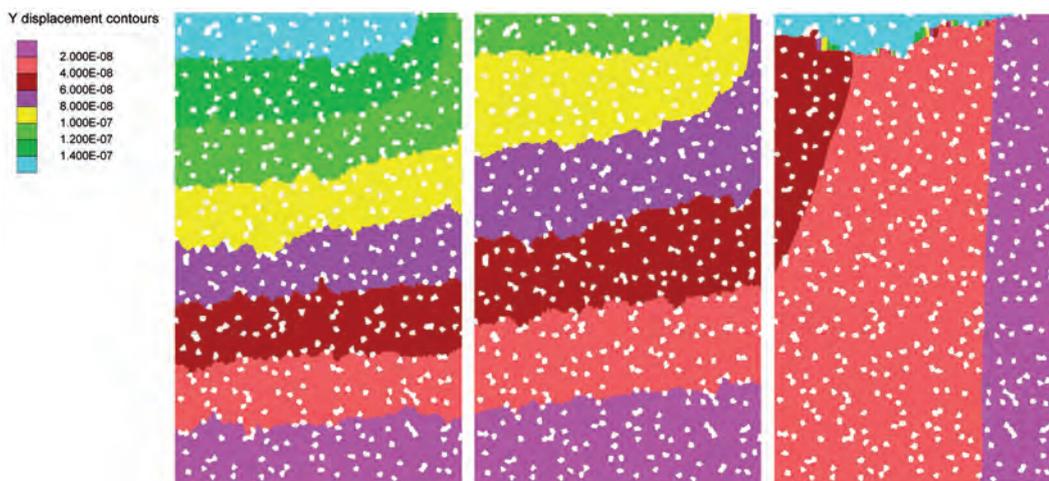


Abb. 79 Modell mit Materialstruktur und Vertikalverschiebungen im einaxialen Zugversuch.

versuch und einaxialen Zugversuch in Abb. 75 dargestellt. Beide Kurven zeigen, dass die Kalibrierungen sich gut mit den Laborwerten decken, d.h. das Materialmodell entspricht dem mechanischen Verhalten des unbehandelten Cottaer Sandsteins.

In Abb. 76 ist die Entwicklung der Spannungsverteilung bei einem einaxialen Druckversuch dargestellt (grün: Druckspannung, rot: Zugspannung) und es zeigt sehr gut den Aufbau von lokal hohen Druckspannungen und deren Reduzierung nach dem Versagen. Die Darstellung der Erhöhungen der horizontalen Verschiebung in Abb. 77 zeigt das klassische Bruchbild eines einaxialen Druckversuchs. Für den einaxialen Zugversuch ist in Abb. 78 die Verteilung der Hauptspannungen dargestellt (grün: Druckspannung, rot: Zugspannung). Für die Zeit vor der Rissbildung sind die Maximalspannungen gleichmäßig über das Modell verteilt. Erst kurz vor und mit dem Versagen kon-

zentrieren sich die Spannungen unmittelbar am sich entwickelnden Riss (oben). Dies spiegelt sich in den vertikalen Verschiebungen in Abb. 79 wieder. Hier entspricht der hellblaue Bereich dem abgerissenen Teil des Modells. Mit den kalibrierten Materialmodellen können nun die eigentlichen Simulationen durchgeführt werden.

6.3.2 Simulation der thermischen Belastung

Die Materialmodelle für die Simulation entsprechen dem unbehandelten, dem gefestigten sowie dem ungefestigten-gefestigten Zustand. Das Modell wurde am unteren Rand mechanisch fixiert, d.h., die sich entwickelnden Spannungen können sich in alle anderen drei Richtungen frei ausbreiten. Hiermit wird die Situation des Grabmals nachgebildet, welches am Boden fixiert ist.

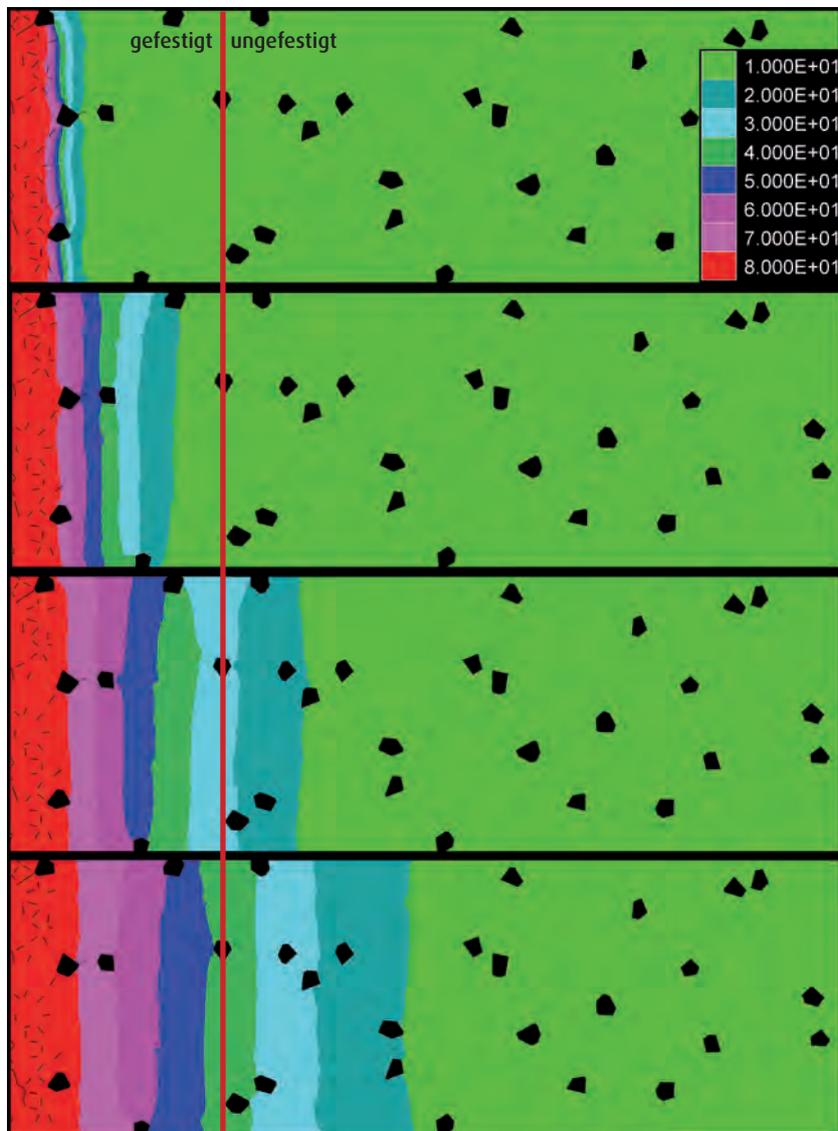


Abb. 80 Simulation der Rissentwicklung bei thermischer Belastung von max. 80°C. Sekundenschritte von oben nach unten: 5 - 50 - 200 - 400. Zu sehen ist eine partielle Entwicklung von Mikrorissen im Temperaturbereich von 80°C (Modellgröße: 12 x 4 cm).

Mit allen drei Modellen wurden thermo-mechanische Belastungen mit Temperaturbereichen von 0 bis 40°C, 60°C sowie 80°C simuliert. Für das gefestigt-ungefestigte Materialmodell wurden weiterhin thermo-mechanische Rechnungen von Null bis 100°C, 150°C, 200°C sowie 800°C durchgeführt. Dabei wurde der linken Modellseite jeweils die hohe Temperatur und der rechten Modellseite die Temperatur = 0°C zugewiesen. Die linke Seite entsprach dem gefestigten Bereich und besaß eine Breite von 3 cm bei einer Gesamtbreite des Modells von 12 cm.

Bei der Simulation wechseln sich thermische und mechanische Belastungen zeitlich ab, d.h., zuerst wird schrittweise die Temperatur erhöht und nach jedem Schritt die Mechanik berechnet. Hierdurch simuliert

man den Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung über die Zeit.

Die hohen Temperaturen wurden einmal gewählt, um gezielt Risse zu erzeugen und die Rissbildungen zu zeigen und somit ein Verständnis für die Simulation bzw. deren Aussagekraft zu entwickeln. Zum anderen können solche und noch höhere Temperaturen in Brandfällen erreicht werden. Von den verschiedenen Parametern wie Hauptspannungen und Stressverteilungen, sollen hier die möglichen Rissbildungen und Rissstrukturen dargestellt werden, da sie für die denkmalpflegerische Praxis bezüglich ihrer Aussagekraft die relevanten und am besten nachvollziehbaren Phänomene sind. Mikrorisse sind mehr oder weniger in jedem Gestein in unterschiedlicher Größe und Ver-

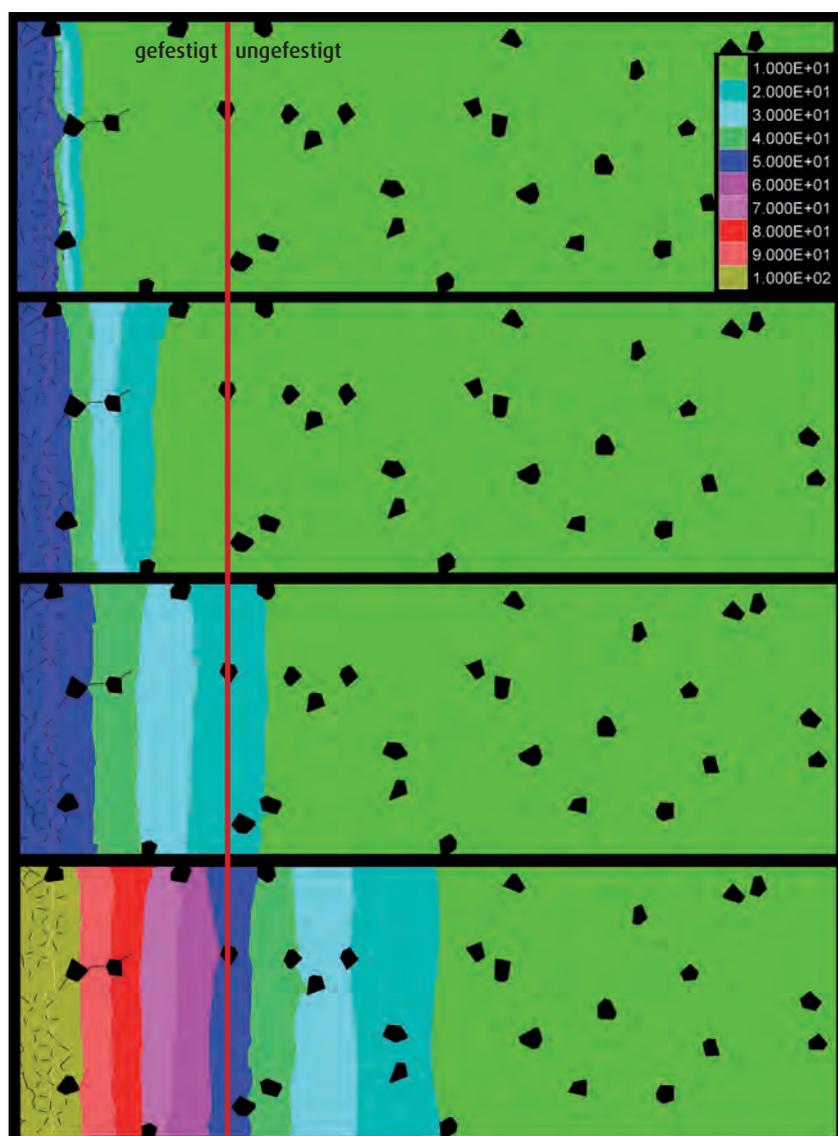


Abb. 81 Simulation der Rissentwicklung bei thermischer Belastung von 100°C. Sekundenschritte von oben nach unten: 5 - 50 - 200 - 400. Fortschreitende Mikrorissentwicklung mit der beginnenden Entstehung durchgängiger Mikrorisse (Modellgröße: 12 x 4 cm).

teilung vorhanden. Sie sind der Auslöser für das Herabsetzen der Gesamtfestigkeit eines Gesteins und ab einem gewissen Grad der Mikrorissausbildung kann sich das Risswachstum beschleunigen und die Gesamtfestigkeit des Gesteins exponentiell reduzieren. Das erklärt, warum sich Risse in der Abbildung auch in Bereiche des Sandsteins fortpflanzen, deren Temperaturen ansonsten keinerlei Rissbildungen zeigten. Für alle Materialmodelle kommt es erst bei der thermischen Belastung von 80°C zu partiellen Mikrorissbildungen, aber keinen durchgehenden Rissstrukturen. Dies kann man sehr gut in Abb. 80 für das Materialmodell „unbehandelt - gefestigt“ erkennen, wo im linken Bereich die vereinzelt Risse zu erkennen sind, sich aber auf den Temperaturbereich von 80°C beschrän-

ken. Für den nächsthöheren Temperaturbereich von max. 100°C setzt sich das partielle Mikrorisswachstum fort und es kommt zu einem ersten durchgängigen Riss (Abb. 81), der sich auch auf den bis zu 80°C temperierten Bereich beschränkt (rot). Das Risswachstum mit durchgängigen Mikrorissen schreitet für Temperaturen von max. 200°C weiter voran (Abb. 82). So kann man in Abb. 82 in der oberen Darstellung erkennen, wie der Riss sich in den Bereich von 20 °C fortsetzt. Dies kann durch die verstärkte Mikrorissbildung und somit die schon erwähnte Beschleunigung von Risswachstum verursacht werden.

In der Simulation wurden auch Temperaturen von 800°C angesetzt, die bei einem Brand erwartet werden können (Abb. 83). Der „Quarzsprung“ floss in

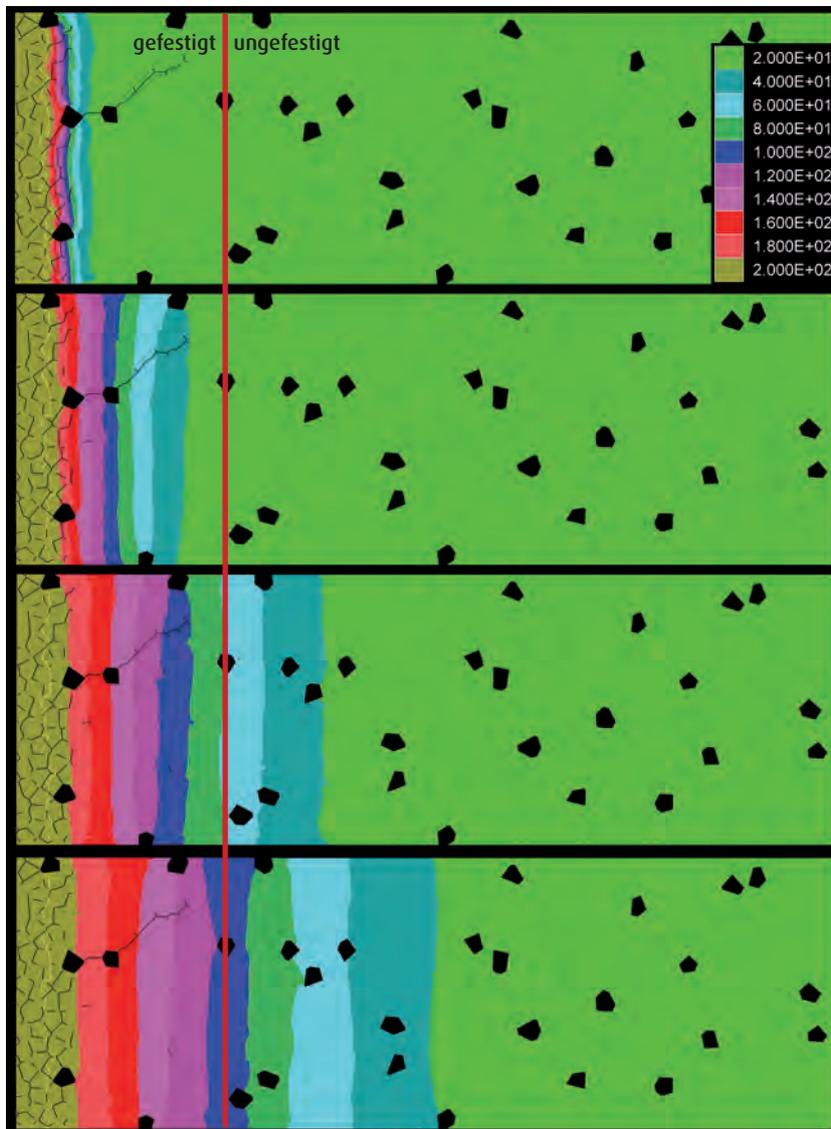


Abb. 82 Simulation der Rissentwicklung bei thermischer Belastung von 200°C. Sekundenschritte von oben nach unten: 5 - 50 - 200 - 400. Vernetzte Mikrorisse und fortschreitendes Risswachstum (Modellgröße: 12 x 4 cm).

die Simulation nicht ein. Zwar sind sie bei normalen Hausbränden geringer, können aber bei ausreichender Zufuhr von Sauerstoff auch Temperaturen von über 1.000°C erreichen. Hier sieht man schon nach Sekunden eine vernetzte Struktur von Rissen und es ist ein massives durchgängiges Risswachstum zu verzeichnen.

In sämtlichen Temperaturbereichen konnte bei der Höhe der Hauptspannungen oder Verschiebungen kein Unterschied bzw. abrupter Wechsel zwischen dem unbehandelten und gefestigten Bereich festgestellt werden.

6.3.3 Zusammenfassung

Aufgrund der dargestellten Berechnungen kann eingeschätzt werden, dass es für Objekte aus Cottaer Sandstein erst bei Temperaturen von 80 °C zu partieller Mikrorissbildungen kommt. Das gilt für den unbehandelten wie für den gefestigten (VKV & KSE 300E) Cottaer Sandstein.

Ein thermisch induziertes Risswachstum bis hin zu durchgehenden Rissen ist erst bei maximalen Temperaturen von 100°C bzw. im Bereich zwischen 80°C und 100°C zu erwarten. Derartige Temperaturen sind an Steinoberfläche bei Freibewitterung normalerweise nicht realisiert.

Einen Überblick zu den Rissentwicklungen vermit-

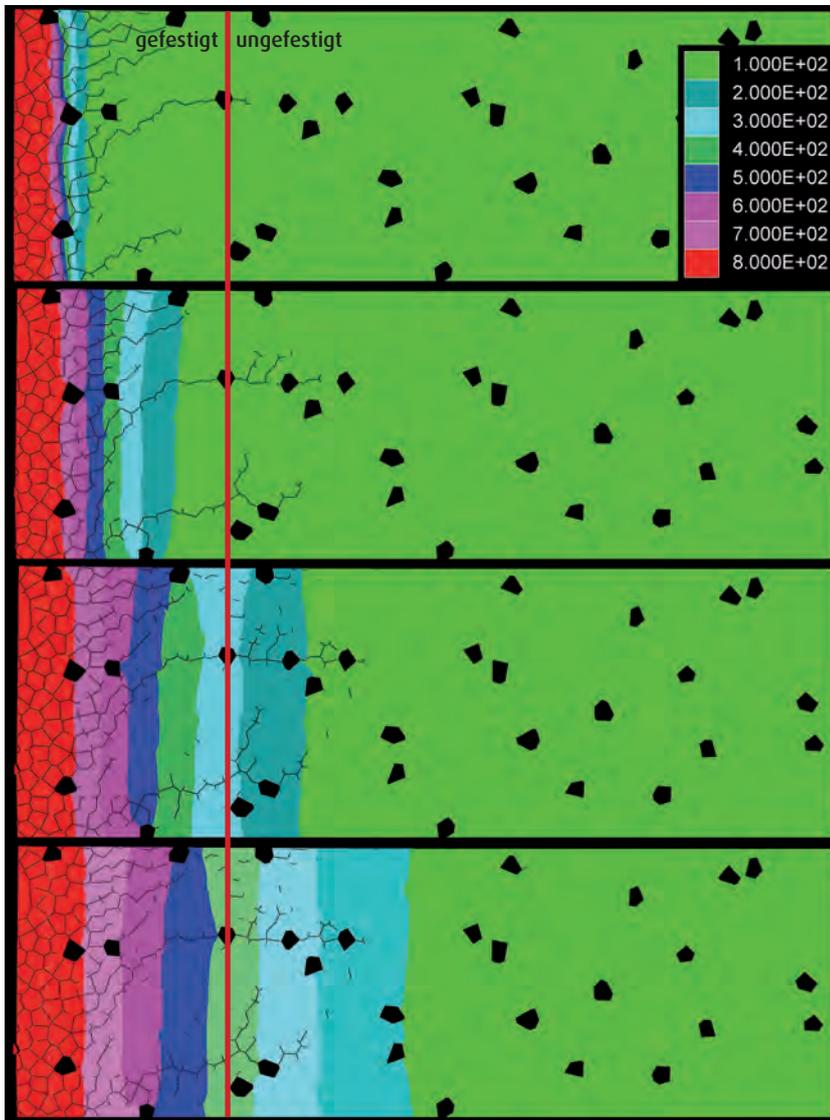


Abb. 83 Simulation der Rissentwicklung bei thermischer Belastung von 800 °C. Sekundenschritte von oben nach unten: 5 - 50 - 200 - 400. Massives Mikrorisswachstum schon nach ersten Rechnungsschritten (Modellgröße: 12 x 4 cm).

telt Tab. 13. Auch konnte in der Simulation kein Unterschied bezüglich der Höhe und Verteilung der aufgebauten Hauptspannungen und entstehenden Verschiebungen zwischen unbehandeltem und gefestigtem Cottaer Sandstein festgestellt werden.

