

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Geologisch-mineralogische und materialtechnische Untersuchungen
zur Risikoabschätzung von Folgekonservierungen bei Sandsteinen am Beispiel von
Regensburger Grünsandstein und Grünem Mainsandstein



vorgelegt von
Jeannine Meinhardt-Degen
aus
Halle/Saale

München 2005

Erklärung

Diese Dissertation wurde im Sinne von § 4 (Absatz 6 und 8) der Promotionsordnung vom 28. Juli 1997 (in der Fassung der Änderungssatzung vom 6. Juli 2001) von Prof. Dr. Rolf Snethlage angeregt und betreut.

Die Dissertation wurde selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt.

München, Dezember 2005

Die Dissertation wurde am 21.12.2005 eingereicht.

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Rolf Snethlage

2. Berichterstatter: Prof. Dr. Dietrich D. Klemm

Tag der mündlichen Prüfung: 13.03.2006



Dank in Farben

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Zentrallabor des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege. Sie wurde mit finanziellen Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

Für die Anregung und Betreuung dieser Arbeit bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Rolf Snethlage. Seine Diskussionsbereitschaft, seine wohlwollende Unterstützung, seine wertvollen Ratschläge, kritischen Anmerkungen und seine Menschlichkeit haben wesentlich zu deren Gelingen beigetragen.

Herrn Prof. Dr. D. D. Klemm danke ich für die Übernahme des Koreferates und die damit verbundenen Mühen.

Für die Unterstützung bei der Durchführung rasterelektronen-mikroskopischer Untersuchungen danke ich C. Gruber (BLFD), Dr. H. Juhling (MPA Bremen) und M. Reiser (Universität München). Weiterhin danke ich C. Franzen für die Messungen der Sorptionsisothermen, K. Rapp für die Ausführung der Quecksilber-Porositätsmessung sowie Herrn Simonis und Herrn Beyerle für ihre freundliche Unterstützung an der Alten Pinakothek und Schloss Schillingsfürst.



Mein großer Dank und meine Anerkennung gilt den MitarbeiterInnen des Zentrallabors des BLFD, namentlich Vojislav Tucic (Dugi), Mathias Kocher, Edith Woznik, Martin Mach, Sven Horalek, Patricia Dietemann, Ilse Sanya und Charlotte Hien, für ihre wertvolle Unterstützung, Diskussionsbereitschaft und die freundschaftliche Atmosphäre.

Ich bedanke mich bei Michaela Hestermann, die mit ihrer langjährigen Restaurierungserfahrung das Projekt bereicherte und von der ich im praktischen Umgang mit Konservierungsmitteln viel lernen konnte.

Für die fruchtbaren Diskussionen hinsichtlich der Interpretationen der FFT-Spektren bedanke ich mich recht herzlich bei Dr. M. Schultz und G. Dietrich (Firma GAMPT).

Mein Dank gilt L. Sattler für die geduldige Diskussion der Ergebnisse.

Ich danke herzlich meiner Familie und meinen Freunden für Ihre Unterstützung.

Kurzfassung

In der Vergangenheit wurden in Westeuropa sehr viele Sandsteindenkmäler und Fassaden konserviert, um zum einen einer zunehmenden Entfestigung entgegenzuwirken und zum anderen den Hauptantrieb der Verwitterungsprozesse im Gestein, Wasser in flüssigem und gasförmigem Zustand, zu minimieren. In vielen Fällen zeigen die gesteinsphysikalischen Parameter mittlerweile eine deutliche Reduktion der Wirksamkeit der früheren Konservierungsmaßnahmen an. Um einem fortschreitenden Verfall der Bausubstanz entgegenzuwirken, ist oftmals eine erneute Behandlung dieser Objekte erforderlich.

Die Problematik einer Wiederbehandlung liegt darin, durch das Einbringen neuer Konservierungsmittel weder eine Überfestigung zu erreichen noch eine Dampfsperre zu erzeugen.

Ein besonderes Interesse der vorliegenden Arbeit galt der Frage, ob die im Leitfaden Steinkonservierung (SNETHLAGE, 1997) und laut SNETHLAGE & WENDLER (1996) aufgestellten Anforderungskriterien, die die Grundlage der Bewertung des Erfolges einer Konservierungsmaßnahme darstellen, in der Praxis eingehalten werden können bzw. inwieweit ein Abrücken davon vertretbar ist oder ob in der Frage der Wiederbehandlung sogar völlig neue Wege eingeschlagen werden müssen. Eine Abwägung zwischen Risiken und Nutzen einer erneuten Konservierung von Natursteinfassaden ist unbedingt erforderlich. Sollte sich heraus stellen, dass im Falle von Kieselsäureestern und siliziumorganischen Hydrophobierungsmitteln Zweitbehandlungen bei sachgerechter Verarbeitung unbedenklich oder zumindest akzeptabel sind, wäre das ein wichtiges Argument, die tägliche Debatte um die Folgerisiken von Konservierungsmaßnahmen zu versachlichen.

Mit dieser Arbeit ist exemplarisch eine Machbarkeitsstudie einer Wiederbehandlung an zwei, verschiedene Verwitterungs- und Konservierungsproblematiken repräsentierenden, Materialien durchgeführt worden. Zum einen wurde der relativ variantenreiche, karbonatisch gebundene Regensburger Grünsandstein (Oberkreide), verbaut an der Alten Pinakothek in München, und zum anderen zwei Lithotypen des tonreichen Schilfsandsteins (Keuper), verwendet an Schloss Schillingsfürst in Mittelfranken untersucht.

Sowohl zur Bestimmung des Zustandes der ursprünglich applizierten Konservierung als auch zu der Überprüfung der Wirkung der Wiederbehandlung an diversen Musterflächen sind Bohrkerne an der Fassade entnommen worden. Die Proben wurden diversen feuchtigkeits- und festigkeitsrelevanten Untersuchungen unterzogen. Ein besonderer Schwerpunkt lag hierbei auf den Ultraschallmessungen. Zusätzlich sind optische und röntgenographische als auch Sorptions- und Porositätsmessungen durchgeführt worden.

Zunächst wurden an Bohrkernen umfassende Laborversuche durchgeführt, um die erfolgsversprechenden Schutzmittel für die Applikation an der Fassade auszuwählen. Zur Festigung wurden die konventionellen monomeren Kieselsäureethylester Funcosil OH und Silex OH (nur an Schilfsandstein verwendet), der elastifizierte Festiger Remmers 300E sowie Funcosil H, ein Festiger mit hydrophoben Eigenschaften, nahezu ausschließlich am Regensburger Grünsandstein verwendet. Als hydrophobierende Schutzmittel kamen die Alkylalkoxysiloxane Funcosil SNL, SL und UNIL 290 zu Anwendung. Für die Regulierung des zum Teil enormen Quellpotentials des Schilfsandsteins wurde Funcosil Antihygro appliziert.

Die Untersuchungen ergaben, dass eine verdünnte Applikation der Schutzmittel von Vorteil für die Entwicklung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes ist, der ansonsten größtenteils eine enorme Steigerung erfuhr. Der Festigkeitszuwachs ist zwar bei unverdünnter Schutzmittelapplikation größer als bei verdünnter, mit Rücksicht auf die notwendige Dampfdiffusion ist jedoch dieser Kompromiss in der Anwendung denkbar.

Gerade bei den Grünsandsteinen sollte geprüft werden, inwieweit durch die Reinigung der Oberfläche, und einer damit verbundenen Entfernung des hydrophilen Staubs, eine Reaktivierung der Hydrophobierung möglich ist. Somit könnte im Rahmen einer erneuten Konservierung auf die hydrophobierende Wiederbehandlung verzichtet werden, da sie sich in den Untersuchungen als durchaus problematisch herausgestellt hat.

Die rasterelektronische Untersuchung der Schilfsandsteinproben zeigten meistens völlig gestörte oder sogar fehlende Filmüberkleidungen. In diesen Fällen ist natürlich die Reaktivierung der Hydrophobierung nicht möglich. Die Applikation der Schutzmittel führte zu einer wesentlichen Senkung der Wasseraufnahme, allerdings häufig verbunden mit einem deutlichen Anstieg der hygrischen Quellneigung.

Es konnten für beide Gesteine Schutzmittel ausgewählt werden, die im Rahmen einer Wiederbehandlung applikabel sind. Die Untersuchungen zeigten jedoch, dass umfangreiche, materialorientierte Voruntersuchungen dringend notwendig sind, um Folgeschäden zu vermeiden.

Ein Abrücken von den Richtlinien, die in SNETHLAGE (1997) und SNETHLAGE & WENDLER (1996) zur Bewertung einer erfolgreichen Konservierungsmaßnahme aufgestellt worden sind, ist nicht notwendig. Um eine Gefährdung des Materials zu vermeiden, eignen sich diese Normen auch für die Bewertung einer Wiederbehandlung.

Liste der verwendeten Abkürzungen

ab	altbehandelt
ARS	Artificial Reference Stone
atm	Atmosphäre
b	behandelt
BDAC	Butyldiammoniumchlorid
BET	Brunauer, Emmett, Teller - Methode zur Ermittlung der Stickstoff (N ₂)-Adsorptionsisotherme)
BLfD	Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
cos	Kosinus
DFMS	Drilling Force Measuring System
DIN	Deutsches Institut für Normierung e.V.
EDX	Energiedispersive Röntgenanalytik (Energy-Dispersive X-Ray)
FFT	Fast Fourier Transformation
Hg-Porosimetrie	Quecksilber-Porosimetrie
KSE	Kieselsäureester
MB	Messbereich
MEK	Methylethylketon
p-Welle	Primärwelle
POL	Polarisationsmikroskopie
QTM	quellfähige Tonminerale
REM	Rasterelektronenmikroskop
stat	statisch
TEOS	Tetraethylorthosilikat
u	unbehandelt
uv	unverwittert
vak	Vakuum
wb	wiederbehandelt
WB_Fas	Wiederbehandlung an der Fassade
WB_Lab	Wiederbehandlung im Labor

Abkürzungen physikalischer Größen

Å	Angström (10 ⁻¹⁰ m)
A	Fläche der Probe [m ²]
b	Wassereindringkoeffizient [cm · h ^{-0,5}]
C	Konstante (BET Gleichung)
cm	Zentimeter
cm ³	Kubikzentimeter
°C	Grad Celcius
d	Schichtdicke [m]
E	Elastizitätsmodul (E-Modul) [kN/mm ²]
f	Frequenz [Hz]
F _{max}	Bruchkraft [N]
g	Gramm
Gew.-%	Gewichtsprozent
G-Modul	Kompressionsmodul [N/m ²]
h	Stunde
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz

kN	Kilonewton
m	Meter
M.-%	Masse-Prozent
m ²	Quadratmeter
m _a	Auftriebsgewicht [g]
MHz	Megahertz
mm	Millimeter
mm ²	Quadratmillimeter
mm ³	Kubikmillimeter
m _n	Nassgewicht[g]
m _t	Trockengewicht [g]
mV	Millivolt
N	Newton [kg·m/s ²]
nm	Nanometer
p	Druck, Schalldruck
Pa	Pascal [N/m ²]
P _e	effektiver (offener) Porenraum [%]
P _o	Gesamtporosität [%]
p _r	Gleichgewichtsdruck (BET Gleichung) [Pa]
p _s	Partialdruck der gesätt. Luft (bei 21°C: 2,49·10 ³ Pa) [Pa]
r	Porenradius
r.Lf.	relative Luftfeuchtigkeit
s	Sekunde
S _d	Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit [m] (diffusionsäquival. Luftschichtdicke)
T	Ultraschalllaufzeit / Zeit [s, min]
U/min	Umdrehungen pro Minute
V	Beim Gleichgewichtsdruck p adsorbiertes Gasvolumen (BET Gleichung) [m ³]
V	Volt
V _m	Adsorbiertes Gasvolumen einer Monoschicht (BET-Gleichung) [m ³]
v _D	Dehnwellengeschwindigkeit [km/s]
v _S	Scherwellengeschwindigkeit [km/s]
v _R	Oberflächen(Raleigh-)wellengeschwindigkeit [km/s]
Vol.-%	Volumenprozent
vp/ v _L	Ultraschall- bzw. Longitudinalwellengeschwindigkeit [km/s]
WAV	Wasseraufnahmevermögen [%]
w-Wert	Wasseraufnahmekapazität [kg/m ² ·h ^{-0,5}]
x	Gesteinstiefe [mm]
z	Schallimpedanz (Schallwiderstand) [Ns/m ³]
ahy	Hygrische Längendehnung [µm/m]
β _{BZF}	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]
?	Oberflächenspannung (des Quecksilbers) [N/m]
d _L	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft (bei 21°C: 1,96·10 ⁻¹⁰)
e	spezifische Dehnung [m]
T	Randwinkel bzw. Benetzungswinkel
?	Wellenlänge
μ	Poissonzahl, Querdehnungszahl [-]
μ	Wasserdampfdiffusions-Widerstand [-]
µm	Mikrometer
µs	Mikrosekunde
ζ	Amplitude (Teilchenausschlag)
? _{mat}	Reindichte (Matrixdichte) [g/cm ³]
? _{roh}	Rohdichte [g/cm ³]
S	Bruchspannung [MPa]
σ _{GF}	Spannung an der Grenzfläche [MPa]
F	Porosität [%]
ω	Winkelbeschleunigung [rad/s ²]

KURZFASSUNG

LISTE DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN

INHALTSVERZEICHNIS

1. PROBLEMATIK	12
2. ZIELSETZUNG	13
3. KONSERVIERUNG VON NATURSTEINEN - STAND DER WISSENSCHAFT	14
3.1 Hydrophobierung	14
3.1.1 Wirkungsweise der Alkyltrialkoxysiloxane	15
3.2 Festigung	17
3.2.1 Wirkungsweise der Kieselsäureester	19
3.2.1.1 Flexibilisierte Kieselsäureester	20
3.3 Eindringtiefen	21
3.4 Anforderungen an eine Konservierung	22
4. WIEDERBEHANDLUNG – ANGEWENDETE PRODUKTE	26
4.1 Festigende Schutzmittel	26
4.1.1 Funcosil OH	26
4.1.2 Remmers 300E	26
4.1.3 Funcosil H	27
4.1.4 Silex OH	27
4.2 Hydrophobierende Schutzmittel	27
4.2.1 Funcosil SNL	27
4.2.2 Funcosil SL	27
4.2.3 UNIL 290	27
4.2.4 Mikroemulsion Funcosil WS	28
4.3 Quellminderer	28
4.3.1 Funcosil Antihygro	28
5. RESTAURIERUNGSGESCHICHTE DER UNTERSUCHTEN OBJEKTE	31
5.1 Alte Pinakothek in München	31
5.2 Schloss Schillingsfürst in Mittelfranken	32
6. SANDSTEINARIETÄTEN	34
6.1 Regensburger Grünsandstein - Alte Pinakothek	34
6.1.1 Varietät I	35
Mikroskopische Betrachtungen	35
6.1.2 Varietät II	36
Mikroskopische Betrachtungen	36

6.1.3 Varietät III	37
Mikroskopische Betrachtungen	37
6.1.4 Varietät IV	38
Mikroskopische Betrachtungen	38
6.2 Schadensbilder	39
6.3 Schilfsandstein - Schloss Schillingsfürst	40
6.3.1 Originalmaterial, Schilfsandstein der Steinbrüche Diebach und Gailnau, Mittelfranken	40
Mikroskopische Betrachtungen	40
6.3.2 Austauschmaterial, Werksandstein aus dem Steinbruch bei Schleerith, Unterfranken	42
Mikroskopische Betrachtungen	42
6.4 Mineralogische Zusammensetzung	43
6.5 Schadensbilder	46
7. WIEDERBEHANDLUNG	49
7.1 Probenmaterial	49
7.2 Wiederbehandlungstests	50
7.2.1 Regensburger Grünsandstein	50
Untersuchungen im Labor	50
Anwendungen am Objekt	52
Beurteilung der optischen Eigenschaften der Wiederbehandlung	53
7.2.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	54
Untersuchungen im Labor	54
Anwendungen am Objekt	55
Beurteilung der optischen Eigenschaften der Wiederbehandlung	56
8. UNTERSUCHUNGSMETHODEN	58
8.1 Mikroskopische Analysen	58
8.1.1 Polarisationsmikroskopie (POL)	58
8.1.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM)	58
Methodik	58
8.1.2.1 Ergebnisse	58
8.1.3 Kryo-Rasterelektronenmikroskopie (Kryo-REM)	61
Methodik	61
8.1.3.1 Ergebnisse	62
8.2 Methoden zur Bestimmung der Porosität	63
8.2.1 Effektiver Porenraum - Bestimmung über die Wasseraufnahme unter Vakuum	64
Methodik	64
8.2.1.1 Ergebnisse	64
8.2.1.1.1 Regensburger Grünsandstein	64
8.2.1.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	67
8.2.2 Quecksilber Porosimetrie	68
Methodik	68
8.2.3 Sorptionsisotherme	69
Methodik	71
8.2.4 Oberflächenbestimmung nach der BET-Methode	71
Methodik	71
8.2.5 Ergebnisse	72

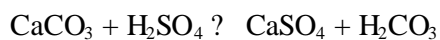
8.3 Methoden zur Überprüfung der feuchtigkeitsrelevanten Parameter	79
8.3.1 Kapillare Wasseraufnahme (w-Wert)	79
Methodik	79
8.3.1.1 Ergebnisse	79
8.3.1.1.1 Regensburger Grünsandstein	80
8.3.1.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	82
8.3.2 Wasserdampfdiffusions-Widerstand	85
Methodik	85
8.3.2.1 Ergebnisse	86
8.3.2.1.1 Regensburger Grünsandstein	86
Funcosil OH und Funcosil H	86
Funcosil OH verdünnt und Funcosil SNL	89
Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt	89
8.3.2.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	91
Funcosil SNL	91
Funcosil SL	92
Funcosil Antihygro	93
UNIL 290 und Mikroemulsion WS	94
Musterfläche/Nordfassade	95
8.3.3 Wasserdampfdiffusions-Leitfähigkeit (Sd-Wert) und Künzel Zahl	99
8.3.3.1 Ergebnisse	99
8.3.3.1.1 Regensburger Grünsandstein	99
8.3.3.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	101
8.3.4 Hygrische Dilatation	102
Methodik	102
8.3.4.1 Ergebnisse	103
8.3.4.1.1 Regensburger Grünsandstein	103
Funcosil OH und Funcosil H	103
Funcosil OH, verdünnt	107
Remmers 300E	108
8.3.4.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	109
Funcosil SNL	109
Funcosil SNL, verdünnt	112
Funcosil SL	112
UNIL 290	113
Funcosil Antihygro	114
8.4 Methoden zur Überprüfung der Festigkeitsparameter	117
8.4.1 Biaxiale Biegezugfestigkeit	117
Methodik	118
8.4.1.1 Ergebnisse	119
8.4.1.1.1 Regensburger Grünsandstein	119
Funcosil OH und Funcosil H	119
Funcosil OH, verdünnt und Funcosil H bzw. Funcosil SNL	122
Remmers 300 E, verdünnt und unverdünnt	123
8.4.1.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	126
8.4.2 Belastungs – Verformungs – Parameter	130
8.4.3 Ultraschalluntersuchungen	134
8.4.3.1 Longitudinalwellenmessung	135
Methodik	136
8.4.3.1.1 Ergebnisse	137
8.4.3.1.1.1 Regensburger Grünsandstein	137
Funcosil OH und Funcosil H	137
Funcosil OH, verdünnt	139
Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt	140
Gegenüberstellung der Longitudinalwellengeschwindigkeit und der Rohdichte	141

8.4.3.1.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	142
8.4.3.2 Fourier-Transformation des Zeitsignals der Longitudinalwellengeschwind.-messung	143
Methodik	144
8.4.3.2.1 Ergebnisse	146
Funcosil OH	147
Funcosil OH, verdünnt	147
Funcosil H	148
8.4.3.3 Dehnwellenmessung	150
Methodik	150
8.4.3.3.1 Ergebnisse	151
8.4.3.3.1.1 Regensburger Grünsandstein	151
8.4.3.3.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	153
8.4.4 Bohrwiderstandsmessungen	153
Methodik	154
8.4.4.1 Ergebnisse	156
8.4.4.1.1 Regensburger Grünsandstein	156
Funcosil OH und Funcosil H	156
Funcosil OH, verdünnt und Funcosil SNL	157
Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt	158
8.4.4.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	160
8.5 Bestimmung der Anionenkonzentration	161
Methodik	162
8.5.1 Ergebnisse	163
8.5.1.1 Regensburger Grünsandstein	163
Funcosil H	163
Funcosil OH, verdünnt und Funcosil SNL	165
Remmers 300E, unverdünnt und verdünnt	166
8.5.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith	167
9. DISKUSSION	171
10. LITERATUR	184
ANHANG	193
Farbtafeln	
Tabellen	

1. Problematik

Seit Mitte der 60er Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurden in Westeuropa, speziell in Deutschland, mehrere tausend Sandsteindenkmäler und Fassaden konserviert. Es sollte damit erreicht werden, einer zunehmenden Entfestigung des Baumaterials entgegenzuwirken, in dem verloren gegangenes Bindemittel durch verschiedene siliziumorganische Gesteinsfestiger ersetzt wurde. Um den Hauptantrieb der Verwitterungsprozesse im Gestein, Wasser in flüssigem und gasförmigem Zustand, zu minimieren, sind in umfangreichem Maße Alkyltrialkoxysiloxane für die Hydrophobierung angewendet worden.

Gesteinsphysikalische Parameter, die sowohl die Feuchtigkeitstransporteigenschaften, als auch die Festigkeits- und Verformungseigenschaften widerspiegeln, zeigen in vielen Fällen eine deutliche Reduktion der Wirksamkeit früher Konservierungsmaßnahmen an. Die fortwährende Luftverschmutzung, heute insbesondere durch NO_x-Verbindungen, und die bereits in den Baumaterialien akkumulierten Schadstoffe aus früheren extensiven Schadstoffemissionen von Industrie und Kraftwerken begünstigen die Alterung der verwendeten Konservierungsmittel und die weitere Verwitterung des Baumaterials. Sie machen die Wiederbehandlung einer Vielzahl von einstmalig behandelten Objekten erforderlich, um den im Ansatz bereits erkennbaren erneuten Substanzverlust zu unterbinden. Mit Hinblick auf eine SO₂-belastete Atmosphäre stellen im Speziellen karbonatische Bindemittel ein Problem dar, da Schwefeldioxid in der Atmosphäre über schwefelige Säure (H₂SO₃) zu Schwefelsäure (H₂SO₄) oxidiert wird. Dieser Protonenüberschuss im Regenwasser verursacht eine verstärkte Auflösung des Karbonats bzw. die Umwandlung in Gips (Formel 1).



Formel 1

Die Problematik einer Wiederbehandlung liegt darin, durch das Einbringen neuer Konservierungsmittel weder eine Überfestigung, noch eine Dampfsperre zu erzeugen.

Die Reduktion der Festigkeit und der elastischen Eigenschaften und die Steigerung der Wasseraufnahme des Baumaterials gehen häufig nur mit einem Teilverlust der ursprünglichen Effektivität der Konservierung einher. Durch fortschreitende Dehydrierungsprozesse initiierte Schrumpfungen bzw. Verdichtungen des Gels führen zu Spannungen, die bei Überschreitung der Kohäsion im Gelverband durch Schrumpfrisse entlastet werden (SNETHLAGE 1984). Durch die Risse wird eine sekundäre Porosität kreiert, welche zum einen den Zusammenhalt des Gefüges stört und zum anderen neue Wegsamkeiten für flüssiges Wasser darstellt. Daraus resultierende, unzureichende gesteinsphysikalische Parameter machen eine erneute Konservierung des Gesteins erforderlich. Aufgrund des nur partiellen Wirksamkeitsverlusts der Konservierungsmittel sind im Speziellen die organischen Reste der siliziumorganischen Substanzen, die für die Hydrophobizität verantwortlich sind, weiterhin nahe der Oberfläche vorhanden. Sie sind unpolar und können somit ein Eindringen neuer Substanzen in größere Gesteinstiefen behindern. Daraus kann sich die Gefahr einer peripheren Überfestigung im Gesteinsprofil ergeben. In Folge einer Wiederbehandlung sind die Wasseraufnahmewerte in den meisten Fällen deutlich reduziert. Diese sehr positiv zu bewertende Entwicklung geht allerdings meistens mit einer stark unterbundenen Dampfdiffusion einher, welche wiederum ein sehr hohes Schadenspotential birgt.

Eine Abwägung zwischen Risiken und Nutzen einer erneuten Konservierung von Natursteinfassaden ist offensichtlich unbedingt erforderlich.

2. Zielsetzung

Sollte sich herausstellen, dass im Falle von Kieselsäureestern und siliziumorganischen Hydrophobierungsmitteln Zweitbehandlungen bei sachgerechter Verarbeitung unbedenklich oder zumindest akzeptabel sind, wäre das ein wichtiges Argument, die tägliche Debatte um die Folgerisiken von Konservierungsmaßnahmen zu versachlichen. Mit dieser Arbeit wurde exemplarisch eine Machbarkeitsstudie einer Wiederbehandlung an zwei unterschiedlichen, sehr gut dokumentierten Baudenkmalen durchgeführt, welche demnach ausgezeichnete Voraussetzungen einer quantifizierten Risikoabschätzung bieten. Die Gesteine beider Objekte repräsentieren verschiedene Verwitterungs- und Konservierungsproblematiken. Da der Schwerpunkt der Anwendung von Kieselsäureestern am ehesten bei Sandsteinen liegt, die aufgrund ihrer Porosität im Normalfall genügend kapillares Saugvermögen besitzen, um eine ausreichende Mittelaufnahme zu garantieren (SATTLER 1992), waren sie Gegenstand dieser Betrachtungen. Bezüglich ihrer Eignung gegenüber einer erneuten Konservierung wurde zum einen der relativ variantenreiche Regensburger Grünsandstein (Oberkreide), verbaut an der Alten Pinakothek in München, und zum anderen zwei Lithotypen des tonreichen Schilfsandsteins (Keuper), verwendet an Schloss Schillingsfürst in Mittelfranken, untersucht.

Ziel dieser Arbeit war eine ganzheitliche Studie über die Auswirkungen der Wiederbehandlung von Sandstein auf der Basis von Untersuchungen der Porosität und daraus resultierenden petrophysikalischen Eigenschaften.

Hierzu werden folgende Teilziele konkretisiert:

- Es sollte überprüft werden, ob durch eine erneute Behandlung der Baumaterialien entscheidende Materialeigenschaften so nachteilig verändert werden, dass daraus noch gravierendere Schäden, wie beispielsweise eine Schalenbildung, resultieren.
- Ein besonderes Interesse galt der Frage, ob die im Leitfaden Steinkonservierung (SNETHLAGE, 1997) und laut SNETHLAGE & WENDLER (1996) aufgestellten Anforderungskriterien in der Praxis eingehalten werden können bzw. inwieweit ein Abrücken davon vertretbar ist oder ob in der Frage der Wiederbehandlung sogar völlig neue Wege eingeschlagen werden müssen.

3. Konservierung von Natursteinen - Stand der Wissenschaft

Es gibt viele Arbeiten über Sandsteine, in denen angestrebt wird, die richtige Behandlung bzw. das passende Schutzmittel für eine spezielle Situation zu finden (WENDLER & PRASARTSET 2000, GROBE ET AL. 2001, WENDLER 2001, MEINHARDT-DEGEN & SNETHLAGE 2002, MALAGA ET AL. 2004). Diese Arbeiten zeigen, dass eine erfolgreiche Behandlung möglich ist. Allerdings sind diese Studien meistens nur genau auf das untersuchte Gestein anwendbar, was, gerade mit Hinblick auf eine Wiederbehandlung, kein verallgemeinerndes Urteil zulässt. Mit zunehmender Komplexität des Substrates bzw. der Restaurierungs- und Konservierungsgeschichte wird eine Abschätzung des Erfolges schwieriger.

Im Folgenden werden die Anliegen und Prozesse hydrophobierender und festigender Behandlungen dargelegt, um zum einen grundlegend in die Problematik der (Wieder-)behandlung von Sandsteinen einzuführen, aber auch um Lösungsansätze aufzuzeigen.

3.1 Hydrophobierung

Mit der Hydrophobierung soll die kapillare Aufnahme flüssigen Wassers unterbunden werden, ohne den Wasserdampftransport des Materials wesentlich zu beeinflussen. Die Charakterisierung von Feststoffeigenschaften als „hydrophob“ hängt sehr eng mit dem Begriff der Sorption zusammen. Hydrophobe Stoffe besitzen keine freien Valenzen an den Oberflächen. Aufgrund der fehlenden Valenzen können weder Wassermoleküle noch gelöste Stoffe gebunden werden, wodurch letztlich eine Benetzung der Oberfläche mit der flüssigen Phase weitgehend verhindert wird (MERKEL & PLANER-FRIEDRICH 2002).

Dadurch wird die Aufnahme von Säuren und Salzen aus dem Regenwasser reduziert. Allerdings ist eine derartige Behandlung nicht in der Lage, die Feuchtedehnung eines Gesteins zu unterbinden, da diese bereits zum großen Teil im hygrokopischen Bereich, d.h. im Bereich des Luftfeuchtewechsels, erfolgt. Dieser Prozess ist hauptsächlich an die Porengrößen gebunden, die von der Kapillarkondensation erfasst werden und auf die die Hydrophobierung keinen Einfluss hat (SNETHLAGE & WENDLER 1996). Die Mobilität der im Porengefüge bereits vorhandenen Salze bleibt trotz hydrophobierender Behandlung in beträchtlichem Umfang erhalten, da das In-Lösung-Gehen und Auskristallisieren von Salzen im Bereich wechselnder Luftfeuchte nicht unterbunden wird. Allenfalls kann man davon ausgehen, dass diese Vorgänge langsamer ablaufen, da der Feuchtetransport durch Diffusion wesentlich langsamer erfolgt als der kapillare Transport von Flüssigkeit (SNETHLAGE & WENDLER 1996).

Die Hydrophobierung mit siliziumorganischen Schutzstoffen ($R'Si(OEt)_3$) führt zur Ausbildung eines

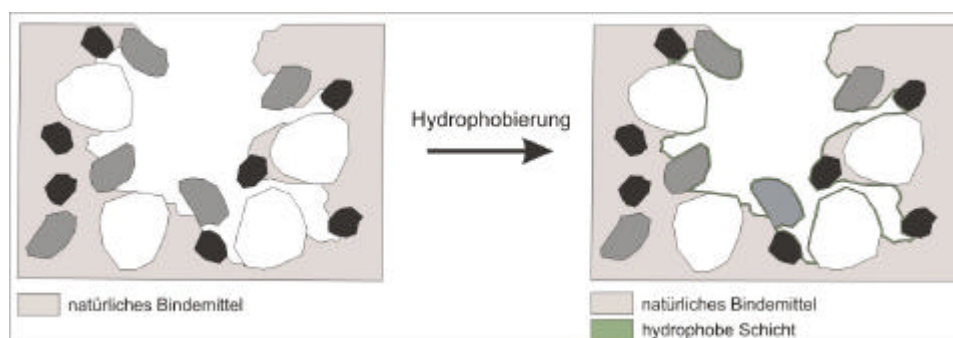


Abb. 3.1: Wirkungsweise siliziumorganischer Schutzstoffe ($R'Si(OEt)_3$) (modifiziert nach GROBE ET AL. 2001).

Die geringe Stärke des hydrophobierenden Films behindert den Transport des Wasserdampfes fast nicht. wasserabweisenden Organopolysiloxan-Films, der sehr dünn ist und unter Umständen nur Moleküldicke besitzen kann (siehe Abb. 3.1).

Die größte Gefährdung durch hydrophobierende Behandlungen liegt darin, dass die Porosität und Permeabilität der Fassadenoberfläche so stark reduziert werden, dass Feuchtigkeit, die beispielsweise über das Fugensystem oder Risse in die Fassade eindringt, hinter der behandelten Zone eingeschlossen bleibt. Das wiederum führt zu einer schnelleren Verwitterung bzw. Schalenbildung aufgrund von Frosteinwirkung, Salzzakkumulation und Veränderung des Bindemittels. Selbst wenn die Porosität und Permeabilität nicht zu stark reduziert sind, verhindert der wasserabweisende Schutzfilm einen Abtransport flüssigen Wassers von innen nach außen (DE WITTE & BOS 1992).

Für die Beurteilung der Wirksamkeit gibt es keine allgemein gültige Festlegung. Mit guter Begründung kann jedoch gefordert werden, dass der w-Wert kleiner als $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ sein muss, um die kapillare Wasseraufnahme eines Baustoffes effektiv zu reduzieren. Andernfalls kann das Porengefüge noch beträchtliche Mengen an Wasser aufnehmen, welche das Gestein für lange Zeit feucht halten und Salze mobilisieren können. Für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit einer Hydrophobierung sollte ein Grenzwert von $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ gelten (SNETHLAGE & WENDLER 1996). Wenn dieser geforderte Wert nicht mehr eingehalten wird, ist die absolute Obergrenze für einen noch akzeptablen wasserabweisenden Effekt überschritten und eine Maßnahme zum Schutz der Bausubstanz wird dringend erforderlich (MEINHARDT-DEGEN & SNETHLAGE 2004).

Sowohl die Effektivität der hydrophobierenden als auch der festigenden Behandlungen nimmt im Laufe der Zeit ab. SNETHLAGE ET AL. (1989) begutachteten 35 Denkmäler in Deutschland, welche in der Vergangenheit hydrophobiert worden sind. Sie fanden heraus, dass in den meisten Fällen ein deutlicher Rückgang der wasserabweisenden Wirkung in den bis dahin vergangenen 10-15 Jahren zu verzeichnen war.

DUKES (1972) merkte bereits an, dass hydrophobierende Behandlungen, die in der Vergangenheit vorgenommen wurden, die Eindringtiefen später folgender, beispielsweise festigender Behandlungen deutlich mindern werden, obgleich Festiger mit organischem Lösungsmittel besser als in Wasser gelöste eindringen würden. Diese Bemerkung gibt einen deutlichen Hinweis darauf, welche Problematik mit einer Wiederbehandlung von Naturstein grundsätzlich verbunden ist. Die Eindringtiefen des neuerlich zu applizierenden Schutzmittels müssen in den verwitterten Bereich des jeweiligen Bausteins ausgedehnt werden, um somit eine Anbindung an das unverwitterte Material zu erzielen.

3.1.1 Wirkungsweise der Alkyltrialkoxysiloxane

Nahezu alle Hydrophobierungsmittel bilden als Endprodukt einen Silikonharzfilm (Polysiloxanfilm) aus. Vorläufer dessen können monomere (Alkyltrialkoxysilan) oder oligomere und polymere Siloxane sein. Entsprechend den TEOS (siehe Kapitel 3.2.1) werden nach der Hydrolyse und Kondensation feste Siloxanverbindungen ausgebildet, die letztlich zur Ausbildung des polymeren Silikonharz führen (siehe Abb. 3.2). Anders als bei den TEOS, wo jedes Siliziumatom von 4 Sauerstoffatomen umgeben ist, wird bei den Alkylsilanen und -siloxanen ein Bindungsarm durch eine Alkylgruppe belegt. Für einen optimalen wasserabweisenden Effekt an der mineralischen Oberfläche sollten diese unpolaren Reste (Alkylgruppe: $-CH_3$ bis $-C_8H_{17}$) nach außen weisen (HONSINGER 1990). Die hydrophoben

Eigenschaften der Polysiloxanfilme werden über die Länge und den Verzweigungsgrad der Alkylgruppen gesteuert. Dabei weisen Produkte mit längeren Alkylketten eine bessere wasserabweisende Wirkung auf, jedoch ist ihr Eindringverhalten bezüglich der engen Poren eingeschränkt. Allerdings bestehen bei den meisten Sandsteinen diesbezüglich keine Probleme, da deren Kapillarporen im Bereich zwischen einem und 100 μm schwanken und diese somit den Durchmesser einer durchschnittlichen Alkylgruppe um das 100- bis 1000fache übersteigen (SNETHLAGE & WENDLER 2000). ROTH (1984) beschreibt, dass mit zunehmender Alkylkettenlänge die Alkalibeständigkeit zunimmt, was allerdings eher für die Anwendung an Betonen relevant ist.

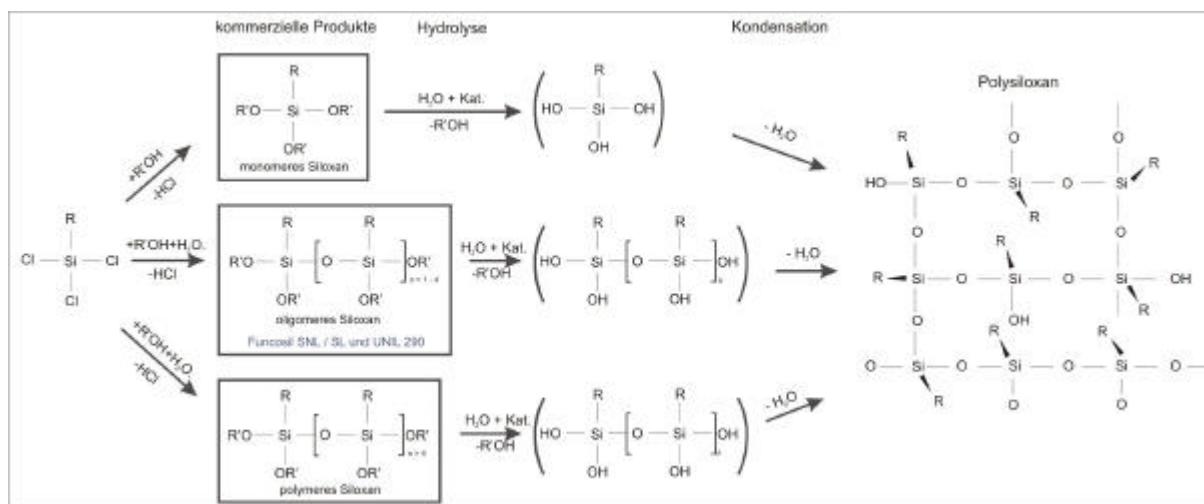


Abb. 3.2: Reaktionsschema zur Bildung von Polysiloxan (Silikonharz). Ausgehend vom Trichloralkylsilan gibt es verschiedene Organosiliciumverbindungen im Handel, die sich in ihrem Polymerisierungsgrad und ihrer Molekülgröße unterscheiden. Die im Projekt angewandten Schutzmittel – Funcosil SL, SNL und Unil 290 gehören zur Gruppe der oligomeren Siloxane (nach SNETHLAGE 1997).

Seit Anfang der 1990er Jahre sind wässrige hydrophobierende Substanzen als Mikroemulsionen erhältlich. Sie haben den wesentlichen Vorteil, dass sie frei von giftigen Lösungsmitteln sind (MAYER & ROTH 1990). Die Tröpfchen der Silane/Siloxane enthalten eine dispergierte Phase (Öl) und werden durch zwei verschiedene Arten von oberflächenaktiven Stoffen (Tenside) stabilisiert. Um Mikroemulsionen mit einem Partikeldurchmesser von 10-80 nm zu erhalten, werden kurzkettige Co-Tenside verwendet, die es der dispergierten Phase ermöglichen, gekrümmte Oberflächen zu bilden. Ein Durchmesser von 10-80 nm ist klein genug, um in enge Poren zu gelangen (SNETHLAGE & WENDLER 2000).

Da die Konzentration von Silanolgruppen auf Quarzoberflächen ziemlich hoch ist, zeigen quarzreiche Sandsteine sehr gute wasserabweisende Eigenschaften in Folge einer hydrophobierenden Behandlung mit Silanen/Siloxanen. Die Polysiloxanfilme sind eng mit der mineralischen Oberfläche verbunden. Ebenso gut ist die Anbindung an den Untergrund, wenn im Vorfeld der Hydrophobierung mit einem Kieselsäureester gefestigt wurde, da somit ebenfalls freie Silanolgruppen an der Oberfläche vorhanden sind.

Im Gegensatz dazu bieten Tonminerale nur randlich Silanolgruppen, die sich zu Siloxanen verknüpfen und Polysiloxanfilme in Segelform von Rand zu Rand der einzelnen Tonpartikel ausbilden können (SNETHLAGE & WENDLER 2000).

3.2 Festigung

Alle Verwitterungsvorgänge führen zu einem Verlust an Festigkeit. Entweder liegt die entfestigte Zone nahe der Oberfläche, wobei ein Absanden einzelner Körner stattfindet, oder in einem tieferen Bereich, was die Ablösung einer Oberflächenschale zur Folge hat. Die eigentliche Ursache für den Festigkeitsverlust ist zunächst eine Schwächung, später eine Aufhebung der Kontaktkräfte zwischen einzelnen Körnern oder Kornaggregaten. Das bedeutet, die zwischen den Gesteinskomponenten bestehenden elektrostatischen und Wasserstoffbrücken-Bindungen werden gelöst (SNETHLAGE & WENDLER 2000). Das Auseinanderbrechen der Kornbindung wird generell durch Dehnungs- und Kontraktionsvorgänge verursacht, die z.B. durch wechselnde Feuchte, Frost, Salzkristallisation oder durch Temperaturunterschiede hervorgerufen werden. In manchen Fällen kann auch ein Herauslösen der Bindemittelsubstanz beteiligt sein. Stets ist die Verwitterung von Gesteinen mit dem Auftreten von Bewegungsvorgängen im Gefüge verknüpft.

Festigende siliziumorganische Schutzmittel werden dazu verwendet, den durch Verwitterung entstandenen Verlust an Kornbindung auszugleichen, verloren gegangenes mineralisches Bindemittel im Baustein zu ersetzen bzw. Polymer-Brücken zwischen den Komponenten auszubilden, um das Gefüge zu stabilisieren (SASSE & HONSINGER 1989, SASSE ET AL. 1993, SNETHLAGE & WENDLER 2000) (siehe Abb. 3.4).

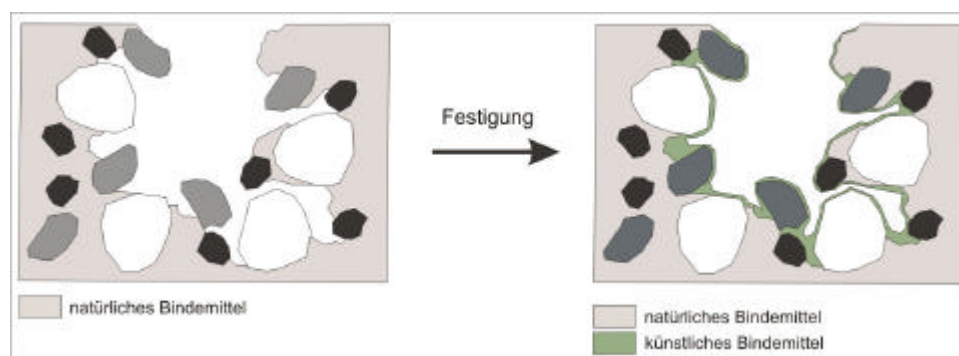


Abb. 3.4: Festigung mit $\text{Si}(\text{OEt})_4$ (TEOS) durch Ausbildung einer künstlichen Bindemittelmatrix aus Kiesegel im geschädigten Porenraum. Die Kieselgelfilme sind stärker als die Polysiloxanfilme. Im Bereich der Porenzwickel kommt es häufig zu Gelaakkumulationen. Der Überzug der einzelnen Minerale ist dünner.

Das eingesetzte Konservierungsmittel soll den Verlust an Festigkeit, hervorgerufen durch den physikalischen und chemischen Angriff der Atmosphären, möglichst bis zu dem Wert des unverwitterten Gesteins ausgleichen (SNETHLAGE 2001). Das Ziel ist die Herstellung eines von innen nach außen homogenen Festigkeitsverlaufs. Die Wirkungstiefe soll bis zum unverwitterten Gestein reichen. In Anbetracht der Inhomogenität aller Baumaterialien und des von Ort zu Ort wechselnden Verwitterungsgrades leuchtet es ein, dass ein homogener Festigkeitsverlauf nur in Einzelfällen verwirklicht werden kann. Man muss aus diesem Grund eine gewisse Bandbreite zulassen, die wohl der allgemeinen Erfahrung entspricht, sich aber nicht streng physikalisch belegen lässt. Der Grad der Überfestigung darf nicht zu hoch ausfallen und der Abfall der Festigkeit am Ende der gefestigten Zone muss in moderater Weise erfolgen (siehe Tab. 3.1 c) (SNETHLAGE 2001). Die gefestigte Zone darf nicht abrupt enden, sondern soll über eine ausreichende Distanz hinweg sanft ausklingen (SNETHLAGE & WENDLER 1996).

Die Festigkeit ist nur einer unter mehreren Parametern für die Beständigkeit eines Gesteins und die Wirksamkeit einer Maßnahme. Entscheidend für die Beurteilung von möglichen Folgeschäden ist

vielmehr der E-Modul. Die Gefahr der Schalenbildung besteht dann, wenn der E-Modul der gefestigten Zone wesentlich über dem des Ausgangsgesteins liegt (SNETHLAGE & WENDLER 1996). Ebenso wie die Hydrophobierungsmittel unterliegen die Festiger Alterierungsprozessen, die zur Beeinträchtigung ihrer Wirksamkeit führen (SATTLER 1992). Probleme in der Anwendung von Festigern können entstehen, wenn sie entweder falsch appliziert werden bzw. ihre Anwendung nicht genau auf den jeweiligen Bedarfsfall abgestimmt wird. Unzureichende Eindringtiefen und - bezüglich der petrophysikalischen Parameter - die Schaffung extrem heterogener Bereiche im Baustein können bereits nach relativ kurzer Exposition zu Schäden des Materials führen (z.B. Schalenbildung). Eine starke Behinderung des Wasser- und Wasserdampftransports kann unter anderem die Akkumulation bauschädlicher Salze im Inneren der Fassade forcieren und somit ebenso eine Schädigung des Bausteins begünstigen (PIACENTI ET AL. 1995).

Untersuchungen haben ergeben, dass eine festigende Behandlung in einem kleinen Zeitrahmen als erfolgreich zu bewerten sein kann, wohingegen auf längere Sicht deutlich wurde, dass die Verwitterung durch die Behandlung sogar begünstigt worden ist und ein Absehen von einer Konservierung für das entsprechende Objekt von Vorteil gewesen wäre (BOYER 1987, DELGADO RODRIGUES 1993).

Unzureichende Eindringtiefen und ein damit verbundener ungenügender Festigkeitszuwachs im verwitterten Fassadenbereich können zum Teil auf ein leichtflüchtiges Lösungsmittel zurückzuführen sein, wobei es aufgrund der raschen Verdunstung des Lösungsmittels zu einer frühen Hydrolyse bzw. Kondensationsreaktion und somit einer Gelbildung nahe der Oberfläche kommt (AURAS 1993). Das Lösungsmittel muss demnach so gewählt werden, dass es dem verwendeten Schutzmittel möglichst lange als Träger zur Verfügung steht, bis das unbehandelte bzw. unverwitterte Material erreicht werden kann.

Weiterhin kann sich der Einsatz vorkondensierter Produkte aufgrund der gesteigerten Partikelgröße unvorteilhaft auf das Eindringverhalten der Schutzmittel auswirken. Laut WENDLER (2003) können für KSE hohe Katalysatorgehalte ungünstig sein, da mit ihnen nur wenig Zeit bleibt, um alle notwendigen Zonen zu erreichen bzw., um genügend Anbindungsstellen zu finden. Dadurch werden alle verfügbaren Verbindungen eingegangen, was eine hohe Spannungsneigung des Gels nach sich zieht. Somit ist in sensiblen Anwendungsfällen nicht unbedingt die mögliche abscheidbare Gelmenge entscheidend für den Behandlungserfolg, sondern die Zeit, die zur Kondensation und Hydrolyse zur Verfügung steht und folglich die Stellen, an denen die Gelbrücken Anbindung an den mineralischen Untergrund finden.

Wenn bereits im Laborversuch zu hohe Festigkeiten und E-Module erzielt werden, ist es ratsam, für die nachfolgende Applikation an der Musterfläche eine Absenkung des Wirkstoffgehaltes vorzunehmen.

Es gibt eine Vielzahl weiterer Komplikationen, die sich aus einer festigenden Behandlung ergeben können. Wenn beispielsweise der Festiger den Anteil an feinen Poren erhöht, so wird, wie bereits bei den Hydrophobierungsmitteln beschrieben, die Empfindlichkeit des Materials gegenüber Frosteinwirkung verstärkt.

Sogar innerhalb eines Gebäudes können die Charakteristik des Baumaterials von einem Quader zum anderen und somit auch das Resultat der Festigung in einer relativ weiten Spanne variieren (MEINHARDT-DEGEN & SNETHLAGE 2002). SNETHLAGE ET AL. (1989) stellten fest, dass Regensburger Grünsandstein, verbaut am selben Gebäude, derartig divers sein kann, dass aus einer einheitlichen,

festigenden Behandlung vollkommen unterschiedliche Ergebnisse resultieren können. In einigen Fällen kam es zu einer Festigung der äußeren geschwächten Zone, wohingegen die gleiche Behandlung auf einer anderen Varietät eine überfestigte Oberflächenzone zur Folge hatte. In weiteren Fällen konnte erfolgreich ein homogener Festigkeitsverlauf und somit ein Anschluss zum gesunden Stein erzielt werden. Ein homogenes Tiefenprofil ist selbstverständlich das angestrebte Ziel einer Festigungsbehandlung.

Im Rahmen des Projekts wurden zur Festigung ausschließlich Kieselsäureester verwendet, da zum einen die ursprüngliche Konservierung auf dieser Basis durchgeführt wurde, aber auch, weil langjährige Praxiserfahrungen diese Schutzmittel generell als sehr vorteilhaft klassifizieren.

3.2.1 Wirkungsweise der Kieselsäureester

Kieselsäureester gehören chemisch zur Gruppe der siliziumorganischen Verbindungen. Diese stellen Verbindungen zwischen der anorganischen Orthokieselsäure ($\text{Si}(\text{OH})_4$) und Ethylalkohol ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{OH}$) dar. Die genaue Bezeichnung lautet Orthokieselsäure-Tetraethylester bzw. Tetraethoxysilan (TEOS). Die chemische Reaktion im Porengefüge des zu festigenden Stoffes besteht aus einer Hydrolyse (siehe Abb. 3.5, Formel 2) und der nachfolgenden Kondensationsreaktion (siehe Abb. 3.6, Formel 3). Kieselsäureester hydrolysieren unter Einfluss von Umgebungsfeuchtigkeit und mit Hilfe von geeigneten Katalysatoren. Für die Reaktionsbeschleunigung werden Säuren, Basen oder organische Katalysatoren eingesetzt. Die Funktionsweise der Katalysatoren und ihr Einfluss auf die Gelstruktur werden in SNETHLAGE (1984) beschrieben. Bei den neueren Produkten werden in aller Regel organische Zusätze wie Dibutyl-Zinn-Dilaurate oder Amine verwendet (SNETHLAGE & WENDLER 2000). Die Substituenten OR werden in SiOH Funktionen überführt und die Reste R als Alkohol ROH abgespalten. Das Zwischenprodukt auf dem Weg zum amorphen Kieselgel ist die instabile Orthokieselsäure. Die Polykondensationsreaktion unter Abspaltung von Wasser liefert als Endprodukt amorphes Kieselgel unterschiedlicher Kondensationsgrade, das als mineralische Substanz in den Porenraum abgeschieden wird und somit zur Festigung des Baustoffs beiträgt. Der bei der Hydrolyse abgespaltene Alkohol verdampft rückstandsfrei.

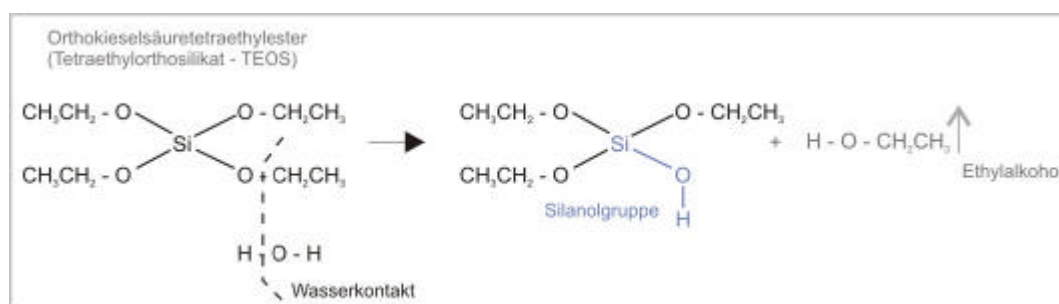


Abb. 3.5: Hydrolysereaktion. Von einem Ast des Ethylsilikattetraeders spaltet ein Wassermolekül den organischen Rest ab. Durch die Ankopplung des Wasserstoffs entsteht die Silanolgruppe (Si-O-H). Der freiwerdende Alkohol entweicht.



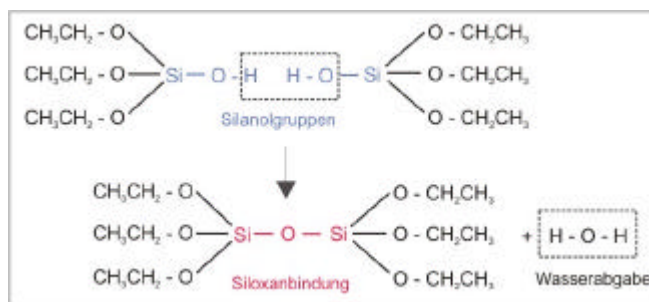


Abb. 3.6: Kondensationsreaktion. Zwei Silanolgruppen verbinden sich unter Abgabe eines Wassermoleküls zu einer festen Siloxanbindung (Si-O-Si). Die Orthokieselsäuren verbinden sich somit zu Polykieselsäuren. Anfänglich entstehende kettenförmige Polykieselsäuren können über noch verbleibende Hydroxylgruppen weiter polykondensieren und sich 3-dimensional vernetzen.

Das Endprodukt der auf dem Markt erhältlichen, konventionellen Kieselsäureesterprodukte ist ein sich im Porenraum ausbildendes Kieselgel, welches aus einem ungeordneten wasserhaltigen SiO_2 -Gerüst aufgebaut ist und einen deutlich spröden Charakter besitzt (BOOS ET AL. 1997). Aus diesem spröden Charakter des Kieselgels resultiert eine mittlere Größe der Kieselgelplatten von ca. $10\ \mu\text{m}$ und einer gleichzeitig auftretenden Sekundärporosität innerhalb des Kieselgelgerüsts. Diese Sekundärporosität sorgt einerseits für den Erhalt von Kapillarität und Wasserdampfdurchlässigkeit des gefestigten Materials, andererseits begrenzt die beschriebene Gelplattengröße jedoch den Einsatzbereich dieser konventionellen Kieselsäureester (BOOS ET AL. 1997).

Dieses Gel kann sich über Hydrolyse verbliebener Silanol-Enden wiederum mit Silanolgruppen der Mineraloberflächen verbinden (SNETHLAGE & WENDLER 2000).

Die Adhäsion des Gels ist dort am stärksten, wo der Gelfilm das gesamte unterlagernde mineralische Substrat berührt.

Die mechanischen Eigenschaften eines Polymers werden hauptsächlich durch dessen Molekulargewicht und dem Alter des Polymers kontrolliert (HORIE 1987). Die physikalischen Eigenschaften des Polymers müssen dem angestrebten Behandlungsergebnis angepasst werden. Zeigt das zu behandelnde Substrat eine stärkere Quell- und Schrumpfungseigenschaft, als das applizierte Polymer zu ertragen bereit ist, kann es in dem abgeschiedenen Gel zu Rissen und Deformationen kommen, die wiederum dessen Wirksamkeit vermindern. Wenn das Polymer zu fest ist und einen geringen E-Modul besitzt, kann es zu einer Ablösung des Gelfilms von der Oberfläche kommen (HORIE 1987).

3.2.1.1 Flexibilisierte Kieselsäureester

Flexibilisierte Kieselsäureester wurden entwickelt, um dem spröden Charakter der konventionellen Festiger zu entgegnen und um die Gelplattengröße so zu verändern, dass eine Überbrückung weiterer Porenräume möglich ist (BOOS ET AL. 1999). Derartige Gele bilden im Laufe des Alterungsprozesses nahezu keine Schrumpfungsriss aus. Die Flexibilität der TEOS wird durch die Integration von Weichsegmenten in die rigide Struktur des Kieselgels erreicht. Das primäre Ziel dieser Modifizierung ist ein moderater Anstieg des E-Moduls in den gefestigten Zonen morbider Materialien. Es wird angestrebt, die mechanische Kompatibilität gefestigter und ungefestigter Zonen zu optimieren und die Gefahr einer Schalenbildung zu reduzieren. Die entsprechenden Gele können je nach Wahl des Weichsegments hydrophob (Bimethyl-Siloxan-Weichsegment) oder nicht-hydrophob (Polyether-Weichsegment) sein. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit Remmers 300E ein nicht-hydrophob eingestellter elastifizierter KSE eingesetzt (siehe Abb. 3.7).

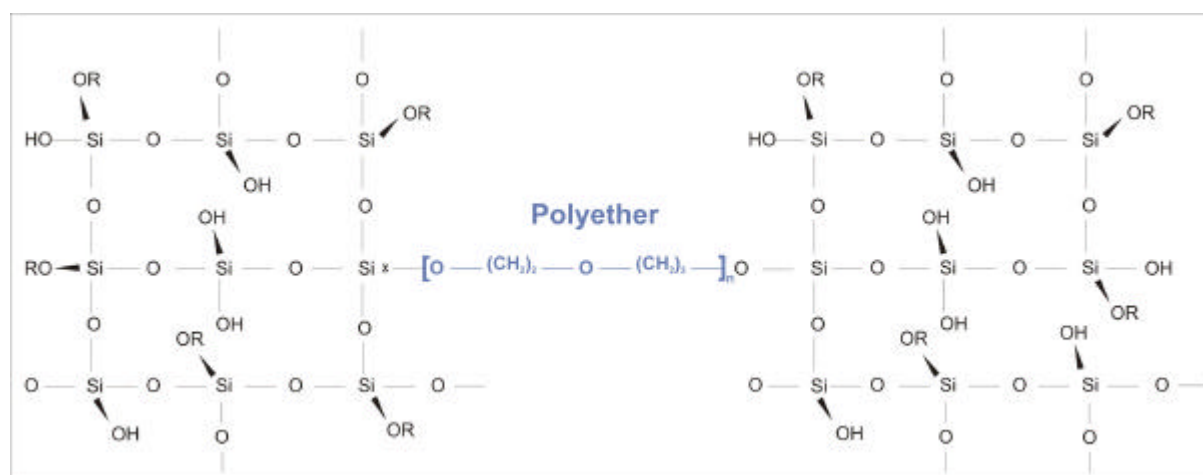


Abb. 3.7: Elastifizierung von Kieselgel durch die Einbindung von Weichsegmenten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein KSE mit eingebauten Polyether-Weichsegmenten zum Zweck einer moderaten Steigerung des E Moduls eingesetzt (nach SNETHLAGE & WENDLER 2000).

Mit Hinblick auf den Zeitrahmen, in dem Konservierungen mit siliziumorganischen Steinschutzstoffen angewandt werden, ist es verständlich, dass es bezüglich der Wiederbehandlung unter natürlicher Bewitterung und komplexen Umweltsimulationen nur wenige reale Studien gibt. Verschiedentlich wurden Verwitterungssimulationen in Kauf genommen, um die Nachträglichkeit von Natursteinflächen zu untersuchen. SCHWAMBORN (1996) stellte im Rahmen eines europäischen Forschungsvorhabens zur Nachträglichkeit von Natursteinflächen mit Silan/Siloxan (Wirkstoffgehalt 20 M.-%, Lösungsmittel Wasser) auf Ebenheider Sandstein fest, dass sich in behandeltem und im Anschluss künstlich gealtertem Material im REM lediglich ein dünner, oberflächlicher Film detektieren lässt. Die Wasseraufnahme wurde in Folge der Nachbehandlung deutlich reduziert, wenn auch mit nur geringer Wirkungstiefe. Erwartungsgemäß konnten bezüglich der Festigung keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden. Im äußersten Bereich entstand eine feste Schale mit hohem E-Modul (SCHWAMBORN 1996).

Auch aus dieser Arbeit wird ersichtlich, dass die relevanten Parameter für die Beurteilung einer Wiederbehandlung – Dampfdiffusion, Reduktion der Wasseraufnahme, Anheben der Festigkeit ohne das Risiko eines zu hohen E-Moduls – extrem stark vom konservierten Substrat abhängen und somit eine pauschalisierte Rezeptur für eine erneute Behandlung nahezu unmöglich ist. Es bedarf für jeden Naturwerkstein umfangreicher Vortests im Labor, die mindestens Messungen der kapillaren Wasseraufnahme, des Wasserdampfdiffusions-Widerstands, der Biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls umfassen müssen. Jede weitere Messung, wie Ultraschalllaufzeit, Bohrhärte und hygrische Dehnung sind ebenfalls zu einer exakten Einschätzung der Machbarkeit einer erneuten Behandlung ratsam.

3.3 Eindringtiefen

Für die Überlegungen zur Konservierung ist es wichtig, die Lage des Maximums der mittleren Feuchteverteilung zu kennen, da dadurch die notwendige Eindringtiefe für die Behandlung vorgegeben wird. Die Eindringtiefe sollte größer als die Zone der maximalen mittleren Feuchte sein. An der Innenseite dieses Maximums beginnt die Gesteinszone, welche von kurzzeitigen Schwankungen des Klimas und der Umgebungsfeuchte nicht mehr wesentlich betroffen ist. Daraus ergibt sich für Gesteine mit niedrigem w -Wert eine erforderliche Eindringtiefe von 10-20 mm, für

Gesteine mit mittlerem w-Wert von 30-40 mm und für Gesteine mit hohem w-Wert von über 50 mm (SNETHLAGE ET AL. 1995).

In der Literatur findet man des Weiteren den Hinweis, dass die Schutzmittel mindestens 25 mm (RICHARDSON 1995) bzw. tiefer in das verwitterte Gestein eindringen sollten, um die Ausbildung eines dünnen, oberflächlichen Films mit extrem abweichenden petrophysikalischen Kennwerten zu vermeiden. Für die Wiederbehandlung an den Objekten gelten diese Richtlinien nur bedingt. Die Schutzmittel der ursprünglichen Konservierungsmaßnahme haben in den meisten Fällen zwar keinen geschlossenen Film, aber dennoch unpolare Reste auf der Mineraloberfläche hinterlassen, die das Eindringen neuer Substanzen in größere Gesteinstiefen behindern können. Weiterhin lagern sich auf einer bereits behandelten Oberfläche mit zunehmender Expositionszeit zum Teil größere Mengen an Staubpartikeln (Ruß und ölige Verbrennungsrückstände) ab. Gerade die öligen Rückstände können bei nicht gereinigter Fassade das Eindringverhalten deutlich beeinflussen. Staub ist hydrophil. Eine Wasseraufnahmeprüfung an einer verstaubten Fassadenoberfläche kann daher zu einer Fehleinschätzung der Dauerhaftigkeit der ursprünglich applizierten Schutzmittel führen. Die zu Beginn der Messung aufgenommene Wassermenge kann demnach die tatsächliche Wasseraufnahmekapazität des behandelten Gesteins übersteigen.

In den Wiederbehandlungstests wurde versucht, die Eindringtiefen und Mittelaufnahme verschiedener Schutzmittel durch eine Absenkung des Wirkstoffgehalts zu optimieren. Eine Modifikation der Wirkstoffgehalte wurde durch Verdünnung der Agenzien entweder mit Ethanol oder Methylethylketon erreicht. Der Wirkstoffgehalt der Konservierungsmittel gibt den Anteil an Polymer und festen Wirkstoffen an, der nach Applikation und nach Abdampfen der flüchtigen Bestandteile als Festkörper im behandelten Porenraum zurück bleibt. Flüchtige Bestandteile, wie zum Beispiel die verwendeten Lösemittel, werden dem Wirkstoff in erster Linie zur Viskositätserniedrigung zugegeben.

3.4 Anforderungen an eine Konservierung

Die Charta von Venedig besagt, dass zur Sicherung eines Denkmals alle modernen Konservierungs- und Konstruktionstechniken herangezogen werden können, deren Wirksamkeit wissenschaftlich nachgewiesen und durch praktische Erfahrung erprobt ist (CHARTA VON VENEDIG 1964). In den Grundsätzen der Denkmalpflege aus dem Jahr 1994 (PETZET 1992) steht geschrieben, dass Konservierungsmaßnahmen, die den materiellen Bestand eines Denkmals sichern und weiteren Substanzverlust vorbeugen, ebenso wie Sicherungsmaßnahmen in jedem Fall den absoluten Vorrang vor allen anderen Maßnahmen haben sollten. Auf dieser Basis gründet sich auch das Bestreben einer Wiederbehandlung historischer Bausubstanz und somit die hier durchgeführten Untersuchungen. Ursprünglich wurde die „Reversibilität“ aller restauratorischen Maßnahmen gefordert. Allerdings sind alle Konservierungsmaßnahmen in der Regel irreversibel. Es ist jedoch anzustreben, dass eine neue konservierende Maßnahme alle Optionen für eine weitere Behandlung in ferner Zukunft ermöglicht. Aus diesem Grund wurde der Begriff der „Wiederbehandelbarkeit“ („retreatability“) eingeführt (PETZET 1992).

Zur Beurteilung eines angemessenen Verhaltens von Hydrophobierungs- und Festigungsmitteln werden generell verschiedene Kriterien beachtet und deren Erfüllung angestrebt:

- gute Anbindung zum mineralischen Untergrund (siehe Abb. 8.1)

- Eindringtiefen in den Stein von mindestens 25 mm (RICHARDSON 1995) bzw. in tiefere Bereiche des verwitterten Gesteins, um die Ausbildung eines dünnen, oberflächlichen Films mit vom unverwitterten Material extrem abweichenden petrophysikalischen Kennwerten zu vermeiden. (In der Literatur besteht in gewissen Grenzen Uneinigkeit darüber, ob wasserabweisende Behandlungen eher an den nahen Oberflächenbereich der Fassade gebunden sein sollte (ŠRÁMEK 1993) oder besser tiefer in den Baustein eindringen sollten. Möglicherweise verhindern beide Methoden ein Voranschreiten der Verwitterung. Während die Konservierung mit nur geringen Eindringtiefen den Einschluss von Feuchtigkeit, die eventuell seitlich über das Fugensystem in den Baustein einwandert, in größeren Gesteinstiefen verhindern würde, kann die tiefer reichende Behandlung den Kontakt des unbehandelten Materials mit Wasserdampf unterbinden.)
- Toleranz gegenüber den an der Fassade vorkommenden Temperaturen (Sasse et al. 1993)
- keine Blockade der Porosität des Gesteins bzw. keine signifikante Steigerung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes. (Es gibt in der Literatur verschiedene Ansichten, ob wasserabweisende Schutzmittel, die an der Grenze zwischen behandelter und unbehandelter Zone die Verdunstung von Wasser provozieren, eine Beschleunigung der Verwitterung bewirken oder nicht (DE WITTE & BOS 1992, ŠRÁMEK 1993).)
- Die Porosität des Materials sollte nicht in dem Maße verändert werden, dass die Empfindlichkeit gegenüber Frost-Tauwechseln ansteigt. Gesteine mit einem Porenmaximum im Bereich der Mikroporen sind gegenüber dem Frost-Tauwechsel empfindlicher.
- Das Schutzmittel sollte die physikalischen Eigenschaften des verwitterten Materials möglichst denen des unverwitterten Materials annähern (z.B. Farbe, hygri sche Dehnung, thermische Dehnung, Porosität, Biaxiale Biegezugfestigkeit, E-Modul, Ultraschallgeschwindigkeit)

Im Folgenden werden wichtige Kriterien aufgeführt, die laut dem Leitfaden Steinkonservierung (SNETHLAGE 1997) bzw. den Anforderungen nach SNETHLAGE & WENDLER (1996) eine erfolgreiche Konservierung charakterisieren, um sie den Ergebnissen dieser Arbeit an späterer Stelle gegenüberzustellen und die Qualität der Resultate zu beurteilen. Es wird damit nicht beabsichtigt, die denkmalpflegerischen Vorhaben in ein Netz von starren Regeln zu pressen und die Erfüllung der Norm zum übergeordneten Kriterium erwachsen zu lassen.

Tab. 3.1_a-c: Anforderungen an eine erfolgreiche Konservierung (nach SNETHLAGE 1997 und SNETHLAGE & WENDLER 1996), definiert durch die Änderung wichtiger Gesteinseigenschaften, bezogen auf das unbehandelte Gestein (u: unbehandeltes Gestein, b: behandeltes Gestein).

Eigenschaft	Symbol [Einheit]	Anforderung
Farbe	-	möglichst keine Änderung
Dunklung	-	möglichst keine Änderung
Glanz	-	möglichst keine Änderung
Wirkungstiefe des Schutzmittels	s [cm]	Notwendige Wirkungstiefe abhängig vom kapillaren Saugvermögen des Steins: s = 1 für $0,1 = w(u) = 0,5$ s = 3 für $0,5 = w(u) = 3,0$ s = 6 für $w(u) = 3,0$ Die Eindringtiefe sollte größer als die Zone der

		max. mittleren Feuchte sein.
REM-Befund		Brückenbildung, Haftverbund mit Mineralkörnern, Durchtränkung von Tonmineraloberflächen

Vielmehr sollen auf streng naturwissenschaftlicher Basis Anforderungskriterien genannt werden, welche nach dem Stand des derzeitigen Wissens geeignet sind, den Erfolg einer Konservierungsmaßnahme zu beurteilen und Fehlanwendungen auszuschließen.

Tabelle 3.1_a gibt zum einen visuelle, aber auch das Eindringverhalten charakterisierende Anforderungskriterien an eine erfolgreiche Konservierung wieder. Die folgende Übersicht (3.1_b) listet all jene Richtlinien auf, denen das Feuchtigkeitsaufnahme und -transportverhalten des Gesteins im Anschluss an eine behandelnde Maßnahme entsprechen sollte.

Tab. 3.1_b

Eigenschaft	Symbol [Einheit]	Anforderung
Hygrische Längendehnung	a_{hy} [μ m/m]	$a_{hy}(b) = 1,2 \cdot a_{hy}(u)$, d.h. eine maximale Steigerung von 20 % gegenüber a_{hy} des unbehandelten Gesteins
Wasseraufnahmekoeffizient	w [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$]	$w(b) = w(u)$, d.h. die kapillaren Wasseraufnahme sollte gleich bleiben oder abnehmen $w < 0,1 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$, um kapillare Wasseraufnahme der Baustoffs effektiv zu reduzieren.
Wassereindringkoeffizient	b [$\text{cm} \cdot \text{h}^{-0,5}$]	$b(b) = b(u)$, d.h. der Wassereindringkoeffizienten sollte gleich bleiben oder abnehmen
Wasserdampfdiffusions-Widerstand	μ [dimensionslos]	$\mu(b) = 1,2 \cdot \mu(u)$, d.h. maximal ist eine Erhöhung um 20 % zulässig
Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit diffusionsäquival. Luftschichtdicke	S_d [m] $S_d = \mu \cdot s$	$S_d(b) \approx S_d(u)$, möglichst geringe Zunahme
Künzel-Zahl	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{h}^{-0,5}$ $w \cdot S_d$	$(w \cdot S_d)_b = (w \cdot S_d)_u$
Wasserdampfsorption	-	Keine Erhöhung der Sorption, insbesondere nicht im Bereich von 70 bis 95 % rel. Feuchte
Erläuterungen für S_d : Da für das Gestein keine Schichtdicke d definiert ist, muss als Schichtdicke die Dicke der von kurzfristigen Feuchteschwankungen erfassten Oberflächenschicht eingesetzt werden. Diese ist etwas größer als die Lage des Maximums der mittleren Feuchte. Als Faustregel kann gelten: $w(u) = 0,1 \dots 0,5 \rightarrow d = 1,0 \text{ cm}$; $w(u) = 0,5 \dots 3,0 \rightarrow d = 3,0 \text{ cm}$; $w(u) > 3,0 \rightarrow d = 6,0 \text{ cm}$.		

In der folgenden Tabelle (3.1_c) sind die Richtlinien aufgeführt, die für die Qualitätsprüfung einer Natursteinfestigung herangezogen werden sollten. Es ist notwendig, stets die hier aufgeführte Biegezugfestigkeitsmessung und E-Modul-Bestimmung oder Haftzugfestigkeitsmessungen vorzunehmen. Für ein umfangreicheres Verständnis der Festigkeitseigenschaften des Materials sind zusätzlich Ultraschalluntersuchungen und Bohrwiderstandsmessungen zu empfehlen. Die Bohrwiderstandsmessung hat den Vorteil einer unterbrechungsfreien Darstellung des Festigkeitsprofils.

Tab. 3.1_c

Eigenschaft	Symbol [Einheit]	Anforderung
Biegezugfestigkeit	β_{BZF} [N/mm ²]	$\beta_{BZF}(b) = \beta_{BZF}(u)$ ausgeglichenes Festigkeitsprofil, ansonsten $\beta_{BZF}(b) = 1,5 \cdot \beta_{BZF}(u)$ und $\beta/x < 0,2$ N/mm ² · mm (x = Gesteinstiefe), d.h. ein möglichst ausgeglichenes Festigkeitsprofil mit max. 50 %iger Überfestigung der Außenzone und sanftem Festigkeitsabfall. Der Festigkeitsabfall auf das Niveau des unverwitt. Gesteins sollte erst hinter der Zone der max. mittl. Feuchtigkeit erfolgen.
E-Modul	E [kN/mm ²]	$E(b) = 1,5 \cdot E(u)$ und $E(b)/\beta(b) = E(u)/\beta(u)$, d.h. möglichst ausgeglichenes E-Modul-Profil, $E/x = 1$ kN/mm ² ·mm, E-Modul-Anstieg darf nicht größer sein als der Festigkeitszuwachs.
Ultraschallgeschwindigkeit	v_p [km/s]	$v_p(b) = v_p(u)$, bzw. ein ausgeglichenes Festigkeitsprofil
Bohrwiderstand	Θ (Steigung der Bohrkurve), Bohrfortschritt mm/Zeit	ausgeglichenes Bohrhärteprofil

4. Wiederbehandlung – angewendete Produkte

Die beiden unterschiedlichen Lithotypen wurden für diese Untersuchungen ausgewählt, da sie verschiedene Verwitterungsproblematiken repräsentieren und damit verbunden verschiedene Konservierungsstrategien erfordern. Der Schwerpunkt der Wiederbehandlung der tonreichen Schilfsandsteine liegt bei der Optimierung der hydrophoben Eigenschaften des Materials bzw. einer Minimierung der Quellneigung. Untersuchungen des karbonatisch gebundenen Regensburger Grünsandsteins zeigen, dass im Laufe der Bewitterung nach der ersten Schutzmittelapplikation zwar die Eigenschaften des Feuchtehaushalts weitestgehend zufrieden stellend sind, die Festigkeitsparameter allerdings varietätenabhängig anzeigen, dass eine fortwährende Beobachtung der Entwicklung notwendig ist, um der nachlassenden Festigkeit rechtzeitig Einhalt zu gebieten.

Neben der Neigung des Schilfsandsteins zur spontanen und erzwungenen Wasseraufnahme liegt das hauptsächliche Schadenspotential in extremen hygrischen Dehnungsbeträgen, die bis zu 5 mm pro Meter erreichen können. Mit dem Hintergrund, durch eine erneute Behandlung diesem Schädigungspotential entgegen zu wirken, wurde unter anderem der chemische Quellminderer Funcosil Antihygro sowohl im Rahmen der Testphase im Labor als auch auf den Musterflächen an der Fassade appliziert.

Zunächst wurden umfassende Laborversuche durchgeführt, um die erfolgsversprechenden Schutzmittel für die Applikation an der Fassade auszuwählen. Jedoch kann im Labortest weder allumfassend jeder Schritt einer Konservierung bis ins Detail nachempfunden werden, noch ist es möglich exakt den Schutzmittelverbrauch für jede beliebige Stelle der zu behandelnden Fassade vorab zu bestimmen. Die Bausubstanz ist oftmals inhomogener als der Ausschnitt, der durch den entnommenen Bohrkern repräsentiert wird (z.B. wechselnde Tongehalte oder Bioklastenbruchstücke). Somit bleibt trotz umfangreicher und ausführlicher Vortests im Labor ein nicht exakt zu kalkulierender Schwankungsbereich der Ergebnisse und folglich ein gewisses Restrisiko, das wiederum durch die Arbeit erfahrener Restauratoren ausgeglichen werden kann.

4.1 Festigende Schutzmittel

Soweit nicht anders angegeben, wurden die vom Hersteller anwendungsfertig gelieferten Produkte verwendet und keiner Modifikation unterzogen.

Die Konzentration des Wirkstoffs im Lösungsmittel liegt bei ca. 75 %. Eine vollständig ablaufende Gelaushärtung vorausgesetzt, ergeben somit 1000 g KSE-Lösung und ein TEOS-Gehalt von 750 g etwa 300 g abgeschiedenes Kieselgel.

4.1.1 Funcosil OH

Hierbei handelt es sich um einen monomeren Kieselsäureethylester (KSE), der zu 75 M.-% in Keton gelöst ist. Das reaktionsbedingte Nebenprodukt Ethanol entweicht. Das Katalysatorsystem ist ph-neutral. Der Festiger ist nicht hydrophob eingestellt.

4.1.2 Remmers 300E

Remmers bzw. Funcosil 300E ist ebenfalls ein monomeres Kieselsäureester ohne Vorkondensierung. Er wird ohne Lösungsmittel aufgetragen. Zum Zweck einer verbesserten Eindringtiefe (bei geringeren Gelabscheideraten) wurde Remmers 300E für diese Untersuchung im Volumenverhältnis 1:2 mit

Ethanol verdünnt. Als markanten Unterschied im Vergleich zum „konventionellen“ Steinfestiger Funcosil OH sind in die Gelstruktur des Festigers 300E Polyethergruppen als Weichsegmente integriert (nicht hydrophob). Die Gelabscheidungsrate beträgt ca. 30 %. Es reagiert mit dem im Porensystem eingelagerten Wasser bzw. mit der Luftfeuchtigkeit. Bei dieser Reaktion wird über Weichsegmente verknüpftes (elastifiziertes), amorphes und wasserhaltiges Siliziumdioxid als Bindemittel abgeschieden. Das Katalysatorsystem ist pH-neutral.

4.1.3 Funcosil H

Bei diesem Schutzmittel handelt es sich ebenfalls um einen Steinfestiger auf der Basis eines Kieselsäureesters. Die Konzentration des Wirkstoffs im Lösungsmittel liegt bei ca. 75 %. Die Gelabscheidungsrate beträgt 30 %. Zusätzlich verfügt dieses Produkt über eine hydrophobierende Komponente auf der Basis von Tri-alkoxysilan.

4.1.4 Silex OH

Silex OH ist ein farbloses Festigungsmittel auf Kieselsäureesterbasis. Es enthält keine hydrophobierende Komponente. Der Wirkstoffgehalt beträgt 75 Gew.-% und die Gelabscheidungsrate 33 Gew.-%. Damit entspricht dieser Festiger nahezu Funcosil OH.

4.2 Hydrophobierende Schutzmittel

4.2.1 Funcosil SNL

Bei Funcosil SNL handelt es sich um ein anhydrolisiertes Silan (Siloxan). Diese reaktive, oligomere Siloxanlösung ist gewählt worden, da aufgrund der niedermolekularen Struktur eine relativ gute Penetrationsfähigkeit gegeben sein müsste. Nach der Wirkstoffbindung beträgt der Polysiloxangehalt ungefähr 5 M.-%.

4.2.2 Funcosil SL

Funcosil SL ist ein niedermolekulares Alkylalkoxysiloxan (reaktive oligomere Siloxanlösung). Aufgrund der niedermolekularen Struktur besitzt die Substanz eine sehr gute Penetrationsfähigkeit. Der Polysiloxangehalt nach Wirkstoffbindung beträgt ca. 5 %. Das Produkt enthält Silikonkautschuk-ähnliche Zusätze, um die Anbindung an SiO₂-arme Untergründe zu verbessern.

4.2.3 UNIL 290

Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein bewährtes Hydrophobierungsmittel mit einem organischen Lösungsmittel, welches seit mehreren Jahren zur Konservierung von Steinuntergründen eingesetzt wird. Als Wirkstoff besitzt UNIL 290 hauptsächlich das oligomere Siloxan Trimethoxy(2,4,4-trimethylpentyl)silan (siehe Abb. 4.1). Der Wirkstoffgehalt beträgt 6,3 % (Sicherheitsdatenblatt, Fa. Hartmann).

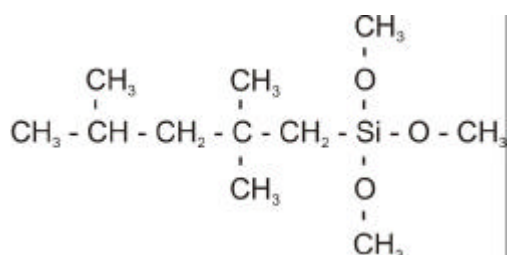


Abb. 4.1: Strukturformel Trimethoxy(2,4,4-trimethyl-pentyl)silan

4.2.4 Mikroemulsion Funcosil WS

Funcosil WS ist ein wässriges Hydrophobierungsmittel auf Siliconmikroemulsionsbasis. Dieses Schutzmittel ist anwendungsfertig mit Wasser verdünnt und für eine längere Lagerungsfähigkeit und Anwendungsdauer vom Hersteller entsprechend stabilisiert. Der Wirkstoffgehalt beträgt ca. 10 M-%. Als Wirkstoffkomponente enthält Funcosil WS Triethoxyoctylsilan (Alkylalkoxysilan) (siehe Abb. 4.2). Nach Applikation und Wirkstoffbindung liegt der Polysiloxangehalt bei ca. 10 %. (Sicherheitsdatenblatt, Fa. Remmers).