Demnach lässt die Festigung mittels VKV keine thermisch induzierte Schalenbildungen oder Rissbildungen beim Cottaer Sandstein erwarten. Diese Ergebnisse decken sich mit denen zur Voruntersuchung der Probekörper.

Es hat sich im Zuge der Simulation gezeigt, dass die Modellgenerierung mit dem stochastischen Ansatz (vgl. Kap. 6.2.2 auf S. 66) die anwendungsfreundlichste von allen ist. Auf dem Gefüge basierende Materialmodelle erfordern im Nachhinein einen enor-

men Rechenaufwand, der im „denkmalpflegerischen Alltag“ nicht vertretbar wäre. Dennoch wird dieser Ansatz weiterverfolgt, da er ein hohes Potenzial bei der Analyse und Bewertung von Schädigungsprozessen besitzt. Auch sollen in Zukunft sich häufig Temperaturwechsel berücksichtigt werden.

Wie auch bei der Prozess-Simulation (Kap. 8 auf S. 99), handelt es sich hier um Forschung, die im Rahmen dieses Vorhabens nur ansatzweise geleistet werden konnte.

Tab. 13 Übersicht zur Simulation bezüglich Rissentwicklung und -wachstum entsprechend der Materialmodelle des Cottaer Sandsteins, Temperaturbelastung und Festigung (VKV, KSE 300).

maximale Temperaturbelastung	Modell unbehandelt	Modell gefestigt	Modell gefestigt - unbehandelt
40 °C	keine Risse	keine Risse	keine Risse
60 °C	keine Risse	keine Risse	keine Risse
80 °C	partielle Rissbildung	partielle Rissbildung	partielle Rissbildung
100 °C	-	-	fortschreitende partielle Rissbildung und Risswachstum
200 °C	-	-	deutliches Mikrorisswachstum und Bildung durchgängiger Risse
800 °C	-	-	massives Mikrorisswachstum und verstärkte Bildung durchgängiger Risse

7

Kapitel

Festigung des Grabmals mittels Vakuum-Kreislauf-Verfahren

7.1 Einführung - Allgemeines zum Vakuum-Kreislauf-Verfahren

Das patentierte „Vakuum Kreislauf Verfahren“ (VKV) ist entwickelt worden, um geschädigte Steinskulpturen, Fassaden und sonstige freistehende bzw. bewitterte Objekte am Standort oder im Atelier zu konservieren. Ein Vorteil des in-situ Verfahrens liegt vor allem in der Möglichkeit, Entsalzungen und Festigungen von Objekten oder Architekturelementen vorzunehmen, die als integraler Bestandteil eines Gebäudes nicht oder nur unter großen Schwierigkeiten entnommen werden können (Abb. 84). Auch besonders schwer geschädigte Objekte, denen das Risiko einer Demontage und Transportes nicht mehr zumutbar ist, können in-situ konserviert werden.

Die hinter dem VKV stehende Grundidee ist die Nutzung eines Unterdrucks, um den Steinfestiger schnell und tiefgreifend in die entfestigten Bereiche zu bringen. Hierzu wird das Objekt luftdicht in Folien eingeschweißt, um es gegen zutretende Außenluft abzudichten.

Die Gleichmäßigkeit des anschließend angelegten Unterdruckes verhindert Schädigungen des Objektes, sofern dieses nicht hohl ist. Bei einem erhöhten Feuchtegehalt im zu festigenden Stein wird vorher

über ein Absorptions-Lufttrockengerät (DR130) auf 20 % Feuchtigkeit abgetrocknete Luft ($130 \text{ m}^3/\text{h}$) zur Trocknung durch den Foliensack geblasen.

Zum Schutz filigraner Details und polychromierter Oberflächen werden diese vor der Festigung mit einem weichen, luft- und flüssigkeitsdurchlässigen Polypropylenvlies abgedeckt sowie Hohlstellen und Hinterschneidungen damit ausgestopft. Stark entfestigte und gefährdete Bereiche müssen vor dem Anlegen der Folie z.B. durch Hinterfüllungen oder Vorfestigungen stabilisiert werden.

Die Anschlüsse innerhalb der Folienhülle werden je nach Untergrund isoliert und mit Silikon sowie Klemmschienen aus Hartholz abgedichtet. Diese Abdichtungen werden nach der Festigung rückstandsfrei abgenommen.

Das Evakuieren der Luft aus dem Foliensack erfolgt bei einem Unterdruck zwischen 100 bis 900 mbar. Die langsame Steigerung des Unterdrucks gewährleistet ein gleichmäßiges Anpressen der überschüssig bemessenen Folienumhüllung an das Objekt mit einem Druck von bis zu $0,9 \text{ kg}/\text{cm}^2$. Es besteht die Vorstellung, dass im Laufe der Erhöhung des Unterdrucks zunächst Poren und Hohlräume im Stein „entlüftet“ werden, was bei einer Skulptur ein bis zwei Stunden in Anspruch nehmen kann.

Zeigt das angeschlossene Manometer den aktuellen

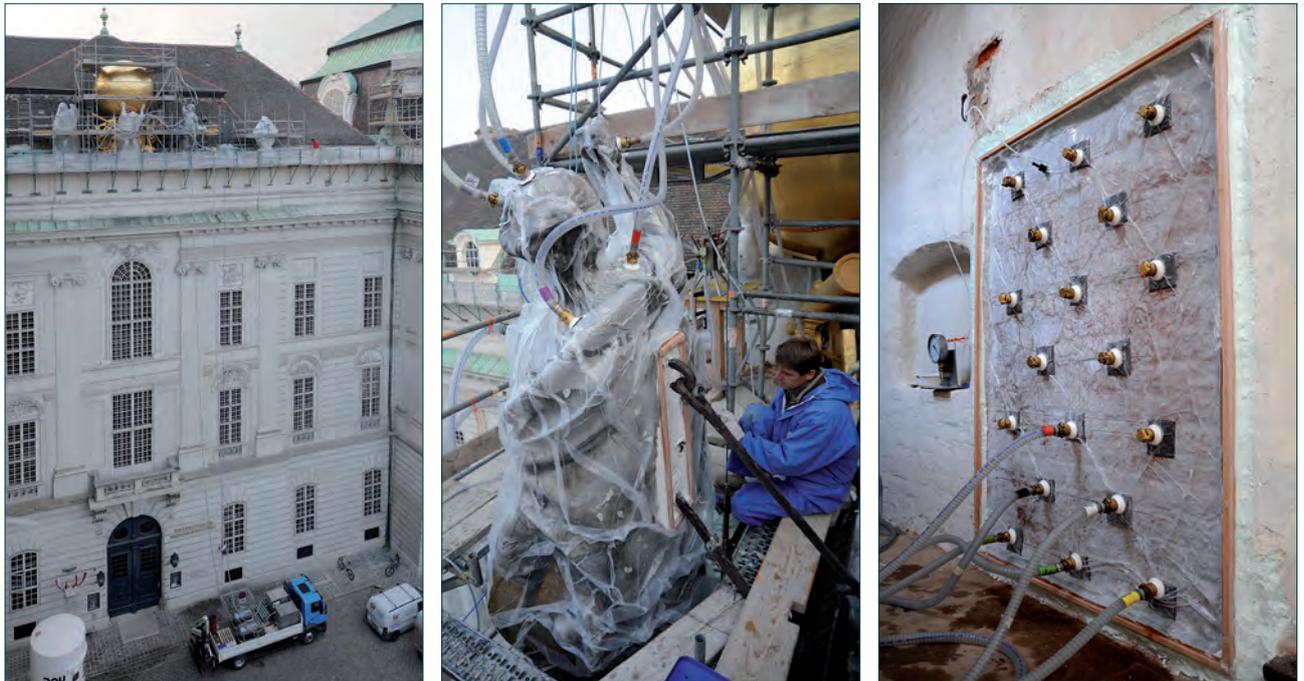


Abb. 84 In-situ Festigung einer 3 m großen Attika-Figur auf der Nationalbibliothek/Hofburg Wien, die zur Konservierung nicht entfernt werden konnte. Zwei Geräte, jeweils auf dem LKW und an der Skulptur wurden gekoppelt und es wurde eine Höhe von 30 m überwunden (erstes und zweites Foto). Entzaltung einer Ziegelmauer im Johanniskloster in Stralsund (rechtes Foto, Fotos: Erich Pummer).

Unterdruck über einen längeren Zeitraum in unveränderter Höhe an, wird davon ausgegangen, dass alle zugänglichen Hohlräume und Poren im entfestigten Bereich des Objekts bzw. Steins diesen Unterdruck aufweisen. Dieser Unterdruck wird dazu verwendet, das flüssige Medium - Wasser oder Festiger - in das Objekt einzuleiten, indem die Ventile für das Medium geöffnet werden und dieses sofort in die zugänglichen Hohlräume migriert. Dabei zeigten Untersuchungen, dass große Poren, Risse und morbide Zonen schnell und vorrangig gefüllt werden, während dichtes Material, wie z.B. unverwitterter Marmor oder Kalkstein weniger oder gar kein Festigungsmittel aufnehmen (Pummer, 2000). Die mögliche Hinterwanderung von durch frühere Überfestigungen, Farbfassungen, Schlämmen oder Krusten verdichteten Außenzonen mit Steinfestiger bedeutet die Überwindung eines der größten, bestehenden Konservierungsprobleme. Der vom Stein nicht aufgenommene Festiger wird in die Anlage zurückgesaugt und gelangt erneut in den Festigungskreislauf. Der Unterdruck wird die ganze Festigung hindurch über die Vakuumpumpen bzw. über den Pufferkessel aufrechterhalten, bis davon ausgegangen wird, dass der gesamte zugängliche Porenraum im entfestigten Bereich vom Festiger erreicht ist. Das Prinzip des Verfahrens ist in Abb. 85 darge-

stellt.

Die Zeit für die Tränkung kann zwischen drei und sechs Stunden schwanken und ist abhängig von den Gesteinseigenschaften und hier vor allem von der Permeabilität. Dabei ist die relative Sättigung des Steins daran zu erkennen, dass sich die im Kreislauf befindliche Menge des Festigers bzw. Mediums kaum verringert. Das eng an der Steinoberfläche angespresste Polypropylenvlies erfüllt nach Abschluss der Anwendung noch eine weitere Funktion. An den unteren Ventilen der Folienanschlüsse wird die überschüssige Flüssigkeit abgesaugt, womit das Polypropylenvlies zum „Löschblatt“ wird, und eine Übersättigung der Oberflächen mit Steinfestiger vermieden wird. Da es sich bis zu diesem Zeitpunkt um einen geschlossenen Kreislauf handelt, treten keine gesundheitsschädlichen Dämpfe oder Flüssigkeiten aus. Um eine allmähliche und vor der Witterung geschützte Gelabscheidung des Kieselsäureesters (KSE) zu ermöglichen, bleibt bei frei bewitterten Objekten nach der Anwendung die Folie am Objekt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die endgültige Reaktion des Festigers je nach Temperatur innerhalb von zwei bis vier Wochen abläuft. Das Eindringverhalten ist abhängig von Eigenschaften des ausgewählten Festigers, wie Molekülgröße,

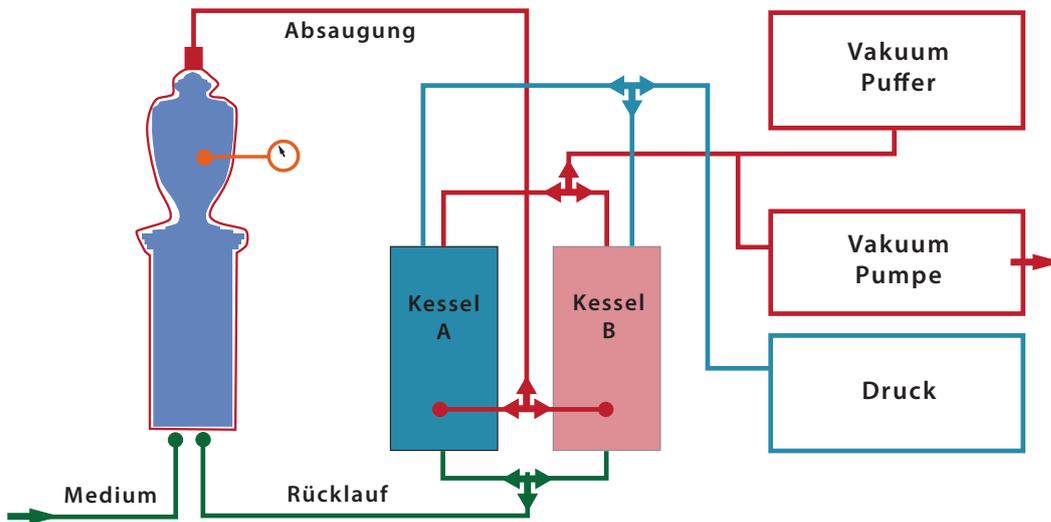


Abb. 85 Prinzip des VKF-Verfahrens.

Verdünnungsgrad etc. und dem Hohlraumgefüge des zu konservierenden Steins. Es wird erwartet, dass bevorzugt die verwitterten Bereiche mit guten „Wegsamkeiten“ für den Festiger durchdrungen und der Festigkeit des ungeschädigten Materials angeglichen werden. Durch die Anlage des Unterdrucks wird weiterhin eine bessere Eindringtiefe als bei konventionellen Oberflächenfestigungen erwartet, was die Gefahr unerwünschter Überfestigungen der Oberfläche deutlich verringern soll.

Gegen die Auffassung, dass durch das Anlegen von Unterdruck eine Verbesserung der Eindringtiefe erreicht wird, führen Kritiker (Snethlage & Pfanner 2013, S. 215) ins Feld, dass der „...durch Vakuum im bestmöglichen Fall zu erzielende Unterdruck 1bar (beträgt). Dieser Unterdruck entspricht etwa der Saugspannung eines Porendurchmessers von 10^{-5} m (10 μ m). Bei dem Verfahren wird nach Angaben der Erfinder aber nur ein technisches Vakuum in der Größenordnung von 0,1 bar erricht, was in etwa der Saugspannung



Abb. 86 Festigung des Grabmals auf dem Inneren Neustädter Friedhof in Dresden im Oktober 2013.

eines Porendurchmessers von 10^{-4} m (100 μm) entspricht. Damit wird bei diesem Verfahren mit Hilfe des Vakuums nur eine Verbesserung der Aufnahmemenge und Eindringtiefe im Bereich der absoluten Grobporen von 100 μm aufwärts erreicht, die nur für ganz wenige Gesteine relevant sind. Die Saugspannung der übrigen Poren mit einem kleineren Durchmesser als 100 μm wird nicht erhöht; die Gesteine saugen genauso schnell wie bei einer normalen Flutung ohne Unterdruck. Das Verfahren bietet demnach nur bei extrem grobporigen Gesteinen Vorteile, bei denen die Saugfähigkeit jedoch bereits so gut ist, dass keine weiteren Hilfen notwendig sind.“

Um das Problem überlanger Reaktionszeiten sowie das Auslaufen und Absacken der Kieselsäureester aus dem gefestigten Objekt zu vermeiden, wurden für die Unterdruckmethode modifizierte KSE entwickelt, die ausschließlich für das VKV zur Verfügung stehen. Sie bestehen aus zwei Komponenten, die kurz vor der Anwendung gemischt werden.

Die Reaktionszeit kann dadurch gesteuert und die Gelabscheidungsrate (bis zu 45 %) kann auf die Porosität und Aufnahmefähigkeit des zu festigenden Steines abgestimmt werden.

In einer Variation des VKV sind bei der Anwendung zur Festigung dichter Gesteine (Marmor, Knollenkalk) an ausgewählten Objekten statt KSE auch Acrylate (Paraloid B72 10 % in Xylol) verwendet worden (Pummer 2000). In den bei Pummer 2000 beschriebenen Beispielen sind jedoch die Festigungserfolge dabei kaum messbar.

7.2 Festigung des Grabmals Richter

Die vorbereitenden restauratorischen Maßnahmen sind bereits in Kap. 4 auf Seite 31 beschrieben worden. Um die Restfeuchte des Objekts nach der Entsalzung mit dem VKV und anschließender Kompressenaufgabe vor der Festigung des Objekts weiter abzusenken, wurde eine aktive Trocknung mit dem Absorptions-Lufttrockengerät (DR130) über ca. 3 Wochen durchgeführt (Abb. 20, S. 32). Im Anschluss ist der Feuchtegehalt im am stärksten durchfeuchteten unteren Bereich des Objekts nochmals durch Feuchtemessungen bestimmt worden (Abb. 87). Die Ergebnisse zeigen, dass durch diese Vorbereitung der Feuchtegehalt im Stein nochmals deutlich abgesenkt werden konnte.

Vor der Festigung wurden an verschiedenen repräsentativen Stellen des Objekts insgesamt 5 Bohrkern mit dem Außendurchmesser 50 mm entnommen. Die

Oberfläche der entstandenen Bohrlöcher wie auch die der kleineren Bohrkanäle für die Entnahme von Proben zur Analyse des Salzgehaltes wurde von Restaurator M. Eilenberger mit einem Epoxidharz-Aufstrich versiegelt, um ein Eindringen des Festigers während der VKV zu unterbinden.

Die Festigung wurde am 10.10.2013 vorgenommen und die Tränkung dauerte sechs Stunden. Da das Verfahren am Cottaer Sandstein bzw. in Sachsen noch nicht angewandt wurde, ergab sich gleichzeitig die Möglichkeit, es einer Fachöffentlichkeit vorzustellen und vor Ort zu diskutieren.

Von diesem Angebot machten geladene Vertreter der Denkmalbehörden, des Staatlichen Immobilien- und Baumanagements (SIB), sächsischer Hochschulen sowie freie Restauratoren regen Gebrauch. Auch die lokale Tagespresse berichtete (Dresdner Neueste Nachrichten, Sächsische Zeitung u.a.).

Nach der Tränkung ist das Objekt (in Abweichung zum unter 7.1 auf Seite 80 geschilderten Standardverfahren) von der Foliehülle befreit worden, weil die bestehende Einhausung einen ausreichenden Schutz gegen etwaige Witterungseinflüsse bot.

Am 20. 05. 2014, also reichlich 7 Monate nach der Festigung, sind am Objekt neben den bereits entnommenen Bohrkernen erneut Bohrkern zur Nachkontrolle gezogen worden. Dabei wurde zusätzlich eine schwarz „patinierte“ Oberfläche beprobt (Bohrkern 3 in Abb. 11 auf Seite 24), um den Effekt der Hinterwanderung verdichteter Oberflächen zu kontrollieren. Am 10. 06. 2014 wurden Bohrwiderstandsmessungen zur Nachkontrolle durch Prof. Dr.-Ing. S. Pfefferkorn, HTW Dresden, ausgeführt (vgl. 3.5.2 auf Seite 19).