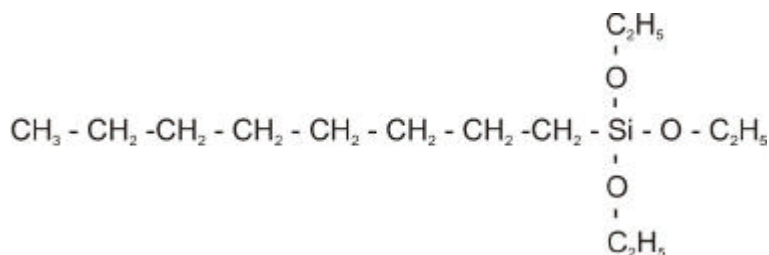


Abb. 4.2: Strukturformel Triethoxyoctylsilan

4.3 Quellminderer

4.3.1 Funcosil Antihygro

Die eigentliche Ursache der Natursteinzerstörung ist darin zu sehen, dass alle Verwitterungsvorgänge Grenzflächenprozesse auslösen, welche die Kontaktkräfte und Bindungsabstände zwischen den Mineralkörnern verändern. Diese Prozesse im Gestein werden durch die Ionenstärke des Porenfluids und die Oberflächenladung der Mineralkomponenten gesteuert (SNETHLAGE ET AL. 1995). Es ist möglich, sowohl die Oberflächeneigenschaften der Gesteinskomponenten als auch die integralen Eigenschaften (z.B. Feuchtedehnung) der Gesteine durch die Wahl geeigneter grenzflächenaktiver Stoffe (Tenside) zu verändern. Die Anwendung von Tensiden für den Gesteinsschutz verfolgt das Ziel, unmittelbar an den Kontaktflächen einzugreifen und die bestehenden Kornkontaktkräfte zu verstärken oder zu erhalten und die kontaktlösenden, dilatativen und kontraktiven Bewegungsvorgänge einzudämmen (SNETHLAGE ET AL. 1995). Die Wirkung der Tenside erstreckt sich auf die Grenzflächen im Mikroporenbereich, ein Vorteil, der sie gegenüber herkömmlichen Mitteln befähigt, die daher erwachsende Quellneigung einzudämmen. Da die Schilfsandsteine von Schloss Schillingsfürst tonreich sind, neigen sie zum Teil zu einer massiven hygrischen Quellung. Da alle Tone eine negative Oberflächenladung besitzen, sind zu deren Behandlung grundsätzlich kationische Tenside geeignet. Bereits seit dem Beginn der 90er Jahre des vergangenen Jahrhunderts wird die

Wirkung quellmindernder Stoffe zur Reduktion des hygrischen Quellens an tonhaltigen Sandsteinen, speziell am Schilfsandstein, untersucht. In den Jahren 1990-91 wurden an den Musterflächen der Nordfassade von Schloss Schillingsfürst bifunktionelle Alkylammoniumchloride zur Stabilisierung des Gefüges eingesetzt und auf ihre Wirksamkeit untersucht (WENDLER & SATTLER 1991). Die Wirkung solcher bifunktionellen Ammoniumverbindungen ist in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt. Es ist zu erwarten, dass Tenside bei den tonigen Schilfsandsteinen eine deutliche Wirkung hervorrufen, da sie im Vergleich zu anderen Sandsteinen eine große innere Oberfläche und eine hohe Kationenaustauschkapazität (KAK) besitzen (SNETHLAGE ET AL. 1995). Die Wirkung der Tenside kann bei großer innerer Oberfläche und KAK am besten zur Gefügestabilisierung beitragen.

In der Abbildung 4.3 sind auf der linken Seite Dreischicht-Tonminerale mit K^+ -fixierten sowie einer quellfähigen Zwischenschicht dargestellt. Die an die Tonminerale fixierten Kationen sind in der Lage, Hydrathüllen anzulagern, die somit das Quellmaß des Materials bestimmen. Die Wirkung des bifunktionellen, kationischen Tensides, Butyldiammoniumchlorid (BDAC), welches Wirkstoff in dem zur Wiederbehandlung angewendeten Funcosil Antihygro ist, beruht auf einem Blockieren der Quellzentren in den Tonmineralen.

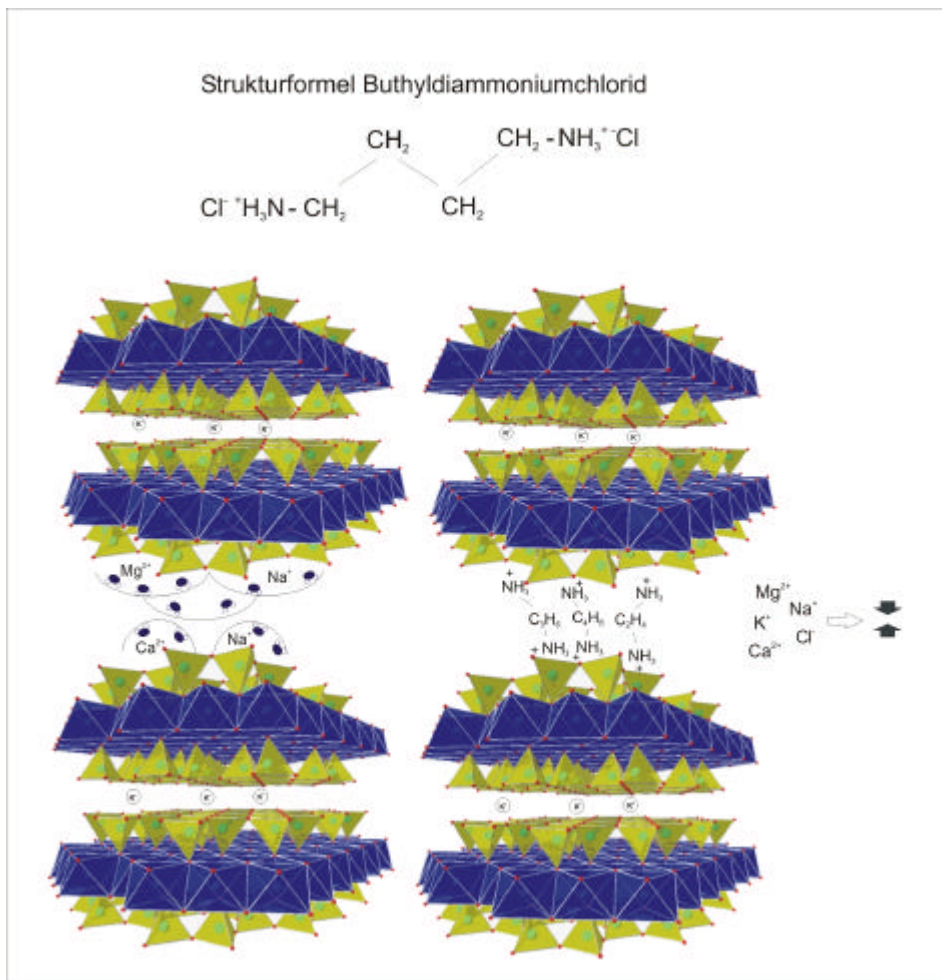


Abb. 4.3: Funktionsweise des kationischen, bifunktionellen Tensides Butyldiammoniumchlorid (Wirkstoff in Antihygro) in wässriger Lösung (nach KEBLER 2000)

Es kommt zu einem Austausch der Kationen durch das Butyldiammoniumchlorid. Die negativ geladenen Tetraederschichten werden über das bifunktionelle, kationische Tensid miteinander

gekoppelt. Die ausgetauschten Kationen und die Chloridionen wandern in die Porenlösung ab. Dadurch wird die Bildung der Hydrathüllen weitestgehend unterbunden.

Die Wirkungsweise der Tenside hat nur einen Effekt auf die hygriische Quellneigung des Gesteins. Die Wasseraufnahme sowohl im Bereich der Luftfeuchte (SNETHLAGE ET AL. 1995) als auch bei Unterwasserlagerung wird nicht oder nur in sehr geringem Maße verändert.

5. Restaurierungsgeschichte der untersuchten Objekte

5.1 Alte Pinakothek in München

Die Alte Pinakothek beherbergt eine der berühmtesten Gemäldesammlungen der Welt. Sie wurde zwischen 1826 und 1836 im Auftrag König Ludwig I. von Architekt Leo von Klenze erbaut und nach dem Zweiten Weltkrieg, zwischen 1952 bis 1957, wiederaufgebaut (SNETHLAGE ET AL. (A), 1996).

Das Mauerwerk besteht aus Ziegeln. Die Fassaden sind durch Halbsäulen, tiefe Gesimse und Fensterrahmen aus Grünsandstein aus dem Gebiet Kelheim/ Bad Abbach gegliedert. Das gesamte Gebäude von ca. 150 m Länge und 35 m Breite umzieht ein mächtiger Rustikasockel aus Grünsandstein-quadern derselben Herkunft.

An der Alten Pinakothek sind im Laufe der Jahre nach dem Krieg als Vorbereitung für die anstehenden Konservierungen mehrere Musterflächen angelegt worden. Im Jahre 1978 wurde eine dieser Flächen an der Nordfassade, im Messbereich 0, eingerichtet (Abb. 7.3). Die entsprechende Behandlung umfasste die Festigung mit Wacker OH und die kombinierte Nachfestigung und Hydrophobierung mit Wacker H. Bei Wacker OH handelt es sich ebenso wie bei dem aktuell verwendeten Funcosil OH um einen monomeren Kieselsäureethylester (KSE), der zu 75 M.-% in Keton gelöst ist. Wacker H ist ebenfalls ein Steinfestiger auf der Basis eines Kieselsäureesters. Die Konzentration des Wirkstoffs im Lösungsmittel liegt bei ca. 75 %. Die Gelabscheidungsrate beträgt 30 %. Zusätzlich verfügt dieses Produkt über eine hydrophobierende Komponente auf der Basis von Trialkoxysilan.

Die Maßnahmen der Fassadeninstandsetzung in den 1980er Jahren gliederten sich in folgende vier Abschnitte:

- Bauabschnitt I 1984/85
- Bauabschnitt II 1985/86
- Bauabschnitt III 1986/87
- Bauabschnitt IV 1988/89

Die Untersuchungen zur Restwirksamkeit der ersten Konservierungsmaßnahme und zur Evaluierung einer Wiederbehandlung, die im Rahmen dieses Projektes gemacht wurden, beschäftigen sich ausschließlich mit Bossenquaden der Nordfassade der Alten Pinakothek. Dem entsprechend repräsentieren die Ergebnisse die Wirksamkeit der Maßnahmen der Jahre 1978, 1984/85 und 1986-1989.

Die Festigung des Regensburger Grünsandsteins wurde in allen vier Bauabschnitten mit dem Steinfestiger Wacker OH durchgeführt.

Die Hydrophobierung ist mit dem Produkt Wacker H in Form einer kombinierten festigenden und hydrophobierenden Behandlung vorgenommen worden (SNETHLAGE ET AL. (A), 1996).

Im Zuge der Fassadeninstandsetzung hatte das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege die Gelegenheit, zwischen 1986 und 1989 die Wirksamkeit der Festigung und Hydrophobierung an zahlreichen Bohrkernen zu überprüfen, indem Wasseraufnahme- und Festigkeitsprofile vor und nach der Behandlung bestimmt wurden. Eine weitere Prüfung der Wirksamkeit der Hydrophobierung erfolgte im Jahr 1992.

5.2 Schloss Schillingsfürst in Mittelfranken

Die Bauarbeiten für diese Dreiflügelanlage mit zentralem Ehrenhof begannen 1705 und dauerten unter Leitung des Baumeisters Louis Remy de la Fosse aus Darmstadt bis 1740. Das Schloss ist heute in Besitz der Familie Hohenlohe-Schillingsfürst.

Die Instandsetzung der Süd- und Westfassade dauerte von 1975 bis 1987. Im Zuge der Maßnahmen wurden große Teile des Mauerwerks durch neue Quader aus Schleerither Sandstein ersetzt und alle Flächen mit UNIL 190 S und UNIL 290 S (oligomere Siloxane) hydrophobiert. Das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege untersuchte im Jahr 1987 die Wirksamkeit der Hydrophobierung des ersten Bauabschnittes auf der Südseite (1975 bis ca. 1980). Auffällig an dem Ergebnis war die zum Teil sehr geringe Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels von nur 2 mm. Die w-Werte der behandelten Flächen lagen in vielen Fällen wieder im Bereich des unbehandelten Gesteins. Die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit, insbesondere von Hydrophobierungsmitteln, ist bei diesem Gesteinstyp geringer als bei anderen Natursteinen. Die Befunde der Südseite zeigen, dass bereits nach 10 Jahren keine Wasser abweisende Wirkung mehr feststellbar war.

Der Abschluss der Arbeiten an der Westfassade war mit dem Wechsel des leitenden Architekten und somit der Hinwendung zu einem stärker denkmalpflegerisch orientierten Konzepts verbunden (SNETHLAGE ET AL. (B), 1996). An der Nordfassade wurde von 1990/91 im Rahmen des BMFT Projektes „Steinzerfall - Steinkonservierung“ eine Musterfläche, bestehend aus sechs Steinquadern, angelegt. Ihre Untersuchung sollte zum einen zur Klärung von Folgeschäden einer Behandlung beitragen und zum anderen helfen, neue Behandlungsmöglichkeiten für den Schilfsandstein zu erschließen. Drei verschiedene Stoffgruppen mit unterschiedlichem Wirkungsspektrum kamen zur Anwendung, wobei handelsübliche und modifizierte Produkte getestet wurden (WENDLER & SATTLER 1990 und 1991):

- Steinfestigung mit Kieselsäureestern (KSE)
 - Anwendung in unterschiedlicher Konzentration
 - Variation des Lösungsmittels
 - Einfluss des Nachwaschens mit Lösungsmittel
 - Applikation weichsegmentmodifizierter KSE Produkte
- Hydrophobierung mit Siloxanen
 - Anwendung von Produkten mit unterschiedlichem Polymerisationsgrad
 - Auswirkung unterschiedlicher Konzentrationen
 - Applikation haftvermittlermodifizierter Silikonharzprodukte
- Wasserlösliche bifunktionelle Tenside zur Verminderung der Feuchtedehnung
 - Einfluss unterschiedlicher Konzentration
 - Mehrfachbehandlung
 - Nachwascheffekt
 - Kombination mit marktüblichen Hydrophobierungsmitteln

Dabei kam heraus, dass wasserlösliche, quellmindernde Schutzstoffe mit Erfolg angewendet werden konnten. Dagegen führte die Hydrophobierung mit Alkylsilanlösungen sogar zu einer Verstärkung der hygri-schen Belastung. Die Applikation von oligomeren und polymeren Siloxanlösungen zeigten zwar gute Anfangswirksamkeiten bei ausreichender Eindringtiefe, jedoch verminderte Dauerhaftigkeit. Einige dieser Musterflächen bilden die Grundlage verschiedener Wiederbehandlungsversuche.

- 1,4-Butyldiammoniumchlorid (BDAC), 0,2 Mol/l H₂O (quellminderndes Tensid)
- 1,4-Butyldiammoniumchlorid (BDAC), 0,5 Mol/l H₂O
- Wacker VP1311 / H₂O 1:9 (Mikroemulsion)
- Propyltriethoxysilan (Mikroemulsion) mit Haftvermittlermodifizierung PTEXS 25A+GF91
- unbehandelt und der Verwitterung ausgesetzt

6. Sandsteinvarietäten

Wie bereits erwähnt, wurden für diese Studie zum einen Gesteinsproben der Alten Pinakothek in München und zum anderen von Schloss Schillingsfürst in Franken benutzt. In beiden Fällen handelt es sich um in historischen Zeiten häufig verarbeitete Bausteine. Sie unterscheiden sich in genetischer und mineralogischer Hinsicht und repräsentieren jeweils verschiedene Verwitterungs- und Konservierungsproblematiken. Einbezogen wurden die vier Varietäten des Regensburger Grünsandsteins, die an der Alten Pinakothek verbaut worden sind und zwei, aus unterschiedlichen Steinbrüchen stammende, Lithotypen des Schilfsandsteins.

Im Folgenden werden die Varietäten im Einzelnen sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch beschrieben.

6.1 Regensburger Grünsandstein - Alte Pinakothek

Die Alte Pinakothek baut sich zum einen aus Ziegelmauerwerk und zum anderen aus Regensburger Grünsandstein, aus dem alle architektonischen Gliederungselemente bestehen, auf. Die Untersuchungen zur Wiederbehandlung an der Nordfassade beziehen sich ausschließlich auf dieses sandige Karbonatgestein.

In der Literatur kann man für den Baustein der Alten Pinakothek sowohl den Namen Regensburger Grünsandstein als auch Bad Abbacher Grünsandstein finden. Wie bereits bei ENDLICHER (1984) erläutert, befinden sich zahlreiche Steinbrüche im Raum Bad Abbach und Kehlheim und nördlich im Regental. Die Lage der Abbaue begründet die vielfältigen Namen, mit denen das Gestein benannt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird das untersuchte Material als Regensburger Grünsandstein angesprochen.

An der Fassade der Alten Pinakothek wurden bereits durch SATTLER ET AL. (1990) aufgrund petrophysikalischer Analysen vier verschiedene Varietäten des Regensburger Grünsandsteins determiniert. MAUSFELD ET AL. (1990) unterscheiden mit Hinblick auf petrographischer Daten generell 3 Varietäten des Regensburger Grünsandsteins. Die Gründe für die starken Ausbildungsunterschiede von glaukonitführendem dolomitischen Fein- bis Mittelsandstein über einen glaukonitführenden Kalksandstein bis sandigen Kalkstein hin zum bioklastenreichen, glaukonitführenden kalkigen Grobsandstein scheinen der Literatur nach noch nicht untersucht worden zu sein.

Da im Rahmen dieser Arbeit zur Machbarkeit einer erneuten Behandlung der Nordfassade besonderes großer Wert auf den Einfluss der mineralogischen und sedimentären Eigenschaften des jeweiligen Materials gelegt wurde, soll in diesem Kapitel ausführlicher auf petrographische Aspekte eingegangen werden. Die Diversität der Varietäten ist so groß, dass eine Klassifizierung dringend notwendig ist, um fehlerhafte Schlussfolgerungen zu vermeiden.

Geologisch betrachtet gehört der Regensburger Grünsandstein in die Oberkreide, Obercenoman (100-95 Mio. a). Im Obercenoman stieß das Oberkreide-Meer der südlichen Molasse-Senke und des Alpenraums rasch in die sich absenkende Fränkische Alb und das östliche angrenzende Triasgebiet vor und als erstes marines Sediment wurde der glaukonitische Regensburger Grünsand abgelagert (WALTER 1992). Zieht man den Bildungsraum des Regensburger Grünsandstein in Betracht, so ist es schwierig, sich für eine exakte Klassifizierung des Materials zu entscheiden; ist es insgesamt als ein Karbonat oder eher als klastisches Sediment zu bewerten. Dennoch wird in den folgenden

Beschreibungen davon ausgegangen, dass es sich hierbei um einen Sandstein, also ein klastisches Sediment, handelt.

Glaukonit ist ein Kalium-Eisen-Alumino-Silikat, das sich im marinen Milieu bildet. Es ist ein grünes Mineral und verleiht somit dem Grünsandstein seine Färbung. Die vier, an der Alten Pinakothek verbauten Varietäten zeigen allerdings sehr unterschiedliche Grüntöne bzw. dementsprechend variierende Glaukonitgehalte. Glaukonitanteile im Gestein sind ungünstig, da sie chemisch relativ leicht angreifbar sind und ihre Eisenanteile, sofern nicht bereits syn-sedimentär geschehen, zu Limonit verwittern.

Die mineralogische Zusammensetzung der vier Varietäten ist deutlich voneinander abweichend. MAUSFELD ET AL. (1990) ermittelten aus Modalanalysen einen Quarzanteil zwischen 20 und 50 %. Die Grundmasse besteht (20-55 %) aus Calcit und/ oder Dolomit. Diese Mengenverhältnisse konnten im Rahmen dieser Untersuchungen bestätigt werden und sollen im Folgenden den einzelnen Varietäten zugeordnet werden.

6.1.1 Varietät I

Makroskopisch erscheint diese Varietät gelblich-braun mit häufig auftretenden Redoxhorizonten, die so nur bei dieser Varietät beobachtet werden konnten. Über einen gesamten Bossenquader verteilt konnten lediglich zwei kleine Muschelbruchstücke identifiziert werden. Auch mit bloßem Auge kann diese einheitlich feinkörnige Varietät im Vergleich zu den anderen als besonders dicht eingestuft werden.

Mikroskopische Betrachtungen

Im Schliffmaßstab zeigt diese Varietät ein inequigranulares, schlecht sortiertes Gefüge, wobei die Quarze und die grünen und bräunlichen Glaukonitaggregate von karbonatischem Zement umgeben sind (Tafel 1/1). Der Quarzgehalt beträgt 30-35 %. Die Quarze sind subangular bis gerundet und meistens monokristallin. Zum größten Teil löschen sie undulös aus und besitzen kleine opake Inklusionen und Flüssigkeitseinschlüsse (Tafel 1/2). Stellenweise zeigen benachbarte Quarze suturierte Korngrenzen. Meistens schwimmen die Komponenten allerdings frei in dem karbonatischen Zement. Die Karbonatphase (ca. 45 %) besteht hauptsächlich aus großen Calzispäritkristallen (Tafel 1/2). Daneben tritt untergeordnet in Kornzwickelbereichen auch feinkristalliner, mikropäritischer Calcit auf. Sobald ein Sediment karbonatisch zementiert ist, gelten auch diese Kristalle als Komponenten, die das Gefüge unterstützen. Somit muss hierbei von einem korngestützten Gefüge gesprochen werden. Betrachtet man ausschließlich die klastischen Bestandteile, wäre dieses Gestein allerdings als matrixgestützt anzusprechen. Des Weiteren konnten in Calciten teilweise Schatten beobachtet werden (Tafel 1/3), die eventuell Hinweise auf eine Dedolomitierung dieser Gesteinsvarietät geben könnten. Demnach würde es sich um eine Substitution des ursprünglichen Dolomitkristalls handeln. Es ist jedoch wahrscheinlicher, dass es sich dabei um Anwachssäume des Calcits handelt.

Die Minerale haben eine durchschnittliche Größe von 110-120 µm. Nur wenige Quarze messen bis zu 210-250 µm entlang ihrer längsten Achse. Die Porosität beträgt ungefähr 10 %. Glaukonit ist in Anteilen von 8-10 % enthalten. Die einheitlich gerundeten Pellets liegen in der Größenordnung von 130-150 µm vor und sind Aggregate sehr kleiner Kristalle. Obgleich in der Literatur von häufig auftretenden braunen Rändern der enthaltenen Glaukonite gesprochen wird (SNETHLAGE ET AL. 1996),

konnten in den untersuchten Dünnschliffen dieser Varietät nur teilweise limonitische Verfärbungen im Randbereich der Glaukonitaggregate beobachtet werden. Limonit ist das Resultat der Oxidation der Eisenionen im Glaukonit (ADAMS ET AL. 1984) und geschieht spätdiagenetisch. Des Weiteren wurden im Dünnschliff sehr untergeordnet Hellglimmer und Plagioklas gefunden.

Entsprechend den Beobachtungen wird Varietät I als glaukonitführender calcitischer Feinsandstein klassifiziert.

6.1.2 Varietät II

Makroskopisch unterscheidet sich Varietät II von Varietät I durch eine deutlichere grünlich bis graugrünliche Färbung des Gesteins. Ebenso sind Schalenbruchstücke sehr verbreitet. Diese Varietät des Regensburger Grünsandsteins erscheint ebenfalls relativ dicht, die Korngröße schwankt allerdings zwischen fein- und mittelkörnig.

Mikroskopische Betrachtungen

Dieser Dünnschliff zeigt ebenfalls ein inequigranulares, schlecht sortiertes Gefüge (Tafel 1/4). Innerhalb des karbonatisch zementierten Gefüges, das aufgrund der Zementation ohnehin als korngestützt gelten muss, gibt es mit ausschließlichem Bezug auf die klastischen Komponenten sowohl korngestützte als auch matrixgestützte Bereiche. Ihr Wechsel zeichnet jedoch keine Lagigkeit nach, sondern scheint zufällig zu sein. Es dominieren allerdings die Bereiche, in denen das Gefüge durch die Matrix stabilisiert wird. Vergleichend zu Varietät I treten Kornkontakte deutlich häufiger auf. (Tafel 1/5). Die Hauptfraktion der Quarze, die ebenfalls subangular bis gerundet ist, liegt zwischen 250-400 µm und ist somit deutlich größer als die der Varietät I. Der Quarzgehalt liegt bei dieser Varietät ungefähr bei 40 %. Der Anteil an undulös auslöschenden Quarzen ist dem bei Varietät I vergleichbar. Ferner betrifft das die suturierten Korngrenzen und das Auftreten von Flüssigkeitseinschlüssen und kleinen opaken, irregulären Einschlüssen in den Quarzen. In einem Dünnschliff wurde sogar ein monokristalliner Quarz beobachtet, dessen Längsachse 1300 µm maß. In Varietät II sind mehr polykristalline Quarze (Neukeimbildung, Rekristallisate) in Form von Gesteinsbruchstücken als in Varietät I enthalten.

Glaukonit ist ungefähr zu 15 % enthalten. Ihre Gestalt und Größe entspricht denen bei Varietät I beobachteten (ca. 150 µm). Allerdings konnten mehr Glaukonitkörner mit einem limonitischen Rand (Tafel 1/6) bzw. mit einer anfänglichen Limonitisierung identifiziert werden (Tafel 1/7).

Die Porosität beträgt ungefähr 15 %. Im Dünnschliffmaßstab fallen vereinzelt relativ große, längliche „Poren“ (ca. 100 µm) auf. Ferner sind eine Reihe weiterer, kleinerer Hohlräume einheitlicher Größe zu erkennen (Tafel 1/8). Generell ist der Porenraumanteil gegenüber Varietät I deutlich erhöht. Den Rest bildet der karbonatische Zement, der hauptsächlich aus großen Calcisparitkristallen besteht. Schatten früherer Kristalle innerhalb der Calcite, die eventuell auf eine Dedolomitisierung des Karbonats hinweisen könnten, wurden bei Varietät II nicht beobachtet. Allerdings befinden sich in der Mitte der Tafel 2/1 angerundete Kristalle, die auf eine rhomboedrische Grundform, typisch für Dolomit, zurückgehen könnten. In ihrem Zentrum zeigen diese Komponenten Lösungsstrukturen, die wiederum für eine Dedolomitisierung des Materials sprechen würden. In Kornzwickeln und im Bereich der Bioklasten ist der Calcit zum Teil feinkristalliner und mikrosparitisch. Im Dünnschliffbild bestätigt sich der makroskopische Befund relativer Bioklastenhäufigkeit. Zum Teil wurden sehr große biogene Bruchstücke beobachtet (Tafel 2/2), die hauptsächlich vollkommen rekristallisiert erscheinen (Tafel

2/3). Entsprechend der Literatur handelt es sich bei den Bioklasten um Muschelfragmente (z.B. Inoceramiden, Austern Rudisten), Brachiopodenschalen und Echinodermenfragmente (ENDLICHER 1984, MAUSFELD ET AL. (1990)).

Weder bei Varietät I noch bei Varietät II konnten Kriterien für eine sedimentäre Schichtung nachvollzogen werden, wie es beispielsweise anhand von Mineraleinregelungen oder Lagen unterschiedlicher Mineralkonzentration möglich wäre.

Entsprechend den Bestimmungen wird Varietät II als glaukonitführender calcitischer Mittel- bis Grobsand mit mittlerem Bioklastengehalt klassifiziert.

6.1.3 Varietät III

Im Verband der Sandsteine der Alten Pinakothek erscheinen die Steine der Varietät III gelblich grün. Bioklasten treten nur mäßig häufig auf. Dadurch erscheinen die Oberflächen der Quader eher glatt und sind somit, abgesehen von der Farbe, denen der Varietät I vergleichbar. Makroskopisch ist eine Porosität erkennbar. Das Material ist mittel- bis gröber körnig. Im Schlißmaßstab konnten ebenso feinkörnige Bereiche detektiert werden.

Mikroskopische Betrachtungen

Varietät III zeigt ein ungleichkörniges, korngestütztes Gefüge (Tafel 2/4). Dennoch kann es nicht als einheitlich durch klastische Komponenten gestützt klassifiziert werden. Es treten häufig Bereiche sehr losen Kornkontakts auf (Tafel 2/6).

Der Quarzgehalt liegt ungefähr bei 35-40 %. Die meisten Quarze besitzen eine subangulare Form und messen entlang ihrer längsten Achse zwischen 150-200 µm, was die makroskopisch erkennbare mittlere bis gröbere Körnigkeit bestätigt. Die Quarze löschen größtenteils undulös aus. Neben den zumeist einzeln verteilten Quarzen konnten innerhalb der selten auftretenden Anhäufungen mehrere Quarze untereinander sowohl lose punktuelle Kontakte als auch Längskontakte beobachtet werden. Manche Quarze enthalten Vakuolen bzw. Flüssigkeitseinschlüsse. Ganz vereinzelt konnten im Dünnschliff Gesteinsbruchstücke (Tafel 2/5) und Feldspäte identifiziert werden.

Glaukonit ist ungefähr zu 12 % enthalten. Ihre Gestalt und Größe entspricht denen der bereits beschriebenen Varietäten I und II (ca. 150 µm). Deutliche limonitische Ränder um die Glaukonitaggregate liegen relativ vereinzelt vor. Zum Teil konnten sehr eng begrenzte braune, wolkige Strukturen in unmittelbarer Nähe zu den Glaukonitkörnern beobachtet werden.

Die Porosität beträgt ungefähr 17 %. Varietät III scheint ein Übergang zwischen Varietät I und II zu sein – die großen, bei Varietät II beschriebenen Poren treten nicht mehr auf und der Quarzgehalt sowie die Größe der Minerale liegen zwischen den Werten der Varietäten I und II.

Der karbonatische Zement scheint fast ausschließlich calcitisch zu sein und wird durch relativ große Einzelkristalle gebildet (Tafel 2/6). In Kornkontaktbereichen lag der Zement auch in mikroporitischer Form vor. Es konnten keine Hinweise auf eine Dedolomitisierung identifiziert werden.

Tafel 2/7 zeigt stellvertretend eine biogene Struktur. Auch in Bezug auf den Bioklastengehalt befindet sich diese Grünsandsteinvarietät zwischen der Varietät I und II.

Die Dünnschliffuntersuchung der Varietät III zeigte ebenfalls keine eindeutigen Kriterien einer sedimentären Schichtung.

Mit Hinblick auf die erzielten Erkenntnisse kann dieses Material als glaukonitführender, calcitischer Fein- bis Mittelsand mit mäßigem Bioklastengehalt klassifiziert werden.

6.1.4 Varietät IV

Makroskopisch fallen die Quader dieser Varietät durch ihre deutliche intensive grüne Färbung und einem stellenweise sehr hohen Gehalt an Bioklasten auf. Anhand der Einregelung der Muschelbruchstücke sowie an dem Wechsel gröber körniger bis hin zu feinkörnigeren Lagen ist es in den meisten Fällen sehr gut möglich, die sedimentäre Schichtung des Gesteins nachzuvollziehen.

Mikroskopische Betrachtungen

Aufgrund der vielen Bioklasten vermittelt das Dünnschliffbild stellenweise einen sehr heterogenen Eindruck des Materials (Tafel 2/8). Allerdings gibt es auch Bereiche, die als eher gut sortiert beschrieben werden können. Anders als bei den übrigen Varietäten kommt es vermehrt zu Anhäufungen mehrerer Quarze, die zumeist an den Ecken in punktuellen oder losem Kontakt zueinander stehen. Die kantengerundeten bis gerundeten Quarze haben eine durchschnittliche Größe von ca. 200 µm. Ausnahmen bilden einige „Riesen“ mit Größen von ca. 850 µm. Die Anzahl undulös und gerade auslöschender Quarze ist ausgeglichen. In Bereichen des Dünnschliffbildes, in denen keine Bioklasten vorkommen, liegt der Quarzgehalt bei ungefähr 45 % und der Glaukonitgehalt bei ca. 15-20 %. Jedoch gibt es auch Zonen, in denen das mikroskopische Bild 100 % Calcit zeigt. Bei der Angabe der Gehalte muss demnach die starke Heterogenität dieser Varietät unbedingt berücksichtigt werden.

Es scheinen auch Bereiche höherer Glaukonitkonzentration und solche loserer Verteilung einander abzuwechseln. Die grünlich bis bräunlich-grünen Pellets sind meistens gut gerundet und haben eine durchschnittliche Größe von ungefähr 200-230 µm. Limonitische Randbereiche wurden häufig beobachtet (Tafel 3/1). In Tafel 3/2 ist ein Glaukonitaggregat abgebildet, das intern kleine schwarze rundliche Komponenten zeigt. In diesem Dünnschliff der Varietät IV konnte das mehrfach beobachtet werden. Neben wenigen Gesteinsbruchstücken wurden Feldspäte (Plagioklase) identifiziert (Tafel 3/1). Auch bei dieser Varietät gibt es Bereiche mit hoher Porosität. Die Hohlräume sind im Gegensatz zu denen der Varietät II eher rundlich und haben eine durchschnittliche Größe von ca. 30-40 µm. Wie in Tafel 3/3 erkennbar ist, sind gerade im Kontakt zu Bioklasten durchaus größere Hohlräume vorhanden. Die Porosität beträgt ungefähr 15-20 %, und schwankt sehr in Abhängigkeit von der Heterogenität der Komponentenkomposition und dem Bioklastengehalt. Der karbonatische Zement wird fast ausschließlich von Calcitkristallen gebildet, die das Gefüge neben den klastischen Komponenten stützen. Ferner konnten im Dünnschliff Dolomitrhomboeder beobachtet werden, die im Inneren Hohlräume zeigen (Tafel 3/4). Nicht selten sind die Kernbereiche von Dolomitkristallen Ca-reicher und damit löslicher (RANDAZZO & COOK 1987). Generell ist das Auftreten dieser umgewandelten Dolomitrhomboeder ein deutlicher Hinweis darauf, dass eine, wenn auch nur partielle, Calcitisierung des Dolomits stattgefunden hat. Demnach ist davon auszugehen, dass der Dolomitgehalt dieser Gesteinsvarietät ursprünglich höher gewesen ist.

Abgesehen von wenigen kleinen Bereichen ist das Gefüge korngestützt (Tafel 3/5). Es ist eindeutig zu erkennen, dass Varietät IV über einen sehr hohen Anteil unterschiedlichen biogenen Materials verfügt (Tafel 3/3, 3/6, 3/7).

Die mikroskopischen Eindrücke bestätigen das makroskopische Bild des Gesteins, wo Wechsellagerungen feiner bis grobkörniger Bereiche bzw. Lagen mit sichtbarer Porosität einander abwechseln.

Unter Beachtung der Dünnschliffanalyse kann dieses Material als bioklastenreicher, glaukonitführender, kalkiger Grobsand bezeichnet werden.

6.2 Schadensbilder

Zunächst muss festgestellt werden, dass die Bausteine im Sockelbereich und die darüber liegenden Bossenquader einen relativ verwitterungsresistenten Gesamteindruck machen. Die dichteren Varietäten I und II zeigen nahezu keine Entfestigungserscheinungen der Oberfläche an. Die Varietäten sind allerdings unterschiedlich stark verwitterungsanfällig. Im Speziellen fiel Varietät IV zum Teil durch eine unregelmäßige Oberfläche, hervorgerufen durch herausgewitterte Bioklasten, auf (siehe Abb. 6.1). Diese Erscheinung ist noch auf den Zustand vor der ersten Konservierung zurückzuführen.



Abb. 6.1: Ablaufspuren, unregelmäßige Zurückwitterung und grüne Verfärbung, Nordfassade, Alte Pinakothek



Abb. 6.2: Zustand der Sandsteinelemente an der Westfassade, Alte Pinakothek

Der Zustand vor den Maßnahmen in den Jahren 1984-89 war durch größere Schäden, insbesondere Gipskrusten in den regengeschützten Bereichen, geprägt.

Bei genauerer Betrachtung und einer leichten Wischprobe konnten an den Varietäten III und IV aktuell zumindest kleine Bereiche detektiert werden, die entweder leicht absanden oder abschuppen. Verglichen zur Westfassade, die in unserer geographischen Lage die Hauptwetterrichtung ist, sind die Schadensbilder jedoch als relativ harmlos einzustufen. Am westlichen Kopfbau können neben Kriegsschäden zum Teil starke Zurückwitterungen, die auf das Abplatzen von mehrlagigen gipshaltigen Schalen und feinschuppigen Ablösungen entlang der Ränder und Kanten zurückzuführen sind, beobachtet werden (siehe Abb. 6.2).

Neben den an der Nordfassade im geringen Maße auftretenden Schäden, hervorgerufen durch einen Materialverlust, wurden im Speziellen an den regengeschützten Unterseiten von Gesimsen und Bossenquadern vereinzelt schwarze Gipskrusten beobachtet. Braune Verfärbungen sind auf die Verwitterung des Tonminerals Glaukonit zurückzuführen. Im Sockelbereich zeigen insbesondere Bauelemente an den Kopfbauten (nordöstlich und nordwestlich) grüne Verfärbungen (siehe Abb. 6.1, schwarzer Pfeil). Des Weiteren fallen störend Ablaufspuren von Wasser auf, die braune und schwarze Striemen auf den Quadern hinterlassen (siehe Abb. 6.1, roter Pfeil).

6.3 Schilfsandstein - Schloss Schillingsfürst

Ursprünglich benutzte man zum Aufbau der Fassade des Schlosses Sandsteinquader aus Steinbrüchen bei Diebach und Gailnau in Mittelfranken (SCHAMBERGER 1991). Zusätzlich wurde Blasensandstein verbaut, der aber in diesem Zusammenhang keine nähere Erwähnung finden soll. Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen an Schloss Schillingsfürst wurden zunächst im größeren Umfang originale Schilfsandsteinquader durch Schleierithersandstein ersetzt.

6.3.1 Originalmaterial, Schilfsandstein der Steinbrüche Diebach und Gailnau, Mittelfranken

Die stark fluviatil geprägte Sedimentation ereignete sich in der Oberen Trias (Mittlerer Keuper, Stuttgart Formation, Schilfsandstein-Folge (STEININGER & PILLER 1999)). Die Schüttung der Sande erfolgte in einem System miteinander verflochtener Rinnen, zwischen denen feinkörnigeres Material in Stillwasserbecken abgelagert wurde (WURSTER 1968). Als weiteres Fazies-Modell für den Schilfsandstein schlägt KÖPPEN (1997) ein kontinentweites „braided anastomosed river system“ vor, das zum Mündungsgebiet hin stärker von Meeresspiegelschwankungen und zum Liefergebiet eher von Regionaltektonik und Klimabedingungen kontrolliert wurde. GEHRMANN UND AIGNER (2002) fanden im Schilfsandstein Hinweise auf einen zumindest zeitweiligen Einfluss von Gezeiten. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Genese dieser Einheit bei weitem noch nicht geklärt ist und ein befriedigendes Gesamtkonzept zur Entstehung des Schilfsandsteins noch weitere lokale und regionale Studien erforderlich macht (GEHRMANN & AIGNER 2002).

Es handelt sich um einen grünen bis gelblich-grünen und dichten, homogenen Feinsandstein (siehe Abb. 6.3).

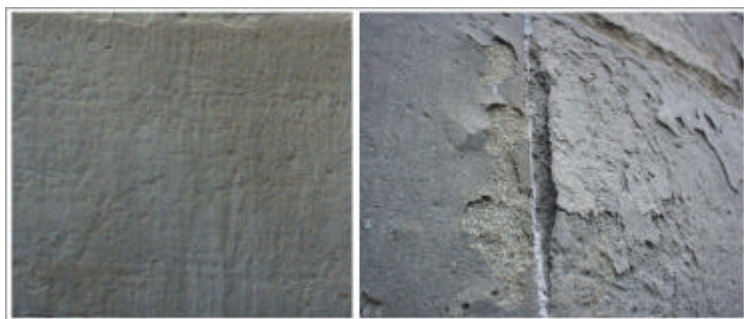


Abb. 6.3: Erscheinungsbild des Originalmaterials aus Diebach/Gailnau. Das linke Bild zeigt eine intakte Oberfläche des gelblich grünen Sandsteins, wohingegen in der rechten Abbildung ein typisches Schadensbild dieses tonreichen Gesteins dargestellt ist.

Nordfassade, Schloss Schillingsfürst.

Eine sedimentäre Schichtung kann in Bereichen einer verstärkten Akkumulation von Tonlinsen entsprechend deren Einregelung nachvollzogen werden. An Quadern, die einen massiven Verwitterungsfortschritt aufweisen, konnten jedoch deutlich heraus präparierte Schrägschichtungskörper und wabenförmige Strukturen beobachtet werden.

Mikroskopische Betrachtungen

Im Übersichtsbild des Dünnschliffes ist zu erkennen, dass es sich bei diesem Material um einen feldspatführenden, tonigen Sandstein mit einem hohen Anteil an Gesteinsfragmenten handelt. Ferner sind im Gestein Hell- und Dunkelglimmer vorhanden. Demnach ist dieses Sediment als relativ immatur einzustufen, obgleich Kathodolumineszenzbetrachtungen ergaben, dass der ursprüngliche Feldspatgehalt wesentlich höher gewesen sein muss. Verwitterungsprozesse bewirkten eine Anlösung und Umwandlung in Schichtsilikate ((SCHAMBERGER 1991)). Die Komponenten bilden ein relativ gut

sortiertes, gleichkörniges und korngestütztes Gefüge (Tafel 6/1), das stellenweise durch etwas loser gepackte Bereiche aufgelockert wird. Wie in Tafel 4/1 deutlich zu erkennen ist, erfuhr dieses Sediment offensichtlich eine Kompaktion, die sich vor allem auch in Form von Drucklösungskontakten zwischen einigen Quarzen zeigt. Die Glimmer besitzen unter gekreuzten Polarisatoren Farben zweiter Ordnung, was auf Muscovit schließen lässt. Bis auf wenige Ausnahmen zeigen sie im Übersichtsbild eine Einregelung (Tafel 4/2). Es ist auffällig, dass diese Glimmer häufig verbogen sind (Tafel 4/3), was ebenfalls auf diagenetische Prozesse zurückzuführen ist. Ferner scheinen sich manche länglichen Quarze dieser Richtung anzupassen. Die Hauptstruktur dieses Materials ist allerdings regellos. Die Quarzminerale, die größtenteils kantengerundet sind, bilden ungefähr 45 % der Bestandteile. Annähernd ein Drittel der Quarze zeigt eine undulöse Auslöschung. Die Korngröße beträgt zwischen 100 und 150 µm. Manche Quarze zeigen angelöste Randbereiche. Der Feldspatgehalt von ungefähr 5 % wird sowohl von Kalifeldspäten als auch Plagioklasen bestimmt. Ihre Umrisse sind kantengerundet bis angerundet (Tafel 4/4). Entlang ihrer längsten Achse messen sie ungefähr 80 bis 120 µm. Die Gesteinsfragmente, die sowohl metamorphen als auch magmatischen Ursprung sind, machen ungefähr 35-40 % der Komponenten aus und sind größtenteils relativ gut gerundet (Tafel 4/5). Ihre Hauptfraktion ist zwischen 100 und 120 µm groß. Stellenweise sind mehrere Minerale eng über Punkt- oder Längskontakt miteinander verbunden (Tafel 4/6), aber die meisten Kornkontakte werden indirekt über die tonig-chloritische Matrix (Tafel 4/7) hergestellt. In Bereichen von Quarzen, die über Drucklösung in Kontakt getreten sind, liegt eine kieselige, direkte Korn-zu-Korn-Bindung vor. Die Matrix enthält feinkörnige Ton- oder Glimmerminerale. Es handelt sich dabei um feinkörnigen Muscovit (Sericit). Diese goldenen, wolkigen Erscheinungen feinkörniger Glimmer sind sowohl auf Feldspäten als auch auf den Gesteinsfragmenten bzw. in deren engerer Randzone zu beobachten (Tafel 4/8). Ihr Vorkommen geht auf die Feldspatverwitterung zurück.

Akzessorisch wurden Rutil und opake Minerale beobachtet.

Zwischen den Individuen verbleibt zum Teil ein recht großer Porenraum, der auch dünne Chlorithäutchen zeigt. Die Porosität macht ungefähr 10 % des Materials aus. Wie bereits erwähnt, bewirkte die Verwitterung im Gesteinsverband eine Anlösung der Feldspäte, die häufiger in den Dünnschliffen – speziell an Plagioklasen – beobachtet werden konnte. Dieser Prozess äußert sich darin, dass sich die Feldspäte als alterierte, sehr poröse Minerale mit hoher innerer Oberfläche präsentieren.

Entsprechend der Literatur (SNETHLAGE ET AL. (B) 1996) verfügt der Sandstein aus Diebach und Gailnau über folgende petrophysikalische Daten:

Reindichte [g/cm ³]	2,67
Rohdichte [g/cm ³]	2,18
Hg-Porosimetrie [Vol %]	18,12
Wasseraufnahme atm. [Vol %]	18,91
Wasseraufnahme atm. [Gew %]	9,08
Wasseraufnahme 150 bar. [Vol %]	22,36
Wasseraufnahme 150 bar.[Gew %]	10,74
Spezifische Innere Oberfläche [m ² /g]	9,69

6.3.2 Austauschmaterial, Werksandstein aus dem Steinbruch bei Schleerith, Unterfranken

Dieses Material gehört stratigraphisch zu den Werksandsteinschichten des Unteren Keupers, dem Lettenkohlenkeuper (Erfurt-Formation (STEININGER & PILLER 1999)). Der Lithotyp zeichnet sich an der Fassade durch eine grünlich graue Färbung und eine dichte, feinsandige Struktur aus. Ganz vereinzelt konnten Ansammlungen von fein verteiltem, inkohltem Pflanzenhäcksel beobachtet werden. Der Schleerith Sandstein verfügt eine relativ gut erkennbare sedimentäre Schichtung.

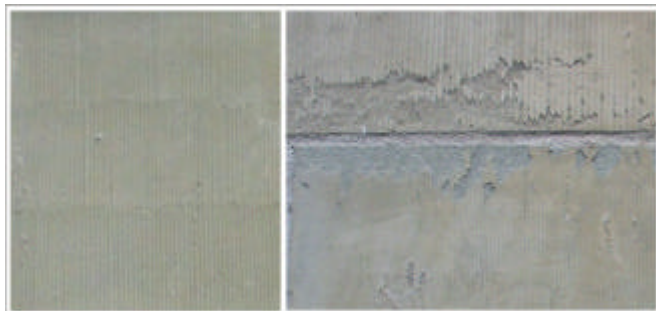


Abb. 6.4: Erscheinungsbild des Austauschmaterials aus Schleerith. Im linken Bild ist eine intakte Oberfläche des grünlich grauen Sandsteins zu erkennen. Die rechte Abbildung zeigt das Ablösen einer dünnen oberflächlichen Schicht (Tapete), wie es bei der ansonsten eher unauffälligeren Sandsteinvarietät häufiger zu beobachten ist.

West- und Südfassade, Schloss Schillingsfürst.

Mikroskopische Betrachtungen

Generell ähnelt der Modalbestand des Austauschmaterials dem des original verbauten Gesteins. Die Abschätzung der prozentualen Verteilung der einzelnen Komponenten ergibt jedoch einen noch höheren Gehalt an Gesteinsbruchstücken, der bei 40 % liegt sowie ein etwas häufigeres Auftreten von Hellglimmern. Chlorit, der auch dem Material aus Schleerith die grünliche Farbe verleiht, ist zwar im Bereich größerer Poren identifizierbar. Bei den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen konnte dieses Tonmineral genauer bestimmt werden (siehe Kapitel 6.4). Der Chlorit wurde syndiagenetisch gebildet.

Ferner bilden die Komponenten ebenfalls ein relativ gut sortiertes, gleichkörniges und korngestütztes Gefüge (5/1). Allerdings gibt es nur sehr selten Bereiche lockeren Gefüges, wie sie im Material aus Diebach und Gailnau beobachtet worden sind. Dennoch ist wohl davon auszugehen, dass sich die Grade der Kompaktion einander annähernd entsprechen. Glimmer und manche längliche Quarze zeigen eine Vorzugsrichtung, jedoch wird auch die Struktur des Austauschmaterials generell als regellos bezeichnet.

Die Quarze sind vielfach kantengerundet und zu gleichen Teilen gerade und undulös auslöschend. Ihr Anteil am Modalbestand beträgt zwischen 40-45 %. Die Korngrößen liegen zwischen 150 und 250 μm . Die Hauptfraktion misst annähernd 200 μm entlang der längsten Ausdehnung. Vereinzelt wurden Flüssigkeit- oder Mineraleinschlüsse beobachtet. Die Gesteinsfragmente sind meistens gut gerundet und bestehen aus Quarz und Feldspat. Sie sind sowohl magmatischen als auch metamorphen Ursprungs. Einige bestehen aus sehr feinkörnigem Material, welches bei diesen Vergrößerungen nicht identifizierbar ist. Ferner gibt es schiefrige Fragmente. Deren enge Lagigkeit zeigt an, dass sie einem fein foliierten Material zuzuordnen sind. Die vorhandenen tonigen Lithoklasten binden einen hohen Tonanteil, der in der Siebkurve des Materials gar nicht detektiert wird. Des Weiteren konnten polykristalline Quarze, Cherts und Chloritklasten identifiziert werden. Die Größe der Fragmente variiert zwischen 120 μm und 200 μm . Die Kalifeldspäte und Plagioklase haben zusammen einen Anteil von 5 % am gesamten Modalbestand. Ihre Größe variiert zwischen 120-180 μm . Meistens haben sie gerundete Kanten und werden häufig von Sericit überlagert. Über das gesamte

Dünnschliffbild sind goldgelbe, feine Glimmerschüppchen (Sericit) verteilt. Als Akzessorien kommen Rutil, Turmalin und opake Minerale vor.

Dem Originalmaterial entsprechend wurden Punkt- und häufig Längskontakte der Komponenten untereinander beobachtet (Tafel 8/3). Neben indirekten tonig-chloritischen Matrixkontakten, die den Hauptanteil bilden, gibt es auch kieselige, direkte Korn-zu-Korn-Bindung (Tafel 5/2).

Der Porenraum zwischen den Komponenten zeigt dünne Chlorithäutchen. Die Porosität macht ungefähr 10 % des Materials aus.

Zusammenfassend wird auch dieser Lithotyp als feldspatführender, toniger Feinsandstein mit einem hohen Anteil an Gesteinsfragmenten klassifiziert.

Entsprechend der Literatur (GRIMM 1992) verfügt der Schleerith Sandstein über folgende petrophysikalische Daten:

Reindichte [g/cm ³]	2,72
Rohdichte [g/cm ³]	2,29
Porosität [Vol %]	15,70
Wasseraufnahme atm. [Gew %]	5,10
Wasseraufnahme vak. [Gew %]	6,85
Spezifische Innere Oberfläche [m ² /g]	5,78

6.4 Mineralogische Zusammensetzung

Die Mineralphasen der Schilfsandsteinproben wurden im Zentrallabor des BLfD mittels Röntgendiffraktometeranalyse untersucht. Der qualitative Befund für die mineralische Komposition beider Schilfsandsteinvarietäten ergab eine schwankende Häufigkeit der verschiedenen Komponenten, wobei Quarz stets das Hauptmineral darstellte. Eine provisorische Abschätzung des quantitativen Anteils zeigt Gehalte von 75-80 % am gesamten mineralogischen Inventar. Zum Vergleich wurde an verschiedenen Quadern sowohl eine Probe aus tieferen Fassadenbereichen als auch eine aus der vordersten Bohrkernscheibe diffraktometrisch untersucht (siehe Abb. 6.5a-c). Dabei fiel auf, dass in dem Material von der Fassadenoberfläche Gips detektiert werden konnte, der in größeren Tiefen nicht mehr vorkommt. Dieser Befund korreliert positiv mit den Bestimmungen der Salzgehalte (siehe Kapitel 8.5.1.2, Salze). Neben Quarz konnte in beiden Schilfsandsteinvarietäten die Alkalifeldspäte Mikroklin und Orthoklas (im Dünnschliff) sowie Albit (Plagioklas) detektiert werden. Klinochlor wurde ebenfalls in beiden Varietäten gefunden, allerdings sind aus Platzgründen nicht alle Diagramme berücksichtigt worden (6.5_b,c). Ebenso verhält es sich mit Muscovit. Calcit wiederum konnte röntgenographisch mit einem deutlichen Peak allein in Proben des Gesteins aus Diebach/Gailnau nachgewiesen werden (6.5_a). Unterschiedliches Wasseraufnahme- und Dehnungsverhalten beider Schilfsandsteinvarietäten gaben Anlass zur Annahme, dass eventuell verschieden quellfähige Tonminerale in dem Material aus Diebach/Gailnau bzw. Schleerith enthalten sind. Am Institut für Geologie der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg sind zu diesem Zweck die Sandsteinproben atterbergiert worden, um die Tonfraktion zu erhalten. Die Mineralphasen der gesamten Tonfraktion (< 2 µm) und der Tonfraktion unter 0,63 µm Korngröße wurden gesondert in Texturpräparaten in einem Röntgendiffraktometer der Firma Siemens mit CuKα-Röntgenstrahlung bei einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1,5° 2θ/min analysiert. Die Tonfraktion < 0,63 µm wurde gesondert untersucht, da das weitestgehende Fehlen von Quarz, Feldspat etc. im Mittel- und Feintonbereich den

Nachweis geringer Gehalte an quellfähigen Tonmineralen (z.B. Smectite und Vermiculite) erleichtert (HEM 1990).

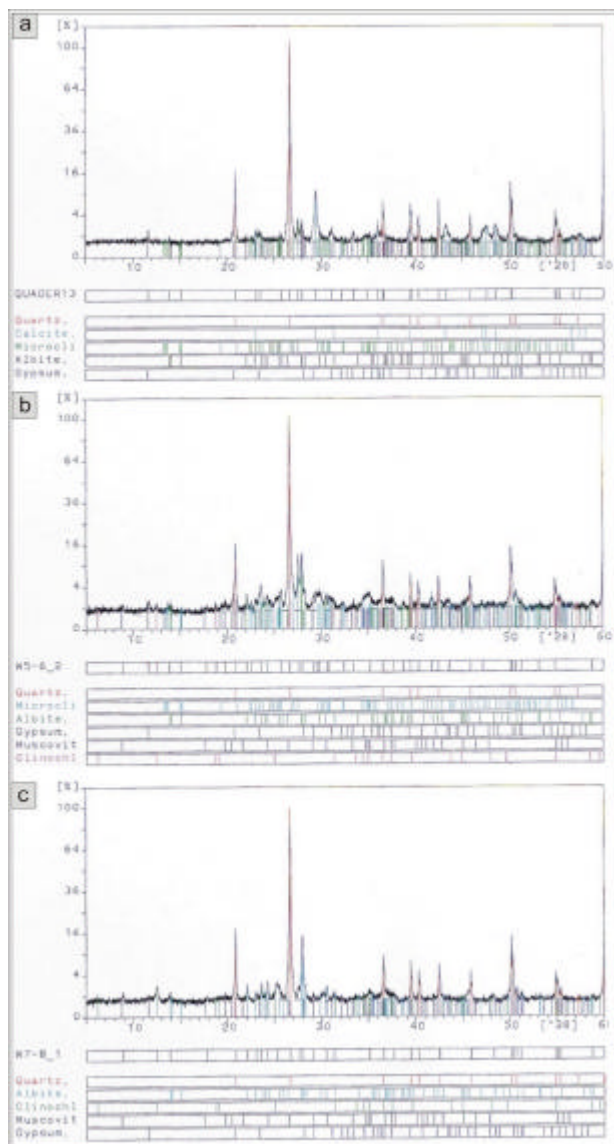


Abb. 6.5: Diffraktogramme von Texturpräparaten des Schilfsandsteins aus Diebach/Gailnau (6.5_a) und aus Schleerith (6.5_b, c).

Zur Identifizierung quellfähiger Tonminerale wurden Glycol-Quellungspräparate hergestellt. Es stellte sich heraus, dass die verschiedenen starken Quellneigungen der Varietäten, die ohnehin keiner Regel bezüglich des Materials zu folgen scheinen, sondern eher willkürlich schwanken, nicht unbedingt auf unterschiedliche Tonminerale, sondern nur auf den Tonmineralgehalt in der jeweiligen Probe zurückzuführen sind. Das dargestellte Beispiel (Abb. 6.6a-c) gibt einen extremen Fall wieder, wo innerhalb eines Bohrkerns, mit einer Grundfläche von ca. 4,5 cm Durchmesser, eine ziemlich starke Schwankung des Tongehaltes zu beobachten ist. Zwar handelt es sich bei der Röntgendiffraktometrie um eine qualitative Bestimmungsmethode, dennoch ist es in gewissen Rahmen möglich, über die Peakhöhe auf den Gehalt in der Probe zu schließen. Abbildung 6.6_a gibt die Messung an Material der vordersten Bohrkernscheibe, dem Bereich zwischen 0-0,5 cm, wieder. In 6.6_b sind die Ergebnisse desselben Bohrkerns, jedoch in ungefähr 2 cm Tiefe gezeigt und 6.6_c repräsentiert den Fassadenbereich von 5,5 cm Tiefe.

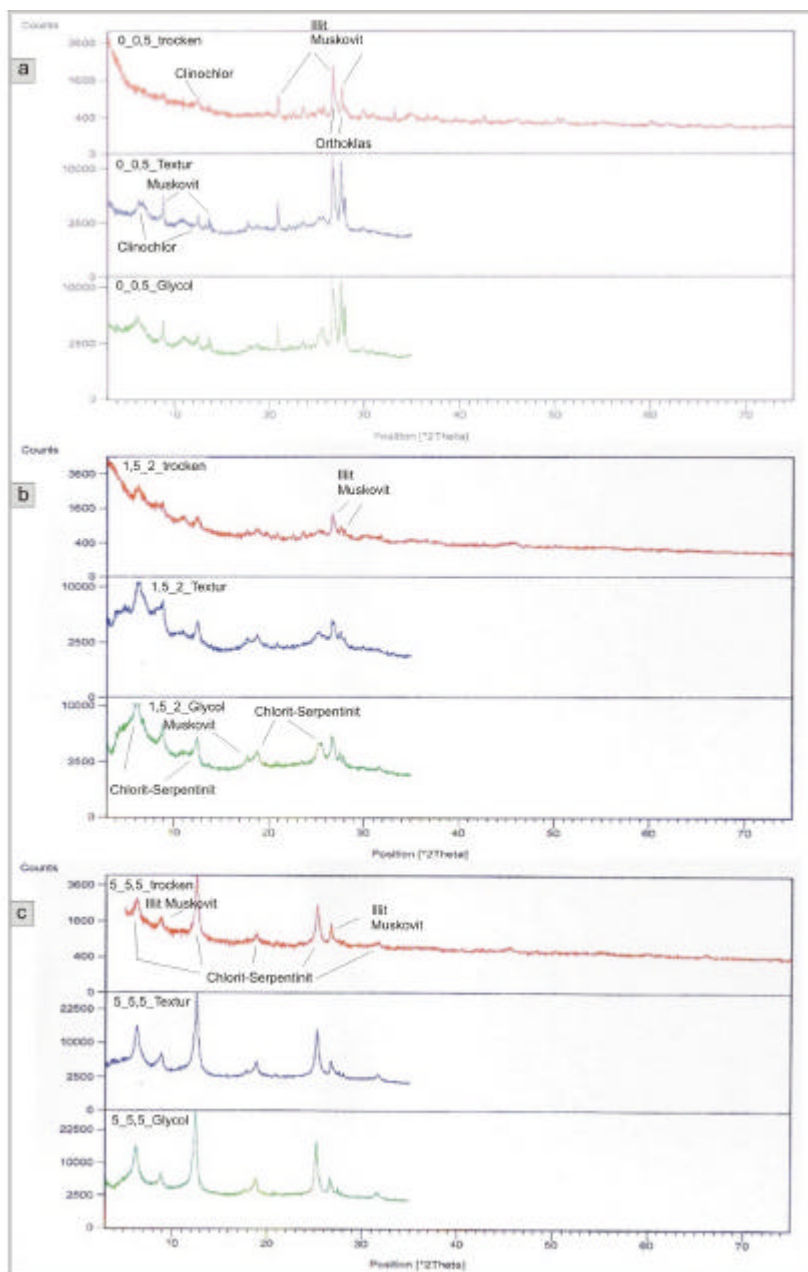


Abb. 6.6: Diffraktogramme verschiedener Texturpräparate der Schluff (trocken) und der Mittel- und Feintonfraktion ($< 0,63 \mu\text{m}$) sowie der über Glycol geleiteten Probe. Die drei untersuchten Materialien stammen aus unterschiedlichen Tiefen desselben Bohrkerns: a) Probe der vordersten Bohrkernscheibe (0-0,5 cm), b) Probe der 4. Bohrkernscheibe (1,5-2 cm), c) Probe der 11. Bohrkernscheibe (5-5,5 cm). Es konnten keine quellfähigen Tonminerale identifiziert werden.

Es ist zu erkennen, dass die Probe in 6.6_a die meisten Illit-Muskovit-Peaks zeigt, wohingegen die letzte Probe (6.6_c) durch Chlorit-Serpentinit dominiert ist. In den Quellungspräparaten erscheint allerdings in keinem der drei Diagramme eine deutliche, von den Textur- und den trockenen Proben abweichende Reflexion aufgeweiteter Struktureinheiten. Weder die Dreischichtminerale der Illit-Muskovit-Reihe, noch Chlorite sind quellfähig. Quellfähige Tonminerale (QTM) sind nicht erkennbar. Daher ist es erstaunlich, dass der untersuchte Schilfsandstein tatsächlich Dehnungsbeträge von bis zu 4,6 mm/m erreichen kann. Obgleich es sich bei den in allen Tiefen ermittelten Tonmineralen um nicht quellfähige Tone handelt, kann anhand der verschiedenen Peakhöhen für die einzelnen Proben auf unterschiedlich starke Quellneigungen des jeweiligen Materials rückgeschlossen werden. Dieser Umstand zeigt sehr deutlich, mit welcher Sorgfalt bei der Erstellung eines Konservierungskonzeptes vorgegangen werden muss, bzw., dass eine Interpolation zwischen den Ergebnissen verschiedener Schilfsandsteinquadern nur unter Vorbehalt möglich ist.

In den folgenden beiden Abbildungen (6.7_a und 6.7_b) werden zwei Proben desselben Bohrkerns aus Originalmaterial vorgestellt. Die in Abbildung 6.7_a dargestellte Messung wurde an Material der

zweiten Bohrkernscheibe (0,5-1 cm) vorgenommen. Im Vergleich zur gesamten Fraktion, sind die Reflexe der Feldspäte vorherrschend. Die Schichtsilikate Clinochlor und die Illit-Muskovit Reihe, beide nicht quellfähig, sind eher unterrepräsentiert. Quellfähige Tonminerale sind nicht erkennbar. Das darunter stehende Diagramm gibt die Verhältnisse in größerer Fassadentiefe wieder. Hier erscheinen zwei Reflexe von Sanidin (Alkalifeldspat). Die Reflexe der nicht quellfähigen Dreischichtminerale der Illit-Muskovit-Reihe und des ebenfalls nicht quellfähigen Clinochlor erscheinen in stärkerer Intensität. Auch für das Originalmaterial kann demnach beschrieben werden, dass bereits innerhalb eines eng begrenzten Raumes größere Schwankungen in den Tongehalten auftreten, die wiederum das Quell- und Wasseraufnahmeverhalten in unterschiedlicher Weise beeinflussen.

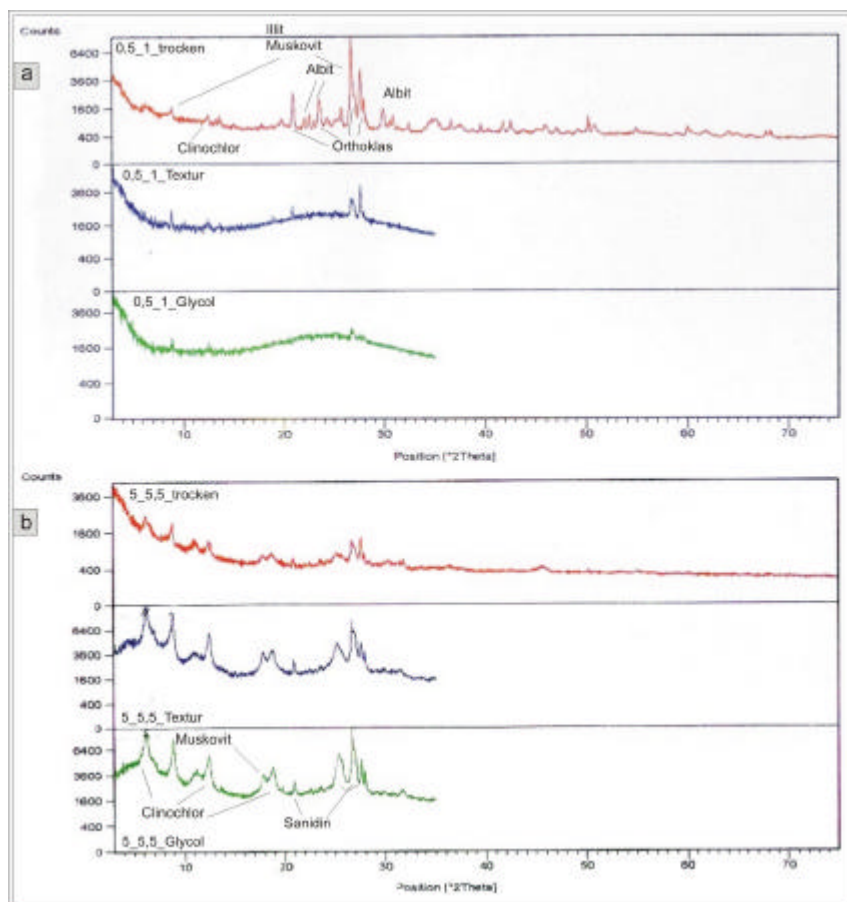


Abb. 6.7: Diffraktogramme verschiedener Texturpräparate (siehe Abb. 6.6). Beide Proben stammen aus unterschiedlichen Tiefen desselben Bohrkerns: a) Probe der 2. Bohrkernscheibe (0,5-1 cm), b) Probe der 11. Bohrkernscheibe (5-5,5 cm). Quellfähige Tonminerale sind nicht erkennbar. Die Reflexe der Feldspäte sind dominant.

Die Abweichungen der Messwerte beider Schilfsandsteinvarietäten in den verschiedenen petrophysikalischen Analysemethoden sind in einander entsprechenden Zonen (z.B. unbehandelt oder wiederbehandelt mit Fungosil SNL) nicht überzubewerten. Eine Aussage bezüglich der Wirksamkeit einer Maßnahme sollte aus diesem Grund - speziell für dieses Material - exakt auf den zugrunde liegenden Zustand bezogen werden, da es ansonsten zu schwerwiegenden Fehleinschätzungen kommen kann.

6.5 Schadensbilder

Unter dem Aspekt der Verwitterungsanfälligkeit erweist sich der feinsandige Schilfsandstein aufgrund seiner überwiegend tonig-chloritischen Kornbindung als relativ empfindlicher Werkstein. Tonreiche Sandsteine bzw. Schilfsandstein gehören zu den Problemgesteinen in der Konservierung. Dauerfeuchte, Wechselfeuchte und Frost beeinträchtigen schnell die Festigkeitseigenschaften des

Kornverbandes, da bei zunehmender Feuchte das Bindemittel plastisch reagiert. Laut WENDLER (1989) lässt sich die oberflächenparallele Schwächungszone unter anderem aus dem unterschiedlichen Dilatationsverhalten verschiedener Tiefenzonen herleiten. In Tafel 6/8 weist der Pfeil auf ein ganz typisches Schadensprofil des Originalmaterials – eine stabile Schale ist über eine mürbe Zone mit dem unterlagernden intakten Gestein verbunden. Diese extremen Schalenausbildungen konnten im Speziellen an der Nordfassade von Schloss Schillingsfürst beobachtet werden.

Zwischen Feuchtetransport, Salzmigration und Chemismus der Tonmineralgrenzflächen treten komplexe Wechselbeziehungen auf. Über Veränderungen des Porenraums und des Quellverhaltens sowie durch die Feuchteretentionswirkung von Salzen können sich die Einflüsse gegenseitig verstärken.

Zu dieser ohnehin relativ hohen Verwitterungsanfälligkeit des Schilfsandsteins kommen im Fall von Schloss Schillingsfürst noch extreme Expositionsbedingungen hinzu. Die Fassaden des Schlosses ragen zum Teil bis 35 m in die Höhe und sind somit starken Winden und Schlagregen von Westen, Süden und Norden ausgesetzt.

Die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit, insbesondere von Hydrophobierungsmitteln, ist bei diesem Gesteinstyp geringer als bei anderen Natursteinen. Die Befunde der Südseite zeigen, dass sich bereits nach 10 Jahren dünnchalige Aufwölbungen der Gesteinsoberfläche bilden.

Das Spektrum der Verwitterungsformen umfasst Absanden, Abbröckeln (Tafel 6/1), Aufblättern, Schuppen- und Schalenbildung (Tafel 6/2-6/4, 6/8) und schichtparalleles Aufspalten (Tafel 6/4). Speziell an der Nordfassade wurden zum Teil extreme, mehrlagige Schalen, häufig assoziiert mit Effloreszenzen (Tafel 6/3) beobachtet. Oberhalb des Sockelbereiches an der Nordfassade befinden sich Quader, die zum einen stark zurück gewittert sind und zum anderen wabenförmige und schlangenförmige Strukturen zeigen (Tafel 6/7). Die beiden an Schloss Schillingsfürst verbauten Lithotypen zeigen verschieden ausgeprägte Schadensbilder, was wahrscheinlich am ehesten in den unterschiedlichen Expositionszeiten begründet liegt. Generell sind die Quader aus Schleerither Sandstein jedoch weit weniger auffällig als jene, welche aus Originalmaterial gefertigt worden sind. Häufig konnten auch ganz dünne, zum Teil zu Blasen aufgeworfene Tapeten beobachtet werden, die sich wahrscheinlich in Folge der Oberflächenbearbeitung (Scharierung) in Kombination mit der ursprünglichen Konservierung vom Untergrund ablösen (Tafel 6/5, 6/6). In der röntgenographischen Analyse konnte in diesen oberflächlichen Ablösungen hauptsächlich K_2CO_3 (Kaliumkarbonat) detektiert werden (siehe Abb. 6.8).

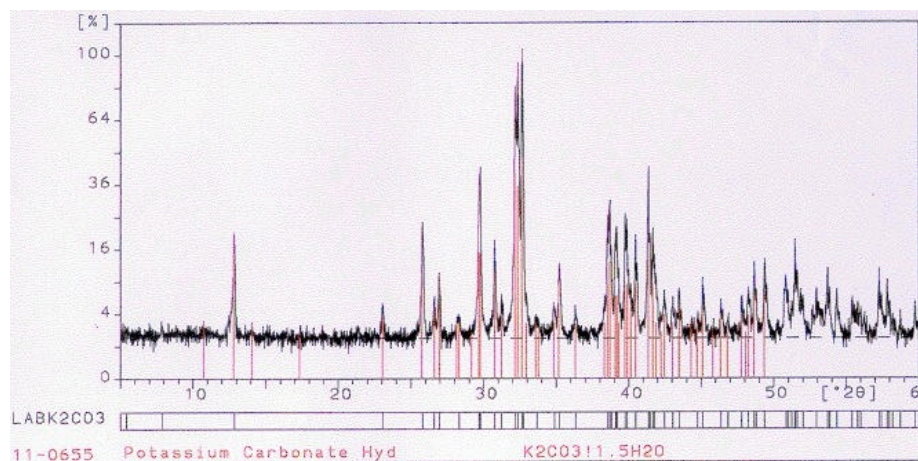


Abb. 6.8: Röntgendiagramm einer Probe, die einer tapetenartigen Ablösung entstammt. Das Spektrum zeigt eindeutig, dass diese dünnen Häute aus Kaliumkarbonat (K_2CO_3) bestehen.

Die Aufzeichnungen zu den früheren Maßnahmen sagen aus, dass vor der Hydrophobierung eine Farblasur mit Silikatfarbe vorgenommen wurde (SNETHLAGE ET AL. B 1997), was den Kaliumkarbonatgehalt erklären könnte. Allerdings ist eine exakte Zuordnung dieses Vorhabens zu bestimmten Bausteinen nicht möglich gewesen. In Fällen, wo diese karbonatischen Beläge fest mit dem Untergrund verhaftet sind, ist das Saugvermögen mit Hinblick auf die kapillare Wasseraufnahme, aber auch auf die Aufnahme der Schutzmittel behindert.

7. Wiederbehandlung

7.1 Probenmaterial

Für die Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, bildeten Bohrkern der Alten Pinakothek (Nordfassade) und von Schloss Schillingsfürst die Grundlage (Süd-, West- und Nordfassade). Bei den Probenahmen wurde genau darauf geachtet, die entsprechenden Quader bezüglich ihrer Varietät genau zu klassifizieren, um im Nachhinein die Ergebnisse sinnvoll miteinander korrelieren zu können. Im Zuge dessen wurden auch umfangreiche mikroskopische (POL) Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse im Kapitel 6 dargelegt sind.

Die Bohrkern wurden mit Bohrkronen mit einem Durchmesser von 5 cm gewonnen. Durch einen minimalen Bohrverlust hatten die Kerne einen Durchmesser von 45-46 mm.

Die meisten beprobten Quader sind parallel ihrer sedimentären Schichtung im Mauerverband eingefügt (siehe Abb. 7.1). Die Kenntnis der Lage des untersuchten Quaders ist äußerst wichtig, um Fehlinterpretationen der gewonnen Ergebnisse zu vermeiden.

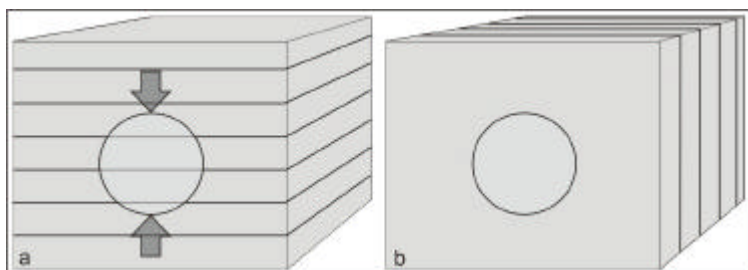


Abb. 7.1: Einbau der Quader in der Fassade. a) mit dem Lager (Die sedimentäre Schichtung des Materials liegt senkrecht zur Fassadenoberfläche.) Die Pfeile markieren die Richtung senkrecht der Schichtung. b) gegen das Lager;

Der Kreis markiert den Bohrkern.

Ist ein Quader abweichend von dieser verwitterungsresistenteren Weise eingebaut, so verläuft die sedimentäre Schichtung parallel der Fassadenoberfläche, was zum einen eine geringere Stabilität mit sich bringt und zum anderen die Ausbildung von Schalen begünstigen würde.

Sowohl zur Bestimmung des Zustandes der ursprünglich applizierten Konservierung als auch zu der Überprüfung der Wirkung der Wiederbehandlung an diversen Musterflächen wurden Bohrkern an der Fassade entnommen. Zusätzlich sind beide Male sowohl Wasseraufnahmeprüfungen mit dem Karstensen Prüf Röhrchen (siehe Kapitel 8.3.1) als auch Bohrwiderstandsmessungen (siehe Kapitel 8.4.4) und Salzprofilmessungen (siehe Kapitel 8.5) auf den entsprechenden Quadern durchgeführt worden. Ferner wurde eine detaillierte Photodokumentation der jeweiligen Fassadenzustände vorgenommen. Auf dieser Basis und im direkten Vergleich zum umgebenden Gestein konnte im Anschluss an die Wiederbehandlung die Bewertung der dadurch verursachten farblichen Veränderungen bestimmt werden.

Die gewonnenen Bohrkern sind im Labor zunächst umfangreichen Ultraschalluntersuchungen (siehe Kapitel 8.4.3) und weiteren Wasseraufnahmeprüfungen an der Bohrkernvorder- und -rückseite unterzogen worden.

Im Anschluss dessen wurden sie, beginnend an der Fassadenfläche des Bohrkerns, in einzelne Scheiben gesägt. Sattler (1992) korreliert die Bruchkraft F mit der quadratisch in die Berechnung einfließenden Scheibenstärke. Demnach stellte sich eine Dicke von annähernd $1/10$ des Scheibendurchmessers als geeignet heraus. Aus diesem Grund beträgt die Scheibenstärke 4,5 mm. Der Sägeverlust zwischen den einzelnen Scheiben macht annähernd 3 mm aus.

Die einzelnen Bohrkernscheiben wurden dann folgenden Messungen unterzogen:

- Hygrische Dilatation (siehe Kapitel 8.3.4)
- Wasserdampfdiffusions-Widerstand (siehe Kapitel 8.3.2)
- Biaxiale Biegezugfestigkeit (E-Modul) (siehe Kapitel 8.4.1)



An den daraus gewonnenen Bruchstücken wurden sowohl optische und röntgenographische Untersuchungen (siehe Kapitel 8.1) als auch Sorptions- und Porositätsmessungen durchgeführt (siehe Kapitel 8.2)

Von der Fassade der Alten Pinakothek und den meisten Quadern an Schloss Schillingsfürst sind pro untersuchten Quader im Zuge der ersten Probennahme jeweils zwei Bohrkerne entnommen worden. An einem der beiden Bohrkerne wurde der Ist-Zustand erfasst. Dieser Zustand beschreibt die Effektivität der in den 1970er bzw. 1980er (1992) applizierten ersten Konservierung nach jeweiliger Standzeit bis zum Jahr 2001. Diese entsprechenden Daten werden im folgenden Text mit „altbehandelt“ klassifiziert. Der jeweils zweite Bohrkern wurde im Labor Wiederbehandlungstests unterzogen. Da beide Bohrkerne nahe beieinander aus der Fassade entnommen wurden, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass sie eine sehr ähnliche mineralogische Komposition und sedimentäre Struktur aufweisen. Auf dieser Grundlage ist es möglich, den tatsächlichen Effekt einer Wiederbehandlung abzuschätzen. Die Ergebnisse werden in den Ausführungen mit „Wiederbehandlung Labor“ (WB_Lab) umschrieben. Im Anschluss an die Vortests im Labor wurden an der Fassade Musterflächen angelegt (Kapitel 7). Nach einer Standzeit der darauf applizierten Schutzmittel von 3 Monaten bei sehr unterschiedlichen Witterungsbedingungen zwischen Sommer und Spätherbst, sind erneut Bohrkerne entnommen worden. Die Resultate der daran vorgenommenen Untersuchungen sind mit „Wiederbehandlung Fassade“ (WB_Fas) klassifiziert.

Die Erfassung der Kenndaten des unbehandelten und unverwitterten Materials erfolgte an Proben aus dem Quaderinneren, mindestens in einer Tiefe von 6 cm.

Unbehandelte Verwitterungsprofile, wie sie in den Auswertungen zur Biegezugfestigkeit dargestellt sind, wurden aus Ergebnissen von SATTLER ET AL. (1990) und SNETHLAGE ET AL. (1996) übernommen. Zum damaligen Zeitpunkt (1985) konnten nur an wenigen Proben der unbehandelte und unverwitterte Zustand bestimmt werden. Dabei gelang es nicht, alle Grünsandsteinvarietäten abzudecken. Aus diesem Grund wird beispielsweise in den Diagrammen 8.39_d und 8_43_a für Varietät III ein einheitlicher unbehandelter (unverwitterter) Wert angegeben, der von Messungen im Inneren des Quaders stammt.

7.2 Wiederbehandlungstests

7.2.1 Regensburger Grünsandstein

Untersuchungen im Labor

Unter Berücksichtigung der in vorangegangenen Konservierungsmaßnahmen angewandten Festigungs- und Hydrophobierungsmittel wurden in Screening Tests aus handelsüblichen und modifizierten Schutzmitteln auf der Basis von Kieselsäureestern und Hydrophobierungsmitteln (Alkyl-trialkoxysiloxane) Favoriten ausgewählt, welche zunächst am Originalmaterial im Labor erprobt worden sind. Ferner richtete sich die Auswahl der applizierten Schutzmittel auch nach deren Verfügbarkeit in der alltäglichen Praxis.