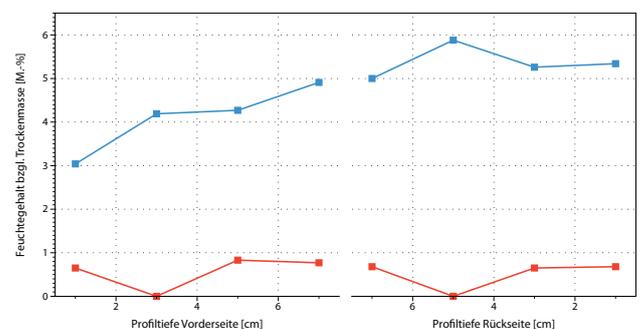


Abb. 87 Feuchtegehalt im Sandstein des Grabmals (Höhe 50 cm über Grund) nach der VKV-Entsalzung mit anschließender Kompressenaufgabe (= vor Trocknung, blau) und nach der aktiven Trocknung (rot).

7.3 Untersuchungen zur Wirksamkeit der Festigung mit dem VKV

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nachuntersuchungen am Objekt und an den entnommenen Bohrkernen dargestellt. Die Untersuchungsmethoden sind bereits in den Abschnitten 3.5 auf Seite 19 bzw. 5.2 auf Seite 46 beschrieben worden.

7.3.1 Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ

Die Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen sind in den Abb. 88 bis Abb. 93 dargestellt. Die für die Profile im gefestigten Sandstein ermittelten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen liegen teilweise über der geforderten maximalen Erhöhung um 20 % (Sneathlage & Wendler 1995, Sneathlage & Pfanner 2013). Dennoch erscheinen sie nicht extrem erhöht und liegen sämtlich im normalen Schwankungsbereich des Cottaer Sandsteins. Weil das Material bereits innerhalb der ungefestigten Bereiche eines Profils Schwankungen bis ca. 25 % aufweist, soll die stellenweise Erhöhung um mehr als 20 % im Vergleich zweier Bohrkern, die in einigen cm Abstand voneinander entnommen wurden, nicht überbewertet werden. Auch zeigt sich keine systematische Werteerhöhung im von der Festigung mit Sicherheit erreichten oberflächennahen Bereich, so dass keine Gefahr hinsichtlich einer Hemmung des Feuchteausbaus konstatiert werden kann.

7.3.2 Gesamtwasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Messungen zur Gesamtwasseraufnahme der Bohrkernscheiben unter Atmosphärendruck wurden an den Profilen (Bohrkernen) 1 und 5 vor und nach der Festigung und an den Profilen 2, 4 und 6 nach der Festigung durchgeführt (Abb. 94). Die Gesamtwasseraufnahme der Bohrkernabschnitte liegt im für den Cottaer Sandstein zu erwartenden Schwankungsbereich zwischen etwa 7 und 12 M.-% und zeigt einen ausgeglichenen Profilverlauf von der vom Festiger erreichten Außenzone hin zur Tiefe. Eine systematische Veränderung durch die Festigung ist nicht erkennbar.

7.3.3 Hydrische Dehnung

Die Ergebnisse der Messung der hydrischen Dehnung nach 4 Tagen Wasserlagerung der Prüfkörper ist in Abb. 95 dargestellt. Wie schon an den Prüfkörpern der Vorprüfung beobachtet (vgl. Abschnitt 5.3.3 auf Seite 51 ff.), zeigt der Cottaer Sandstein, abhängig von

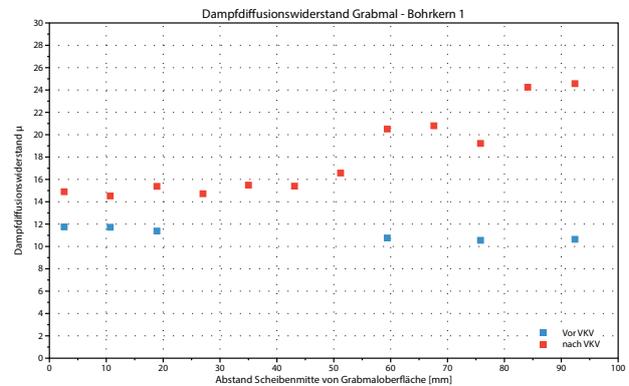


Abb. 88 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 1.

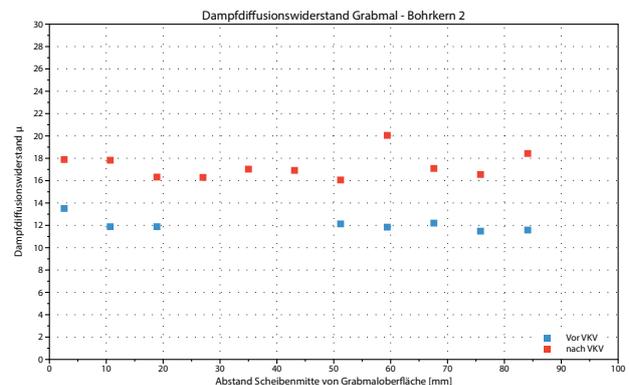


Abb. 89 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 2.

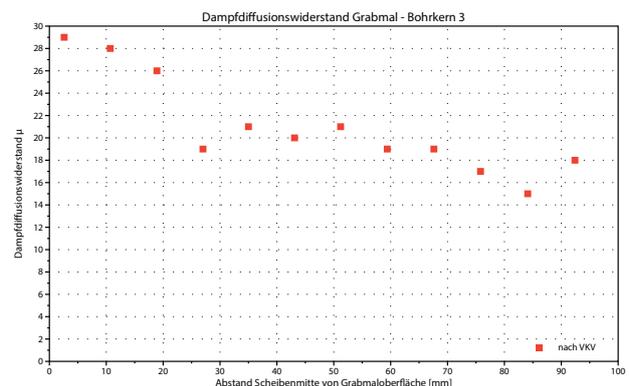


Abb. 90 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 3.

Gehalt und Verteilung der Tonmineralanreicherungen, starke Schwankungen in der hydrischen Dehnung einzelner untersuchter Bohrkernabschnitte. Eine systematische Erhöhung der Werte ist jedoch, wie schon in der Vorprüfung, in den durchtränkten Bereichen nicht

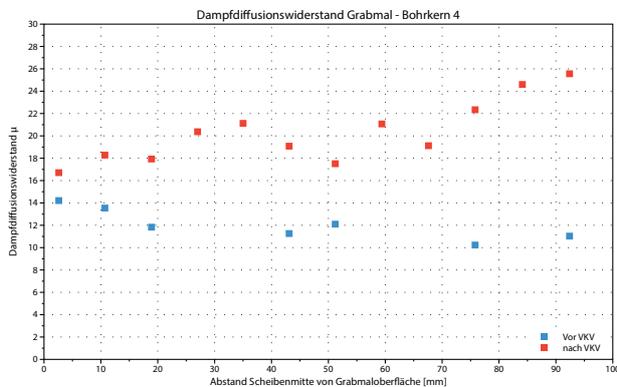


Abb. 91 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 4.

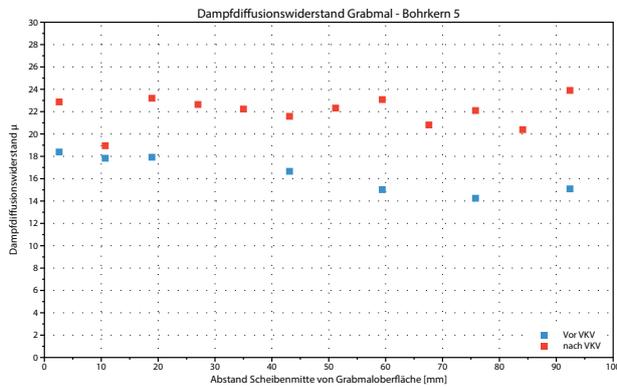


Abb. 92 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 5.

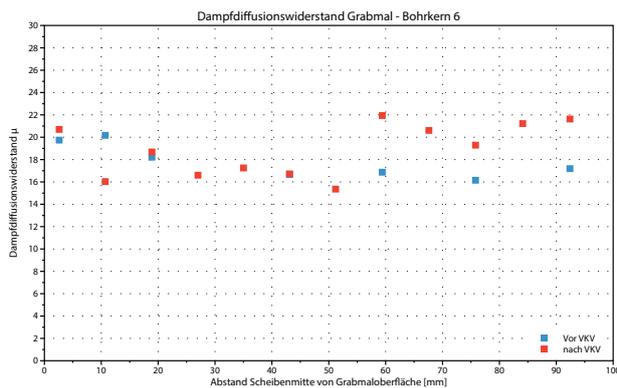


Abb. 93 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 6.

zu beobachten, so dass in dieser Hinsicht keine Gefährdung des Sandsteinmaterials durch die Tränkung erwartet wird.

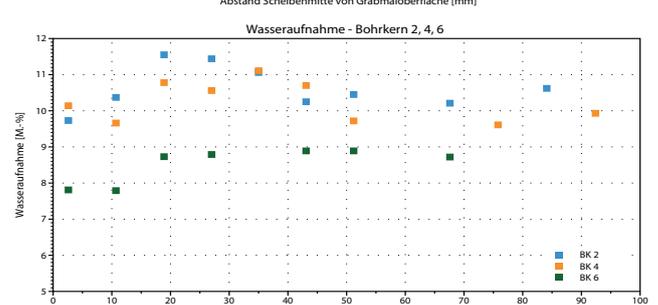
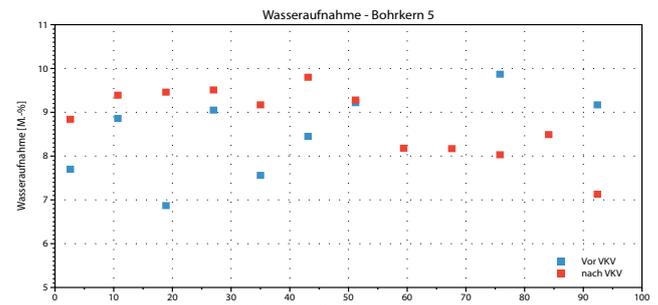
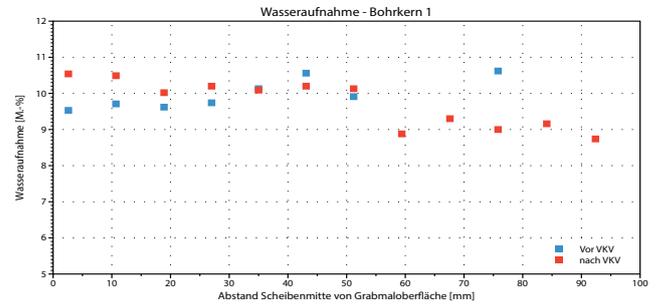


Abb. 94 Messung der Gesamtwasseraufnahme am ungefestigten und gefestigten Sandstein an den Probenahmepunkten 1 und 5 sowie am gefestigten Sandstein (Probenahmepunkte 2, 4, 6)

7.3.4 Messungen der Wasseraufnahme mit Karsten-Prüfröhrchen

Messungen der Wasseraufnahme mit dem Karsten-Prüfröhrchen wurden an verschiedenen Stellen des Objekts vor und nach der Tränkung mit dem VKV durchgeführt (im Oktober 2013 und im Februar 2015; Messpunkte s. Abb. 11 auf Seite 24). Die Messwerte wurden mit dem Programm CALKAROW (E. Wendler & S. Pfefferkorn) zur Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten (w -Wert) nach der Methode von Wendler & Sneathlage 1989 bearbeitet. Die Ergebnisse sind in Abb. 97 dargestellt. Am Messpunkt 4 gelang wegen schlechter Haftung des Röhrchens keine Nachmessung. Bei Messpunkt 6 (nach VKV) wurde nach einer Stunde Messzeit nur eine eingedrungene Wassermenge von ca. 0,12 ml ermittelt, deshalb wurde ein w -Wert von (maximal) $0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ dargestellt.

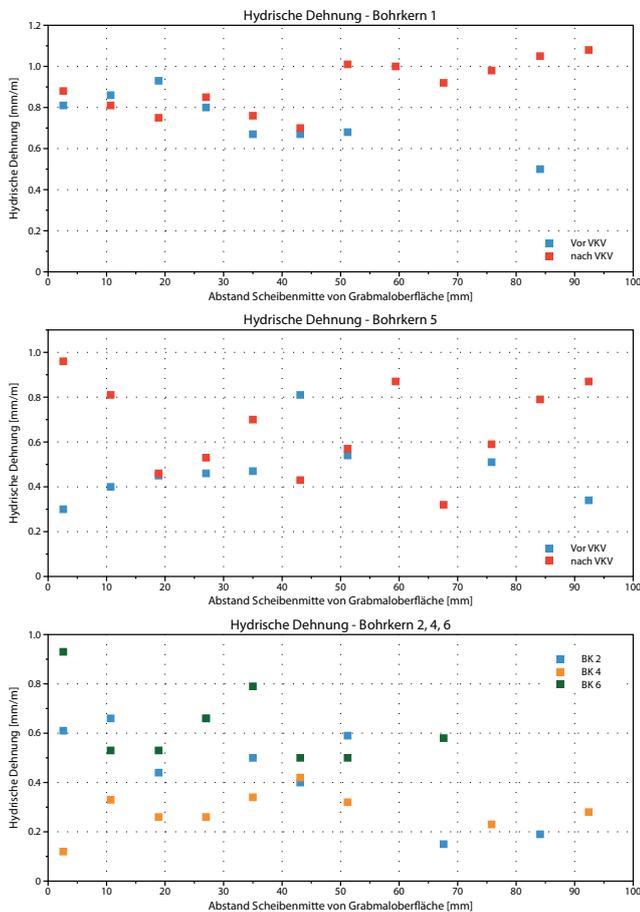


Abb. 95 Messung der Hydrischen Dehnung am ungefestigten und gefestigten Sandstein am Probenahmepunkt 1, 5, 2, 4 und 6.

Die Messwerte vor der Tränkung zeigen für Cottaer Sandstein, je nach Verwitterungsgrad, übliche w -Werte zwischen 2 und 4,5 kg/m²h^{0,5}. Die Messstelle 1 ist ein flächig schwarz patinierter Bereich, der nahezu wasserabweisend reagiert. Auch die nicht patinierte Messstelle 6 zeigt eine sehr geringe Wasseraufnahme, die eventuell auf eine Innenkruste zurückzuführen ist, die durch die Entsalzung nicht gelöst werden konnte. Die w -Werte repräsentieren damit gut das gesamte mögliche Spektrum der Oberflächeneigenschaften hinsichtlich einer Flüssigkeitsaufnahme und zeigen, dass sich die Objekt Oberfläche in dieser Beziehung sehr heterogen verhält.

Die Messungen der Wasseraufnahme ca. 16 Monate nach der Tränkung des Objekts mit dem VKV zeigen generell niedrigere w -Werte als vor der Behandlung. An den meisten Messstellen ist eine sehr starke Reduzierung der Wasseraufnahme im Vergleich zum Vorzustand sichtbar. Durch Aufsetzen von Wassertropfen mit der Spritzflasche auf verschiedene Oberflächenberei-

che wurde deutlich, dass eine starke Resthydrophobie der gesamten behandelten Oberfläche vorlag (Abb. 96). Dieser Effekt, der in ähnlicher Weise an Oberflächen der Würfel-Probekörper beobachtet worden war (vgl. Abschnitt 5.3 auf Seite 48 ff.) kann nur durch eine nicht vollständige Reaktion des KSE-Festigers erklärt werden.

7.3.5 Messungen des Bohrwiderstands am Objekt

Bohrwiderstandsprofile bieten eine gute Möglichkeit, Festigkeitsveränderungen von Naturstein im Tiefenprofil nahe der Oberfläche hoch auflösend darzustellen. Die Vorzustände der Oberflächen des ungefestigten Grabmals waren vor der Maßnahme dokumentiert worden (Abb. 13 auf Seite 25). In Abb. 98 sind sie im Vergleich mit den ca. 8 Monate nach der Festigung gemessenen Profilen nochmals dargestellt worden. Wie bereits bei den Vormessungen sind wiederum Mittelwerte aus mindestens 3 Einzelmessungen dargestellt.

Die nach der Festigung ermittelten Profile zeigen im auswertbaren Bereich (bis 20-25 mm Tiefe, vgl. Abschnitt 3.5.2 auf Seite 19 ff.) sämtlich eine Erhöhung des Bohrwiderstandes und zugleich einen Ausgleich besonders niedriger Bohrwiderstände im Vorzustand, so dass nach diesen Ergebnissen der Festigungseffekt im oberflächennahen Bereich positiv beurteilt werden kann. Durch die Tränkung mit Rem-



Abb. 96 Resthydrophobie auf der Oberfläche des Grabmals: Wasser „perlt“ auf der Steinoberfläche ab (nach VKV).

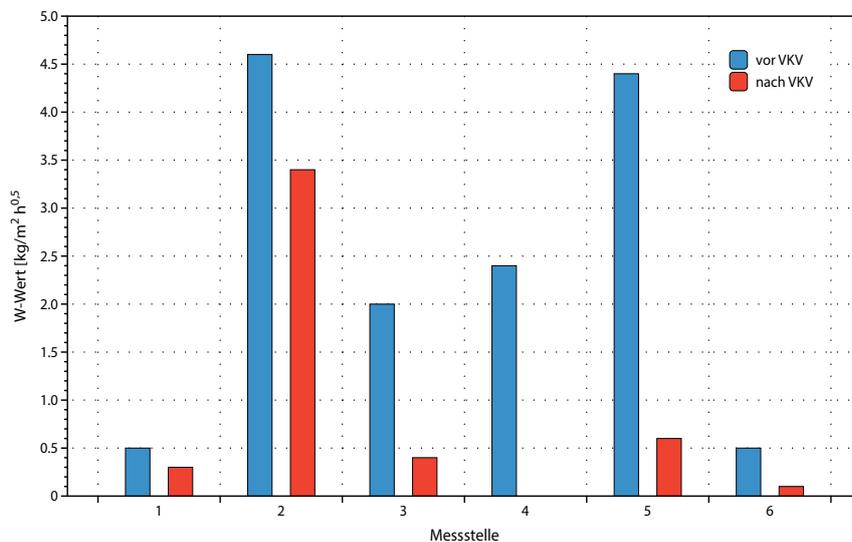


Abb. 97 Aus Messungen mit dem Karsten-Prüfröhrchen berechnete w-Werte an ungetränkten und mit KSE Remmers 300E und VKV getränkten Oberflächen des Grabmals Richter.

mers 300E werden in den obersten zwei Zentimetern unter der Sandsteinoberfläche relativ ausgeglichene Bohrwiderstandsprofile erreicht. Der Wert des Bohrwiderstands wird dabei etwa an das Niveau des unverwitterten Steins angeglichen. Überfestigungen an der Oberfläche wurden nicht nachgewiesen.

7.3.6 Messungen der Ultraschall-Geschwindigkeit an Bohrkernen

Vor der weiteren Aufteilung in senkrecht zur Bohrerachse geschnittene Abschnitte (Bohrkernscheiben) sind an den nach der Festigung gewonnenen Bohrkernprofile der US-Geschwindigkeit gemessen worden (zur Methodik s. Abschnitt 3.5.1 auf Seite 19). Die Ergebnisse sind in Abb. 99 dargestellt.

Überraschend ist eine tendenzielle Verringerung der US-Geschwindigkeit in den nach der Festigung gezogenen Bohrkernen im Vergleich zu den unmittelbar in ihrer Nachbarschaft vor der Festigung ausgebohrten Kernen. Eine zusätzliche Vermessung der Bohrkernprofile mit einem anderen Ultraschall-Messgerät durch das Institut für Geotechnik der TU BAF bestätigte diesen Trend, so dass Messfehler ausgeschlossen werden können. Wie die Darstellung der Differenzen zwischen beiden Messungen zeigt, ist dieser Effekt besonders im oberflächennahen Bereich (je nach Bohrkern bis in 3-4, maximal - bei Bohrkern 5 - bis in 6 cm Tiefe) ausgeprägt.

Zu erwarten wäre bei einer strukturellen Festigung eine Erhöhung der US-Geschwindigkeit. Die US-Geschwindigkeit korreliert negativ mit der Porosität und positiv mit dem E-Modul von Gesteinen; Wassergehalt

te bzw. Flüssigkeiten im Porenraum führen zur Erhöhung (Snethlage 2011, Schön 1983).

Snethlage (2011) hält US-Messungen zur Beschreibung der Verwitterung von Sandsteinen für eher ungeeignet, weil die Geschwindigkeiten mit der Verwitterung nicht so deutlich variieren wie bei dichten Gesteinen wie Marmor, wo deutliche Differenzen auftreten (frischer Marmor 5-7 km/s, stark verwitterter Marmor 1 km/s). Dennoch bedarf der beobachtete Unterschied an den untersuchten Bohrkernen, der meist unter $\pm 0,3$ km/s liegt, aber für den äußeren Bohrkernbereich typisch zu sein scheint, einer Erklärung. Vermutet wird, dass der elastifizierte KSE im durchtränkten Bereich noch nicht vollständig ausgehärtet ist. Darauf weisen auch die stark reduzierte Wasseraufnahme und das hydrophobe Verhalten der Steinoberfläche hin (vgl. Abschnitt 7.3.4 auf Seite 85).

Aus den Messungen der hydrischen Kennwerte (Wasseraufnahme, Dampfdiffusionswiderstand) der Bohrkernscheiben nach der Tränkung können allerdings keine systematischen Veränderungen im Eindringbereich des Festigers abgeleitet werden (vgl. Abschnitte 7.3.1 und 7.3.2 auf Seite 84). Ein auf der Baustelle verbliebener, offener Kanister mit dem verarbeiteten KSE Remmers 300E mit Erhärtungsbeschleuniger zeigte zum Zeitpunkt der Probenahme einen überwiegend nicht mehr flüssigen Inhalt, der jedoch eine gallertartige Konsistenz aufwies.

Von einer solchen Substanz könnte ein sehr elastisches Verhalten auch im erreichten Porenraum erwartet werden, das möglicherweise die Veränderung der US-Geschwindigkeit erklärt.

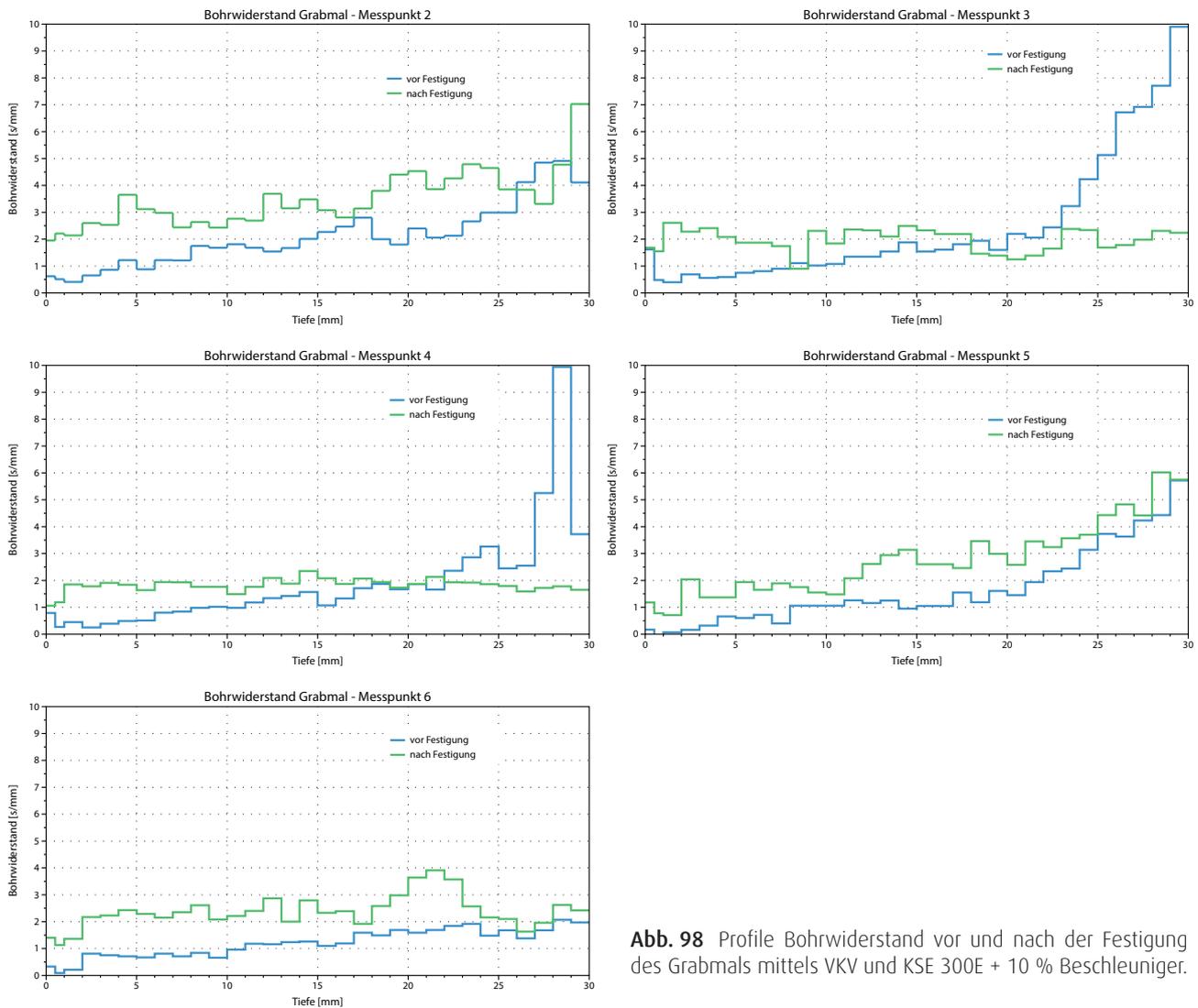


Abb. 98 Profile Bohrwiderstand vor und nach der Festigung des Grabmals mittels VKV und KSE 300E + 10 % Beschleuniger.

Aus Gesteinsuntersuchungen ist bekannt, dass elastische Bestandteile im Porengefüge, wie beispielsweise durch Wasserzutritt aufgequollene Tonminerale, den E-Modul und die Ultraschallgeschwindigkeit von Sandsteinen reduzieren (Schön 1983).

7.3.7 Ringbiegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul

Die Ergebnisse der Messungen von Ringbiegezugfestigkeiten und E-Moduli an den Bohrkernscheiben der Bohrkern, die nach der Festigung gezogen wurden, sind in Abb. 100 und Abb. 101 im Vergleich zu den Bohrkernen aus dem Objekt im ungefestigten Vorzustand dargestellt.

Im Gegensatz zu den bruchfrischen Prüfkörpern sind an den Objektproben systematische Festigkeits- und

E-Moduländerungen nach der Tränkung mit dem VKV nicht deutlich zu erkennen. Die Unterschiede in den Festigkeiten der Profile vor und nach der Tränkung liegen im Bereich der natürlichen Schwankungen der Materialeigenschaften und könnten deshalb auch lokalen Unterschieden geschuldet sein. Vergleicht man die Resultate für die Ringbiegezugfestigkeit an den äußersten Kernabschnitten (bis 2 cm Tiefe) mit den Ergebnissen der höher auflösenden Bohr widerstandsmessungen, sind zumindest keine Widersprüche zu erkennen: Auch wenn sich die Ringbiegezugfestigkeit nicht durchweg signifikant erhöht, erscheinen die an den äußersten drei Bohrkernscheiben gemessenen Festigkeitsprofile nach der Behandlung ausgeglichener als die der Vormessungen. Am Messpunkt 5 wurde allerdings nach der Behandlung eine geringere Festig-

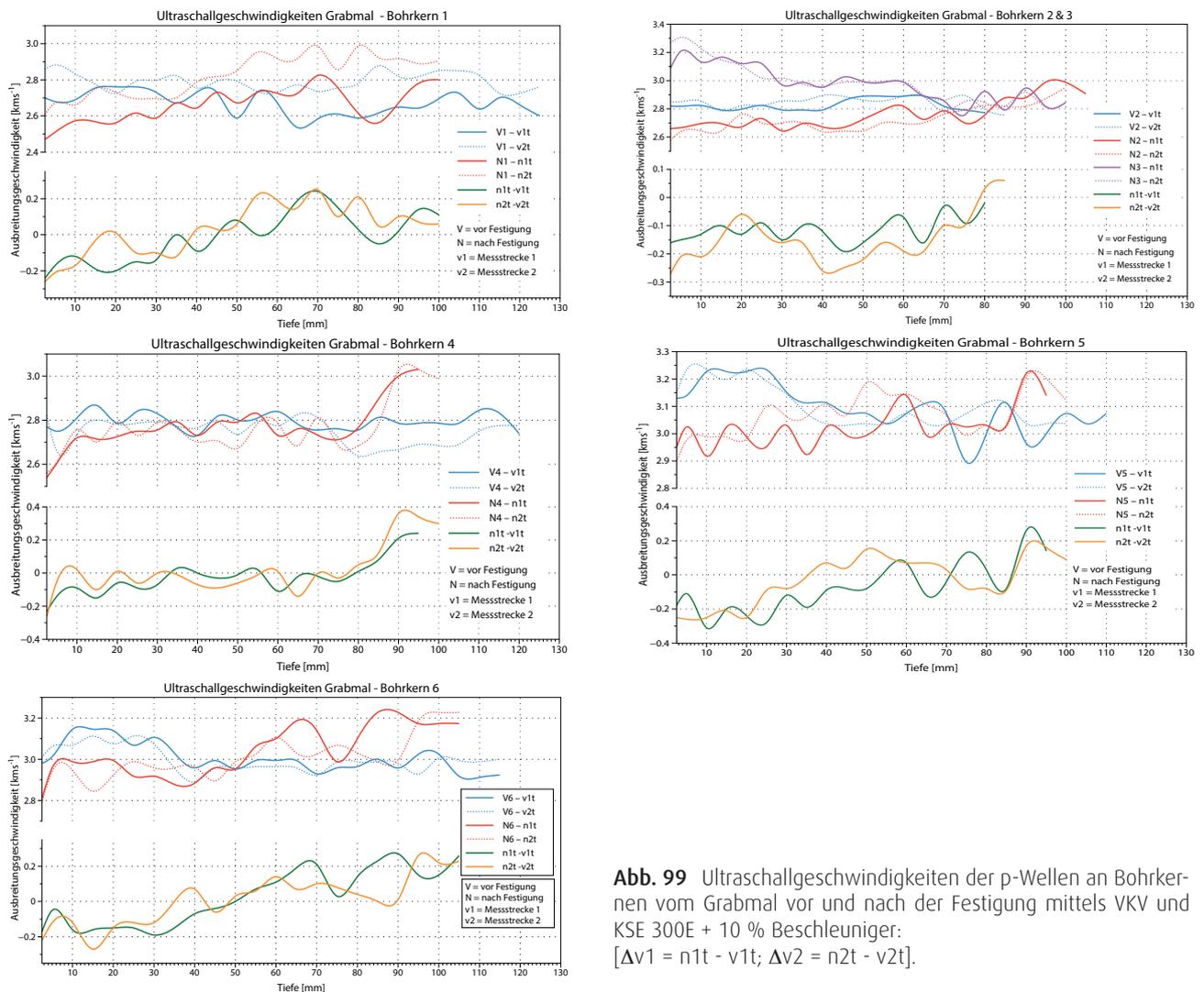


Abb. 99 Ultraschallgeschwindigkeiten der p-Wellen an Bohrkernen vom Grabmal vor und nach der Festigung mittels VKV und KSE 300E + 10 % Beschleuniger: $[\Delta v1 = n1t - v1t; \Delta v2 = n2t - v2t]$.

keit festgestellt als bei der Vorprüfung, im vorderen Abschnitt des Kerns ist dort auch der E-Modul deutlich erniedrigt.

7.4 Diskussion und Bewertung der Ergebnisse

Summarisch kann festgestellt werden, dass die äußersten ca. 2 cm, die nach den Vormessungen an einigen der untersuchten Profile strukturelle Entfestigungen zeigten, durch die Behandlung im VKV vom KSE Remmers 300E erreicht worden sind. Überfestigungen der oberflächennahen Zone konnten an den gemessenen Profilen nicht festgestellt werden.

Problematisch bleibt zu diesem Zeitpunkt dennoch die Gesamtbewertung der Maßnahme. Derzeit (1 Jahr

und 4 Monate nach der Behandlung) noch nachweisbare, stark hydrophobe Effekte an der Oberfläche des Grabmals und ein anomales Verhalten der an Bohrkernen 8 Monate nach der Tränkung gemessenen US-Geschwindigkeiten in einer oberflächennahen Zone bis 3-4 cm (maximal 6 cm) Tiefe deuten darauf hin, dass die Reaktion des Festigers offenbar noch nicht vollständig abgelaufen ist. Die bei der US-Messung festgestellten Effekte deuten auf Eindringtiefen im Bereich von einigen cm hin, was gut mit den Ergebnissen der Voruntersuchungen an den Probewürfeln übereinstimmt.

Berücksichtigt man die wahrscheinlich noch nicht vollständige Reaktion des Steinfestigers, ist auch die Interpretation der 8 Monate nach der Tränkung durchgeführten Bohrwiderstandmessungen mit einiger Vor-

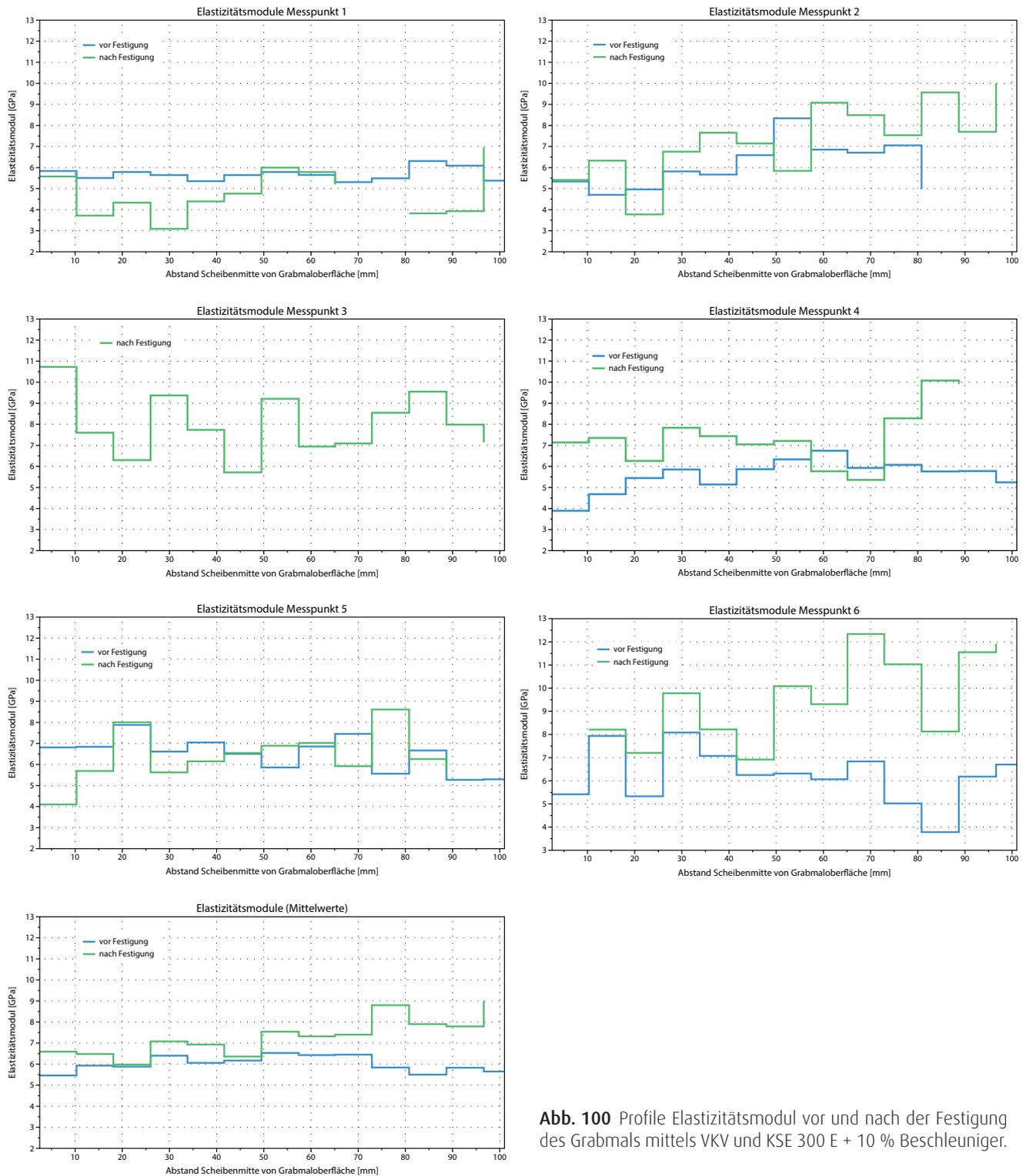


Abb. 100 Profile Elastizitätsmodul vor und nach der Festigung des Grabmals mittels VKV und KSE 300 E + 10 % Beschleuniger.

sicht vorzunehmen. Obwohl die gemessenen Profile erfreulich ausgeglichen wirken, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Erhöhung des Bohrwiderstands im oberflächennahen Bereich im Vergleich zum

unbehandelten Vorzustand durch Reste von Flüssigkeit oder durch noch nicht ausreagierten, „gallertartigen“ Festiger in dieser Zone und nicht durch eine tatsächliche Erhöhung der strukturellen Festigkeit bedingt ist.

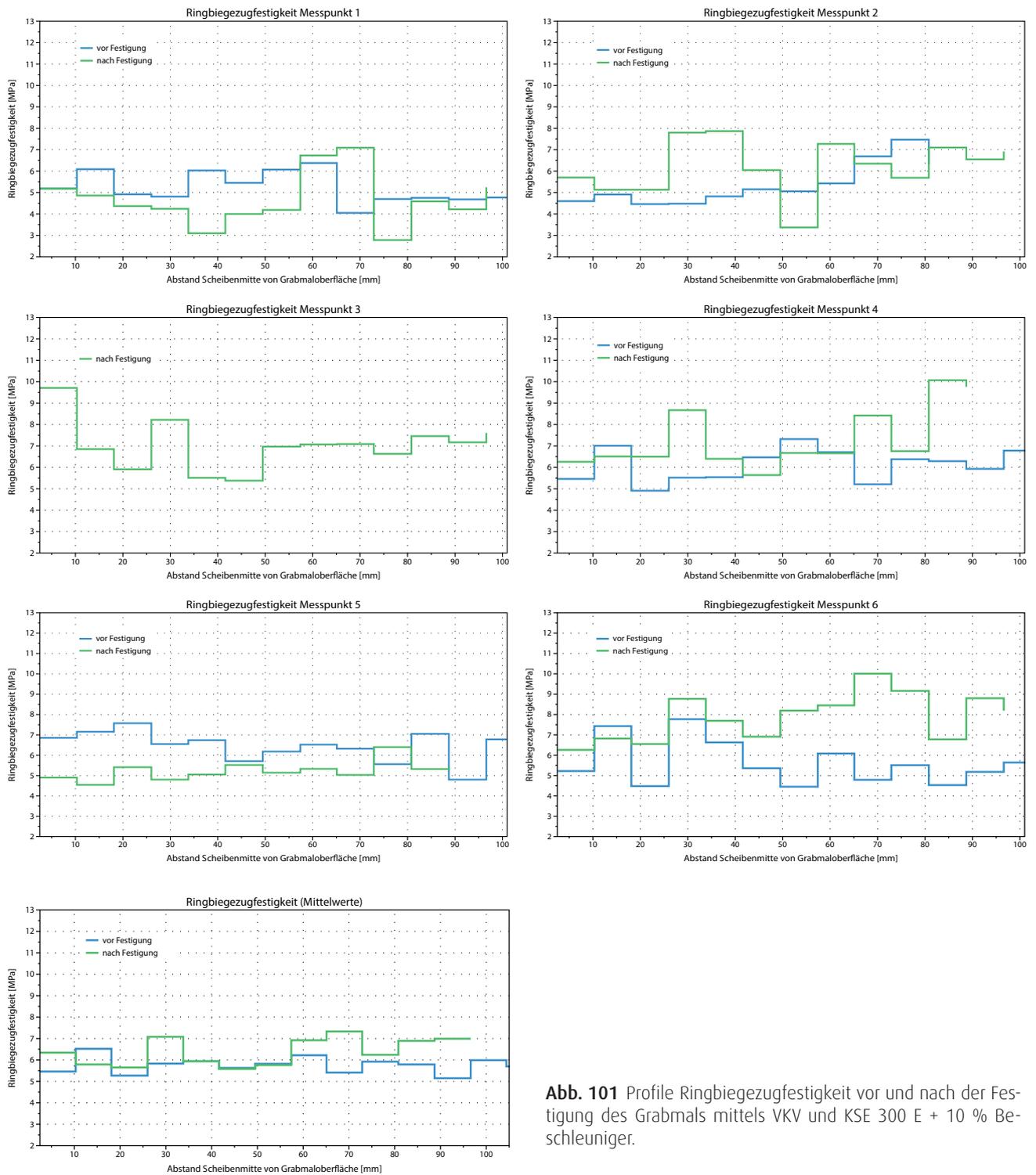


Abb. 101 Profile Ringbiegezugfestigkeit vor und nach der Festigung des Grabmals mittels VKV und KSE 300 E + 10 % Beschleuniger.