Um zu gewährleisten, dass trotz des begrenzten Probenmaterials alle 4 Varietäten des Regensburger Grünsandsteins mit ihren zum Teil markanten Unterschieden bezüglich der Porosität und dem Bioklastenanteil in ihrer Wechselwirkung mit den zu erprobenden Konservierungsmitteln erfasst werden, entschied man sich für zwei unterschiedliche Schutzmittel, die zusätzlich in ihrem Wirkstoffgehalt modifiziert wurden. Damit ist die Repräsentativität der Wirkung der ausgesuchten Steinschutzstoffe für den gesamten Sockelbereich der Nordfassade der Alten Pinakothek gewährleistet.

Um die Auswirkungen einer erneuten Behandlung deutlich herauszupräparieren, ist die Wiederbehandlung im Labor in geringem Maße übertrieben worden, ohne allerdings bei dieser Gratwanderung eine unsinnige Überfestigung zu erzielen. Demzufolge wurden die Bohrkern im Labor in einem 3er-Rhythmus erneut behandelt (siehe Tab. 1, im Anhang):

- Steinfestiger
- Steinfestiger
- Hydrophobierung

Die Proben wurden zu diesem Zweck entsprechend der nebenstehenden Abbildung (7.2) mit der Fassadenseite auf ein kleines Gittergeflecht in das jeweilige Schutzmittel gestellt. Es musste unbedingt darauf geachtet werden, dass die kapillare Tränkung nur über die Stirnseite des Bohrkerns passierte, um reelle Vergleichswerte zu den Bedingungen an der Fassade zu schaffen. Innerhalb von 30 Minuten wurde in festgelegten Zeitabständen die Mittelaufnahme des Bohrkerns ermittelt. Zwischen den einzelnen Behandlungsschritten sind die Proben im Exsikkator bei simulierten Außenbedingungen (75 % relative Luftfeuchtigkeit (r.Lf.) und 20°C) eine Woche gelagert worden. Da man davon ausgehen kann, dass nach ca. 36 Stunden 95 %

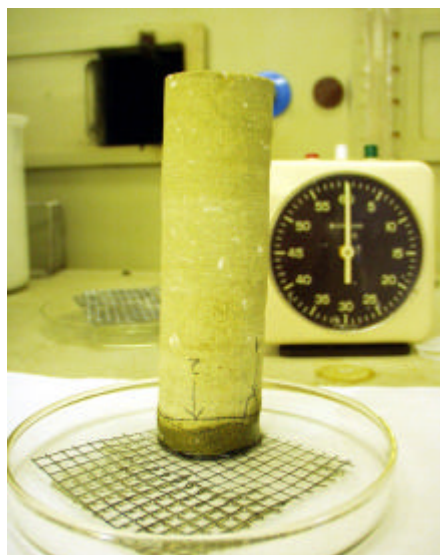


Abb. 7.2: Tränkung der Bohrkern im Labor

des Gels abgeschieden sind, wird der Zeitraum von einer Woche als ausreichend zum Ausreagieren angenommen.

Folgende Schutzmittel kamen zur Anwendung:

- Fungosil OH, unverdünnt und verdünnt mit organischen Lösungsmitteln (Ethanol oder Methylethylketon) im Verhältnis 1:2
- Remmers 300E - unverdünnt und verdünnt mit Ethanol 1:2
- Fungosil H
- Fungosil SNL

(Zur genauen Verteilung der Schutzmittel und deren Kombination auf die verschiedenen Grünsandsteinvarietäten siehe im Anhang, Tabelle 1.)

Anwendungen am Objekt

Basierend auf den Laboruntersuchungen wurden die Schutzmittel für die Verwendung an der Fassade ausgewählt. Im Labortest hat sich ergeben, dass eine Applikation des unverdünnten Festigers Funcosil OH keine zufrieden stellenden Eindringtiefen erreichen konnte. Aus diesem Grund erfolgte am Objekt ausschließlich die Behandlung mit verdünntem Funcosil OH (Ethanol oder Methylethylketon) im Verhältnis 1:2. Des Weiteren wurde der elastifizierte Kieselsäureester Remmers 300E - unverdünnt und verdünnt (mit Ethanol 1:2) appliziert. In den meisten Fällen wurde aber Funcosil H verwendet, da das Ziel für diesen speziellen Fall war, die Festigkeit des Materials nur in geringem Maße zu steigern und gleichzeitig zu hydrophobieren. Nur eine Musterfläche ist im Anschluss an die Steinfestigung mit Funcosil SNL hydrophobiert worden.

Die beprobten Sandsteinquader und die entsprechenden Musterflächen befinden sich, wie bereits erwähnt, an der Nordfassade der Alten Pinakothek in den rot markierten Fassadenabschnitten (siehe Abb. 7.3). Im Abschnitt „0“ wurde 1978 von der Firma BAYPLAN eine Musterfläche (Wacker OH und Wacker H) angelegt. Im Rahmen der Konservierungsmaßnahmen 1984-89 erfolgte daher an einem Teil dieses Fassadenabschnitts eine wiederholte Behandlung.

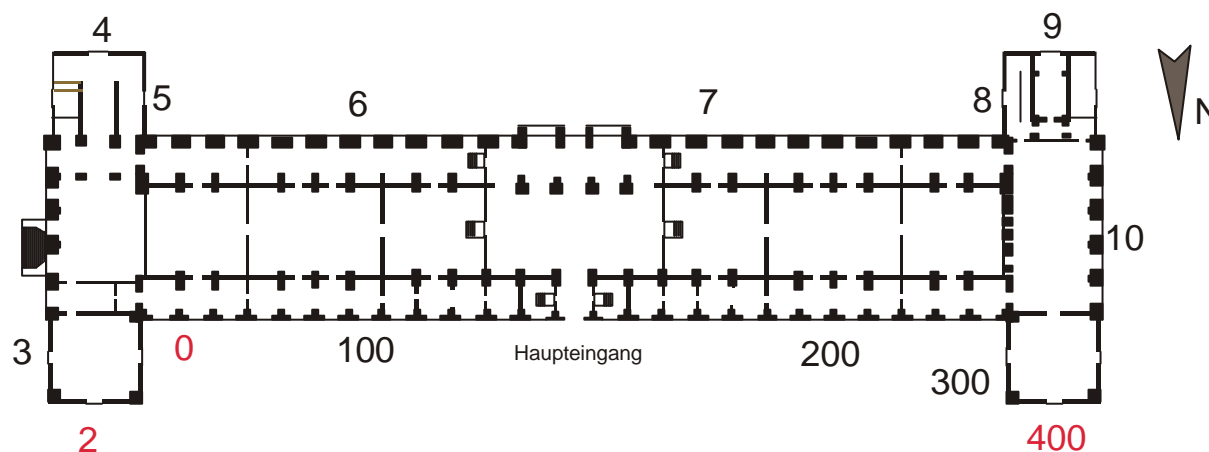


Abb. 7.3: Messbereichsübersicht der Alten Pinakothek in München (nach SNETHLAGE 1996)

Die Musterflächen entsprachen in der Höhe dem jeweiligen Quader und hatten eine Breite von ungefähr 30 cm. Die Methode der Applikation des Schutzmittels ist generell von großer Bedeutung für dessen Eindringtiefe. Eine wirksame Applikationsmethode an der Fassade besteht darin, auf der vertikalen Fläche einen Flüssigkeitsfilm derart zu erzeugen, dass die Imprägnierlösung flutend herab läuft und für einige Sekunden mit der porösen Fläche in Kontakt steht. Den Kapillarkräften folgend wird ein Teil des Schutzmittels in den Porenraum gesogen.

Die Substanzen wurden mittels kleindüsigen Spritzflaschen, berieselnd von oben nach unten bis zur Sättigung bzw. nicht länger als 20 Minuten aufgebracht.

In Fällen, in denen auf die Festigung eine Hydrophobierung folgte, wurde das entsprechende Schutzmittel erst ungefähr 10 Tage später appliziert.

Für die folgenden 14 Tage waren die Musterflächen durch locker angebrachte Folien vor möglichen Regenereignissen geschützt.

Die folgende Abbildung (7.4) zeigt im Vergleich die Mittelaufnahmen, die bei den Wiederbehandlungstests im Labor und an den Musterflächen erreicht worden sind. Alle dargestellte Proben wurden im Rahmen der ersten Konservierungsmaßnahme mit Wacker OH gefestigt und

anschließend mit Wacker H hydrophobiert (mit Restfestigung). Wie bereits erwähnt, sind Teile der Musterfläche aus dem Jahr 1978 doppel behandelt worden. Davon betroffen ist die mit dem Pfeil markierte Probe (siehe Abb. 7.4_a). Im Vergleich zu den daneben dargestellten Aufnahmemengen eines anderen Quaders der Varietät I fällt auf, dass im intensiven Labortest weniger Schutzmittel aufgenommen worden ist. Da diese Varietät relativ homogen ist, könnte dieser Umstand auf einen umfassender ausgekleideten Porenraum bzw. Unterschiede in der Porenradienverteilung zurückzuführen sein. Die Kennwerte der Porositätsmessung zeigen an, dass die Probe mit geringer Mittelaufnahme vor der Wiederbehandlung eine Porosität von 16,7 Vol.-% besaß und die andere 18,9 Vol.-%.

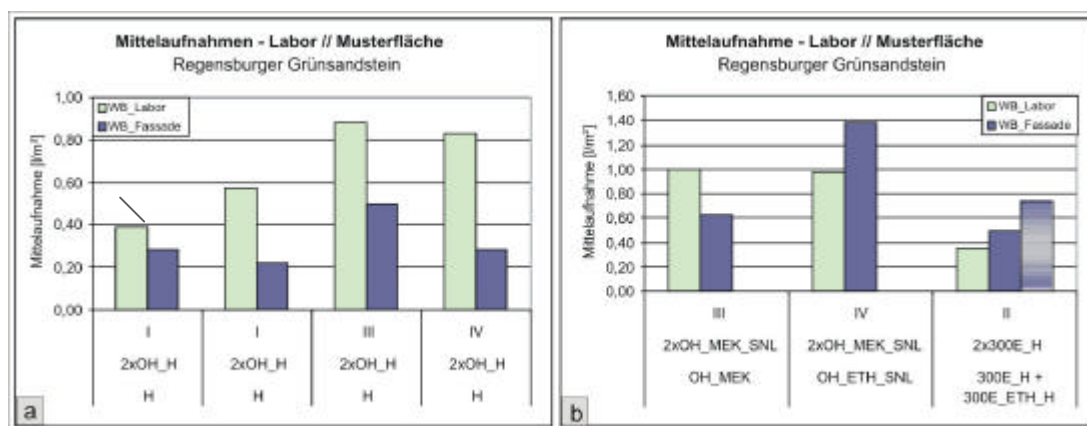


Abb. 7.4a-b: Gegenüberstellung der im Labor und an den Musterflächen erzielten Schutzmittelaufnahmen, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV. Die einander gegenübergestellten Aufnahmemengen wurden jeweils an denselben Bausteinen ermittelt und stellen einzelne Behandlungen dar.

Des Weiteren ist deutlich zu erkennen, dass bei den beiden weniger dichten Varietäten III und IV (siehe Kapitel 8.2.1) gegenüber den dichteren Varietäten I und II höhere Mittelaufnahmen zu verzeichnen sind. Im Diagramm 7.4_b sind die Beispiele dargestellt, in denen verdünntes Fungosil OH (auf Varietät III und IV) appliziert wurde. Dabei werden im Vergleich zur Anwendung des unverdünnten Festigers höhere Mittelaufnahmen erreicht. Ähnliches ist auch bei der Behandlung mit Remmers 300E zu erkennen. Die Mittelaufnahme an der Fassade konnte durch die Absenkung des Wirkstoffgehalts verbessert werden.

Im Anhang sind in Tabelle 1 die verschiedenen applizierten Schutzmittel (Labor und Musterfläche) und ihre Zuordnung zu den jeweils damit behandelten Grünsandsteinvarietäten dargestellt.

Beurteilung der optischen Eigenschaften der Wiederbehandlung

Die Kriterien zur Beurteilung einer gelungenen Konservierungsmaßnahme schließen neben petrophysikalischen Parametern auch die optischen Eigenschaften der Musterfläche mit ein. Entsprechend den Richtlinien (SNETHLAGE 1997) darf ein bestimmtes Maß der Dunklung nicht überschritten werden. Ebenso sind Grauschleier und glänzende Oberflächen zu vermeiden. Entsprechend dieser Kriterien sind die Wiederbehandlungstests an der Nordfassade der Alten Pinakothek als empfehlenswert einzustufen. Es konnten auf den Musterflächen weder Glanz noch Grauschleier detektiert werden (Tafel 14). Die verschiedenen Schutzmittel in Relation zu den einzelnen Varietäten verursachten unterschiedliche Farbtiefen der ursprünglichen Gesteinsfarbe. Dabei

stellte sich die verdünnte Applikation von Funcosil OH als besonders farbneutral heraus. In allen Fällen, in denen im Anschluss an die Festigung hydrophobiert wurde, ging dies mit einer deutlicheren Dunklung des Gesteins einher. Auch wenn es dadurch nicht zu einer Veränderung der Gesteinsfarbe gekommen ist, sondern eher die Intensität des Farbtones verstärkt wurde, ist mit Hinblick auf die anzustrebende optische Unversehrtheit der Fassade eventuell auf eine nachträgliche Hydrophobierung zu verzichten (Tafel 14).

7.2.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Untersuchungen im Labor

Die Schwerpunkte der Konservierung des tonreichen Schilfsandsteines liegen zum einen in der Hydrophobierung und zum anderen in der Minderung der extremen Quellneigung begründet. Mit Hinblick darauf sind die Schutzmittel für die Wiederbehandlung ausgewählt worden. Zum Teil wurden im Rahmen der ersten Probennahme von den zu untersuchenden Quadern (Nord-, West- und Südfassade, siehe Abb. 7.7) jeweils zwei Bohrkern entnommen, wovon an einem der Ist-Zustand des Materials bestimmt und der andere zu Wiederbehandlungstest im Labor verwendet wurde. In den Untersuchungen fanden auch die Anfang der 1990er Jahre an der Nordfassade angelegte Musterfläche, bestehend aus mehreren Quadern mit jeweils 4 bis 5 Einzelflächen, Berücksichtigung. Auf diesen sehr kleinen Flächen, wo ebenfalls das Resultat der Wiederbehandlung überprüft und fortwährende Untersuchungen ermöglicht werden sollen, wurde jeweils nur ein Bohrkern entnommen. Alle Quader dieser Musterfläche bestehen aus dem Originalmaterial aus Diebach/Gailnau. Um sowohl den Ist-Zustand zu bestimmen und die Auswirkung der Wiederbehandlung im Labor zu überprüfen, war es notwendig, zwischen verschiedenen Musterflächen gleicher Ausgangsbehandlung zu interpolieren. Aufgrund der schwankenden Tongehalte bereits innerhalb ein und desselben Quaders sind diese Ergebnisse kritisch zu bewerten. Für die Beurteilung des tatsächlichen Behandlungserfolges ist es eigentlich unumgänglich, sich nur auf einen einzelnen Bohrkern zu beziehen. Im Auswertungsteil ist in diesen Fällen darauf hingewiesen.

Die Bohrkern aus Schilfsandstein beider Varietäten sind zum Teil einfach, aber auch doppelt behandelt worden. Zur Abschätzung der Gefahr einer Dampfdiffusionssperre wurde auch bei diesem Material die Wiederbehandlung im Labor in geringem Maße übertrieben, ohne allerdings bei dieser Gratwanderung eine unsinnige Gefährdung des Materials zu provozieren.

Der Vorgang des Tränkens und die anschließende Lagerung der Proben entsprechen den unter 7.2.1 beschriebenen Abläufen.

Im Rahmen der Untersuchungen zur Wiederbehandlung kamen im Labor folgende Produkte zur Anwendung:

- Funcosil SNL, unverdünnt und verdünnt mit Ethanol im Verhältnis 1:1
- Funcosil SL
- Mikroemulsion Funcosil WS
- Funcosil Antihygro

(Zur genauen Verteilung der Schutzmittel und deren Kombination auf die beiden Schilfsteinvarietäten siehe im Anhang, Tabelle 2.)

Anwendungen am Objekt

Die Wiederbehandlung der Fassade, die das Kernstück des Projekts bildet, wurde im Juli 2002 vorgenommen. Zusätzlich zu den in den Laboruntersuchungen verwendeten Schutzmitteln wurde an der Nordfassade ein Quader mit deutlichen Abschuppungen und Schalenbildungen exemplarisch mit Silex OH (verdünnt mit Ethanol, 1:2) behandelt.

Zur Überprüfung dieser Maßnahmen wurden im Spätherbst die Bohrkerne entnommen, nachdem die Musterflächen mindestens 3 Monate wechselnden Witterungsbedingungen ausgesetzt waren. Die Vorgänge des Anlegens und die Größe der Musterflächen entsprachen denen an der Alten Pinakothek (siehe Kapitel 7.2.1). Eine Ausnahme bildet die Applikation der Mikroemulsion Funcosil WS, die mit einem Pinsel erfolgte. Im Anschluss wurde die Musterfläche mit Zellstoff abgetupft, um Rückstände aufzunehmen. Eine weitere Ausnahme bildete die Musterfläche an der Nordfassade, wo entsprechend kleinere Abmessungen gewählt wurden (siehe Abb. 7.5).

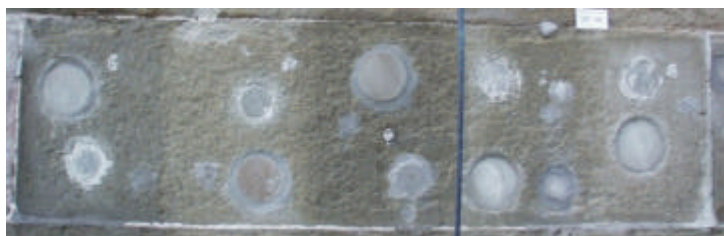


Abb. 7.5: Unterteilte Musterfläche, Nordfassade Schloss Schillingsfürst

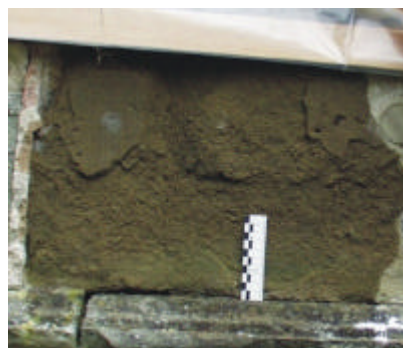


Abb. 7.6: Musterfläche, Nordfassade (Fensterachse 15) Schloss Schillingsfürst, Antragungen sowie Festigung mit Silex OH/ Ethanol 1:2

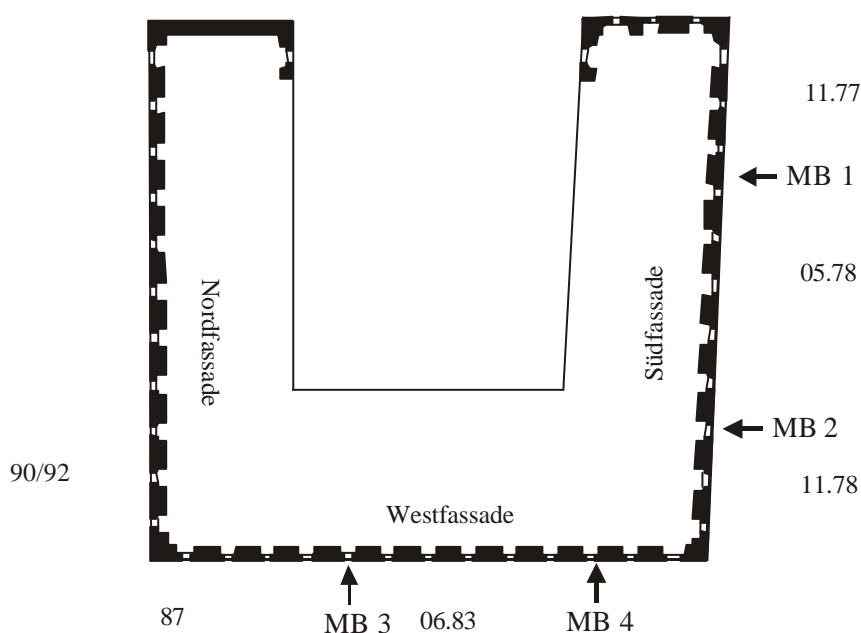


Abb. 7.7: Messbereichsübersicht an den Fassaden von Schloss Schillingsfürst. Die Zahlen geben den Monat und das Jahr der ursprünglichen Konservierung an.

Die folgende Abbildung (7.8) gibt einen Eindruck über die bei den verschiedenen Wiederbehandlungstests erzielten Mittelaufnahmen. Erwartungsgemäß liegen die im Labor erreichten Aufnahmemengen aufgrund intensiverer Tränkungsbedingungen zum Teil deutlich über denen der Fassade. Im Falle einer doppelten Schutzmittelapplikation im Labor (2 Balken) erstaunt, dass die aufgenommenen Mengen im zweiten Durchlauf nicht sehr stark hinter denen der ersten Applikation zurück bleiben. Der Porenraum scheint demnach noch aufnahmefähig zu sein bzw. scheinen die organischen Reste der siliziumorganischen Substanzen - trotz ihrer unpolaren Eigenschaften - ein Eindringen neuer Substanzen nicht wesentlich zu behindern. Es gibt jedoch auch einige Beispiele, in denen die Mittelaufnahme am Objekt der im Labor erreichten Menge gleich ist oder sie sogar übertrifft. Hierfür sind wahrscheinlich Unterschiede in den Tongehalten verantwortlich, da eine Musterfläche einen bedeutend größeren Fassadenausschnitt repräsentiert als ein Bohrkern. Diese Tatsache macht deutlich, dass für die Erstellung eines schlüssigen Sanierungskonzeptes zur Konservierung einer Fassade für die genaue Abschätzung der Mittelaufnahmen neben Vortests im Labor dringend auch die Anlage von Musterflächen anzuraten ist.

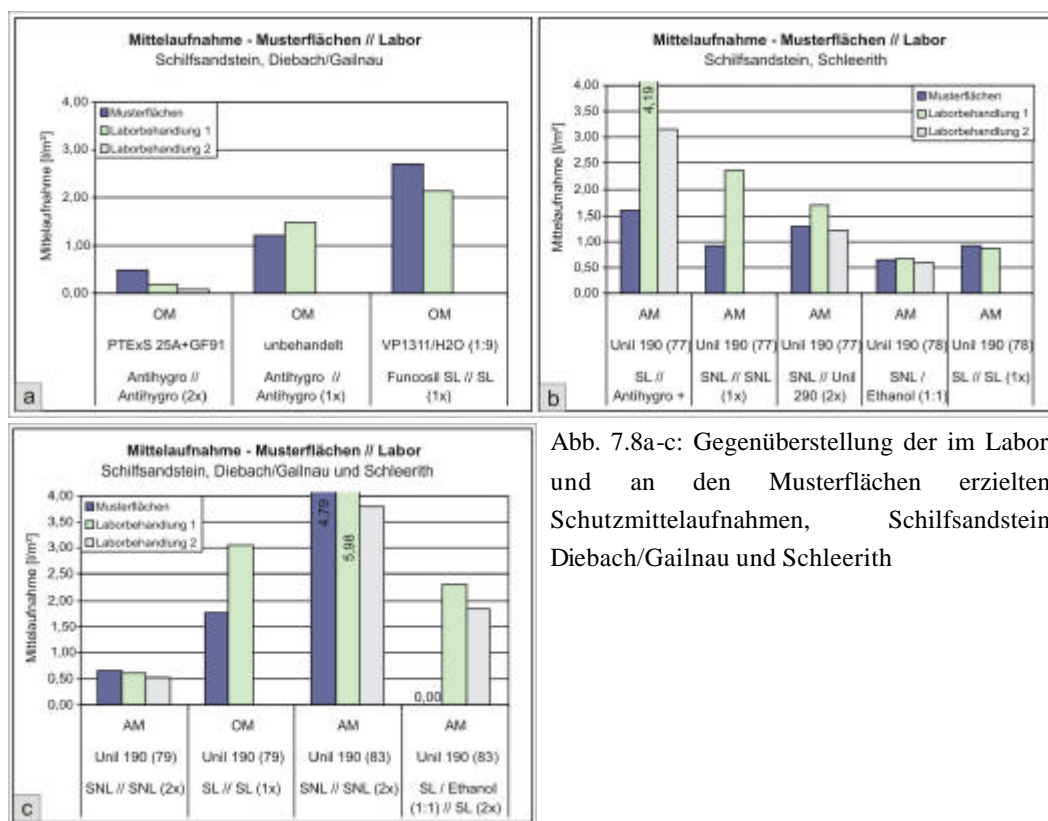


Abb. 7.8a-c: Gegenüberstellung der im Labor und an den Musterflächen erzielten Schutzmittelaufnahmen, Schiffsandstein Diebach/Gailnau und Schleerith

Im Anhang sind in Tabelle 2 alle im Labor applizierten Schutzmittel und Konservierungsmittel, die an der Fassade zu Anwendung kamen, verzeichnet.

Beurteilung der optischen Eigenschaften der Wiederbehandlung

Das Erscheinungsbild der an Schloss Schillingsfürst wiederbehandelten Quader hat sich in Folge der neuerlichen Applikation verschiedener Schutzmittel nur minimal bis gar nicht verändert. Stellvertretend für alle Wiederbehandlungstests werden in Tafel 15 drei Quader mit unterschiedlichem Verwitterungsstatus vorgestellt. Entweder kam es im Zuge der Wiederbehandlung zu einer leichten

Intensivierung des originalen Farbtons oder die Musterfläche hebt sich nicht vom umgebenden Gestein ab.

Es entstanden weder Grauschleier noch glänzende Oberflächen. Entsprechend den empfohlenen Kriterien für die optische Beschaffenheit einer Musterfläche (SNETHLAGE 1997) sind die Wiederbehandlungstests an Schloss Schillingsfürst als erfolgreich zu charakterisieren.

8. Untersuchungsmethoden

8.1 Mikroskopische Analysen

8.1.1 Polarisationsmikroskopie (POL)

Zur genauen Bestimmung des Mineralbestandes und des Gefüges sowie zur Determinierung markanter Unterschiede wurde stellvertretend für jede Sandsteinvarietät ein Dünnschliff (0,03 mm) angefertigt und mit konventioneller Polarisationsmikroskopie im Durchlicht systematisch untersucht. Zur Stabilisierung der sehr zerbrechlichen Schilfsandsteinproben war es notwendig, diese für die Dünnschliffpräparation in ein farbloses Harz einzubetten. Diese Maßnahme beeinträchtigte die Charakterisierung des Mineralbestandes und des Gefüges nicht. Die Ergebnisse dieser Bestimmungen sind im Kapitel 6 zur Klassifizierung der untersuchten Sandsteinvarietäten dargelegt.

8.1.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die Rasterelektronenmikroskopie bietet neben der Kryo-REM (siehe unten) die beste Möglichkeit, Verteilung und Anbindung des ausgehärteten Schutzmittels im Porenraum und auf der Kornoberfläche zu untersuchen. Diese Methode wurde angewendet, um die aus den ersten Konservierungsmaßnahmen herrührenden Kieselgelfilme zu detektieren und eine zusätzliche Aussage zur Restwirksamkeit der ehemals applizierten Substanzen zu erhalten. Ferner diente sie der hoch auflösenden Visualisierung der Anbindung von den im Rahmen der Wiederbehandlung verwendeten Substanzen an die mineralische Oberfläche. Für eine optimale Kontrolle des Wiederbehandlungserfolgs wurde jeweils eine Probe des altbehandelten Sandsteins mit der entsprechenden wiederbehandelten Probe verglichen. Diese vergleichende Betrachtung ermöglicht eine Beurteilung der Veränderung der Porenstruktur und gibt einen qualitativen Eindruck von der Wirksamkeit bzw. Unzulänglichkeit einer Wiederbehandlung. Zu diesem Zweck wurde für jede Gesteinsvarietät-Schutzmittel-Kombination mindestens eine Untersuchung durchgeführt.

Methodik

Die Untersuchungen wurden mit dem Mikroskop Stereoscan 250 MK 3 der Firma Cambridge und dem energiedispersiven Röntgenanalyse System AN 10000 der Firma Link im Zentrallabor des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege durchgeführt. Eine Probencharge ist zusätzlich mit dem Gerät DSM 960 A der Firma Zeiss an der LMU München untersucht worden. In diesem Fall war auch eine Mineralanalyse mittels EDX möglich.

8.1.2.1 Ergebnisse

Für eine erfolgreiche Applikation des jeweiligen Schutzmittels ist die Art des Kontaktes der Gelsubstanz mit den benachbarten Gesteinskomponenten von entscheidender Bedeutung. Wichtig ist ein adhäsiver Verbund zwischen mineralischem Untergrund und der polymeren Mikroschicht. Abbildung 8.1 zeigt die Anbindung von Kieselgel- und Polysiloxanfilmen an die mineralische Oberfläche durch Wasserstoffbrückenbindungen. Die Sauerstoffatome der SiO_4 -Tetraeder sind an der Quarzoberfläche hydratisiert. Einerseits kommen reaktive Silanolgruppen (Si-OH) und andererseits nicht reaktive Siloxangruppen (Si-O-Si) vor. Auch entlang der Spalt- und Bruchflächen der Feldspäte sind nach SNETHLAGE (1984) die reaktiven Silanolgruppen vorhanden. Bei den Tonmineralen können

beide funktionellen Gruppen vorkommen. Auf den Schichtflächen der SiO_4 -Tetraederschichten treten vermutlich ausschließlich Siloxangruppen auf (SNETHLAGE 1984). Die Konzentration von Silanolgruppen an der Oberfläche von Quarzmineralen ist hoch. Aus diesem Grund können sowohl Kieselgel- als auch Polysiloxanfilme sehr gut an mineralische Oberflächen mit hohem Quarzgehalt (Sandstein) anbinden. Im Gegensatz dazu bieten Tonminerale nur randlich Silanolgruppen, die sich zu Siloxane verknüpfen, so dass sich Polysiloxanfilme in Form von Segeln von Rand zu Rand zwischen einzelnen Tonpartikel ausbilden können (SNETHLAGE & WENDLER 2000).

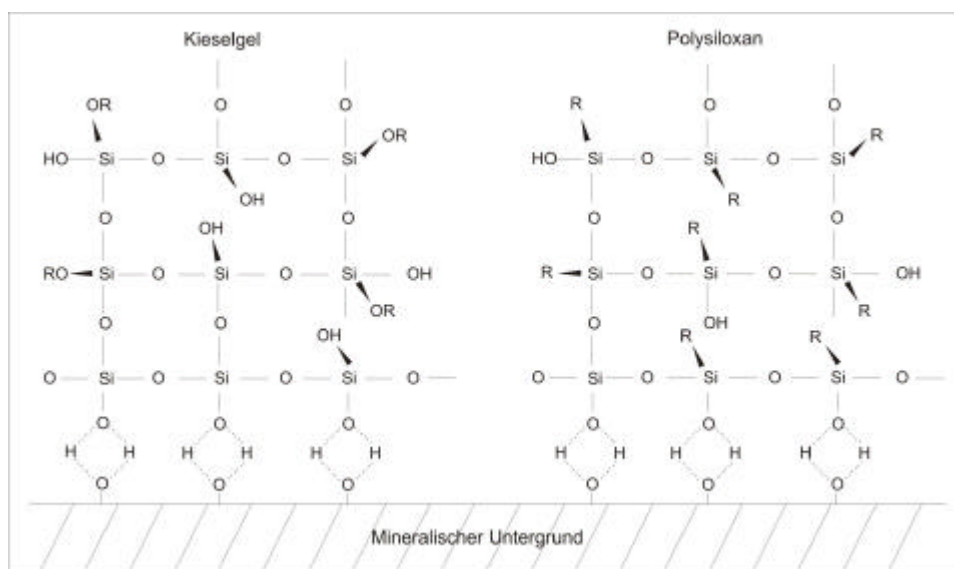


Abb. 8.1: Anbindung von Kieselgel und Polysiloxanfilmen an den mineralischen Untergrund über van-der-Waals-Bindungen (nach SNETHLAGE & WENDLER 2000). Durch Wasserabspaltung kommt es zur Ausbildung der festen Siloxanbindungen mit dem Untergrund.

Schutzfilme, die aus einer hydrophobierenden Behandlung mit Alkyltrialkoxysiloxanen resultieren, sind sehr fragil und zum Teil nur eine Moleküllage dick. Meistens konnte beobachtet werden, dass sie sich nicht zwischen einzelne Tonmineralaggregaten ziehen, sondern dachziegelartig dem Tonmineralrasen oben aufliegen (Tafel 10/3, 11/8), was nur einen mäßig hydrophobierenden Effekt nach sich zieht.

Für eine Optimierung der Festigkeit sind zwei Effekte maßgeblich: die Steigerung des Kornverschränkungsgrades durch zusätzliche Verzahnung und Verstärkung sowie die Bildung von Haftbrücken (SATTLER 1992). Im Folgenden wird zunächst aufgezeigt, inwieweit die ursprüngliche Konservierung bezüglich dieser Kriterien noch wirksam ist bzw. mit welchem Erfolg eine Wiederbehandlung durchgeführt wurde. Zu diesem Zweck werden REM-Aufnahmen aller untersuchten Varietäten in den Tafeln (siehe Anhang) dargestellt und ausgewertet.

Merkmale einer wirksamen Festigungsmaßnahme sind fehlstellenfreie polymere Kornbrücken und Zwickelfüllungen, die den Zusammenhalt der Quarzkörner stabilisieren. Das Gel hat im Falle der Zwickelfüllungen ein tuchartiges Erscheinungsbild mit konkav kalottenförmigen Begrenzungen zum frei bleibenden Porenraum.

Den Aufnahmen der wiederbehandelten Proben ist die Dokumentation des altbehandelten Zustandes (Stand 2001) vorangestellt. Diese Gegenüberstellung soll die Grundlage für die Beurteilung der Veränderung der Gefügestrukturen bilden. Es wurden stets die vordersten Scheiben eines jeden Bohrkerns untersucht, um auf jeden Fall in einem Bereich zu operieren, der die vorgenommenen Maßnahmen widerspiegelt. Als Anhaltswert für die Wirkungsdauer von Steinfestigern wird ein auf

Erfahrungen an verschiedenen Objekten basierender Zeitraum von ungefähr 10 Jahren angegeben. SNETHLAGE (1984) beschreibt neben der Verwitterung vor allem wirkstoffbedingte Ursachen, die eine Minderung der Festigungswirkung nach sich ziehen. Hauptaugenmerk wird dabei auf die fortschreitende Dehydrierung der Gelphase gelegt (siehe Abb. 8.2). Nach einer erfolgreichen Behandlung bedeckt zunächst ein zusammenhängender Gelfilm das Substrat, wobei Grenzflächenspannungen die Gelpartikel aneinander ziehen (SATTLER 1992). Je nach Produkt dauert die Abscheidung des frischen Kieselgels 1 bis 5 Wochen. Die darauf folgende Alterung des Kieselgels ist auf die fortgesetzte Kondensation verbliebener Silanolgruppen und die Verdunstung von Wasser- und Ethanolmolekülen zurückzuführen, die während der Vernetzung in Hohlräumen des Gels eingeschlossen wurden. Sie dauert über mehrere Jahre an. Mit zunehmender Alterung des Gels wird durch die fortschreitende Wasserabgabe eine Gelkontraktion ausgelöst und daraus resultierende Risse werden sichtbar. Die Folge fortschreitender Dehydrierungsprozesse äußert sich in Form teilweise abgelöster Gelfragmente (siehe Abb. 8.2). Diese Alterungserscheinungen des Gels gehen nicht zwangsläufig mit einer reduzierten Festigkeit des Materials einher (SATTLER 1992).

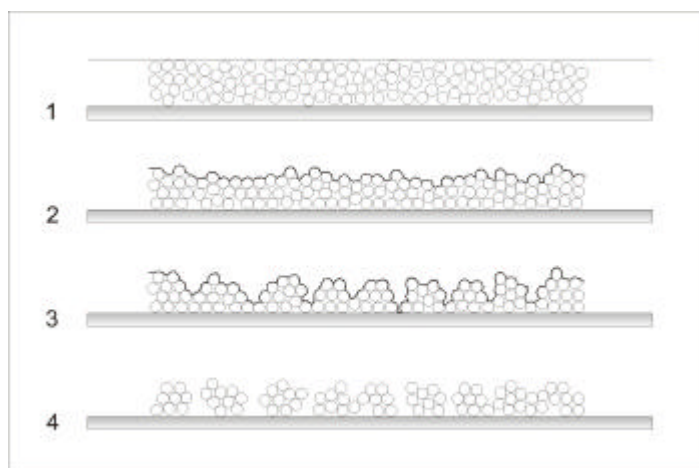


Abb. 8.2: Schematische Darstellung der Alterung eines Gelfilms (nach ILER 1979);
 1. Solzustand, beginnende Aggregation,
 2. ausgebildeter Gelfilm,
 3. beginnende Rissbildung bei Kontraktion,
 4. Gelfragmente nach fortschreitender Alterung

Mit der Aufreihung der Bilder in den Tafeln 7/1 bis 7/6, 7/7 und 8/5 bis 8/7 wurde versucht, das bei den Grünsandsteinvarietäten I-IV beobachtete Spektrum möglicher Unzulänglichkeiten der Gelfilme aufzuzeigen, die aus der ersten Behandlung stammen. Die meisten Abbildungen zeigen Gele, die vom mineralischen Untergrund abgelöst sind (Tafeln 7/1 bis 7/3, 7/4, 7/7, 7/8, 8/3 und 8/5). Dieses Phänomen korreliert sehr gut mit den ermittelten erniedrigten Biegezugfestigkeiten der Materialien. Die Ablösung des Gels vom Untergrund spielt eine ausschlaggebende Rolle beim absoluten Festigkeitsverlust des Gesteins. Des Weiteren konnten Schrumpfungsrissen in Gelpaketen beobachtet werden (Tafeln 7/5, 7/6, 8/2). In erster Linie wird dafür die fortschreitende Entwässerung der Gelphase verantwortlich gemacht (SATTLER 1992). Die mit zunehmender Verdichtung des Gels verbundene Wasserabgabe führt zu internen Spannungen, die beim Überschreiten der Kohäsion durch die Ausbildung von Schrumpfungsrissen abgebaut wird (SATTLER 1992). Die aus hydrophobierenden Behandlungen resultierenden Polysiloxanfilme sind sehr dünn und fragil. In der Tafel 8/7 ist zu erkennen, dass sie den mineralischen Untergrund noch weitflächig überziehen. Allerdings scheint es, dass sich einzelne Schuppen des Polysiloxanfilms von der Oberfläche ablösen, was mit Sicherheit eine Schwächung des wasserabweisenden Effekts nach sich zieht. Die auf altbehandeltem Material ermittelten kapillaren Wasseraufnahmen lagen jedoch bei allen Varietäten im Bereich einer akzeptablen hydrophoben Wirkung (siehe Kapitel 8.3.1).

Vereinzelt wurden auch großflächigere intakte Gelüberzüge detektiert (Tafeln 7/8 und 8/1). Der Zustand der Schutzmittelfilme im Porenraum bzw. auf der Mineraloberfläche in den erläuterten Fällen spricht dafür, dass sowohl festigende als auch hydrophobierende Eigenschaften weiterhin erhalten sind, aber auch, dass deren Wirksamkeit im Vergleich zu intakten Gelfilmauskleidungen reduziert sein müsste. Entsprechendes konnte durch die Überprüfung der Festigkeitsparameter und des Feuchtigkeitsaufnahme und -transportverhalten bestätigt werden (siehe Kapitel 8.4 und 8.3).

Nach der Wiederbehandlung konnten in rasterelektronischen Untersuchungen an vielen Stellen in den Proben lang aushaltende, geschlossene Gelfilme beobachtet werden (Tafel 9), die den beschriebenen Festigkeitszuwachs bestätigen. Anhand der Aufnahmen konnten keine Unterschiede zwischen elastifizierten und konventionellen Festigern festgestellt werden.

Einen direkten Vergleich zwischen altbehandeltem und wiederbehandeltem Status geben die Abbildungen 10/3 (altbehandelt) und 10/4 (wiederbehandelt mit Funcosil SNL) wieder. Die altbehandelte Probe weist einen Porensaum aus Chloritrasen auf, der Relikte eines Polysiloxanfilms zeigt. Der auf dieser Fläche ermittelte w -Wert beträgt $1,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$. In Folge der doppelten Applikation mit Funcosil SNL konnte ein weitreichender, einheitlicher Polysiloxanfilm ausgebildet werden, woraufhin sich der entsprechende w -Wert auf $0,05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ reduzierte. Somit ist die Konservierungsmaßnahme eindeutig als erfolgreich einzustufen.

Bei den Untersuchungen des altbehandelten Original- und Austauschmaterials von Schloss Schillingsfürst konnten in vielen Bereichen nahezu keine Relikte einer ursprünglichen Behandlung detektiert werden. Dieser Befund unterstreicht sehr eindrucksvoll die messtechnisch ermittelten sehr hohen Wasseraufnahmen beider Materialien. Auf den Tafeln 11 und 13 sind die Ergebnisse der Wiederbehandlung des Schilfsandsteines dargelegt. Bei der Auswertung der REM-Bilder fällt auf, dass Proben, die mit Funcosil SNL wiederbehandelt wurden, häufig die typischen, durch den Gelfilm abgedeckten Tonmineralrasen zeigen. Aus Untersuchungen von SNETHLAGE (1984) ist bekannt, dass sich die hydrophobierenden Polysiloxanfilme nur mangelhaft mit der Basisfläche der Tonmineralblättchen verbinden. So bleiben weite Teile des Porenraums ungeschützt und die unzulänglichen Silikonharzfilme werden von eindringendem Wasser unterwandert. Diese unvollständigen Filme wurden auch in den aktuellen REM-Untersuchungen detektiert. Allerdings konnten in Folge einer Behandlung mit Funcosil SNL tatsächlich homogenere und kontinuierlichere Schutzfilme beobachtet werden als es bei den anderen Konservierungsmitteln der Fall gewesen ist. Die Ausbildung von Gelsegeln zwischen den Plättchen der Kartenhausstruktur treten eher untergeordnet auf. Anders verhält es sich bei dem mit Funcosil SL und Funcosil Antihydro wiederbehandelten Material. Die Porenwandungen aus kartenhausähnlichen Tonmineralrasen wurden nicht in der oben beschriebenen „zugedeckten“ Form beobachtet. Die Gelfilme ziehen sich mehr in die Zwischenräume und bilden Segel zwischen den Tonmineralen aus. Allerdings kann diese Beobachtung nicht mit Unterschieden in der Effektivität bezüglich der Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme korreliert werden.

8.1.3 Kryo-Rasterelektronenmikroskopie (Kryo-REM)

Methodik

Zusätzlich zu den rasterelektronenmikroskopischen Betrachtungen wurden diverse Schilfsandsteinproben in der Kryo-REM Anlage (Hitachi S4000) am Institut für Werkstofftechnik /Amtliche Materialprüfanstalt in Bremen untersucht. Der Einsatz eines Kryo-Tisches bietet die

Möglichkeit, die Reaktion des Gefüges auf Feuchtigkeit sichtbar zu machen. Nur bei sehr geringen Temperaturen, unter minus 140° C, liegt Wasser bei geringen Drücken als stabile Phase vor, die nicht sublimiert. Hier liegt auch der Ansatz der Idee der Kryo-Präparation (CLOOTH 1992). Die Feuchtigkeit wird bei diesen geringen Temperaturen fixiert und die Probe im gefrorenen Zustand gebrochen. Für die weitere Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop, also bei einem hohen Unterdruck, bleibt diese stabil.

Um beim Einfrierprozess die Bildung von Eiskristallen zu verhindern, muss die Abkühlgeschwindigkeit in den zu fixierenden, möglichst kleinvolumigen Proben über 1000°C/s liegen, was nur durch die Verwendung von schmelzendem Stickstoff erreicht werden kann. Danach erfolgt die artefaktfreie Untersuchung durch Weiterkühlung im REM (MPA BREMEN).

Im Vorfeld der Untersuchungen wurden die meisten 0,5x0,5x0,5 cm Proben 1,5 h unter Wasser gelagert, um die kapillar wirksame Porosität zu füllen. Es folgten die Kryo-Präparation in schmelzendem Stickstoff und der anschließende Gefrierbruch. Die mikroskopischen Analysen wurden an diesen frischen Bruchflächen vorgenommen.

Die Methode bietet sowohl die Möglichkeit der Betrachtung von Rückstreubildern (RE-Bilder) als auch von Sekundärelektronenbildern (SE-Bilder). Rückstreubilder bzw. Rückstreuerelektronen sind in die Probe eingedrungene Primärelektronen des Elektronenstrahls, die durch einfache oder mehrfache elastische Streuung ohne wesentliche Energieverluste die Probenoberfläche verlassen können. Die Menge der Rückstreuerelektronen steigt mit zunehmender Ordnungszahl. Ein Materialunterschied (Ordnungszahldifferenz) ist durch Kontrastunterschiede erkennbar. Oberflächen mit geringer Topographie können ebenfalls kontrastreich abgebildet werden. Die Anzahl emittierter Sekundärelektronen ist im Wesentlichen unabhängig von der Ordnungszahl. Sekundärelektronenbilder eignen sich insbesondere zur detailgenauen Abbildung reliefreicher Oberflächen; neigen jedoch zum Teil zu Überstrahlungen, die eine genaue Identifizierung der Komponenten verwehren können.

8.1.3.1 Ergebnisse

Die Kryo-REM Untersuchungen der altbehandelten Schilfsandsteinproben von Schloss Schillingsfürst vermittelten stellenweise den Eindruck eines nahezu unbehandelten Korngefüges. Auf den, den Porenraum auskleidenden Tonmineralrasen konnten häufig unzureichende Polysiloxanfilmreste detektiert werden. Diese Beobachtungen gehen auch mit den Messungen der w-Werte einher, die den jeweiligen „Stand 2001“ der Fassade repräsentieren. Sie schwanken zwischen 6,7 kg/m²h^{-0,5} und 1,7 kg/m²h^{-0,5}. Die Schutzfilme der ursprünglichen Konservierungsmaßnahme sind demnach generell nicht mehr intakt und die wasserabweisende Wirkung nicht mehr gegeben. Eine erneute Behandlung ist entsprechend den Beobachtungen im Rasterelektronenmikroskop notwendig. Die Abbildungen des wiederbehandelten Porenraums in Kombination zu den entsprechenden ermittelten kapillaren Wasseraufnahmewerten geben an, dass die jeweiligen Wiederbehandlungen diesbezüglich als erfolgreich einzustufen sind. Die Silikonharzfilme überkleiden meist weitreichend das Korngefüge. Die optisch besten Ergebnisse erzielt hierbei die Applikation von Funcosil SNL. Die im Anschluss an diese Anwendung beobachteten Schutzfilme waren am homogensten (Tafel 10/4, 11/1, 11/3, 13/2 und 13/5).

Ebenso wie bei den normalen REM-Untersuchungen wurden bei den Kryo-REM-Untersuchungen sowohl altbehandelte als auch wiederbehandelte Proben berücksichtigt. Die altbehandelten Proben repräsentieren einen Zeitraum von 18-24 Jahren nach der ursprünglichen Konservierung. Die meisten zu untersuchenden Materialien wurden im Vorfeld der optischen Untersuchung 1,5 Stunden unter

Wasser gelagert. In allen Fällen war das Resultat ein mit Wasser gefüllter Porenraum und somit ein unzureichender Schutz vor eindringendem Wasser (Tafel 12/1-12/3, 12/5, 12/6 und 12/8). Des Weiteren konnten entsprechend einer freundlichen mündlichen Mitteilung von Dr. H. Juhling diffuse, semitransparente Erscheinungen als sich entmischende Salzlösungen identifiziert werden (Tafel 12/4, 12/7 und 13/1). Diese Beobachtungen lassen sich mit Messungen der Salzbelastung positiv korrelieren.

Die wiederbehandelten Proben zeigen in Zonen umfassender Polysiloxanbedeckung nahezu keine Wasserfilme. Tafel 13/2 zeigt eine offensichtlich umfassend geschützter Mineraloberfläche, auf der jedoch mittels EDX-Analyse (Sauerstoffpeak) ein sehr dünner Wasserfilm detektiert werden konnte. Stellen, an denen die Silikonharzfilme unzureichend ausgebildet sind, hat sich in Folge der anderthalbstündigen Unterwasserlagerung Wasser im Porenraum etablieren können (Tafel 13/4 und 13/7). Die entsprechenden w-Werte zeigen zwar eine deutliche Reduktion gegenüber dem altbehandelten Zustand an, allerdings kann in diesen Fällen nicht von einer umfassend geschützten Probe ausgegangen werden.

8.2 Methoden zur Bestimmung der Porosität

Wie bereits erwähnt, spielt die Anwesenheit von Wasser eine Hauptrolle bei der Verwitterung der Natursteine. Nahezu jeder Verwitterungsprozess ist auf das Wasser, sowohl in flüssigem, gasförmigem als auch festem Aggregatzustand, zurückzuführen. Der Wassergehalt eines Bausteins hängt zum einen von den Umweltgegebenheiten wie Jahresniederschlag, Temperatur und Luftfeuchte ab. Andererseits sind die gesteinspezifischen Parameter Porenvolumen, Porengröße, Porenverteilung und Porengeometrie verantwortlich für den Feuchtehaushalt des Gesteins.

Die folgenden Untersuchungen wurden durchgeführt, um die verschiedenen Gesteinsvarietäten bezüglich ihres Porenraums zu charakterisieren, um darauf aufbauend den Effekt der applizierten Schutzmittel zu bestimmen.

Sandsteine besitzen eine enorme Vielfalt an variablen Eigenschaften, welche Einfluss auf ihren Feuchtehaushalt haben. In diesem Zusammenhang besitzt die Porosität bzw. die Porenstruktur die höchste Relevanz. Für das Verwitterungsverhalten von Naturwerksteinen ist die Beschaffenheit des Porenraums von entscheidender Bedeutung. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften eines Gesteins werden durch die Art, Form, Größe, Verteilung und Vernetzung der Poren bestimmt.

Der Porenraum ist der Ort im Gestein, in dem unmittelbar alle verwitterungsrelevanten chemisch-physikalischen Prozesse wie Wassereinlagerung, Salzkristallisation, Lösungs- und Fällungsprozesse etc. ablaufen (FITZNER 1994).

Die Porosität stellt das Verhältnis zwischen dem Hohlraumvolumen (Poren) und dem Gesamtvolumen des Gesteins dar und wird in Prozent angegeben. Die Gesamtporosität P_0 umfasst alle Hohlräume im Material unabhängig davon, ob es sich um geschlossene oder von außen zugängliche Poren handelt und ist damit die größtmögliche Porositätskenngröße (MENG 1993). An allen verwitterungsrelevanten Prozessen und insbesondere an Feuchtetransportvorgängen sind nur die von außen zugänglichen Poren beteiligt, deren Anteil als effektiver (offener) Porenraum P_e bezeichnet wird.

Für die Einteilung der Porengröße existieren je nach Fragestellung unterschiedliche Nomenklaturen (siehe Tab. 8.1). Wenn keine besonderen Anmerkungen gemacht sind, ist dem Text die bauphysikalische Nomenklatur zugrunde gelegt, da diese Einteilung das breiteste Porengrößenspektrum umfasst und in ihrer Gliederung auf die verschiedenen Wassertransportfunktionen abgestimmt ist.

Tab. 8.1: Einteilung der Porendurchmesser

Bauphysikalische Einteilung (KLOPFER 1985)	Mikroporen < 0,1 µm		Kapillarporen 0,1 – 1000 µm		Makroporen > 1 mm
IUPAC-Klassifizierung (GREGG 1982)	Mikroporen < 0,002 µm		Mesoporen 0,002 – 0,05 µm		Makroporen > 0,05 µm
Poreneinteilung WITTMANN (1979)	Mikroporen	Mesoporen	Mikro-kapillaren	Kapillaren	Makroporen

8.2.1 Effektiver Porenraum - Bestimmung über die Wasseraufnahme unter Vakuum

Methodik

Die Bestimmung der Porosität erfolgt über die verschiedenen Gewichtszustände Trockengewicht (m_t), Nassgewicht (m_n) sowie Auftriebsgewicht (m_a), wobei als poren sättigendes Medium demineralisiertes Wasser verwendet wird. Die Sättigung des zugänglichen Porenraums wird durch vorhergehendes Evakuieren der Proben erreicht.

Nahezu von jeder untersuchten Bohrkernscheibe sind die Porositätskenndaten (P_e) ermittelt worden. Um der mangelnden Repräsentativität der Ergebnisse aufgrund der zum Teil sehr kleinen Probenabmessungen von 0,5x0,5x0,5cm entgegen zu wirken, wurden meistens mehrere Bruchstücke einer Bohrkernscheibe der jeweiligen Messung zugeführt und aus den Ergebnissen ein Mittelwert gebildet. Die Porosität ergibt sich aus folgender Beziehung (Formel 4):

$$\Phi = \frac{m_n - m_t}{m_n - m_a} \cdot 100 \quad \begin{array}{l} F \quad [\%] = \text{Porosität} \\ m_t \quad [\text{g}] = \text{Trockengewicht} \\ m_n \quad [\text{g}] = \text{Nassgewicht} \\ m_a \quad [\text{g}] = \text{Auftriebsgewicht} \end{array} \quad (\text{Formel 4})$$

Aus den Gewichtsdaten lassen sich weiterhin die Rohdichte (ρ_{roh}) und die Reindichte (Matrixdichte) (ρ_{mat}) ermitteln.

Es wurden WAV [M.-%], die Porosität [Vol.-%], die Rein- und die Rohdichte [g/cm³] bestimmt.

8.2.1.1 Ergebnisse

8.2.1.1.1 Regensburger Grünsandstein

Aus der Abbildung 8.3_a wird sehr gut ersichtlich, dass die bereits zweimal behandelte Varietät I (2. von oben) gegenüber der einmalig behandelten eine deutlich verringerte Porosität des altbehandelten Materials besitzt. Die Porenräume sind demnach noch besser ausgekleidet.

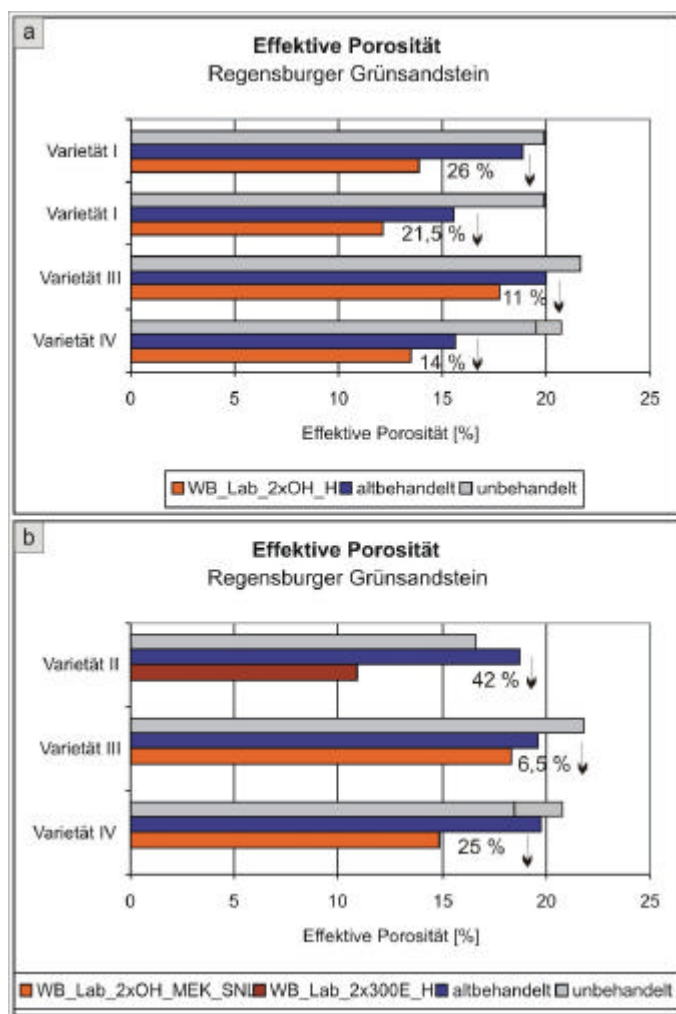


Abb. 8.3 (a-b): Effektive Porosität des Bereiches zwischen 0-0,5 cm der Fassade. 8.3_a gibt die Ergebnisse der zweifachen Wiederbehandlung im Labor mit Fungosil OH und der Hydrophobierung mit Fungosil H wieder. Indes sind in 8.3_b die Laborapplikation von Remmers 300E (2x) und Fungosil H sowie die verdünnte Anwendung von Fungosil OH (2x) mit nachfolgender Hydrophobierung mit Fungosil SNL dargestellt.

Dennoch konnten keine optimaleren Festigkeitsbedingungen, beispielsweise in Form einer höheren Biegezugfestigkeit, detektiert werden. Eventuell handelt es sich nur um brückenartige Verbindungen, die zwar den Porenraum verstellen, aber nicht zur Festigkeitssteigerung beitragen. Dafür würden auch die Werte der jeweiligen E-Module sprechen. Der E-Modul der nur einmal konservierten Varietät I liegt bei 13,5 kN/mm² und der bereits zweimal behandelten Probe beträgt im Mittel 21 kN/mm². Die Wiederbehandlung mit 2xOH_H (8.3_a) führt auf der nur einmal behandelten Varietät I zu einer stärkeren Absenkung der Porosität gegenüber dem altbehandelten Material. Eventuell ist der Porenraum in diesem Fall besser zugänglich. In dem bereits zweimalig konservierten Gestein wirken die Gelreste mit den Schrumpfrissen möglicherweise eher hinderlich (Grenzflächenreaktionen) auf die neuerliche Geldeposition. Bei den Interpretationen zur Abnahme der Porosität ist jedoch unbedingt zu beachten, dass nicht nur Kieselgele im Porenraum deponiert worden sind, sondern alle Proben auch hydrophobiert wurden. Jedoch dürfte die Hydrophobierung im Vakuum eigentlich nicht wirksam sein, und das Wasser müsste ungehindert in den Porenraum eindringen können.

Allerdings ist es nicht in ganz auszuschließen, dass die Oberflächenspannung tatsächlich im vollen Umfang überwunden werden kann und es somit keine Rolle spielen würde, ob die Probe letztlich hydrophobiert oder nicht hydrophobiert der Messung zugeführt wurde. Hinzu kommt, dass die Proben im Anschluss an die Evakuierung im Wasser unter Normaldruck gelagert und danach die Porositätskenndaten im Wasserbecken ermittelt werden. Es wäre denkbar, dass bei hydrophobierten Proben aufgrund von Grenzflächenphänomenen die Auftriebseigenschaften ändern. Da die Proben jedoch alle hydrophobiert worden sind, kann von vergleichbaren Einflüssen ausgegangen werden, die somit nicht zu wesentlichen Fehlinterpretationen führen dürften.

Die bereits makroskopisch sichtbare Porosität der Varietäten III und IV ist eher auf größere Poren zurückzuführen, wohingegen die Varietäten I und II einen höheren Anteil an kleineren Poren besitzen.

Demnach muss die effektive Porosität nicht zwangsläufig für die Varietäten III und IV sehr viel höher sein als die der Varietäten I und II. Im Rahmen dieser Arbeit wurden an den Grünsandsteinproben keine Hg-Porosimetriemessungen durchgeführt. Zu einer genauen Aufklärung der Porengrößenverteilung der einzelnen Varietäten wäre das für folgende Untersuchungen empfehlenswert. Eine Betrachtung der Rohdichten (siehe Abb. 8.4_a) der vier Varietäten gibt jedoch schon einen Hinweis darauf, dass die Porengrößenverteilung die wahrscheinlichste Erklärung für die nur gering unterschiedlichen Porositäten ist. Die makroskopisch eher grobporig erscheinenden Varietäten III und IV zeigen eine deutlich geringere Rohdichte als die Varietät I und II (siehe Abb. 8.4_b). Der Umkehrschluss über die Rohdichte entspricht dem makroskopischen Eindruck der verschiedenen Grünsandsteinvarietäten. Ein höherer Anteil an Grobporen in Varietät III und IV würde auch die geringeren Absenkungen der Porositäten in Folge der Wiederbehandlung erklären. Die engeren Porenräume der dichteren Varietäten können durch die Kieselgele leichter erfüllt werden, wohingegen bei großen Porenräumen das Einbringen eines Schutzmittelfilms prozentual einen geringeren Einfluss besitzt (siehe Abb. 3.4).

In Abbildung 8.3_b ist sowohl die Behandlung mit Remmers 300E (2x) mit nachfolgender Hydrophobierung mit Funcosil H als auch die verdünnte Applikation von Funcosil OH mit nachträglicher Hydrophobierung mit Funcosil SNL dargestellt. Der flexibilisierte Festiger vermochte demnach die größte Absenkung der Porosität zu bewirken. Ein Grund hierfür könnte die Gelplattengröße des elastifizierten Festigers sein. Sie ist größer als die der konventionellen Festiger, wie beispielsweise Funcosil OH, so dass eine Überbrückung weiterer Porenräume möglich ist (BOOS ET AL. 1999). Ein Resultat dessen könnte eine weiterreichende Auskleidung des Porenraums und somit eine stärkere Reduzierung der effektiven Porosität sein.

Zusätzlich zur Entwicklung der effektiven Porosität werden in den Abbildungen 8.4_a und 8.4_b die entsprechenden Rohdichten der einzelnen Wiederbehandlungsmaßnahmen dargestellt. Erwartungsgemäß verhält sich die Rohdichte der Porosität entgegengesetzt. Die Wiederbehandlung mit dem elastifizierten Festiger Remmers 300E bewirkt im Vergleich zu den anderen Schutzmitteln den stärksten Anstieg der Rohdichte. Die Änderung der Rohdichte in Folge der Applikation von Funcosil OH, unverdünnt (8.4_a) und verdünnt (8.4_b) auf Varietät III, ist dahingegen relativ gering.

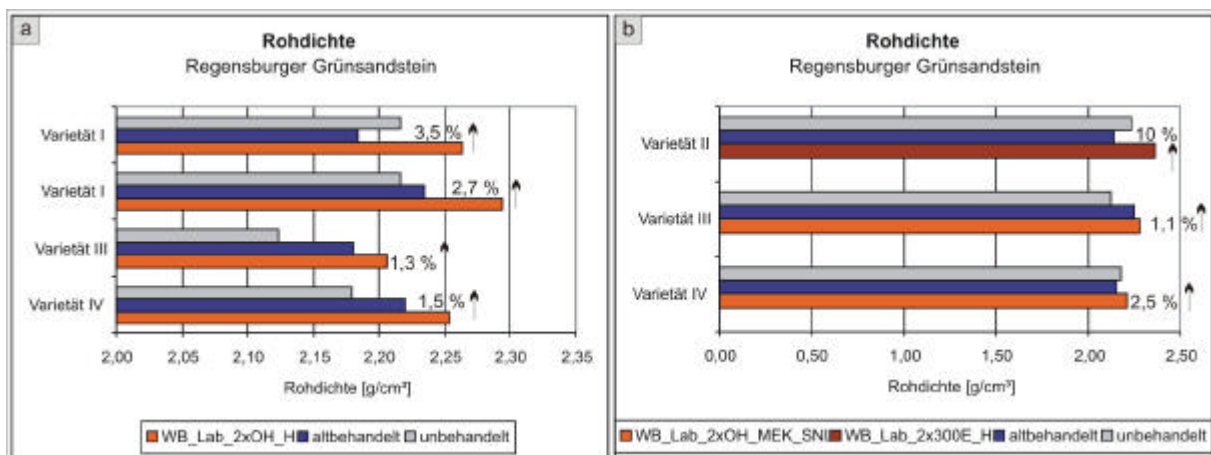


Abb. 8.4 (a-b): Entwicklung der Rohdichte in Folge der Wiederbehandlung der Proben. 8.4_a gibt die Ergebnisse der zweifachen Wiederbehandlung im Labor mit Funcosil OH und der Hydrophobierung mit Funcosil H wieder, wohingegen in 8.4_b die Laborapplikation von Remmers 300E (2x) und Funcosil H sowie die verdünnte Anwendung von Funcosil OH mit nachfolgender Hydrophobierung mit Funcosil SNL dargestellt sind (Zone 0-0,5 cm Tiefe).

Der Versuch, einen Faktor zwischen der veränderten Porosität und der Rohdichte zu finden, gelang nur für jede Varietät separat. Für Varietät I liegt er zwischen 1:7 bzw. 1:8, für Varietät II, wovon nur eine Wiederbehandlung in diese Betrachtung einfließt, liegt er bei 1:4 und für Varietät IV bei 1:9 bzw. 1:10.

8.2.1.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

In der folgenden Abbildung (8.5) wird der Einfluss einer erneuten hydrophobierenden Behandlung auf die effektive Porosität bzw. die Rohdichte vergleichend dargestellt. Die prozentualen Unterschiede zum Grünsandstein in der Reduktion der Porosität liegen schon darin begründet, dass dort Kieselgele abgelagert wurden. Polysiloxanfilme sind zu geringmächtig, als dass sie tatsächlich detektierbar wären. Die hier dargestellte Reduktion der Porosität ist deshalb mit der Optimierung der hydrophoben Eigenschaften verknüpft. Wie unter 8.2.1.1.1 bereits dargelegt, dürfte die Hydrophobierung unter Vakuum nicht mehr wirksam sein bzw. ist von einer starken Einschränkung der Wirkung auszugehen. Da die Schilfsandsteinproben alle hydrophobiert wurden (außer Funcosil Antihydro), kann von vergleichbaren Ausgangsbedingungen für die Porositätsmessungen ausgegangen werden.

Eine Ausnahme, in der die Änderung der Porosität im Bereich des Messfehlers liegt bzw. demnach keine Veränderung detektierbar war, bildet die Applikation des Quellminderers Funcosil Antihydro. Ähnliches wird auch in UTZ (2004) beschrieben, wo die einfache Behandlung mit Quellminderern keine messbaren Veränderungen der Gesamtporosität verursacht. Die andere Probe, an der die Applikation von Funcosil Antihydro zumindest eine Reduktion der Porosität um 9 % hervorrief, ist im Rahmen der ersten Konservierungsmaßnahme mit der Mikroemulsion PTEXS behandelt worden. Die Quellneigung konnte durch die Wiederbehandlung in beiden Fällen gleichsam um ungefähr 1000 µm/m reduziert werden.

Die beiden Originalmaterialproben (Diebach/Gailnau), die mit Funcosil SNL wiederbehandelt wurden, zeigen eine verschieden starke Absenkung der Porosität an. Auch in diesem Fall liegt eine voneinander abweichende primäre Konservierung zugrunde.

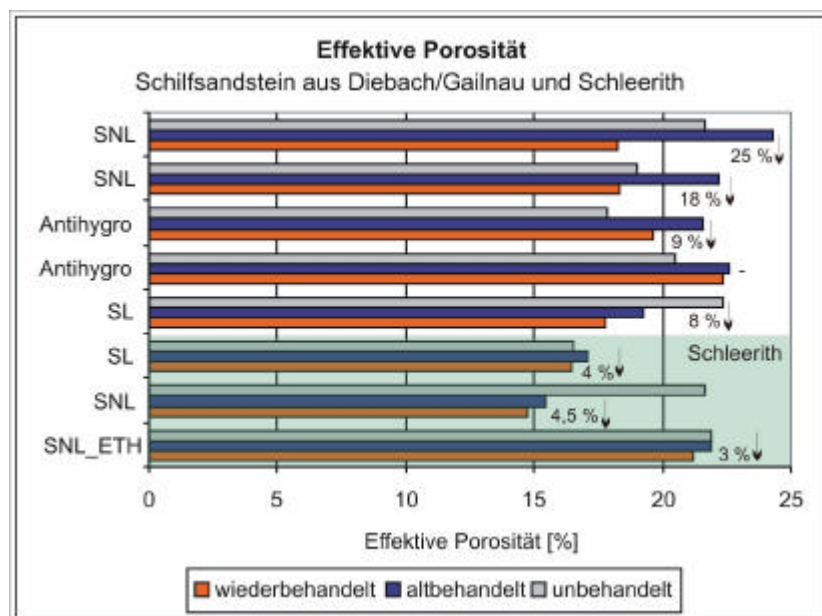


Abb. 8.5: Vergleich der effektiven Porosität und Rohdichte in Folge der Wiederbehandlung

Die obere Probe, an der eine 25-prozentige Reduktion detektiert werden konnte, erfuhr ursprünglich eine Behandlung mit dem Quellminderer BDAC, wohingegen die andere Musterfläche (18 %) unbehandelt verblieb. Die Tatsache, dass die Reduktion der effektiven Porositäten bei dem Sandstein aus Schleierith einheitlich geringer ausfiel als bei dem Material aus Diebach/Gailnau, spricht für eine wirkungsvollere Hydrophobierung des Austauschmaterials.

Die Bestimmung der effektiven Porosität über die Wasseraufnahme ist vor dem Hintergrund der oben dargelegten Überlegungen für hydrophobierte Proben nicht geeignet. Um einen Zweifel an den Ergebnissen eindeutig ausschließen zu können, wird empfohlen, die Analysen mit der Quecksilberporosimetrie durchzuführen. Diese Messung läuft ausschließlich im Vakuum unter Verwendung einer nicht benetzenden Flüssigkeit (Quecksilber) ab.

8.2.2 Quecksilber Porosimetrie

Methodik

Die Bestimmung der Porengrößenverteilung erfolgte mittels der Quecksilberdruckporosimetrie. Es wurden nur einige Messungen an dem tonreichen Schilfsandstein vorgenommen. Die einzelnen Proben waren Bruchstücke mit einem Volumen von ca. 2 cm³. Sie wurden bei 65 °C vorgetrocknet. Die Kapillardruckkurven wurden bis zu einem Druck von 2000 bar gemessen, was die Erfassung der Porenradien bis =3,8 nm ermöglicht. Diesem Messverfahren liegt die Washburn-Gleichung zugrunde (Formel 5). Danach gilt für nicht benetzende Flüssigkeiten mit einem Randwinkel $\theta > 90^\circ$ (Quecksilber), dass jedem Kapillarradius ein bestimmter Druck zugeordnet werden kann, der aufgebracht werden muss, um die Flüssigkeit in die Kapillare einzupressen.

$$p = \frac{-2\sigma \cos \Theta}{r} \quad (\text{Formel 5})$$

r	Porenradius
σ	Oberflächenspannung des Quecksilbers
Θ	Benetzungswinkel
p	Druck

Ein Probe wird unter Vakuum mit Quecksilber beaufschlagt, welches im Laufe der Messung mit zunehmendem Druck in immer kleinere Poren eindringt. Über die Washburn-Gleichung können unter der Annahme zylinderförmiger Poren die den jeweiligen Drücken entsprechenden Porenradien berechnet und somit eine Poreneingangsradienverteilung erstellt werden (DULLIEN 1979).

Die Verteilung der Porengrößen gibt den Anteil unterschiedlicher Porengrößen (Porenklassen) am Porenvolumen eines Gesteins wieder. In der vorliegenden Arbeit wurde die Messung der Porengrößenverteilung eingesetzt, um zu detektieren, inwieweit sich in Folge einer erneuten Konservierung das Porenradienspektrum ändert bzw., welche Poren von dem erneut aufgetragenen Schutzmittel erfüllt werden. Dazu wurden die Porengrößen der beiden tonreichen Keupersandstein-Varietäten von Schloss Schillingsfürst, das Original- und das Austauschmaterial, sowohl im altbehandelten Zustand als auch nach der Wiederbehandlung einander gegenübergestellt. Aus dem Resultat sollte es möglich sein, einschätzen zu können, ob eine verdünnte Schutzmittel-Applikation tatsächlich Vorteile für das Eindringen der Substanz zur Folge hat.

(Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse erfolgt unter 8.2.5.)

8.2.3 Sorptionsisotherme

Da das Hauptanliegen der Untersuchungen des Grünsandsteins eher auf der Bestimmung der Festigkeitsparameter lag, wurden hierfür keine Proben den Messungen der Sorptionsisotherme zugeführt. Der Schwerpunkt der Wiederbehandlung des Schilfsandsteins wiederum lag auf der Hydrophobierung, was eine detailliertere Aufnahme des daraus resultierenden Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabeverhaltens erforderte. Die Sorptionsisotherme ist ein wichtiger Parameter in der Bewertung der Effektivität einer hydrophobierenden Behandlung. Aus diesem Grund beziehen sich die folgenden Ausführungen ausschließlich auf die beiden unterschiedlichen Schilfsandsteinvarietäten und den Einfluss der darauf applizierten Schutzmittel.

Festkörper stehen mit ihrer gesamten zugänglichen spezifischen Oberfläche in ständiger Wechselwirkung mit der Feuchte der Atmosphäre. Dabei kommt es zur Sorption der Wassermoleküle an der Oberfläche. Die Wassermoleküle lagern sich über Wasserstoffbrückenbindungen und van der Waals'sche Kräfte an den Porenwandoberflächen an. Der Sorptionsfeuchte- oder hygroskopische Bereich erstreckt sich bis zu Ausgleichsfeuchten von 95 % relativer Feuchte. Bei gegebener Luftfeuchte kommt es zu einem dynamischen Gleichgewicht zwischen Sorption und Desorption der Teilchen. Thermodynamisch lässt sich das Sorptionsgleichgewicht als Funktion des Wasserdampfpartialdrucks bzw. der relativen Feuchte bei konstanter Temperatur beschreiben. Der Zusammenhang zwischen der Menge des angelagerten Wassers und der relativen Luftfeuchte wird durch die Sorptionsisotherme dargestellt. Die Hysterese zwischen Adsorptions- und Desorptionsisotherme ist bei den meisten Baustoffen so wenig ausgeprägt, dass zur Charakterisierung der Feuchtespeicherung die Adsorptionsisotherme im Allgemeinen ausreicht (KÜNZEL 1994). Als eine Ursache des Hystereseeffekts beschreibt GARRECHT (1992) die Existenz von Flaschenhalsporen, größere Poren, die nur über kleinere Zugangsporen erreicht werden können. Dabei bestimmen die Partialdruckverhältnisse der kleineren Poren die Feuchtesituation. Die größeren Poren können ihr Wasser erst abgeben, sobald die kleineren Zugangsporen entsprechend des Partialdruckverhältnissen ebenfalls trocknen können.

Der s-förmige Verlauf der ermittelten Sorptionsisothermen folgt aus einer zunächst einschichtigen über eine mehrschichtige Adsorption bis hin zur Kapillarkondensation durch Dampfdruckerniedrigung (siehe Abb. 8.6). Der untere Teil der Kurve in Abbildung 8.6 wird durch Anlagerung einer monomolekularen Wasserschicht auf der inneren Oberfläche des Festkörpers hervorgerufen. Weitere Schichten werden bei höheren Luftfeuchtegehalten adsorbiert. Bei einer Luftfeuchtigkeit von > 70 % wächst der Anstieg der Isotherme infolge zunehmender Kapillarkondensation deutlich an. In der Literatur schwanken die Angaben. KRUS (1995) beschreibt, dass sich im progressiv ansteigenden Bereich der Sorptionsisotherme die Poren über den Effekt der Kapillarkondensation füllen. Dieser Anstieg kann sich bei den besprochenen porösen Baustoffen bereits bei > 50 % r.Lf. an den linear ansteigenden Bereich der multimolekularen Belegung anschließen. Bei relativen Luftfeuchten über 95 % steigt die Sorptionsisotherme sehr stark an. Für diesen Bereich ist kein Messverfahren bekannt, wodurch mit hoher Genauigkeit die Luftfeuchte bestimmt werden kann. Hier beginnt der Kapillarwasserbereich, auch überhygroskopischer Bereich genannt (KRUS 1995).

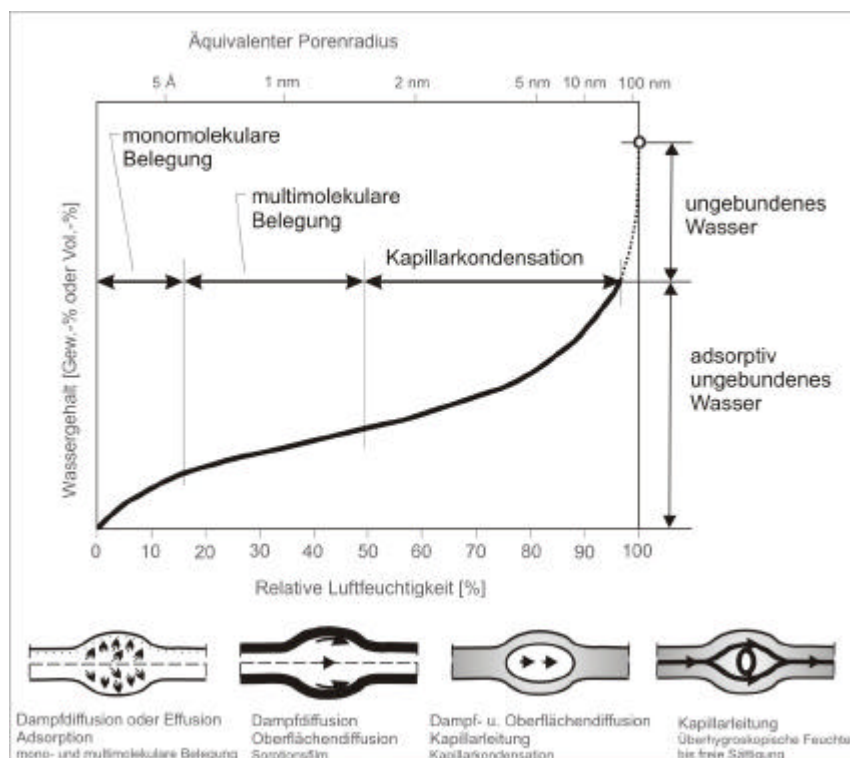


Abbildung 8.6: Typische Sorptionsisotherme feinporiger Feststoffe (nach KIEBL 1983). Die Grafik unter dem Diagramm zeigt die den verschiedenen Feuchtegehaltsstadien entsprechenden Transporteffekte am Modell einer einzelnen zylindrischen Kapillare.

Bei genügend hohem Feuchtegehalt der Porenluft kommt es in den Mikroporen durch Dampfdruckerniedrigung zur Wasserkondensation. Bei durchschnittlicher relativer Feuchte ist in Poren kleiner $0,1 \mu\text{m}$ Kapillarkondensation möglich. Laut KRUS (1995) treten Kondensationserscheinungen im Mikroporenbereich zwischen $2 \cdot 10^{-9}$ und 10^{-7} auf. Grundsätzlich gehört dieser Vorgang nicht zu den Transportmechanismen, sondern zählt zu den Mechanismen der Wasserspeicherung (CLOOTH 1992).

Über die Kelvin Gleichung, welche den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und dem Kapillarradius im idealen zylindrischen Porenmodell beschreibt, ist es möglich, aus der Form der Wasserdampfsorptionsisotherme Rückschlüsse auf die Porenradienverteilung im Mikroporenraum unter $0,1 \mu\text{m}$ zu ziehen (KRUS 1995). In Abbildung 8.6 sind die aus der Kelvin Gleichung berechneten äquivalenten Porenradien den Dampfdrücken der Luft gegenübergestellt. Hieraus ist abzulesen, welche Porengrößen sich bei steigender Luftfeuchtigkeit sukzessive füllen.

Die über das gesamte Feuchtespektrum hinweg aufgenommenen Sorptions- und Desorptionsisotherme erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften.

Bauschädliche Salze beeinflussen den Sorptionsfeuchtegehalt der Baustoffe in entscheidendem Maße. Mit dem Einsetzen der hygroscopischen Wirkungsweise der Salze nimmt die Materialfeuchte sprunghaft zu, wobei deren Höhe von der Art und der Konzentration der Salze bestimmt wird (GARRECHT 1992).

Methodik

Die Sorptionsisothermen wurden mittels unterschiedlicher Verfahren ermittelt. Der Großteil der Messungen ist jedoch mit dem neu entwickelten Wasserdampf-Sorptionsprüfschrank SPS11 des Pharmazeutischen Instituts der Leopold-Franzens Universität Innsbruck durchgeführt worden. Dieser modernen Methode wurden, wie bereits erwähnt, nur Schilfsandsteinproben zugeführt. Diese Verfahren erlaubt die Bestimmung der Massenänderungen von 11 Proben gleichzeitig unter identischen Atmosphärenbedingungen. Die Sorptions- und Desorptionsisotherme wurde in Schritten von 10 % rel. Luftfeuchte bei 25 °C gemessen. Der Bereich erstreckte sich von 0 % bis 95 %. Die Erkennung der Gleichgewichtsbedingungen erfolgt automatisch über die Massenkonstanz bei jedem Zyklus (< 0,01 % für 40 Minuten). Nachdem alle Proben diese Gleichgewichtsbedingungen erfüllen, wird automatisch die nächste Klimabedingung des vorprogrammierten Messzyklus eingestellt (FRANZEN & GRIESSER 2002). Die zu untersuchenden Proben wurden nicht vorkonditioniert. (Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse erfolgt unter 8.2.5.)

8.2.4 Oberflächenbestimmung nach der BET-Methode

Methodik

Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche, die die Gesamtheit der Flächen im Material widerspiegelt, wurde auch am Institut für Mineralogie und Petrographie der Leopold-Franzens Universität Innsbruck (Gerät: Nova 2200, Firma Quantachrom Corp.) mittels der N₂-Adsorptionsisotherme nach der BET-Methode (Brunauer, Emmett und Teller) durchgeführt. Dieses Verfahren durchliefen all die Proben, an denen auch die Sorptionsisothermen bestimmt worden sind. Die erzielten Ergebnisse geben Hinweis auf die physiko-chemische Reaktivität des Materials. Mit Hinblick auf die Tonminerale, die speziell im Schilfsandstein enthalten sind, kann gesagt werden, dass je blättchenartiger deren Form, desto größer ist die Fläche pro Volumeneinheit, an der sich Wassermoleküle anlagern können. Daher kann die spezifische innere Oberfläche eines Tonminerals als Hinweis auf seine osmotische Quellfähigkeit dienen (PIMENTEL 1996).

Der Platzbedarf eines adsorbierten Stickstoffmoleküls beträgt $16,3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (METZ 1992). Die Meßmethode kann alle Oberflächen in Poren mit einem Durchmesser > 0,002 µm erfassen. Der Mikroporenbereich (laut IUPAC Klassifizierung) bleibt unberücksichtigt.

Vor der Messung wurde das zu ca. 7 mm³ Granulat zerkleinerte Probenmaterial mehrere Tage im Exsikkator über Silicagel gelagert und dann in die Messbürette genau eingewogen. Von einer Trocknung mit Hilfe einer Temperierung wurde abgesehen, um einer Veränderung des Materials durch Temperatureinfluss vorzubeugen. Der folgende Untersuchungsschritt ist die Evakuierung des Probenglases zusammen mit der Probe bei 10^{-2} bis 10^{-3} Pa. Über eine Helium-Befüllung wird das so genannte Totvolumen ermittelt. Anschließend muss erneut evakuiert werden. Glas und Probe werden auf 77 K abgekühlt. Es folgt die Befüllung des Glases mit Stickstoff bei gleich bleibender Temperatur so lange, bis sich für den angestrebten Dampfdruck P / P_0 im Glas ein Gleichgewicht einstellt. Aus der Menge des zugeführten Gases, dem Totvolumen und dem Gleichgewichtsdampfdruck errechnet sich das adsorbierte Stickstoffvolumen, aus dem die Monolayer, bzw. Multilayer in m²/g berechnet werden (BET-Gleichung, Formel 6 (ALLEN 1981)).

$$V = \frac{V_m \cdot c \cdot p_r}{(1 - p_r)(1 - p_r + c \cdot p_r)} \quad (\text{Formel 6})$$

8.2.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Porenradienverteilung (Hg-Pososimetrie), der Sorptionsisotherme sowie der BET-Oberflächen beziehen sich ausschließlich auf Schilfsandsteinproben aus Diebach/Gailnau und Schleerith.

Die Porenradienverteilung aus der Quecksilberporosimetrie ist in Abbildung 8.7 abgebildet. Im Vergleich ist eine Probe des Originalmaterials aus Diebach/Gailnau, die im Rahmen der ersten Konservierung mit der Mikroemulsion (mit Haftvermittler) PTEXS 25A+GF91 behandelt wurde, und zwei Proben des Austauschmaterial (Schleerith) dargestellt, von denen die eine den altbehandelten Status (UNIL 190) und die andere darauf basierend die Wiederbehandlung mit Funcosil SNL repräsentiert.

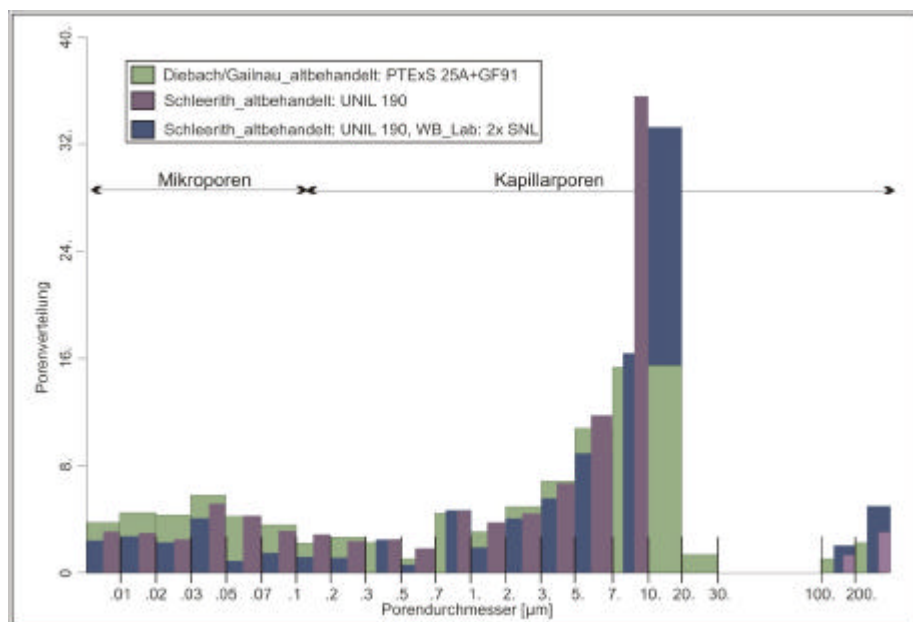


Abb. 8.7: Vergleich der Porenradienverteilung aus den Resultaten der Hg-Pososimetrie, Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith.

Für alle Proben liegt die Messgrenze bei 0,0071 µm Porendurchmesser. Das Porenmaximum des altbehandelten Originalmaterials (grün) liegt im Kapillarporenraum zwischen 7 und 20 µm. Danach fällt die Kurve steil ab.

Des Weiteren gibt es geringe Porenanteile zwischen 20 und 30 µm und 100-270 µm. Die Porengröße von 30-100 µm ist nicht vorhanden. Gleiches gilt für das Austauschmaterial. Das Maximum der altbehandelten Probe aus Schleerith Sandstein (violett) ist enger begrenzt als das des Originalmaterials und liegt zwischen 7-10 µm, ebenfalls im Kapillarporenbereich. Im Gegensatz zum Originalmaterial, wo ein sanfter Anstieg der Porenverteilung zum Maximum führt, ist in diesem Fall ein steiler Anstieg zu beobachten. Die folgenden Porenanteile (10-100µm) existieren nicht. Ebenso wie beim zuvor erörterten Originalgestein, gibt es vergleichsweise geringe Porenanteile im Bereich

zwischen 100-270 μm . Die Wiederbehandlung des beschriebenen altbehandelten Austauschgesteins führt offensichtlich zu einer Verschiebung des Porenmaximums zu größeren Porendurchmessern, hin zu dem Bereich zwischen 10-20 μm . Diese Maximumverschiebung ging mit einer deutlichen Senkung der Porenanteile zwischen 7-10 μm einher. Im Bereich der oberen Mikroporosität (0,03-0,1 μm) und der unteren Kapillarporosität (0,1-10 μm) kam es zur Senkung der jeweiligen Porenanteile. Eine Ausnahme hierbei ist der Bereich zwischen 0,3-1 μm , wo es nahezu keine Veränderungen gab. Im unteren Mikroporenbereich scheint der Quecksilberzutritt durch das Einbringen des Polysiloxanfilms nicht wesentlich blockiert zu sein.

Für alle drei, in Abbildung 8.7 dargestellten Proben ist eine bimodale Porenverteilung festzustellen.

In Abbildung 8.8 sind alle Wasserdampfadsorptionsisothermen dargestellt, die an Originalmaterial (Diebach/Gailnau) von Schloss Schillingsfürst gemessen worden sind. Es werden sowohl die Ergebnisse an unbehandeltem, unverwittertem (ub_uv) und bei der ersten Behandlung unbehandelt belassenem (ub) Material als auch an alt- und wiederbehandelten Proben gemeinsam in dem Diagramm dargestellt.

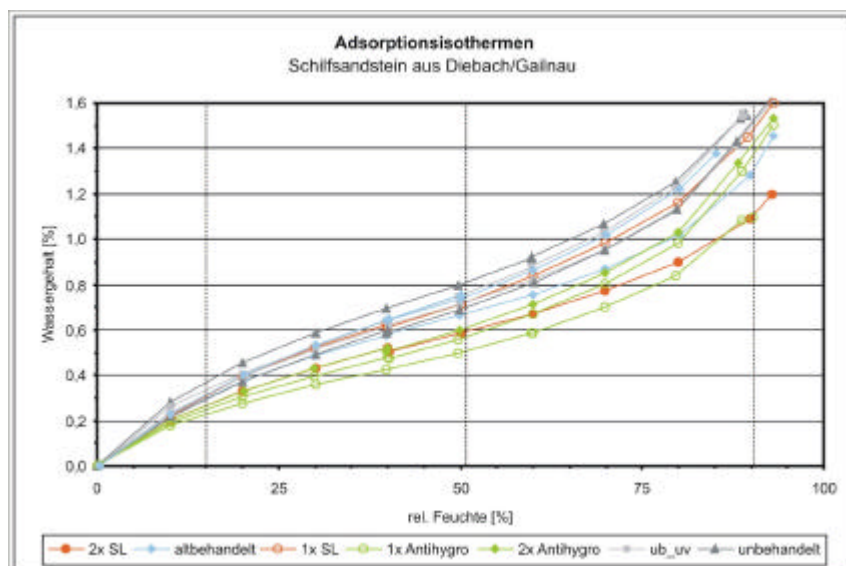


Abb. 8.8: Gegenüberstellung der Wasserdampfadsorptionsisothermen des unbehandelten/unverwitterten, des unbehandelten/verwitterten, des alt-behandelten und wiederbehandelten Schilfsandsteins aus Diebach/Gailnau. Zur Wiederbehandlung wurde in den untersuchten Fällen sowohl Funcosil SL, doppelt und einfach, als auch der Quellminderer Funcosil Antihygro, ebenfalls doppelt und einfach, appliziert.

Die Isothermen verlaufen in annähernd der gleichen flachen s-Form. Da bei allen Messungen keine starke Hysterese gemessen wurde, werden nur die Adsorptionsisothermen dargestellt. Bereits zwischen unbehandeltem/verwittertem und unbehandeltem/unverwittertem Material kann über den gesamten Feuchtigkeitsbereich eine gesteigerte Wasserdampfadsorption der der Verwitterung ausgesetzten Probe beobachtet werden. Im Vergleich zwischen dem altbehandelten Zustand (hellblau) und den diversen Wiederbehandlungen ist zu erkennen, dass eine einmalige Applikation von Funcosil SL keine Veränderungen bewirkt. Bei der doppelten Anwendung dieses oligomeren Siloxans sowie bei der Behandlung mit Funcosil Antihygro fällt eine Trennung der Graphen bereits im Luftfeuchtigkeitsbereich ab 10 % auf. Wie in Abbildung 8.6 dargestellt, entspricht der Zone bis 15 % relative Luftfeuchte einer monomolekularen Belegung. Gleiches gilt für die Multilayerbelegung bis zu einer rel. Feuchte von 50 %. Für diese Schutzmittel ist die Wasserdampfadsorption bereits im unteren Luftfeuchtigkeitsbereich reduziert. Die Wasserdampfadsorption im unteren Bereich der Isotherme

verhält sich in der Regel proportional zum Quellpotential eines porösen Materials (KOCHER 2004). Sie ist ein wichtiger Hinweis für die Auswirkung der Behandlungen auf das Quellverhalten des Materials. Bei der Betrachtung des Einflusses der Applikation von Funcosil SL auf das Quellverhalten des Originalmaterials musste allerdings eine deutliche Steigerung detektiert werden. Der progressive Anstieg der Kurven im Bereich der Kapillarkondensation verläuft für die doppelte und einmalige Anwendung von Funcosil Antihygro parallel, wohingegen die mit Funcosil SL (2x) behandelte Probe zu geringerer Wasserdampfadsorption tendiert. Eine andere, ebenfalls mit Funcosil Antihygro behandelte Probe, zeigt eine ähnliche Tendenz. Diese Abweichungen innerhalb eines Schutzmittels sind wohl eher auf verschiedene Tongehalte und daraus resultierend unterschiedlichen, der Adsorption zur Verfügung stehenden Porenspektren zurückzuführen.

Die Resultate zeigen, dass für beide Schutzmittel, sowohl Funcosil Antihygro als auch Funcosil SL, die Behandlung mit einer Reduktion der Adsorption im hygroskopischen Bereich verbunden ist. Die Richtlinie zur Bewertung der Kompatibilität und Dauerhaftigkeit von Konservierungsmaßnahmen an Naturstein (SASSE & SNETHLAGE 1996) fordern, dass die Fläche unter der Wasserdampfadsorptionsisotherme des behandelten Materials kleiner oder gleich der Fläche des unbehandelten Materials sein soll. Diese Vorgabe konnte im Rahmen der dargelegten Wiederbehandlungstests eingehalten werden.

Die Wasserdampfadsorptionsisothermen des Austauschmaterials aus Schleerith geben ein anderes Bild wieder (siehe Abb. 8.9). Die Adsorptionsisotherme des unbehandelten/unverwitterten Materials ist der des Originalmaterials nahezu identisch, wohingegen die des altbehandelten Materials (UNIL 190) etwas flacher verläuft. Zusätzlich zu den Tests an Originalmaterial wurden zwei weitere Hydrophobierungsmittel sowie die Kombination aus dem Quellminderer Funcosil Antihygro und dem Hydrophobierungsmittel Funcosil SL appliziert. Die jeweiligen Ergebnisse streuen sehr weit. Während die alleinige Anwendung des Quellminderers Antihygro und die Behandlung mit UNIL 290, bezogen auf den Ausgangszustand, nahezu keine Veränderung der Wasserdampfdiffusion erzielten, führte die Applikation von Funcosil SNL und SL bzw. die Kombinationsbehandlung aus Funcosil Antihygro und SL, gerade im Bereich der Kapillarkondensation zu enormen Absenkungen der entsprechenden Wassergehalte. Die Gesamtwasseraufnahmen bei 93 % relative Luftfeuchte variieren sehr stark. Sie liegen bei 0,4 % für die Kombinationsbehandlung aus Quellminderer und Hydrophobierungsmittel sowie der einmaligen Applikation von Funcosil SNL und 1,3 % für die Wiederbehandlung mit UNIL 290 und Funcosil Antihygro. In dem Bereich dazwischen liegen mit schwankenden Wassergehalten trotz z.T. gleichartiger Behandlung die doppelte Anwendung mit Funcosil SNL und SL. Es fällt auf, dass die einmaligen Applikationen der Schutzmittel im Vergleich zur doppelten Behandlung eher zu niedrigen Gesamtwassergehalten tendieren. Alle Sorptionsisothermen von behandelten Proben liegen unter der unbehandelten. Der hydrophobe Siloxanfilm blockiert OH-Gruppen auf der Oberfläche, welche H₂O-Moleküle anlagern. Die Form der Isothermen ist grundsätzlich ähnlich, allerdings fällt bei den Proben mit geringer Gesamtwasseraufnahme der flache Anstieg bei hohen Luftfeuchten auf. Der primäre Grund für die unterschiedlichen Sorptionsmengen scheinen schwankende Tonmineralgehalte zu sein. Je mehr Schichtsilikate in einer Probe vorhanden sind, umso größer ist die Porosität. Mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit quellen die Tone weiter auf, was zu einer Vergrößerung der Oberfläche führt. Die kombinierte Behandlung aus Quellminderer und Funcosil SL zeigt bereits im unteren Luftfeuchtigkeitsbereich eine reduzierte Wasserdampfadsorption an, was laut KOCHER (2004) mit einem geminderten Quellpotential einhergehen müsste und in der Messung der hygrischen Dilatation auch Bestätigung fand. Die Quellung ist demnach gebremst und mit steigenden relativen

Luftfeuchtigkeiten kommt es nicht zu einer derartigen Vergrößerung der inneren Oberfläche, wie es in Folge der Applikation von UNIL 290 oder Funcosil SNL und SL (2x) anscheinend der Fall ist.

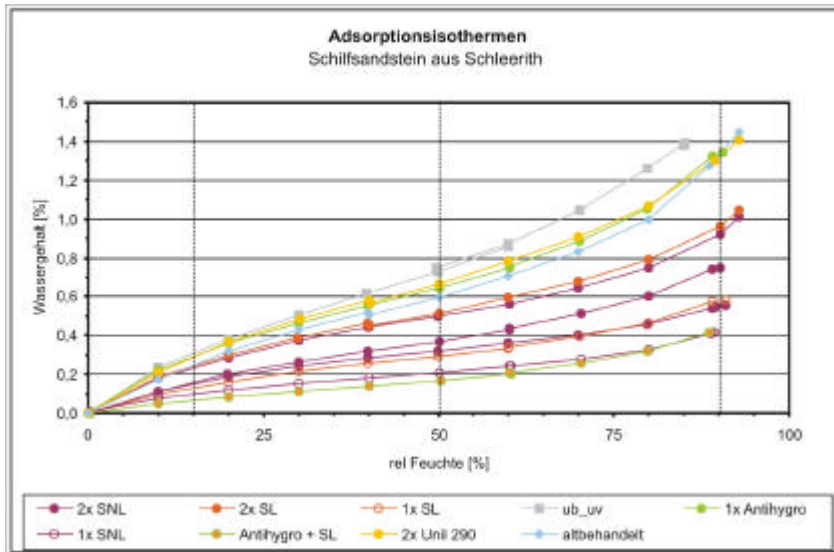


Abb. 8.9: Gegenüberstellung der Wasserdampfadsorptionsisothermen des unbehandelt/unverwitterten (grau), des altbehandelten (hellblau) und wiederbehandelten Schilfsandsteins aus Schleerith. Zur Wiederbehandlung wurde in den untersuchten Beispielen Funcosil SL und SNL (einfach und doppelt), UNIL 290 (2x) sowie der Quellminderer Funcosil AntiHygro appliziert.

Erstaunlich ist, dass die alleinige Behandlung des Austauschmaterials mit Funcosil AntiHygro keinerlei Einfluss, bezogen auf den vorherigen Zustand, festgestellt werden kann. Entsprechend den Wassergehalten in den unteren Luftfeuchtigkeitsbereichen, die nicht abgesenkt sind, müsste die Probe nach der Behandlung weiterhin stark quellen. Diese Erklärung fand jedoch in der Untersuchung der hygrischen Dilatation keine Bestätigung. Bezogen auf die bereits zitierten Anforderungen von SASSE & SNETHLAGE (1996), wonach die Fläche unter der Wasserdampfadsorptionsisotherme des behandelten Materials kleiner oder gleich der Fläche des unbehandelten Material sein soll, erfüllen alle applizierten Schutzmittel die geforderten Kriterien. Eine gewisse Ausnahme bilden UNIL 290 und Funcosil AntiHygro (1x), deren Abweichungen vom altbehandelten Zustand im Bereich des Messfehlers liegen.

Die schwankenden Tonmineralgehalte der Proben erschweren einen Vergleich zwischen Ausgangszustand und dem Resultat der Wiederbehandlung sehr. Aus diesem Grund ist es eigentlich nur sinnvoll, exakt die gleiche Probe durch alle Untersuchungen hinweg beizubehalten, um tatsächlich eine absolut veritable Aussage über den Erfolg der Behandlung zu erhalten.

Im Folgenden werden einzelne, besonders auffällige Sorptionsisothermen den entsprechenden Porenradienverteilungen gegenübergestellt, um den Einfluss des Tongehaltes auf die Porosität und damit auf die Sorption zu erhalten. Alle drei Sorptionsisothermen in Abbildung 8.10 besitzen die gleiche Form. Markant unterschiedlich sind jedoch die erzielten Gesamtwassergehalte. So liegt die Gesamtwasseraufnahme bei 93 % relativer Feuchte im Falle 8.10_a bei 1,0 % und in 8.10_b und 8.10_c bei ungefähr 1,6 %. Die geringere Gesamtwasseraufnahme geht mit einem flacheren Anstieg der Sorptionsisotherme einher.

Die beiden oberen Abbildungen gehören systematisch zusammen. Abbildung 8.10_b zeigt den altbehandelten Schleerith Sandstein (UNIL 190). Darauf aufbauend folgt die Abbildung 8.10_a, wo entsprechendes Material mit Funcosil SNL wiederbehandelt worden ist. Diese hydrophobierende

Behandlung war mit einer Verschiebung des Porenmaximums um eine Porenklasse verbunden. Der Anteil der am Austausch beteiligten Mikroporen und der Kapillarporen aus dem Bereich $< 5 \mu\text{m}$ ist dementsprechend abgesenkt worden. Hierin scheint der flachere Anstieg der Sorptionsisotherme begründet zu sein. Die kleineren Poren wurden durch das Einbringen des Polysiloxanfilms verlegt.

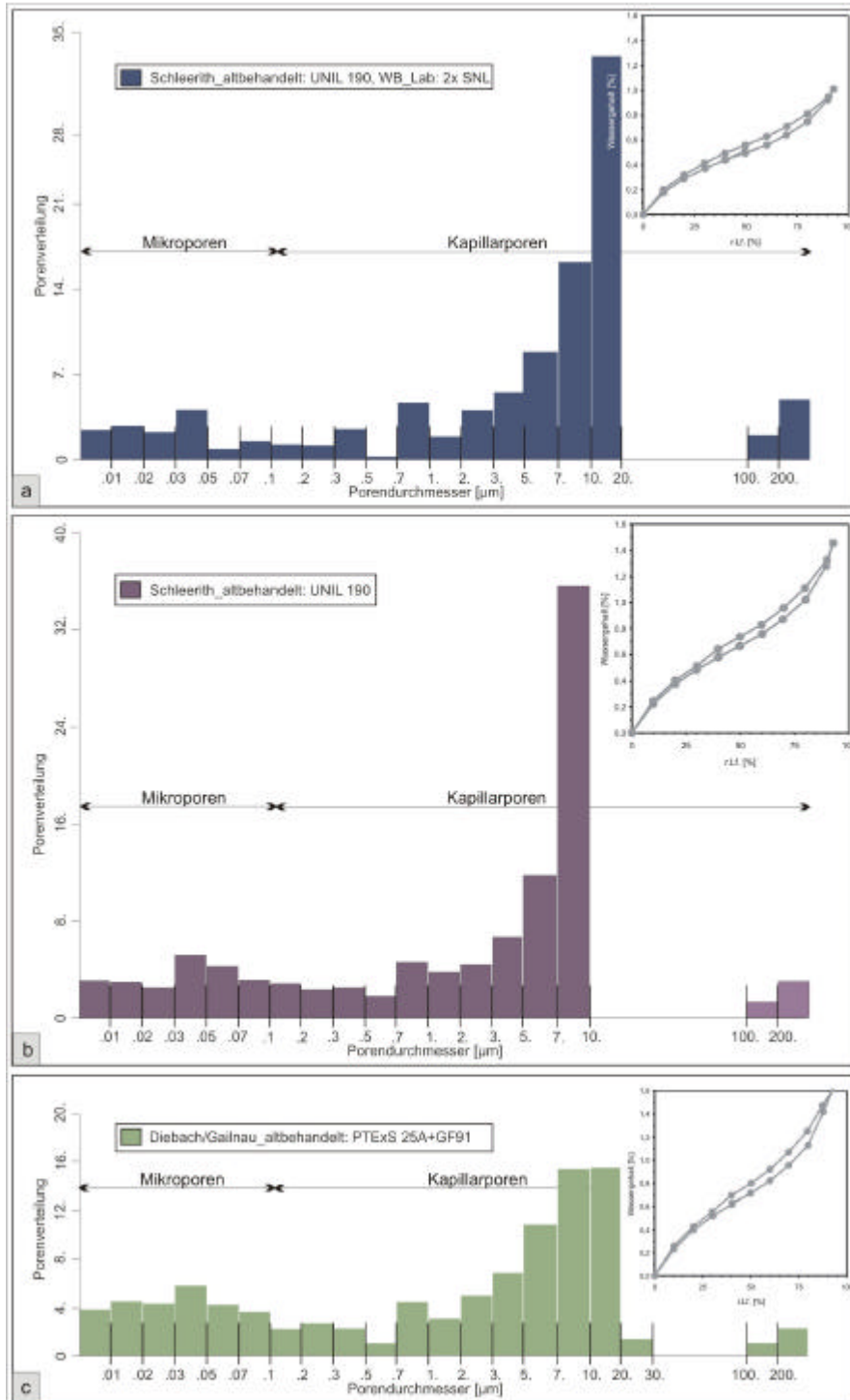


Abb. 8.10 (a-c): Gegenüberstellung der Porenradienverteilung aus den Hg-Porosimetrie und der entsprechenden Sorptionsisothermen.

- a) Austauschmaterial, wiederbehandelt mit Funcosil SNL
- b) Austauschmaterial, altbehandelt
- c) Originalmaterial, altbehandelt

Das Porenradienmaximum des Schilfsandsteins (8.10_c) (altbehandelt mit PTEXS) liegt zwar vergleichbar dem des Schleierther Sandsteins, jedoch ist der Anteil der kleineren Poren am Gesamtporenspektrum deutlich höher. Die Sorptionsisotherme, die bei 93 % r.Lf. ebenso zu einem

Wassergehalt von 1,6 % ansteigt, ist nahezu genauso steil wie die des altbehandelten Schleerither Materials.

Es zeigt sich, dass der Anteil an Mikroporen einen großen Einfluss auf den Anstieg der Sorptionsisotherme besitzt. Die Wassergehalte beider Proben (8.10_b und 8.10_c) sind in den Bereichen der mono- und multimolekularen Belegung nahezu identisch. Erst in der Zone der Kapillarkondensation, bzw. erst ab 70 % r. Lf. ist der Anstieg der Sorptionsisotherme des Originalmaterials steiler als der des vergleichbaren Austauschmaterials.

Die folgende Abbildung (8.11) zeigt die spezifische Oberfläche aus der Stickstoffadsorptionsmethode (BET-Methode) für den Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau. Gegenüber dem unbehandelten und unverwitterten Zustand ist für die altbehandelten Proben noch eine deutlich reduzierte spezifische Oberfläche ermittelt worden. Demnach sind im Porenraum noch Silikonharzfilme der ursprünglichen Konservierungsmaßnahme vorhanden. In den rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen konnten jedoch nur wenige Reste der ursprünglichen Maßnahmen beobachtet werden, was wiederum sehr gut mit den z.T. sehr hohen w-Werten korreliert. Die damalige Behandlung am Objekt mit der Mikroemulsion PTE_xS (mit Haftvermittler) vermochte entweder die spezifische Oberfläche stärker zu reduzieren oder ist aufgrund der kürzeren Standzeit der entsprechenden Musterfläche (Nordfassade) noch besser erhalten. Die entsprechenden w-Werte liegen durchschnittlich bei 0,46 kg/m²·h^{-0,5} und zeigen somit für die Verhältnisse des Schilfsandsteins eine Wirksamkeit der ursprünglichen Maßnahme an. Die Behandlung mit dem Quellminderer BDAC zeigt gegenüber dem unbehandelten Material nahezu keine Abweichung. Auch die Wiederbehandlung mit quellmindernden Tensiden (Antihydro) hat keinen nennenswerten Einfluss auf die innere Oberfläche des Materials.

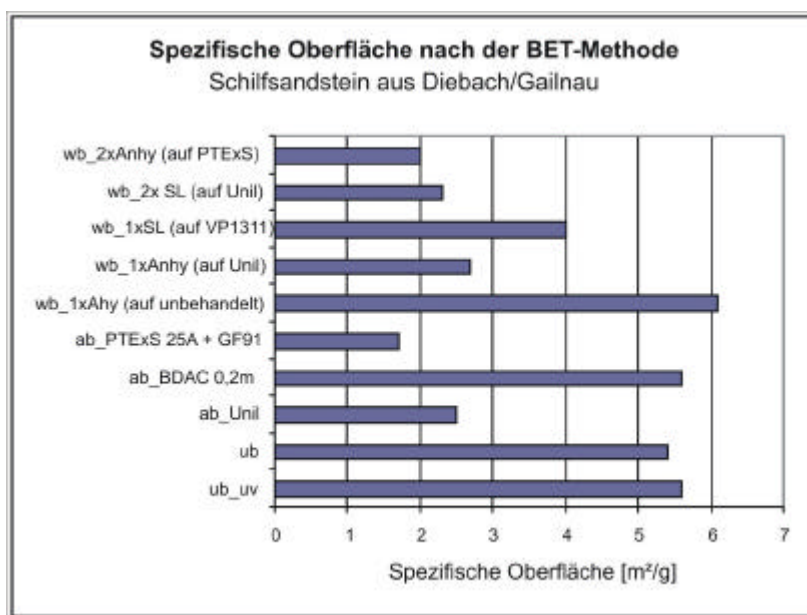


Abb. 8.11: Spezifische Oberfläche - ermittelt nach der Stickstoffadsorptionsmethode BET), Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau. (ub = unbehandelt, uv = unverwittert, AB = Altbehandlung (Stand 2001), WB = Wiederbehandlung Labor.

Die Applikation von Funcosil SL führte zu einer Minderung der spezifischen Oberfläche. Die Reduktion der inneren Oberfläche ergibt sich aus der Verringerung des Porenvolumens im unteren Bereich der Kapillarporosität.

Die Ergebnisse der spezifischen Oberfläche für den Sandstein aus Schleerith (siehe Abb. 8.12) entsprechen tendenziell denen des Originalmaterials (siehe Abb. 8.11). Allerdings liegen die BET-Oberflächen des unbehandelten bzw. unbehandelten/unverwitterten Materials um 35 % höher. Das

altbehandelte Material zeigt zwar ebenso eine reduzierte Oberfläche, allerdings ist sie gegenüber dem unbehandelten Zustand nur um $\frac{1}{4}$ verringert.

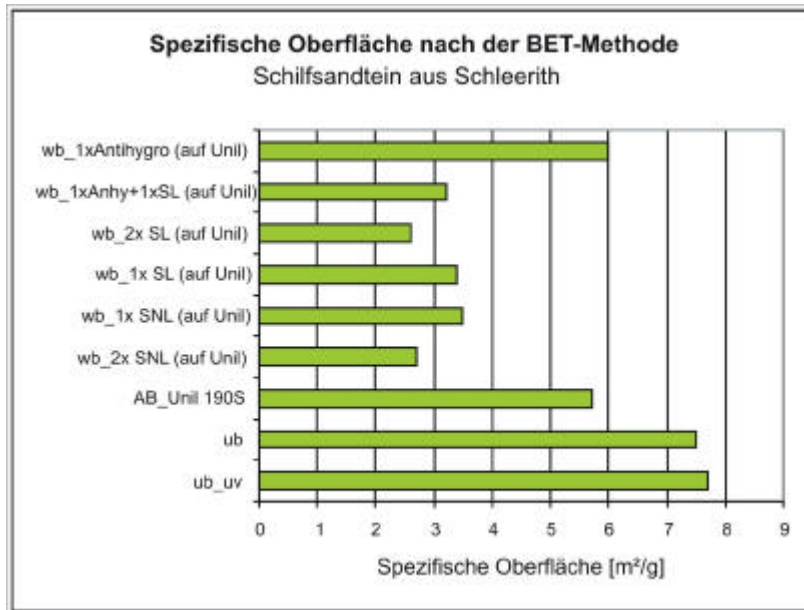


Abb. 8.12: Spezifische Oberfläche - ermittelt nach der Stickstoffadsorptionsmethode BET), Sandstein aus Schleerith. (ub = unbehandelt, uv = unverwittert, AB = Altbehandlung (Stand 2001), WB = Wiederbehandlung Labor.

Beim Originalmaterial beträgt die Reduktion mehr als die Hälfte. Die Wiederbehandlung mit Funcosil Antihygro hat auch auf dem Austauschmaterial mit Hinblick auf den möglichen Messfehler keinen nennenswerten Einfluss auf die innere Oberfläche des Gesteins. Die Wiederbehandlung mit Funcosil SNL und SL erzielte deutlichere Minimierungen der spezifischen Oberfläche als es bei dem Originalmaterial beobachtet werden konnte.

Die Hydrophobierungen, die ursprünglich appliziert wurden und die der Wiederbehandlungen scheinen jedoch die Oberflächeneigenschaften derartig zu verändern, dass die Ergebnisse der BET-Messungen nicht direkt vergleichbar sind. Demnach behindert ein wirksamer wasserabweisender Effekt die Stickstoffadsorption besonders stark.

8.3 Methoden zur Überprüfung der feuchtigkeitsrelevanten Parameter

8.3.1 Kapillare Wasseraufnahme (w-Wert)

Die kapillare Wasseraufnahme poröser Materialien ist durch die Kennwerte Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) (Formel 7) und den Wassereindringkoeffizient (b-Wert) (Formel 8) beschrieben. Der w-Wert ist ein direktes Maß für den Kapillarporenanteil im Material. Die Einbeziehung des b-Wertes ermöglicht die Berechnung seines Anteils am Gesamtvolumen der Probe.

$$\text{w-Wert} = \frac{mw}{\sqrt{t}} \text{ (kg/m}^2\text{h}^{-0,5}\text{)} \quad \text{(Formel 7)}$$

$$\text{b-Wert} = \frac{h}{\sqrt{t}} \text{ (m/h}^{-0,5}\text{)} \quad \text{(Formel 8)}$$

Die kapillare Wasseraufnahme erfolgt in der Anfangsphase des Saugvorgangs und bei gut saugenden Sandsteinen bis zur vollständigen Durchfeuchtung annähernd einem \sqrt{t} -Gesetz (KLOPFER 1974, KRAUS 1985). Nach MENG (1993) gelten folgende drei Bedingungen für die Gültigkeit des \sqrt{t} -Gesetzes:

1. Die Verdunstung muss gegenüber der aufgesogenen Wassermenge gering sein.
2. Es sollte wenige zu große und damit nicht kapillar aktive oder zu kleine und damit durch Kapillarkondensation verstopfte Poren geben.
3. Bei vertikaler Wasseraufnahme nur vor Erreichen der maximalen Steighöhe.

Methodik

Die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme erfolgt an der Fassade mittels des Karstenschen Prüfröhrchens. Im Labor werden die jeweiligen Bohrkern mit den Stirnseiten in aqua dest. gelagert. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Wasseraufnahme über die Mantelfläche des Bohrkerns zu vermeiden ist. Es wird das Verhältnis zwischen aufgenommener Wassermenge und der Zeit ermittelt (DIN 52 103).

8.3.1.1 Ergebnisse

Zum einen ist es möglich, über den w-Wert auf den Kapillarporenanteil rückzuschließen und zum anderen kann bereits der Verlauf der Messung einen Hinweis auf spezielle Verwitterungserscheinungen der Fassade geben. Eine Schale vor einer entfestigten Zone kann sich bei der Messung mit dem Karstenschen Prüfröhrchen beispielsweise dadurch äußern, dass das Wasser zunächst langsam und dann sehr schnell von der Fassade aufgenommen wird, es allerdings keinen Flüssigkeitsaustritt direkt am Kontakt der Messvorrichtung zur Fassade gibt. Bei Karstenmessungen an der Fassade der Alten Pinakothek lief das Messröhrchen bei wiederholtem Versuch stets nach ungefähr drei Minuten leer. Die dazugehörige Bohrwiderstandsmessung zeigt in einer Tiefe von 5 mm einen deutlichen Festigkeitsabfall, wie er typisch für eine Mürbzone ist. Das Wasser wird demnach zunächst von der festen Zone an der Oberfläche der Fassade aufgenommen und erreicht nach

wenigen Minuten den entfestigten Bereich, wohinein es entweichen kann. In Abbildung 8.13 ist die Analogie der Resultate beider Messmethoden graphisch dargelegt. In der Graphik oben links ist schematisiert die Beschaffenheit der Fassade und die Migration des Wassers abgebildet.

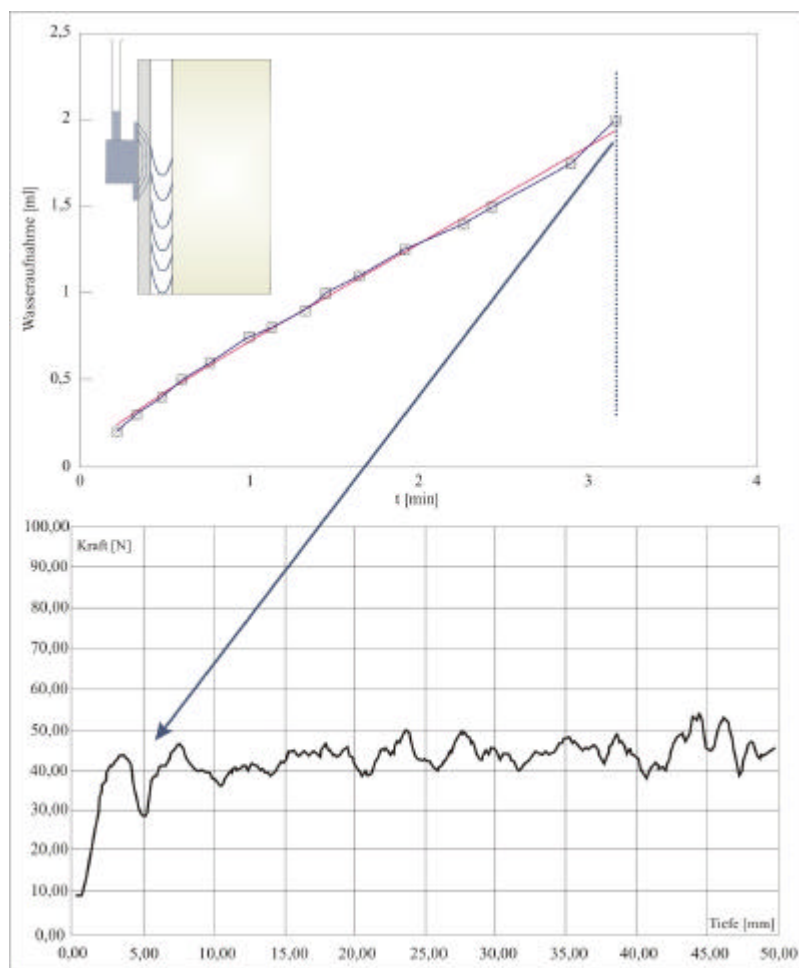


Abb. 8.13: Vergleich der Wasseraufnahme nach Karsten und der Bohrwiderstandsmessung. Nach wiederholten Messungen, brach nach ungefähr 3 Minuten stets das gesamte Wasser aus dem Karstenschen Prüfröhrchen. Dieses Phänomen ist mit einer mürben Zone korrelierbar, die mittels der Bohrwiderstandsmessung detektiert wurde. Die Abbildung oben links gibt schematisch die Mürbezone ungefähr 5 mm unterhalb der Fassadenoberfläche wieder bzw. wie das Wasser dorthin wegläuft.

8.3.1.1.1 Regensburger Grünsandstein

Ein Anliegen der Wiederbehandlung des Regensburger Grünsandstein war zwar auch, das daraus resultierende Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabeverhalten zu untersuchen, aber bis auf eine Ausnahme ist zu diesem Zweck ausschließlich Fincosil H appliziert worden. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse aller Varietäten in einem Diagramm vergleichend dargestellt (siehe Abb. 8.14), ohne dabei näher auf die jeweils verwendeten Schutzmittel einzugehen.

Im Speziellen zeigen die Kennwerte des unbehandelten Materials deutliche Unterschiede im Wasseraufnahmeverhalten der verhältnismäßig dichten Varietäten I und II und der poröseren, verschieden stark bioklastenführenden Varietäten III und IV. Die w -Werte steigern sich sprunghaft von 1,4-1,52 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ für die dichteren Proben auf 2,75 bis 3,5 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ bei den poröseren Varietäten. Im unbehandelten Zustand liegen die w -Werte aller Varietäten, wenn auch gestaffelt, weit über dem angestrebten Wert von $< 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$. Die relativen Unterschiede zwischen den Varietäten

konnten auch im Rahmen der Untersuchungen zur Effektivität der ursprünglichen Behandlung (altbehandelter Zustand) bestätigt werden. Allerdings lagen die Durchschnittswerte aller einfließenden Messungen zwischen $0,1$ und $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ und spiegeln somit eine noch zufrieden stellende hydrophobe Wirkung der in den 1980er Jahren applizierten Schutzmittel wider.

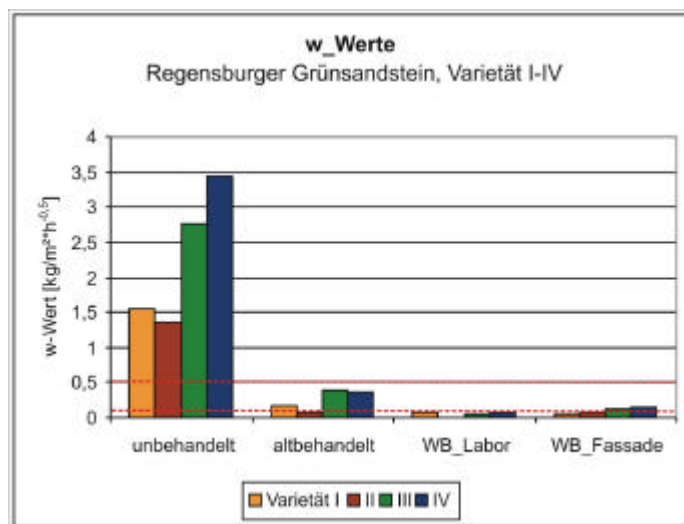


Abb. 8.14: Gegenüberstellung der Wasseraufnahmewerte (w-Werte) des unbehandelten und altbehandelten Zustandes im Vergleich zu den Resultaten der Wiederbehandlungstests im Labor und an der Fassade. Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV

Sowohl die Wiederbehandlungen im Labor als auch an der Fassade führten bei allen Varietäten zu einer zusätzlichen Reduktion der Wasseraufnahme, wobei sich die Anwendung unter Laborbedingung gegenüber der Behandlung an der Musterfläche als noch effektiver erwiesen hat. Die im Labor erzielten w-Werte liegen alle bei oder unterhalb der anzustrebenden $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ und zeigen somit eine sehr effektive Reduktion der Wasseraufnahme an. Bei höheren w-Werten besteht weiterhin die Gefahr, dass das Porengefüge doch noch beträchtliche Mengen Wasser aufnehmen kann, welche das Gestein für längere Zeit feucht halten und Salze mobilisieren können.

Die Messungen des w-Wertes können zum einen herangezogen werden, um die wasserabweisenden Eigenschaften des Materials bzw. die Effektivität einer Maßnahme zu überprüfen, aber auch, um ein Maß für die Schutzmittelmenge zu ermitteln, die das Gestein aufnehmen kann.

Die folgende Abbildung (8.15) zeigt die Gegenüberstellung der w-Werte, die im Jahr 2001 an den altbehandelten Fassaden gemessen wurden, und der Mengen an Konservierungsmittel, die jeweils im Labor und an der Musterfläche eingebracht werden konnten. Bereits bei den w-Werten ist eine Staffelung von den dichteren Varietäten I und II hin zu den poröseren Varietäten III und IV festzustellen. Das gleiche Verhältnis zeigt sich auch in den Mittelaufnahmemengen. In den meisten Fällen liegt die im Labor aufgenommene Menge über der an der Fassade erzielten, was wohl auch dem Umstand zuzuschreiben ist, dass die Tränkungszeit im Labor 10 Minuten länger andauerte. Wie im Kapitel 7.2.1 näher erläutert, wurde im Labor zweimal hintereinander gefestigt und anschließend hydrophobiert. Die Applikation des Festigers erfolgte an der Fassade stets nur einfach. Auf Varietät II und IV wurde zum Teil nachträglich hydrophobiert. Aus diesem Grund liegen die Mittelaufnahmen im Labor höher. Dennoch ist erstaunlich, dass bei einer mehrfachen Applikation auf einer bereits behandelten Fläche, deren Kennwerte durchaus einen akzeptablen Zustand beschreiben, fortwährend Schutzmittel im Porenraum deponiert werden konnte.

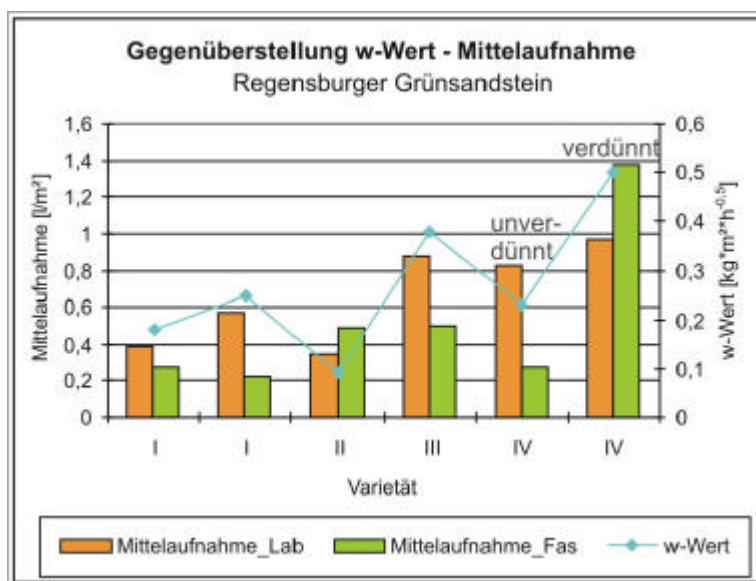


Abb. 8.15: Gegenüberstellung der w-Werte des altbehandelten Zustandes und der Mittelaufnahmen, die im Zuge der Wiederbehandlungstests im Labor und an der Fassade erzielt wurden, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV.

Im Vergleich der beiden Quader der Varietät IV (siehe Abb. 8.15) kommt sehr gut der Unterschied zwischen der Anwendung des verdünnten und des unverdünnten Festigers Funcosil OH zum Ausdruck. Die beiden rechten Balken der Varietät IV symbolisieren die Ergebnisse einer verdünnten Applikation. Besonders eindrucksvoll stellt sich der Unterschied zum unverdünnten Schutzmittel bei der Mittelaufnahme an der Musterfläche dar. Allerdings muss in diesem Fall auch auf die verschiedenen hohen w-Werte der einzelnen Quader hingewiesen werden, die bereits eine variierende Aufnahmekapazität anzeigen. Wie sowohl in der makroskopischen als auch mikroskopischen Gesteinsbeschreibung erläutert (siehe Kapitel 6.1.4), wechseln bei Varietät IV Schichten höherer und geringerer Porosität einander ab. Der Quader, an dem das verdünnte Agens appliziert wurde, muss laut dem w-Wert gegenüber dem anderen Baustein eine eher offene, höhere Porosität besitzen.

8.3.1.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Neben der Minderung der Quellneigung war die Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme das Hauptanliegen der Wiederbehandlung des Schilfsandsteins.

In Abbildung 8.16 sind die w-Werte des Originalmaterials aus den Steinbrüchen Diebach/Gailnau und des Austauschmaterials aus Schleerith getrennt dargestellt. Es fällt auf, dass das Austauschmaterial (8.16_b) höhere w-Werte im unbehandelten, unverwitterten Zustand besitzt als das vergleichbare Originalmaterial. Es fließen in dieser Darstellung sehr viele Einzelwerte in einem Mittelwert zusammen, dennoch ist der Unterschied zwischen beiden Materialien nicht überzubewerten, da die Tongehalte beider Varietäten bereits kleinräumig relativ stark schwanken und somit die Wasseraufnahme in einem gewissen Rahmen ebenso variieren kann. Sowohl die w-Werte des unbehandelten als auch des altbehandelten Gesteins liegen außerordentlich hoch und übertreffen die Grenze eines gerade noch akzeptablen w-Wertes von $0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-0,5}$ um das Vier- bis Achtfache. Das im Rahmen der ersten Konservierungsmaßnahme applizierte Schutzmittel UNIL 190 S zeigt nahezu keine Wirkung mehr. Auch wenn bei beiden Gesteinsvarietäten kein effektiver wasserabweisender Effekt mehr detektierbar war, lagen die w-Werte des Austauschmaterials leicht unter denen des

original verbauten Gesteins. Der Unterschied beider Werte ist allerdings so gering, dass er wohl eher schwankenden Tongehalten als einer länger anhaltenden hydrophoben Wirkung zuzuschreiben ist. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Konservierungsmittel, die an den Musterflächen der Nordfassade verwendet wurden, nicht mit in die Betrachtung eingeflossen sind.

Entsprechend den Resultaten ist eine erneute Hydrophobierung für den Erhalt der Fassade unerlässlich. Im Rahmen der Wiederbehandlungstests im Labor und an der Fassade führten, abgesehen von der Fassadenapplikation von Funcosil SNL auf Austauschmaterial, alle verwendeten Hydrophobierungsmittel zu einer Senkung des w-Wertes unterhalb der geforderten Grenze von $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$. Das Wasseraufnahmeverhalten der Gesteine blieb erwartungsgemäß durch die Verwendung von Funcosil Antihydro und Silex OH nahezu vollständig unbeeinflusst. Leicht veränderte Werte liegen in den schwankenden Tongehalten begründet. Die doppelte Applikation der Hydrophobierungsmittel im Labor vermochte die Wasseraufnahme am stärksten zu reduzieren. Abgesehen von der einmaligen Behandlung des Originalmaterials mit Funcosil SL (Labor), konnten im Labortest in allen Fällen die w-Werte sogar unter die erstrebenswerte Grenze von $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ abgesenkt werden. Ebenso vorteilhaft wirkt sich auf Austauschmaterial die Applikation von Funcosil SL an der Fassade aus.

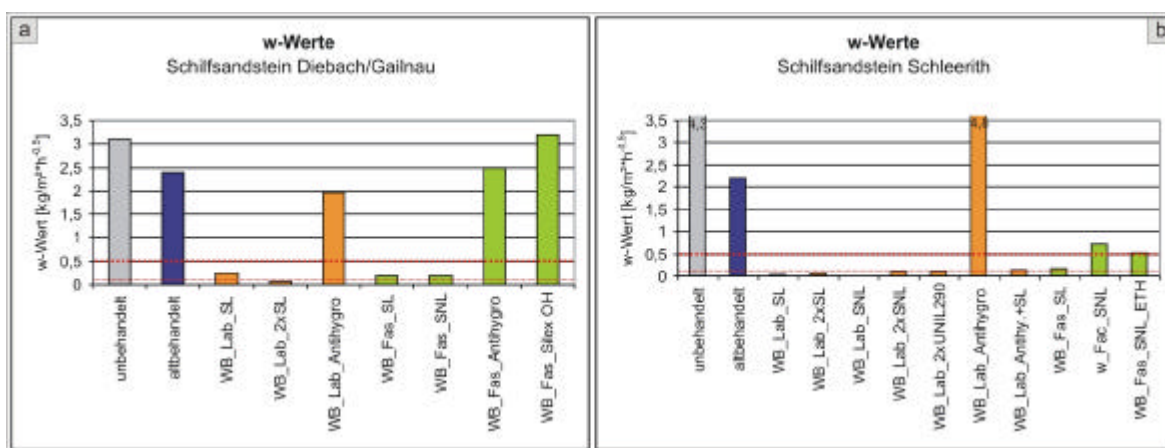


Abb. 8.16 (a-b): Gegenüberstellung der Wasseraufnahmewerte (w-Werte) des unbehandelten und altbehandelten Zustandes im Vergleich zu den Resultaten der Wiederbehandlungstests im Labor und an der Fassade. Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleierith.

Erst ein w-Wert von $= 0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ lässt sicher gehen, dass die vom Porenraum aufgenommene Wassermenge nicht ausreicht, um das Gestein für längere Zeit feuchtzuhalten und Salze zu mobilisieren.

In Anbetracht der sehr hohen Wasseraufnahmewerte des unbehandelten, unverwitterten Schilfsandsteins kennzeichnen die Ergebnisse der Wiederbehandlung – auch wenn sie nicht das $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ - Kriterium erfüllen – eine erfolgreiche Konservierungsmaßnahme. Immerhin beträgt die Reduktion des w-Wertes mindestens ungefähr das Zwanzigfache des altbehandelten Zustandes.

An einer Musterfläche wurde die Mikroemulsion Funcosil WS verwendet, ohne vorher im Labor getestet worden zu sein. Diese Behandlung war bezüglich einer Reduktion des w-Wertes vollkommen unwirksam. Dieses Mittel kann für die Wiederbehandlung von Schilfsandstein, der mit UNIL 190 S vorbehandelt ist, nicht empfohlen werden.

Die Messungen des w-Wertes wurden auch für den Schilfsandstein den Schutzmittelmengen gegenübergestellt, die im Labor und an der Fassade aufgenommen worden sind. Die folgende Abbildung (8.17) zeigt jeweils für die wiederbehandelten Quader der Nord –(a), West-(b) und Südfassade (c) die entsprechenden Vergleichswerte.

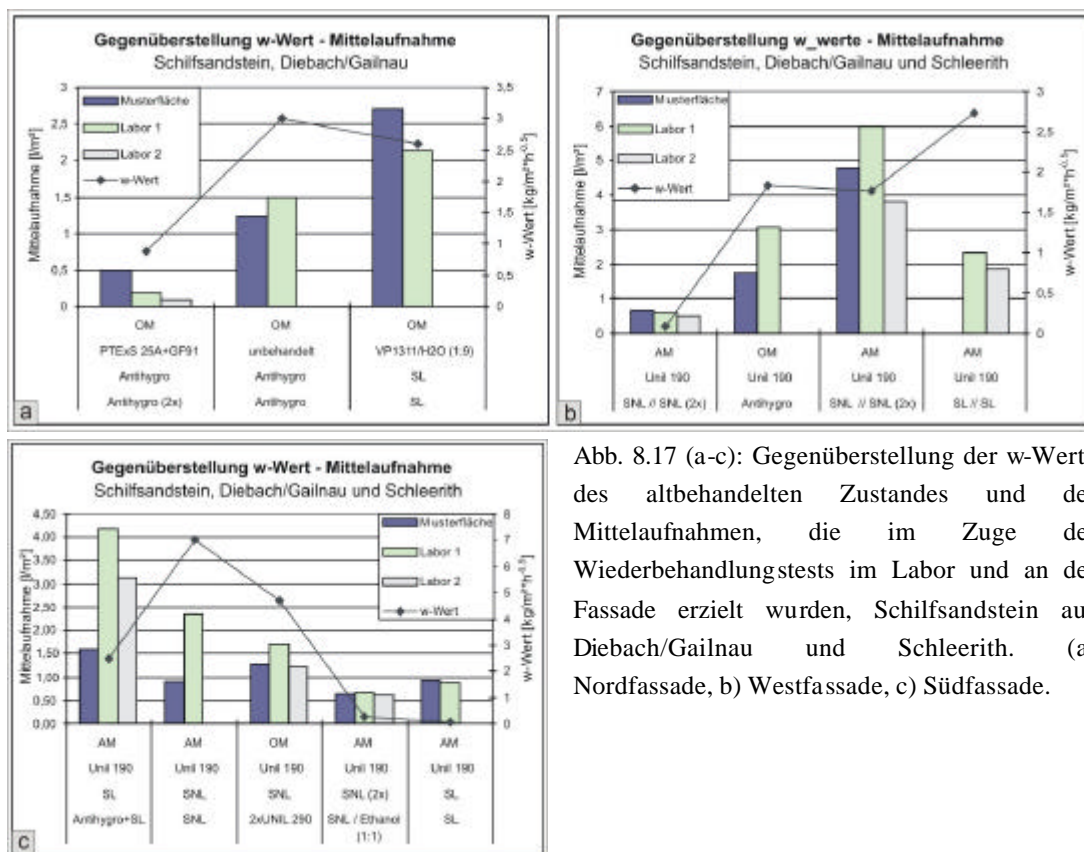


Abb. 8.17 (a-c): Gegenüberstellung der w-Werte des altbehandelten Zustandes und der Mittelaufnahmen, die im Zuge der Wiederbehandlungstests im Labor und an der Fassade erzielt wurden, Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith. (a) Nordfassade, b) Westfassade, c) Südfassade.

Anders als bei den Varietäten des Grünsandsteins, wo der w-Wert mit den erzielten Mittelaufnahmemengen annähernd konform geht, vermittelt diese Gegenüberstellung beim Schilfsandstein einen eher willkürlichen Eindruck. Sehr niedrige Mittelaufnahmen gehen zwar mit geringen w-Werten einher, allerdings lassen sich im Umkehrschluss hohe w-Werte nicht zwangsläufig mit entsprechenden Aufnahmemengen korrelieren. Somit wird deutlich, dass es schwierig ist, für einen Schilfsandstein mit schwankenden Tongehalten eine exakte Vorhersage der Schutzmittelmenge zu treffen.

Ein weiterer Unterschied zu den Grünsandsteinproben besteht darin, dass bei jenem Material - mit Ausnahme der Applikation eines verdünnten Festigers auf Varietät IV – die im Labor erzielten Aufnahmemengen stets über denen der Fassade liegen. Bei den Schilfsandsteinproben verhält es sich anders. Entweder sind die Mengen annähernd gleich oder erratisch im Labor oder an der Fassade höher. Ein Grund dafür könnten auch in diesem Fall die wechselnden Tongehalte innerhalb eines Quaders sein. Der Bohrkern repräsentiert nur einen kleinen Ausschnitt des Bausteins, wohingegen die Musterfläche annähernd 30 cm breit ist und sich über die gesamte Höhe des Quaders erstreckt. Die Wahrscheinlichkeit, auf einen tonreicheren Bereich zu treffen, ist demnach viel höher.

8.3.2 Wasserdampfdiffusions -Widerstand

Die Gasdurchlässigkeit der Sandsteine ist entscheidend für das Trocknungsverhalten der befeuchteten Oberflächen. Zu Beginn des Trocknens eines stark durchfeuchteten Materials spielt die Kapillarität eine entscheidende Rolle. Die weitere Trocknung bis zur Ausgleichsfeuchte, die in Abhängigkeit zu den Umgebungsbedingungen steht, ist durch die Wasserdampfdiffusion gesteuert. Somit fällt ihr eine große Bedeutung für die Beständigkeit eines Sandsteins zu (SCHUH 1987).

Der Diffusionstransport von Wasserdampf aus der umgebenden Luft durch einen porösen Baustoff wird im Bereich der Sorptionsfeuchte durch zwei Arten der Diffusion gemeinsam gesteuert. Die Wasserdampfdiffusion leitet die Wassermoleküle in der Gasphase durch den Porenraum. Die Oberflächendiffusion (Flüssigphase) transportiert sie in adsorbierten Wasserfilmen, die sich an den Porenwänden der Mikroporen und in den Zwickeln der Kapillar- und Makroporen anlagern (KLOPFER 1985). Die dimensionslose Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl (μ -Wert) gibt Auskunft über den Diffusionswiderstand eines porösen Baustoffs gegen die Feuchtigkeit der angrenzenden Luft. Neben der kapillaren Wasseraufnahme ist sie der wichtigste Feuchtigkeitsparameter, der zur Beurteilung einer erfolgreichen Behandlung bzw. Wiederbehandlung mit Hydrophobierungsmitteln herangezogen werden muss. Der μ -Wert errechnet sich aus dem Verhältnis zwischen dem tatsächlichen Diffusionskoeffizienten des Baustoffs und dem Diffusionsleitkoeffizienten einer ruhenden Luftschicht gleicher Temperatur und Dicke. Er ist damit ein direkter Zahlenwert, der aussagt, um wievielfach höher der Diffusionswiderstand eines Baustoffs im Vergleich zu einer ruhenden Luftschicht gleicher Dicke ist. Der μ -Wert von Luft ist 1.

Methodik

Die Wasserdampfdiffusion wurde nach DIN 52615 im wet-cup Verfahren untersucht. Von jedem untersuchten Bohrkern sind sowohl die vordersten 5 Scheiben eines jeden Bohrkerns, die jeweiligen Behandlungsstadien repräsentierend, als auch Proben aus größerer Tiefe (unbehandelt/unverwittert) dieser Messung unterzogen worden.

Die Bohrkernscheiben werden zunächst bei 55°C bis zur Massekonstanz getrocknet und dann mit Parafin dicht schließend auf einen mit aqua dest. gefüllten zylindrischen Glasbehälter aufgesetzt (siehe Abb. 8.18). Vorbereitend erfolgt eine schützende Ummantelung der Steinscheiben mit Parafilm, um sie vor eindringendem Wachs zu schützen. Über einen Zeitraum von 14 Tagen wird diese Versuchseinheit in einem Exsikkator bei 4 % r.Lf. über Kaliumkarbonat gelagert. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen. In Abhängigkeit von der Porosität des Materials erfolgt ein Wasserdampftransport im Sinne eines Konzentrationsausgleichs durch die Bohrkernscheibe nach außen (wet-cup Verfahren). Die Gewichtsveränderungen werden in gewissen Zeitabständen bestimmt. Nach der Einstellung eines stationären Diffusionsstroms verhält sich die Gewichtsänderung im Glas direkt proportional zur Zeit. Aus dem linearen Bereich der Gewichtsänderung wird die Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl nach folgender Formel (9) berechnet:

$$\mu = \frac{d_L \cdot p_s \cdot \Delta a \cdot A \cdot t}{s \cdot \Delta m} \quad (\text{Formel 9})$$

d_l [kg/Pa m s]	Wasserdampfdiffusionsleit- koeffizient der Luft (bei 21°C: $1,96 \cdot 10^{-10}$ kg/Pa m s)
p_s [Pa]	Partialdruck der gesätt. Luft (bei 21°C: $2,49 \cdot 10^3$ Pa)
Δa [-]	Differenz der r. Lf.
A [m ²]	Fläche der Probe
t [s]	Diffusionszeit
s [m]	Dicke der Bohrkernscheibe
Δm [kg]	Gewichtsänderung

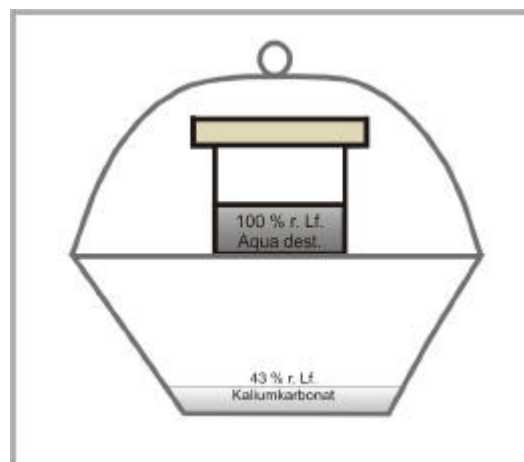


Abb. 8.18: Versuchsaufbau (wet-cup Verfahren) zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes (μ -Wert). Im Exsikkator wird mittels K_2CO_3 eine Luftfeuchtigkeit von 43 % r.Lf. eingestellt. In diese Atmosphäre wird der wet-cup Behälter gestellt, auf dem dicht schließend die Bohrkernscheibe aufgebracht ist.

8.3.2.1 Ergebnisse

8.3.2.1.1 Regensburger Grünsandstein

Im Folgenden werden die verschiedenen applizierten Agenzien und ihre Wirkung auf die Varietäten I-IV des Regensburger Grünsandsteins im Einzelnen dargestellt, um herauszufinden, welche Substanzen für eine Wiederbehandlung empfehlenswert sind bzw. welche nicht verwendet werden sollten.

Sowohl für die Untersuchungen am Regensburger Grünsandstein als auch die Schilfsandstein-Varietäten gilt, dass entsprechend den Richtlinien von SNETHLAGE und WENDLER (1996) (siehe Kapitel 3.4) eine Steigerung des Wasserdampfdiffusions-Widerstands gegenüber dem unbehandelten Material um 20 % zulässig ist.

Funcosil OH und Funcosil H

Die nächste Abbildung (8.19) zeigt den Effekt einer doppelten Anwendung von Funcosil OH und nachfolgender Behandlung mit Funcosil H im Labor und der einfachen Applikation von Funcosil H auf den Musterflächen der Varietäten I-IV.

Die Diagramme 8.19_a und 8.19_b geben die Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes für Proben der relativ dichten Varietät I wieder. Die Eindringtiefe der applizierten Schutzmittel scheint bis in eine Tiefe von ungefähr einem Zentimeter zu reichen. In diesem Bereich ist der μ -Wert, bezogen auf den altbehandelten Zustand, enorm angestiegen (um 90 % in 8.19_a und b und um 70 bzw. 250 % in 8.19_b). Obwohl beide Balken der Wiederbehandlung im Labor in Abbildung 8.19_b von Bohrkernen desselben Quaders stammen, verursacht die gleiche Maßnahme diese extrem unterschiedlichen Ergebnisse. Eine Erklärung ist schwierig, da starke kompositionelle Schwankungen, z.B. durch Bioklastenbruchstücke, bei der relativ dichten und homogenen Varietät I nicht vorkommen. Beide Proben wurden bereits zum wiederholten Male vor diesen Untersuchungen, 1978 und 1988/89, mit Wacker OH und Wacker H konserviert. Diese extremen Unterschiede zeigen erneut deutlich die Notwendigkeit von umfangreichen Analysen im Vorfeld der Erstellung eines Konservierungskonzepts.

Die Wiederbehandlung an der Fassade mit Funcosil H überschreitet in unterschiedlichem Maße in beiden Fällen überdeutlich die empfohlene Richtlinie für einen akzeptablen Anstieg des μ -Wertes. Zusammenfassend betrachtet muss von einer Wiederbehandlung der Varietät I mit dieser Schutzmittelkomposition abgesehen werden.

Abbildung 8.19_c zeigt den Effekt derselben Konservierungsmittel, allerdings auf Varietät III. Der Wert des altbehandelten und des unbehandelten, unverwitterten Materials liegt deutlich unter dem der Varietät I, dementsprechend niedriger ist auch die Grenze einer annehmbaren Steigerung des μ -Wertes. Auch für diese Grünsandsteinvarietät ist die Applikation von Funcosil OH (2x) und Funcosil H (Labor) bzw. Funcosil H an der Fassade nicht empfehlenswert. Beide Behandlungen erzielten eine Steigerung des Diffusions-Widerstandes um 80 bzw. 75 % gegenüber dem unbehandelten Wert und kommen somit für eine Wiederbehandlung nicht in Frage. Eine Aussage bezüglich der Eindringtiefe der neu applizierten Schutzmittel kann nicht getroffen werden.

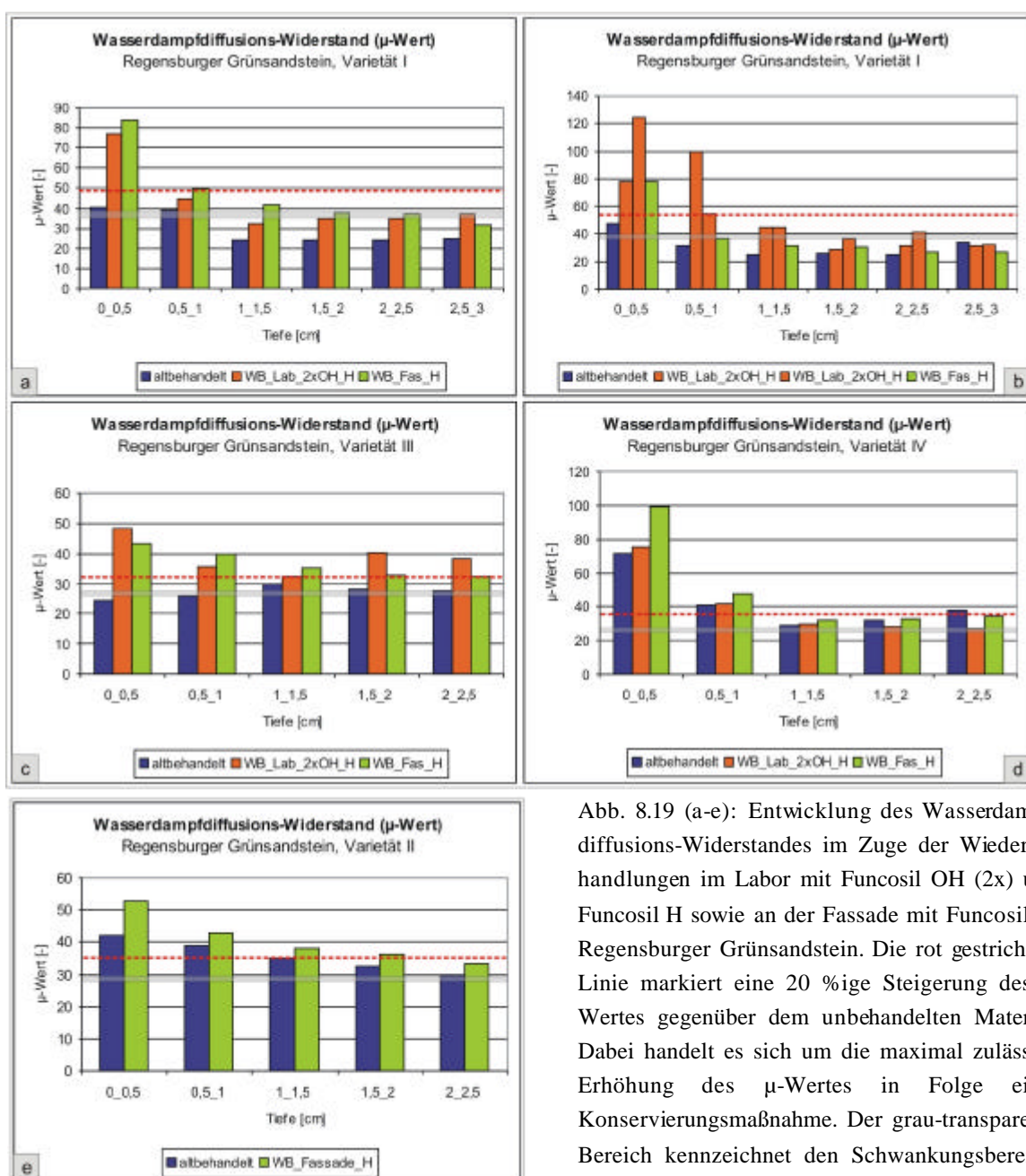


Abb. 8.19 (a-e): Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes im Zuge der Wiederbehandlungen im Labor mit Funcosil OH (2x) und Funcosil H sowie an der Fassade mit Funcosil H, Regensburger Grünsandstein. Die rot gestrichelte Linie markiert eine 20 %ige Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem unbehandelten Material. Dabei handelt es sich um die maximal zulässige Erhöhung des μ -Wertes in Folge einer Konservierungsmaßnahme. Der grau-transparente Bereich kennzeichnet den Schwankungsbereich des unbehandelten, unverwitterten Materials.

Im Diagramm 8.19_d sind die Entwicklungen für Varietät IV wiedergegeben. Die Schutzmittelkombinationen entsprechen denen der bereits beschriebenen Beispiele. Der Wert für das altbehandelte Gestein liegt sehr hoch. Bereits bei der makroskopischen Gesteinsansprache fällt die extreme Heterogenität dieser Varietät auf. Zonen vermehrter Bioklastenhäufigkeit wechseln mit Bereichen großer und geringer Porosität. Die hohen Diffusions-Widerstände scheinen von Messungen an eher bioklastenreichen Proben zu stammen. Die Muschelbruchstücke erschweren die Diffusion. Da die Bemessungsgrundlage für den Erfolg einer Behandlung der unbehandelte Zustand des Materials ist, sind die Steigerungen des μ -Wertes in Folge der Wiederbehandlungstest im Labor und an der Fassade als nicht akzeptabel zu erachten. In diesem Fall muss allerdings beachtet werden, dass es entsprechend den Ergebnissen bereits im Rahmen der ersten Konservierung zu einem enormen Anstieg des μ -Wertes gekommen sein muss. Vor diesem Hintergrund bewegt sich der relativ geringe zusätzliche Anstieg nach den aktuellen Labortests in einem zulässigen Rahmen. Eine entsprechende Wiederbehandlung der Varietät IV wäre somit doch möglich. Die Behandlung an der Fassade mit Funcosil H hingegen führte, auch bezogen auf den altbehandelten Zustand, erneut zu einem überhöhten Anstieg des μ -Wertes. Zwar sind 40 % Steigerung gegenüber dem altbehandelten Wert im Zuge der Fassadenbehandlung bedeutend weniger als bei Varietät I und III, eine Wiederbehandlung mit Funcosil H kann allerdings auch für diese Varietät nicht empfohlen werden.

Es bleibt zu prüfen, welchen Effekt eine einfache Anwendung der Schutzmittelkombination Funcosil OH und Funcosil H an der Fassade hätte. Wenn jedoch bereits die alleinige Applikation von Funcosil H zu derartigen Anstiegen des μ -Wertes führt, ist es bei der momentanen Situation der Fassade ratsam, auf eine kombinierte Festigung mit Hydrophobierung durch Funcosil H zu verzichten, da sie in besonderem Maße zu einer Erhöhung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes zu führen scheint. Wie jedoch im Kapitel 8.3.1.1.1 ausgeführt, zeigen die w-Werte aller vier Grünsandsteinvarietäten eine nahezu intakte wasserabweisende Wirkung der ursprünglichen Konservierung an.

Abbildung 8.19_e stellt den Vergleich der μ -Werte des altbehandelten Zustandes und der Wiederbehandlung am Objekt mit Funcosil H für Varietät II dar. Der μ -Wert der ursprünglich behandelten Fläche stimmt nahezu mit dem der Varietät I überein. Diese Beobachtung vereinbart sich auch mit den Porositätsmessungen der jeweils unbehandelten Materialien. Beide Varietäten sind im Vergleich zu den Varietäten III und IV eher als dicht zu klassifizieren. Der Anstieg des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes übersteigt die empfohlene Richtlinie wieder deutlich. Eine erneute Konservierung der Fassade mit Funcosil H kann nicht empfohlen werden. Auch hier scheint die Eindringtiefe nicht über einen Zentimeter Tiefe hinauszugehen.

Zusammenfassend kann die Aussage getroffen werden, dass weder eine kombinierte Behandlung aus Funcosil OH und Funcosil H (bei zweifacher Anwendung), wie sie im Labor getestet wurde, noch die Applikation von Funcosil H für eine Wiederbehandlung der Fassade der Alten Pinakothek bezüglich ihres Einflusses auf den Wasserdampfdiffusions-Widerstand empfohlen werden kann. Auch wenn die die Steigerung der μ -Werte bei den einzelnen Varietäten verschieden stark ausfällt und mit Hinblick auf das altbehandelte Material in Einzelfällen doch akzeptabel scheint, so ist zu bedenken, dass der Sockelbereich und die rahmenden Elemente der Fassade vollkommen zufällig aus den vier Grünsandsteinvarietäten aufgebaut sind. Eine differenzierte Behandlung einzelner Varietäten im Zuge einer kommerziellen Restaurierungsmaßnahme ist daher nicht realisierbar.

Funcosil OH verdünnt und Funcosil SNL

In den folgenden beiden Abbildungen (8.20) wird der Effekt einer verdünnten Anwendung von Funcosil OH an den Varietäten III und IV dargestellt (verdünnt mit Methylethylketon).

Im Vergleich zu dem Quader der Varietät III, der für die Untersuchungen mit unverdünntem Funcosil OH benutzt wurde, zeigt der im linken Diagramm wiedergegebene Baustein, trotz gleicher ursprüngliche Konservierung, einen nahezu doppelt so hohen μ -Wert, was erneut die Forderung nach umfangreichen Voruntersuchungen für ein Konservierungskonzept unterstreicht.

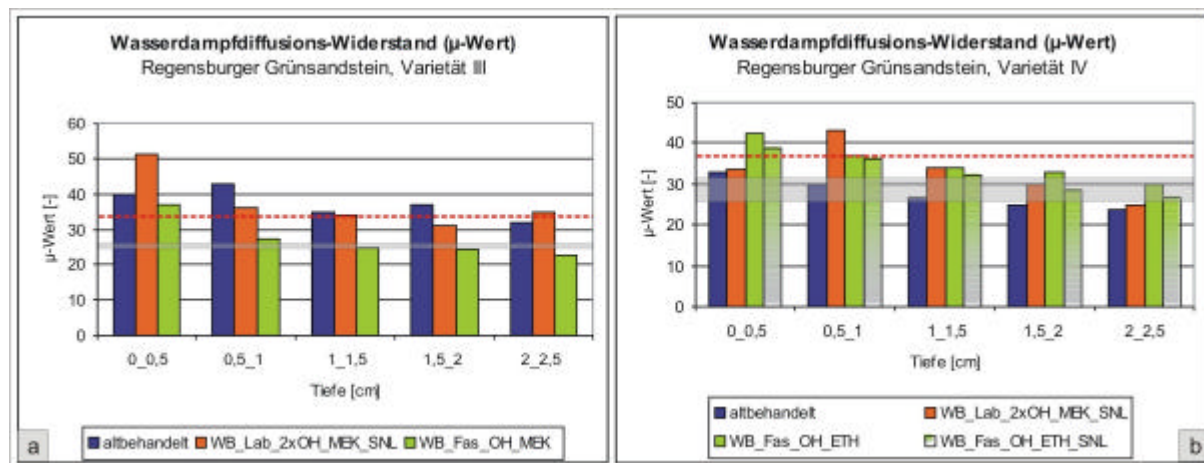


Abb. 8.20 (a-b): Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes im Zuge der Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade mit verdünntem Funcosil OH (2x) und z.T. nachträglicher Hydrophobierung mit Funcosil SNL, Regensburger Grünsandstein. Die rot gestrichelte Linie markiert eine 20 %ige Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem unbehandelten Wert. Der grau-transparente Bereich kennzeichnet den Schwankungsbereich des unbehandelten, unverwitterten Materials.

In Abbildung 8.20_a kann erneut festgestellt werden, dass eine Hydrophobierung, in diesem Fall mit Funcosil SNL, zu einem starken Anstieg des μ -Wertes führt. Die einfache Anwendung des verdünnten Funcosil OH, ohne nachfolgende Hydrophobierung, bewirkt, bezogen auf das unbehandelte Material, noch nahezu vertretbare Werte. Gerade mit Hinblick auf den altbehandelten Zustand scheint der verdünnte Festiger bezüglich einer Steigerung des μ -Wertes unbedenklich zu sein. Sowohl für Varietät III als auch Varietät IV (Abb. 8.20_b) können mit dieser Untersuchungsmethode gegenüber dem unverdünnten Schutzmittel keine optimierten Eindringtiefen festgestellt werden. Auch in diesem Fall sind die Substanzen wahrscheinlich nicht tiefer als einen Zentimeter eingedrungen.

In Anbetracht der enormen Überschreitungen empfohlener Richtlinien für den Anstieg des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes bei Applikation des unverdünnten Festigers Funcosil OH, können die dieses Limit minimal übersteigenden Resultate des verdünnten Festigers noch als erfolgreich bewertet werden. Auf Varietät IV wäre sogar die Kombination mit einer hydrophobierenden Nachbehandlung durch Funcosil SNL applikabel

Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt

Die folgende Abbildung (8.21) zeigt, inwieweit die Anwendung des verdünnten und unverdünnten elastifizierten Festigers Remmers 300E entsprechend seines Einflusses auf den Wasserdampfdiffusions-Widerstand befürwortet werden kann.

Bezogen auf das unbehandelte Material kann keine der applizierten Behandlungskombinationen mit Remmers 300E empfohlen werden. Würde der aktuelle Zustand der Fassade als Bemessungsgrundlage

gelten, könnte nur der einmalig an der Fassade angewendeten Behandlung mit verdünntem Remmers 300E ohne nachfolgende Hydrophobierung zugestimmt werden. Dieses Anwendungsbeispiel bestätigt die bereits getroffenen Aussagen, dass zum einen die verdünnte Applikation der Schutzmittel bezüglich der Entwicklung des μ -Wertes von Vorteil ist und zum anderen hydrophobierende Nachbehandlungen der vier Grünsandsteinvarietäten (Ausnahme Funcosil SNL, Varietät IV) teilweise zu hohen Diffusionswiderständen führen.

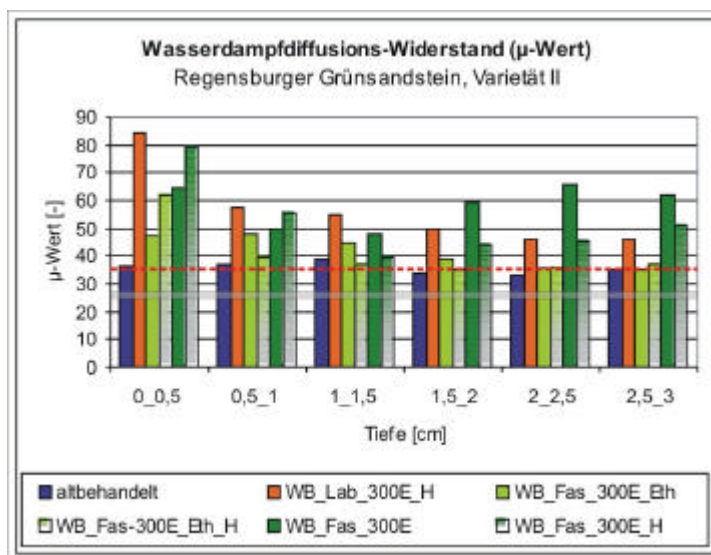


Abb. 8.21: Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes im Zuge der Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade mit unverdünntem und verdünntem Remmers 300E und z.T. nachträglicher Hydrophobierung mit Funcosil H, Regensburger Grünsandstein. Die rot gestrichelte Linie markiert eine 20 %ige Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem unbehandelten Gestein. Die grau-transparente Zone kennzeichnet den Schwankungsbereich des unbehandelten, unverwitterten Materials.

Eine Aussage bezüglich der Eindringtiefe ist nur schwer zu treffen.

Im Falle einer intakten wasserabweisenden Wirkung des ursprünglich aufgetragenen Konservierungsmittels kann zum Zweck der Optimierung der Festigkeit des Regensburger Grünsandsteins (Varietät II) eine Wiederbehandlung mit verdünntem Remmers 300E durchaus empfohlen werden.