Die nur geringen messbaren Effekte der Behandlung auf die Ringbiegezugfestigkeit müssen ebenfalls vor diesem Hintergrund gesehen werden. Fraglich ist weiterhin, welches Potenzial für einen Zuwachs von Festigkeit und E-Modul bei einer weiteren Reaktion des

KSE, ggf. über längere Zeiträume, noch gegeben ist. Die Ergebnisse zeigen eine grundsätzliche Problematik der Tiefenimprägnierung von Sandsteinen mit „Sondermethoden“ wie dem VKV auf: Einerseits ermöglichen diese eine deutlich tiefere Penetration des

porösen Materials mit Steinfestiger als herkömmliche Oberflächentränkungen. Andererseits können die Erfahrungen mit Reaktionszeiten, die bei herkömmlichen Tränkungen gemacht worden sind, offensichtlich nicht ohne weiteres auf solche Tiefenimprägnierungen übertragen werden. Zudem ist die Reaktion eines Festigers mit „Erhärtungsbeschleuniger“, dessen chemisches Wirkprinzip nicht bekannt ist, ebenfalls nicht mit der herkömmlicher KSE-Systeme zu vergleichen.

Eine zusätzliche Ursache für die langsame Reaktion des Wirkstoffs mag die auch am Ende des Projekts noch andauernde Aufstellungssituation des Objekts in einer Einhausung in relativ trockenem Milieu ohne direkte Beregnung sein. Auch ist das Objekt, wie aus Abb. 87 auf Seite 83 deutlich wird, relativ „hart“ getrocknet worden, um ideale Bedingungen für maximale Eindringtiefen zu erreichen. Der relativ trockene

Porenraum des Sandsteins könnte eine weitere Ursache für die verzögerte Reaktion des Festigers sein. Damit wird deutlich, dass nicht allein die erreichte Eindringtiefe des Wirkstoffs, die im Falle des hier untersuchten Cottaer Sandsteins als gut bewertet werden kann, Kriterium für eine erfolgreiche Maßnahme sein kann.

Das gefestigte Objekt soll nach Ende des Projekts frei bewittert an einer Mauer an der Nordseite des 1. Landes auf dem inneren Neustädter Friedhof aufgestellt werden. Es wird für sinnvoll erachtet, weitere Messungen der Wasseraufnahme mit dem Karsten-Prüfröhrchen sowie ggf. eine spätere Nachuntersuchung des Bohrwiderstandes im Sinne eines Monitoring (Auras et al. 2011) vorzunehmen.

8 Kapitel

Simulation zum Vakuum-Kreislauf-Verfahren

8.1 Einleitung

Während des Vorhabens stellte sich die Frage nach der Höhe und Verteilung des Unterdrucks im Grabmal bei einem angelegten Maximaldruck von 900 mbar während der Festigung.

Die für den Entsalzungs- und Festigungsprozess grundsätzliche Frage umfasste folgende Aspekte:

- Welchen Einfluss haben die Porosität und die Feuchtigkeit im Objekt auf das Migrationsverhalten des Festigers?
 - Verändert sich die Viskosität des Festigers in Abhängigkeit der Zeit und Temperatur? Welchen Einfluss hätte eine Änderung auf das Migrationsverhalten des Festigers?
 - Gibt es Beziehungen zwischen dem Migrationsverhalten und der Objektgeometrie? Wie verhält sich der Festiger, wenn er von sehr feingliedrigen Architekturelementen zu einfachen oder größeren Elementen migriert?
 - Ist es möglich, dass der Festiger aufgrund einer veränderten Viskosität sowie komplexerer Formen der Architekturelemente bestimmte entfestigte Bereiche nicht oder nur teilweise erreicht?
- Wie sind die Strömungsmechanismen des Festigers im Mikro- und Makroporenraum, d.h., gelangt der Festiger überhaupt in den Mikroporenraum?

Zur Frage der Höhe und Verteilung eines Unterdruckes in einem (Sandstein-) Objekt scheint es bis dato keine Untersuchungen bzw. Messungen zu geben.

Es wurde entschieden, die Testsimulationen mit einer stark vereinfachten Geometrie des Grabmals durchzuführen. Mit diesen Simulationen wurde versucht, das generelle Strömungsverhalten abzubilden sowie das Potenzial dieser Simulation für die Konservierung abzuschätzen.

Die Prozess-Simulation wurde im Rahmen einer Studienarbeit unter fachlicher Leitung von Herrn Wichert und Dr. Herbst am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt.

Für die Simulation wurde FLAC3D von der Firma Itasca eingesetzt. Es handelt sich hier um die Anwendung der Finiten Differenzen Methode (FDM) für die Simulation im Kontinuum.

8.2 Generieren des geometrischen Modells

Die Erstellung des numerischen Modells erfordert zuerst die Generierung eines geometrischen Modells. Zum Generieren der sehr vereinfachten Geometrie des Grabmals wurde die Vorderseite mittels eines skalierten Fotos mit der Freeware „ImageJ“ bildanalytisch vermessen.

Anschließend wurden die Werte in einem CAD Programm importiert, die Fläche entsprechend der Tiefe des Grabmals extrudiert und die Konturen zu einem 3d-Objekt verknüpft.

Dem schloss sich das Erzeugen eines aus Tetraedern bestehenden Gitternetzes an, welches exportiert und in FLAC3D eingelesen wurde. Für die Darstellung der Simulationsergebnisse am Grabmal wurden zwei Schnitte verwendet (siehe Abb. 102).

Die vorbereitenden Simulationen wurden auch an einem Würfelmodell mit den Abmessungen 30 x 30 x 30 cm durchgeführt.

8.3 Grundlagen zur Berechnung

Die Berechnung des Fluidtransports basiert auf dem Darcy-Gesetz und die folgende Darlegung stammt von Busch et al. (1993). Hydraulische Prozesse werden von verschiedenen Kräften beeinflusst, d.h. vor allem von der Schwerkraft, Reibungskraft und Kapillarkraft. Die Reibungskraft wirkt als Flächenkraft an den Wandungen der Porenräume, aber aufgrund der Komplexität des Porenraumes ist es nur möglich, einen auf eine Volumeneinheit bezogenen statistischen Mittelwert zu berücksichtigen. Daher handelt es sich um eine hydraulisch fiktive Volumenkraft, die nicht direkt mess-

bar, sondern Ergebnis von Berechnungen ist.

Die Kapillarkraft wiederum wirkt als Linienkraft in den Bereichen, wo an den Wandungen des Porenraums zwei fluide Phasen mit unterschiedlichen Oberflächenspannungen aneinandergrenzen.

Wie die Reibungskraft, so ist auch die Kapillarkraft nur summarisch zu erfassen und bezieht sich auf die Querschnittsfläche. Aus diesem Grunde handelt es sich letztendlich um eine hydraulisch fiktive Flächenkraft. Die Kapillarkraft ist keine strömungstreibende Kraft. Erst in der Druckkraft zwischen benetztem und unbenetztem Fluid im porösen Medium kommt sie zur Geltung. Das hier angewandte Darcy-Gesetz beschreibt den Fluidfluss durch eine definierte Fläche innerhalb eines porösen Mediums, hier Sandstein. Es ist direkt proportional abhängig vom hydraulischen Gradienten, was im Fall des Grabmals dem angesetzten max. Unterdruck von 900 mbar entspricht.

Das Darcy-Gesetz ist nur für laminares Fließen gültig und für die Festigung wurde ein quasi-laminares Fließen angenommen. Da es an alternativen Stoffgesetzen und vor allem deren numerischen Umsetzung fehlt, ist es gängige Praxis, das Darcy-Gesetz anzuwenden und die entsprechenden Fehler zu formulieren.

Neben dem Medium spielt auch das strömende Fluid eine wichtige Rolle, da das Gesetz für newtonsche Fluide entwickelt wurde. Diese sind durch eine belastungsunabhängige Viskosität charakterisiert. Ein newtonsches Fluid ist z.B. Wasser.

Die Messungen zur Viskosität des Festigers Remmers KSE 300E + 10 % Beschleuniger wurden vom Institut für Keramik, Glas - und Baustofftechnik der TU Berg-

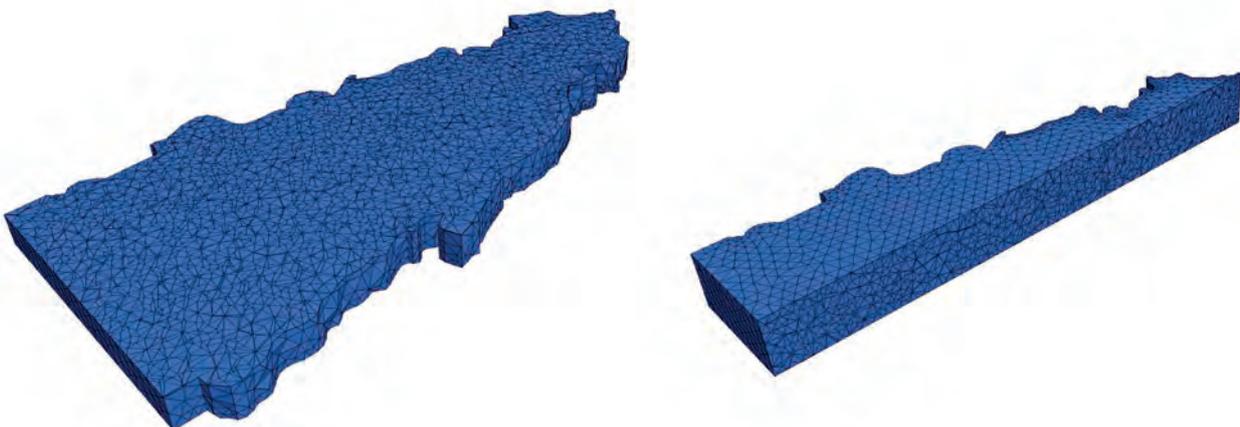


Abb. 102 Schnittdarstellung 1 parallel zur xz- Ebene (links) und Schnittdarstellung 2 parallel zur yz- Ebene (rechts).

akademie Freiberg vorgenommen. Der Wert liegt bei 2,5 mPas und ist somit dem von Wasser sehr nahe, so dass der Festiger als newtonsches Fluid betrachtet werden kann. Zum Vergleich: technische Suspensionen liegen zwischen 100-500 mPas.

Bei der Berechnung wird der Kapillareffekt vernachlässigt, was zu Ungenauigkeiten führt. Die verschiedenen Transportmechanismen in den unterschiedlichen Porenklassen wurden nicht abgedeckt, da dies in dieser Arbeit nicht geleistet werden konnte. Inwieweit sich diese Prozesse in einem Unterdruck ändern oder gar irrelevant werden, konnte in dem Vorhaben nicht geklärt werden. Thermische Effekte sind bei der Rechnung vernachlässigt worden.

8.3.1 Vorabrechnungen zu den Anfangs- und Randbedingungen

Die Vorabrechnungen dienten dazu, aus verschiedenen Anfangs- und Randbedingungen diejenigen festzustellen, die die Realität am besten abbilden, um dann die eigentliche Simulation durchzuführen.

Der Anfangszustand bezeichnet den Zustand vor der Festigung. Trotz intensiver Trocknung befindet sich im Grabmal immer ein gewisser Grad an Restfeuchte, die während der Gelabscheidung als Katalysator fungiert (Pummer, 2007) und numerisch berücksichtigt wird.

In FLAC3D kann eine beliebige konstante Restwassersättigung vorgegeben werden, wobei in der Berechnung zwischen den Fluiden Wasser und Festiger nicht unterschieden werden kann.

Da die Viskosität des Festigers ähnlich der von Wasser ist, kann man davon ausgehen, dass diese Vereinfachung zu keiner Verfälschung der Rechnung führt.

Sobald die umgebende Folie an das Grabmal „heranmodelliert“ ist, stellt sich im Laufe der weiteren Evakuierung ein Unterdruck ein.

Die Verteilung des Anfangsdrucks hat einen Einfluss auf die Rechnung. Da die Höhe und Verteilung des Unterdrucks im Grabmal nicht bekannt sind, wurden die Vorabsimulationen mit verschiedenen Unterdruckbedingungen durchgeführt, wobei folgende unterschiedliche Annahme berücksichtigt wurden:

- der Unterdruck bildet sich im gesamten Objekt;
- der aufbauende Unterdruck ist zufällig verteilt;
- der Unterdruck bildet sich in diskrete Bereichen aus;
- der Unterdruck bildet sich in der Außenzone aus.

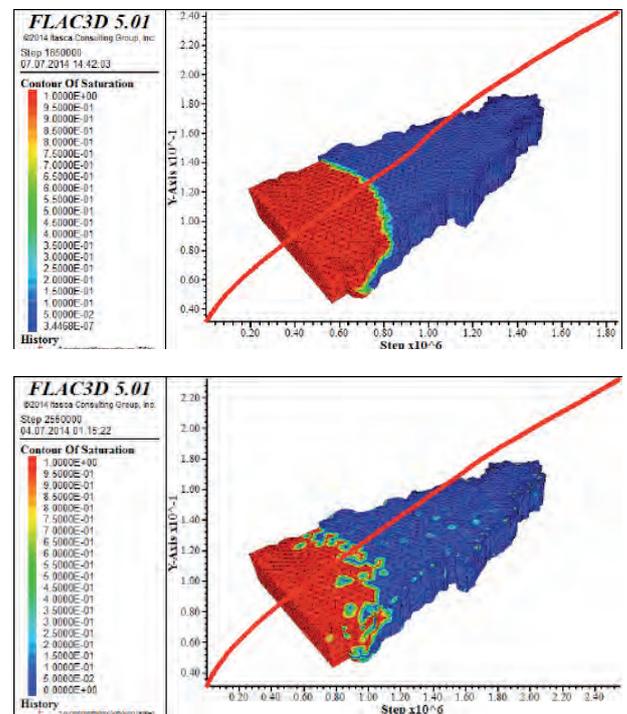


Abb. 103 Konturplot Sättigung bei konstantem Unterdruck (links) sowie bei zufällig verteiltem Unterdruck (rechts).

Für den Zulauf und Abfluss stehen jeweils drei Randbedingungen zur Verfügung, was in neun mögliche Kombinationen resultiert, von denen vier für die Testsimulationen ausgewählt wurden (siehe Tab. 14 auf Seite 96).

Die erste Randbedingung ist die Impermeabilität und in diesem Fall kann das Fluid nicht das Netz verlassen und ist daher für die Simulation geeignet. Bildlich gesprochen bleibt es im Grabmal und fließt nicht in die Umgebung.

Die zweite Randbedingung ist die Vorgabe des Porenwasserdrucks im Modell, um hiermit die Migration des Fluids zu ermöglichen. Bei der Festigung mittels VKV wird oben der Unterdruck angelegt und der Festiger strömt von unten in das Grabmal. Rechnungsbedingt besteht aber nur die Möglichkeit, das Druckgefälle umzukehren oder einen Zufluss zu definieren.

Die dritte Randbedingung ist die des „leaky boundary“. Hier wird eine undichte Stelle definiert, wozu nur der Druck und Durchlässigkeitskoeffizient von Bedeutung sind.

Tab. 14 Kombination der Randbedingungen für die Simulation

Anfangsbedingungen	Randbedingung am Zufluss	Randbedingung am Abfluss
konstanter Druck	definierter Druck	definierter Druck
zufälliger Druck	definierter Zufluss	leaky boundary (=undichte Stelle)
definierte Fließwege	definierter Druck	leaky boundary (=undichte Stelle)
Unterdruck an Kontur	definierter Druck	leaky boundary (=undichte Stelle)

8.3.2 Testrechnungen zur den Anfangsbedingungen

Anfangsbedingung: konstanter Unterdruck

Dieser Berechnungsfall kommt der unwahrscheinlichen Annahme am nächsten, dass sich im gesamten Objekt ein Unterdruck ausbreitet. Abb. 103 zeigt oben, wie die durchlässigere Kontur die Migration des Festigers beeinflusst und den Fluidstrom begünstigt. Die Abbildung zeigt auch, dass während die Fluidmigration in Richtung des oberen Bereichs voranschreitet, diese in die seitlichen und hinausragenden Elemente zeitlich verzögert ist. Die finale Vollsättigung wurde nach einer Modellzeit von 4,2 h erreicht.

Anfangsbedingung: zufällig verteilter Unterdruck

Bei dieser Anfangsbedingung kommt es teilweise zu keiner geordneten Fluidausbreitung innerhalb des Objektes. So sind zu Beginn des Prozesses Bereiche mit einer gehäuften Fluidkonzentration festzustellen, die sich vor der eigentlichen Sättigungsfront befinden. Hinter der Sättigungsfront wiederum treten zeitweilig Bereiche geringerer Sättigung auf.

Diese Phänomene sind in Abb. 103 unten dargestellt: Im Gegensatz zur oberen Darstellung sind hier im gesättigten Bereich (rot) isolierte Partien geringerer Sättigung festzustellen (grün-gelb).

Entsprechend dieser Rechnung treten Bereiche verminderten Drucks auf, die demnach nicht vollständig gesättigt wären, sofern die Festigung zu früh abge-

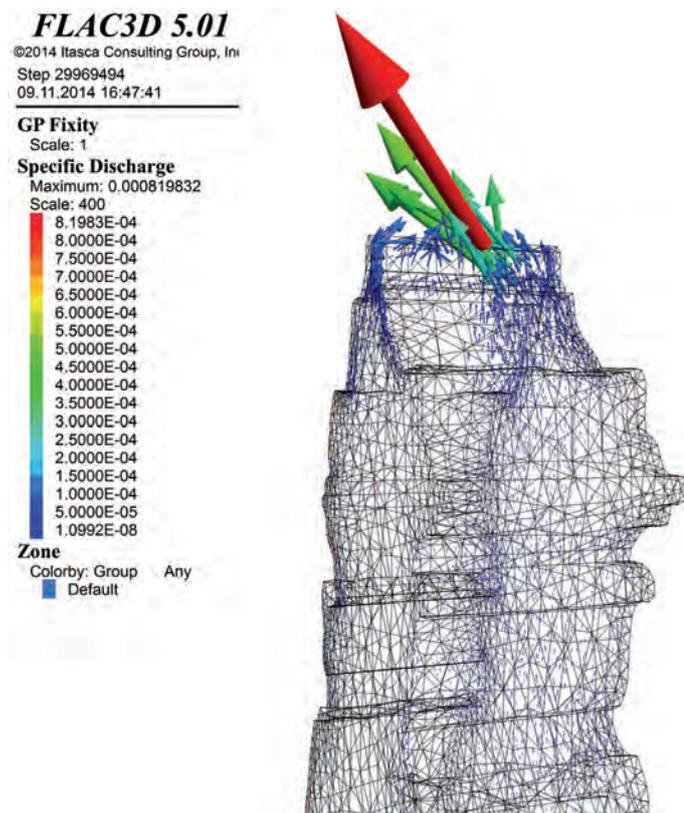


Abb. 104 „Flowplot“ des oberen Bereichs des Grabmals unter der „leaky boundary“-Randbedingung.

brochen würde. Die Simulationszeit für die Vollsättigung beträgt 6,9 h.

Anfangsbedingung: definierte Fließwege

Das Fluid benutzt die definierten Druckwege. Es bildet sich eine breite Sättigungsfront aus, der temporär „Sättigungsstränge“ vorangehen.

Anfangsbedingung: Unterdruck an Kontur

Das Fluid dringt dem Unterdruck folgend zuerst in die Außenzonen ein.

8.3.3 Ergebnisse

Alle Testrechnungen ergaben eine Vollsättigung. Dies wurde aber offensichtlich nur durch die untere Rand-

bedingung mit der Vorgabe eines definierten Drucks hervorgerufen, d.h. die freie Fluidausbreitung funktioniert unter den zuerst angenommenen Umständen nicht.

Die Anfangsbedingungen müssen frei wirken können, so dass sie nicht von der Randbedingung am Zufluss überlagert werden.

Abb. 104 zeigt die Durchflussrate im oberen Bereich des Grabmals und es ist gut zu sehen, dass sich das Fluid zur Absaugstelle bewegt und die besser durchströmbare Außenseite des Grabmals bevorzugt. Daher ist die Kombination der Randbedingungen aus „Druck am Zufluss“ und „leaky boundary“ (= undichte Stelle) am Ausfluss am geeignetsten zur Simulation der Festigung.

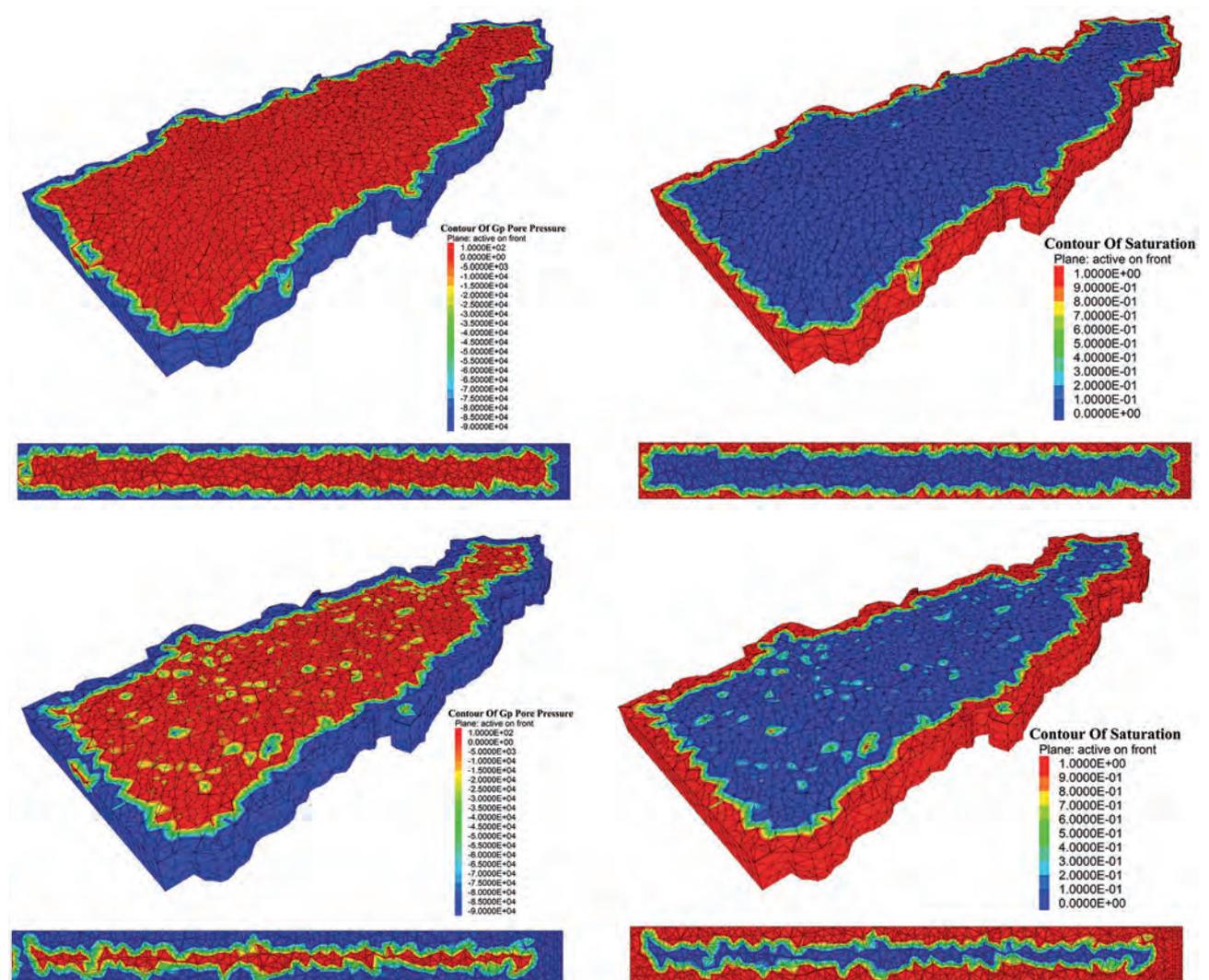


Abb. 105 Obere Reihe: Anfangsporendruckverteilung (links) und finale Sättigung (rechts) für „Eindringtiefe“ = 0,00 m. Untere Reihe: Anfangsporendruckverteilung (links) und finale Sättigung (rechts) für „Eindringtiefe“ = 0,03 m.

8.4 Simulation am Grabmal

Insgesamt wurden Berechnungen für drei unterschiedliche Wirtktiefen des Unterdrucks durchgeführt: 0,00 m, 0,02 m und 0,03 m. Da zwischen den ersten beiden Eindringtiefen keine signifikanten Unterschiede festgestellt wurden, sind hier nur die Ergebnisse und Unterschiede zwischen 0,00 m und 0,03 m dargestellt. Die Randbedingungen sind „Druck am Zufluss“ und „leaky boundary“ am Abfluss. In Abb. 105 sind in die anfängliche Porendruckverteilung und der finale Sättigungszustand für die unterschiedlichen Wirtktiefen des Unterdrucks dargestellt.

Sie zeigen das zu erwartende Resultat, dass die finale Sättigung bei einer Wirtktiefe des Unterdrucks von 0,03 m höher als bei 0,00 m ist und der Festiger in tiefere Bereiche des Grabmals migriert. Die Bereiche geringerer Anfangsporendruckverteilung und der finalen Sättigung in der Darstellung für die Eindringtiefe von 0,03 m ist dessen feinerer Skalierung geschuldet. D.h. bei einer etwas größeren Skalierung würden auch hier homogene Bereiche für die beiden Parameter festzustellen sein. Die simulierte Festigungszeit liegt für 0,03 m bei 19 h, während sie für 0,00 m bei 22 h beträgt. Die lange Dauer der simulierten Festigung wird durch die geschwindigkeitsverzögernden Randbedingungen verursacht. Auch wenn die Festigungszeit wesentlich höher als tatsächlich ist, wurde der Prozess jeweils realistisch abgebildet. Die jeweiligen Durchflussraten sind in Abb. 106 zu sehen. Mit 10^{-3} ms^{-1} liegen die Werte für 0,03 m um eine Größenordnung höher als die für 0,00 m, die zwischen 10^{-4} ms^{-1} und 10^{-5} ms^{-1} variieren.

Dies ist durch den größeren Querschnitt begründet. Wiederum begünstigt die schmalere Fließbahn eine schnellere Migration.

Die Werte zeigen, dass immer mehr Netzpunkte im Modell aufgesättigt wurden als mit der Anfangsbedingung versehen. Die Erhöhung der Wirtktiefe des Unterdrucks führte auch zu einer höheren Anzahl vollgesättigter Netzpunkte im Modell.

8.5 Schlussfolgerungen

Trotz der genannten Unsicherheiten zeigte sich, dass die Simulation den eigentlichen Festigungsprozess gut abbildet. Ein noch zu lösendes Problem ist die simulierte Zeit, die im Gegensatz zur realen Zeit für die Festigung des Grabmals von 6 h deutlich zu hoch ist. In diesen Rechnungen hatten die Änderung von Porosität und Permeabilität einen nur sehr geringen Einfluss auf die Ergebnisse. Vielmehr war die Höhe und Wirtktiefe des Unterdrucks ausschlaggebend.

Da die Permeabilität vom verwitterten Cottaer Sandstein unbekannt ist, werden hierzu an der TU Bergakademie Freiberg Untersuchungen erfolgen, um bei zukünftigen Simulationen mit realen Werten arbeiten zu können. Erst wenn alle strömungsmechanisch relevanten Parameter bekannt sind, kann eine genauere Wichtung der Einflussgrößen und somit Modellanpassung vorgenommen werden.

Dessen ungeachtet zeigen die Ergebnisse der Simulation ein hohes Potenzial zur Klärung z.B. von Festigungsprozessen. Um in der Zukunft belastbare Aussagen treffen zu können, muss mit unterschiedlichen Sandsteinsorten und genauer Kenntnis zu deren Para-

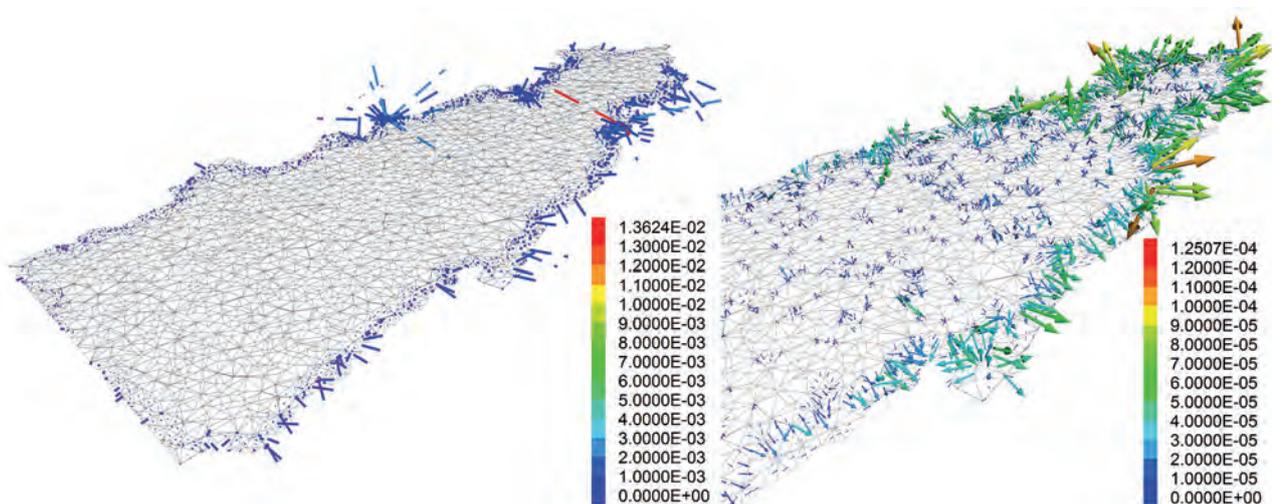


Abb. 106 Fließraten, Schnittdarstellung 1. Linke Seite für „eindringtiefe“ = 0,00 m; rechte Seite für „eindringtiefe“ = 0,03 m.

metern sowie mit einer komplexeren Geometrie gearbeitet werden. So ist ein entscheidender Parameter für das strömungsmechanische Verhalten durch einen porösen Körper die Benetzbarkeit des Fluids (Häfner et al., 1985).

Die Benetzbarkeit des Festigers bzw. Festigern allgemein ist den Bearbeitern nicht bekannt, ist aber ein Parameter, den man strömungsmechanisch berücksichtigen sollte.

Unabhängig davon, ob es aus konservatorischer Sicht zu wünschen ist, dass der Festiger in die Tonlagen eindringt, ist es aufgrund der Saugspannung im Mikroporenraum physikalisch unwahrscheinlich.

Im Zuge der Simulation kam die Überlegung auf, ob es effektiver wäre, die Festigung bei einer größtmög-

lichen Feuchtigkeit durchzuführen, also genau umgekehrt zur gegenwärtigen Praxis. So nimmt die Saugspannung mit zunehmender Sättigung ab, um bei 100%er Sättigung den Wert 0 zu erreichen. Läge man einen Unterdruck gleich mit dem Festiger an, würde dies zu einem Strömen des Wassers und Nachströmen des Festigers führen. Da die Saugspannung theoretisch Null bzw. äußerst gering wäre, könnte der Festiger demnach auch in den Mikroporenbereich fließen. Es handelt es sich hier um eine sehr komplexe Materie, die ein eigenes Forschungsthema darstellt. Die damit zusammenhängenden Fragen können hier nicht beantwortet werden sollte, zumal Kapillareffekte in dem Programm nicht berücksichtigt werden können.

9

Kapitel

Zusammenfassung und Ausblick

Im beschriebenen Projekt war es möglich, die Anwendung des innovativen „Vakuum-Kreislauf-Verfahrens“ (VKV) zur Entsalzung sowie zur Festigung an einem ausgewählten Denkmalobjekt erstmalig mit ausführlichen und detaillierten naturwissenschaftlichen Untersuchungen zu begleiten und zu bewerten. Als Referenzgestein wurde dafür der Cottaer Elbsandstein ausgewählt, der hinsichtlich seines Eindringverhaltens bei der Behandlung mit Flüssigkeiten zur Konservierung als problematisch gilt.

Die Entsalzung sowie die anschließende Festigung mit dem VKV und die Vor- und Nachuntersuchungen wurden an einem barocken Grabmal auf dem Inneren Neustädter Friedhof in Dresden durchgeführt. Auf diesem Friedhof mit umfangreichem historischem Bestand sind zahlreiche Grabmale mit ähnlichen Erhaltungsproblemen aus Barock und Klassizismus vorhanden (Kapitel 2). In Abstimmung mit den Denkmalbehörden war das Grabmal Richter aus Cottaer Sandstein von der Friedhofsverwaltung für das Projekt zur Verfügung gestellt worden. Es wies umweltbedingte Schäden auf, und sein Zustand wurde vor der Konservierung ausführlich untersucht und dokumentiert (Kapitel 3). Aus den Untersuchungen ergab sich die Notwendigkeit der Strukturfestigung nach vorheriger Entsalzung.

Die Entsalzung wurde modellhaft mit dem VKV durchgeführt (Kapitel 4). Nach einer siebentägigen Behandlung mit Leitungswasser im „Vakuum“-Kreislauf (Unterdruck bis zu 600 mbar) wurden Bohrprofile zur Analyse der verbliebenen Salzbelastung entnommen. Außerdem wurde das dem Kreislauf entzogene Wasser kontinuierlich über längere Zeit auf seine Salzbelastung untersucht. In der Trocknungsphase im Anschluss an das VKV wurden auf die gesamte Objekt Oberfläche Zellstoffkompressen aufgelegt, um bei der Trocknung kapillar zur Steinoberfläche migrierende Salzionen aufzunehmen. Nach der Abnahme der Kompressen (5 Wochen Standzeit) wurden erneut Bohrprofile zur Bestimmung der Restsalze im Stein gewonnen. Die Bewertung der Salzanalysen ergab, dass vor allem die vor der Maßnahme in der gesamten Steinoberfläche nachweisbare hohe Gipsbelastung erheblich reduziert werden konnte. Im Vergleich mit früheren Versuchen zur Reduzierung einer oberflächennahen Gipsbelastung am Cottaer Sandstein im Dresdner Zwinger kann die Effizienz des eingesetzten Verfahrens als deutlich besser bezeichnet werden. Hinsichtlich einer ebenfalls partiell vorhandenen Nitratbelastung zeigt sich das Verfahren weniger effizient. Dies ist mit dem Mechanismus des Salztransportes während der Behandlung erklärbar, der durch

die Analyse der Salzprofile und des aus dem Kreislauf entfernten Wassers deutlich wird: Leicht lösliche Salze wie die Nitratverbindungen werden mit kapillar eindringendem Wasser durch Advektion tiefer in den Stein hineinbewegt, während im Oberflächenbereich, der stark mit schwerer löslichem Gips belastet ist, vor allem diffusive Prozesse ablaufen, die für einen kontinuierlichen Abbau der Gipsbelastung sorgen. Insofern kann das VKV zur Entsalzung als eine Art „mobile Wasserbadentsalzung“ mit kontinuierlichem Wasserwechsel angesehen werden. Der angelegte Unterdruck führt erwartungsgemäß nicht zu einer „Durchspülung“ des Natursteins, wie an den ebenfalls untersuchten Feuchteverteilungen im Objekt vor und nach der Behandlung nachgewiesen werden konnte. Er könnte aber das kapillare Eindringen und Einsickern von Wasser in Grobporen und Rissstrukturen durch Absaugen der enthaltenen Luft, bevorzugt nahe der Steinoberfläche, begünstigen. Vor allem jedoch dient er dazu, Wasser permanent aus dem Kreislauf zu entziehen und frisches Wasser wieder einzuführen. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, steuert die Dynamik des Wasserwechsels die diffusiven Prozesse bei der Extraktion von Gips. Hier scheint noch Potenzial für eine Optimierung der Methode vorhanden zu sein. Zwischenzeitliches Abschalten der Anlage in Intervallen zum längeren Kontakt von Frischwasser mit der vergipsten Oberfläche sollte die diffusive Bewegung von gelöstem Gips erhöhen. Ein anschließendes Abpumpen und die erneute Zufuhr von Frischwasser, die das für die Diffusion stets erforderliche Konzentrationsgefälle wieder herstellen, sind problemlos möglich als bei stationären Wasserbädern. Dies stellt einen Vorteil des Verfahrens dar, das deshalb besonders zur effizienten Entsalzung von in der Oberflächenzone stark vergipsten Steinobjekten empfohlen werden kann. Die Wasserzu- und -abfuhr in Intervallen würde auch dazu beitragen, hinsichtlich des Wasserverbrauchs effektiver zu arbeiten, wobei trotzdem gute Ergebnisse erwartet werden können. Insgesamt kann festgestellt werden, dass das VKV hinsichtlich der Entsalzung vergipster Natursteinoberflächen eine interessante, die Palette der konservatorischen Möglichkeiten erweiternde Methode darstellt. Sie kann, auch in Kombination mit einer anschließenden Kompressenentsalzung, als „mobile Vollbadentsalzung“ insbesondere für höherwertige Kleindenkmale aus Sandstein zum Einsatz kommen, deren Abbau aus technischen und/oder konservatorischen Gründen nicht ratsam erscheint.

Untersuchungen zur Festigung des Cottaer Sandsteins mit dem VKV wurden einerseits an Prüfkör-

pern aus bruchfrischem Sandstein durchgeführt, um grundsätzliche Aussagen zum Materialverhalten zu erhalten (Kapitel 5). Der Einsatz des VKV unter Praxisbedingungen sowie Nachuntersuchungen vor Ort und im Labor erfolgten am ausgewählten Denkmalobjekt, dem barocken Grabmal Richter (Kapitel 7). Die Ergebnisse aus beiden Ansätzen werden hier zusammenfassend behandelt. Aus den Voruntersuchungen, in die auch Systeme mit höherem Wirkstoffgehalt einbezogen worden sind (Remmers 500E, 1:1 Mischungen aus Remmers 500E und 300E) war der Kieselsäureester (KSE) Remmers 300E für die Objektanwendung favorisiert worden. In der Voruntersuchung an bruchfrischen Probekörpern (Würfel mit 20 cm Kantenlänge) zeigte er die beste Eindring- und Wirtktiefe (bis zu 5 cm). Dagegen wurden bei vergleichenden, herkömmlichen nass-in-nass-Tränkungen der Steinoberfläche von Hand mit dem gleichen Festiger nur Eindring- und Wirtktiefen unter 1 cm erreicht. Vor dem Hintergrund der Diskussion zur Wirksamkeit des Unterdrucks im Kapillarsystem feinporiger Sandsteine wurden zum Vergleich auch Würfel im KSE-Vollbad ohne Druckbeaufschlagung, aber mit gleicher Einwirkungsdauer wie beim VKV getränkt. Die nachgewiesenen Eindringtiefen (maximal 3 cm) an zwei Prüfkörpern lagen ebenfalls deutlich über denen der Oberflächentränkung und zugleich an der Untergrenze der mit dem VKV erreichten Werte. Die Ergebnisse einer längeren Tränkung mit permanentem Wirkstoffangebot mit bzw. ohne Druck zeigen an den wenigen untersuchten bruchfrischen Probewürfeln somit nur graduelle, keine grundsätzlichen Unterschiede. Bei stärker geschädigten Oberflächen mit Rissen und Auflockerungen, wie sie in der Konservierungspraxis die Regel sind, mag der Unterdruck jedoch die Verteilung der Flüssigkeit entlang von durch die Verwitterung sekundär entstandenen Wegsamkeiten zusätzlich fördern und beschleunigen.