Die Ergebnisse der Messungen des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes zeigen, dass nur die Applikation verdünnter Schutzmittel μ -Werte erzielt, die annähernd im Rahmen der Richtlinien liegen und somit keine Gefahr einer Dampfdiffusionssperre besteht. Diese Feststellung gilt nur für die Varietäten II-IV. Auf Varietät I wurden keine verdünnten Festiger verwendet. Die Behandlung der relativ dichten Varietät II mit verdünntem Remmers 300E ist, wie erläutert, auch nur ohne eine nachfolgende Hydrophobierung annähernd akzeptabel. Diese Einschränkung muss bei der Erarbeitung eines Sanierungskonzepts unbedingt beachtet werden.

Generell sollten Schutzmittel, die eine große Steigerung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes verursachen, nicht eingesetzt werden. Es besteht allerdings die Möglichkeit, mittels Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit (Sd-Wert) bzw. die Künzel Zahl abzuschätzen, inwieweit die hohen μ -Werte ein Risiko für die Fassade bedeuten. Bei der Bewertung dieser Resultate geht man

allerdings von einem perfekt intakten Fugennetz aus, wo kein Wasser über Umwege hinter die hydrophobierte Zone gelangen kann.

8.3.2.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Die Süd-, West- und Nordfassade von Schloss Schillingsfürst wurden mit Ausnahme der Musterfläche (Nordfassade) im Zuge der ersten Konservierung in verschiedenen Etappen (siehe Kapitel 5.2) mit UNIL 190 S hydrophobiert. In den folgenden Abbildungen (8.22-8.26) bezieht sich die Kategorie „altbehandelt“ auf diese ursprüngliche Behandlung, deren hier dargestellte Wirksamkeit im Jahr 2001 ermittelt wurde.

Im Folgenden werden die verschiedenen applizierten Agenzien und ihre Wirkung auf die Schilfsandsteinvarietäten aus Diebach/Gailnau (Originalmaterial) und Schleerith (Austauschmaterial) einzeln aufgezeigt.

Funcosil SNL

In Abbildung 8.22 sind die Ergebnisse der Anwendung von Funcosil SNL dargestellt. Das linke Diagramm (8.22_a) zeigt die Resultate der Applikation der unverdünnten und das rechte (8.22_b) die Verwendung der mit Ethanol (1:1) verdünnten Substanz.

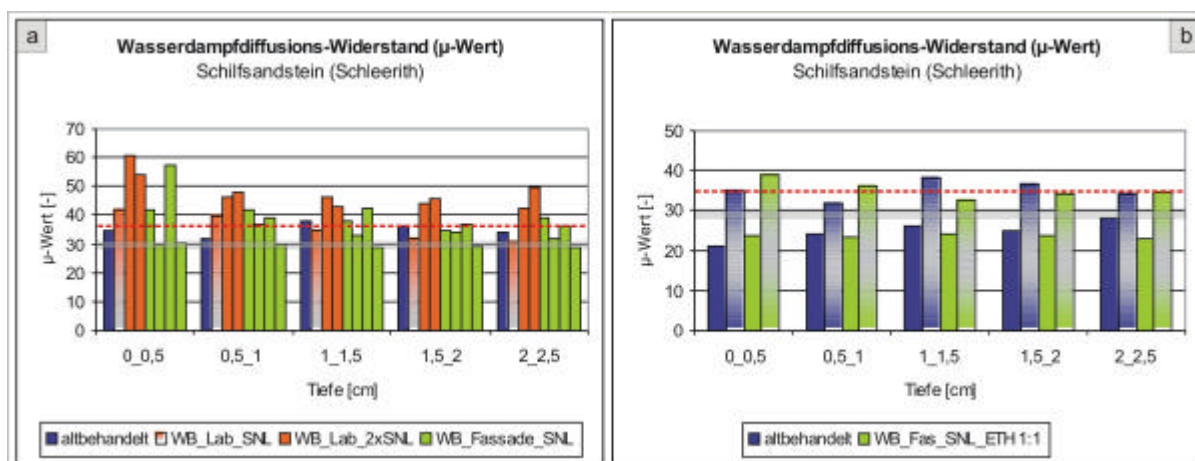


Abb. 8.22 (a-b): Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes im Zuge der Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade mit Funcosil SNL bzw. Funcosil SNL, verdünnt mit Ethanol (1:2), Schilfsandstein (Schleerith). Die rot gestrichelte Linie markiert eine 20 %ige Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem unbehandelten Wert. Der grau-transparente Bereich kennzeichnet den Schwankungsbereich des unbehandelten, unverwitterten Materials.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die einmalige Applikation im Labor günstiger auswirkte, als die doppelte, deren resultierender μ -Wert enorm die empfohlene Grenze einer 20 %igen Steigerung gegenüber dem unbehandelten Material (rote gestrichelte Linie) übersteigt. Obgleich die einmalige Behandlung ebenfalls zur Überschreitung dieses akzeptablen Grenzwertes kommt. Am Objekt wurden mehrere, unterschiedliche Quader mit Funcosil SNL wiederbehandelt. Mit einer Ausnahme stieg der Wasserdampfdiffusions-Widerstand nur mäßig an bzw. blieb nahezu unverändert. Die Tatsache, dass nach der erneuten Behandlung die μ -Werte teilweise sogar unter dem des altbehandelten Zustandes zurück blieben, ist wohl auf Schwankungen in den Tongehalten (siehe Kapitel 6.4) zwischen den unterschiedlichen Quadern zurückzuführen. Gleiches gilt wahrscheinlich auch für die Applikation an

der Musterfläche, die den extrem angestiegenen μ -Wert zur Folge hat. Der hierfür untersuchte Bohrkern stammt von demselben Quader wie die Probe, die nach der Laborbehandlung einen Wert von 60 erzielte. Dieses Beispiel zeigt deutlich, dass Bausteine, die zu einer Varietät gehören, keinesfalls als einheitlich angesehen werden dürfen. Sowohl erste Konservierungsmaßnahmen als auch eine erneute Behandlung erfordern aus diesem Grund eine umfangreichere Anzahl von Messungen, um ein Spektrum der möglichen petrophysikalischen Parameter und darauf basierender Resultate zu erhalten.

Abbildung 8.22_b zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen an zwei Musterflächen, die mit Ethanol verdünntem Fungosil SNL (1:1) wiederbehandelt wurden. Messungen an beiden entsprechenden Quadern ergaben unterschiedlich hohe μ -Werte für den altbehandelten Zustand. In beiden Fällen bleiben die μ -Werte nach der Wiederbehandlung nahezu im Rahmen der empfohlenen Steigerung von 20 % gegenüber dem unbehandelten, unverwitterten Zustand. Die leichte Überschreitung ist in Anbetracht der z.T. überdurchschnittlich angestiegenen μ -Werte noch vertretbar.

Bei beiden Diagrammen liegt die Annahme nahe, dass die Eindringtiefe der jeweiligen Schutzmittel nicht über einen Zentimeter hinausgegangen ist.

Fungosil SL

Mit dem Siloxan Fungosil SL wurden mehrere unterschiedliche Proben des Original- und des Austauschmaterials von Schloss Schillingsfürst wiederbehandelt. Die folgenden Abbildungen (8.23_a und 8.23_b) zeigen daraus resultierende Ergebnisse. Die Messungen ergaben zwei verschiedene μ -Werte für die Kategorie des altbehandelten Materials. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu ermöglichen, wurden die Werte entsprechend auf zwei Diagramme aufgeteilt. Das linke Diagramm (8.23_a) gibt sowohl Ergebnisse auf Originalmaterial aus Diebach und Gailnau als auch von Untersuchungen an Schleierith Austauschmaterial (der erste grüne Balken jedes Tiefenbereichs) wieder. Mit Bezug auf das unbehandelte, unverwitterte Material ist eine doppelte Applikation von Fungosil SL, wie sie im Labor an Originalmaterial durchgeführt wurde, durchaus akzeptabel.

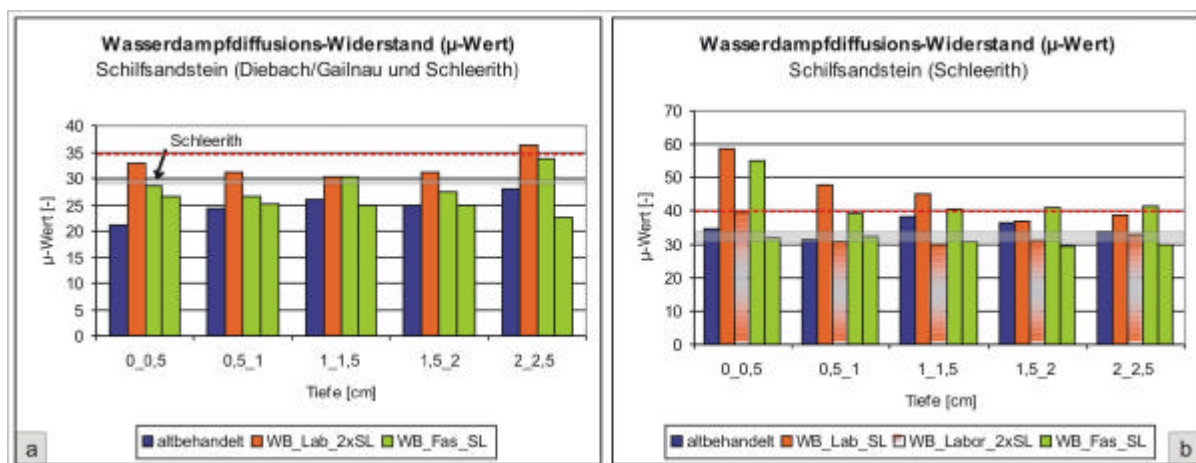


Abb. 8.23 (a-b): Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes im Zuge der Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade mit Fungosil SL, Schilfsandstein (Diebach/Gailnau und Schleierith). Die rot gestrichelte Linie markiert eine 20 %ige Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem unbehandelten Gesteins. Die grau-transparente Zone kennzeichnet den Schwankungsbereich des unbehandelten, unverwitterten Materials.

Auch wenn es im Zuge dessen zu einer deutlichen Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem altbehandelten Zustand gekommen ist, muss der wiederbehandelte Bereich kompatibel zum unbehandelten Gestein bleiben. Da sich die Steigerung innerhalb des dementsprechend annehmbaren Rahmens bewegt, kann die erneute Behandlung befürwortet werden, noch dazu, da die doppelte Applikation der Schutzmittel im Labor zur deutlichen Hervorhebung möglicher Risiken durchgeführt wurde. An der Fassade wurde das jeweilige Agens nur einmal angewendet. An dem gleichen Quader, an dessen Probe in der Laborbehandlung ein starker Anstieg des μ -Wertes bewirkt wurde, konnte auf der Musterfläche mit Funcosil SL eine erfolgreiche Wiederbehandlung erzielt werden. Der μ -Wert liegt sogar leicht unterhalb des unbehandelten Gesteins. Bei dem Austauschmaterial aus Schleierith erzielte die erneute Behandlung an der Fassade ein, diese Grenze überschreitendes Resultat.

Abbildung 8.23_b zeigt nur Ergebnisse, die an Sandstein aus Schleierith erhoben wurden. Der μ -Wert des altbehandelten Zustands liegt höher als im linken Diagramm. Erstaunlicherweise führt in diesem Fall die einmalige Laborapplikation zu einem extremen Anstieg des μ -Wertes gegenüber dem alt- und auch dem unbehandelten Wert (70 %). Die Behandlung an der Fassade, die ähnlich hohe Werte erzielte, wurde an demselben Quader vorgenommen, von dem auch die Probe für die Labortests stammt. In diesem Fall scheint die Mineralogie des Materials den Ausschlag der extremen Entwicklung der μ -Werte zu geben. Wie jedoch in den Untersuchungen zum Mineralbestand des Schilfsandsteins (siehe Kapitel 6.4) festgestellt wurde, gibt es bereits innerhalb eines Quaders starke Schwankungen im Tongehalt, was wahrscheinlich für die extremen Unterschiede verantwortlich ist. Auch dieses ist wieder ein Beispiel dafür, dass umfassende Kenntnis eines Baumaterials und somit die Vermeidung von Fehleinschätzungen nur durch umfangreiche Untersuchungen erreicht werden können. Solche außergewöhnlichen Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass pauschalisierende Aussagen zur Machbarkeit einer Maßnahme, extrapolierend auf die gesamte Fassade, durchaus schwierig sein können.

Anhand der Entwicklung der μ -Werte im Tiefenprofil in beiden Diagrammen können die Eindringtiefen der Hydrophobierungsmittel zwischen einem und anderthalb Zentimetern angenommen werden.

Funcosil Antihygro

Neben reinen Hydrophobierungsmitteln wurde zur erneuten Behandlung der Schilfsandsteinvarietäten auch der Quellminderer Funcosil Antihygro verwendet. In Abbildung 8.24 sind die Ergebnisse dargestellt, die mit diesem Schutzmittel auf der Basis des ursprünglich applizierten UNIL 190 S erzielt wurden. Des Weiteren sind umfangreiche Untersuchungen mit dem Agens auf den Musterflächen an der Nordfassade vorgenommen worden. Die entsprechenden Resultate finden folgend (Musterfläche/Nordfassade) nähere Erwähnung. Im Diagramm 8.24 beziehen sich jeweils die vollfarbigen und die semitransparenten Balken aufeinander.

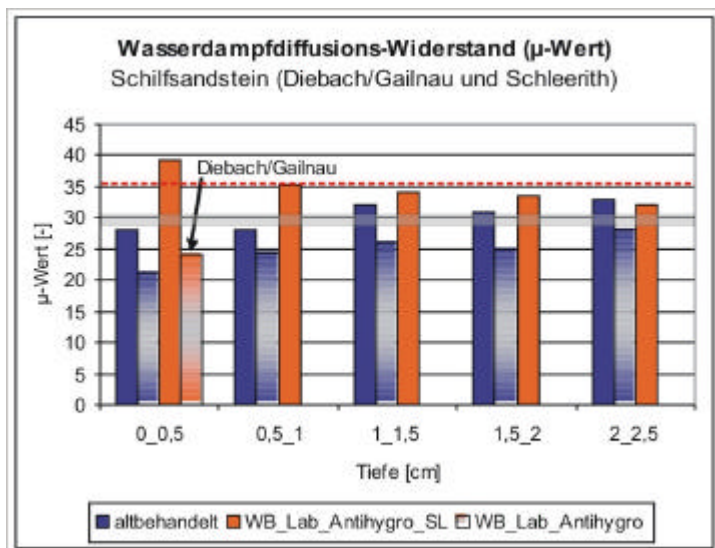


Abb. 8.24: Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes im Zuge der Wiederbehandlung im Labor mit Funcosil Antihygro, Schilfsandstein (Diebach/Gailnau und Schleerith). Die rot gestrichelte Linie markiert eine 20 %ige Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem unbehandelten Wert. Der grau-transparente Bereich kennzeichnet den Schwankungsbereich des unbehandelten, unverwitterten Materials

Im Falle des Originalmaterials aus Diebach/Gailnau lag nur der Messwert der vordersten Bohrkernscheibe vor. Das Ergebnis zeigt bezüglich der Steigerung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes eine erfolgreiche Wiederbehandlung an. Der vollfarbige, orange Balken gibt das Resultat einer Antihygro-Behandlung mit nachfolgender Applikation von Funcosil SL wieder.

Vermutlich gibt die nachträgliche Anwendung von Funcosil SL, die der hydrophoben Einstellung des Materials dienen sollte, den Anlass für den extremen Anstieg des μ -Wertes. Diese Schutzmittelkombination kann für eine Applikation an der Fassade nicht empfohlen werden. Der Unterschied im Behandlungserfolg mit Funcosil Antihygro könnte offensichtlich auch in den beiden, aus unterschiedlichen Steinbrüchen stammenden Schilfsandsteinvarietäten begründet liegen. Allerdings bestätigte sich diese Vermutung an keinem anderen Beispiel der Untersuchungen zum Wasserdampfdiffusions-Widerstand, weshalb doch die verschiedenen Schutzmittelkombinationen dafür verantwortlich zu sein scheinen.

Die Mitteleindringtiefe liegt ungefähr bei einem Zentimeter.

UNIL 290 und Mikroemulsion WS

Exemplarisch an jeweils einem Sandsteinquader bzw. den entsprechenden Bohrkernen wurde zum einen UNIL 290 und zum anderen die Mikroemulsion WS bezüglich ihrer Eignung zur Wiederbehandlung des ursprünglich mit UNIL 190 S hydrophobierten Schilfsandstein getestet. In Abbildung 8.25_b ist zu erkennen, dass eine erneute Behandlung mit UNIL 290 erstaunlicherweise nahezu keine Veränderung der Dampfdiffusion bewirkt, obgleich es eine ähnliche Wirkung haben müsste wie Funcosil SNL. Die minimalen Abweichungen in Bezug auf den Wert der altbehandelten Probe können hier nicht eindeutig in kompositionelle Abweichungen und Resultate einer Behandlung unterschieden werden; im Speziellen deshalb, da trotz des Einbringens eines Schutzmittels der Diffusions-Widerstand im Bereich der vordersten 5 mm der Fassade leicht zurückging.

Die Eindringtiefe liegt vermutlich bei ungefähr einem Zentimeter.

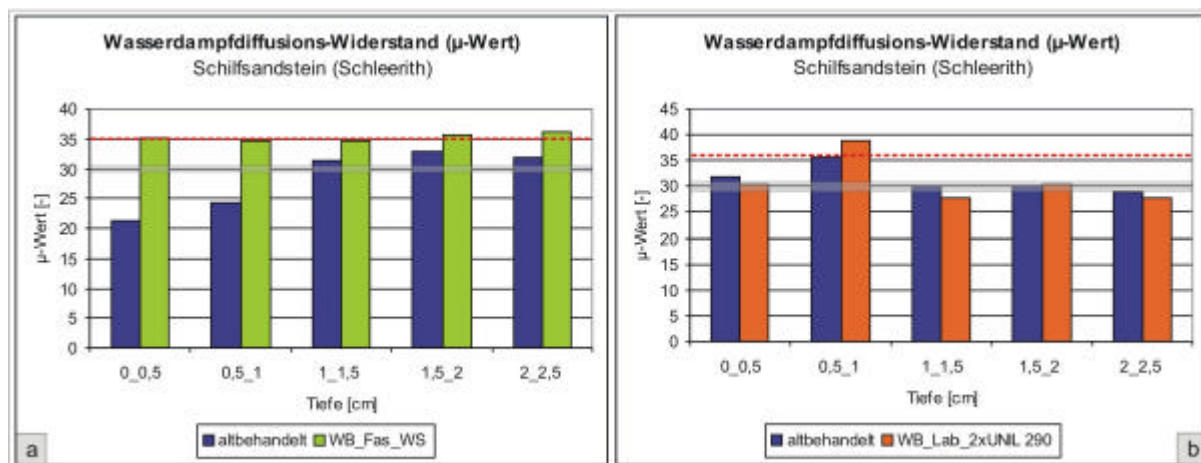


Abb. 8.25 (a-b): Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes im Zuge der Wiederbehandlung im Labor mit UNIL 290 und der Wiederbehandlung an der Fassade mit der Mikroemulsion WS, Schilfsandstein (Schleerith). Die rot gestrichelte Linie markiert eine 20 %ige Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem unbehandelten Wert. Der grau-transparente Bereich kennzeichnet den Schwankungsbereich des unbehandelten, unverwitterten Materials.

Die Wiederbehandlung mit der Mikroemulsion WS (8.25_a) bewirkte einen Anstieg des μ -Wertes um annähernd 75 % gegenüber dem altbehandelten Zustand und 16 % zum unbehandelten, unverwitterten Material. Trotz dieser enormen Steigerung, bezogen auf das altbehandelte Gestein, liegt der erzielte μ -Wert mit Hinblick auf das unbehandelte Material noch innerhalb des akzeptablen Limits. Allerdings erstaunt die Diskrepanz zwischen unbehandeltem Gestein und dem Material, das bereits konserviert worden ist. Auch wenn die Effektivität des Polysiloxanfilm nahezu aufgehoben ist (siehe Kapitel 8.3.1.1.2), sollten die Unterschiede nicht derartig groß sein. Höchstwahrscheinlich liegt die Diskrepanz erneut in wechselnden Tongehalten begründet. Aus diesem Grund ist die „Gratwanderung“ bezüglich der Applikation der Mikroemulsion skeptisch zu bewerten. Da der μ -Wert durch die Behandlung mit der Mikroemulsion nicht abgesenkt werden konnte, scheint das Risiko eines überdurchschnittlich gesteigerten μ -Wertes unverhältnismäßig. Die erneute Behandlung mit der Mikroemulsion kann demnach nicht empfohlen werden.

Musterfläche/Nordfassade

Im Rahmen der ersten Konservierung der Fassaden von Schloss Schillingsfürst, die in mehreren Etappen über ungefähr 15 Jahre währte (siehe Kapitel 5.2), wurde im Jahr 1992 an der Nordfassade eine Musterfläche mit verschiedenen Schutzmitteln angelegt. Einige dieser Musterflächen bilden die Grundlage diverser Wiederbehandlungsversuche. In der Abbildung 8.26 bezieht sich die Kategorie „altbehandelt“ auf die folgenden Schutzmittel, deren hier dargestellte Wirksamkeit im Jahr 2001 ermittelt wurde.

- 1,4-Butyldiammoniumchlorid (BDAC), 0,2 Mol/l H₂O (quellminderndes Tensid)
- 1,4-Butyldiammoniumchlorid (BDAC), 0,5 Mol/l H₂O
- Wacker VP1311 / H₂O 1:9 (Mikroemulsion)
- Propyltriethoxysilan (Mikroemulsion) mit Haftvermittlermodifizierung PTE_xS 25A+GF91
- unbehandelt und der Verwitterung ausgesetzt

Auf diese bereits behandelten Flächen bzw. an davon entnommenen Bohrkernen wurden verschiedene Wiederbehandlungsversuche durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden näher erläutert werden.

In 8.26_a wurde auf der Basis von BDAC 0,2 m am Objekt Funcosil SNL appliziert. Der Anstieg des μ -Wertes bleibt in Folge dessen im empfohlenen Bereich einer höchstens 20 %igen Steigerung gegenüber dem unbehandelten Wert (rot gestrichelte Linie). Bezüglich des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes ist diese Wiederbehandlung zu empfehlen.

Bei zwei anderen Musterflächen, die ursprünglich mit BDAC behandelt wurden, konnten für die ersten Bohrkernscheibe (0-0,5 cm) einmal 37 (BDAC 0,5 m) und weiterhin 43 (BDAC 0.2 m) als μ -Wert ermittelt werden. Diese Flächen sind nicht wiederbehandelt worden und finden daher im Diagramm keine Erwähnung. Die leichte Abweichung kann in unterschiedlichen Konzentrationen beider Substanzen begründet liegen, aber auch durch mineralogische Unterschiede (siehe Kapitel 6.4) hervorgerufen worden sein.

Eine Aussage bezüglich der Eindringtiefe anhand der Messbalken ist schwierig. Es scheint, dass sie bis ungefähr zu einem Zentimeter Tiefe reicht.

In Abbildung 8.26_b sind die Resultate einer ursprünglichen Anwendung der Mikroemulsion VP1311 in zwei unterschiedlichen Konzentrationen und der darauf folgenden Wiederbehandlung mit dem Hydrophobierungsmittel Funcosil SL abgebildet. Die damalige Behandlung mit VP1311 hat verschiedene μ -Werte nach 18 Jahren zur Folge. Beide Male wurde die Substanz mit Wasser verdünnt. Im Falle der Verdünnung 1:9 resultierten niedrigere μ -Werte, als nach der 1:5-Verdünnung. Auch hier könnten mineralogische Abweichungen beider Quader diesen Unterschied bewirken. Beachtet man allerdings die Ergebnisse dieser aktuellen Untersuchung, so wurde festgestellt, dass sich verdünnte Applikationen günstiger auf den Wasserdampfdiffusions-Widerstand auswirken. Die Resultate der Wiederbehandlungen liegen alle im Bereich des empfohlenen Grenzwerts einer 20 %igen Steigerung, bezogen auf das unbehandelte, unverwitterte Material. Es ist auffällig, dass ein stärkerer Anstieg des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes zwischen 0,5 cm und 1,0 cm zu verzeichnen ist.

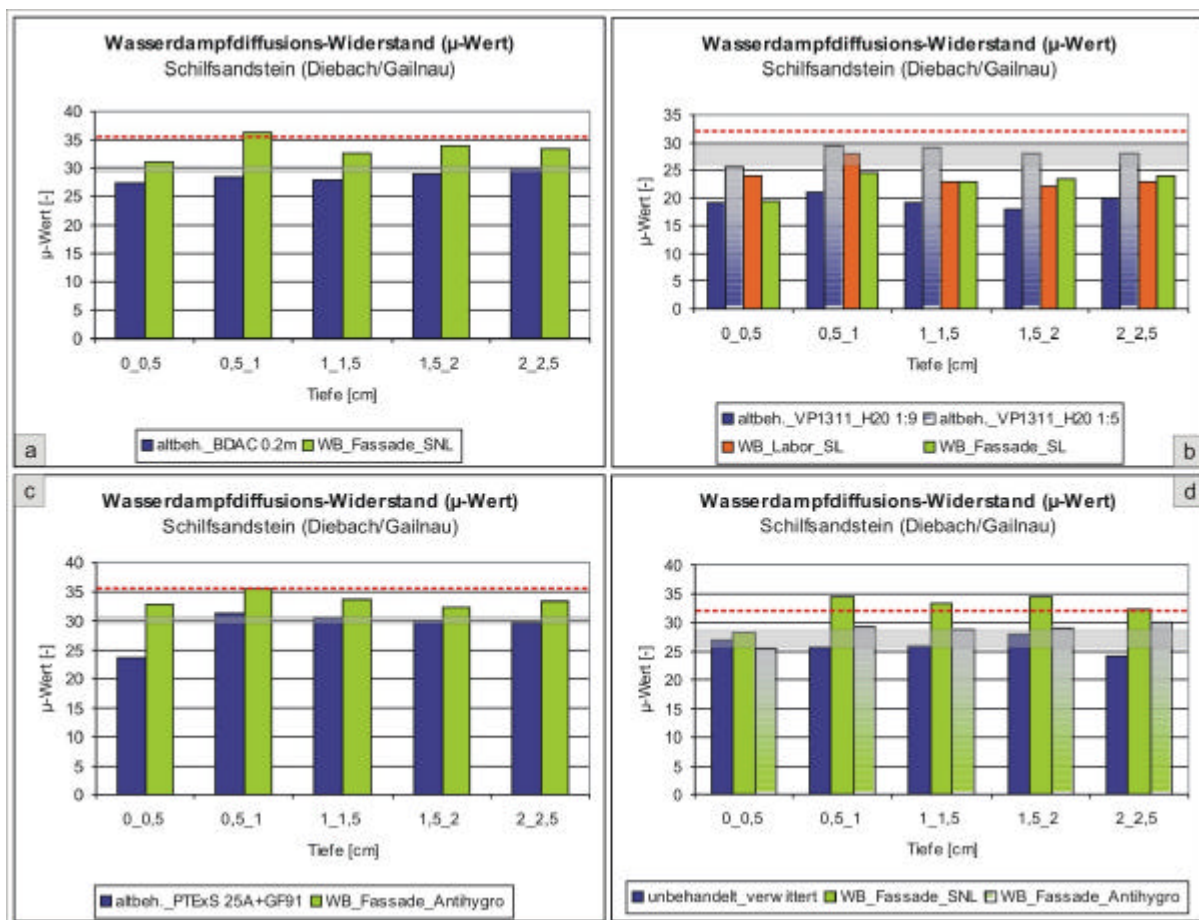


Abb. 8.26 (a-d): Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes auf der Basis verschiedener, Anfang der 1990er Jahre an der Nordfassade von Schloss Schillingsfürst applizierter, Schilfsandstein (Diebach/Gailnau). Die rot gestrichelte Linie markiert eine 20 %ige Steigerung des μ -Wertes gegenüber dem unbehandelten Wert. Der grau-transparente Bereich kennzeichnet den Schwankungsbereich des unbehandelten, unverwitterten Materials.

Eventuell könnte hierfür eine Verlagerung der Salze, die sich zunächst auf oder ganz nah unterhalb der Fassadenoberfläche angelagert hatten und durch die Wiederbehandlung in größere Tiefen transportiert wurden, wo sie nun den Porenraum verlegen und zu einer Steigerung des μ -Wertes führen. Da hier eine Verschiebung der Salze zwischen der ersten (0-0,5 cm) und zweiten (0,5-1,0 cm) Bohrkernscheibe zur Diskussion steht, die Salze jedoch in Schritten von einem Zentimeter entlang eines Tiefenprofils analysiert wurden, ist keine exakte Aussage möglich. Dennoch ergab der Vergleich zwischen altbehandeltem und wiederbehandeltem Zustand für den speziellen Quader, dessen Ergebnisse im Diagramm 8.26_b wiedergegeben werden, im Bereich des vordersten Zentimeters eine deutliche Steigerung sowohl der Sulfat-, der Chlorid- als auch der Nitratkonzentration (siehe Abb. 8.27). Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass die Salze an der Oberfläche lagerten und im Zuge der Konservierungsmaßnahme mit in die Fassade eingeschwemmt worden sind.

Die Zunahme des Nitratgehalts überschreitet offensichtlich sogar die der Belastungsgrenze entsprechende Konzentration. Die Grenze für eine Sulfatbelastung liegt bei einer Konzentration von 15-18 g/kg und wurde nicht erreicht.

Die neu applizierten Schutzmittel scheinen mindestens bis in eine Tiefe von einem Zentimeter eingedrungen zu sein.

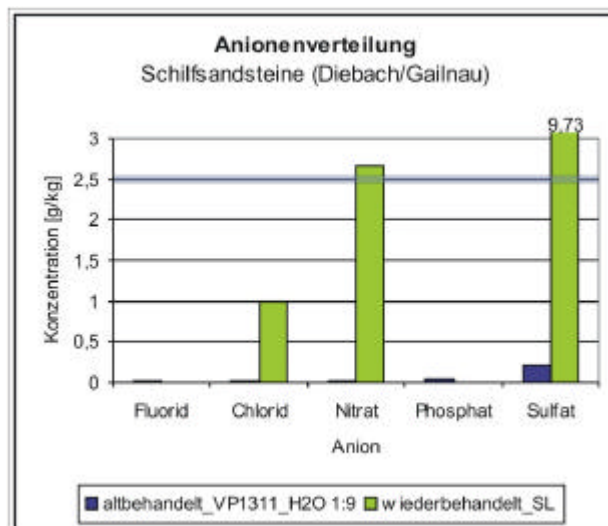


Abb. 8.27: Verteilung der Anionen im Bereich von 0-1,0 cm Fassadentiefe - Vergleich der altbehandelten mit der wiederbehandelten Musterfläche. Die semitransparente Linie markiert die Belastungsgrenze für Nitrat. Fluorid- und Phosphationen konnten nach der Wiederbehandlung nicht detektiert werden.

In Abbildung 8.26_c ist die Wechselwirkung einer ursprünglichen Konservierung mit einer Mikroemulsion mit Haftvermittlermodifizierung (PTExS 25A+GF91) und der nachfolgenden Wiederbehandlung mittels Funcosil Antihygro wiedergegeben. Die im Zuge der erneuten Konservierung erzielten μ -Werte liegen innerhalb der Grenze eines akzeptablen Anstiegs.

Eine Aussage bezüglich der Eindringtiefe ist nur schwer zu machen. Aber auch in diesem Fall scheint mindestens ein Zentimeter erreicht worden zu sein.

Das Diagramm in 8.26_d beschreibt den Effekt einer Wiederbehandlung mit Funcosil SNL bzw. Funcosil Antihygro auf Musterflächen, die 1992 unbehandelt verblieben. Sie geben demnach den Zustand einer seit ungefähr 300 Jahren der Verwitterung exponierten Fassadenfläche wieder. Die Anwendung von Funcosil Antihygro am Objekt führte nur zu einer sehr geringen bzw. nahezu keiner Veränderung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes im Bereich der Eindringtiefe des Schutzmittels, die entsprechend den Messbalken zwischen einem und anderthalb Zentimetern liegen müsste. In Folge der Applikation des Hydrophobierungsmittels Funcosil SNL stieg der μ Wert im Bereich ab einer Tiefe von 0,5 cm deutlich an, liegt aber dennoch innerhalb der Grenzen eines zu vertretenden Anstiegs. Die Behandlung mit Funcosil Antihygro und Funcosil SNL auf dem unbehandelten und verwitterten Untergrund kann empfohlen werden.

Die Ergebnisse der Messungen des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes zeigen, dass die μ Werte zwar sehr erhöht sind, mit Bezug auf das unbehandelte, unverwitterte Material allerdings zum großen Teil noch innerhalb der empfohlenen Richtlinien einer 20 %igen Steigerung liegen. Sowohl eine Antihygro-Behandlung mit nachfolgender Hydrophobierung (Funcosil SL) als auch die Applikation der Mikroemulsion Funcosil WS führten jedoch zu stark erhöhten μ Werten und können keinesfalls empfohlen werden. Der Wasserdampfdiffusions-Widerstand nach der Behandlung mit Funcosil WS liegt zwar noch knapp innerhalb des akzeptablen Bereichs, da diese Wiederbehandlung jedoch keinerlei Absenkung des w-Wertes bewirkt hat, sollte auf die Anwendung der Mikroemulsion verzichtet werden. Funcosil SNL und SL haben unterschiedliche Auswirkungen auf die beiden Schilfsandsteinvarietäten. Eine einfache und verdünnte Applikation ist generell mit einem geringeren Anstieg des μ Wertes verbunden, als bei doppelter oder unverdünnter Verwendung. Die alleinige

Anwendung von Funcosil Antihydro und UNIL 290 sind bezüglich der Entwicklung des μ -Wertes unbedenklich.

Wie oben bereits erwähnt, sollte Schutzmittel, die einen großen Anstieg des μ -Wertes verursachen, nicht eingesetzt werden. Im Folgenden wird für beide Sandsteintypen mittels der Kalkulation von Wasserdampfdiffusionsleitfähigkeit (Sd-Wert) bzw. die Künzel Zahl theoretisch abgeschätzt werden, inwieweit die hohen μ -Werte ein Risiko für die Fassade bedeuten. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass sich die damit verbundenen Richtwerte und Klassifizierungen auf ein intaktes Fugennetz beziehen, wo kein Wasser über Umwege hinter die hydrophobierte Zone gelangen kann.

8.3.3 Wasserdampfdiffusions -Leitfähigkeit (Sd-Wert) und Künzel Zahl

Zur Abschätzung des Trocknungsverhaltens der Fassade wird einerseits der Sd-Wert, der das Produkt aus dem μ -Wert und der dazugehörigen Schichtdicke ist, verwendet. Die Dicke entspricht der Stärke einer Bohrkernscheibe (= 0,0045 m). Laut den bestehenden Übereinkünften (KÜNZEL 1969) wird die Wasserdampfdiffusions-Leitfähigkeit folgendermaßen klassifiziert:

- hoch wasserdampfdurchlässig: Sd = 0,14 m
- mittel wasserdampfdurchlässig: Sd = 0,14 ... 1,4 m
- gering wasserdampfdurchlässig: Sd = 1,4 m

Das Zusammenwirken der kapillaren Wasseraufnahme und des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes wurde von Künzel für den Fall der Beregnung und Trocknung von Fassadenflächen in der sog. „Künzel Zahl“ zusammengefasst (KÜNZEL 1969). Die Künzel Zahl errechnet sich aus dem Sd-Wert und dem entsprechenden w-Wert. Diese Größe beschreibt das Wasseraufnahme- und Trocknungsverhalten des Materials. Je größer der w-Wert, umso kleiner muss die Wasserdampfdiffusions-Leitfähigkeit sein, damit das Gestein nach einem Regenereignis wieder vollständig austrocknen kann (KÜNZEL 1969). Diese Forderung lässt sich nach KÜNZEL (1969) in dem Produkt $w \cdot Sd = 0,1 \text{ kg/m}\cdot\text{h}^{-0,5}$ ausdrücken.

8.3.3.1 Ergebnisse

8.3.3.1.1 Regensburger Grünsandstein

Die folgende Abbildung stellt die Entwicklung des Sd-Wertes (8.28_a) und der Künzel Zahl (8.28_b) in Folge der Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade dar.

Die erhobenen Sd-Werte (8.28_a) des altbehandelten Zustands zeigen erneut eine sehr gute Korrelation zu den Porositätswerten. Je größer die Porosität ist, umso geringer ist demnach der Sd-Wert, was mit einer erhöhten Wasserdampfdurchlässigkeit einhergeht. Im Vergleich zum unbehandelten, unverwitterten Material weist der Zustand, der im Jahr 2001 bestimmt wurde (altbehandelt), eine etwas verminderte Wasserdampfdiffusions-Leitfähigkeit auf.

Abgesehen von Funcosil H wurden die anderen Schutzmittel lediglich in verdünnt/unverdünnt und nachträglich hydrophobiert bzw. nicht hydrophobiert unterschieden. Dabei fällt auf, dass eine verdünnte Applikation ohne nachfolgende Hydrophobierung vorteilhaftere Auswirkungen auf die

Wasserdampfleitfähigkeit besitzt als eine vergleichbare unverdünnte Behandlung. Wie bereits bei der Auswertung der μ -Werte festgestellt wurde, zieht die Behandlung der Varietät IV mit Funcosil H einen hohen Wasserdampfdiffusions-Widerstand nach sich. Gleiches ist auch im Diagramm der Sd-Werte zu erkennen, worin der μ -Wert mit einfließt. Diese Varietät verfügt, wie schon mehrmals darauf hingewiesen, über Bereich wechselnder Porosität und Bioklastengehalte. Eventuell ist diese Heterogenität für den ansonsten schwer zu erklärenden Anstieg verantwortlich.

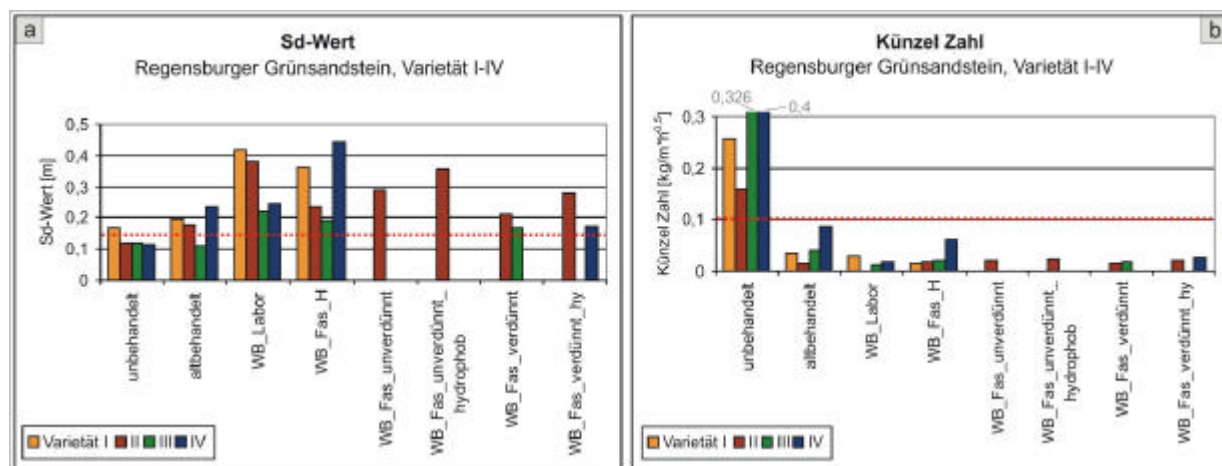


Abb. 8.28 (a-b): a) Wasserdampfdiffusions-Leitfähigkeit (Sd-Wert) und b) Künzel Zahl, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV.

Die Ergebnisse der Wiederbehandlung liegen zum Teil deutlich unterhalb des Sd-Wertes von 0,35 m. Demnach befinden sich alle Varietäten nach der Wiederbehandlung im oberen mittel- bis sogar an der Grenze zum hoch-wasserdampfdurchlässigen Bereich.

Da bei den Varietäten des Regensburger Grünsandsteins durch die Wiederbehandlung die ohnehin recht geringen Wasseraufnahmewerte noch deutlich weiter gesenkt werden konnten, ergibt sich laut der Künzel Zahl (8.28_b) für die Fassade folgende Konsequenz: Abgesehen vom unbehandelten Material, das durchaus der Gefahr einer permanenten Feuchteakkumulation ausgesetzt wäre, liegen die Künzel Zahlen aller Kategorien zum Teil überdeutlich unterhalb des empfohlenen Richtwerts von 0,1 kg/m·h^{-0.5}.

Die Betrachtung der erhöhten μ -Werte im Vergleich zu den entsprechenden w-Werten sollte aber nur in gewissen Grenzen zur Bewertung einer erfolgreichen Maßnahme hinzugezogen werden. Da die Wasseraufnahmewerte durch die erneute Konservierung wesentlich gesenkt werden konnten, wurde die Problematik der zum Teil drastisch angestiegenen μ -Werte in gewisser Weise kompensiert. Allerdings werden bei der Berechnung der Künzel Zahl nicht die natürlichen Gegebenheiten einer Fassade, deren Quader über ausgedehnte Fugennetze miteinander verbunden sind, berücksichtigt. Fugensysteme sind Risikobereiche für eindringende Feuchtigkeit. Ein Quader kann an der Frontseite sehr gute wasserabweisende Eigenschaften besitzen, gelingt es jedoch der Feuchtigkeit, über einen Defekt des Fugensystems diesen Bereich zu umlaufen, so ist eine Gefährdung des Materials gegeben. Der Baustein nimmt zwar auf diesem Wege Feuchtigkeit auf, ist jedoch aufgrund stark erhöhter μ -Werte eventuell nicht in der Lage, sie über die Fassade wieder an die Umgebung abzugeben.

8.3.3.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleierth

Mit Bezug auf die unter 8.3.3 dargelegten Übereinkünften (KÜNZEL 1969) kann anhand der Ergebnisse in Abbildung 8.29_a ausgesagt werden, dass die Wasserdampfleitfähigkeit des original verbauten Gesteins aus Diebach/Gailnau generell dem eines hochdurchlässigen Materials entspricht, dessen obere Grenze durch die rote Linie markiert wird (Abb. 8.29_a). Die Proben des Austauschmaterials liegen am Übergang zwischen hoch wasserdampfdurchlässig und mittel dampfdurchlässig. Für beide Gesteinsvarietäten dürfte die Austrocknung der Fassade nach einem Regenereignis dementsprechend nicht behindert werden.

In die Künzel Zahl (siehe Abb. 8.29_b) fließt neben dem Sd-Wert der entsprechende w-Wert mit ein. Diese Größen beschreiben das Wasseraufnahme- und Trocknungsverhalten. Je größer der w-Wert ist,

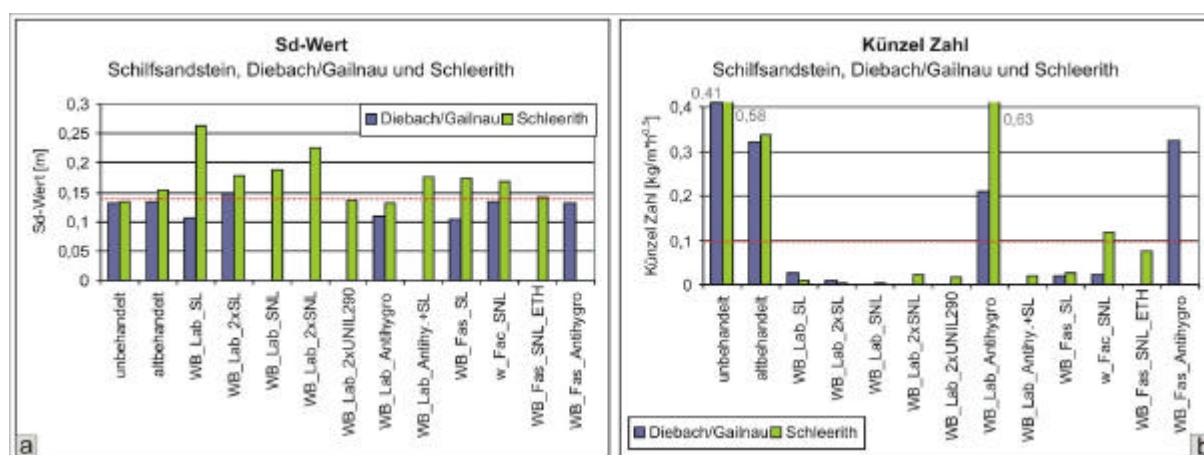


Abb. 8.29 (a-b): a) Wasserdampfdiffusions-Leitfähigkeit (Sd-Wert) und b) Künzel Zahl, Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleierth.

desto kleiner muss Sd sein, damit das Gestein nach dem Regenereignis wieder vollständig austrocknen kann. Wie bereits erwähnt, lässt sich diese Forderung nach Künzel in dem Produkt $w \cdot Sd = 0,1 \text{ kg/m} \cdot \text{h}^{-0,5}$ ausdrücken. Da beide Schilfsandsteinvarietäten eine relativ hohe kapillare Wasseraufnahme besitzen, liegen die Künzel Zahlen des unbehandelten, unverwitterten und des altbehandelten Materials eindeutig oberhalb des Grenzwertes von $0,1 \text{ kg/m} \cdot \text{h}^{-0,5}$, markiert durch die rote Linie (Abb. 8.29_b). Da die Wiederbehandlung stets eine deutliche Senkung der w-Werte zur Folge hatten und die μ -Werte des Schilfsandsteins im Bereich der ersten Bohrkernscheibe (0-0,5 cm) nicht allzu stark angestiegen sind, erscheint die Künzel Zahl für beide Varietäten in Folge der erneuten Konservierung auffallend reduziert. Der angestrebte Wert von $0,1 \text{ kg/m} \cdot \text{h}^{-0,5}$ wird erreicht bzw. deutlich unterschritten. Neben der Behandlung mit Funcosil Antihydro, wodurch die für die Austrocknung wichtige Wasserdampfdiffusion einschränkt, aber die kapillare Wasseraufnahme nicht reduziert wurde, fällt des Weiteren das Resultat des auf Austauschmaterial angewendeten Funcosil SNL (unverdünnt und verdünnt) aus dem Rahmen der ansonsten sehr niedrigen Künzel Zahlen heraus.

Da in Folge der meisten Wiederbehandlungstests die Wasseraufnahme deutlich abgesenkt wurde, können somit in gewissem Rahmen die erhöhten μ -Werte kompensiert werden. Abgesehen von der bereits oben erwähnten Applikation von Funcosil SNL auf Austauschmaterial und die Verwendung von Funcosil Antihydro, die nicht auf die Reduzierung der Wasseraufnahme ausgerichtet ist, besteht entsprechend den Ergebnissen keine Gefahr einer dauerfeuchten Fassade.

Wie zuvor in den Erläuterungen zur Wasserdampfdiffusions-Leitfähigkeit des Regensburger Grünsandsteins näher erläutert, sollte die Betrachtung der erhöhten μ -Werte im Vergleich zu den entsprechenden w -Werten nur in gewissen Grenzen zur Bewertung einer erfolgreichen Maßnahme hinzugezogen werden, da bei der Berechnung der Künzel Zahl der Zustand des angrenzenden Fugensystems unberücksichtigt bleibt. Fugensysteme sind Risikobereiche für eindringende Feuchtigkeit. Der Baustein kann auf diesem Wege Feuchtigkeit aufnehmen, ist aber aufgrund stark erhöhter μ -Werte eventuell nicht in der Lage, sie über die Fassade wieder an die Umgebung abzugeben.

8.3.4 Hygrische Dilatation

Die hygrische Dehnung wird entscheidend von der Anzahl an Kornkontaktstellen beeinflusst, da der Abstand aller Körner durch die Anlagerung von Wasserfilmen vergrößert werden kann. Bei feinkörnigen, tonhaltigen Sandsteinen, wie dem Schilfsandstein von Schloss Schillingsfürst, ist die Kontaktstellenhäufigkeit, die sich in der inneren Oberfläche ausdrückt (siehe Kapitel 8.2.4), besonders hoch. Eine größere innere Oberfläche ist mit einer gesteigerten hygrischen Dilatation verbunden (SCHUH 1987). Bei höherem Tongehalt nehmen die innere Oberfläche und die Anzahl der Tonmineralkontakte zu. Die Summe der durch Wassereinlagerung bedingten Quellung ergibt die Gesamtlängenänderung. Laut SNETHLAGE ET AL. (1995) sind hauptsächlich die Mikroporen die von der Dilatation betroffenen Porengröße ($< 100\text{nm}$). Diese Porengrößen werden allerdings durch herkömmliche Schutzmittel nicht erreicht, so dass diese nicht in der Lage sind, tatsächlich die hygrische Bewegung des Gefüges und die daraus resultierenden Schäden abzuwenden. Die Wirkung der quellmindernden Tenside (Funcosil Antihygro) erstreckt sich aber gerade in diesen Mikroporenbereich.

Der karbonatisch gebundene Regensburger Grünsandstein, der außer den als Körnern auftretenden Glaukoniten nur untergeordnet quellfähige Minerale besitzt, verfügt über eine relativ geringe Quellneigung. Bei den untersuchten Varietäten schwanken die Glaukonitgehalte zwischen 8-10 % und 15-20 % des gesamten Mineralbestandes. Die einzelnen kugeligen Aggregate sind von der karbonatischen Matrix umgeben. Diese starre Umklammerung unterbindet eine Weiterleitung von aus der Wasseraufnahme resultierenden Quellvorgängen an das Gefüge. Es kommt lediglich zu lokal begrenzten Gefügeveränderungen (SCHUH 1987). Allerdings quillt die mit Gips angereicherte Oberfläche des Regensburger Grünsandsteins bei der hygroskopischen und kapillaren Wasseraufnahme um den 2 bis 10fachen Betrag gegenüber dem nicht kontaminierten Gestein (SCHUH 1987). Wahrscheinlich kommt es durch die Gipskristalle im Gefüge zu einer erleichterten Übertragung der Dehnung. Die ansonsten bestehenden Freiräume sind demnach von den Gipskristallen blockiert (SNETHLAGE ET AL 1995).

Methodik

Die Messungen sind entsprechend der Prüfvorschrift DIN 52450 durchgeführt worden.

Dieser Untersuchungsmethode wurden sowohl die vordersten 5 Scheiben eines jeden Bohrkerns, die jeweiligen Behandlungsstadien repräsentierend, als auch Proben aus größerer Tiefe unbehandelt/unverwittert) unterzogen. Das Prinzip der Messung beruht auf der Ermittlung der Dehnung des Materials bei Unter-Wasserlagerung. Die hygrische Dilatation, aufgetragen als Funktion

der Zeit, nähert sich asymptotisch einem Maximalwert an. Da normalerweise bei Sandsteinen 98 % der Quellung nach 48 Stunden erreicht sind, wird dieser Zeitpunkt generell als Versuchsende gewählt und der 48-Stunden-Wert als Endwert zur Berechnung der Feuchtedehnung verwendet. Dieser Maximalwert der Quellung wird zur aufgenommen Wassermenge ins Verhältnis gesetzt. Man erhält die hygri-sche Dehnung in $\mu\text{m/m}$.

Die umfangreiche Datenerhebung war gerade mit Hinblick auf die Schwankungsbreite der hygri-schen Dilatation hilfreich, um die Ergebnisse der jeweiligen Schutzmittelapplikationen tatsächlich richtig einzuschätzen. Beide untersuchte Lithotypen zeigen, mit wenigen Ausnahmen, bereits innerhalb eines Bohrkerns eine recht hohe Heterogenität, hervorgerufen durch unterschiedliche Bioklasten- oder Tongehalte (siehe Kapitel 6.4), so dass ein Bezug auf wenige Einzeldaten ohne weiteres zu Fehleinschätzungen führen könnte.

Die Messungen wurden sowohl senkrecht als auch parallel zur sedimentären Schichtung der Gesteine durchgeführt. Da die Quellneigung in beiden Richtungen, gerade bei tonreichem Material, stark voneinander abweichen kann, verhindert eine konsequente Beachtung dieser genetischen Gegebenheiten ebenfalls eine Fehlinterpretation der Resultate. Sowohl für den Regensburger Grünsandstein als auch für den Schilfsandstein erhält man die größten Dehnungsbeträge senkrecht zur Schichtung des Gesteins.

Wie bereits dargelegt, konnte festgestellt werden, dass einige Quader gegen das Lager eingebaut sind, d.h. die gewonnenen Bohrkernscheiben repräsentieren nur eine Schicht (siehe Abb. 7.1). Anderenfalls werden von einem Bohrkern - in Abhängigkeit von der Schichtdicke - mehrere Lagen erfasst. In diesen Einzelfällen werden nur die Ergebnisse des jeweiligen Quaders (altbehandelt, WB-Labor und WB-Fassade) miteinander verglichen. Sie fließen nicht in eine für die jeweilige repräsentative Gesamtdarstellung der entsprechenden Gesteinsvarietät mit ein, um im gegenseitigen Vergleich Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Die Ergebnisse der hygri-schen Dilatation konnten auch herangezogen werden, die Eindringtiefe des jeweiligen Schutzmittels abzuschätzen, worauf in den einzelnen Diagrammen gesondert hingewiesen wird.

Im Folgenden werden den unterschiedlichen applizierten Substanzen die jeweiligen Resultate bezüglich der hygri-schen Dilatation zugeordnet.

8.3.4.1 Ergebnisse

8.3.4.1.1 Regensburger Grünsandstein

Die Kennwerte der unbehandelten und unverwitterten Grünsandsteinvarietäten, die eine deutliche Staffelung von niedrigeren Werten für die Varietäten I und II und entsprechend höheren für Varietät III und IV anzeigen, erlauben eine Zuordnung des Gesteins in die Kategorie nicht quellender Materialien. In Folge der Exposition der Bausteine und einer damit verbunden Schadstoffakkumulation (Sulfat) bzw. durch das Einbringen diverser Schutzmittel, kommt es zum Teil zu einem deutlichen Anstieg der Quellneigung der Varietäten. Verschiedentlich kann jedoch durch die Behandlung der Fassade eine Minderung der hygri-schen Dilatation bewirkt werden.

Funcosil OH und Funcosil H

An allen Varietäten des an der Alten Pinakothek verbauten Regensburger Grünsandsteins ist die Wirkung des Festigers Funcosil OH, bei verdünnter und unverdünnter Applikation, untersucht worden.

Auf die Musterflächen an der Fassade wurde des Weiteren Funcosil H, das sowohl hydrophobierend als auch festigend wirkt, aufgebracht.

Die folgende Abbildung (8.30_a-c) zeigt die Entwicklung der hygrischen Dilatation und dem entsprechenden Wassergehalt nach 48-stündiger Unterwasserlagerung in Folge der Wiederbehandlung der Varietäten I-IV.

In 8.30_a sind Untersuchungen zweier verschiedener Quader der Varietät I zusammengefasst. Die Kennwerte des jeweils altbehandelten Materials verhalten sich unterschiedlich bezüglich dem unbehandelten, unverwitterten Wert, der durch den semitransparenten grauen Balken wiedergegeben wird.

Während die einen nahe dem unbehandelten Material liegen oder mit noch niedrigeren Werten eindeutig ein nicht quellendes Materialien repräsentieren, zeigt der altbehandelte Zustand des anderen Quaders in den vorderen 10 mm einen enormen Anstieg der Dilatation an. Diese Beobachtung lässt sich sehr gut mit den Ergebnissen der Salzuntersuchungen korrelieren, die für diesen Bereich eine sehr hohe, die Belastungsgrenze überschreitende, Sulfatkonzentration anzeigt (siehe Abb. 8.81_a). In diesem Fall trifft das oben beschriebene Phänomen der mit Gips angereicherten Fassadenoberfläche (erhöhter Sulfatgehalt) und dem daraus resultierenden Anstieg der Dilatation zu (SCHUH 1987). Der Unterschied beider Bausteine liegt zum einen darin, dass derjenige mit der stärkeren Quellneigung am nordwestlichen Kopfbau, an einer sehr exponierten Ecke verbaut ist, wohingegen der andere sich in die Musterfläche 0 eingliedert (siehe Abb. 7.3), die eher geschützt liegt. Zum anderen wurde der Quader an der Musterfläche 0 bereits vor der Wiederbehandlung zweimal konserviert. Es bleibt zu spekulieren, welches Merkmal Anlass für die extremen Unterschiede der Sulfatgehalte und damit der hygrischen Dilatation ist. Auf jeden Fall demonstrieren diese Differenzen erneut deutlich die Problematik der Konservierung eines Objektes, das aus mehr als nur einem Stein besteht.

Aus den Ergebnissen der Wiederbehandlung kristallisiert sich heraus, dass die Applikation von Funcosil OH gegenüber der alleinigen Behandlung mit Funcosil H von Vorteil ist. Die Festigung scheint das Gefüge in der Form zu stabilisieren, dass die Dehnung der sulfatbelasteten Quader effektiv unterbunden werden kann. Die entsprechende Behandlung an der Fassade mit Funcosil H resultierte in dem grünen Graphen, der einen identisch hohen Dilatationswert im Bereich der vordersten Bohrkernscheibe erzielte. An dem anderen Quader konnte im Zuge der Wiederbehandlung eine geringe Steigerung der Quellneigung beobachtet werden, die allerdings keine Probleme verursachen würde. Lediglich an einer Probe des Quaders führte die doppelte Applikation von Funcosil OH und nachfolgender Anwendung von Funcosil H erstaunlicherweise zu einer Zunahme auf ungefähr 600 $\mu\text{m}/\text{m}$. Diese Erhöhung und die enormen Dehnungsbeträge des sulfatbelasteten Quaders überschreiten eindeutig die empfohlene Richtlinie einer 20 %igen Steigerung gegenüber dem unbehandelten, unverwitterten Gestein (rot gepunktete Linie) und kann in genau diesen Fällen nicht empfohlen werden. Hier ist es angebracht, genauer zu differenzieren und eventuell vor der Wiederbehandlung der Fassade eine Entsalzung vorzunehmen, um günstigere Ergebnisse für die hygrische Dilatation zu erhalten.

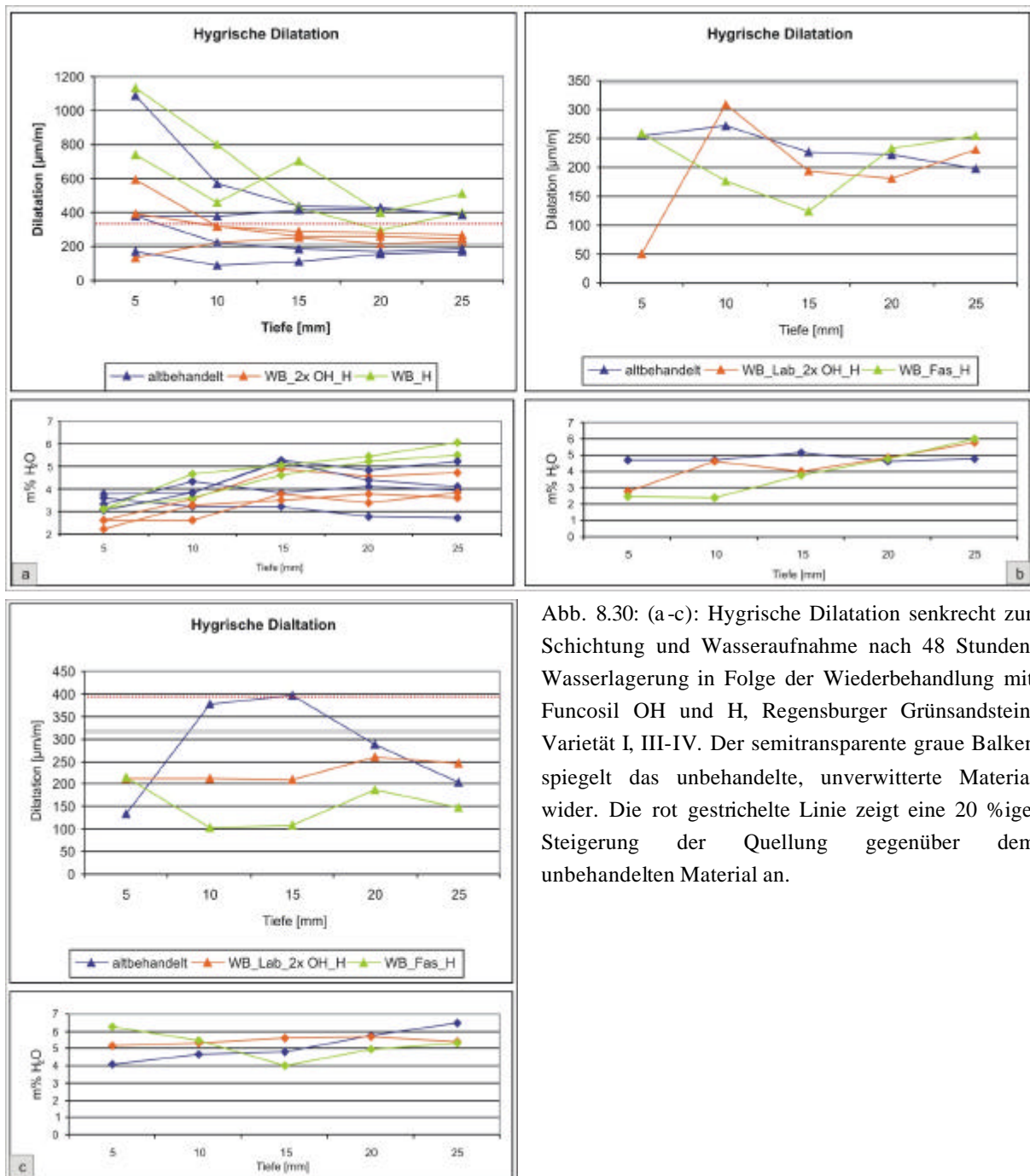


Abb. 8.30: (a-c): Hygrische Dilatation senkrecht zur Schichtung und Wasseraufnahme nach 48 Stunden Wasserlagerung in Folge der Wiederbehandlung mit Funcosil OH und H, Regensburger Grünsandstein, Varietät I, III-IV. Der semitransparente graue Balken spiegelt das unbehandelte, unverwitterte Material wider. Die rot gestrichelte Linie zeigt eine 20 %ige Steigerung der Quellung gegenüber dem unbehandelten Material an.

Die Wassergehalte konnten im Bereich der Eindringtiefe der Schutzmittel, die aus dem Verlauf der Graphen ungefähr bei 1 cm Tiefe angenommen werden kann, generell durch die Wiederbehandlung abgesenkt werden, wobei sich die doppelte Laborapplikation als vorteilhafter erwies.

Die folgende Abbildung (8.30_b) stellt die Ergebnisse der Wiederbehandlung an Varietät IV dar. Der Wert des unbehandelten, unverwitterten Materials liegt bei 350 µm/m und somit noch immer im Bereich eines nicht quellenden Materials. Die Dilatationsneigung des altbehandelten Zustands bleibt hinter dem unbehandelten Status zurück, was für eine vorhandene Effektivität der ursprünglichen Behandlung spricht. Die Glaukonitkörner werden demnach noch gut vom Wassereintrag abgeschirmt bzw. die Quellung kann über das gefestigte Gefüge nicht weiter getragen werden. Die Wiederbehandlung resultiert in einer Senkung der Quellung im Bereich der Eindringtiefe der Schutzmittel. Für Funcosil OH (2x), das eine enorme Absenkung erzielte, liegt die Eindringtiefe bei

ungefähr 10 mm und für Funcosil H, appliziert an der Fassade, bei 15 mm. Der Gesamtwassergehalt konnte in beiden Fällen deutlich gesenkt werden.

Die Untersuchungen an Varietät III (siehe Abb. 8.30_c) zeigten eine sehr interessante Entwicklung der hygrischen Dilatation im Tiefenprofil des altbehandelten Zustandes. Im vordersten Bereich der Fassade wurden sehr niedrige Dehnungsbeträge gemessen. 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ sind sogar für den Regensburger Grünsandstein als sehr gering einzustufen. Verfolgt man das Dehnungsverhalten in die Tiefe, so fällt eine deutliche erhöhte Quellneigung im Bereich von 0,5 und 2,0 cm Tiefe auf. Diese Erscheinung ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass, wie bereits beschrieben, im Porengefüge eingelagerte Gipskristalle für eine erleichterte Übertragung der Dehnung auf das Gefüge sorgen und somit die mit Gips angereicherte Zone der Fassade bei Wasseraufnahme um ein Vielfaches gegenüber dem nicht kontaminierten Gestein quillt (SCHUH 1987). Dieses Ergebnis ist sehr gut mit den Untersuchungen der Salzverteilung im Tiefenprofil der Fassade zu korrelieren (siehe Abb. 8.81_c). Die Auflösung dieser Messungen entsprechen zwar nicht genau denen der hygrischen Dilatation, dennoch kann die Aussage getroffen werden, dass die Sulfatkonzentration, die in diesem Fall den Gips anzeigt, in der Fassadenoberfläche eher gering ist und im Bereich des ersten und zweiten Zentimeters ein deutliches Sulfat-Maximum liegt. Die Sulfatkonzentrationen des altbehandelten Materials konnten nach der Wiederbehandlung an der Fassade in dieser Verteilung nicht mehr detektiert werden. Speziell im Bereich des ersten und zweiten Zentimeters wurden gegenüber dem altbehandelten Zustand stark reduzierte Sulfatgehalte ermittelt. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Graphen der hygrischen Dilatation nach den Wiederbehandlungen, so ist deutlich zu erkennen, dass das Dehnungsmaximum im Bereich zwischen dem ersten und ungefähr dem zweiten Zentimeter verschwunden ist. Gegenüber dem altbehandelten Zustand führten die Wiederbehandlungen insgesamt zu einem geringfügigen Anstieg der Quellung. Bezüglich des relativ hohen Wertes des unbehandelten und unverwitterten Materials ist davon auszugehen, dass die ursprünglich aufgebrauchte Konservierung im vorderen Bereich der Fassade noch relativ wirksam ist. Es ist erstaunlich, dass trotz hydrophobierender Wiederbehandlung weder im Labor noch an der Fassade eine Senkung des Wassergehalts nach 48stündiger Wasserlagerung erzielt wurde. Die Messungen zur kapillaren Wasseraufnahme bestätigten diesbezüglich jedoch eine erfolgreiche Maßnahme (siehe Kapitel 8.3.1.1.1). Eine denkbare Erklärung für dieses Phänomen wäre zum einen, dass eine hydrophobe Behandlung nicht gedacht ist, einem Druck entsprechend der Wassersäule der Versuchsanordnung über 48 Stunden standzuhalten und unter diesen speziellen Messbedingungen kein wasserabweisender Effekt detektiert werden kann. Eine weitere Möglichkeit, die allerdings mit Ergebnissen anderer Untersuchungen (z.B. μ -Wert-Bestimmung) nicht konform geht, wäre der ungünstige Umstand, dass lediglich die äußerste Schicht der Fassade hydrophobiert wurde und somit mit dem Karstensen Prüfröhrchen ein reduzierter w -Wert ermittelt werden konnte. Die Rückseite der entsprechenden Bohrkernscheibe wurde nach dieser Annahme nicht mehr von dem applizierten Schutzmittel erfasst, weshalb die Probe bei Unterwasserlagerung nicht vor eindringendem Wasser geschützt ist.

In diesem speziellen Beispiel erschien es schwierig, basierend auf dem Verlauf der Graphen, eine Aussage zur Eindringtiefe der applizierten Agenzien zu treffen. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Salzbestimmung, müsste mit speziellem Hinblick auf die Veränderungen des Sulfatgehalts der Einfluss erneut aufgebrauchter Schutzmittel bis in eine Tiefe von ungefähr anderthalb oder sogar zwei Zentimetern gereicht haben.

Fungosil OH, verdünnt

Der Bossenquader, dem die Bohrkern für die Untersuchungen in Abbildung 8.31_a zugrunde liegen, ist nicht schichtparallel in den Mauerverband eingefügt worden. Deshalb werden die Absolutwerte der Messungen, die trotzdem im normalen Dehnungsbereich des Regensburger Grünsandsteins angesiedelt sind, nicht in die Gegenüberstellung der Varietäten einfließen. Dennoch wird die Auswirkung der Wiederbehandlung relativ zum entsprechenden altbehandelten Zustand betrachtet.

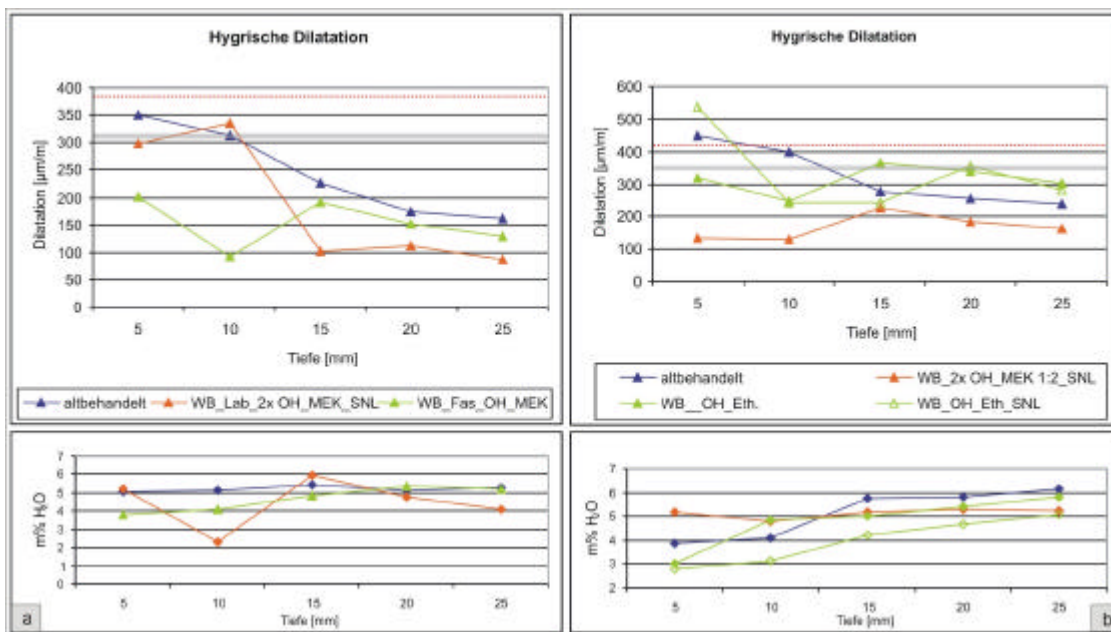


Abb. 8.31 (a-b): Hygrische Dilatation und Wasseraufnahme nach 48 Stunden Wasserlagerung in Folge der Wiederbehandlung mit verdünntem Fungosil OH und Fungosil SNL, Regensburger Grünsandstein, Varietät III (a) und IV (b). Der semitransparente graue Balken spiegelt das unbehandelte, unverwitterte Material wider. Die rot gestrichelte Linie zeigt eine 20 %ige Steigerung der Quellung gegenüber dem unbehandelten Material an.

Die Kennwerte des altbehandelten Materials liegen im Bereich der vordersten Bohrkernscheibe über dem des unbehandelten, unverwitterten Gesteins (semitransparenter grauer Balken). Die Verwendung von mit Methylethylketon (1:2) verdünntem Fungosil OH bei der Wiederbehandlung am Objekt zeigt gegenüber dem altbehandelten Zustand eine deutliche Absenkung der Quellneigung.

Die erneute Behandlung im Laborexperiment, die ebenfalls mit verdünntem Fungosil OH vorgenommen wurde, kann diesbezüglich als nur wenig erfolgreich eingestuft werden. Vermutlich könnte diese Diskrepanz an der nachträglich applizierten Hydrophobierung mit Fungosil SNL liegen. Die Sulfatkonzentration der altbehandelten Fassade und dementsprechend auch im Bohrkern, der für die Tests im Labor verwendet wurde, hat ihr Maximum im vordersten Zentimeter der Fassade, was erneut die gesteigerte Dehnungstendenz in diesem Bereich erklären würde. Allerdings zeigen die Salzbestimmungen im Anschluss an die Wiederbehandlung an der Fassade einen ähnlich hohen Sulfatgehalt, was mit dem Abfall der Kurve und somit dieser Erklärung nicht konform gehen würde. Die Wassergehalte konnten im Rahmen der erneuten Konservierung deutlich abgesenkt werden. Die Eindringtiefen der Schutzmittel werden entsprechend dem Verlauf der Graphen bei ungefähr einem bis höchstens anderthalb Zentimetern angenommen.

Abbildung 8.31_b zeigt das Resultat der Tests mit verdünntem Fungosil OH an Varietät IV. Der altbehandelte Zustand des Quaders übersteigt im Bereich zwischen 0-5 mm die Dilatation des unbehandelten, unverwitterten Gesteins deutlich. Auch in dem Fall hat diese Schutzmittelanwendung offensichtlich positive Auswirkungen auf die Dehnungstendenz des Gesteins beim Kontakt mit flüssigem Wasser. Die kombinierte Laborapplikation von verdünntem Fungosil OH (2x) und nachfolgender Hydrophobierung mittels Fungosil SNL erzielte in den vorderen 1-1,5 cm eine deutliche Reduktion der Dilatation gegenüber dem altbehandelten Zustand.

Tendenziell konnte die gleiche Wirkung auch durch die Wiederbehandlung an der Fassade mit dem verdünnten Festiger Fungosil OH erzielt werden. Auf einem anderen Teil dieser Musterfläche wurde im Nachhinein noch mit Fungosil SNL hydrophobiert, was die dehnungsmindernde Wirkung des verdünnten Fungosil OH offensichtlich aufzuheben scheint. Die Eindringtiefe der Schutzmittel reicht ungefähr bis in eine Tiefe von einem Zentimeter. Obgleich mit einer verdünnten Applikation der Schutzmittel versucht wurde, die Eindringtiefen zu optimieren, kann ein Erfolg dessen mittels dieser Methode nicht bestätigt werden.

Remmers 300E

Der dieser Untersuchung (siehe Abb. 8.32) zugrunde liegende Baustein ist bezüglich seiner sedimentären Schichtung nicht richtig in der Fassade verbaut (siehe Abb. 7.1). Die Kennwerte des unbehandelten, unverwitterten Gesteins entsprechen dennoch nahezu denen des ordentlich verbauten Quaders. Die Quellneigung des altbehandelten Materials bleibt hinter der des unbehandelten Materials zurück, was für eine gewisse Effektivität der ursprünglichen Behandlung spricht.

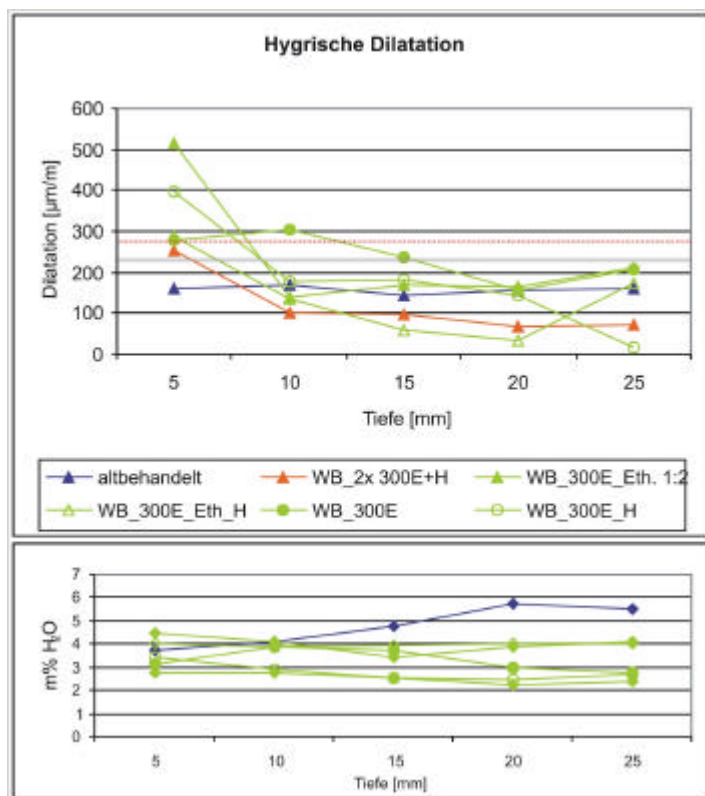


Abb. 8.32: Hygrische Dilatation und Wasseraufnahme nach 48 Stunden Wasserlagerung in Folge der Wiederbehandlung mit Remmers 300 E, verdünnt und unverdünnt, und Fungosil H, Regensburger Grünsandstein, Varietät H. Der semitransparente graue Balken spiegelt das unbehandelte, unverwitterte Material wider. Die rot gestrichelte Linie zeigt eine 20 %ige Steigerung der Quellung gegenüber dem unbehandelten Material an.

Im Laborexperiment wurde der entsprechende Bohrkern zunächst zweimal hintereinander mit Remmers 300 E und Funcosil H behandelt. An den Musterflächen ist sowohl die verdünnte als auch die unverdünnte Substanz appliziert worden.

Die Anwendung von verdünntem Remmers 300E mit nachfolgender Hydrophobierung sowie die alleinige Applikation von unverdünntem Remmers 300E führten zu einer weniger starken Dilatationstendenz des Materials. Einen extremeren Anstieg, die Richtlinie einer 20 %igen Steigerung deutlich überschreitend, bewirkte hingegen die alleinige Verwendung der verdünnten Substanz sowie die Kombination aus unverdünntem Remmers 300E und der nachfolgenden Hydrophobierung.

Bezüglich des Gehalts an Wasser in der Probe nach 48-stündiger Wasserlagerung konnten alle verwendeten Schutzmittelkombinationen gegenüber dem altbehandeltem Material eine Senkung bewirken. Sowohl die Wiederbehandlung im Labor (2x Remmers 300E+Funcosil H) als auch die einmalige Verwendung von Remmers 300E, gefolgt von der Hydrophobierung mit Funcosil H, waren besonders effektiv.

Obgleich es nicht durchgängig zu großen Steigerungen der Quellneigung in Folge der Wiederbehandlung mit verschiedenen 300E-Kombinationen kam, kann mit Hinblick auf mögliche Schwankungen eine erneute Behandlung des Regensburger Grünsandsteins mit Remmers 300E bzw. des verdünnten Schutzmittels nicht empfohlen werden. Da sich dieser elastifizierte Kieselsäureester sehr günstig auf die Festigkeitsparameter dieses Materials auswirkt, könnte in Anbetracht der dennoch vergleichsweise zumeist eher geringen Dehnungsbeträge in diesem Fall ein Kompromiss eingegangen werden.

8.3.4.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Bei der Auswahl der Schutzmittel, die für die Wiederbehandlung der Schilfsandsteinvarietäten verwendet werden sollten, war bereits bekannt, dass Hydrophobierungsmittel, in erster Linie solchen auf der Basis von Silanen oder oligomeren Siloxanen, den nachteiligen Effekt nach sich ziehen, die hygrische Dehnung nicht unwesentlich zu erhöhen. Dennoch entschied man sich für die Applikation von Funcosil SL und SNL, um deren Wirkung im Rahmen einer Wiederbehandlung zu überprüfen.

Funcosil SNL

Die Wiederbehandlungsversuche mit dem anhydrolisiertes Silan Funcosil SNL resultierten alle trotz deutlicher Reduktion der Wasseraufnahme in einer beträchtlichen Steigerung der hygrischen Quellneigung. MÖLLER ET AL. (1992) sehen die Ursachen dafür in einer mechanischen Verbrückung des Tonmineralverbandes durch die Polysiloxanfilme, die bei monomeren Produkten direkt im Bereich kleiner Poren durch Hydrolyse und Kondensation gebildet werden. Funcosil SNL ist zwar nicht monomer, wurde aber aufgrund seiner niedermolekularen (oligomer) Struktur ausgewählt, um optimal in das Material eindringen zu können.

In der folgenden Abbildung (8.33_a-d) sind alle Wiederbehandlungstests mit Funcosil SNL dargestellt, um aufzuzeigen, dass trotz gleichartiger Erstbehandlung und gleicher Gesteinsvarietät zum Teil deutliche Unterschiede im Effekt der Wiederbehandlung zu verzeichnen sind. Außer in Abbildung 8.33_d handelt es sich bei den untersuchten Proben um Schleerither Austauschmaterial, das im Rahmen der ersten Konservierungsmaßnahme mit UNIL 190S hydrophob eingestellt wurde.

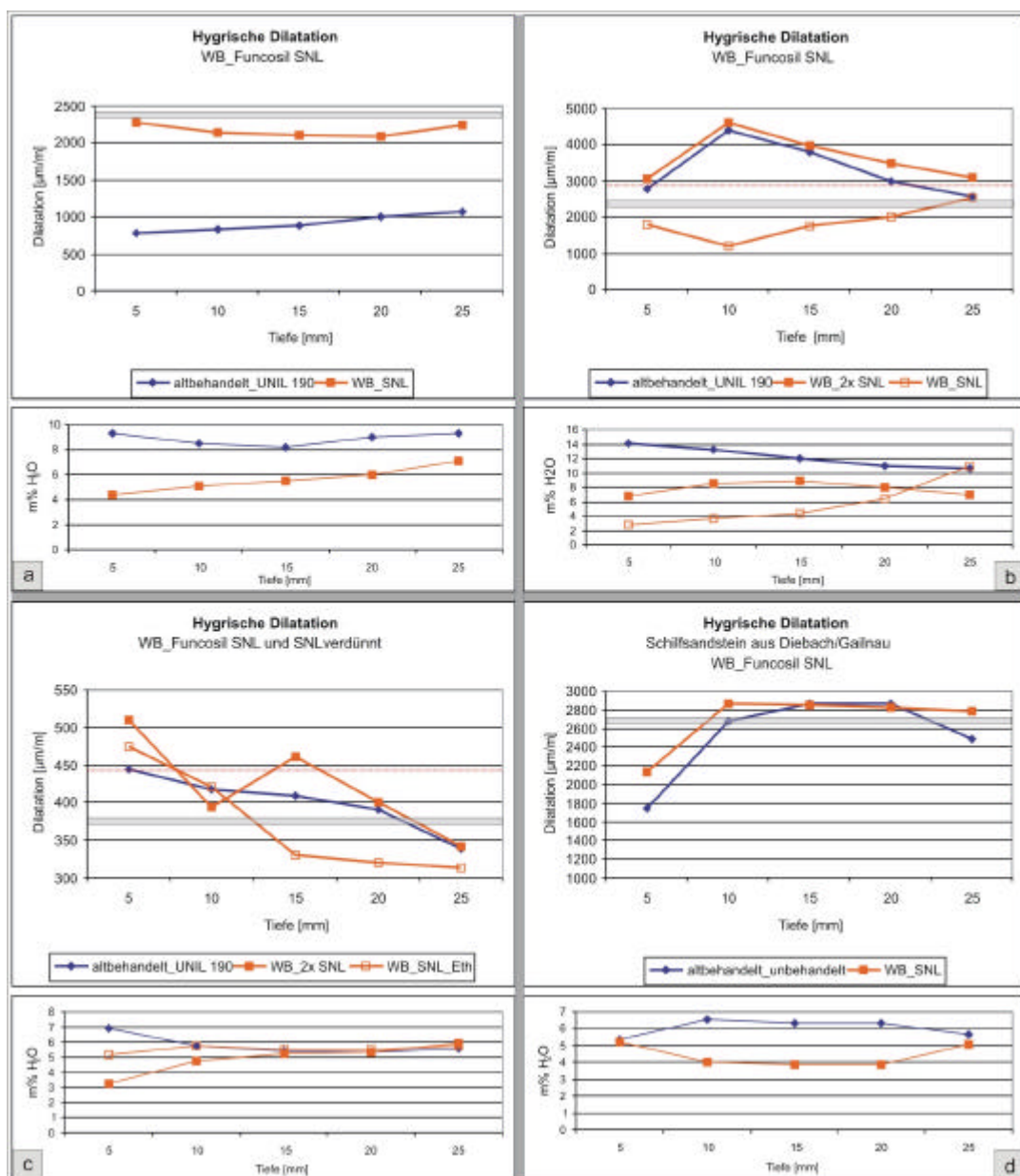


Abb. 8.33 (a-d): Tiefenprofile der hygrischen Dilatation senkrecht der Schichtung und Wasseraufnahme nach 48 h Unterwasserlagerung, Einfluss der Wiederbehandlung mit Funcosil SNL Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith. Der semitransparente graue Balken gibt das unbehandelte Material wieder. Die empfohlene Richtlinie einer 20 % Steigerung gegenüber dem unbehandelten Gestein ist durch die rot gestrichelte Linie markiert.

In Abbildung 8.33_a ist zu erkennen, dass der Zustand des altbehandelten Materials noch eine zufrieden stellende Quellneigung anzeigt. Gegenüber dem unbehandelten Gestein (grauer Balken), dessen Kennwert aus einer Mittelwertbildung aller Messungen im Bereich zwischen 5-5,5 cm stammt, ist eine Minimierung der hygrischen Dilatation festzustellen. Die Wiederbehandlung mit Funcosil SNL steigert die Quellneigung ungefähr um 100 %, dennoch wird damit erst das Niveau des unbehandelten Materials erreicht. Entsprechend der Richtlinien für eine akzeptable Steigerung der Dilatation sind 20 % (rot gestrichelte Linie) gegenüber dem unbehandelten Gestein zulässig (siehe Tab.3.1_b). Abgesehen von den Reglements wird hierin jedoch sehr deutlich, inwieweit es durch die Applikation von Funcosil SNL zu einer Steigerung der Quellneigung des Materials kommen kann. Die Wasseraufnahme der Probe konnte durch diese erneute Behandlung deutlich reduziert werden.

Die Abbildung 8.33_b versteht sich als ein Extrembeispiel, in welchem Maße es an Proben desselben Quaders in Folge der Applikation des identischen Schutzmittels zu gegensätzlichen Wirkungen kommen kann. Die hygrische Dilatation des altbehandelten Materials liegt weit über der des unbehandelten Gesteins. Das Maximum liegt im Bereich der zweiten Bohrkernscheibe, was sehr gut mit der hohen Sulfatkonzentration in dieser Zone korreliert. Durch die Wiederbehandlung im Labor, wo die Probe zweimal in Folge mit Funcosil SNL getränkt wurde, kommt es zu einer minimalen Steigerung der Dilatation, die zum Teil sogar im Bereich des Messfehlers liegt. Erstaunlich ist der nahezu identische Verlauf beider Kurven entlang des Tiefenprofils. Die einmalige Behandlung der Musterfläche, wiedergegeben durch den Graphen mit den nicht gefüllten Symbolen, führt entgegen dazu zu einer deutlichen Reduzierung der Quellneigung, die ihr Maximum ebenfalls im Bereich der 2. Bohrkernscheibe besitzt. Die Korrelation mit den hohen Sulfatgehalten, die in diesem Fall auf das Vorhandensein von Gips hindeuten, funktioniert nicht.

Entsprechend dem Verlauf der Graphen im darunter stehenden Diagramm der Wassergehalte, vermochte eine einmalige Applikation von Funcosil SNL gegenüber der doppelten Behandlung eine noch intensivere Reduzierung der Wasseraufnahme. Mit Hinblick auf die Entwicklung des Wassergehaltes im Tiefenprofil kann eine Wirkungstiefe der Wiederbehandlung zwischen 2-2,5 cm angenommen werden.

Für das folgende Beispiel in Abbildung 8.33_c wurde nicht der Mittelwert des unbehandelten Materials, sondern genau der des entsprechenden Quaders zugrunde gelegt. Im Vergleich zu den beiden zuvor erläuterten Darstellungen fällt zunächst auf, dass die hygrische Quellung dieses Quaders deutlich hinter den Werten der anderen zurück bleibt. Auch dieses ist wieder ein Indiz für die zum Teil enorme Schwankungsbreite des Schilfsandsteins. In Folge der Wiederbehandlung kam es zu vergleichsweise mäßigen Steigerungen der Dilatation (außer in Abb. 8.33_a), dennoch wird der Richtwert einer 20 %igen Steigerung gegenüber dem unbehandelten Gestein z.T. übertroffen, was die Empfehlung von Funcosil SNL bezüglich der Optimierung des Dilatationsverhaltens verwehrt. Obgleich beide Behandlungen in einer Überschreitung des Richtwertes resultieren, so wird in diesem Fall sehr gut der Sinn einer, der Applikation an der Fassade, vorausgeschickten Laboruntersuchung deutlich. Im Labortest erwies sich die Behandlung mit Funcosil SNL als relativ stark quellbegünstigend. Daraufhin wurde für die Wiederbehandlung an der Fassade die verdünnte Substanz verwendet, mit der Konsequenz einer in geringerem Maß gesteigerten hygrischen Dilatation.

Die Kurven der entsprechenden Wassergehalte, die in diesem Fall auf eine Eindringtiefe von ungefähr 1 cm hindeuten, zeigen eine Absenkung der Wasseraufnahme in Folge der Wiederbehandlung an.

In Abbildung 8.33_d wird das Ergebnis der Wiederbehandlung mit Funcosil SNL auf einem ursprünglich unbehandelt verbliebenen Originalgestein dargestellt. Obgleich bislang kein Schutzmittel appliziert wurde, bleibt die Quellneigung in der vorderen Zone der Fassade erstaunlicherweise hinter der des unbehandelten Materials deutlich zurück. Die Wiederbehandlung führt zu einer relativ geringen Anhebung der Dilatation und bleibt damit unterhalb der empfohlenen Grenze.

Zusammenfassend betrachtet, kann mit Hinblick auf den negativen Einfluss auf die hygrische Dilatation eine Wiederbehandlung mit Funcosil SNL nicht empfohlen werden. Obgleich in einigen Fällen die Richtlinie einer 20 %igen Steigerung in Folge der Behandlung nicht überschritten wird, so zeigt diese detaillierte Darstellung der Ergebnisse die Diversität des Materials und damit des Effektes der Behandlung. Mit Hinsicht auf ein Sanierungskonzept für die gesamte Fassade ist von einer alleinigen Behandlung mit Funcosil SNL eindeutig abzuraten.

Funcosil SNL, verdünnt

Wie bereits zu Abbildung 8.33_c näher erläutert, wirkt sich die verdünnte Applikation von Funcosil SNL günstiger auf die Entwicklung des Quellverhaltens der jeweiligen Probe aus. In Abbildung 8.34 wird ein weiterer Fall einer derartigen Wiederbehandlung vorgestellt. Bis in eine Tiefe von ungefähr 10 mm liegt die Quellneigung des altbehandelten Materials deutlich über der des unbehandelten Materials. Die ursprüngliche Konservierung (UNIL 190S) zeigt bezüglich des Quellverhaltens keine Effektivität mehr. Im Bereich der angenommenen Eindringtiefe des verdünnten Funcosil SNL, die entsprechend dem Verlauf der Graphen des Wassergehaltes zwischen 2-2,5 cm liegen müsste, bewirkt das Schutzmittel nahezu keinerlei Veränderungen der hygrischen Dilatation.

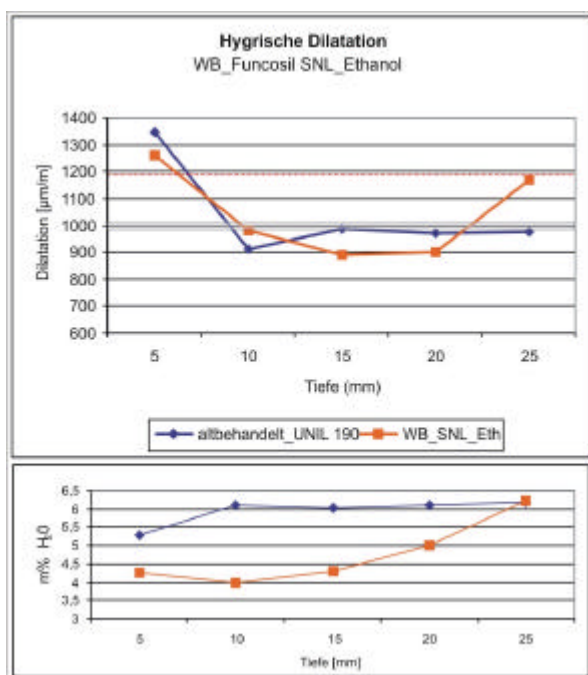


Abb. 8.34: Tiefenprofile der hygrischen Dilatation senkrecht der Schichtung und Wasseraufnahme nach 48 h Unterwasserlagerung, Einfluss der Wiederbehandlung mit verdünntem Funcosil SNL. Sandstein aus Schleierith. Ursprüngliche Konservierung – UNIL 190S. Der semitransparente graue Balken gibt das unbehandelte Material wieder. Die empfohlene Richtlinie einer 20 % Steigerung gegenüber dem unbehandelten Gestein ist durch die rot gestrichelte Linie markiert.

Die Maßnahme ist demnach als erfolgreich einzustufen, da die angestrebte Senkung der Wasseraufnahme gelungen ist, ohne die Quellneigung des Materials zu verstärken. Zwar handelt es sich dabei um einen Kompromiss, da die Dilatation ebenfalls zu niedrigeren Werten verschoben werden sollte, doch im Vergleich mit anderen hydrophobierenden Agenzien, ist das Ergebnis positiv zu bewerten.

Funcosil SL

Auch bei diesem Schutzmittel handelt es sich um ein niedermolekulares Alkylalkoxysiloxan, das aufgrund seiner Struktur eine sehr gute Penetrationsfähigkeit besitzen sollte.

In Abbildung 8.35 wird das Ergebnis der Wiederbehandlung mit Funcosil SL dargestellt. Der Status des altbehandelten Materials stimmt nahezu mit dem des unbehandelten (semitransparenter grauer Balken) überein. Wie sich auch aus dem hohen Wassergehalt am Ende der 48-stündigen Unterwasserlagerung ablesen lässt, ist die ursprüngliche Konservierung nicht mehr wirksam. Durch die Wiederbehandlung mit Funcosil SL konnte zum einen der Wassergehalt deutlich gesenkt werden. Zum anderen verblieb die Quellneigung des Austauschmaterials auf dem Ausgangsniveau. Die Eindringtiefe kann aufgrund des Verlaufes der Graphen des Wassergehaltes auf 10 mm oder - bei der doppelten Applikation - eventuell sogar bis 25 mm angegeben werden.

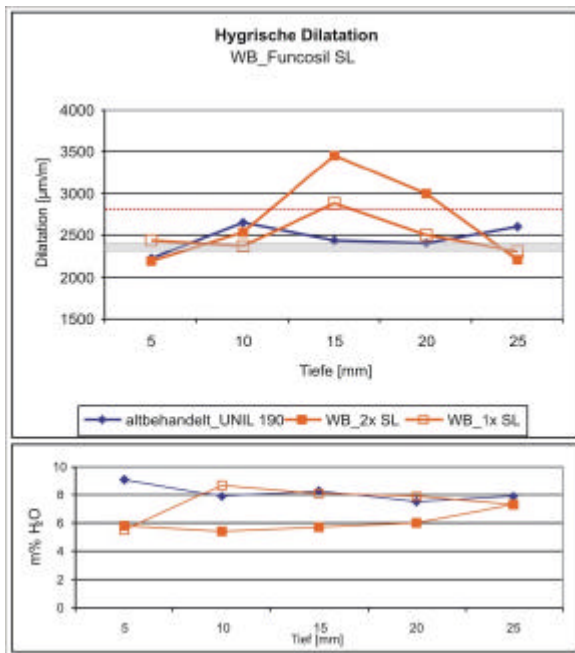


Abb. 8.35: Tiefenprofile der hygrischen Dilatation senkrecht der Schichtung und Wasseraufnahme nach 48 h Unterwasserlagerung, Einfluss der Wiederbehandlung mit Funcosil SL. Sandstein aus Schleerith. Ursprüngliche Konservierung – UNIL 190S. Der semitransparente graue Balken gibt das unbehandelt Material wieder. Die empfohlene Richtlinie einer 20 % Steigerung gegenüber dem unbehandelten Gestein ist durch die rot gestrichelte Linie markiert.

Wahrscheinlicher ist die Tiefe von 10 mm. Die drei Bohrkern, die den Messkurven zugrunde liegen, stammen zwar von demselben Quader, wie allerdings an den stark voneinander abweichenden Dilatationskurven zu erkennen ist, repräsentieren sie Bereiche unterschiedlicher Tongehalte. Aus diesem Grund ist die Überschreitung des Richtwertes einer 20 %igen Steigerung der Dilatation im Bereich zwischen 15 und 20 mm eher unbedenklich. Mit Hinblick auf dieses Ergebnis kann die Wiederbehandlung mit Funcosil SL empfohlen werden.

UNIL 290

Abbildung 8.36 zeigt das Resultat einer Wiederbehandlung mit UNIL 290. Obgleich es sich bei diesem Material um die gleiche Varietät wie in den oben beschriebenen (ausgenommen 8.33_d) Fällen handelt und alle die gleiche primäre Konservierung erfahren haben, so zeigt sich in diesem Beispiel,

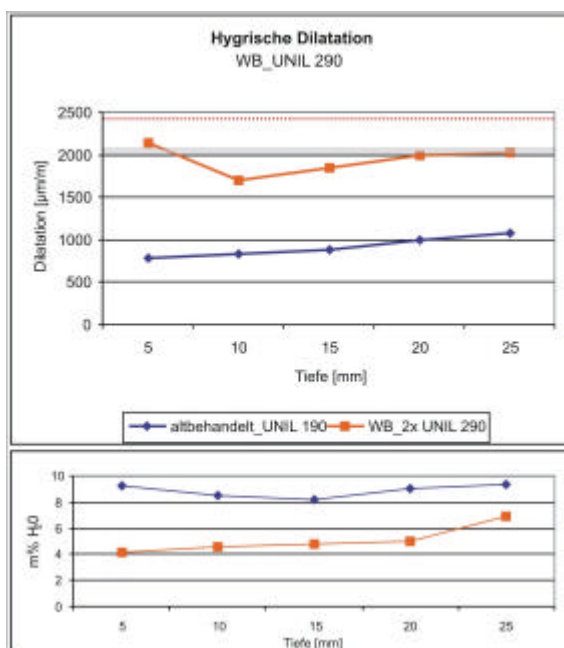


Abb. 8.36: Tiefenprofile der hygrischen Dilatation senkrecht der Schichtung und Wasseraufnahme nach 48 h Unterwasserlagerung, Einfluss der Wiederbehandlung mit UNIL 290. Sandstein aus Schleerith. Der semitransparente graue Balken gibt das unbehandelt Material wieder. Die empfohlene Richtlinie einer 20 % Steigerung gegenüber dem unbehandelten Gestein ist durch die rot gestrichelte Linie markiert.

dass der altbehandelte Zustand deutlich unter der Quellneigung des unbehandelten Materials (semitransparenter grauer Balken) liegt. Die Wassergehalte nach 48-stündiger Wasserlagerung zeigen jedoch keine effektive Schutzwirkung der ursprünglich applizierten Substanz mehr an.

Die Wiederbehandlung mit UNIL 290 geht einerseits mit einer deutlich reduzierten Wasseraufnahme einher. Andererseits steigt die Dilatationsneigung der untersuchten Probe um nahezu 100 % gegenüber dem Ausgangszustand. Damit wird zwar gerade das Niveau des unbehandelten Materials erreicht und die Ergebnisse liegen demzufolge unterhalb der empfohlenen Richtlinie (rot gepunktete Linie), dennoch ist eine derartig sprunghafte Entwicklung der hygrischen Dilatation skeptisch zu betrachten. Es sollten auf jeden Fall weitere Tests mit UNIL 290 durchgeführt werden, um ein eventuelles Risiko umfassend abschätzen zu können.

Funcosil Antihygro

In der Abbildung 8.37 sind Messungen zur hygrischen Dilatation an vier Bohrkernen unterschiedlicher Bausteine aus Originalmaterial einander gegenübergestellt. Entweder sie wurden im Rahmen der ersten Konservierung oder der Wiederbehandlung mit einem Quellminderer behandelt.

In Abbildung 8.37_a verblieb das Material während der ersten Konservierung unbehandelt, was sich an den hohen Dehnungsbeträgen nachvollziehen lässt. Es entspricht dem unbehandelten, unverwitterten Gestein, das durch den semitransparenten grauen Balken wiedergegeben wird. Sowohl die Wiederbehandlung im Labor als auch an der Fassade mit Funcosil Antihygro (1x) konnte dieses Ausmaß an Quellung unterbinden, wobei sich die günstigeren Applikationsbedingungen im Labor in Form einer noch stärkeren Blockierung des Dilatationsvermögens äußert (66 %ige Senkung). Die Gesamtwassergehalte vor und nach der Wiederbehandlung entsprechen erwartungsgemäß einander, da der Quellminderer keine wasserabweisende Funktion besitzt. Der Verlauf der Längendehnung im Tiefenprofil zeigt, dass von einer Mindesteindringtiefe von 1 cm ausgegangen werden kann.

Das Material in Abbildung 8.37_b wurde bei der ersten Konservierung zu Beginn der 1990er Jahre mit der Mikroemulsion (mit Haftvermittler) PTEXS 66a + GF 91 behandelt. Die im Jahr 2001 ermittelten Werte der hygrischen Dilatation sind geringer als die des unbehandelt verbliebenen Gesteins (8.37_a) sowie des unbehandelten, unverwitterten Gesteins (semitransparenter grauer Balken). Dieser Sachverhalt gibt Hinweis darauf, dass das haftvermittelte Hydrophobierungsmittel durchaus noch wirksam zu sein scheint, was sich auch in den vergleichsweise eher niedrigen Gesamtwassergehalten der altbehandelten Probe zeigt. Die Wiederbehandlung an der Musterfläche mit Funcosil Antihygro erzielte in den vorderen 10 mm der Fassade, was wahrscheinlich der Eindringtiefe entspricht, eine Minderung der Quellneigung. Die Tiefenprofile des Wassergehalts beider Messungen entsprechen sich nahezu genau. Auch hier blieb der Gesamtwassergehalt unbeeinflusst von der Wiederbehandlungsmaßnahme. Gegenüber dem Ausgangswert konnte eine 22 %ige Senkung der hygrischen Dehnung bewirkt werden.

Die Musterfläche in Abbildung 8.37_c wurde ebenfalls ursprünglich mit PTEXS 66a + GF91 behandelt. Die Quellneigung ist im Vergleich zum vorherigen Beispiel (8.37_b) niedriger. Dieser Umstand spiegelt erneut die Variabilität des Materials wider. Sowohl die Wiederbehandlung im Labor als auch an der Fassade führte jeweils zu einer Senkung der hygrischen Dilatation um nahezu den gleichen Betrag (ca. 35 %). Bei der einmaligen Fassadenapplikation von Funcosil Antihygro scheint erneut eine Eindringtiefe von ca. 1 cm erreicht worden zu sein. Die doppelte Behandlung im Labor hat sich allerdings anscheinend günstiger auf die Eindringtiefe ausgewirkt. SNETHLAGE ET AL. 1995

beschreiben, dass sich ein mehrmaliges Tränken positiv auf die Senkung der Feuchtedehnung auswirkt, wobei eine

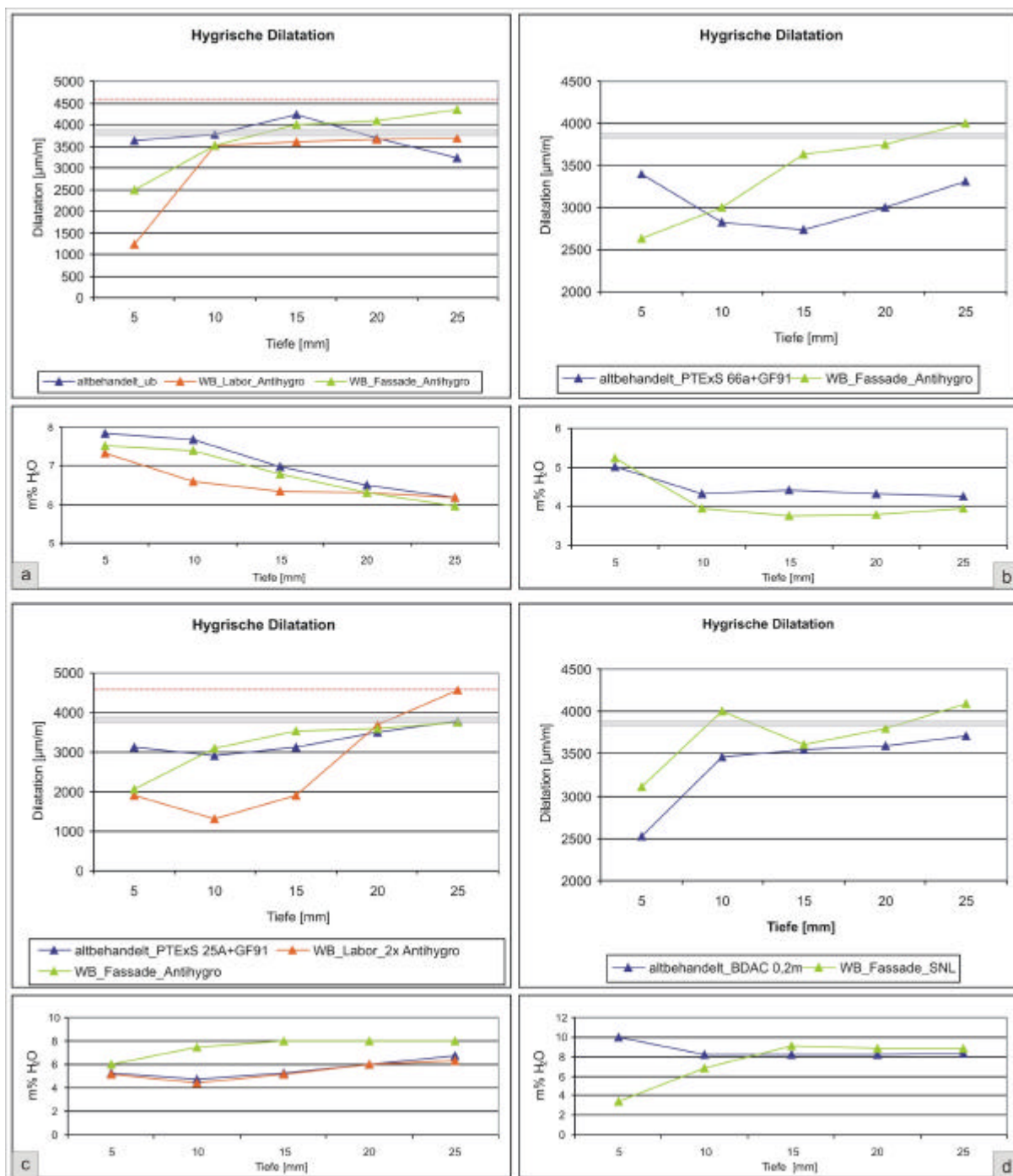


Abb. 8.37 (a-d): Tiefenprofile der hygrischen Dilatation senkrecht der Schichtung und der dazugehörigen Wasseraufnahme nach 48 h Unterwasserlagerung, Schloss Schillingsfürst, Originalmaterial aus Diebach/Gailnau. Einfluss bifunktionaler, kationischer Tenside.

verdünnte Applikation der eines unverdünnten Mittels vorzuziehen sei, da es andererseits zu einer deutlichen Dunklung des Materials kommt. Zwar konnte im aktuellen Fall durch eine mehrmalige Behandlung die Effizienz der Wirkung nicht extrem gesteigert werden, wohl aber die Wirkungstiefe. Die Gesamtwassergehalte sind im vorderen Fassadenbereich unverändert und liegen unterhalb derer des unbehandelten Gesteins, was für eine andauernde Wirksamkeit der ursprünglich applizierten Substanz spricht. Erstaunlich ist jedoch erneut die Schwankungsbreite der hygrischen Parameter

innerhalb eines Quaders, außerhalb der potentiell behandelten Zone. Abbildung 8.37_d zeigt die Ergebnisse einer Musterfläche, die im Rahmen der ersten Konservierungsmaßnahme mit dem Quellminderer BDAC (0,2 m) behandelt wurde. In Anbetracht der dem Material möglichen Dehnungsbeträge, verweist die Messung im Vergleich zu der mit PTEXS 66a + GF91 behandelten Musterfläche nach 20 Jahren Exposition am Objekt noch auf eine relativ gute „Blockierung“ der hygrischen Quellung bei Unterwasserlagerung. Die Wiederbehandlung mit Funcosil SNL führte zu einer 20 %igen Steigerung der hygrischen Dilatation. Dennoch liegen die Ergebnisse deutlich unterhalb der Kennwerte des unbehandelten, unverwitterten Gesteins bzw. entsprechen ihnen (semitransparenter grauer Balken), was ein Ausdruck für die noch bestehende Effektivität der ursprünglichen Konservierungsmaßnahme ist. Der enorm hohe Gesamtwassergehalt konnte durch die erneute Behandlung nahezu gedrittelt werden. Die Eindringtiefe der Wiederbehandlung scheint im Bereich zwischen 1-1,5 cm zu liegen.

Die quellmindernde Wirkung von Funcosil Antihydro fand durch die Untersuchungen Bestätigung. Im Bereich der Eindringtiefe konnte die Feuchtedehnung um ca. 30 % gegenüber dem altbehandelten Wert abgesenkt werden. In einem Fall wurde durch die doppelte Applikation des Quellminderers sogar eine 70 %ige Senkung bezogen auf die altbehandelte Musterfläche erzielt. Die kombinierte Behandlung aus Funcosil Antihydro und Funcosil SL vermochte sowohl eine Minimierung der Quellneigung als auch der Wasseraufnahme des Gesteins zu bewirken.

8.4 Methoden zur Überprüfung der Festigkeitsparameter

8.4.1 Biaxiale Biegezugfestigkeit

Zur Kennzeichnung der Festigkeit mineralischer Baustoffe dienen im Allgemeinen die Prüfung der Druck-, Biegezug- und Haftzugfestigkeit. Bei den meisten Gesteinen liegt das Verhältnis von maximaler Zugspannung und maximaler Druckspannung zwischen 1/15 und 1/30 (ALFES 1989). Oberflächennahes Materialversagen dieser Gesteine ist meistens auf die Überschreitung von Scher- und Zugspannung zurückzuführen. Daher werden in der Natursteinkonservierung vorwiegend die Zugfestigkeiten und die Biegezugfestigkeiten als Kriterium für den Verwitterungsfortschritt und die Verwitterungsresistenz verwendet (SCHUH 1987), (SNETHLAGE 1991a).

Das in dieser Arbeit verwendete Prüfverfahren beruht auf der doppelten Ringauflage der Probe (Bohrkernscheibe). Wie in Abbildung 8.38 zu erkennen, besitzt der Auflagering einen größeren Durchmesser als der dazu konzentrisch gelagerte obere Belastungsring. Die Durchmesser der beiden Ringe stehen dabei in einem Verhältnis von 1:3. Bei der verwendeten Versuchsvorrichtung erfolgt über den oberen Ring eine konstante Kraftereinleitung auf die Probe bis zu deren Bruch. Als Biaxiale Biegezugfestigkeit f_{BZ} wird in diesem Verfahren die erreichte maximale Biegespannung definiert, die an der Scheibe durch die eingeleitete Last erzeugt wird (SATTLER, 1992).

Bei der Prüfung der Biaxialen Biegezugfestigkeit wird der Probekörper einer gleichzeitig wirkenden Druck-, Scher- und Zugspannung ausgesetzt. Der Bruch tritt aufgrund des positiven Verhältnisses zwischen Druck- und Zugfestigkeit beim Überschreiten der Zugfestigkeit ein (SATTLER 1992). Bei der Messung wird der Verlauf von Kraft und Verformung aufgezeichnet. Die Biegezugfestigkeit f_{BZ} errechnet sich aus der Bruchkraft F_{max} (Formel 10). Aus dem linearen Bereich der Belastungskurve wird der statische E-Modul E ermittelt (siehe Formel 11), und zwar nach WITTMANN & PRIM (1983) aus dem Biaxialen Last-Verformungs-Diagramm bei 1/3 der Bruchlast.

$$s_{BZ} = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot p \cdot d^2} \cdot \left[2 \cdot (1+n) \cdot \ln \frac{a}{b} + \frac{(1-n) \cdot (a^2 - b^2)}{a^2} \cdot \frac{a^2}{r^2} \right] \quad (\text{Formel 10})$$

$$E = \frac{1,5 \cdot F}{f_0 \cdot d^3} \cdot (1-n^2) \cdot \left[b^2 \cdot \ln \frac{b}{a} + \frac{(a^2 - b^2) \cdot (3+n)}{2 \cdot (1+n)} \right] \quad (\text{Formel 11})$$

- F_{\max} : maximale Last auf dem Belastungsring [N]
 F: Kraft auf dem Belastungsring [N]
 f_0 : Durchbiegung der Probenscheibe [mm]
 d: Dicke der Probenscheibe [mm]
 ν : Poissonzahl (0,25)
 a: Radius des Auflagerings [mm]
 b: Radius des Belastungsringes [mm]
 r: Radius der Gesteinsscheibe [mm]

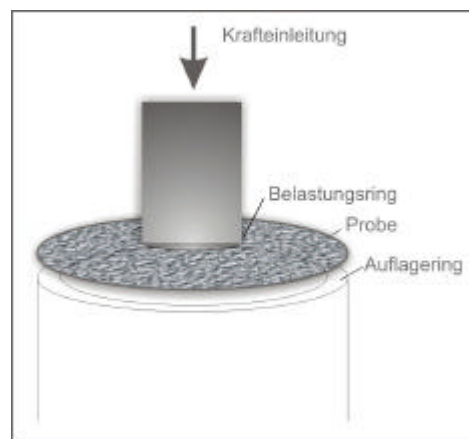


Abb. 8.38: Schematische Darstellung der Prüfanordnung zur Messung der Biaxialen Biegezugfestigkeit

Methodik

Die Biaxialen Biegezugmessungen wurden bei jedem Bohrkern jeweils an den vorderen 4 Bohrkernscheiben, die theoretisch im Bereich der ersten Konservierung bzw. der Wiederbehandlung liegen könnten, als auch an Scheiben des unbehandelten und unverwitterten Materials durchgeführt. Da die Biegezugfestigkeit als Maß der Intensität der Kornbindung angesehen werden kann, gibt der Vergleich der verschiedenen Behandlungsstadien einen direkten Hinweis auf die Wirksamkeit der ursprünglichen Konservierung bzw. den Erfolg der Wiederbehandlung. Ebenso wie bei der hygrischen Dehnung ist bei dieser Meßmethode die genaue Kenntnis der Orientierung der jeweiligen Proben von enormer Bedeutung. Gesteine mit flächenhaftem Parallelgefüge weisen nämlich eine deutliche Richtungsabhängigkeit auf. Die minimalen Zugfestigkeiten liegen dabei senkrecht zu den Spaltflächen. Ein Vergleich zweier Messungen, die bezüglich der sedimentären Schichtung in der Messapparatur verschieden orientiert sind, kann demnach zu wesentlichen Fehlinterpretationen führen. Wie sowohl aus dem makroskopischen als auch dem mikroskopischen Befund hervorging, weisen beide untersuchten Lithotypen keine sehr deutliche Lagigkeit auf, dennoch kann in Abhängigkeit von der Varietät meistens eine Schichtung identifiziert werden. Die ermittelten Unterschiede zwischen Quadern, die parallel oder senkrecht zur Schichtung in der Fassade verbaut wurden (siehe Abb. 7.1), sind nicht sehr hoch. Trotzdem sind die Ergebnisse von senkrecht verbauten Quadern separat betrachtet worden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Die Messungen wurden mit einer Universalprüfmaschine der Firma Zwick (Zwick /Z010) mit folgenden Versuchsparametern durchgeführt:

- Radius des Belastungsringes: 6,5 mm
 Radius des Auflagerings: 19,5 mm
 Vorkraft: 5,0 N
 Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min
 Querdehnungszahl (?): 0,25

Die Messvorrichtung arbeitet lagegeregelt.

Das Durchbiegen f_0 der Bohrkernscheibe wurde mit einem Längenaufnehmer in der Scheibenmitte an der Unterseite der Probe erfasst.

Wie alle Festigkeitswerte ist auch die Biaxiale Biegezugfestigkeit stofffeuchteabhängig (SÄTTLER 1992). Bei der Durchführung dieser Untersuchungen ist aus diesem Grund genau darauf geachtet worden, die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) im Labor für alle Untersuchungen nahezu konstant zu halten. Die Bohrkernscheiben waren zum Zeitpunkt der Messung in 40 % r.Lf. und 21°C konditioniert.

8.4.1.1 Ergebnisse

In den folgenden Ausführungen werden die Ergebnisse der Wiederbehandlungen im Labor und an den Musterflächen sowohl für die Grünsandstein-, als auch die Schilfsandsteinvarietäten dargelegt.

Die Grundlage der Bewertung an den Proben des Regensburger Grünsandsteins bilden Resultate zur Wirksamkeit der ursprünglichen Behandlung, ermittelt in den Jahren 1990 und 2001 (altbehandelt), und die Eigenschaften des unbehandelten, verwitterten Materials, die während der Konservierungsmaßnahmen 1984-89 bestimmt wurden. Somit können die Effektivität der ursprünglichen Maßnahme und die Wirkung der Wiederbehandlung direkt miteinander verglichen werden. Die Qualität der erneuten Behandlung wird darauf bezogen, inwieweit die Ergebnisse die Anforderungen an eine erfolgreiche Konservierung (SNETHLAGE & WENDLER 1996) erfüllen, und ob die Steigerung der Biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls dem Anspruch eines ausgeglichenen Festigkeitsprofils gerecht werden.

8.4.1.1.1 Regensburger Grünsandstein

Funcosil OH und Funcosil H

Für jeden der in Abbildung 8.39 dargestellten Steinquader (Varietät I, III und IV) ist es offensichtlich, dass die Festigkeit im Zeitraum von 1990 bis 2001 (altbehandelt) deutlich abgenommen hat. Bevor aber aus dem relativ starken Abfall zwischen den aktuellen Ergebnisse der Biaxialen Biegezugfestigkeit und den Daten aus dem Jahr 1990 voreilige Schlüsse gezogen werden, wäre es höchstwahrscheinlich notwendig, den Einfluss der verschiedenen Probengeometrien in Betracht zu ziehen. Die Messungen im Jahr 1990 wurden an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 8 cm gemacht, wohingegen die neuen Ergebnisse von 5 cm-Bohrkernen stammen.

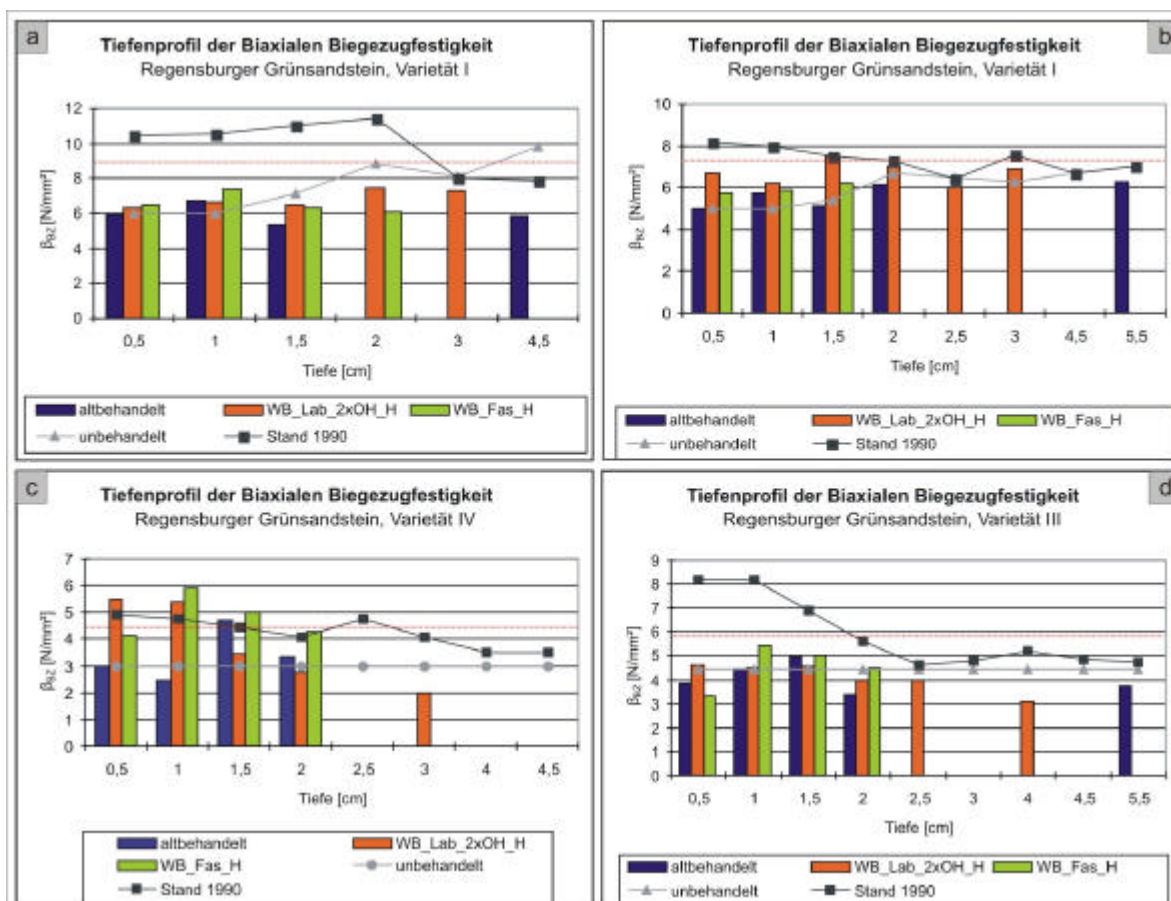


Abb. 8.39 (a-d): Tiefenprofile der Biaxialen Biegezugfestigkeit in Folge der Wiederbehandlung mit Funcosil OH und Funcosil H, Regensburger Grünsandstein, Varietät I, III und IV.

Im Vergleich mit den Werten, die im Rahmen der Messungen 1990 ermittelt wurden, zeigt der aktuelle Zustand der Steinquader eine deutliche Reduktion der Festigkeit des Korngefüges an. Die Biegezugfestigkeiten entsprechen nahezu denen des unbehandelten Materials im vergleichbaren Tiefenprofil. Daraus kann einerseits auf eine Minderung der Effektivität der ursprünglichen Behandlung geschlossen werden. Andererseits entspricht der Zustand des unbehandelten Gesteins dem anzustrebenden Konservierungserfolg. Zum momentanen Zeitpunkt ist trotz nachweislich abnehmender Wirkung der ursprünglichen Konservierung im äußeren Fassadenbereich keine erneute Festigung dringend erforderlich. Dennoch wird für die übrige Fassade eine regelmäßige Kontrolle der Festigkeitsparameter dringend empfohlen.

Die Diagramme in Abb. 8.39 geben die Auswirkung der Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade für die Grünsandsteinvarietäten I, III und IV wieder. Die Festigkeiten des unbehandelten und altbehandelten Materials folgen der bereits angesprochenen Staffelung der Varietäten, wonach Varietät I die höchste und Varietät IV die niedrigste Festigkeit besitzt.

Der Unterschied zwischen Abb. 8.39_a und Abb. 8.39_b, die beide Ergebnisse einer Wiederbehandlung mit Funcosil OH bzw. Funcosil H auf Varietät I darstellen, liegt darin, dass der Quader aus Abb. 8.39_a bereits in der Vergangenheit (Musterfläche 1978 und Konservierungsmaßnahme 1988/89) zweifach behandelt worden ist. Die Auswirkungen der erneuten Behandlungen führten nur zu geringfügigen Steigerungen der Festigkeit. Die Biaxiale Biegezugfestigkeit lag im Jahr 1990 und bei den aktuellen Untersuchungen über der des Quaders in Abbildung 8.39_b, bei dem eine signifikantere Änderung der Festigkeit in Folge der Laborbehandlung

beobachtet werden konnte. Der geringe Festigkeitszuwachs in 8.39_a kann darauf zurückzuführen sein, dass der Porenraum, im Speziellen die engen Poren, durch die bereits zweifache Behandlung noch weitreichend mit Gel ausgekleidet ist, und so die Platznahme eines neuen Gelfilms zu keiner wesentlichen Festigkeitssteigerung führt. Ein Vergleich der E-Module der jeweils vordersten Bohrkernscheiben beider Quader bestätigt diese Vermutung. Der im Vorfeld der Wiederbehandlungsmaßnahmen nur einmalig behandelte Quader hatte bei den Messungen 2001 einen E-Modul von 13,5 kN/mm², wohingegen der bereits zweimal behandelte bei 21 kN/mm² liegt und somit einen stärkeren Kornverschränkungsgrad und damit eine größere Steifheit repräsentiert.

Die Wiederbehandlung der Musterflächen resultierte jeweils lediglich in einem geringen Anstieg der Festigkeit.

Abgesehen von einer leichten Abweichung in Bild 8.39_a, führte die Wiederbehandlung im Labor, die zweifach hintereinander vorgenommen wurde, zu einem größeren Anstieg von β_{BZ} , als die Applikation an der Fassade.

In Bild 8.39_c sind die Ergebnisse der Schutzmittelapplikation an Varietät IV dargelegt. Hierbei handelt es sich um die Varietät mit der geringsten Festigkeit. Anders als bei Varietät I führte die Maßnahme zu einer überdeutlichen Steigerung der Biaxialen Biegezugfestigkeit, im Speziellen nach der doppelten Applikation von Funcosil OH im Labor. Aber auch die Anwendung von Funcosil H vermochte die Festigkeit deutlich über das Niveau des altbehandelten Zustandes anzuheben. Der empfohlenen Grenzwert eines 1,5 fachen Anstiegs gegenüber dem unbehandelten Zustand wird mit der übertriebenen Festigung im Laborexperiment im Bereich der ersten Bohrkernscheibe deutlich überschritten. Der weitere Anstieg in einer Tiefe zwischen 0,5 und 1,0 cm spiegelt die Schwierigkeit der Beurteilung der Ergebnisse bei einer derartig heterogenen Gesteinsvarietät wie Varietät IV wider. Es ist eigentlich kein Grund vorstellbar, dass eine neuerliche Festigung, mit der ohnehin bei den aktuellen Untersuchungen nur geringe Eindringtiefen erreicht werden konnten, sich erst in größerer Fassadentiefe in einem Anstieg der β_{BZ} äußert.

Das Überschreiten der empfohlenen Richtlinie konnte nur in diesem einzelnen Fall registriert werden. Die erzielten Festigkeitsprofile sind – abgesehen von der beschriebenen Varietät IV – relativ harmonisch in Bezug auf das sich in größerer Fassadentiefe anschließende unbehandelte und unverwitterte Material.

In Abbildung 8.39_d sind die Auswirkungen auf Varietät III wiedergegeben. Die Ergebnisse weichen von denen der anderen, nur einmalig vorbehandelten Varietäten ab. Die doppelte Applikation von Funcosil OH, gefolgt von einer Behandlung mit Funcosil H (Labor) bewirkte lediglich eine leichte Steigerung der β_{BZ} , wohingegen die Wiederbehandlung an der Fassade nahezu keinen Effekt hatte.

Eine Abschätzung der erreichten Eindringtiefen anhand der dargestellten Säulen ist schwierig. Eine größere Tiefe als 1,5 cm scheint allerdings nicht erreicht worden zu sein.

In Abbildung 8.40 sind die Kurven der Biaxialen Biegezugmessung für Varietät I (8.40_a) und Varietät IV (8.40_b) wiedergegeben, um den Effekt der Wiederbehandlung an der Fassade mit Funcosil H darzustellen. Erstaunlicherweise bleibt Varietät IV nicht überdeutlich hinter der Ausgangsfestigkeit (altbehandelter Zustand) der Probe von Varietät I zurück. Eine wahrscheinliche Erklärung für dieses Phänomen liegt wohl in der extremen Heterogenität der Varietät IV begründet. In diesem Fall war der geprüfte Bereich von einer höheren Dichte und Festigkeit als das durchschnittliche Material dieser Varietät.

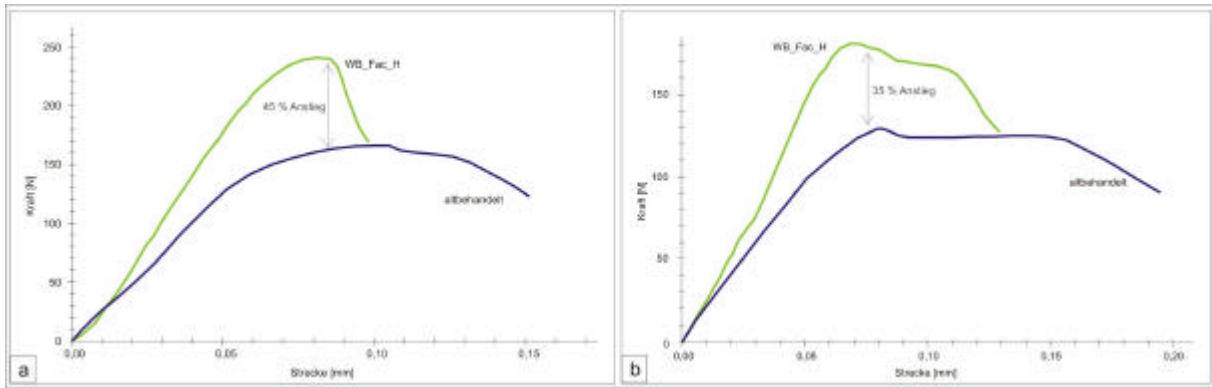


Abb. 8.40 (a-b): Verformungskurven der Biaxialen Biegezugfestigkeitsmessung des Bereiches 0-0,5 cm. Vergleich des altbehandelten (Stand 2001) und des wiederbehandelten Zustands (Funcosil H). Der Scheitelpunkt der Kurve entspricht der Bruchkraft F_{max} , die in die Berechnung der Biegezugfestigkeit einfließt.

Die erneute Konservierung der dichten Varietät I resultierte in einem deutlichen Anstieg der Biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls. Auch bei Varietät IV kann eine Steigerung dieser Festigkeitsparameter beobachtet werden, allerdings in geringerem Ausmaß.

Funcosil OH, verdünnt und Funcosil H bzw. Funcosil SNL

In den folgenden beiden Diagrammen (siehe Abb. 8.41) sind die Resultate einer verdünnten Applikation von Funcosil OH und einer nachfolgenden hydrophobierenden Behandlung dargestellt. Die Variante der verdünnten Schutzmittel wurde gewählt, um die Eindringtiefen der Substanzen zu optimieren.

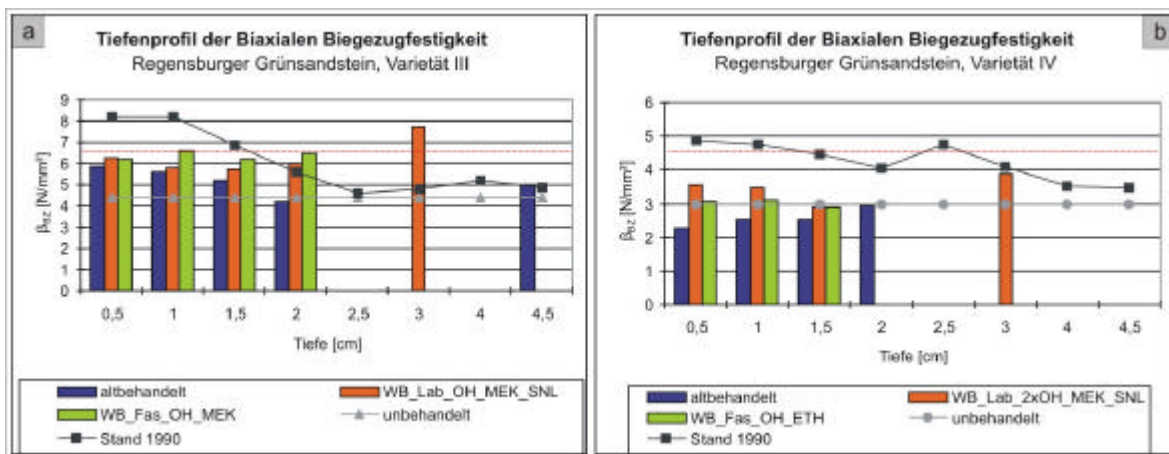


Abb. 8.41 (a-b): Tiefenprofile der Biaxialen Biegezugfestigkeit in Folge der Wiederbehandlung mit Funcosil OH und Funcosil H, verdünnt, Regensburger Grünsandstein, Varietät III und IV

Anhand der Wiederbehandlungen an Varietät III kann man eine verbesserte Eindringtiefe, bis 2,0 cm, erkennen. Der Festigkeitszuwachs gegenüber dem altbehandeltem Zustand ist jedoch gering.

Vergleicht man für Varietät III die Applikation des unverdünnten mit der des verdünnten Festigers Funcosil OH, so wird deutlich, dass die verdünnte Applikation, bei geringerem Wirkstoffgehalt, eine um 40 % geringere Reduzierung der Porosität bewirkte (siehe Abb. 8.3_a und b). Dieses Ergebnis lässt sich sehr gut mit der jeweiligen Steigerung der Biaxialen Biegezugfestigkeit korrelieren, wobei das

unverdünnte Funcosil OH, bezogen auf das altbehandelte Material, einen stärkeren Anstieg der Festigkeit (siehe Abb. 8.39_d), als die verdünnte Behandlung (siehe Abb. 8.41_a) bewirkte.

Auf Varietät IV scheint diese Schutzmittelvariation einen positiveren Effekt zu haben. Die Messungen an Proben des Quaders der Varietät IV (siehe Abb. 8.41_b) im Bereich zwischen 1,5 und 2,0 cm schlugen aus messtechnischen Gründen fehl, so dass eine Aussage zur Wirksamkeit in dieser Tiefe verwehrt bleibt.

Die entsprechenden Verformungskurven der Biaxialen Biegezugfestigkeit in Abbildung 8.42 geben die oben dargelegten Sachverhalte wieder. Für Varietät III (8.42_a) ist die Applikation von verdünntem Funcosil OH mit Bezug auf die Zunahme der β_{BZ} nahezu ohne Effekt. Der E-Modul ist leicht angestiegen. Auf Varietät IV (8.42_b) hat die doppelte Applikation im Labor (ca. 200 %iger Anstieg der β_{BZ}), aber auch die Wiederbehandlung an der Fassade eine höhere Festigkeit zur Folge. Im Zuge der doppelten Applikation an der Fassade stieg auch der E-Modul an.

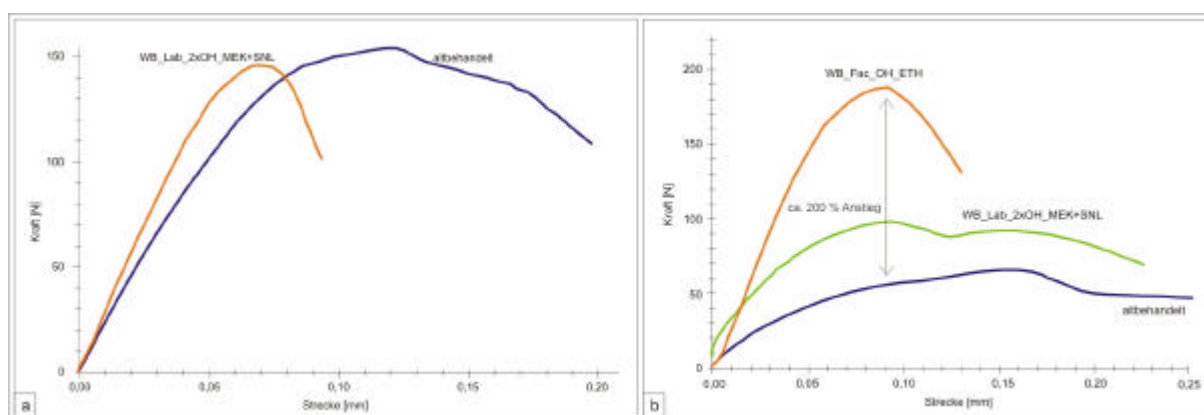


Abb. 8.42 (a-b): Verformungskurven der Biaxialen Biegezugfestigkeitsmessung des Bereiches 0-0,5 cm. Vergleich des altbehandelten (Stand 2001) und des wiederbehandelten Zustands (Funcosil OH, verdünnt).

In diesem Beispiel (8.42_b) besitzt die Probe, die den altbehandelten Zustand wiedergibt, eine sehr geringe Festigkeit, die typisch für Material der Varietät IV ist.

In der Gegenüberstellung der Steigerung der β_{BZ} und der entsprechenden effektiven Porosität durch die Applikation des unverdünnten und verdünnten Funcosil OH verhalten sich beide Parameter gegensätzlich. Der Festigkeitszuwachs durch das unverdünnte Schutzmittel war größer (siehe Abb. 8.39_c und 8.41_b), wohingegen die dazugehörige effektive Porosität deutlich hinter der, durch die verdünnte Applikation erzielten, zurückbleibt (siehe Abb. 8.3_a,b). Allerdings stammen die Bohrkerne für die vergleichenden Untersuchungen von zwei unterschiedlichen Bausteinen. Da diese Varietät sehr heterogen ist, erscheint ein Vergleich beider Messungen nicht empfehlenswert zu sein.

Remmers 300 E, verdünnt und unverdünnt

Um einer überproportionalen Versteifung des Korngefüges durch eine Wiederbehandlung entgegenzuwirken, wählte man als Schutzmittel Remmers 300E, in verdünnter und unverdünnter Konzentration. Die Tests wurden an einem Quader der Varietät II durchgeführt (siehe Abb. 8.43). Dieser Baustein war bezüglich seiner Schichtung senkrecht in der Fassade verbaut. Ein Vergleich mit anderen Steinen der Varietät II ist demnach nur bedingt möglich. Im Laborexperiment führte die doppelte Applikation des elastifizierten Festigers zu einer deutlichen Steigerung der β_{BZ} .

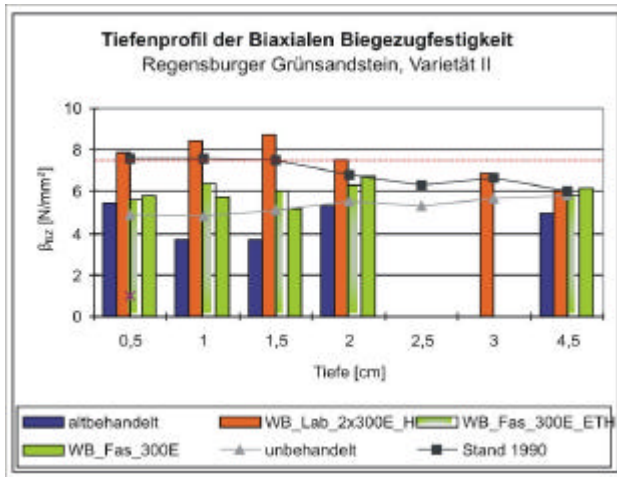


Abb. 8.43: Tiefenprofile der Biaxialen Biegezugfestigkeit in Folge der Wiederbehandlung mit Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt, Regensburger Grünsandstein, Varietät II.

Die erzielten Werte liegen an der Grenze des empfohlenen Wertes eines 1,5fachen Anstieges gegenüber dem unbehandelten Material. Da es sich allerdings um eine doppelte Behandlung handelt, die durchgeführt wurde, um das Risiko einer möglichen Überfestigung abzuschätzen, ist dieses Resultat nicht überzubewerten. An der Fassade wurde sowohl das unverdünnte als auch das verdünnte Agens appliziert. Die Resultate sind relativ identisch und zeigen gegenüber dem Ausgangszustand keine wesentliche Steigerung der β_{BZ} . Die Eindringtiefen scheinen im Bereich von 2 cm zu liegen. Nur in diesem Fall und bei der doppelten Behandlung der Varietät IV mit Funcosil OH+H (siehe Abb. 8.39_c) konnten die Festigkeiten der ursprünglichen Konservierung erreicht werden (1990 ermittelt). Die folgende Abbildung (8.44) stellt die entsprechenden Kurven der oben dargelegten Biaxialen Biegezugmessungen dar. Durch die Wiederbehandlungen steigerte sich sowohl die Biegezugfestigkeit als auch der E-Modul. Zum wiederholten Male ist zu erkennen, dass die zweifache Laborapplikation diese Effekte verstärkt (160 %iger Anstieg der β_{BZ} gegenüber dem altbehandelten Zustand). An der Fassade hatte die verdünnte Applikation des elastifizierten Festigers, die angewendet wurde, um die Eindringtiefen zu optimieren, im Vergleich zum altbehandelten Zustand einen positiven Effekt und führte zur gleichen Festigkeit wie die unverdünnte Substanz.

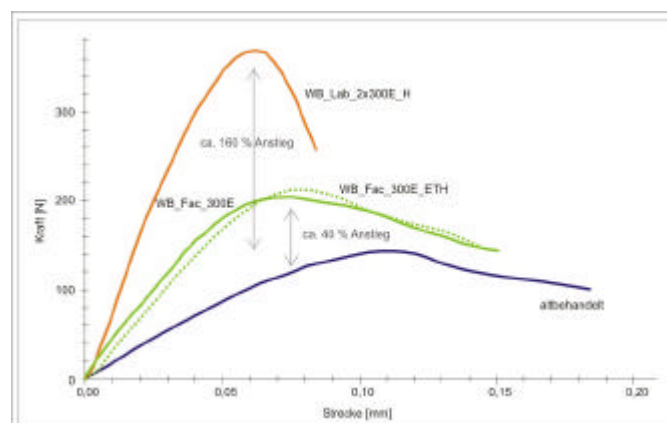


Abb. 8.44: Verformungskurven der Biaxialen Biegezugfestigkeitsmessung des Bereiches 0-0,5 cm. Vergleich des altbehandelten (Stand 2001) und des wiederbehandelten Zustands (Funcosil OH, verdünnt).

Wie bereits näher erörtert, ist die Wiederbehandlung eng mit der Frage verknüpft, inwieweit die erneute Festigung das Risiko einer Schalenbildung erhöht bzw. es im Vergleich zum unbehandelten, unverwitterten Material zu einer Überfestigung der Oberfläche und somit zu einem disharmonischen

Festigkeitsprofil kommt. Der der Biaxialen Biegezugfestigkeit entsprechende statische E-Modul wird als Tangens der Biaxialen Last-Verformungskurve bei 30 % der Bruchlast errechnet. Das Verhältnis β_{BZ} und E-Modul wird durch die spezifischen Dehnung ϵ wiedergegeben, die die obere Grenze eines idealen elastischen Verhaltens wiedergibt, bis zu der Deformationen reversibel sind. In der folgenden Abbildung (8.45) sind alle Messungen der Biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls, die in einer für die Wiederbehandlung relevanten Fassadentiefe liegen, zusammengefasst. Zusätzlich sind die Werte des unbehandelten Materials und des Zustandes der altbehandelten Fassade verzeichnet.

Der Zweck einer gemeinsamen Darstellung der Biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls ist die Möglichkeit der Risikoabschätzung einer Überfestigung. Die Entscheidung, ob eine derartige Gefahr besteht, wird anhand von Richtlinien für die Konservierung von Natursteinen getroffen, die auf der Basis experimenteller Untersuchungen beruhen (SASSE & SNETHLAGE (1996), SNETHLAGE & WENDLER (1997) und SNETHLAGE (1997)). Diese Kriterien fordern für unterschiedliche Behandlungsstadien, dass β_{BZ} und der E-Modul stets im gleichen Verhältnis ansteigen, welches sich an den Relationen des unbehandelten Materials orientiert. Nach Möglichkeit sollte der E-Modul in geringerem Maße ansteigen als die Biaxiale Biegezugfestigkeit. Der Abfall der Festigkeit zum unbehandelten Gestein hin sollte nicht steiler als $0,2 \text{ N/mm}^2$ pro mm sein. Diese Kriterien bilden eine objektive Grundlage für die Beurteilung möglicher, aus der (Wieder-)behandlung resultierender Risiken.

Messwerte, die zu den Varietäten II, III und IV gehören, bilden um die obere Linie (a) zwei Schwerpunkte.

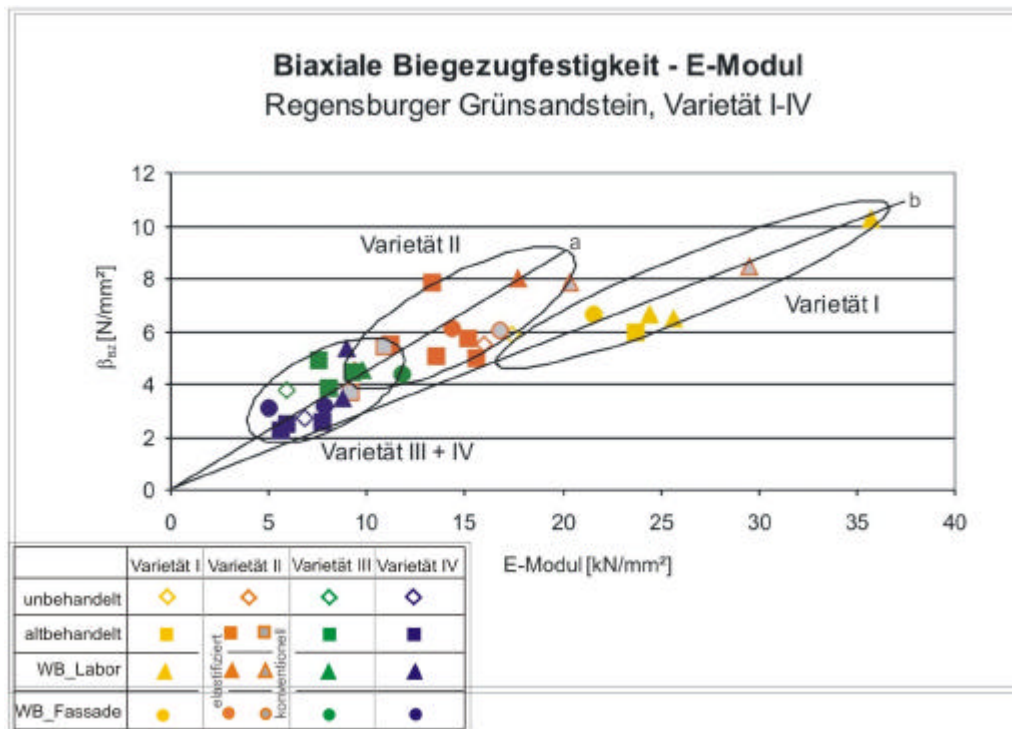


Abb. 8.45: Verhältnis der Biegezugfestigkeit und des EModuls im Bereich der wiederbehandelten Zone, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV.

Die Varietäten III und IV, die sich auch in den Ultraschallmessungen mit vergleichsweise niedrigeren Festigkeiten repräsentierten, plotten im unteren Bereich der Linie a, die entsprechend der Formel 12 ein konstantes Verhältnis zwischen σ_{BZ} und dem E-Modul symbolisiert ($s_{max} = \beta_{BZ}$).

$$e = \frac{b_{Bz}}{E} = \frac{b_{Bz}}{s_{30\%}} \cdot e_{30\%} \quad (\text{Formel 12})$$

e = spezifische Dehnung

β_{Bz} = Biaxiale Biegezugfestigkeit

s = Spannung

E = E-Modul

Die Ergebnisse an Varietät II liegen entlang dieser Linie (a) im Bereich höherer Festigkeiten und E-Module. Bezüglich ihres Belastungs- und Verformungsverhaltens können diese drei Varietäten als gleichartig angesehen werden. Dasselbe gilt dementsprechend auch für deren Verwitterungs- und Wiederbehandlungsverhalten (SNETHLAGE & MEINHARDT-DEGEN 2004). Es konnte bestätigt werden, dass bei Anwendung elastifizierter Kieselsäureester die Entwicklung des E-Moduls harmonischer verläuft. Bei dennoch gleichwertigem Festigkeitszuwachs ist er in problematischen Fällen dem konventionellen Festiger vorzuziehen.

Varietät I, die auch in anderen Messverfahren als die Varietät mit der höchsten Dichte und Festigkeit hervor trat, folgt im Zuge der Behandlung einem anderen Verhältnis von β_{Bz} und E-Modul. Aus diesem Grund wurde im Diagramm eine weitere Linie (b), die ebenso ein konstantes Verhältnis von Biegezugfestigkeit und Elastizitätsmodul kennzeichnet, eingetragen.

Abgesehen von wenigen leichten Abweichungen, die wahrscheinlich der Heterogenität des Materials anzulasten sind, plotten alle Resultate (unbehandelt, altbehandelt, wiederbehandelt) in einem engen Bereich entlang dieser Linien (b). Eine Gefahr der Überfestigung scheint mit Hinblick auf die Wahrung des Verhältnisses von β_{Bz} und der E-Modul nicht gegeben. Selbst die übertriebene Applikation der Schutzmittel im Labor konnte keine extremen Heterogenitäten im Festigkeitsprofil der Fassade schaffen.

8.4.1.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Da die auf Schilfsandstein applizierten Schutzmittel nicht auf die Verbesserung der Festigkeit des Materials ausgerichtet sind, sondern den Feuchtigkeitshaushalt des Gesteins optimieren bzw. die Quellneigung mindern sollen, werden die Ergebnisse der einzelnen Schutzmittel zusammenfassend betrachtet.

Wie bereits erwähnt, wurde genau darauf geachtet, dass die Proben für die Messung der Biaxialen Biegezugfestigkeit stets gleich konditioniert gewesen sind (40 % r.Lf. und 21°C). Bei den Untersuchungen der Schilfsandsteinproben zur hygri-schen Dilatation konnte in besonders beeindruckender Weise der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Stabilität des Kornverbandes beobachtet werden. Nach der 48-stündigen Unterwasserlagerung waren die Bohrkernscheiben oftmals ganz fragil und erinnerten z.T. eher an gering verfestigten Sand. Diese Beobachtung wurde zwar unter extremen Bedingungen gemacht, führt allerdings sehr deutlich die Notwendigkeit einheitlich konditionierter Proben vor Augen.

In Abbildung 8.46 sind die Auswirkungen der Wiederbehandlungstests auf die Biaxiale Biegezugfestigkeit sowohl bei dem Originalmaterial aus Diebach/Gailnau als auch bei dem Austauschmaterial aus Schleerith dargestellt. Die einzelnen Balken der Wiederbehandlungsversuche

stellen jeweils Mittelwerte aller Tests dar. Zusätzlich wurde für jede Substanz die jeweils höchste erreichte Biegezugfestigkeit verzeichnet.

Die Festigkeiten des unbehandelten Materials von Original- und Austauschgestein, markiert durch die semitransparenten grauen Linien, zeigen einen deutlichen Unterschied. Die ursprüngliche σ_{BZ} des Gesteins aus Diebach/Gailnau liegt mit ungefähr $2,2 \text{ N/mm}^2$ sehr niedrig, was die Verwitterungsanfälligkeit unterstreicht.

Der Verlauf der Biegezugfestigkeit des Originalmaterials (8.46_a) im Tiefenprofil weist eindeutig auf einen verwitterungsinduzierten Festigkeitsverlust bis in eine Tiefe von 2 cm hin. In dieser Zone trifft der altbehandelte Zustand des Materials auf die Eigenschaften des unbehandelten Gesteins. Obgleich die Wiederbehandlung nicht darauf abzielte, bewirkten die Tests im Labor und an der Fassade eine geringe Steigerung der Festigkeit, die jedoch im Bereich des ersten Zentimeters von der Ausgangsfestigkeit des Materials deutlich entfernt ist.

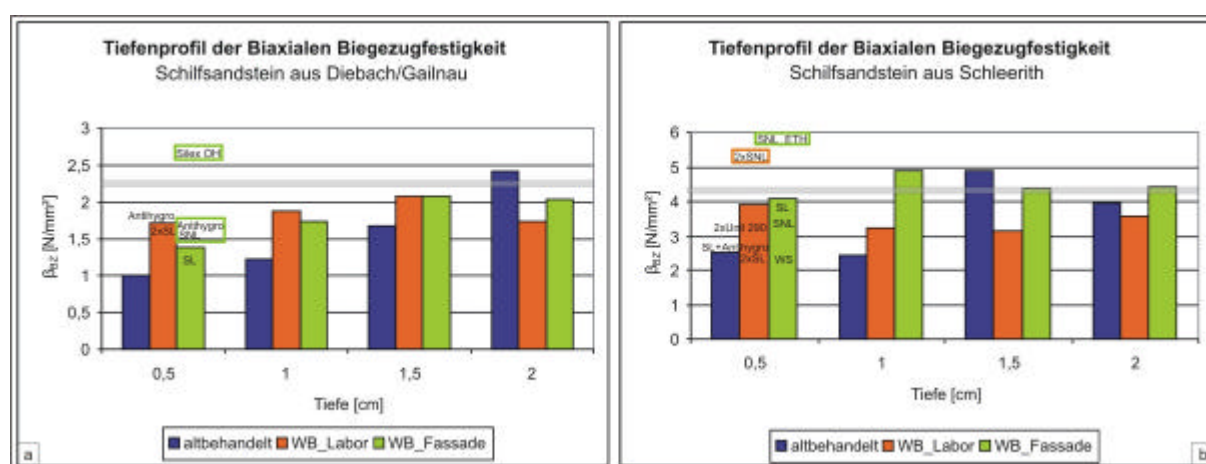


Abb. 8.46 (a-b): Tiefenprofile der Biaxialen Biegezugfestigkeit in Folge der Wiederbehandlung mit diversen Hydrophobierungsmitteln und verdünntem Silex OH, Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleierith.

Zum Zweck der Optimierung der Festigkeit wurde eine Musterfläche an der Fassade von Schloss Schillingsfürst mit dem Festiger Silex OH (verdünnt mit MEK 1:2) wiederbehandelt. Damit konnte eine Steigerung der Biaxialen Biegezugfestigkeit über den Wert des unbehandelten, unverwitterten Materials erreicht werden. Mit Hinblick auf den empfohlenen Grenzwert für eine Steigerung der Festigkeit in Folge einer Behandlung (siehe Tab. 3.1_c) ist die Applikation von verdünntem Silex OH dennoch vertretbar, da diese Grenze erst bei $3,4 \text{ N/mm}^2$ liegt. Die anderen applizierten Schutzmittel bleiben diesbezüglich ebenfalls deutlich unter diesem Limit. Die Eindringtiefe der Substanz scheint bis 1,5 cm zu reichen. In dieser Tiefe konnte gegenüber dem altbehandelten Zustand eine Steigerung der Festigkeit bewirkt werden.

Wie bereits erwähnt, liegt die Ausgangsfestigkeit des unbehandelten Austauschgestein (siehe Abb. 8.46_b) mit $4,2 \text{ N/mm}^2$ deutlich über der des original verbauten Materials. Das Gestein aus Schleierith fällt an der Fassade im Vergleich zum Originalmaterial auch weniger häufig durch die Ausbildung massiver Abschuppungen und großer Schalen auf (siehe Kapitel 6.5). Dieses Phänomen kann allerdings auch der geringeren Standzeit der ausgetauschten Quader zuzuschreiben sein. Sowohl die Wiederbehandlungsversuche im Labor als auch am Objekt führten in der vordersten Fassadenzone (0-0,5 cm) zum Erreichen der Festigkeit des unbehandelten, unverwitterten Materials. Die Applikation von Funcosil SNL in verdünnter und unverdünnter Konzentration bewirkte sogar einen Anstieg über diese ursprüngliche Festigkeit hinaus. Der Grenzwert für eine empfohlene Festigkeitssteigerung, der in

diesem Fall bei $6,3 \text{ N/mm}^2$ liegt, wurde allerdings nicht erreicht. Eine Aussage bezüglich der erreichten Eindringtiefe ist anhand des Diagramms nur schwer zu treffen, es muss jedoch mindestens eine Tiefe von einem Zentimeter erreicht worden sein, da hier noch eine Steigerung der β_{BZ} zu verzeichnen ist. Weshalb die festigende Wirkung an der Fassade im Bereich der zweiten Bohrkernscheibe höher liegt als an der Fassadenfront, ist ungewiss. Wahrscheinlich ist dieses Phänomen dem schwankenden Tongehalt des Quaders zuzuschreiben. Je mehr Ton in einer Probe ist, umso geringer ist die β_{BZ} .

Es war interessant zu beobachten, dass bei dem tonreichen Schilfsandstein bei Vorhandensein von makroskopisch sichtbaren Tonlinsen diese nicht bzw. nur ausnahmsweise (siehe Abb. 8.47_a) in das Bruchmuster integriert waren, sondern die Risse meistens an anderer Stelle die Bohrkernscheibe durchschlugen. Anders als ursprünglich erwartet, verliefen die Brüche nicht entlang der Grenze zwischen Tonlinsen und umgebendem Gestein. Für alle Gesteine gilt, die Druckfestigkeit ist größer als die Zugfestigkeit (SATTLER, 1992). Das bedeutet, der Bruch der Probe tritt durch Versagen in der Zugzone entlang der Linien der höchsten Spannung ein. Auf der gedehnten Seite der Bohrkernscheibe entsteht ein Bruchbild in Form radialstrahlig angeordneter Risse. Die Rissmuster (Mercedesstern) (siehe Abb. 8.47_b) sind primär geometrieabhängig, weswegen kleinräumige Heterogenitäten im Material keine anderen Rissverläufe zu provozieren vermögen. Andererseits hat eine ausgeprägte sedimentäre Schichtung schon einen Einfluss auf die Rissverläufe, die dadurch das Material weniger strikt durchlaufen.



Abb. 8.47 (a-b): Bohrkernscheiben nach der Bruchbelastung. Bild a zeigt ein Rissmuster in einer Scheibe aus Schleerither Sandstein. Die Brüche sind eher ausnahmsweise intensiv mit den Tonlinsen vergesellschaftet. Ansonsten ähneln sie denen in der nebenstehenden Abbildung (b). In Bild b ist das typische, mercedessternförmige Rissmuster in einer Bohrkernscheibe der Varietät II des Regensburger Grünsandsteins zu erkennen.

Abgesehen von der exemplarischen Applikation von verdünntem Silex OH sind in der folgenden Abbildung (8.48) alle ermittelten Daten des vordersten Zentimeters der Fassade, eine Zone, die auf jeden Fall von der Wiederbehandlung betroffen ist, zusammengefasst.

Für beide Gesteinsvarietäten wurde im Jahr 2001 (altbehandelt) eine reduzierte Festigkeit gegenüber dem unbehandelten Zustand detektiert. Auch in diesem Diagramm ist zu erkennen, dass ausgehend von einer relativ niedrigen β_{BZ} die Wiederbehandlung des Originalmaterials zu einer geringfügigen Steigerung der Festigkeit führt.

Einige Ergebnisse zeigen an, dass nach der Wiederbehandlung die Werte der Biaxialen Biegezugfestigkeit abgenommen haben. Diese Tatsache liegt wahrscheinlich in wechselnden Tongehalten des Materials begründet. Die Vergleichsmessungen wurden zwar an Bohrkernen gleicher Quader gemacht, allerdings gibt es bereits innerhalb eng begrenzter Zonen unterschiedliche Tongehalte. Im Rahmen einer hydrophobierenden Behandlung ist generell kein Prozess denkbar, der zu einer Absenkung der Festigkeit führen könnte.

Die Wiederbehandlungen an der Fassade führten auf Austauschmaterial zum Teil zu einer deutlichen Steigerung der Biaxialen Biegezugfestigkeit. Im Speziellen erzielte die Applikation von Funcosil SNL

einen stärkeren Anstieg von Biegezugfestigkeit und E-Modul. Abgesehen von diesen beiden Datenpunkten plotten die Ergebnisse der spezifischen Dehnung ϵ , dem Verhältnis aus Biaxialer Biegezugfestigkeit und E-Modul, annähernd auf einer Linie (siehe Abb. 8.48).

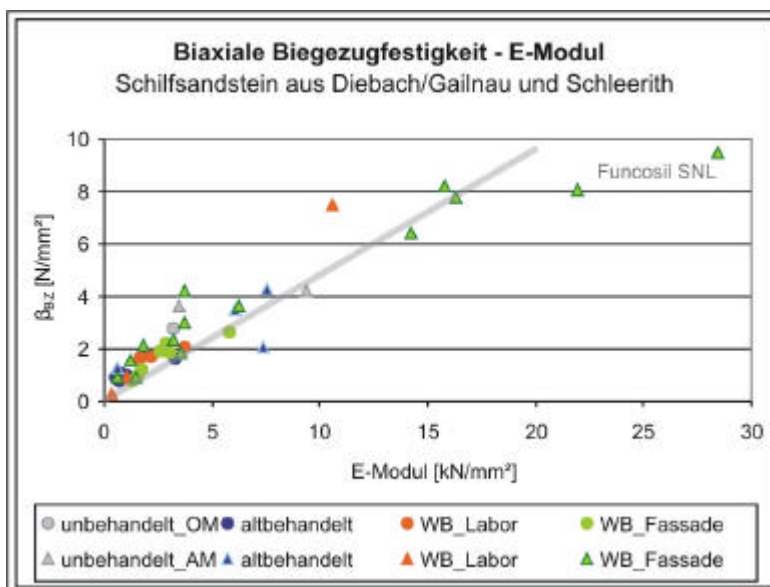


Abb. 8.48: Verhältnis der Biaxialen Biegezugfestigkeit und des EModuls im Bereich der wiederbehandelten Zone. Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith.

Diese Tatsache sagt aus, dass die vorgenommenen Behandlungen keine Schädigung des Gesteins im Sinne einer Überfestigung bzw. einer stärkeren Rigidität der behandelten Zone gegenüber tieferen, unbehandelten Fassadenbereichen erwarten lassen. Andererseits scheint auch die Verwitterung gemäß einem konstanten β_{BZ} / E -Modul abzulaufen.

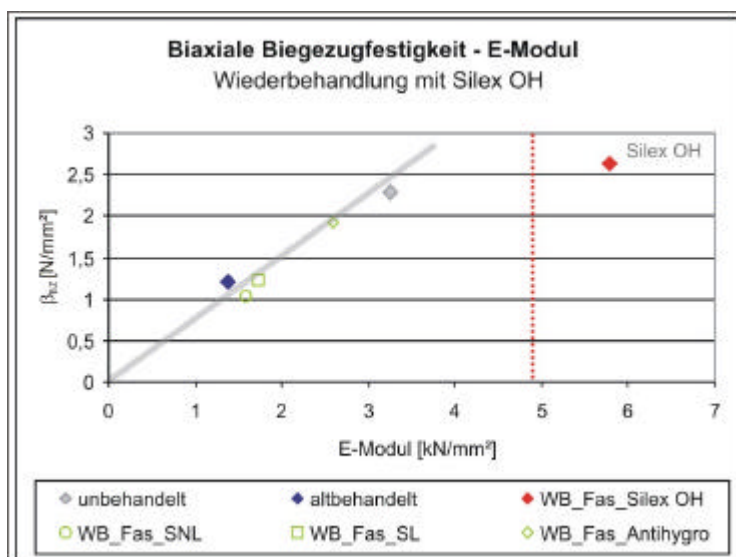


Abb. 8.49: Verhältnis der Biaxialen Biegezugfestigkeit und des E-Moduls bezüglich der festigenden Wiederbehandlung mit verdünntem Silex OH. Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau.