Unabhängig davon muss die bei der Verwendung einer geschlossenen Anlage wie dem VKV-System mögliche saubere restauratorische Arbeit hervorgehoben werden. Sie ermöglicht eine geruchsfreie und für den ausführenden Restaurator gesundheitlich unschädliche Tränkung des Objekts sowie die vollständige Rückführung des nicht verbrauchten Wirkstoffs. Dem gegenüber stehen jedoch nicht unerhebliche Kosten für Equipment und erfahrenes Personal. So muss der Einsatz des Verfahrens unter Berücksichtigung aller Gesichtspunkte und Gegebenheiten des jeweils zu behandelnden Objekts abgewogen werden.

Hinsichtlich des Festigungseffekts und der Auswirkung der Tränkung auf die hydrischen Kennwerte konnte aus den Untersuchungen an mit Remmers

300E gefestigten, bruchfrischen Würfel aus Cottaer Sandstein eine positive Bilanz gezogen werden: Die Festigkeitsprofile verliefen mit einem akzeptabel von außen nach innen abfallenden Gradienten und ohne scharfe Festigkeits- oder E-Modulsprünge. Ebenso ist aus der Untersuchung der hydrischen Kennwerte keine Gefahr hinsichtlich einer dampfsperrenden Wirkung oder signifikant erhöhten hydrischen Dehnung der getränkten Abschnitte abzuleiten. Bei der Anwendung am Objekt ist das Grabmal Richter mit dem VKV über 6 Stunden mit Remmers 300E (+ 10 % Erhärtungsbeschleuniger, von der Fa. Remmers speziell für die Anwendung beim VKV konfektioniert) gefestigt worden. Bohrwiderstandsmessungen ergaben eine Zunahme des Bohrwiderstands in der, nach den Ergebnissen der Vormessung entfestigten, äußersten 2 cm-Zone ohne abrupte Sprünge. Bei der Untersuchung von 7 Monate nach der Festigung entnommenen Bohrkernen konnte jedoch über die Ringbiegezugfestigkeit an Bohrkernabschnitten kein deutlicher Festigungseffekt nachgewiesen werden. Dagegen lag überraschenderweise die Ultraschallgeschwindigkeit in den äußeren Bohrkernabschnitten systematisch unter der der Vormessungen. Möglicherweise weist das, ebenso wie eine noch nach nahezu 1,5 Jahren ausgeprägte Hydrophobie der gesamten Steinoberfläche, auf eine nicht vollständige Ausreaktion des verwendeten Festigers hin. Negative Effekte hinsichtlich der hydrischen Eigenschaften der getränkten Zone wurden an den Bohrkernen nicht nachgewiesen. Nach Beendigung des Projektes wird das Grabmal wieder außerhalb der bisherigen Schutzzeinhäusung aufgestellt werden. Dann soll in größeren zeitlichen Abständen ein Monitoring erfolgen, um einen Abbau der Hydrophobie und ggf. auch Veränderungen von Festigkeiten der durchtränkten Zone weiter zu verfolgen. Da die Tränkung an Probekörpern grundsätzlich gute Eindringtiefen, Festigkeitsprofile und hydrische Kennwerte mit dem verwendeten KSE Remmers 300E ergab, kann die beobachtete verzögerte Reaktion des Wirkstoffs wohl nicht dem Verfahren angelastet werden. Die relativ starke Trocknung des Objekts vor der Festigung und seine regengeschützte Aufstellung mögen dabei eine Rolle spielen, aber auch Probleme der Konfiguration des verwendeten Festigers mit Erhärtungsbeschleuniger, dessen chemisches Wirkprinzip vom Hersteller nicht offen gelegt wird, müssen ins Kalkül gezogen werden. Grundsätzlich wäre zu hinterfragen, ob bei einem recht feinporigen Material wie dem Cottaer Sandstein die Zugabe eines „Erhärtungsbeschleunigers“ überhaupt notwendig und sinnvoll ist, weil seine hohe Saugspannung ein „Auslaufen“ (Sickern) des noch flüssigen Festigers

verhindern sollte. Weiterhin wäre überlegenswert, ob nicht auch mit dem KSE-System Remmers 100 mit geringeren Wirkstoffkonzentrationen, das beim Cottaer Sandstein in der restauratorischen Praxis häufig für herkömmliche Festigungen verwendet wird, in Kombination mit dem VKV gearbeitet werden könnte.

Als Resümee kann aus den gewonnenen Erkenntnissen mit der VKV-Anwendungstechnik am Cottaer Sandstein für die restauratorische Praxis festgehalten werden, dass gegenüber herkömmlichen in-situ-Applikationsmethoden des Festigers von der Oberfläche her, wie Flutungen nass-in-nass von Hand (wahrscheinlich auch Kompressen, Infusionen etc.) deutlich bessere Eindringtiefen erzielbar sind. Vor dem Hintergrund der an bruchfrischen Proben gezeigten relativ günstigen Festigkeitsverläufen für Cottaer Sandstein erscheint das Verfahren für ausgewählte Fälle, in denen sich an kleineren Objekten eine Konservierung in situ erforderlich macht, als mögliche Alternative zu traditionellen Festigungen mit KSE. Die Ergebnisse für die hier untersuchten Kombinationen von KSE-Steinfestigern mit Cottaer Sandstein dürfen in der Konservierungspraxis natürlich nicht unkritisch auf andere Gesteinsarten und Festiger bzw. Festigerkonfigurationen übertragen werden. Auch ist in jedem Fall die spezielle Situation und der Vorzustand des Objekts zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Projekts wurde die numerische Simulation angewandt, um Aussagen zu möglichen Rissbildungen am Grabmal aufgrund der Festigung mittels VKV zu treffen. Neben der eigentlichen Risikobewertung des Verfahrens sollte auch die Anwendbarkeit als eine neue und ergänzende Methode in der Denkmalpflege festgestellt werden.

Bei der Simulation wurden thermische Belastungen mit unterschiedlichen maximalen Temperaturen von 40°C bis 800 °C gerechnet (Kap. 6). Die Rechnungen wurden mit Modellen durchgeführt, die jeweils dem unbehandelten und dem mit KSE 300E gefestigten Cottaer Sandstein entsprachen. Ein drittes Modell bildete beide Zustände ab.

Bei allen Rechnungen zeigte es sich, dass es erst bei Temperaturen ab 80°C zu vereinzelt Rissbildungen kommt und bei weiter steigenden Temperaturen ein Risswachstum zu verzeichnen ist. Nach den Ergebnissen der Simulation führte die Festigung nicht zu Veränderungen in den gesteinsmechanischen Eigenschaften, die die thermisch induzierte Bildung von Schalen oder Rissen bei einmaligen Ereignissen verursachen könnten. Temperaturwechsel über längere Zeiträume wurden nicht berücksichtigt.

Bei der Modellgenerierung für die Simulation wurden verschiedene Ansätze verfolgt, wobei der klassische Ansatz (stochastischen Zuweisung) nach aktuellem Wissensstand der anwendungsfreundlichste und daher momentan zu bevorzugende Ansatz ist.

Ein auf dem Realgefüge basierendes geometrisches Modell liefert sicher mehr Informationen, muss aber in Zukunft derart optimiert werden, dass es ausreichend die Realität abbildet und zugleich akzeptable Rechenzeiten ermöglicht.

Es hat sich gezeigt, dass die Simulation zur Risikobewertung für denkmalpflegerische Fragen Potenzial besitzt und deshalb weiterentwickelt werden sollte. So könnten zukünftig weitere Sandsteine mit ihren jeweiligen (Verwitterungs-) Eigenschaften untersucht werden, um so die Anwendbarkeit der Simulation für diese Gruppe von Gesteinen zu verbessern und zu erweitern. Sinnvoll wäre, zukünftig Monats- oder Jahresgänge von Temperaturen und die damit verbundenen Schadensprozesse zu simulieren.

Die Simulation der thermischen Belastung erbrachte bei hohen Temperaturen die erwartbaren Rissbildungen. Aber die Erfahrung zeigt, dass es bei Bränden zu Schalenbildungen kommt, die bei der Simulation nicht abgebildet wurden. Es zeigt sich, dass mit diesem Vorhaben nur ein erster Schritt auf dem Gebiet der Simulation getan wurde, aber noch viele Fragen offen stehen, deren Beantwortung eine fachübergreifende Zusammenarbeit erfordert, um die Simulation zu verifizieren und den realen Prozessen weiter anzupassen.

Im Laufe des Vorhabens kamen auch Fragen zum Festigungsprozess selbst auf. Es wurde daher eine vereinfachte Prozess-Simulation zum VKV versucht (Kap. 8), um den Festigungsprozess nachzubilden und um festzustellen, ob die Prozess-Simulation als zusätzliche Methode für die (Weiter-) Entwicklung von Festigungsverfahren geeignet ist.

Die durchgeführten Modellierungen zeigten, dass der Transport strömender Medien in Sandstein bei angelegtem Unterdruck ein komplexer Prozess ist, der weitere detaillierte Kenntnisse zu Porenraum- und Flüssigkeitseigenschaften erfordert, um praxisgerechte Annäherungen des Modells an die real ablaufenden Vorgänge zu erreichen.

Schriftenverzeichnis

Anonym (200): Kulturdenkmale im Freistaat Sachsen, Ausführliches Denkmalverzeichnis - Innerer Neustädter Friedhof. - Landesamt für Denkmalpflege Sachsen (Dresden).

Anonym (2011): Users Guide UDEC 5.0. - Itasca (Minneapolis, USA).

Arnold, A. & Zehnder, K. (1989): Salt weathering on monuments. - 1st International Symposium: "La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo". Proceedings (ed. F. Zezza), Bari 1989, 31-58.

Auras, M. & Meinhardt, J. & Snethlage, R. (2011): Leitfaden Naturstein-Monitoring. - Fraunhofer IRB Verlag (Stuttgart).

Busch, K.-F. & Luckner, L. & Tiemer, K. (1993): Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 3, Geohydraulik. - Borntraeger (Berlin, Stuttgart).

EN ISO 12572 (2001): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth-Verlag Berlin.

Franzen, C. & Hoferick, F. & Laue, S. & Siedel, H. (2013): Water bath desalination followed by poultice treatment. In: Heritage, A., Heritage, A. & Zezza, V. (eds.): Desalination of Historic Buildings, Stone and Wall Paintings. Archetype Publications, London, 74-78.

Grunert, S. (1986): Der Sandstein der Sächsischen Schweiz. - Abh. Staatl. Mus. Miner. Geol. Dresden, 34.

Grunert, S. (2007): Der Elbsandstein: Vorkommen, Verwendung, Eigenschaften. - Geologica Saxonica, J. of Central European Geology, 52/53, 3-22 (Senckenberg Naturhistorische Sammlungen, Dresden).

Häfner, F. & Voigt, H.D. & Bamberg, H.-F. & Lauterbach, M. (1985): Geohydrodynamische Erkundung von Erdöl-, Erdgas- und Grundwasserlagerstätten. - Wiss.-Techn. Informationsdienst des ZGI, 26, Heft 1 (Berlin).

Heilbronner, R. & Barrett, S. (2013): Image Analysis in Earth Science - Microstructures and Textures of Earth Materials. - Springer Verlag (Heidelberg, Berlin).

ICOMOS/Vergés-Belmin et al. (2010): Illustriertes Glossar der Verwitterungsformen von Naturstein. - Michael Imhof Verlag (Petersberg).

Kiesewetter, A. (2000): Der Dresdner Totentanz: Überlegungen zu seiner Herkunft und Idee. - Denkmalpflege in Sachsen.

Kozub, P. (2008): To the determination of the Young's modulus from the biaxial flex-ural strength. In: Lukaszewicz, J.W. & Niemcewicz P. (Eds.): 11th Int. Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Torun, Poland. Volume 1, p. 407-4.13.

Lepique, M. (2008): Empfehlung Nr. 10 des Arbeitskreises 3.3 "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Indirekter Zugversuch an Gesteinsproben – Spaltzugversuch, Bautechnik 85, Heft 9, 623-627.

Mavko, G. & Mukerji, T. & Dvorkin, J. (2009): The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. - Cambridge University Press, 2nd ed., (Cambridge, UK).

Mutschler, T. (2004): Neufassung der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Einaxial Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern. - Bautechnik 81, Heft 10, Ernst & Sohn (Berlin).

Pauffer, P. (1986): Physikalische Kristallographie. - Akademie Verlag (Berlin).

Pel, L. & Sawdy, A. & Voronina, V. (2010): Physical principles and efficiency of salt extraction by poulticing. - J. Cult. Heritage 11, 59-67.

Pfefferkorn, S. (2014): Untersuchungsbericht zum DBU Projekt: Bohrwiderstands- und Ultraschallmessungen an Sandsteinproben (unveröff.).

Pfefferkorn, S. & Siedel, H. (1999): Einfluss der Materialfeuchte auf die Ergebnisse des Bohrwiderstandsmessverfahrens an Sandsteinen verschiedener Gefügetypen. In: Wittmann, F.H. & Gerdes, A. (Hrsg.): Proceedings 5th International Colloquium Material Science and Restoration, Aedification Publ., Unterengstringen, 1559-1568.

Pummer, E. (2007): Vakuum-Kreislauf-Festigung. Eine attraktive Applikationsmethode für Steinfestiger. In: Pummer, E. Die Kremser Dreifaltigkeitssäule. For-

schung, Konservierung, Restaurierung. EC Research Project 2007. Selbstverlag, Atelier Pummer, Rossatz / Wachau. 141-145.

Rahmig, M. (2015): Numerische Prozess-Simulation des VKV am Beispiel eines barocken Grabmals. - Studienarbeit am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg (unveröff.).

Russ, John C. (2008): Introduction to Image Processing and Analysis. - CRC Press, Taylor & Francis Group (Boca Raton, Florida).

Sattler, L. (1992): Untersuchungen zur Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester. Diss. und Forschungsbericht 9/1992 des Zentrallabors am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, München, 156 S. u. Anh.

Schön, J. (1983): Petrophysik-Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen. - Akademie Verlag (Berlin).

Siedel, H. (1996): Experiences from desalting of tuffstone and sandstone monuments by compresses. - „Le dessalement des matériaux poreux“. 7es Journées d'études de la Section Française de l'Institut International de Conservation, Poitiers 9./10. Mai 1996. Preprints. pp. 191-198.

Siedel, H. (2007): Verwitterung von Elbsandstein am Bauwerk. - In: Siedel, H.; Franzen, C. & Weise, S. (Hrsg.): Elbsandstein. Beiträge zur Tagung des Arbeitskreises zur Erhaltung von Kulturgütern aus Stein (ARKUS) 2007 in Dresden, 59-71.

Siedel, H. & Klemm, W. (2000): Evaluation of the environmental influence on sulphate salt formation at monuments in Dresden (Germany) by sulphur isotope measurements. - 9th Int. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice 2000. Proceedings (Ed. V. Fassina), Elsevier Amsterdam etc. 2000, Vol. 1, 401-409.

Siedel, H. & Siegesmund, S. (2011): Characterisation of Stone Deterioration on Buildings (with a contribution by K. Sterflinger) - In: Siegesmund, S. & Snethlage, R. (eds.): Stone in Architecture. 4th edition. Springer, Berlin, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 347-410.

Siedel, H. & Franzen, Ch. & Pummer, E. (2014): In-situ ‚vacuum‘ desalination-case study of a baroque tombstone. - 3rd Int. Conf. on Salt Weathering of Buil-

- dings and Stone Sculptures. - Proceedings (ed. H. De Clercq), 483-496, Brüssel.
- Siegismund, S. & Snethlage, R. (2011): Stone in Architecture-Properties, Durability. - 4. Aufl., Springer-Verlag (Heidelberg, Dordrecht, London, New York).
- Snethlage, R. (2011): Stone conservation (with a contribution by K. Sterflinger). - In: Siegismund, S. & Snethlage, R. (eds.): Stone in Architecture. 4th edition. Springer, Berlin, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 411-544.
- Snethlage, R. & Pfanner, M. (2013): Leitfaden Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. 4. Aufl., Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart.
- Snethlage, R. & Wendler, E. (1995): Methoden der Steinkonservierung - Anforderungen und Bewertungskriterien. - In: Snethlage, R. (Hrsg.): Denkmalpflege und Naturwissenschaft. Natursteinkonservierung I. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 3-40.
- Sörries, R. (2013): Trauer und Medien in: Friedhof und Denkmal - Zeitschrift für Sepulkralkultur, 58. Jhg, S. 3-9 (Kassel).
- Stein, M. (2000): Friedhöfe in Dresden. - Verlag der Kunst (Dresden).
- Twiss, J. & Moores, E. M. (1992): Structural Geology. - W. H. Freeman & Co (New York).
- Vergés-Belmin, V. & Siedel, H. (2005): Desalination of masonries and monumental sculptures by poulticing: a review. - International Journal for Restoration of Buildings and Monuments 11, no. 6, 391-407.
- Wendler, E. & Snethlage, R. (1989): Der Wassereindringprüfer nach Karsten - Anwendung und Interpretation der Messwerte. Bautenschutz + Bausanierung 12 (6), 110-115.
- Wittmann, F. & Prim, P. (1983): Mesures de l'effet consolidant d'un produit de traitement. - Matériaux et Constructions 16, 235-242.
- WTA-Merkblatt 3-13-01/D (2003): Zerstörungsfreies Entsalzen von Naturstein und anderen porösen Baustoffen mittels Kompressen - Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Städtische Entwicklung Dresdens und zugehörige Lage des Inneren Neustädter Friedhofs (Hist. Karten Privatbesitz, Karte von 2014 Openstreetmap).....	10
Abb. 2	Struktur des Inneren Neustädter Friedhofs	11
Abb. 3	Barocke und klassizistische Grabmale (A, B, C, D) auf dem ersten Land sowie Grabmale des 20. Jahrhunderts auf dem zweiten Land (D; F) und drittem Land (E, G). Bis auf Foto D (Kalkstein) und Foto E (Kunststein) sind alle Objekte aus Sandstein.....	12
Abb. 4	Orthofoto vom Inneren Neustädter Friedhof (Quelle: Landesvermessungsamt Sachsen).....	13
Abb. 5	Aktueller Standort mit Zustand 2012. Umsetzung und Fixierung des Grabmals auf ein Streifenfundament zur Stabilisierung für die anschließende Entsalzung und Festigung (rechts).....	16
Abb. 6	Standort Grabdenkmal	16
Abb. 7	Dünnschliff Cottaer Sandstein. Oben: blau gefärbtes Harz zeigt den Porenraum. Das mittlere Foto mit gekreuzten Nichols und das untere Foto (zusätzlich mit Lambda-Plättchen zeigen sehr schön die Quarzkörner mit direkten Kornkontakten oder kieseligen Anwachssäumen (Bildbreite = 1,3 mm).....	17
Abb. 8	Porenradialverteilung von Cottaer Sandstein.....	18
Abb. 9	Klassifizierung der festgestellte Schadensphänomene entsprechend ICOMOS Glossar.....	21
Abb. 10	Übersicht zum Verlust der originalen Oberfläche (links, rot) sowie detaillierte Schadenskartierung (S. 23). Aus Gründen der Übersicht wurde die Patina nicht eingezeichnet; sie ist an den dunklen Bereichen des Hintergrundfotos erkennbar.	22
Abb. 11	Übersicht zu den Untersuchungen und den Probenahmepunkten.....	24
Abb. 12	Ultraschallgeschwindigkeiten der p-Wellen an Bohrkernen vom Grabmal vor der Festigung mittels VKV und KSE 300 E + 10 % Beschleuniger.....	25
Abb. 13	Bohrwiderstände gemessen am Grabmal vor der Festigung mittels VKV und KSE 300 E + 10 % Beschleuniger.....	25
Abb. 14	Korrelation der Gehalte ausgewählter Ionen unter Berücksichtigung aller gemessenen Werte: (a) Sulfat und Calcium, (b) Nitrat und Magnesium.	26
Abb. 15	Gesamtgehalt lösliche Bestandteile in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).....	27
Abb. 16	Feuchteverteilung in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).....	27
Abb. 17	Verteilung der Ionen Ca und Sulfat (Summe = Maß für den Gipsgehalt) in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).....	28
Abb. 18	Verteilung der Nitrat-Ionen in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).....	28
Abb. 19	Verteilung der Magnesium-Ionen in der Grabplatte, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).....	28
Abb. 20	Maßnahmen zur Entsalzung der Grabplatte, oben v.l.n.r.: Schutz der Oberfläche mit einem Vliesbelag vor dem Einschweißen in Plastikfolie; Apparatur zur Entsalzung; unten v.l.n.r.: in Folie eingeschweißte Grabplatte während des Entsalzungsvorgangs (Ansicht von der Vorderseite mit Schlauchanschlüssen für die Wasserzufuhr); Auflage einer Zellstoffkompressen auf das nasse Objekt unmittelbar nach Entfernung der Plastikhülle im Anschluss an die Unterdruck-Entsalzung, aktive Trocknung aufgrund von Restfeuchte nach natürlicher Trocknung.....	31