Die exemplarische Applikation des Festigers Silex OH auf einer ehemals mit UNIL190 S behandelten Fläche erzielte zwar die gewünschte Steigerung der Festigkeit des Schilfsandsteins (Diebach/Gailnau), allerdings verbunden mit einem zu hohen Anstieg des E-Moduls (siehe Abb. 8.49). Die empfohlene

Richtlinie $E(b) = 1,5 \cdot E(u)$, markiert durch die rote Linie, wird durch dieses Schutzmittel überschritten. Den Bezug für die Richtlinie bildet das unbehandelte, unverwitterte Material; betrachtet man aber, wo der E-Modul des altbehandelten Wertes liegt, ist eine Empfehlung dieser Substanz für eine festigende Wiederbehandlung des Schilfsandsteins nicht anzuraten. Eigentlich sollten tonreiche Gesteine eine höhere Festigkeitstoleranz gegenüber Kieselsäureesterfestigungen besitzen. Laut SATTLER (1992) bedeutet das, dass tonreiche Sandsteine bei einem Festigkeitszuwachs eher zu einer geringeren E-Modulsteigerung neigen. Diese Feststellung findet in dem speziellen Fall keine Bestätigung.

8.4.2 Belastungs – Verformungs – Parameter

Im Folgenden soll zusätzlich zu der Betrachtung innerhalb der einzelnen Grünsandsteinvarietäten abgeschätzt werden, inwieweit eine Steigerung der Festigkeit und des E-Moduls generell für den Regensburger Grünsandstein zulässig ist, um eine Schalenbildung in der (wieder)-behandelten Zone zu vermeiden. Wie bereits dargelegt (siehe Kapitel 3.4), wurden auf der Basis von Messungen und logischen Überlegungen von SASSE & SNETHLAGE (1996), SNETHLAGE & WENDLER (1997) and SNETHLAGE (1997) quantitative Bewertungskriterien zur Beurteilung der Grenzflächenbedingungen bezüglich der Belastungs-Dehnungs-Parameter zwischen behandelten bzw. wiederbehandelten und unbehandelten Bereichen erstellt. Die wichtigste Folgerung daraus ist die Wahrung des Verhältnisses zwischen der Festigkeit und der Elastizität des unbehandelten und unverwitterten Materials in der (wieder)-behandelten Zone. Mit Rücksicht auf die Wahrung der mechanischen Kompatibilität zwischen ungefestigtem und gefestigtem Material empfehlen SASSE UND SNETHLAGE (1996) für Steinfestigungen, dass der Anstieg der Druck-, Zug- oder Biegefestigkeit vom ungefestigten zum gefestigten Material den Faktor 1,5 nicht überschreiten sollte. Demnach gilt grundsätzlich die Regel: $(\beta_{\text{behandelt}} - \beta_{\text{unbehandelt}}) / \beta_{\text{unbehandelt}} < 0,5$

Der Festigkeitsabfall vom gefestigten Bereich hin zum unbehandelten Gestein sollte möglichst sanft sein und nicht 0,2 N/mm² pro mm übersteigen.

Bezüglich der Verwitterungsmechanismen ist die Veränderung der Elastizität der wichtigere Faktor für die mechanische Kompatibilität zum unbehandelten Material. Die festigungsbedingte Erhöhung des Elastizitätsindex fällt zumeist – so auch im Rahmen der Wiederbehandlungstests – stärker aus als die Erhöhung der Bruchfestigkeit. Das Verhältnis von Bruchfestigkeitsveränderung und Elastizitätsveränderung ist ebenfalls ein wichtiges Bewertungskriterium für die Dauerhaftigkeit von Natursteinfestigungen. In SASSE & SNETHLAGE (1996) wird diesbezüglich folgende Forderung aufgestellt:

$$E_{\text{behandelt}} / E_{\text{unbehandelt}} = \beta_{\text{behandelt}} / \beta_{\text{unbehandelt}}$$

Diese Parameter geben eine solide Grundlage für die Beurteilung der Effektivität und des Risikopotentials verschiedener Behandlungen.

Um diese Anforderungen auf ein spezielles Konservierungsszenario anzuwenden, muss man sich zunächst noch einmal verdeutlichen, wie die Parameter Festigkeit und E-Modul miteinander zusammenhängen (siehe Abb. 8.50). Die Festigkeit einer Probe errechnet sich aus der Belastung, die nötig ist, um zum Bruch zu führen. Der entsprechende E-Modul ist per definitionem der Tangens der Belastungs-Verformungs-Kurve bei 30 % F_{max} . Die spezifische Dehnung e ergibt sich aus dem Verhältnis der Bruchspannung (s) und dem E-Modul und repräsentiert die obere Grenze der reversiblen (elastischen) Verformung. Die Überschreitung der spezifischen Dehnung führt langfristig

zur irreversiblen Deformation, die im Allgemeinen als Beginn und Ursache von Materialablösung und Verwitterung angesehen wird.

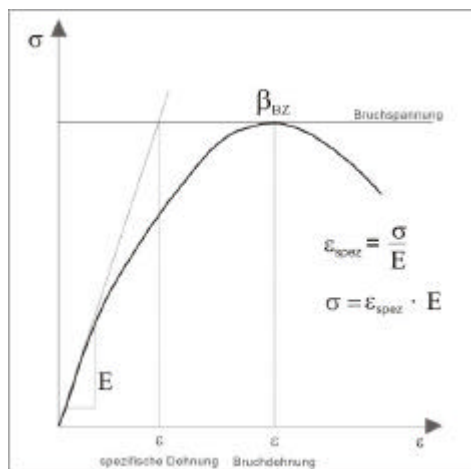


Abb. 8.50: Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Schematische Darstellung von Spannung (σ), EModul (E) und spezifischer Dehnung (e).

Wie schon in der Gegenüberstellung der Biegezugfestigkeit und des E-Moduls erkennbar war, plotten alle gemessenen Biegezugfestigkeits- und E-Modul-Daten, sowohl des unbehandelten, unverwitterten als auch des (wieder)-behandelten Materials der Grünsandsteinvarietäten in einem sehr engen Cluster mit einer linearen Korrelation der spezifischen Dehnung von $e = 0,34 \text{ ‰}$ (siehe Abb. 8.51_a). Diese Abbildung entspricht der in Abb. 8.45 in vereinfachter Form. Wie dort bereits beschrieben, gibt es aufgrund der Diversität der Varietäten zwei voneinander abweichende Verhältnisse von β_{BZ} und E-Modul. Für die Schilfsandsteinproben ergibt die Korrelation der Biaxialen Biegezugfestigkeiten und E-Module eine spezifische Dehnung von $e = 0,74 \text{ ‰}$ (siehe Abb. 8.51_b). Hierbei gilt zu beachten, dass die Ergebnisse, die an Originalmaterial ermittelt worden sind, eher im Bereich geringerer spezifischer Dehnung liegen, wohingegen das Austauschmaterial aus Schleerith höhere Werte erzielte. Das Wissen um die spezifische Dehnung von $e = 0,34 \text{ ‰}$ für den Regensburger Grünsandstein bzw. $e = 74 \text{ ‰}$ für den Schilfsandstein ermöglicht die Berechnung eines akzeptablen Spannungsanstiegs in Folge einer festigenden Behandlung. Ein Beispiel wird in Abbildung 8.52 gezeigt. In diesem Diagramm sind verschiedene EModule (1, 5, 10 kN/mm²) eingezeichnet. Die vertikalen Linien markieren die Werte der jeweiligen spezifischen Dehnung für Grün- und Schilfsandstein.

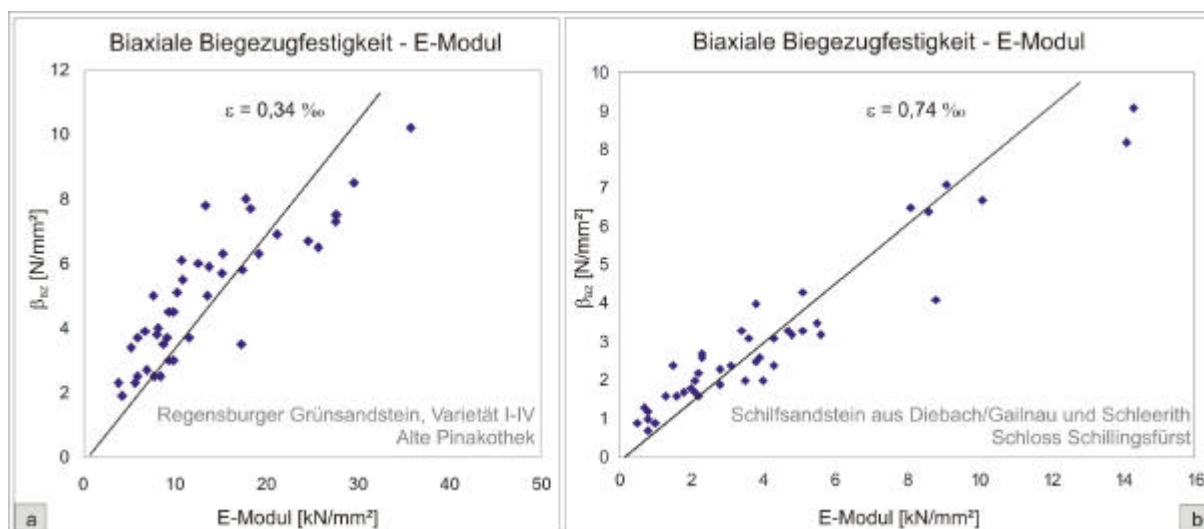


Abb. 8.51 (a-b): Spezifische Dehnung - Biaxiale Biegezugfestigkeit gegen E-Modul: a) Regensburger Grünsandstein, b) Schilfsandstein.

Beträgt demnach die Biaxiale Biegezugfestigkeit eines unbehandelten, unverwitterten Regensburger Grünsandsteins der Alten Pinakothek vor der Konservierung 3,5 N/mm² und einen E-Modul von 10 kN/mm², dann ist nach der festigenden Behandlung ein E-Modul von 20 kN/mm² und ein β_{BZ} von 7 N/mm² zulässig. Im Falle des weicheren Schilfsandsteins, verbaut an Schloss Schillingsfürst, der eine ursprüngliche Festigkeit von nur 1-2 N/mm² und einen E-Modul von 1 kN/mm² besitzt, sind im Sinne der Wahrung der mechanischen Kompatibilität zwischen ungefestigtem und gefestigtem Material eine E-Modul von 5 kN/mm² und eine Biaxiale Biegezugfestigkeit von 5 N/mm² akzeptabel.

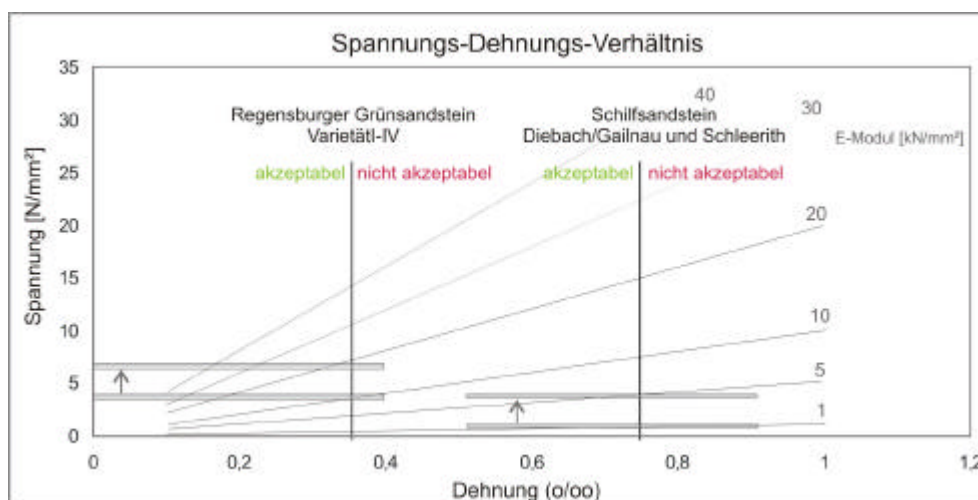


Abb. 8.52: Kalkulation der akzeptablen Zunahmen von Spannung und EModul in Folge einer festigenden Behandlung.

Im grünen Bereich (akzeptabel) beider Diagramme ist die Dehnung kleiner als die spezifische Dehnung und liegt somit im Bereich einer elastischen Verformung. Mit dem Überschreiten der spezifischen Dehnung verhält sich das Material weniger elastisch und in Folge einer Verformung kehrt das Gestein nicht mehr in den Ausgangszustand zurück. Eine Begünstigung der Verwitterung kann unter diesen Umständen nicht ausgeschlossen werden.

Mit dieser Darstellung (siehe Abb. 8.52) wird ebenso die Gefahr, die aus der Quellneigung des jeweiligen Materials erwächst, deutlich. Die dadurch verursachte Dehnung, insbesondere bei

tonreichen Gesteinen, liegt im Bereich von einem Prozent und somit für beide untersuchten Lithotypen weit außerhalb des Bereichs einer elastischen Verformung.

Die gleiche Überlegung kann auch herangezogen werden, um zu ermitteln, welche Spannungsunterschiede an Grenzflächen verschiedener Materialien bzw. zwischen gefestigten und ungefestigten Zonen, im Sinne der Wahrung der mechanischen Kompatibilität, vertretbar sind. Spannungen erwachsen aus Unterschieden der E-Module und verschiedenen Dehnungsneigungen. Diese Problematik findet in den folgenden Gleichungen Ausdruck:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot e_1 \quad (\text{Formel 13})$$

$$\sigma_2 = E_2 \cdot e_2 \quad (\text{Formel 14})$$

$$\sigma_{GF} = ?E \cdot ?e \quad (\text{Formel 15})$$

σ	Spannung
σ_{GF}	Spannung an der Grenzfläche
E	E-Modul
e	spezifische Dehnung

Sowohl die Festigkeit als auch die Geschwindigkeit der Belastung haben einen großen Einfluss auf die Verformung. Eine hohe Belastungsgeschwindigkeit erfordert eine hohe Festigkeit. Allerdings kann bei einer langsamen Belastung ein Spannungsabbau durch Kriechverformung stattfinden, wodurch es nicht zum Materialschaden kommt.

Zur Veranschaulichung dieser Problematik wurde im folgenden Diagramm (8.53) vereinfachend ein Unterschied zwischen dem weicheren Schilfsandstein (Material 1) und dem festeren Regensburger Grünsandstein (Material 2) von $?e = 0,4 \text{ ‰}$ angenommen.

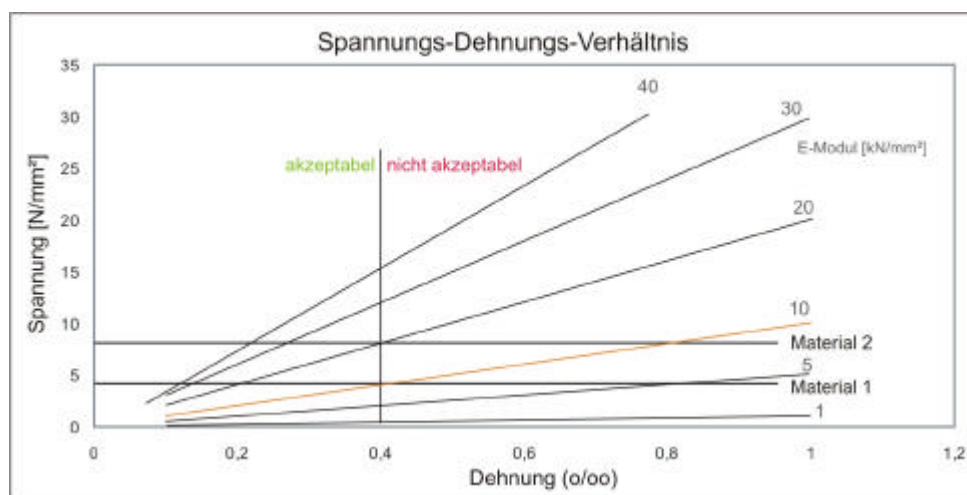


Abb. 8.53: Kalkulation der akzeptablen Zunahmen von Spannung und EModul an einer Grenzfläche zweier unterschiedlicher Materialien.

Dieses Beispiel zeigt, wenn das weichere Material 1 eine Biaxiale Biegezugfestigkeit von 4 N/mm^2 und einen E-Modul von 10 kN/mm^2 besitzt, das angrenzende festere Material 2 eine Festigkeit von 8 N/mm^2 und einen E-Modul von 20 kN/mm^2 haben darf. Mit dieser Kenntnis lassen sich auch Risiken am Übergang des gefestigten zum ungefestigten Material abschätzen.

8.4.3 Ultraschalluntersuchungen

Die Ultraschalldiagnostik dient der Erfassung des Festigkeitszustandes poröser Materialien und damit der Beurteilung weiterer mechanischer Eigenschaften.

Im Folgenden sollen nur die unbedingt notwendigen physikalischen Erscheinungen des Ultraschalls kurz beschrieben werden, soweit sie für das Verständnis des später erläuterten Versuchsaufbaus, der Versuchsdurchführung und der Interpretation der Ergebnisse erforderlich sind. Für weitere und vertiefende Beschäftigung mit der Physik des Ultraschalls seien KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER (1986), MILLNER U. A. (1987) und KUTTRUFF (1988) empfohlen. Die in diesem Kapitel beschriebenen Erscheinungen gelten nicht nur für den Ultraschall, sondern allgemein für mechanische Wellen (Schallwellen), von denen der Ultraschall einen Teilbereich darstellt. Mit Ultraschall werden die mechanischen Schwingungen und Wellen bezeichnet, die sich im Frequenzbereich von $f = 16 \text{ kHz}$ bis $f = 1000 \text{ MHz}$ bewegen (MILLNER U. A. 1987). Vereinzelt wird als untere Grenze auch 20 kHz angegeben (KUTTRUFF 1988). Allgemein stellen Wellen einen zeitlich und räumlich periodischen Vorgang dar, bei dem Energie übertragen wird. Ein Transport von Masseteilchen findet nicht statt. Die Masseteilchen schwingen nur um ihre Ruhelage. Dabei geben sie einen Anteil der Energie weiter, der andere wird durch Reibung absorbiert. Der Abstand zwischen zwei Teilchen, die sich auf benachbarten Wellenbergen oder -tälern befinden, in gleicher Phase schwingen, heißt Wellenlänge λ . In einer Flüssigkeit und einem Gas tritt ausschließlich in Ausbreitungsrichtung ein Schwingen der Massenteile auf. Diese Wellenform bezeichnet man als Longitudinalwelle (Druck- oder Kompressionswelle (siehe Abb. 8.54_a). In einem Festkörper kann zusätzlich die Transversalwelle (Scher-, Schub- oder Querwelle) auftreten. Bei dieser Wellenart schwingen die Massenteile senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (siehe Abb. 8.54_b). Diese beiden reinen Wellenarten treten nur im unbegrenzten Raum auf bzw. in einem Medium, dessen Abmessungen sehr viel größer als die Wellenlänge λ sind. Ist das Medium in einer Dimension begrenzt, können sich zusätzlich Oberflächen- oder Rayleighwellen bilden (siehe Abb. 8.54_c). In endlich großen Körpern setzt sich das Schallfeld in komplizierter Weise aus den genannten drei Wellenarten zusammen, und zusätzlich entstehen Dehn-, Biege- und Torsionswellen (in Stäben etc.). Biegewellen bilden sich in festen Körpern, wie z.B. Platten, die durch parallele Flächen begrenzt sind. Dehnwellen kommen in Körpern vor, die durch zwei Raumdimensionen begrenzt sind.

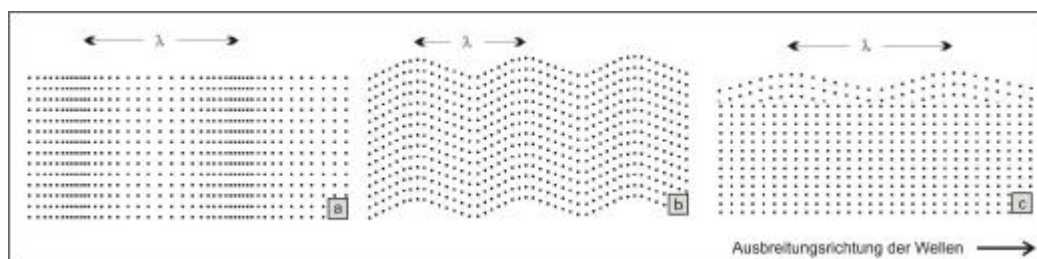


Abb. 8.54: Longitudinal-(a), Transversal-(b) und Oberflächenwelle

Für die physikalischen Größen Frequenz f , Wellenlänge λ und die Schallgeschwindigkeit v gilt die Beziehung (Formel 16):

$$v = f \cdot \lambda \quad (\text{Formel 16})$$

Für die Werkstoffprüfung ist das Verhalten von Schallwellen an Grenzflächen wichtig, da z.B. in folgenden drei Bereichen Wirkungen von Grenzflächen auftreten:

- Bei der Übertragung von einem Schallerzeuger (Impulsgeber) auf den Probekörper und umgekehrt beim Schallempfänger besteht eine Grenzfläche.
- Die Außenflächen des Probekörpers stellen Grenzflächen für den Schall dar.
- Fehlstellen (z.B. luftgefüllte Hohlräume) im Probekörper wirken auf die Schallausbreitung ebenfalls als Grenzfläche.

8.4.3.1 Longitudinalwellenmessung

In unendlich dimensionierten, homogenen und isotropen Festkörpern ist die Ultraschallgeschwindigkeit [v_L] der Longitudinalwelle (p-Welle) das Resultat der mechanischen Eigenschaften des durchlaufenen Mediums. Die Gleichung 17 zeigt die Abhängigkeit von Laufzeit und E-Modul. Mit jeder Veränderung im Material bzw. an Grenzflächen verändert sich die Laufzeit des Ultraschalls. Die p-Welle wird teilweise reflektiert und absorbiert.

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (\text{Formel 17})$$

v_L	Longitudinalwellengeschwindigkeit
E	Elastizitätsmodul
ρ	Rohdichte
μ	Poissonzahl, Querdehnungszahl

Für verschiedene Kalksteine und auch Sandsteine wurden lineare Korrelationen von Ultraschallgeschwindigkeit zu Porosität, Druckfestigkeit und Dichte gefunden (BARTSCH 1989).

Das Ausbreitungsmedium der Longitudinalwelle muss unendlich sein, d.h. in der Praxis, dass die Durchmesser des durchschallten Materials mindestens das 1,5-fache der Wellenlänge λ betragen müssen (RENTSCH & KROMPHOLZ 1961). Für eine Untersuchung kleindimensionierter Proben, entsprechend den benutzten Bohrkernen, ist aufgrund der benötigten kurzen Wellenlängen die Verwendung hochfrequenter Impulsgeber notwendig. In diesem Fall wurden für die Messungen an den Bohrkernen mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 4,5 cm als Impulsgeber ein 350 kHz Kompressionswellenschwinger mit einer Wellenlänge von 1 cm verwendet. Impulsgeber und Empfänger sind piezoelektrische Elemente.

Die Messung der v_L – Wellengeschwindigkeit wurde stets an einheitlich konditionierten Proben (22°C und 45 % r. Lf.) durchgeführt, um klimainduzierte Schwankungen der v_L - Wellengeschwindigkeiten zu unterbinden und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt der Grünsandsteinproben geht mit einer Zunahme der Ultraschallgeschwindigkeit einher, wie in einer Versuchsmessung an einer wassergesättigten Probe ermittelt werden konnte. Die Überbrückung der Poren mit Wasser steigert die integrale Impulsgeschwindigkeit, da die Schallgeschwindigkeit im Wasser (1,48 km/s) viereinhalb mal höher ist als in Luft (0,33 km/s) (ESBERT ET AL. 1989). Für tonige Sandsteine sind aber auch abnehmende Schallgeschwindigkeiten bei

zunehmenden Feuchtigkeitsgehalten zu verzeichnen (SIMON 2001). Die Ursache dieses Verhaltens liegt in der begrenzten Kompressibilität von Wasser im Vergleich zu Luft (NUR & SIMMONS 1969). Weiterhin ist denkbar, dass die Tone durch die Wasseraufnahme quellen bzw. ihre Oberfläche vergrößern und somit an Dichte verlieren, was sich wiederum bei Materialien mit höheren Tongehalten in einer Abnahme der Longitudinalwellengeschwindigkeit äußern könnte.

Neben der herkömmlichen Bestimmung der Longitudinalwellengeschwindigkeit wurde an ausgewählten Proben auch die Dehnwellenmessung zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls eingesetzt.

Methodik

Wie bereits erwähnt, ist der wichtigste Parameter bei der Ultraschallmessung die Ausbreitungsgeschwindigkeit (v_L) der Longitudinalwelle. Die Ultraschalllaufzeit wird aus der Messstrecke und der Signallaufzeit berechnet (siehe Formel 18).

$$v_L = \frac{l}{t} \quad \text{(Formel 18)}$$

v_L Longitudinalwellengeschwindigkeit [km/s]

l Messdistanz [mm]

t Signallaufzeit [μ s]

Die Messungen wurden mit einem Ultraschallgenerator vom Typ USG 30 der Fa. Krompholz Geotron Elektronik durchgeführt. Das Eingangssignal ist mit dem von Geotron Elektronik empfohlenen Signalverstärker optimiert worden. Da Bohrkerne eine gebogene Mantelfläche haben, ist für eine Optimierung der Kontaktfläche der Einsatz relativ spitzer Schallköpfe notwendig. Zur Ankopplung der Prüfköpfe an die Bohrkernoberfläche wurde jeweils etwas elastisches Silicon (Plastikfermit) verwendet. Der dadurch herbeigeführte Fehler wurde über einen Korrekturfaktor ausgeglichen. Eine spezielle Messvorrichtung ermöglichte eine genaue Positionierung der Bohrkerne zwischen den Prüfköpfen sowie die reproduzierbare Einstellung des Ankopplungsdruckes (1 bar) an die Probe. Das Oszilloskop ist mit einem Computer verknüpft, wo Messdaten gespeichert und mit der Software LightHouse 2000-SM nachbearbeitet werden können (vergleichende Darstellung, FFT). Der Messfehler bei dieser Messanordnung ist $< 5 \%$.

Es entstand eine detaillierte Aufnahme der Longitudinalwellengeschwindigkeiten an zylindrischen Proben (Bohrkerne) entlang eines definierten Tiefenprofils senkrecht und parallel der sedimentären Schichtung der Gesteine (siehe Abb. 8.55). Die Messungen erfolgten mittels der Durchschallungsmethode (transmission method). Grundlegende Untersuchungen und Beschreibungen zur Durchschallungsmessung an mineralischen Baustoffen sind z.B von NEISECKE (1974) und HILLGER (1983) beschrieben. Schallsender und -empfänger sind an genau gegenüberliegenden Seiten des Probekörpers angebracht. Somit entspricht der Schallweg maximal der Bauteildicke und erfährt keine zusätzliche Schwächung aufgrund einer langen Distanz, wie es beispielsweise bei der Reflexionsmessung der Fall ist.

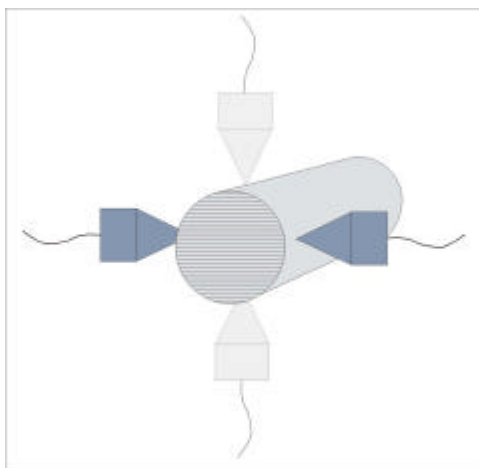


Abb. 8.55: Ultraschallanalytik – Messung der Longitudinalwellengeschwindigkeit entlang des Tiefenprofils.

Insgesamt wurden in diesem Projekt 1500 einzelne Ultraschalllaufzeitmessungen durchgeführt. Die Tiefenprofile gliederten sich in folgende Messschritte: 0,25; 0,5; 1; 1,5; 2, 2,5; 3 bis 7 bzw. 12 cm. Im Vorfeld der Messungen sind die vorgesehenen Messpunkte auf den Bohrkernen markiert worden. Obwohl die Untersuchungen mit einem spitzen Impulsgeber (Typ, UPG-T, 350 kHz) und einem spitzen Empfänger (Typ USE-T) erfolgten, bereitete die Positionierung der Messköpfe im Bereich des ersten Zentimeters Schwierigkeiten, wo zum Zweck einer genauen Auflösung versucht wurde, drei Messungen auszuführen. Demnach gibt es Überschneidungen der bei den Messereichen in 0,25; 0,5 und 1 cm dargestellten Charakteristika.

Den durchgeführten Messungen liegen keine vergleichbaren Ergebnisse zu Grunde, da diese Methode an den beiden untersuchten Objekten bislang nicht durchgeführt worden ist.

8.4.3.1.1 Ergebnisse

8.4.3.1.1.1 Regensburger Grünsandstein

Funcosil OH und Funcosil H

In den folgenden Abbildungen (8.56_a-d) sind die Resultate der Behandlung des Regensburger Grünsandsteins (Varietäten I-IV) mit Funcosil OH bzw. Funcosil H dargestellt. Die Werte des unbehandelten Materials geben die Staffelung der Festigkeiten von Varietät I zu Varietät IV wieder. Die v_L des unbehandelten Materials liegen zwischen 3,7 km/s für Varietät I und 2,8 km/s für Varietät IV.

Von den anzustrebenden Parametern einer konservierten Fassade ausgehend, die denen des unbehandelten, unverwitterten Materials entsprechen sollten, zeigen die Kurven des altbehandelten Zustands (siehe Abb. 8.56_a, b, d) durchaus eine fortwährende Effektivität der ursprünglichen Konservierung an. Im Beispiel der Varietät III (siehe Abb. 8.56_b) kann nicht exakt gesagt werden, ob entweder die ursprüngliche Maßnahme nur unzureichend wirksam war, oder die Verwitterung zum Rückgang der Longitudinalgeschwindigkeit gegenüber tieferen Fassadenbereichen geführt hat.

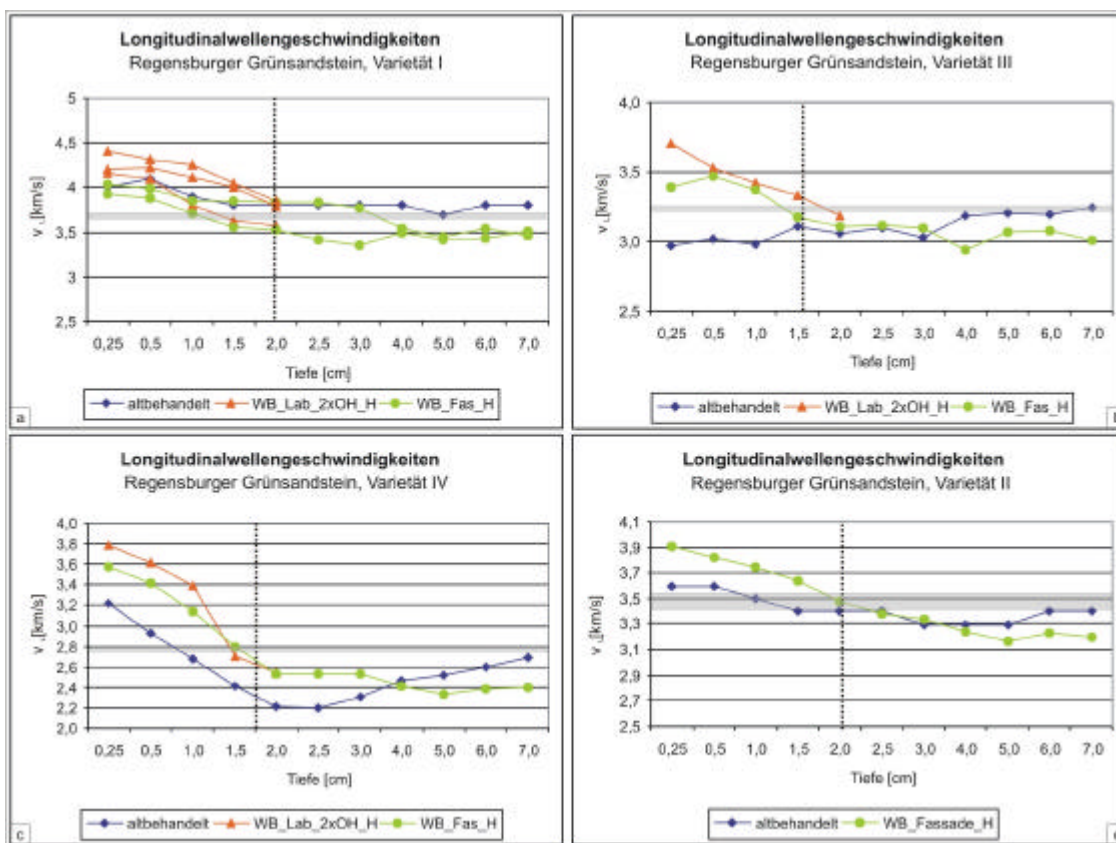


Abb. 8.56 (a-d): Longitudinalwellengeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Wiederbehandlung mit Funcosil OH und Funcosil H, Regensburger Grünsandstein, Varietät IV. Die gepunktete Linie markiert die angenommene Eindringtiefe und der semitransparente Balken den Wert des unbehandelten Materials.

Auf allen Varietäten bewirkt die erneute Behandlung eine deutliche Steigerung der Longitudinalwellengeschwindigkeiten im Bereich der vorderen 1,5-2,0 cm. Entsprechend der Kurvenverläufe scheinen die Substanzen bis in diese Tiefe eingedrungen zu sein. Generell führte die doppelte Applikation der Schutzmittel zu höheren Geschwindigkeiten als die einfache Behandlung an der Fassade. Die Erhöhungen der Geschwindigkeiten in Folge der Wiederbehandlung im Labor liegen zwischen 250 und 700 m/s, wobei die größten Steigerungen, relativ zum jeweils altbehandelten Material, bei den weniger festen Varietäten III und IV (siehe Abb. 8.56_c und 8.56_d) detektiert werden konnten.

Im Bild 8.56_c sind die Ergebnisse der Varietät IV dargestellt. Der Verlauf der Kurve des altbehandelten Materials (blau) zeigt an, dass bereits im Rahmen der ersten Konservierungsmaßnahme in Bezug auf das unbehandelte, unverwitterte Material eine Überfestigung bewirkt wurde. Die Geschwindigkeit im Bereich des vorderen Zentimeters liegt deutlich über der im Inneren der Fassade. Eine Abschätzung, inwieweit die Exposition der Fassade in den vergangenen 15 Jahren zu einem Rückgang der Festigkeit – in Korrelation mit der Longitudinalgeschwindigkeit – geführt hat, kann aufgrund fehlender Vergleichswerte nicht gemacht werden.

Die Wiederbehandlungssubstanzen entfalteten im Bereich zwischen 0 bis 1,5-2 cm ihre Wirkung. Die gesteigerten v_L folgen dem Verlauf des Geschwindigkeitsprofils des altbehandelten Materials. Diese Beobachtung belegt, dass die eingebrachten Schutzmittel bis in eine Tiefe von 1,5-2 cm effektiv wirken.

Zur Visualisierung der Longitudinalwellengeschwindigkeiten der einzelnen Bohrkerns wurde ein

Programm geschrieben, welches die Geschwindigkeiten einem Farbwert zuordnet. Die Farben werden zwischen den Ultraschallgeschwindigkeiten einer jeden einzelnen Probe interpoliert. Aus diesem Grund gelingt zwar kein quantitativer Vergleich zwischen verschiedenen Bohrkernen, aber es können relative Festigkeitszunahmen und dementsprechend die Wirkungstiefen abgelesen werden. Das folgende Beispiel visualisiert die in Abbildung 8.56_b wiedergegebene Entwicklung der Longitudinalwellengeschwindigkeit vor und nach der Wiederbehandlung an der Fassade.

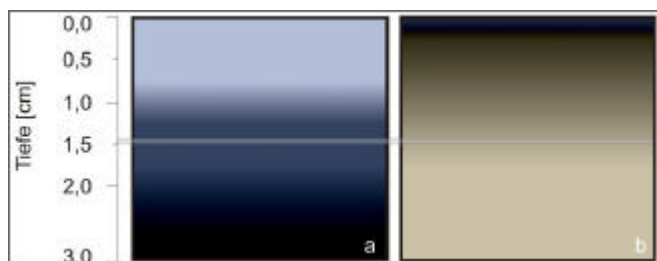


Abb. 8.57 (a-b): Visualisierung der Longitudinalwellengeschwindigkeiten vor (a) und nach (b) der Wiederbehandlung im Labor (2x Funcosil OH +Funcosil H), Regensburger Grünsandstein, Varietät III). Die semitransparente graue Linie demonstriert die in Abbildung 8.56_b markierte Eindringtiefe.

Im Bereich der beiden vordersten Messpunkte (0,25 und 0,5 cm) ist in Folge der Wiederbehandlung (8.57_b) eine deutliche Geschwindigkeits- und somit Festigkeitszunahme im Vergleich zum altbehandelten Material (8.57_a) zu erkennen. Die Eindringgrenze, die aus dem Kurvenverlauf in Abbildung 8.56_b geschlussfolgert wird, kann mit dieser Darstellungsweise nahezu bestätigt werden. Kleinere Abweichungen liegen in den sehr geringen Geschwindigkeitsunterschieden, die hier nicht mehr aufgelöst werden können, begründet.

Funcosil OH, verdünnt

Die beiden Diagramme in Abbildung 8.58 zeigen die Resultate der Wiederbehandlung mit dem verdünnten Festiger Funcosil OH mit nachfolgender Hydrophobierung auf den Varietät III und IV. Die Wirkung der ursprünglichen Behandlung auf Varietät III (8.58_a) scheint noch effektiv zu sein, wohingegen entweder die Qualität der ersten Konservierungsmaßnahme auf Varietät IV (8.58_b) unzureichend war bzw. die Verwitterung die v_L im Vergleich zum unbehandelten Material absinken ließ. Die erwünschte Steigerung der Eindringtiefe konnte mit der Ultraschallmessung nicht bestätigt werden, obgleich beispielsweise mit der μ -Wert-Bestimmung ein tieferreichender Einfluss des verdünnten Schutzmittels detektiert wurde. Der Verlauf der Kurven gibt an, dass der verdünnte Festiger (8.58_b) nur bis 1,3 cm eingedrungen zu sein scheint, wohingegen das unverdünnte Agens Auswirkungen bis in eine Tiefe von 2 cm zeigt (siehe Abb. 8.56_c). Die Steigerung der v_L in Folge der zweifachen Laborapplikation betrug in beiden Fällen ungefähr 500 m/s. Die Behandlung der Fassade vermochte nur einen sehr geringen Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit zu bewirken.

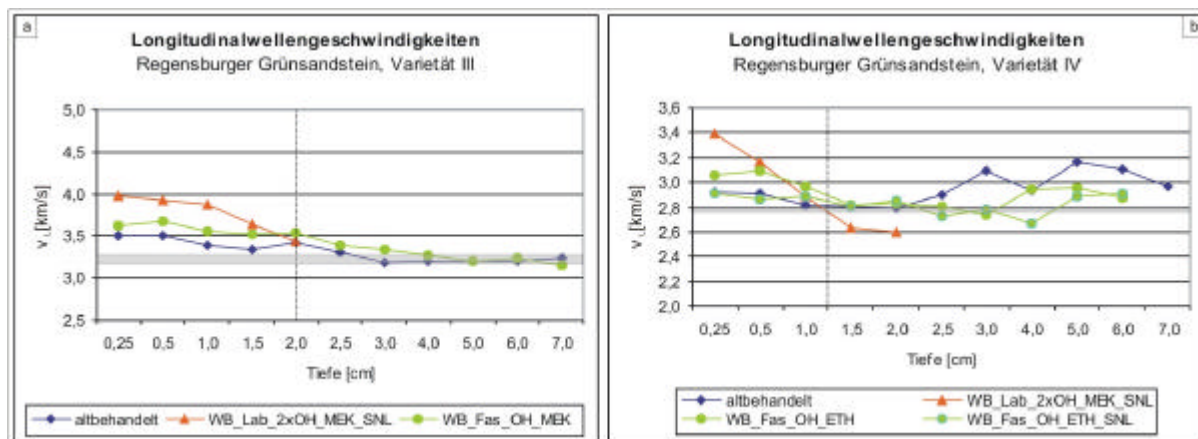


Abb. 8.58 (a-b): Longitudinalwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wiederbehandlung mit verdünntem Fungosil OH und nachfolgender Hydrophobierung mit Fungosil SNL, Regensburger Grünsandstein, Varietät III-IV. Die gepunktete Linie markiert die angenommene Eindringtiefe und der semitransparente Balken den Wert des unbehandelten Materials.

Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt

Auch für diesen Quader gibt das Tiefenprofil der Longitudinalwellengeschwindigkeit des altbehandelten Materials eine akzeptable Wirksamkeit des ursprünglich verwendeten Schutzmittels wieder (siehe Abb. 8.59). Die Applikation des elastifizierten Festigers Remmers 300E führte nur in der unverdünnten Anwendung bei der doppelten Laborapplikation zu einer Steigerung der v_L um 250 m/s.

Die Geschwindigkeitsprofile der Fassadenbehandlung, die sowohl verdünnt als auch unverdünnt vorgenommen wurde, zeigen entsprechend dem Verlauf der Kurven sogar eine Absenkung an. Die Tatsache, dass die Kurve des altbehandelten Zustandes selbst in einer Tiefe von 7 cm den Wert des unbehandelten Materials um 400 m/s übersteigt, liegt vermutlich in der Heterogenität des Gesteins begründet. Die entsprechenden Bohrkern wurden zwar dem gleichen Quader entnommen, dennoch sind Schwankungen nicht auszuschließen, zumal Varietät II auch Bioklasten enthält.

Zusammenfassend betrachtet wurden durch die Wiederbehandlung des Regensburger Grünsandsteins in deutlicher Abhängigkeit von Varietät und appliziertem Schutzmittel bzw. Wirkstoffgehalt Steigerungen der Longitudinalwellengeschwindigkeit von 200-800 m/s erzielt.

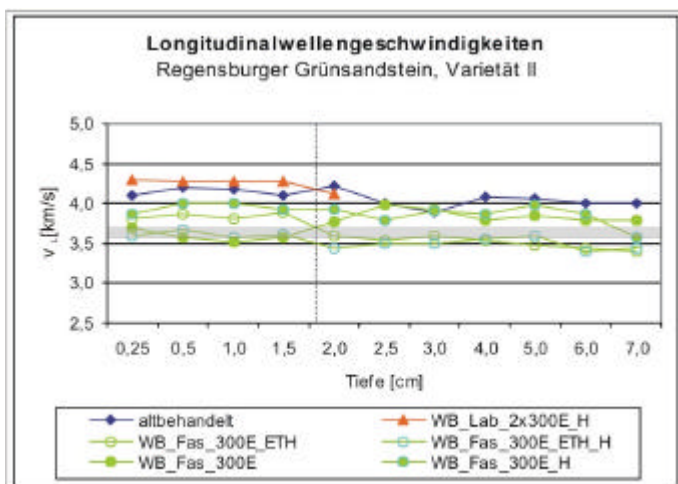


Abb. 8.59: Longitudinalwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wiederbehandlung mit Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt, Regensburger Grünsandstein, Varietät II. Die gepunktete Linie markiert die angenommene Eindringtiefe und der semitransparente Balken den Wert des unbehandelten Materials.

Gegenüberstellung der Longitudinalgeschwindigkeit und der Rohdichte

Die Ultraschallgeschwindigkeit ist direkt abhängig von der Dichte des durchdrungenen Materials. Dennoch korrelieren die Longitudinalwellengeschwindigkeiten nur bedingt mit der entsprechenden Rohdichte. Beispielsweise führte die Applikation von Remmers 300E relativ zur größten Steigerung der Rohdichte (siehe Abb. 8.60_b) gegenüber dem altbehandelten Zustand.

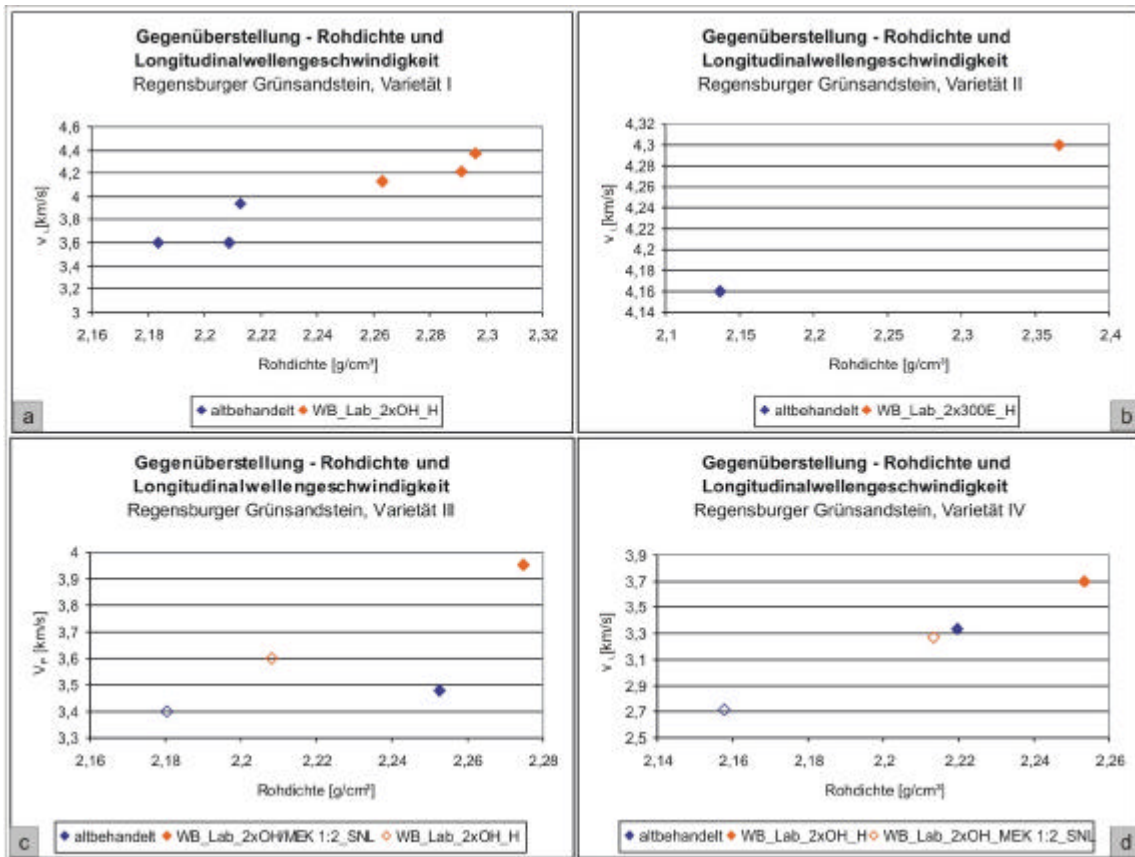


Abb. 8.60 (a-d): Longitudinalwellengeschwindigkeit als Funktion der Rohdichte mit Hinblick auf die Wiederbehandlung im Labor, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV, semitransparent gezeichnete Messpunkte markieren Untersuchungen an einem anderen Quader.

Die v_l stieg jedoch nur geringfügig an (siehe Abb. 8.59). Die Behandlung der Varietät III mit verdünntem Fungosil OH ging dagegen mit einer relativ geringen Steigerung der Rohdichte einher, wohingegen die Ultraschallgeschwindigkeit deutlich anstieg (siehe Abb. 8.60_c und 8.58_a). Durch das Einbringen des Kieselgels in die vergleichsweise porösere Varietät III (bzw. Varietät IV, siehe Abb. 8.60_d), was wegen der geringen Mächtigkeit des Films nur in unwesentlichem Maße zur Veränderung der Rohdichte beiträgt, ist allerdings der Kontakt zwischen den einzelnen Mineralkörnern optimiert, wodurch die Longitudinalwellengeschwindigkeit und auch der EModul ansteigt. Betrachtet man die Relationen zwischen den Veränderungen der Rohdichte und der Longitudinalwellengeschwindigkeiten so fällt auf, dass sich die Geschwindigkeiten um weitaus größere Beträge ändern.

Die Beispiele in Abbildung 8.60 geben die direkte Proportionalität von Dichte und Longitudinalwellengeschwindigkeit wieder - mit zunehmender Dichte des Materials steigt auch die Longitudinalwellengeschwindigkeiten an, allerdings sind die Intensitäten der jeweiligen Steigerung

unterschiedlich. Die deutlichste Erhöhung der v_L wurde durch die Wiederbehandlung der ohnehin dichten Varietät I mit Funcosil OH (2x) und H bewirkt.

8.4.3.1.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Die folgenden beiden Abbildungen (8.61_a, b) stellen die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen dar, die an Original- und Austauschmaterial von Schloss Schillingsfürst vorgenommen worden sind. Anders als die Resultate der Biegezugfestigkeit, weisen die Longitudinalwellengeschwindigkeiten des wiederbehandelten Materials - abgesehen von Funcosil SNL an zwei verschiedenen Proben - nicht auf einen Festigkeitszuwachs hin. Diese Erkenntnis ergab der direkte Vergleich der Geschwindigkeiten der altbehandelten Bohrkerns vor und nach der Applikation des neuen Schutzmittels. Die beiden Fälle, in denen es zu einer Steigerung der Geschwindigkeit durch die Behandlung mit Funcosil SNL kam, wurde die Substanz auf Quadern aus Austauschmaterial (8.61_b, gelbe Kurven) appliziert, die bereits höhere Ausgangsgeschwindigkeiten aufwiesen. Die Steigerung im Vergleich zu altbehandelten Material betrug zwischen 250 und 500 m/s.

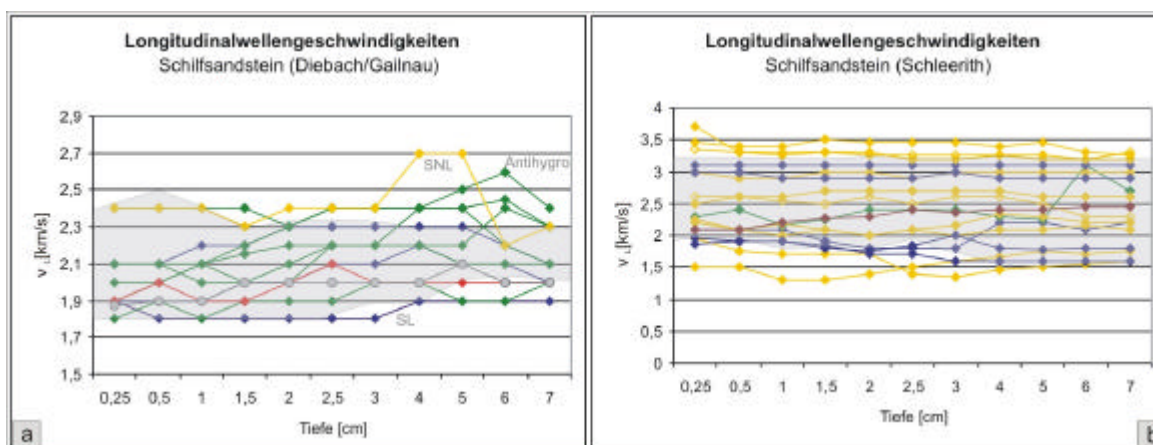


Abb. 8.61 (a-b): Longitudinalwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Wiederbehandlung und im Vergleich zum Zustand des ursprünglich behandelten Materials (semitransparente graue Zone). Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith. (Folgende Farben entsprechen einer Wiederbehandlung mit: gelb - Funcosil SNL, blau - Funcosil SL, grün - Antihydro (8.61_a), Funcosil WS (8.61_b), rot - Silex OH, braun - UNIL 290, grau - unbehandelt).

Da die v_L des altbehandelten Zustandes aller untersuchten Proben sehr stark variieren, wurden sie in den Diagrammen (8.61) als Schwankungsbereich (semitransparente graue Zone) dargestellt. Die Geschwindigkeiten nach der Wiederbehandlung liegen zumindest im Bereich der wahrscheinlichen Eindringtiefe der Substanzen alle in dieser Zone. Sogar die Applikation von verdünntem Silex OH auf Originalmaterial (siehe Abb. 8.61_a, roter Graph) liegt eher an der Untergrenze der Geschwindigkeiten, die im Jahr 2001 ermittelt wurden. Im direkten Vergleich zu dem Zustand des Quaders vor der Applikation des Festigers konnte lediglich ein Anstieg von knapp 100 m/s gemessen werden, was noch im Bereich des Messfehlers liegt. In wenigen Fällen wurden Geschwindigkeiten ermittelt wurden, die unterhalb des Schwankungsbereichs der altbehandelten Werte liegen (8.61_b), ist wahrscheinlich auf wechselnde Tongehalte in den Proben (siehe Kapitel 6.4) zurückzuführen. Beim Vergleich zwischen Originalmaterial aus Diebach/Gailnau und Austauschmaterial aus Schleerith fällt jedoch deutlich auf, dass die Longitudinalwellengeschwindigkeiten des Austauschmaterials einen

größeren Geschwindigkeitsbereich abdecken und insgesamt höher liegen. Wie bereits bei den Untersuchungen der Biaxialen Biegezugfestigkeit festgestellt wurde, sind die Festigkeiten des Austauschmaterials höher als die des Originalmaterials, was durch die Ultraschallmessungen bestätigt werden kann.

Eine Aussage bezüglich der Eindringtiefen kann anhand der Kurvenverläufe nicht eindeutig angegeben werden.

Aus den Beobachtungen kann geschlossen werden, dass die Methode der Longitudinalwellengeschwindigkeit nicht geeignet ist, um applizierte Hydrophobierungsmittel zu detektieren und deren Einfluss auf das Gestein zu bestimmen.

8.4.3.2 Fourier-Transformation des Zeitsignals der Longitudinalwellengeschwindigkeitsmessung

Zur Auswertung des empfangenen Ultraschallsignals wurde in der Vergangenheit in der Regel nur die Messung der Laufzeit t , die der Impuls für die Probendicke (oder Bauteildicke) l benötigt, herangezogen. Seit einigen Jahren werden Ultraschallgeräte gebaut, die zusätzlich noch eine Frequenzanalyse durchführen können. Dabei wird der empfangene Schallimpuls, der einen Frequenzumfang von z.B. 350 kHz besitzt, in mehrere Frequenzbereiche zerlegt. Die prinzipielle Transformation eines Signals von der Zeit- in die Frequenzebene zeigt schematisiert folgende Abbildung (8.62).

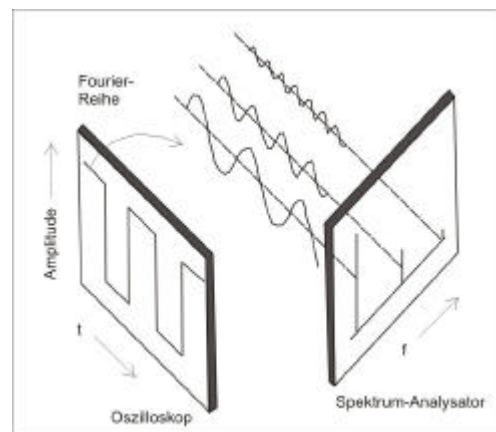


Abb. 8.62: Prinzipielle Arbeitsweise eines Spektrumanalysators (nach Elektronik-Katalog, Fa. Rohde & Schwarz)

Jedes periodische Signal lässt sich als Überlagerung von Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden darstellen (Fourierreihe). Die Amplituden der verschiedenen Sinuskurven werden dann nach ihrer Frequenz ausgewertet und als Amplitudenspektrum über der Frequenz wiedergegeben. Damit ist das Signal von der Zeit- auf die Frequenzachse transformiert worden.

Grundsätzlich treten bei jeder Schallausbreitung Energieverluste auf. Eine sich im Werkstoff ausbreitende Schallwelle wird daher auf ihrem Weg zunehmend geschwächt. Die Schallintensitäten nehmen entsprechend ab (JONAS 1996).

Der Schalldruck p und der Teilchenausschlag ζ ($\zeta_{\max} = \text{Amplitude}$) sind sowohl bei ebenen Wellen als auch bei Kugelwellen durch folgende Gleichung (19) miteinander verbunden:

$$p = \rho \cdot v \cdot \omega \cdot \zeta \quad (\text{Formel 19})$$

Bei ebenen Wellen ist das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit der Schallwellenwiderstand (spezifische Schallimpedanz oder Schallwiderstand) (siehe Formel 20) (JONAS 1996).

$$\rho \cdot v = z \quad (\text{Formel 20})$$

Bei der Durchschallung treten in Abhängigkeit des Substrates z.T. deutliche Intensitätsverluste durch Absorption und Streuung (Grenzflächen) auf. Hierin lag der Ansatz für die vorgenommenen Untersuchungen - Schutzmittel bzw. Gele, die einen höheren Schallwiderstand besitzen als Luft, werden in den Porenraum eingebracht, der zuvor luftgefüllt gewesen ist oder nur mäßig von einem Gelfilm überkleidet war. Diese Modifikation des Porenraums sollte zwangsläufig Veränderungen in den Frequenzspektren nach sich ziehen. Die Intensitätsverluste müssten aufgrund unterschiedlicher Absorptions- und Streuungserscheinungen verschieden stark ausfallen.

Um die einzelnen Messungen miteinander vergleichen zu können, ist die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse von großer Bedeutung. Optimale Voraussetzungen dafür sind eine konstante Kraft, mit der die Prüfköpfe gegen den Probekörper gepresst werden und die grundsätzliche Verwendung eines gleichartigen, leicht verformbaren Kopplungsmittels, um Luft auszuschließen bzw. kleine Poren zu verschließen (JONAS 1996). Diese Bedingungen sind im Rahmen dieser Messungen erfüllt gewesen.

Methodik

Wie sich im Anschluss an die durchgeführten Ultraschallmessungen herausstellte und durch Kontrollmessungen bestätigt werden konnte, besitzt der verwendete schmalbandige Impulsgeber eine Impulslaufzeit von ungefähr 5 ms. Damit ist die Laufzeit der untersuchten Bohrkerns, die ungefähr 15-24 μs beträgt, bei weitem überschritten. Aufgrund des extrem langen Ausschwingens des Eigenimpulses des Gebers ist es schwierig, anhand der Frequenzmuster verlässliche Rückschlüsse auf die durch die Wiederbehandlung der Proben hervorgerufene Alteration des Porenraums zu ziehen. Es ist daher bei Auswertung des gesamten Signals nahezu unmöglich, zwischen multiplen Impulsen oder Überlagerungen und Absorption und Streuung, hervorgerufen durch Charakteristika des Gesteins, zu unterscheiden. Die p-Welle benötigt ungefähr die ersten 18 μs , um den Bohrkern vom Impulsgeber zum Empfänger zu durchlaufen (siehe Abb. 8.63). Dieser Bereich entspricht der Kurve bis zum ersten Nulldurchgang (siehe Abb. 8.64). Um die Wahrscheinlichkeit mehrfacher Reflektionen an der Außenfläche des Probekörpers zu vermeiden, wurde die Entscheidung getroffen, nicht das gesamte Signal zu transformieren, sondern nur den Zeitraum der doppelten Laufzeit.

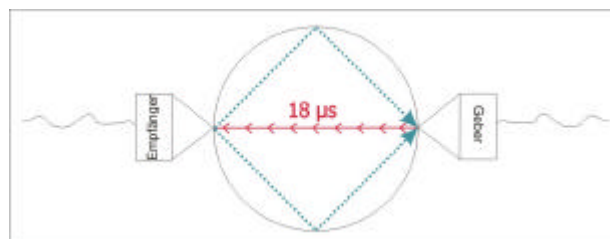


Abb. 8.63: Visualisierung der Longitudinalwelle beim Durchlaufen eines Bohrkerns zwischen Impulsgeber und Empfänger.

Dieses umfasst den Abschnitt der Messkurve vom ersten Nulldurchgang bis zu weiteren 18 μs (siehe Abb. 8.64). Der Messbereich der doppelten Laufzeit, der jeweils fouriertransformiert wurde, ist durch den grünen Kreis markiert.

Ein Vergleich verschiedener Messungen erfordert, dass alle Signale gleich lang sind. Da die Laufzeiten der einzelnen Messungen entlang des Bohrkerndurchmessers zwischen 16 μs und 21 μs schwanken, wurde für eine optimale Vergleichbarkeit der Signale ein Durchschnittswert von 18 μs aus allen ermittelten Laufzeiten errechnet.

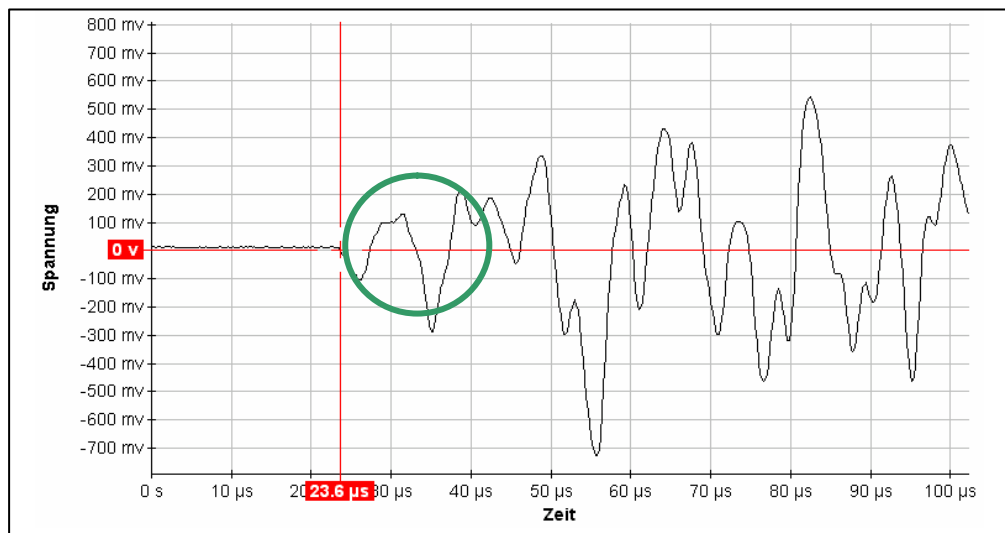


Abb. 8.64: Bereich der doppelten Laufzeit, der zum Zweck einer Fourier-Transformation aus dem jeweiligen Datensatz der Messung herauskopiert wurde, um ihn separat in Origin 6.0 zu transformieren.

Ein Beispiel in Abbildung 8.65 zeigt das Resultat der Fourier-Transformation einer kompletten Messung, die mit den oben beschriebenen 350 kHz Schallköpfen durchgeführt wurde. Es sind deutlich durch Überlagerungseffekte hervorgerufene Struktureffekte erkennbar. Der Pfeil markiert einen grünen Peak, der sich höchstwahrscheinlich von Interferenzen oder reflektierten Wellen ableitet. Aufgrund des anscheinend endlosen Ausschwingens des Geberimpulses kann keine Aussage bezüglich des Anlasses für die Reflektion der Wellen gegeben werden. Das sinnvolle Positionieren eines Analysefensters (z.B. Hanning Fenster) auf einem solchen Signal ist nahezu unmöglich.

Ein Vergleich verschiedener Materialzustände, was ohnehin schwierig sein kann, sollte nicht auf einer derartig unschlüssigen Frequenzanalyse beruhen.

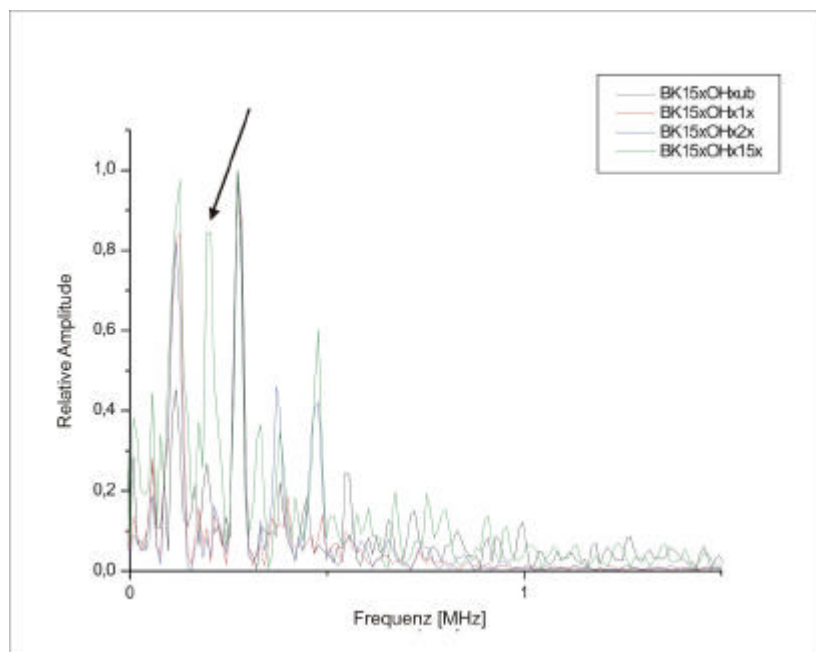


Abb. 8.65: Beispiel der Transformation eines kompletten Signals, aufgenommen mit den beschriebenen 350 kHz Prüfköpfen. Der Pfeil markiert einen durch Überlagerungseffekte hervorgerufenen Struktureffekt.

Aus diesem Grund wurde der Versuch unternommen, nur die doppelte Laufzeit des Signals auszuwerten. Die FFT ist zwar auch mit der Software des Ultraschallgeräteherstellers (Fa. Krompholz) möglich, allerdings kann nur das gesamte Signal transformiert werden. Aus diesem Grund ist das Programm Origin 6.0 hinzugezogen worden. Für die Auswertung wurde der Datenblock von 18 μ s einer jeden Messung kopiert und für die separate FFT in das Programm Origin 6.0 eingefügt. Als Analysefenster ist das Hanning Fenster (Standardfenster) gewählt worden. Um eine Gegenüberstellung der Messungen, die zu einem Bohrkern bzw. einem Quader gehören, zu ermöglichen, wurden die Daten auf das Maximum der jeweils „altbehandelten“ Probe normiert. Die Abbildungen zeigen die Powerspektren jeweils zusammengehöriger Messungen.

Für diese Auswertungsmethode fanden ausschließlich Proben des Regensburger Grünsandsteins Verwendung.

8.4.3.2.1 Ergebnisse

Da man davon ausgehen kann, dass die Qualität der Kornkontakte direkten Einfluss auf die Dämpfung der Ultraschallwelle hat, kann in Folge einer Konservierungsmaßnahme (bzw. Wiederbehandlung) mit Veränderungen der Frequenzspektren gerechnet werden. Eine Schallwelle, die polykristallines Material durchläuft, tritt an jeder Korngrenze in ein Medium mit anderen physikalischen Eigenschaften und somit anderen Dämpfungskoeffizienten ein. Die Dämpfung ist stark von der Viskosität des Materials abhängig. Je niedriger die Viskosität, umso geringer ist die Dämpfung. Und je niedriger die Dämpfung ist, umso besser können die höheren Frequenzen das Medium durchlaufen (KUTTRUFF 1988). Der Schall wird an diesen Grenzen partiell reflektiert, gestreut und absorbiert, was auf einen geringeren Energiegehalt der jeweils resultierenden Welle hinausläuft.

Für diese Untersuchung wurden jeweils die Messungen des Bereiches bis 0,5 cm Fassadentiefe herangezogen (1. Bohrkernscheibe).

Es sind stets gleiche Ankopplungsbedingungen gewählt worden (Plastikfermit und 1 bar Anpressdruck). Somit ist die Wahrscheinlichkeit, dass verschiedene Dämpfungen der Amplituden auf variable Messparameter zurückzuführen sind, nahezu auszuschließen.

Funcosil OH

Wie in Abbildung 8.66 zu erkennen ist, führte die zweimalige Wiederbehandlung des Materials, in diesem Fall Varietät I, im Vergleich zum altbehandelten Material zu einer Dämpfung des Signals.

Die Hauptpeaks beider Messungen liegen ungefähr bei 100 kHz. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um die Querschwingung des Ultraschallwandlers. Bei dem Versuch, die y-Achse stärker herauszuzoomen, erhält man bei ungefähr 400 kHz einen weiteren Frequenzausschlag. Dieser Peak dürfte der Dickenschwingung des Wandlers entsprechen. Wie bereits erwähnt, werden die verwendeten Schallköpfe mit 350 kHz angegeben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde jedoch auf diese Darstellung verzichtet.

Die Form der FFT Spektren zeigt sehr deutlich, dass der Ultraschall mit einem schmalbandigen, sehr langen Impuls angeregt wurde.

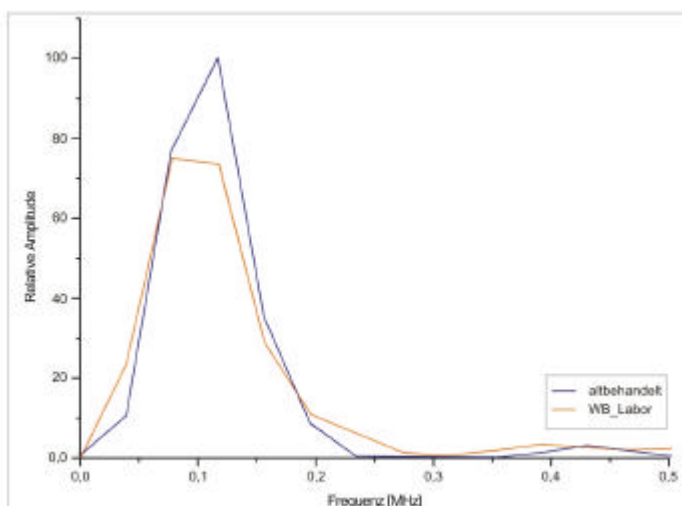


Abb. 8.66: Gegenüberstellung der Frequenzspektren des Zustandes der altbehandelten und im Labor wiederbehandelten (2x Funcosil OH+H) Probe. Es wurde die Laufzeit von 18 μ s ausgewertet. Regensburger Grünsandstein, Varietät I. Die Kurve des wiederbehandelten Zustandes zeigt eine deutliche Dämpfung gegenüber der altbehandelten.

Funcosil OH, verdünnt

In folgender Darstellung wird der Einfluss der Applikation des verdünnten Festigers Funcosil OH vorgestellt. Anders als erwartet, führt diese Maßnahme zu einer stärkeren Dämpfung der Amplitude als die unverdünnte Substanz (siehe Abb. 8.66). Abbildung 8.67_a zeigt die Applikation auf Varietät III. Die doppelte Behandlung verursacht eine schwächere Dämpfung als die einfache Anwendung an der Fassade. Das korreliert nicht zweifellos mit der Idee, dass applizierte Substanzen mit einem anderen Dämpfungskoeffizienten eine Veränderung der Amplitude hervorrufen. Es wurde eine direkte Abhängigkeit zwischen der eingebrachten Schutzmittelmenge und der Dämpfung angenommen. Im nebenstehenden Bild (8.67_b), wo das Resultat der Wiederbehandlung mit verdünntem Funcosil OH auf Varietät IV dargestellt ist, findet diese Vermutung Bestätigung. Die doppelte Applikation im Labor verursachte eine noch deutlichere Dämpfung als die erneute Behandlung an der Fassade.

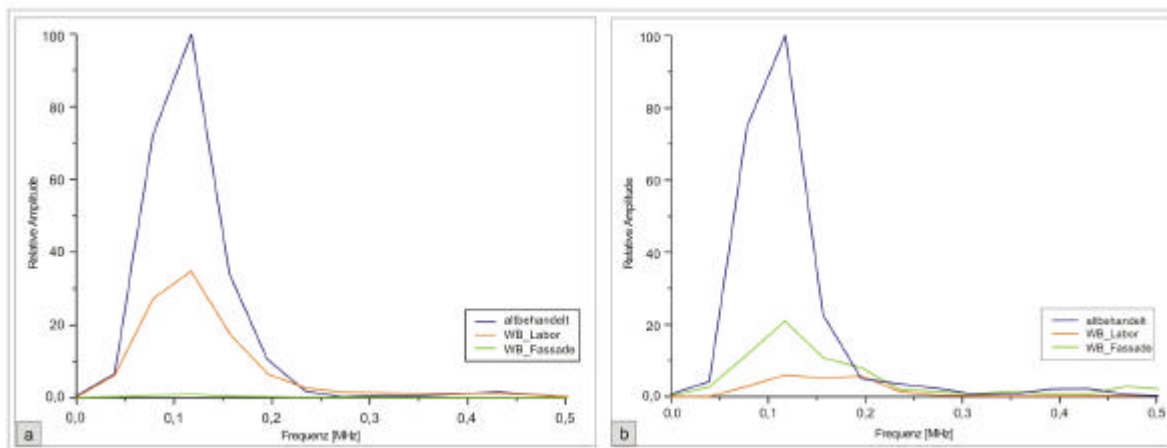


Abb. 8.67 (a-b): Gegenüberstellung der Ergebnisse zweier unterschiedlicher Quader – 8.67_a Varietät III und 8.67_b Varietät IV. In beiden Fällen wurde mit verdünntem Funcosil OH wiederbehandelt, was jeweils eine deutliche Dämpfung der Amplitude nach sich zog.

Funcosil H

Auch die Wiederbehandlung der Varietät II, einmalig mit Funcosil H (Fassade), führte zu einer drastischen Dämpfung der Amplitude (siehe Abb. 8.68). Als Referenz standen zwei Bohrkerne zur Verfügung, die den altbehandelten Zustand repräsentieren. Ihre beinahe Kongruenz unterstreicht die Verlässlichkeit dieser Untersuchung.

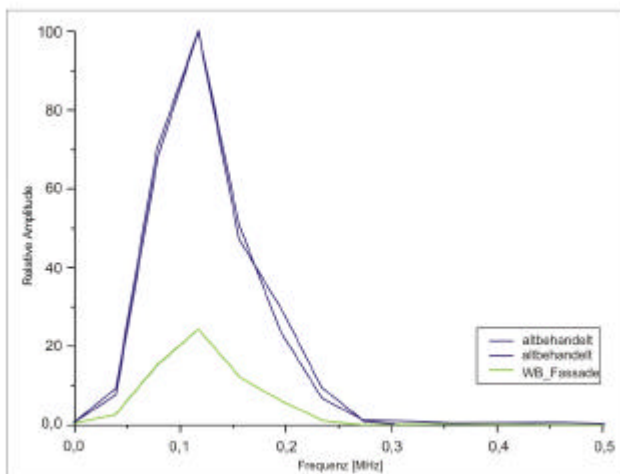


Abb. 8.68: Gegenüberstellung der Frequenzspektren zweier altbehandelten Proben des gleichen Quaders und einer an der Fassade mit Funcosil H wiederbehandelten Probe. Die annähernde Deckungsgleichheit beider Kurven (altbehandelt) unterstreicht die Verlässlichkeit der Messmethode. Es wurde die Laufzeit von 18 μ s ausgewertet. Regensburger Grünsandstein, Varietät II. Die Kurve des wiederbehandelten Zustandes zeigt eine deutliche Dämpfung gegenüber der altbehandelten.

Im Rahmen der Messungen der Longitudinalwellengeschwindigkeiten an Proben des Regensburger Grünsandsteins konnte eine Steigerung durch die Wiederbehandlungstests (außer der Wiederbehandlung an der Fassade mit Remmers 300E) festgestellt werden. Im Vergleich dazu zeigen die dargestellten Fouriersignale in allen Fällen eine zumeist sehr deutliche Dämpfung der Amplitude. Demnach geht als Folge einer (Wieder-)behandlung mit festigenden Substanzen ein Anstieg der Geschwindigkeit der v_L -Welle mit einer Dämpfung der Amplituden in der Fourier-Transformation einher.

Probeweise wurden die Dämpfungssignale entlang der Quer- und der Längsachse von Bohrkerne des altbehandelten Status miteinander verglichen. Die Laufzeiten der Signale bei den Längsmessungen

sind mit ungefähr $56 \mu\text{s}$ nahezu dreimal länger, als diejenigen entlang des Bohrkerndurchmessers. Die Geometrie der Probe, d.h. der verlängerte Messweg, bei gleichem Material wirkt sich in einer stärkeren Dämpfung der relativen Amplitude aus (siehe Abb. 8.69).

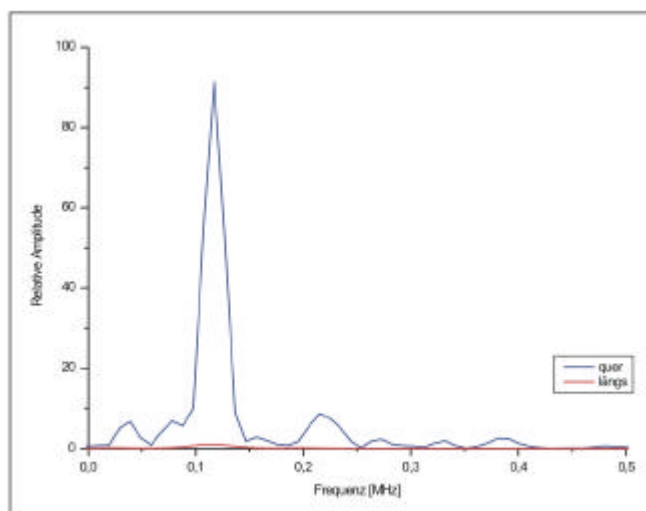


Abb. 8.69: Gegenüberstellung der fouriertransformierten Signale quer und längs der zylindrischen Geometrie eines Bohrkerns, Regensburger Grünsandstein, Varietät III.

Die Methode der Fourier-Transformation des Zeitsignals der Longitudinalwellengeschwindigkeitsmessung eignet sich sehr gut, um Veränderungen im Porenraum zu belegen, die durch das Einbringen von Kieselgel verursacht werden. Mit der verwendeten Versuchsanordnung ist es nicht möglich, verlässliche Aussagen über die Art des applizierten Schutzmittels zu machen, ob es sich z.B. um einen elastifizierten oder konventionellen Festiger handelt. Aber der theoretische Ansatz, dass Änderungen der Grenzflächeneigenschaften in einem Material zu unterschiedlichen Streu- und Dämpfungserscheinungen führen, findet mit dieser Auswertungsmethode Bestätigung. Als alleiniges Verfahren zur Bestimmung des Festigkeitszuwachses kann die FFT nicht empfohlen werden, sondern sie versteht sich in diesem Zusammenhang eher als Zutrag für das Verständnis der Prozesse einer festigenden Behandlung.

Die Frequenzanalyse ist aber auch als eigenständige Methode auf dem Gebiet der Werkstoffwissenschaften und Bauwerksüberwachung von Nutzen. In der Vergangenheit gab es beispielsweise viele Untersuchungen zum Einsatz der Fourier-Transformation für den Zweck der Fehlstellendetektion, vor allem bei Beton (z.B. JONAS (1996) und NEISECKE & HILLGER (1985)). Erste Versuche wurden auch auf dem Gebiet der Natursteinverwitterung unternommen (KLEMM 2003).

Versuchsmessungen an Proben des Regensburger Grünsandstein mit 1 MHz-Prüfköpfen zeigten allerdings Unterschiede in den Frequenzspektren verschiedener elastischer Kieselgele bezüglich ihrer Anfälligkeit gegenüber Belastungen. Es ist empfehlenswert, diese Untersuchungen an Sandsteinen fortzusetzen und damit das Anwendungsfeld der Fourier-Transformation von Zeitsignalen der Longitudinalwellenmessung zu erweitern.

8.4.3.3 Dehnwellenmessung

Die Theorie der Dehnwellenmessung wird von ERFURT & KROMPHOLZ (1996) ausführlich beschrieben. Dehnwellen sind eine spezielle Form der Oberflächenwelle. Sie entstehen, wenn die Querabmessungen des durchschallten Körpers deutlich kleiner und die Probenlänge größer als die Wellenlänge λ der p-Welle ist.