Abb. 21	Gesamtgehalt lösliche Bestandteile in der Grabplatte nach der Entsalzung mit VKV, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.-%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe. Die dargestellten Punkte bei 1, 1.5, 3 und 7 cm entsprechen jeweils den Mittelwerten für die Profilschritte 0-1, 1-2, 2-4 und 4-10 cm).....	33
Abb. 22	Feuchteverteilung in der Grabplatte nach der Entsalzung mit VKV sowie anschließender Kompressenaufgabe, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.- %, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe. Die dargestellten Punkte bei 1, 1.5, 3 und 7 cm entsprechen jeweils den Mittelwerten für die Profilschritte 0-1, 1-2, 2-4 und 4-10 cm)	34
Abb. 23	Verteilung der Ionen Ca und Sulfat (Summe = Maß für den Gipsgehalt) in der Grabplatte nach der Entsalzung mit VKV, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.- %, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe. Die dargestellten Punkte bei 1, 1.5, 3 und 7 cm entsprechen jeweils den Mittelwerten für die Profilschritte 0-1, 1-2, 2-4 und 4-10 cm).....	34
Abb. 24	Verteilung der Nitrat-Ionen in der Grabplatte nach der Entsalzung mit VKV, ermittelt in verschiedenen Höhen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.-%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe. Die dargestellten Punkte bei 1, 1.5, 3 und 7 cm entsprechen jeweils den Mittelwerten für die Profilschritte 0-1, 1-2, 2-4 und 4-10 cm).....	35
Abb. 25	Effizienz der Entsalzung mit VKV und anschließender Kompressenaufgabe, ermittelt in verschiedenen Höhen und Profiltiefen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.-%, bezogen auf den Ausgangssalzgehalt in M.-%).....	36
Abb. 26	Differenz zwischen Ausgangssalzgehalt und Salzgehalt nach Entsalzung mit VKV und anschließender Kompressenaufgabe, ermittelt in verschiedenen Höhen und Profiltiefen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in M.-%, bezogen auf die Trockenmasse der Bohrmehlprobe).....	36
Abb. 27	Effizienz der Entsalzung mit VKV und anschließender Kompressenaufgabe bezüglich Gips (Ca + Sulfatgehalt), ermittelt in verschiedenen Höhen und Profiltiefen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in %, bezogen auf den Ausgangssalzgehalt in M.-%).....	37
Abb. 28	Effizienz der Entsalzung mit VKV und anschließender Kompressenaufgabe bezüglich Nitrat, ermittelt in verschiedenen Höhen und Profiltiefen jeweils von der Vorder- und Rückseite (Angaben in %, bezogen auf den Ausgangssalzgehalt in M.-%).....	37
Abb. 29	Messung der Gesamtsalzgehalte, elektrischen Leitfähigkeiten, Sulfat- und Nitratkonzentrationen in Stichproben des „Abwassers“ aus der Entsalzung mit VKV.....	38
Abb. 30	An „Abwasser“ aus dem Vakuum-Kreislauf-Prozess gemessene elektrische Leitfähigkeiten während der ersten 5 Tage der Entsalzung mit VKV.....	39
Abb. 31	Extrahierter Gesamtsalzgehalt in Kompressenproben, bezogen auf die wirksame Fläche der Komresse, nach Abschluss der Kompressenentsalzung mit Zellstoffkompressen. Die Proben wurden im Bereich der Bohrprofile (vgl. Abb. 21 - Abb. 24) entnommen.....	40
Abb. 32	Festigung Probewürfel aus Cottaer Sandstein mit VKV im Atelier Pummer (Rossatz). Bei einem Unterdruck von 250 - 500 mb wurden für beide Würfel 3 kg KSE 300E benötigt. Die Festigung dauerte 6 h und die Eindringtiefe betrug 3- 5 cm.....	42
Abb. 33	Festigung Probewürfel aus Cottaer Sandstein durch vollständige Einbettung in KSE Remmers 300E (drucklos) im Atelier Eilenberger (Holzhau, Erzg.)	43
Abb. 34	Probekörper P mit ausgebohrten Prüfzylindern, parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert.....	44
Abb. 35	Messung der hydrischen Dehnung an Bohrkernscheiben.....	44
Abb. 36	Messung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl an den von der Oberfläche her gefestigten Prüfkörpern (E 1 Kernachse senkrecht ss, E 5 Kernachse parallel ss).....	47
Abb. 37	Messung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl an den mit VKV und Remmers 300E gefestigten Prüfkörpern (E 1 Kernachse senkrecht ss, E 5 Kernachse parallel ss).....	47

Abb. 38	Messung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl an den mit VKV und Remmers 500E gefestigten Prüfkörpern (E 1 Kernachse senkrecht ss, E 5 Kernachse parallel ss).....	47
Abb. 39	Messung der Gesamtwasseraufnahme an den von der Oberfläche her gefestigten Prüfkörpern.....	48
Abb. 40	Messung der Gesamtwasseraufnahme an den mit VKV und Remmers 300E gefestigten Prüfkörpern.....	48
Abb. 41	Messung der Gesamtwasseraufnahme an den mit VKV und Remmers 500E gefestigten Prüfkörpern.....	48
Abb. 42	Wassertropfentest an der Oberfläche des Prüfkörpers K, der im VKV mit Remmers 500E gefestigt wurde, 6 Monate nach der Festigung.....	49
Abb. 43	Messung der hydrischen Dehnung an den von der Oberfläche her gefestigten Prüfkörpern.....	50
Abb. 44	Messung der hydrischen Dehnung an den mit VKV und Remmers 300E gefestigten Prüfkörpern.....	50
Abb. 45	Messung der hydrischen Dehnung an den mit VKV und Remmers 500E gefestigten Prüfkörpern.....	50
Abb. 46	Ultraschallmessungen der p-Wellen an ungefestigten und unterschiedlich gefestigten Probewürfeln (Mittelwerte).....	51
Abb. 47	Ringbiegezugfestigkeiten und E-Moduli von gefestigten und ungefestigten Prüfkörpern (jeweils Mittelwerte aus allen untersuchten Bohrkernen).....	52
Abb. 48	Spaltzugfestigkeiten von ungefestigten Probekörpern aus Cottaer Sandstein.....	53
Abb. 49	Einaxiale Druckfestigkeiten von ungefestigten Probekörpern aus Cottaer Sandstein.....	54
Abb. 50	Verformungs- und E-Moduli von ungefestigten Probekörpern aus Cottaer Sandstein.....	54
Abb. 51	REM-Aufnahme der behandelten Außenzone des Cottaer Sandsteins von Würfel E (Oberflächenbehandlung, Remmers 300E).....	55
Abb. 53	REM-Aufnahme der behandelten Außenzone des Cottaer Sandsteins von Würfel K (VKV, Remmers 300E).....	55
Abb. 55	REM-Aufnahme des Cottaer Sandsteins von Würfel U (unbehandelt).....	55
Abb. 52	REM-Aufnahme der behandelten Außenzone des Cottaer Sandsteins von Würfel P (VKV, Remmers 300E).....	55
Abb. 54	REM-Aufnahme des Cottaer Sandsteins von Würfel U (unbehandelt).....	55
Abb. 56	REM-Aufnahme der behandelten Außenzone des Cottaer Sandsteins von Würfel P (VKV, Remmers 300E).....	55
Abb. 57	E-Moduli für gefestigte und ungefestigte Bohrkernabschnitte (parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert) aus unbewitterten und bewitterten Probekörpern: U (unbehandelt), E (oberflächenbehandelt mit Remmers 300E), P (VKV mit Remmers 300E), K (VKV mit Remmers 500E) und Q (VKV mit Remmers 300E+500E).....	57
Abb. 58	Ringbiegezugfestigkeiten für gefestigte und ungefestigte Bohrkernabschnitte (parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert) aus unbewitterten und bewitterten Probekörpern: U (unbehandelt), E (oberflächenbehandelt mit Remmers 300E), P (VKV mit Remmers 300E), K (VKV mit Remmers 500E) und Q (VKV mit Remmers 300E+500E).....	58
Abb. 59	Ultraschallgeschwindigkeiten der p-Wellen für gefestigte und ungefestigte Bohrkernabschnitte (parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert) aus bewitterten Probekörpern: UW (unbehandelt), EW (oberflächenbehandelt mit Remmers 300E), PW (VKV mit Remmers 300E), KW (VKV mit Remmers 500E) und QW (VKV mit jeweils 50% Remmers 500E+300E).....	59
Abb. 60	Mittelwerte Quotient E-Modul/Biegezugfestigkeit für gefestigte und ungefestigte Bohrkernabschnitte (parallel und senkrecht zur Schichtung orientiert) sowie unbewitterte und bewitterte Probekörper: U (unbehandelt), E (oberflächenbehandelt mit Remmers 300E) und P (VKV mit Remmers 300E).....	59
Abb. 61	Dehnung (A): Die Normalspannung ist senkrecht zur Rissebene; Scherung (B): entgegengesetzte horizontale Bewegungen; Scherung (C): Vertikale Verschiebungen quer zur Richtung der Rissausbreitung. (umgezeichnet nach Twiss & Moores,1992).....	61
Abb. 62	Beispiel einer numerischen Simulation im Diskontinuum über die Zeit.....	62

Abb. 63	Erstellung eines Binärbildes zur Messung der Porosität: Auf dem linken Foto ist das durch Bildbearbeitung betonte blaue Harz zu sehen. Das mittlere Bild zeigt die durch die Threshold Funktion in ImageJ separierte Porosität als Voraussetzung zur Erstellung eines Binärbildes (rechts).....	63
Abb. 64	Kornparameter und die jeweiligen Variablen.	64
Abb. 66	Beispielformen bei Verwendung der Formfaktoren d_{elP} versus ΔA (nach an Heilbronner & Barrett, 2013).	65
Abb. 65	Beispielformen zur Veranschaulichung verschiedener Kornparameter (nach Heilbronner & Barrett, 2013).	65
Abb. 67	Aus Punkten werden über eine Delaunay Triangulation (blaue Linien) Voronoi-Blöcke (rote Linien) generiert, um die Voronoi-Blöcke entsprechend dem Porenraum und den Gesteinskörnern zu verschmelzen (untere Graphik).	67
Abb. 68	Obere Reihe: Vernetzung mittels Voronoi-Blöcke (links) und statistische Zuweisung Porosität (rechts) Mittlere Reihe: Grauwertbild für den Import in UDEC sowie zur Erstellung von Binärbildern (links). Prinzipdarstellung zur Erstellung eines Modells auf Basis von Grauwerten (rechts). Untere Reihe: Generation des geometrischen Modells durch Import der Grauwerte in UDEC (links). Ausschnitt von zufällig generierten Clumps mit 200 Kombinationen aus jeweils 7 Kugeln (rechts).....	68
Abb. 71	Zum Generieren geometrischer Modelle verwendete Grauwertbilder mit unterschiedlichen Porositäten und Gefügen (schwarz = Porosität, weiß = Tonlage, grau = Quarzkörner).	69
Abb. 69	Generierte Partikel werden durch Clumps ersetzt.....	69
Abb. 70	Ablauf bei der Generation eine Clump-Kombination aus drei Partikeln. Partikel 1 besitzt eine definierte Position, Partikel 2 und 3 sind beliebig generiert. Die Kombination bildet annähernd das reale Korn im Hintergrund ab. Untere Reihe mit einfachen Kombinationen: [a] Clump aus drei überlappenden Partikeln mit gleichem Durchmesser, [b] Clump aus einem großen und zwei kleinen Partikeln, [c] Clump aus einem großen und einem kleinen Partikel.	69
Abb. 72	Generation eines geometrisches Modells auf Kugelbasis: [a] Partikel; [b] Ersetzen der Partikel durch Clumps; [c] Geometrisches Modell durch Import der Textdatei in UDEC, hier dargestellt die Normale Steifigkeit der Kontakte; [d] Darstellung der Materialeigenschaften der Blöcke.	70
Abb. 73	Vergleich ΔA und d_{elP} der Körner und Kugelkombinationen (clumps aus 7 Kugeln) entsprechend der Elliptizitätsgruppen (hier grün = Gruppe 3, blau = Gruppe 4; Symbole bleiben bei allen Diagrammen gleich).	71
Abb. 74	Vernetzung und Materialmodell mittels stochastischer Zuweisung: Matrix (blau) und Porenraum (weiß). Die Modellgröße beträgt 10 x 6 cm.	72
Abb. 75	Links: Spannung [Pa] versus axiale Kopfverschiebung [m] (einaxialer Druckversuch). Rechts: Zugspannung [Pa] versus axiale Kopfverschiebung [m] (einaxialer Zugversuch).	73
Abb. 76 Modell mit vertikalen Hauptspannungsvektoren im einaxialen Druckversuch.....	73
Abb. 77	Modell mit Materialstruktur und Horizontalverschiebungen im einaxialen Druckversuch.	73
Abb. 78	Modell mit vertikalen Hauptspannungsvektoren im einaxialen Zugversuch.	74
Abb. 79	Modell mit Materialstruktur und Vertikalverschiebungen im einaxialen Zugversuch.	74
Abb. 80	Simulation der Rissentwicklung bei thermischer Belastung von max. 80°C. Sekundenschritte von oben nach unten: 5 - 50 - 200 - 400. Zu sehen ist ein partielle Entwicklung von Mikrorissen im Temperaturbereich von 80°C (Modellgröße: 12 x 4 cm).....	75
Abb. 81	Simulation der Rissentwicklung bei thermischer Belastung von 100°C. Sekundenschritte von oben nach unten: 5 - 50 - 200 - 400. Fortschreitende Mikrorissentwicklung mit der beginnenden Entstehung durchgängiger Mikrorisse (Modellgröße: 12 x 4 cm).	76
Abb. 82	Simulation der Rissentwicklung bei thermischer Belastung von 200°C. Sekundenschritte von oben nach unten: 5 - 50 - 200 - 400. Vernetzte Mikrorisse und fortschreitendes Risswachstum (Modellgröße: 12 x 4 cm).	77
Abb. 83	Simulation der Rissentwicklung bei thermischer Belastung von 800 °C. Sekundenschritte von oben nach unten: 5 - 50 - 200 - 400. Massives Mikrorisswachstum schon nach ersten Rechnungsschritten (Modellgröße: 12 x 4 cm).	78

Abb. 84 In-situ Festigung einer 3 m großen Attika-Figur auf der Nationalbibliothek/Hofburg Wien, die zur Konservierung nicht entfernt werden konnte. Zwei Geräte, jeweils auf dem LKW und an der Skulptur wurden gekoppelt und es wurde eine Höhe von 30 m überwunden (erstes und zweites Foto). Entstaltung einer Ziegelmauer im Johanniskloster in Stralsund (rechtes Foto, Fotos: Erich Pummer).....	81
Abb. 86 Festigung des Grabmals auf dem Inneren Neustädter Friedhof in Dresden im Oktober 2013.....	82
Abb. 85 Prinzip des VKF-Verfahrens.....	82
Abb. 87 Feuchtegehalt im Sandstein des Grabmals (Höhe 50 cm über Grund) nach der VKV-Entsorgung mit anschließender Kompressenaufgabe (= vor Trocknung, blau) und nach der aktiven Trocknung (rot).....	83
Abb. 88 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 1.....	84
Abb. 89 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 2.....	84
Abb. 90 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 3.....	84
Abb. 91 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 4.....	85
Abb. 92 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 5.....	85
Abb. 93 Ergebnisse der Dampfdiffusionswiderstandsmessungen vor und nach der Festigung an Probenahmepunkt 6.....	85
Abb. 94 Messung der Gesamtwasseraufnahme am ungefestigten und gefestigten Sandstein an den Probenahmepunkten 1 und 5 sowie am gefestigten Sandstein (Probenahmepunkte 2, 4, 6).....	85
Abb. 95 Messung der Hydrischen Dehnung am ungefestigten und gefestigten Sandstein am Probenahmepunkt 1, 5, 2, 4 und 6...	86
Abb. 96 Resthydrophobie auf der Oberfläche des Grabmals: Wasser „perlt“ auf der Steinoberfläche ab (nach VKV).....	86
Abb. 97 Aus Messungen mit dem Karsten-Prüföhrchen berechnete w-Werte an ungetränkten und mit KSE Remmers 300E und VKV getränkten Oberflächen des Grabmals Richter.....	87
Abb. 98 Profile Bohrwiderstand vor und nach der Festigung des Grabmals mittels VKV und KSE 300E + 10 % Beschleuniger.....	88
Abb. 99 Ultraschallgeschwindigkeiten der p-Wellen an Bohrkernen vom Grabmal vor und nach der Festigung mittels VKV und KSE 300E + 10 % Beschleuniger: $[\Delta v1 = n1t - v1t; \Delta v2 = n2t - v2t]$	89
Abb. 100 Profile Elastizitätsmodul vor und nach der Festigung des Grabmals mittels VKV und KSE 300 E + 10 % Beschleuniger.....	90
Abb. 101 Profile Ringbiegezugfestigkeit vor und nach der Festigung des Grabmals mittels VKV und KSE 300 E + 10 % Beschleuniger.....	91
Abb. 102 Schnittdarstellung 1 parallel zur xz- Ebene (links) und Schnittdarstellung 2 parallel zur yz- Ebene (rechts).....	94
Abb. 103 Konturplot Sättigung bei konstantem Unterdruck (links) sowie bei zufällig verteiltem Unterdruck (rechts).....	95
Abb. 104 „Flowplot“ des oberen Bereichs des Grabmals unter der „leaky boundary“- Randbedingung.....	96
Abb. 105 Obere Reihe: Anfangsporendruckverteilung (links) und finale Sättigung (rechts) für „Eindringtiefe“ = 0,00 m. Untere Reihe: Anfangsporendruckverteilung (links) und finale Sättigung (rechts) für „Eindringtiefe“ = 0,03 m.	97
Abb. 106 Fließraten, Schnittdarstellung 1. Linke Seite für „eindringtiefe“ = 0,00 m; rechte Seite für „eindringtiefe“ = 0,03 m.....	98

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Mittels Bildanalyse an Dünnschliffen ermittelte Porositäten vom Cottaer Sandstein.....	17
Tab. 2	Untersuchungen am Grabmal und angewandte Methoden (v.F./n.F = vor/nach Festigung).....	18
Tab. 3	Wasserdurchsatz bei der Entsalzung des Grabmals Richter vom 13. - 19. 06.2013.	33
Tab. 4	Bedingungen der Behandlung von Prüfkörpern aus Cottaer Sandstein	47
Tab. 5	Erläuterungen zu den aus den Sandsteinwürfeln ausgebohrten zylindrischen Prüfkörpern.....	48
Tab. 6	Ermittelte Mittelwerte vom Cottaer Sandstein, gemäß DGGT-Empfehlung Nr. 1	55
Tab. 7	Messungen der Porenradialverteilung am unbehandelten Probekörper (U) sowie an durchtränkten Außenzonen und der vom Festiger nicht erreichten inneren Zone der unterschiedlich behandelten Probewürfel.	58
Tab. 8	Programm der thermischen Belastung der Probewürfel im Klimaschrank (insgesamt 100 Zyklen Erwärmung-Abkühlung).....	60
Tab. 9	Vergleich Parameter zur Erfassung und Klassifizierung von Kornformen	70
Tab. 10	Elliptizitätsgruppen	75
Tab. 11	Klassifizierung nach ΔA vs. ΔP und der Anzahl der Körner und Clumps in der jeweiligen Elliptizitätsgruppe (in Gruppe 1 weder Körner noch Clumps).	75
Tab. 12	Parameter Cottaer Sandstein zur Kalibrierung und Simulation (eigene Laborwerte, außer wenn anders angegeben).....	77
Tab. 13	Übersicht zur Simulation bezüglich Rissentwicklung und -wachstum entsprechend der Materialmodelle des Cottaer Sandsteins, Temperaturbelastung und Festigung (VKV, KSE 300).	84
Tab. 14	Kombination der Randbedingungen für die Simulation.....	103