Der Vorteil der Dehnwellenmessung im Vergleich zur Elastizitätsbestimmung aus der Longitudinalmessung liegt darin, dass die Dehnwellengeschwindigkeit nur vom Youngschen E-Modul und von der Rohdichte des Materials abhängig ist. Sie berechnet sich für zylindrische bzw. stabförmige Körper aus folgender Formel (21):

$$v_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{Formel 21})$$

v_D Dehnwellengeschwindigkeit [km/s]

E E-Modul [kN/mm²]

ρ Rohdichte [g/cm³]

Das Hauptanwendungsgebiet des Dehnwellenmessverfahrens besteht in der Bestimmung von elastischen Kennwerten wie der Ultraschallgeschwindigkeit -

- v_L Geschwindigkeit der Longitudinalwelle (Kompressionswelle)
- v_D Geschwindigkeit der Dehnwelle
- v_S Geschwindigkeit der Scherwelle
- v_R Geschwindigkeit der Oberflächenwelle (Raleigh) -

der Querdehnungszahl μ sowie des E-Moduls und G-Moduls (Kompressionsmodul) an genormten Probekörpern. Die Querdehnungszahl (Poissonzahl) beschreibt das Verhältnis zwischen Stauchung und Dehnung. Für die Messung werden spezielle Dehnwellenprüfköpfe eingesetzt, die eine synchrone Erzeugung und Erfassung kurzweiliger Longitudinalwellensignale und langweiliger Dehnwellensignale ermöglichen. Aus dem Verhältnis dieser Wellengeschwindigkeiten erfolgt die Bestimmung der Querdehnungszahl, die zur weiteren Berechnung von elastischen Kennwerten verwendet werden kann. Die Probengeometrien für kreisförmige Querschnitte (Bohrkern) sollten im Verhältnis 1:4 sein.

Methodik

Die speziellen Ultraschallprüfköpfe UPG-D und UPE-D arbeiten im Frequenzbereich zwischen 20 und 100 kHz. Die Wellenlänge λ der Longitudinalwelle ist abhängig von ihrer spezifischen Geschwindigkeit im Medium und von der Frequenz f des emittierten Signals. Für die Bestimmung des dynamischen E-Moduls mit der Dehnwellenmessung sind andere Prüfköpfe benutzt worden. Ansonsten entspricht der Prüfaufbau dem der Longitudinalwellenmessung. Auf Anraten des Herstellers Fa. Krompholz wurde jedoch weder ein Kopplungsmittel noch der Signalverstärker eingesetzt. Eine Signalverstärkung würde die erste ankommende Welle intensivieren. Da zur Ermittlung des dynamischen E-Moduls die Scherwelle benötigt wird und diese hinter der Longitudinalwellen (Primärwelle) herläuft, wäre die Scherwelle schwer messbar. Die Auswertung erfolgt mit der LightHouse Software.

Es wurden Untersuchungen an Proben aller vier Varietäten des Regensburger Grünsandsteins unter identischen klimatischen Bedingungen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag auf den durch verschiedene Steinfestiger hervorgerufene Abweichungen der elastischen Kennwerte.

Ursprünglich war ein Grund für die Bestimmung der Dehnwelle, eine Korrelation des dadurch ermittelten dynamischen E-Moduls mit den E-Modulen der Biaxialen Biegezugfestigkeitsuntersuchung zu ermöglichen. Die unterschiedlichen Probengeometrien, die beide Methoden verlangen, erlauben allerdings keine derartige Gegenüberstellung. Die Dehnwellenmessung wird an zylindrischen Proben durchgeführt und der gemessene dynamische E-Modul repräsentiert gewissermaßen einen Durchschnittswert des gesamten Bohrkerns (siehe Abb. 8.70).



Abb. 8.70: Darstellung einer Dehnwellenmessung und des Verhältnisses zwischen wiederbehandeltem Bereich und dem restlichen Bohrkern.

8.4.3.3.1 Ergebnisse

8.4.3.3.1.1 Regensburger Grünsandstein

Die Biegezugfestigkeit wird, wie bereits erwähnt, an einzelnen Bohrkernscheiben durchgeführt. Ein Vergleich des statischen E-Moduls mit dem dynamischen der Dehnwellenmessung vor dem Hintergrund, den Einfluss des applizierten Schutzmittels zu bestimmen, wäre demnach zu vage. Dennoch werden in der folgenden Abbildung (8.71_a) den dynamischen E-Modulen der Wiederbehandlung an der Fassade die statischen E-Module aus dem Bereich zwischen 0-0,5 cm (1. Bohrkernscheibe) und 6 cm Tiefe (12. Bohrkernscheibe) der entsprechenden Biaxialen Biegezugmessung gegenüber gestellt. Somit kann zusätzlich die Entwicklung des statischen E-Moduls im Zuge der Wiederbehandlung verfolgt werden. Des Weiteren enthält das in 8.71_b dargestellte Diagramm die dazugehörigen Scher- und Longitudinalwellengeschwindigkeiten.

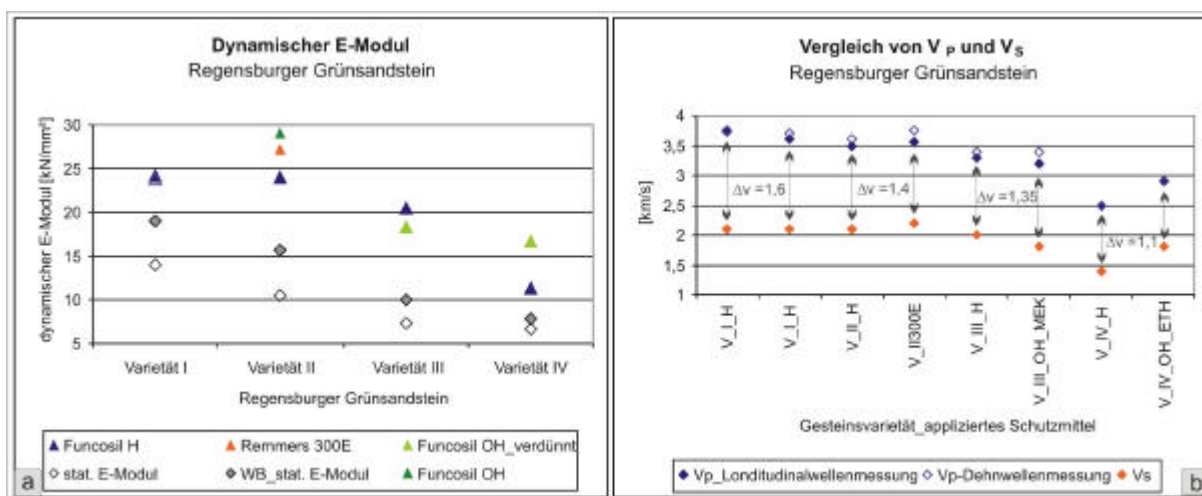


Abb. 8.71 (a-b): a) Darstellung der dynamischen im Vergleich zu den statischen E-Modulen, b) Darstellung der Longitudinalwellengeschwindigkeit aus der herkömmlichen Messung im Vergleich zu der aus der Dehnwellenmessung und Vergleich zur Scherwellengeschwindigkeit.

In der linken Abbildung (8.71_a) sind die dynamischen E-Module vergleichend aufgezeigt, die durch die Verwendung verschiedener Schutzmittel auf den Varietäten I-IV bedingt sind. Die Auswirkungen der Anwendung von Funcosil H bei den einzelnen Varietäten gehen konform mit der Staffelung der Festigkeit bzw. dem statischen E-Modul des jeweils unbehandelten Materials. Die Applikation von verdünntem Funcosil OH gleicht die Unterschiede zwischen Varietät III und IV einander an, bzw. sie führt auf Varietät IV zu einem stärkeren Anstieg des dynamischen E-Moduls als auf Varietät III. Der elastifizierte Festiger Remmers 300E, der durch das orangefarbene Dreieck symbolisiert wird, erscheint hier lediglich durch den Vergleich mit Funcosil H (Hydrophobierungsmittel mit Restfestigung) erhöht. Die Elastifizierung wirkt einem überhöhten E-Modul entgegen. Der konventionelle Festiger Funcosil OH verursacht auf derselben Varietät einen erwartungsgemäß höheren dynamischen E-Modul, da die damit erzielte Kornverschränkung starrer ist. Die relativ geringfügigen Unterschiede beider Werte liegen jedoch im Bereich des Messfehlers.

Der Vergleich der statischen E-Module vor und nach der Wiederbehandlung zeigt in deren Folge generell eine Steigerung an. Weiterhin kann auch beobachtet werden, dass die dichteren Varietäten I und II sensibler bzw. mit einem stärkeren Anstieg des statischen E-Moduls auf die Behandlung reagieren. Die Zunahme bei Varietät III und vor allem bei Varietät IV ist relativ gering.

Auch wenn ein Vergleich der dynamischen und statischen E-Module aufgrund der unterschiedlichen Probengeometrien vage ist, soll eine Interpretation versucht werden. Die Ergebnisse der dynamischen E-Modul-Messung liegen – abgesehen von Varietät IV - deutlich über denen der statischen E-Module. Der dynamische E-Modul, der aus der Behandlung mit Funcosil H (Hydrophobierung mit Restfestigung) resultiert, hat eine, dem statischen E-Modul nahezu vergleichbaren Wert. Der Unterschied zwischen den statischen E-Modulen der wiederbehandelten Zone und den dynamischen E-Modulen, die aus der Wiederbehandlung mit verdünntem Funcosil OH und Funcosil H (Varietät I und II) stammen, beträgt annähernd 10 – 12 kN/mm².

Im Diagramm 8.71_b wurden zur Überprüfung der Verlässlichkeit der Messungen der Longitudinalwellengeschwindigkeit die Ergebnisse aus der normalen Ultraschallmessung (dunkelblaue Punkte) denen der Dehnwellenmessung (semitransparente blaue Punkte) an den gleichen Proben gegenübergestellt. Die gemessenen Geschwindigkeiten liegen sehr nahe beieinander oder sind nahezu deckungsgleich. Demnach ist es auch möglich, den dynamischen E-Modul, zumindest annäherungsweise, aus folgender Formel (22) zu ermitteln:

$$E = v_L^2 \cdot \rho \quad (\text{Formel 22})$$

Im Vergleich dazu ist die Scherwellengeschwindigkeit der einzelnen wiederbehandelten Proben dargestellt. Sie ist deutlich niedriger als die Longitudinalwellengeschwindigkeit. Ebenso fällt auf, dass beispielsweise bei Varietät IV, wo Funcosil H appliziert wurde, eine relativ niedrige v_L mit einer ebenso langsameren v_S einhergeht. Die absolute Gegenüberstellung der Unterschiede zwischen den Longitudinal- und Scherwellengeschwindigkeiten zeigt von Varietät I hin zu Varietät IV, also auch mit steigender effektiver Porosität des Materials, abnehmende Unterschiede beider Geschwindigkeitswerte (siehe Abb. 8.71_b).

8.4.3.3.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Da der Schwerpunkt der Wiederbehandlung des Schilfsandsteins auf einer Minderung des Feuchtigkeitseintrags lag, ist in diesem Zusammenhang eine Veränderung der elastischen Parameter von geringerer Bedeutung, zumal die Messungen nicht im wechselfeuchten Bereich vorgenommen wurden. Mit Hinblick auf den Tongehalt des Materials wäre das für weiterführende Untersuchungen zu empfehlen. Laut UTZ (2004) stabilisiert eine auf tonigem Material vorgenommene Tensidbehandlung, wie sie auch hier Anwendung fand, im hygroskopischen Bereich die Stabilität der Kornbindung.

Die Methode der Dehnwellenmessung kam erst den Untersuchungen zur Effektivität der Wiederbehandlung an der Fassade zum Einsatz. Vorher stand die entsprechende Versuchsvorrichtung noch nicht zur Verfügung. Somit war jede Probe, die den Ultraschalluntersuchungen zugeführt wurde, mit Schutzmittel kontaminiert. Aus diesem Grund liegen von der Bestimmung der Dehnwelle keine Vergleichsmessungen an unbehandeltem Probenmaterial vor, weswegen in der Abbildung 8.72 die entsprechenden Referenzwerte fehlen. Tendenziell ist erkennbar, dass speziell Funcosil SNL, appliziert auf Austauschmaterial, höhere dynamische E-Module bedingt als auf Originalmaterial. Funcosil SNL führte auch zu den deutlichsten Anstiegen der Biaxialen Biegezugfestigkeit in Folge der Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade.

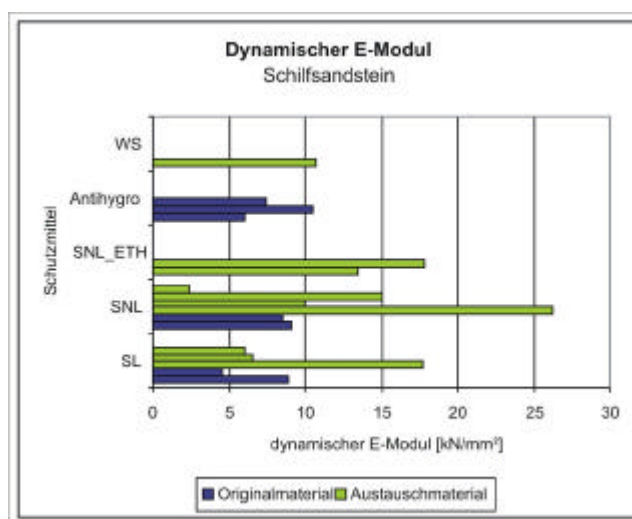


Abb. 8.72: Gegenüberstellung der dynamischen E-Module, bedingt durch die Applikation verschiedener Schutzmittel, Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith.

Auch Funcosil SL bewirkt zumindest teilweise höhere dynamische E-Module. Für die anderen Schutzmittel fehlen die Vergleichswerte der jeweils anderen Gesteinsvarietät, um Relationen abzulesen. Aber auch die Applikation von verdünntem Funcosil SNL scheint höhere dynamische E-Module hervorzurufen.

8.4.4 Bohrwiderstandsmessungen

Bereits zu Beginn des Projekts sind im Rahmen der Ist-Wert-Bestimmung zur Wirksamkeit der ursprünglich applizierten Konservierung an jedem Quader, aus dem Bohrkerne entnommen wurden, unmittelbar neben der Entnahmestelle auch Bohrwiderstandsmessungen vorgenommen worden. Somit

war die Grundlage geschaffen, die gewonnenen Daten mit denen anderer Festigkeitsparameter (Ultraschall-Laufzeitgeschwindigkeit und Biaxiale Biegezugfestigkeit bzw. E-Modul) vergleichen zu können. Im Kapitel 8.3.1.1 wird ebenso eine Korrelationsmöglichkeit zwischen dem Tiefenprofil der Bohrwiderstandsmessung und einer, auf demselben Quader ausgeführten, Wasseraufnahmeprüfung nach Karsten vorgestellt. Die entsprechende Abbildung (8.13) zeigt deutlich, dass mehrere Methoden zur Bestimmung der Gesteinsparameter angewendet werden müssen und eine Verknüpfung der Daten für eine Klärung gewisser Phänomene unerlässlich ist.

Methodik

Es handelt sich dabei um ein sehr gering destruktives Verfahren, welches lediglich Löcher von 5 mm Durchmesser in der Fassade hinterlässt. Die Messungen erfolgten mit einem Bohrkraft-Mess-System (DFMS). Die Bohrmaschine auf dem dreibeinigen Ständer und das Steuerelement mit PC sind in Abbildung 8.73 dargestellt.

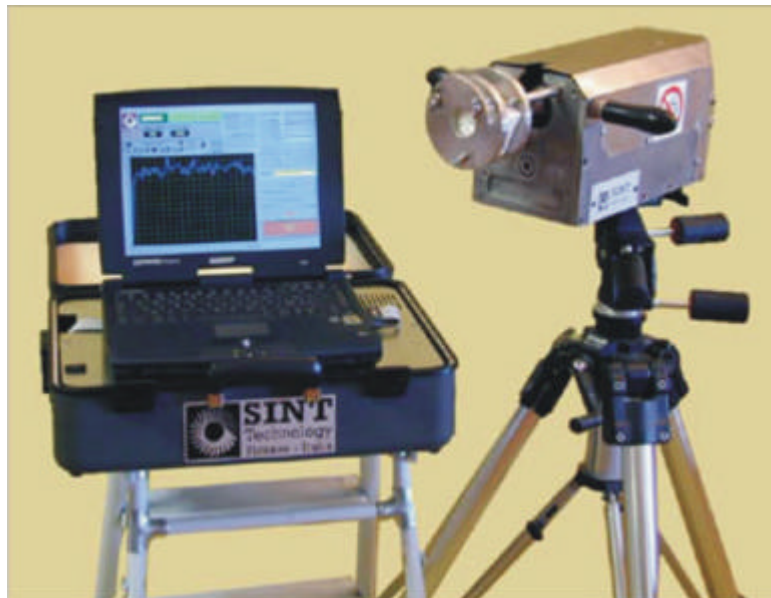


Abb. 8.73: Versuchsanordnung der Bohrwiderstandsmessung an Einzelproben. Für die Arbeit am Objekt werden die beiden Platten, die im Bild eine Probe vor dem Bohrer fixieren, entfernt (Quelle: Internet, Sint Technology).

Die Bestimmung des Bohrwiderstands basiert auf der Messung der Kraft [N], die notwendig ist, bei vorgegebenen Randbedingungen ein Loch in das jeweilige Material zu bohren. Während der Messung werden Vorschub und Rotationsgeschwindigkeit konstant gehalten. Diese Parameter wurden entsprechend der Festigkeitsklassifikation der untersuchten Sandsteine folgendermaßen gewählt:

- Rotationsgeschwindigkeit: 600 U/min
- Vorschub: 10 mm/min

Als Richtlinie für die Auswahl der Messparameter gilt, dass bei hoher Festigkeit des zu bearbeitenden Materials (z.B. Carrara Marmor) mit hoher Geschwindigkeit (1200 U/min) und geringem Vorschub (5

mm/min) gebohrt werden sollte. Ein weicher und poröser Kalkstein hingegen würde mit geringer Rotationsgeschwindigkeit und schnellerem Vorschub (20 mm/min) untersucht werden.

Grundlage für die Untersuchung mit der Bohrtechnik ist die Korrelationsmöglichkeit zwischen Bohrwiderstand und Festigkeit des Materials. Die Bohrwiderstandsmessung ist eine einfache Methode, die Festigkeitsveränderungen in Folge der Verwitterungsprozesse oder einer Konservierungsmaßnahme zu quantifizieren.

Die anfänglichen Messungen wurden mit WIDIA-Steinbohrern (siehe Abb. 8.74) der Firma Fischer durchgeführt. Im Laufe des Projekts hat sich allerdings international die Bohrpraxis geändert. Da die Fischer-Bohrer den Nachteil einer recht hohen Streubreite aufweisen, hat man sich in der Grundlagenforschung im Sinne einer Vereinheitlichung der Datenaufnahme und einer besseren Vergleichbarkeit der Resultate für die ausschließliche Verwendung von Diamantbohrern (siehe Abb. 8.74) entschieden. Die Unterschiede beider Bohrerarten sind so gravierend, dass eine vernünftige Korrelation von alten, mit Fischer Bohrern ermittelte Daten und neuen Werten, die mit Diamantbohrern gewonnen wurden, nicht möglich gewesen wäre.

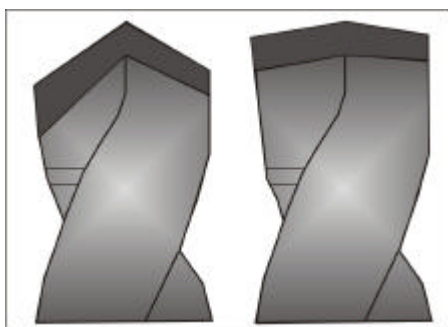


Abb. 8.74: Vergleich eines WIDIA-Bohrers (links) mit einem Diamantbohrer. Der Diamantbohrer verfügt über zwei Schneiden, die nahezu horizontal stehen, wohingegen die verwendeten WIDIA-Bohrer einen Winkel von 120° besitzen. Diamantbohrer sind aufgrund ihrer Härte über einen längeren Zeitraum einsetzbar, ohne dass es zu einer wesentlichen Schwächung des Materials kommt. Allerdings werden geringe Festigkeitsänderungen zum Teil durch diese Bohrer nicht aufgelöst, da sie zu scharf sind.

Um den Erfolg der Konservierung auch mittels der Messungen des Bohrwiderstandes untersuchen zu können, wurden bei einer Auswahl von wiederbehandelten Quadern die Bohrungen auf dem altbehandelten Material mit Diamantbohrern wiederholt, um gleich anschließend die Bohrwiderstände auf den erneut behandelten Musterflächen zu ermitteln. Die neuen Bohrhärte-Profile reichen - mit Hinblick auf die erzielten Eindringtiefen – nur bis 1 cm Tiefe.

Um im Anschluss an die Messungen, die mit demselben Bohrer vorgenommen wurden, dessen Abnutzung zu bewerten, ist es notwendig, zuvor den Bohrwiderstand in einem Referenzmaterial (ARS – Artificial Reference Stone) bestimmt zu haben. Die Parameter für diese Kalibrierung sind auf 600 U/min und 20 mm/min festgelegt. Im Anschluss an die Messungen wird erneut in dieses Referenzmaterial gebohrt und die Differenz zum ursprünglichen Wert ermittelt. Die Anzahl der vorgenommen Bohrungen wird dann zu diesem Wert ins Verhältnis gesetzt und von den einzelnen ermittelten Bohrwiderständen abgezogen. Bei der Verwendung von Diamantbohrern sind bei der Untersuchung des Schilfsandsteins und des Regensburger Grünsandsteins nur geringe Schwächungen beobachtet worden.

Die unbehandelten, unverwitterten Daten stammen von Labormessungen an Bohrkernendstücken, die eine Tiefe von ca. 8 cm repräsentieren. Der Wert des jeweiligen altbehandelten Bausteins, der die Effektivität der ursprünglichen Konservierung widerspiegelt, ist auf dem Quader gemessen worden, von dem die jeweiligen Bohrkerne entnommen wurden. Die dazugehörigen Werte der Wiederbehandlung entstammen den entsprechenden, im Sommer 2002 angelegten, Musterflächen. Um den Einfluss möglicher genetisch bedingter Heterogenitäten zu minimieren, hat man jeweils 3

Bohrungen sehr nahe beieinander eingebracht, welche auch einen Überblick über die Reproduzierbarkeit der Methode geben.

8.4.4.1 Ergebnisse

8.4.4.1.1 Regensburger Grünsandstein

In den folgenden Abbildungen (8.75-8.78) werden ausgewählte Profile der Bohrwiderstandsmessungen den entsprechenden Longitudinalwellengeschwindigkeiten gegenübergestellt.

Das Diagramm zur Ultraschalluntersuchung wurde bereits im Kapitel 8.4.3.1.1.1 näher erläutert. Allerdings ist in dieser Darstellung nur der Quader verzeichnet, auf den sich die Bohrwiderstandsuntersuchung bezieht.

Funcosil OH und Funcosil H

Bei Betrachtung des Bohrwiderstandes (siehe Abb. 8.75) ist deutlich zu erkennen, dass im Vergleich zum unbehandelten Material (grau), mit einem durchschnittlichen Bohrwiderstand von 13,2 N, die Festigkeit der altbehandelten Fläche (blau) ab der Tiefe von 1 mm noch darüber liegt, um sich bei einer Tiefe von 9 mm diesem Zustand anzugleichen. Der Verlauf der Kurve des altbehandelten Materials ist zu Beginn, bis zu einer Tiefe von 3 mm, als nachlassende Wirkung der ursprünglichen Behandlung zu bewerten. Diese Gefügeflockung wäre dennoch nur sehr peripher und entspricht keiner realen Schädigung des Materials. Durch die Wiederbehandlung der Fassade mit Funcosil H wurde die Festigkeit über diesen entfestigten Bereich hinaus angehoben.

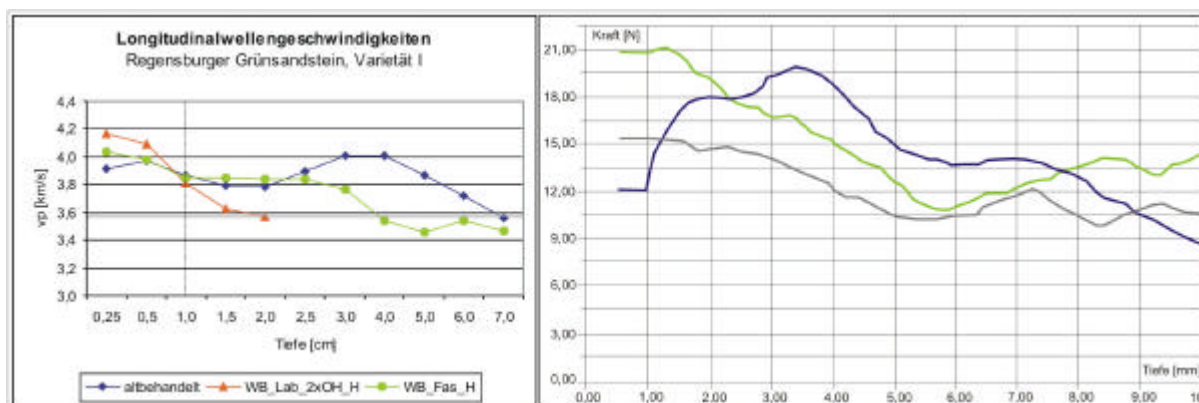


Abb. 8.75: Gegenüberstellung der Longitudinalwellengeschwindigkeiten und der entsprechenden Bohrwiderstandsmessungen, Regensburger Grünsandstein, Varietät I. Die semitransparenten grauen Linien markieren die Parameter des unbehandelten, unverwitterten Materials, blau entspricht dem altbehandelten und grün dem wiederbehandelten Zustand.

Der Verlauf aller drei Kurven vermittelt den Eindruck einer harmonischen Festigkeitsentwicklung, und dass die gefestigte Zone bis in eine Tiefe von ungefähr 5 mm reicht. Die Ultraschallmessung, die mit einer weniger detaillierten Auflösung durchgeführt wurde, zeigt in der Abbildung die Wirkungstiefe bei einem Zentimeter an. Vergleichbares konnte auch mit der Biegezugmessung detektiert werden.

In einer Tiefe von ungefähr 9 mm kreuzen sich in beiden Diagrammen die Kurven des altbehandelten Materials und der Wiederbehandlung an der Fassade, was die Vergleichbarkeit beider Messmethoden demonstriert. Die Charakteristika der Graphen können sich nicht punktgenau entsprechen, da die Auflösung im Bohrprofil kontinuierlicher und genauer ist als die der Ultraschalluntersuchung.

Funcosil OH, verdünnt und Funcosil SNL

Die folgende Abbildung (8.76) zeigt die Gegenüberstellung von Ultraschall- und Bohrwidstandsmessung einer Wiederbehandlung mit verdünntem Funcosil OH und einer nachträglichen Applikation von Funcosil SNL (nur Labor) (Varietät III). Die Kurve des unbehandelten Materials (grau) weist deutliche Schwankungen in der Festigkeit auf, die wiederum die Heterogenität dieser Gesteinsvarietät widerspiegeln, die neben Quarz speziell durch Bioklasten hervorgerufen werden kann (siehe Kapitel 6.1.3). Die Festigkeit der altbehandelten Probe (blau) wird durch einen ausgeglicheneren Kurvenverlauf wiedergegeben. Die Festigkeit liegt in den vorderen 4 mm über der des unbehandelten Materials. Dieser Umstand rührt wahrscheinlich noch von der ursprünglichen Behandlung her. Für diese Gesteinsvarietät sind die Festigkeiten, die auch in Ultraschall- und Biaxialer Biegezugfestigkeitsmessung entsprechend ermittelt wurden, noch als zufrieden stellend zu bewerten. Der durch eine Konservierung stets anzustrebende Wert des Originalzustandes wird leicht übertroffen.

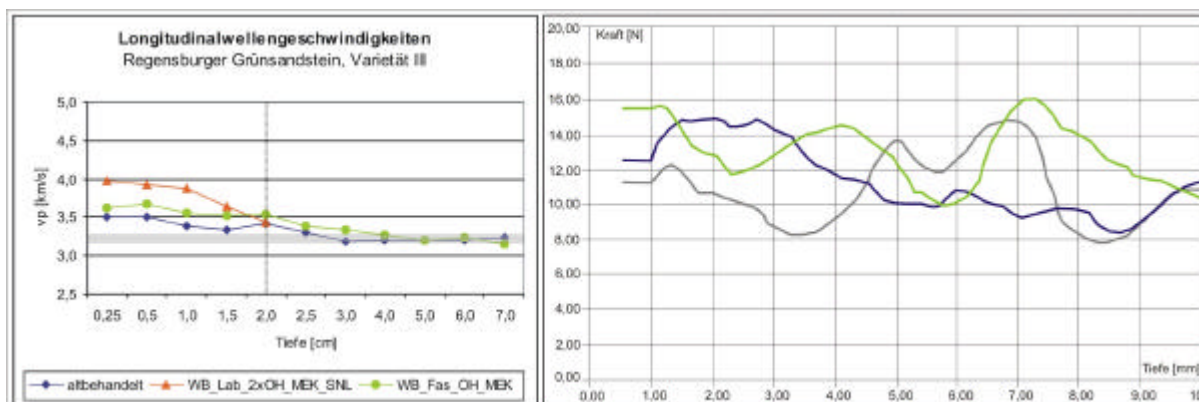


Abb. 8.76: Gegenüberstellung der Longitudinalwellengeschwindigkeiten und der entsprechenden Bohrwidstandsmessungen, Regensburger Grünsandstein, Varietät III. Die semitransparenten grauen Linien markieren die Parameter des unbehandelten, unverwitterten Materials, blau entspricht dem altbehandelten und grün dem wiederbehandelten Zustand.

Die Wiederbehandlung mit verdünntem Funcosil OH (grün) führt zu keiner wesentlichen, detektierbaren Veränderung des Festigkeitszustandes im Bereich der vorderen 5 mm. In den folgenden 5 mm ist ein Festigkeitsanstieg gegenüber dem altbehandelten Zustand zu beobachten. Ein entsprechendes Ergebnis konnte auch durch die Messung der Biaxialen Biegezugfestigkeit am gleichen Quader festgestellt werden. Auch die Untersuchungen der Longitudinalwellengeschwindigkeit gehen mit diesem Resultat konform. Generell ist die Methode der Bohrwidstandsmessung geeignet, um einen Festigkeitszuwachs in Folge einer Behandlung mit Kieselsäureestern zu detektieren. Allerdings ist es aufgrund der geringen Profiltiefe von einem Zentimeter nicht möglich, eine Aussage bezüglich der Eindringtiefe der applizierten Schutzmittel, vergleichbar der Ultraschalluntersuchung, zu treffen.

Die folgende Abbildung (8.77) zeigt den Effekt der Applikation von verdünntem Fungosil OH auf Varietät IV. Das unbehandelte, frische Gestein (grau) liegt bei durchschnittlich 8,6 N und damit niedriger als die darüber abgebildete Varietät III (11,3 N). Dieses Ergebnis bestätigt erneut die Staffelung der Festigkeit der Grünsandsteinvarietäten. Die Messung auf der altbehandelten Fläche (blau) zeigt demgegenüber eine höhere Festigkeit und somit eine noch bestehende Wirksamkeit des ursprünglich applizierten Schutzmittels. Das Resultat konnte durch die Biaxiale Biegezugfestigkeitsmessung nicht bestätigt werden. Hierbei wurden für das altbehandelte Material geringere Festigkeiten als für das unbehandelte ermittelt. Allerdings ist dabei zu bedenken, dass gerade Varietät IV mit stark schwankenden Bioklastengehalten auch lokal eng begrenzt Schwankungen in der Festigkeit aufweisen kann.

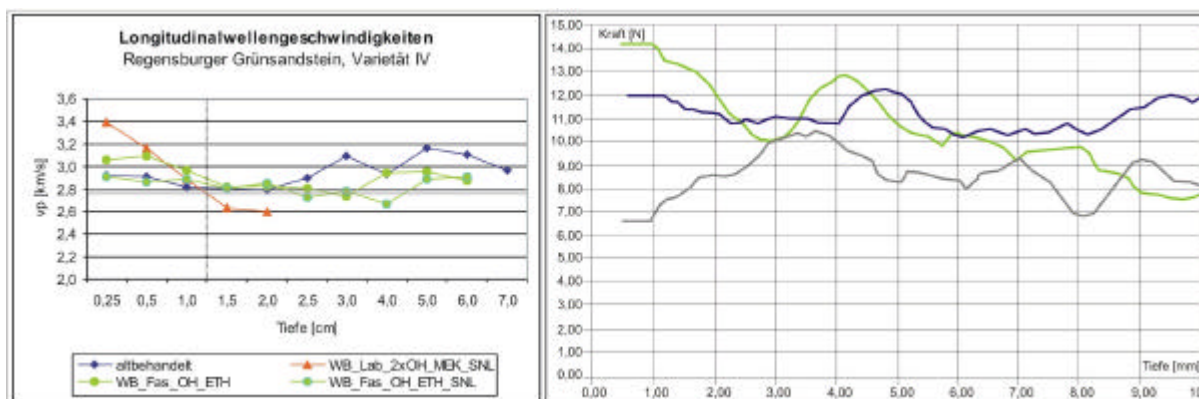


Abb. 8.77: Gegenüberstellung der Longitudinalwellengeschwindigkeiten und der entsprechenden Bohrwiderstandsmessungen, Regensburger Grünsandstein, Varietät IV. Die semitransparenten grauen Linien markieren die Parameter des unbehandelten, unverwitterten Materials, blau entspricht dem altbehandelten und grün dem wiederbehandelten Zustand.

Durch die Wiederbehandlung an der Fassade (grün) konnte in den vorderen 3 mm eine Konsolidierung des Gefüges bewirkt werden. Im Durchschnitt betrachtet entspricht die Festigkeit nahezu der des altbehandelten Materials (10,6 N). Eine deutlichere Festigkeitssteigerung in Folge der Applikation des verdünnten Fungosil OH konnte jedoch mit Hilfe der Messung der Longitudinalwellengeschwindigkeit und der Biaxialen Biegezugfestigkeitsmessung detektiert werden.

Eine Aussage darüber, ob sich die Applikation des verdünnten Festigers im Vergleich zum unverdünnten Schutzmittel günstiger auf das Eindringverhalten auswirkt, kann mit der Methode der Bohrwiderstandsmessung nicht getroffen werden. Dafür sind die Bohrprofiliefen zu kurz gewählt gewesen.

Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt

Die nächste Abbildung (8.78) gibt die Ergebnisse der Wiederbehandlung mit Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt (Varietät II) wieder.

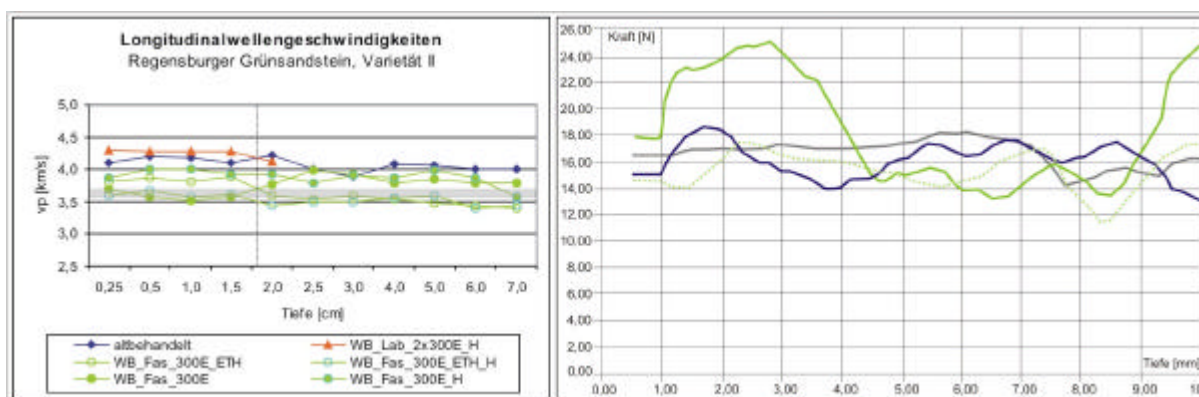


Abb. 8.78: Gegenüberstellung der Longitudinalwellengeschwindigkeiten und der entsprechenden Bohrwiderstandsmessungen, Regensburger Grünsandstein, Varietät II. Die semitransparenten grauen Linien markieren die Parameter des unbehandelten, unverwitterten Materials, blau entspricht dem altbehandelten und grün dem wiederbehandelten Zustand.

Der Bohrwiderstand des unbehandelten Materials (grau) liegt ungefähr bei 16 N und gliedert sich damit sehr gut in die Staffelung der Festigkeiten von Varietät I bis IV, die auch in anderen Untersuchungen bestätigt wurden. Der Zustand des altbehandelten Materials (blau) scheint gemäß der Kurve nahezu dem des unbehandelten Materials zu entsprechen. Dieses Resultat geht nicht mit der nebenstehenden Ultraschalluntersuchung und den Ergebnissen der Biaxialen Biegezugfestigkeit einher. In diesen beiden Untersuchungen lag die Festigkeit (bzw. die Geschwindigkeit) des altbehandelten Zustandes deutlich über der des unbehandelten, frischen Gesteins. Die Wiederbehandlung mit unverdünntem Remmers 300E (grün) führte entsprechend der Bohrwiderstandsmessung zu einer deutlichen Steigerung der Festigkeit des Materials bis in eine Tiefe von ungefähr 5 mm, was mit der Ultraschalluntersuchung nicht bestätigt werden konnte. Hier liegen alle an der Fassade applizierten Schutzmittel in ihrer Effektivität unterhalb der Festigkeit des altbehandelten Zustandes. Die Biegezugfestigkeitsmessung wiederum zeigt einen minimalen Anstieg der Festigkeit gegenüber dem Status der ursprünglich behandelten Fläche. Die Wirksamkeiten des verdünnten und unverdünnten elastifizierten Festigers entsprechen sich nahezu bezüglich der erzielten β_{BZ} .

Die Applikation des verdünnten Remmers 300E (grün, gepunktet) ergibt in der Bohrwiderstandsmessung nahezu keinen festigenden Effekt.

Eine Aussage über Eindringtiefe im Vergleich zur nebenstehenden Ultraschalluntersuchung ist schwierig. Der unverdünnte Festiger Remmers 300E scheint, wie bereits erwähnt, bis in eine Tiefe von ungefähr 5 mm eingedrungen zu sein, was mit dem Verlauf des Graphen der Ultraschalluntersuchung nicht ohne weiteres zu korrelieren ist. Hierfür sind eventuell die unterschiedlichen Auflösungen beider Messverfahren verantwortlich. Die für die Biegezugfestigkeitsmessung beschriebenen Eindringtiefen geben reichen mit angenommenen 1,5 cm weiter in das Material hinein.

Eine Korrelation der verschiedenen Messungen zur Bestimmung der Festigkeitsparameter ist nur bedingt machbar. Nach Möglichkeit sollten stets sowohl Untersuchungen der Biaxialen Biegezugfestigkeit (E-Modul) als auch Ultraschall- bzw. Bohrwiderstandsmessungen durchgeführt werden, um einen umfassenderen Eindruck von der Wirkung der applizierten Schutzmittel zu bekommen.

8.4.4.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Zur Überprüfung der Wiederbehandlung an beiden Schilfsandsteinvarietäten kam ebenfalls die Methode der Bohrwiderstandsmessung zum Einsatz. Von mehreren gleichartigen Resultaten werden im Folgenden zwei Beispiele stellvertretend näher dargelegt. Abbildung 8.79_a gibt die Resultate des Originalmaterials aus Diebach/Gailnau und das nebenstehende Bild (8.79_b) diejenigen des Austauschmaterials wieder. Der Vergleich der unbehandelten Materialien (graue Linie) zeigt eine ähnliche Relation zwischen den Festigkeiten des Original- und Austauschmaterials, wie sie bereits bei der Biaxialen Biegezugfestigkeit und der Ultraschalluntersuchung festgestellt wurde.

Der Zustand des altbehandelten Gesteins, der im Jahr 2001 detektiert wurde, zeigt für das Originalmaterial (a), dass die ermittelten Festigkeiten deutlich unterhalb derer des unbehandelten Gesteins liegen. Eine neue Behandlung mit Funcosil SNL (grüne Linie) vermochte, die Festigkeit im erbohrten Bereich über diese Festigkeit anzuheben.

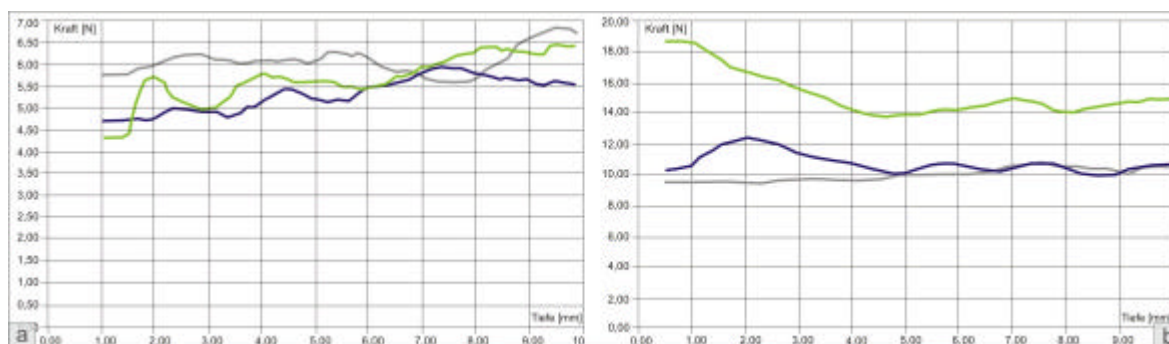


Abb. 8.79 (a-b): Bohrwiderstandsmessungen – unbehandelter (grau), altbehandelter (blau) und wiederbehandelter (grün) Zustand im Vergleich. Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau (a) und Schleerith (b).

Der Bohrwiderstand des frischen Sandsteins aus Diebach/Gailnau liegt bei durchschnittlich 6,1 N (8.79_a) und der des Schleerither Sandsteins bei 10 N (8.79_b).

Das Phänomen der Konsolidierung in Folge der erneuten Hydrophobierung, wie es mit der Biaxialen Biegezugfestigkeitsmessung detektiert wurde, konnte auch mittels der Bohrwiderstandsmessung bestätigt werden. Anders verhält es sich bei dem Austauschmaterial. Die Bohrwiderstände des altbehandelten Gesteins übertreffen in den vorderen 5 mm das unbehandelte Material um durchschnittlich 2 N. In Folge der Wiederbehandlung mit Funcosil SL kam es zu einer überdeutlichen Steigerung des Bohrwiderstandes auf 15 N. Diese Resultate stimmen, abgesehen von dem hier ermittelten Verhältnis zwischen unbehandeltem und altbehandeltem Gestein aus Schleerith, sehr gut sowohl mit den Messungen der Biegezugfestigkeit und der Longitudinalwellengeschwindigkeit überein, auch wenn die Auflösung der Tiefenprofile verschieden sind. Für den Bereich des vordersten Zentimeters der Fassade gelingt eine Korrelation.

Zusammenfassend kann man erkennen, dass sowohl auf Original- als auch auf Austauschmaterial die Wiederbehandlung zu einer Steigerung des Bohrwiderstandes geführt hat. Obwohl die verwendeten Schutzmittel (außer Silex OH) nicht darauf ausgerichtet sind, als Bindemittel im Kornverband zu wirken und somit zu einem Festigkeitszuwachs beizutragen, hat sich der Bohrwiderstand der Musterflächen gegenüber dem Vorzustand erhöht.

8.5 Bestimmung der Anionenkonzentration

Vor allem im Zusammenhang mit der Feuchte spielen Salze bei der Verwitterung eine entscheidende Rolle. Sie zählen zu den wichtigsten bauschädlichen Stoffen, die bei der Sanierung alter und historischer Bausubstanz besondere Probleme bereiten (FALLER & KAROTKE 1988). An vielen Mauerwerken, bei denen Salze in Abhängigkeit von der Luftfeuchte periodisch ausblühen, entdeckt man eine eindeutige Schadenszunahme (ARNOLD ET AL. 1989).

Bei der Bausteinverwitterung besitzen Sulfate, Nitrate, Chloride und Karbonate die größte Relevanz (NEISEL 1995). Für den Ursprung der verschiedenen Ionenarten gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Die für die aktuelle Problematik wahrscheinlichen Herkünfte werden folgend dargelegt:

- Autochthon, als natürlicher Bestandteil eines Naturwerksteins (WEISS 1992), wobei Sandsteine - soweit nicht karbonatisch gebunden – eher niedrige Salzgehalte aufweisen.
- Aus der Luft und dem Regen. Hierzu gehören auch Spritz- und Oberflächenwasser. Die hauptsächlichste Kontamination der Atmosphäre findet hierbei durch die Industrie und den Verkehr in Form von erhöhten Mengen an Schwefeldioxid statt. Die Schwefelsäure, die aus der Oxidation des Schwefeldioxids entsteht, löst das calcitische bzw. dolomitische Bindemittel der Sandsteine unter Bildung von Gips bzw. Magnesiumsulfat. Neben Schwefeldioxid nehmen die Stickoxide, die zu Nitraten oxidieren, einen wichtigen Platz in der Reihe der Luftschadstoffe ein (TORRACA 1986).
- Aus inkompatiblen Baustoffsystemen (z.B. Portlandzement bzw. andere Fugenmörtel), sowie eventuell durch unsachgemäße Sanierungsmaßnahmen.
- Salzionen können durch den Stoffwechsel von Mikroorganismen erzeugt werden (ARNOLD ET AL. 1989).

Folgende Schäden sind durch einen gesteigerten Salzgehalt im Mauerwerk möglich:

- Bildung von Salzausblühungen auf der Oberfläche der Fassade (Effloreszenzen)
- Lösung des Korngefüges durch Auslaugung löslicher Komponenten
- Zerstörung des Korngefüges und mechanische Schwächung des Gesteins durch Auskristallisation von Salzphasen (Subfloreszenzen) – Kristallisations- und Hydratationsschäden
- Versinterung der Poren durch Salzausscheidung, Behinderung des Dampfaustausches
- Quellung oder Schrumpfung von quellfähigen Materialien

Die Dilatation von salzbelasteten Gesteinen zeigt gegenüber salzfreien ein vollständig gegensätzliches Verhalten. Im Feuchtewechsel zwischen 35 % und 90 % r.Lf dehnt sich der Sander Schilfsandstein bei Befeuchtung aus und schrumpft bei Trocknung. Der Vorgang ist reversibel. In Gegenwart von NaCl hingegen kontrahiert das Gefüge bei Befeuchtung und dehnt sich bei Trocknung. Es bleibt bei jedem Zyklus ein Rest irreversibler Verformung und die Beträge der Längenänderungen nehmen zu. Die Ursache für dieses Verhalten liegt darin, dass in Gegenwart von Salzen eine Kompaktion der Hydrathüllen stattfindet, verbunden mit einer Schrumpfung des Gefüges (WENDLER & RÜCKERT-THÜMLING 1993). Bei Trocknung sorgt die Kristallisation von Salz im Porengefüge für die beschriebene Dilatation (SNETHLAGE ET AL. 1995).

In der Regel ist die Konzentration der im Wasser gelösten Salze noch sehr gering, aber durch Verdunsten kapillar aufgesaugten Wassers erfolgt eine Zunahme des Salzgehaltes in der Lösung. Wird dann das Löslichkeitsprodukt der Salze überschritten, kristallisieren diese aus und fraktionieren sich am Gebäude gemäß ihrer Löslichkeit. Schwerlösliche Salze reichern sich näher zur Quelle, leichter

lösliche in größerer Entfernung dazu ab (ARNOLD 1990). Die Interaktion von Salzen und Salzgemischen mit Wasser in der flüssigen und gasförmigen Phase verursacht eine Vielzahl von Phasenübergängen von Kristallisation und Hydratation. Kristallwachstum, verbunden mit diesen Phasenumwandlungen, ist eine wichtige Ursache der Zerstörung porösen Materials (STEIGER 2004). Historische Bauwerke enthalten meist komplexe Salzgemische. Innerhalb des Bereiches der relativen Luftfeuchtigkeit unterliegen einfache Salzgemische kontinuierlichen Phasenumwandlungen. Leicht lösliche Salze, wie zum Beispiel NaCl, durchlaufen bei normaler Witterung häufige Kristallisations- und Lösungszyklen und können sich mit dem Wasser in tiefere Fassadenbereiche zurückziehen. Die daraus resultierende dynamische Beanspruchung verursacht Schäden in den Porenwänden des Baumaterials. Schlecht lösliche Salze, wie Gips oder Kalziumkarbonat, kristallisieren zuerst aus. Sie sammeln sich in den äußeren 0,5 bis 1,0 cm, verändern somit die Porenradienverteilung in diesem Bereich und blockieren folglich den Kapillartransport und reduzieren die Trocknungsrate. Die Anwesenheit von Salzen im Porenraum begünstigt die Wahrscheinlichkeit eines Frostschadens, da mehr Wasser im Gestein zurück bleibt.

Konzentrationsunterschiede gelöster Salze verursachen eine Diffusion von Salzionen im Porengefüge der Baustoffe. Bei der Trocknung eines Bauteils reichern sich die Salze an der Verdunstungszone an und gehen bei einer Feuchteaufnahme wieder in Lösung. Sie werden mit der Feuchte an einen anderen Platz transportiert oder streben selbst, auf dem Weg der Diffusion, einem Konzentrationsausgleich im Baustoff entgegen (GARRECHT 1992).

Die Gefahr einer Salzbelastung in einer zu behandelnden Fassade besteht darin, dass die Salze direkt hinter der behandelten Zone auskristallisieren und damit ein hohes Potential der Schalenbildung in sich bergen.

Zur Beurteilung und Vorhersage des Schädigungspotentials wurden umfangreiche Salzanalysen sowohl vor als auch nach der Wiederbehandlung durchgeführt. Weitere Gründe für eine Detektierung der Salze liegen darin, zu erkennen, inwieweit sie durch das Einbringen des neuen Schutzmittels innerhalb der Fassade transportiert werden und somit welchen Einfluss sie auf den Feuchtehaushalt bzw. das Trocknungsverhalten der Fassade haben werden.

Methodik

Parallel der Probenahme zur Bestimmung des Ist-Zustandes der Fassade als auch in Folge der Wiederbehandlungstests an den Musterflächen wurden von jedem untersuchten Quader im Tiefenprofil Bohrmehlproben für die Anionenanalyse entnommen. Mit abnehmender Bohrerstärker sind jeweils sechs 1 cm tiefe Löcher erbohrt worden (siehe Abb. 8.80).

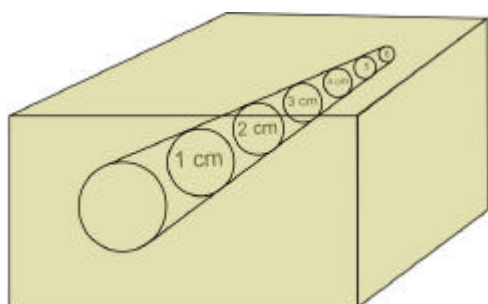


Abb. 8.80: Probengewinnung zur Salzanalyse. Mit jeweils abnehmendem Bohrerdurchmesser wurde ein 1 cm tiefes Loch gebohrt und das entstandene Bohrmehl aufgefangen. Durch die geringer werdenden Bohrerdurchmesser konnte eine Kontamination des folgenden Abschnittes verhindert werden.

Im Kaltwasseraufschluss sind die Proben 24 Stunden gerüttelt und anschließend ionenchromatographisch auf ihren Anionengehalt untersucht worden.

8.5.1 Ergebnisse

Die Proben wurden auf Fluorid-, Chlorid-, Nitrat-, Phosphat- und Sulfationen untersucht. Da die Fluorid- und Phosphatgehalte zumeist nur sehr gering waren bzw. gar nicht detektiert werden konnten, beschränkt sich die folgende Darstellung auf die übrigen drei Anionen.

8.5.1.1 Regensburger Grünsandstein

Funcosil H

Die folgende Gegenüberstellung enthält zum einen die Ergebnisse des Ist-Zustandes der Fassade, der im Jahr 2001 bestimmt wurde und in den Diagrammen in grauen, entsprechend den Ionen farbige eingerahmten Balken dargestellt ist, sowie die Anionengehalte nach der Wiederbehandlung auf den Musterflächen, die durch die farbigen Balken repräsentiert werden.

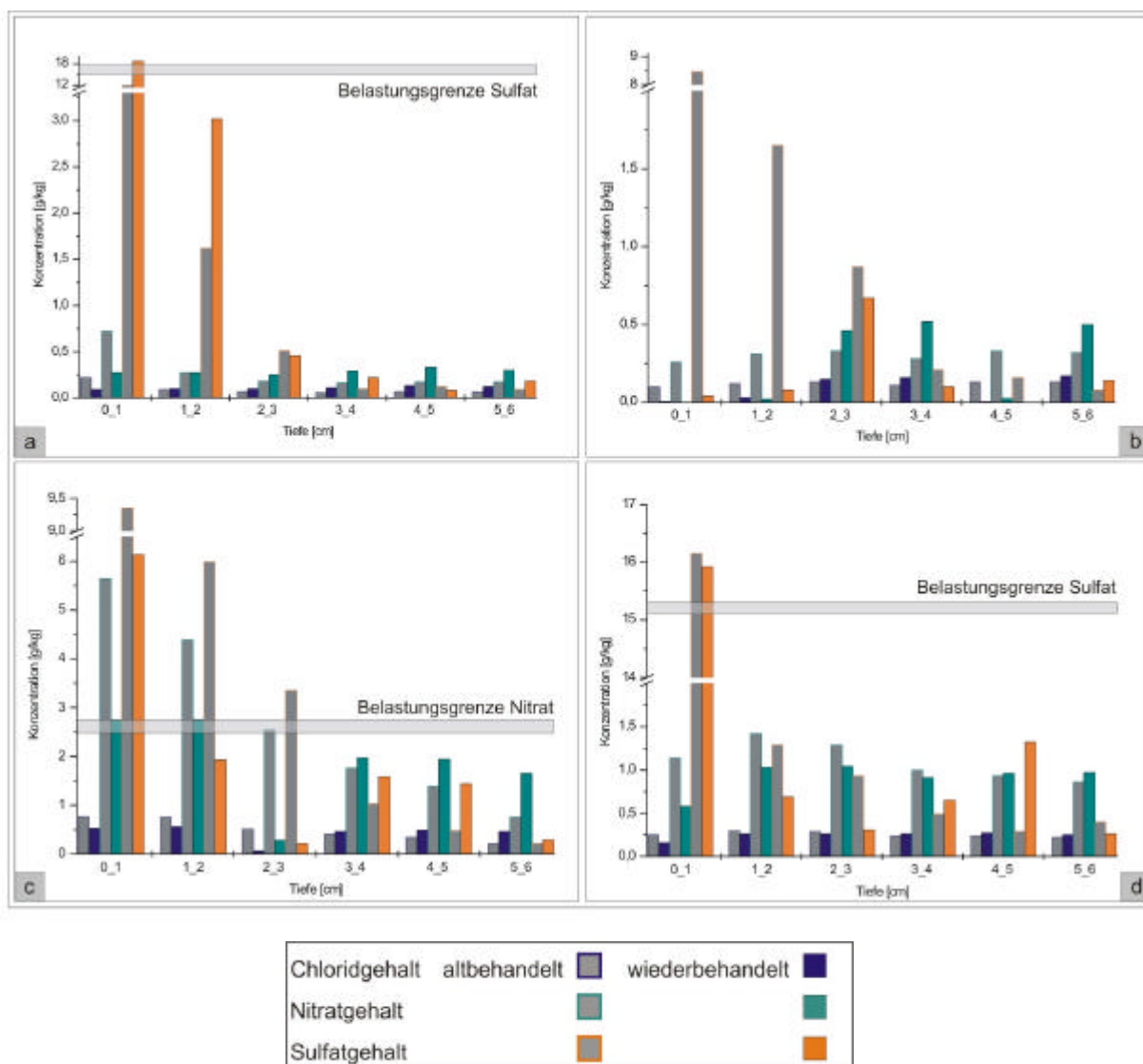


Abb. 8.81 (a-d): Tiefenprofil der Anionenverteilung (Chlorid-, Nitrat- und Sulfationen) vor und nach der Wiederbehandlung mit Funcosil H, Regensburger Grünsandstein. a - Varietät I, b – Varietät II, c – Varietät III und d – Varietät IV. Die Legende am Ende der Abbildung gilt für alle dargestellten Diagramme.

Die Abbildung 8.81_a gibt die Entwicklung der Ionenkonzentration in Folge der Wiederbehandlung mit Fungosil H auf Varietät I wieder. Im Bereich zwischen 0-1 cm konnte sowohl für das altbehandelte als auch das wiederbehandelte Material ein relativ hoher Sulfatgehalt (Gips) detektiert werden, der sogar die Belastungsgrenze für Sulfat (15 g/kg Probe) überschreitet. Der altbehandelte Zustand des in diesem Fall beprobten Quaders (8.81_a) repräsentiert bereits eine zweifach Behandlung.

Eventuell kam es durch die ältere Konservierung schon über einen längeren Zeitraum zu einer begünstigten Akkumulation von Schadstoffen aus der Atmosphäre, die vor allem auch bis in eine Tiefe von 2 cm reichen.

Der Unterschied zwischen alt- und wiederbehandeltem Quader liegt für den Bereich zwischen 1-2 cm nicht mehr innerhalb eines möglichen Messfehlers. Die Verlagerung der bereits vorhandenen Ionenkonzentration konnte nicht beobachtet werden. Eine Erklärung dieses Phänomens ist schwierig, da die Steigerung der Sulfatkonzentration in größerer Tiefe offensichtlich nicht durch Abwanderung des Salzes zustande gekommen ist, zumal Calciumsulfat und auch Nitrate in TEOS nicht löslich sind.

Dennoch befindet sich diese Zone entsprechend den Ergebnissen der Eindringtiefen, die mit den unterschiedlichsten Methoden ermittelt wurden, nahe der Wiederbehandlungsfront. Würde das gesteigerte Sulfationenaufkommen hinter der hydrophobierten Zone liegen, könnte der Kontakt mit Feuchtigkeit, die beispielsweise über ein defektes Fugennetz hinter die behandelte Zone eingedrungen ist, zu einer Gefährdung des Bausteins führen. Verminderten Trocknungsrate und Gefügaufweitung durch Kristallisationsprozesse könnten in diesem Fall unter Umständen zur Schalenbildung führen.

Für Varietät II (siehe Abb. 8.81_b), wo die Sulfatkonzentrationen des altbehandelten Gesteins deutlich niedriger sind als bei Varietät I, wurde in Folge der Wiederbehandlung mit Fungosil H im Bereich zwischen 0-1 cm eine sehr starke Reduzierung der Sulfatkonzentration festgestellt. In weniger extremem Ausmaß gilt dieses auch für die Zone zwischen 1-2 cm. Das gleiche trifft auch für die Chlorid- und Nitrationen zu, obgleich deren Konzentration sehr gering ist. Demnach ist es auch hier nicht zu einer Verlagerung der Salzfracht in größere Fassadentiefen gekommen. Eine mögliche Erklärung für die Reduktion der Gehalte ohne eine Umlagerung könnte sein, dass Salze im KSE-Gel eingeschlossen werden, somit nicht in Lösung gehen und der Messung entzogen werden. Allerdings müsste der Gelfilm durch die Pulverisierung der Probe eigentlich zerstört werden. Diese Vermutungen müssten im Rahmen weitergehender Untersuchungen geprüft werden.

Varietät III (siehe Abb. 8.81_c) weist im altbehandelten Zustand im Bereich zwischen 0-1 cm eine Sulfatkonzentration auf, die der von Varietät II nahezu entspricht. Allerdings bleibt im Gegensatz zu den bisher betrachteten Varietäten I und II der Sulfatgehalt auch bis in Tiefen bis 3 cm vergleichsweise hoch. Die Belastungsgrenze für Nitrat (2,5 g/kg Probe) wird im altbehandelten Zustand um mehr als das Doppelte überschritten. Nach der Wiederbehandlung mit Fungosil H sind einheitlich die Chlorid-, Nitrat- und Sulfatgehalte abgesenkt worden. Die Verlagerung der Ionen in größere Tiefen der Fassade ist nicht geschehen. Eine bedenkliche Akkumulation der Salze hinter der Eindringgrenze des erneut eingebrachten Agens liegt ebenfalls nicht vor.

Varietät IV (siehe Abb. 8.81_d) besitzt Sulfationkonzentrationen, die nahezu denen der Varietät I entsprechen. Die Belastungsgrenze für Sulfat wird sowohl im alt- als auch im wiederbehandelten Zustand überschritten. Die Chlorid- und Nitratgehalte sind vergleichsweise gering. In Folge der Behandlung konnte bei den bestimmten Ionen eine Absenkung der Konzentration detektiert werden. Es fand auch hier keine Verlagerung der Salze in größere Tiefen statt. Hinter der Schutzmittelfront kam es nicht zur Anreicherung von diversen Salzen.

Funcosil OH, verdünnt und Funcosil SNL

Im Falle einer verdünnten Applikation von Funcosil OH kann man speziell in Abbildung 8.82_b erkennen, dass der Einfluss des Agens bezüglich einer Veränderung der Salzfracht nicht tiefer reicht als bei der Anwendung von unverdünntem Funcosil H. Abbildung 8.82_a stellt die Entwicklung der Ionenverteilung vor und nach der Wiederbehandlung mit verdünntem Funcosil OH auf Varietät III dar. Dabei erscheinen die Chlorid- und Sulfatkonzentrationen vergleichsweise niedrig, wohingegen der Nitratgehalt fast an der Belastungsgrenze bei 2,5 g/kg liegt. Durch die Behandlung des entsprechenden Quaders sind unter Berücksichtigung des möglichen Messfehlers keine Veränderungen der Anionenkonzentrationen im Tiefenprofil festzustellen gewesen. Demnach kam es weder zu einer Verlagerung der Salze noch zu einer Akkumulation hinter der erneut behandelten Zone. Die nebenstehende Darstellung der Entwicklung auf Varietät IV (siehe Abb. 8.82_b) zeigt für das altbehandelte Material ebenfalls einen relativ hohen Nitratgehalt im Bereich zwischen 0-1 cm. Die Belastungsgrenze für Nitrat wird überschritten.

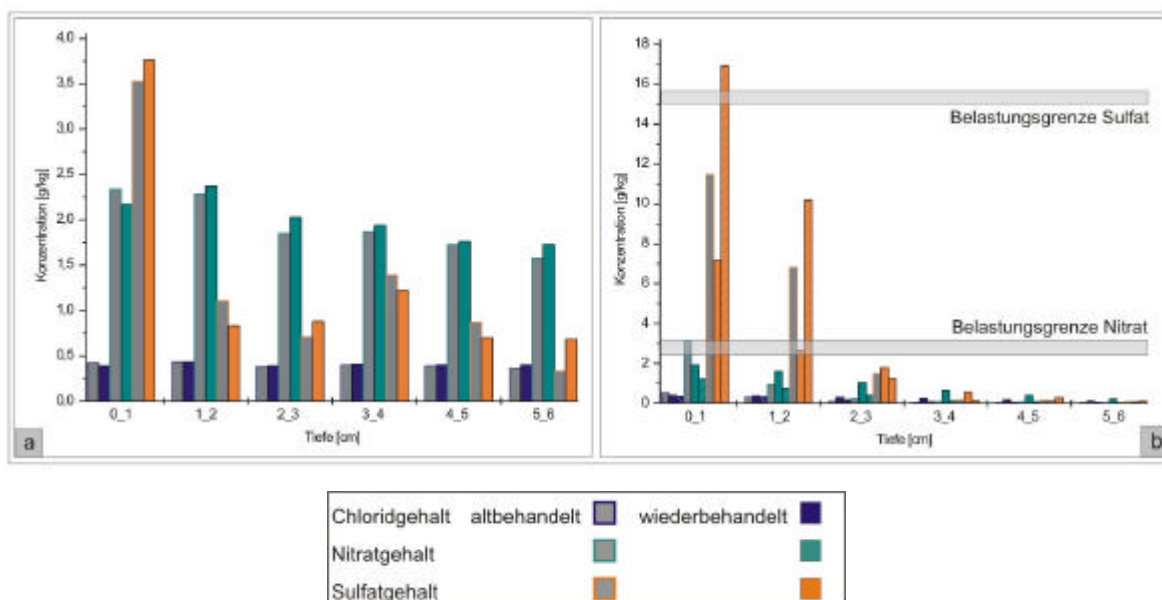


Abb. 8.82 (a-b): Tiefenprofil der Anionenverteilung vor und nach der Wiederbehandlung mit verdünntem Funcosil OH auf Varietät III (a) und auf Varietät IV (b). In 8.82_b wurde eine Probestelle des Quaders mit verdünntem Funcosil OH und die andere noch zusätzlich mit Funcosil SNL behandelt (hellgraue Streifen).

Der Sulfatgehalt der altbehandelten Fläche ist entsprechend dem in Abbildung 8.81_d erhöht, obgleich er unterhalb der Belastungsgrenze bleibt. Durch die kombinierte Wiederbehandlung aus verdünntem Funcosil OH und anschließender Hydrophobierung mit Funcosil SNL resultiert demgegenüber in einem Anstieg der Sulfationenkonzentration im Bereich zwischen 0-2 cm. Die erneut eingebrachten Schutzmittel sind mit Hilfe der Untersuchungsmethode bis in 2 cm Tiefe verfolgt worden, somit besteht auch für die kombinierten Applikation von Festiger und nachfolgender Hydrophobierung (8.82_b) keine Gefahr einer erhöhten Sulfationenkonzentration (Gips) hinter der behandelten Zone, was ein gesteigertes Schädigungspotential mit sich bringen könnte. Der erhöhte Salzgehalt befindet sich auch in diesem Fall innerhalb des wiederbehandelten Bereichs. Eine alleinige Applikation von verdünntem Funcosil OH führt hingegen zu einer Absenkung der Sulfat- und Nitratgehalte. Es kam jedoch nicht zu einer Verlagerung der Salze in tiefere Fassadenbereiche. Nach der Wiederbehandlung mit alleiniger Festigung und der kombinierten Anwendung lagen die NO_3^- -Konzentrationen unterhalb der Belastungsgrenze, obgleich die ausschließlich festigende Behandlung im Bereich zwischen 1-2 cm

eine Anhebung des Nitratgehaltes gegenüber dem altbehandeltem Material verursachte. Der Chloridgehalt ist als relativ gering einzustufen.

Remmers 300E, unverdünnt und verdünnt

Wie bereits ausgeführt, wurde der elastifizierte Festiger Remmers 300E auf Varietät II appliziert. In diesem Fall (siehe Abb. 8.83) liegen die Ausgangskonzentrationen der Sulfationen (altbehandelt) mit 6,5 g/kg deutlich unter der in Abbildung 8.81_b dargestellten Sulfatkonzentration der Varietät II. Dieser Sachverhalt zeigt den möglichen Schwankungsbereich innerhalb einer Varietät an, obgleich beide Quader von ihrer Exposition identisch sind.

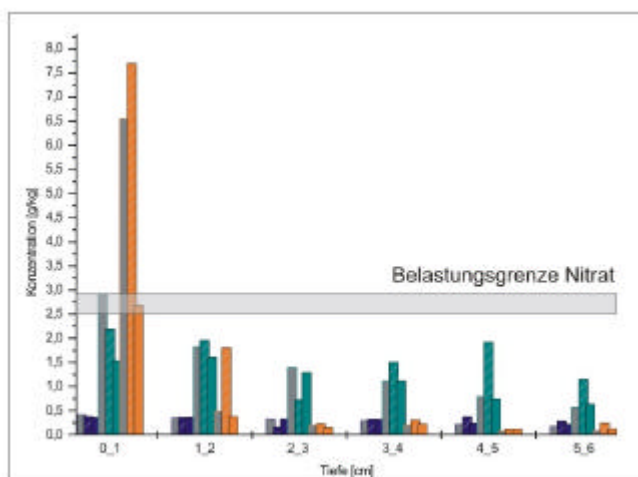


Abb. 8.83: Tiefenprofil der Anionenverteilung vor und nach der Wiederbehandlung mit Remmers 300E, unverdünnt und verdünnt, auf Varietät II. Auf den jeweiligen grauen Balken, die die Konzentration der Chlorid-, Nitrat- bzw. Sulfationen des altbehandelten Zustandes wiedergeben, folgen jeweils zwei bunte Balken, wobei die grauen Streifen die Behandlung mit verdünntem Remmers 300E anzeigen.



Die Anwendung der verdünnten Substanz scheint mit einem Anstieg des SO_4^{2-} -Gehaltes einherzugehen, wohingegen das unverdünnte Agens mit einer Absenkung desselben verknüpft ist. Dieses gegenläufige Verhalten lässt sich bis in eine Tiefe von 2 cm verfolgen. Demnach ist davon auszugehen, dass der Einfluss der eingebrachten Substanzen bis in diese Zone reicht. Der Nitratgehalt der altbehandelten Fassade liegt im Bereich der Belastungsgrenze. In Folge der erneuten Behandlung wird er allerdings abgesenkt, ohne jedoch in größerer Tiefe angereichert zu werden. Demnach kommt es nicht zu einer Verlagerung der Salzfracht. Eine Akkumulation im Bereich hinter der Eindringgrenze scheint nicht erfolgt zu sein.

Bei der Darlegung der Ergebnisse und den Versuchen einer Interpretation sind aber stets auch die möglichen Schwankungen der Lateralverteilung innerhalb eines Quaders zu berücksichtigen, die eine Bewertung erschweren. HOFERICK (2005) stellte beispielsweise in seiner Diplomarbeit an Sandsteinskulpturen des Dresdner Zwingers systematische Vergleiche zwischen mehreren, eng benachbarten Bohrungen an und detektierte für einige Ionen Unterschiede im zweistelligen Prozentbereich (bezogen auf den Mittelwert aus allen Messungen an einer Stelle).

Bezogen auf den altbehandelten Zustand kann zusammenfassend festgestellt werden, dass es in den meisten Fällen in Folge der Wiederbehandlung zu einer Steigerung der Sulfatgehalte kam. Die z.T. hohen Sulfat- und Nitratgehalte sind beachtlich und stellen ein Risiko dar. Einerseits repräsentieren sie wohl einen „Restbestand“ aus dem 19. und 20. Jh. und andererseits handelt es sich um Neubildungen seit der Konservierung 1985-88. Eine Migration der Salze von außen nach innen war anhand ansteigender und fallender Konzentrationen innerhalb des Tiefenprofils nicht nachvollziehbar. In

Folge der Wiederbehandlung mit Funcosil H auf Varietät I (siehe Abb. 8.81_a) und auf Varietät IV nach der kombinierten Applikation von verdünntem Funcosil OH und Funcosil SNL (siehe Abb. 8.82_b) kam es zu erhöhten Anstiegen im Bereich zwischen 1-2 cm, was nahe an der Endringgrenze des Schutzmittels liegt. Jedoch befindet sich diese Akkumulation noch innerhalb der wiederbehandelten Zone, weshalb kein erhöhtes Schadensrisiko zu befürchten ist. Die Entwicklungen der Anionenkonzentrationen in Folge der erneuten Konservierung der Regensburger Grünsandsteinvarietäten bezüglich der Ausbildung von Schalen sind eher als unbedenklich zu klassifizieren.

8.5.1.2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau und Schleerith

Die folgenden Gegenüberstellungen enthalten zum einen die Ergebnisse des Ist-Zustandes der Fassade, die im Jahr 2001 bestimmt wurden und in den Diagrammen in grauen, entsprechend den Ionen, farbig eingerahmten Balken dargestellt sind. Des Weiteren sind die Anionengehalte nach der Wiederbehandlung auf den Musterflächen (farbigen Balken) dargestellt. Die Diagramme in Abbildung 8.84_a, b geben die Untersuchungen an Austauschmaterial aus Schleerith, verbaut an Süd- und Westfassade des Schlosses, wieder. Wie bereits auf den ersten Blick auffällt, geht anscheinend die Exposition der Fassade mit einem unterschiedlich hohen Nitratgehalt der Bausteine einher. Sehr nahe zu den untersuchten Quadern der Südfassade (8.84_a) befinden sich große Käfige, in denen Raubvögel gehalten werden. Eventuell kann man aus dieser Vergesellschaftung die hohen Nitratkonzentrationen ableiten. Allerdings sind diese Käfige erst seit einigen Jahren dort aufgestellt. Wahrscheinlich wäre auch, dass die Kontamination durch unkontrollierte Ablage von Unrat an der Fassade bzw. den Kontakt mit aus oberen Geschossen über das Fenster beseitigter Fäkalien entstanden ist.

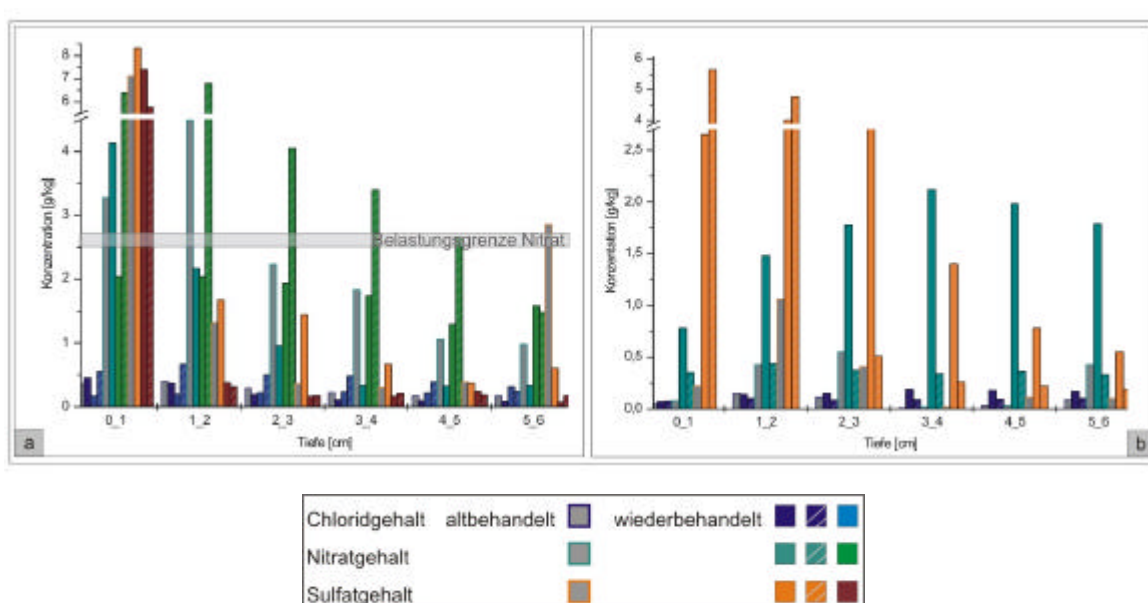


Abb. 8.84 (a-b): Tiefenprofil der Anionenverteilung vor und nach der Wiederbehandlung. Sandstein aus Schleerith an Süd-(a) und Westfassade (b) von Schloss Schillingfürst. In den 1970er und 1980er Jahren wurden die dargestellten Beispiele mit UNIL 190 konserviert und im Rahmen der Wiederbehandlung mit Funcosil SL, SNL und SNLverd. erneut hydrophobiert. Die Legende gilt auch für die Darstellung des Originalmaterials in Abbildung 8.85.

Um einen möglichen Einfluss der unterschiedlichen, zur Wiederbehandlung verwendeten, Agenzien auf die Anionenfracht im Baustein herauszupräparieren, wurden sie im Vergleich in Abbildung 8.84_a dargestellt. Auf den grauen Balken, die jeweils den altbehandelten Status der Ionenkonzentration wiedergeben, erscheint zunächst der Balken für die Wiederbehandlung mit Funcosil SL, gefolgt von Funcosil SNL und verdünntem Funcosil SNL. Aus Gründen, die nur schwer nachzuvollziehen sind, hat die Applikation von Funcosil SNL (unverdünnt) im Vergleich zur Konzentration des altbehandelten Zustandes der Fassade sowohl auf die Chlorid- als auch die Nitrationkonzentration einen senkenden Einfluss. Eine mögliche Erklärung könnte eine durch die Hydrophobierung erschwerte Eluierung der Salze sein. Die Verminderung der Gehalte geht auch nicht mit einer Akkumulation in anderen Bereichen der Fassade einher, somit ist die Migration der Salze nur schwer nachvollziehbar. Allerdings bleibt zu bedenken, dass die ohnehin hohen NO_3^- -Gehalte nach der Wiederbehandlung weit über der Belastungsgrenze liegen und sie sogar doppelt bzw. nahezu dreifach übersteigen. Da die Nitratwerte auch im Bereich zwischen 1-2 cm und darauf folgend hoch sind, kann eine Gefährdung des Bausteins nicht ausgeschlossen werden. Die Sulfationenkonzentration (Gips), die bei diesem Material – mit Ausnahme dreier Quader an der Nordfassade – deutlich niedriger ist, als die des karbonatisch gebundenen Regensburger Grünsandstein, erreicht an der Südfassade (8.84_a) im Kontrast zu tieferen Fassadenbereichen relativ hohe Werte. Es muss aber bemerkt werden, dass aufgrund der genetischen Nähe des Schilfsandsteins zum Gipskeuper dieser a priori Sulfat enthält. Durch die Wiederbehandlung wurde unter Berücksichtigung des möglichen Messfehlers keine wesentliche Veränderung der SO_4^{2-} -Konzentration bewirkt.

Die Messungen an der Westfassade (8.84_b) haben ergeben, dass der Nitratgehalt im Bereich, der im Austausch mit der Atmosphäre steht, im Vergleich zu tieferen Zonen eher sehr niedrig ist. Auch der Chloridgehalt liegt deutlich unterhalb der an der Südfassade ermittelten Konzentrationen. Die Sulfatkonzentration liegt in der vordersten Zone zwar nach der Wiederbehandlung mit Funcosil SL bzw. Funcosil SNL annähernd genauso hoch wie an der Südfassade, allerdings reicht dieser Status bis in die Tiefe von zwei Zentimetern. Im unbehandelten Zustand sind jedoch die Cl^- - und SO_4^{2-} -Konzentration sehr niedrig. Erst nach der erneuten Behandlung können die erhöhten Gehalte gemessen werden. Als Grund hierfür wäre eine Verlagerung der Salze, die als Effloreszenzen an der Oberfläche liegen (Gips), denkbar. Die etwas höhere Konzentration der Sulfationen im Bereich zwischen 1-2 cm könnte ein Hinweis auf ein leichter lösliches Salz sein, das in tiefere Fassadenregionen vorgedrungen ist. Hierzu müsste eine Kationenanalyse (AAS) durchgeführt werden, die eine genaue Bestimmung des Salzes ermöglicht (Kationenbestimmung).

Es scheint demnach ein deutlicher Unterschied zwischen Süd- und Westfassade bezüglich ihrer Nitrat- und Sulfationenkonzentrationen zu geben, woraus wiederum verschiedene Schadensphänomene resultieren können. Auffällig war, dass die tapetenartigen Ablösungen von der Fassadenoberfläche ein hauptsächliches Schadensbild der Südfassade sind. Obgleich diese in der röntgenographischen Untersuchung im Wesentlichen Kaliumkarbonat (K_2CO_3) enthalten (siehe Kapitel 6.5 bzw. Abbildung 6.8), könnten sie eventuell auf die erhöhten Nitratgehalte zurückzuführen sein.

Neben den Ausführungen über das Austauschmaterial aus Schleerith folgt in Abbildung 8.85 (a-c) die Betrachtung zur Entwicklung der Anionenkonzentration für das Originalmaterial aus Diebach/Gailnau. Auch dieses Gestein verfügt über einen relativ hohen Nitratgehalt, der zumindest im altbehandelten Zustand die Belastungsgrenze erreicht bzw. im Falle 8.85_a deutlich übersteigt. Ein erheblicher Unterschied zu den in Abbildung 8.84 dargestellten Verhältnissen des Austauschmaterials liegt in der Höhe des Sulfat-, aber auch des Chloridgehaltes. Obgleich sie unterhalb der jeweiligen Belastungsgrenzen liegen, sind sie im Vergleich viel höher als bei dem Gestein aus Schleerith.

Auffällig ist ebenso die offensichtliche Abhängigkeit – im Speziellen der Sulfatkonzentration – von der ursprünglichen Behandlung. Demnach begünstigte die Behandlung der damaligen Musterfläche mit PTEXS, der Mikroemulsion mit Haftvermittler, offensichtlich im Laufe der daraufhin vergangenen 10 Jahre eine Akkumulation von Sulfat aus der Atmosphäre (siehe Abb. 8.85_a). Gleiches gilt für die Nitrat- und Chloridionen. Ohne dass es zu Konzentrationsanstiegen in größeren Fassadentiefen gekommen ist und demnach keine Verlagerung der Salzfracht stattgefunden hat, sind die Gehalte nach der Wiederbehandlung deutlich reduziert. Im Falle der ursprünglich unbehandelt verbliebenen Musterfläche (8.85_b) und bei Applikation der Mikroemulsion VP1311 /H₂O (8.85_c) zeigen die ermittelten Ionenkonzentrationen ein relativ einheitliches Bild. Die Gehalte aller drei Ionen sind Bereich zwischen 0-1 cm sehr gering und weisen nach der Wiederbehandlung einen sehr deutlichen Anstieg auf. Die Nitrationenkonzentration erreicht bzw. überschreitet demnach die Belastungsgrenze. Der SO₄²⁻-Gehalt ist sehr hoch und auf Gips zurückzuführen. Die Steigerung der Chloridkonzentration in Abbildung 8.85_b könnte aus der Freisetzung aus dem applizierten Quellminderer stammen. Laut (SNETHLAGE ET AL. 1995) zeigte jedoch eine Berechnung für den Sander Schilfsandstein, dass die Menge des eingetragenen Chlorids unter 0,1 Gew.-% bleibt und sich somit im Bereich der natürlichen Elektrolytkonzentration des Gesteins befindet.

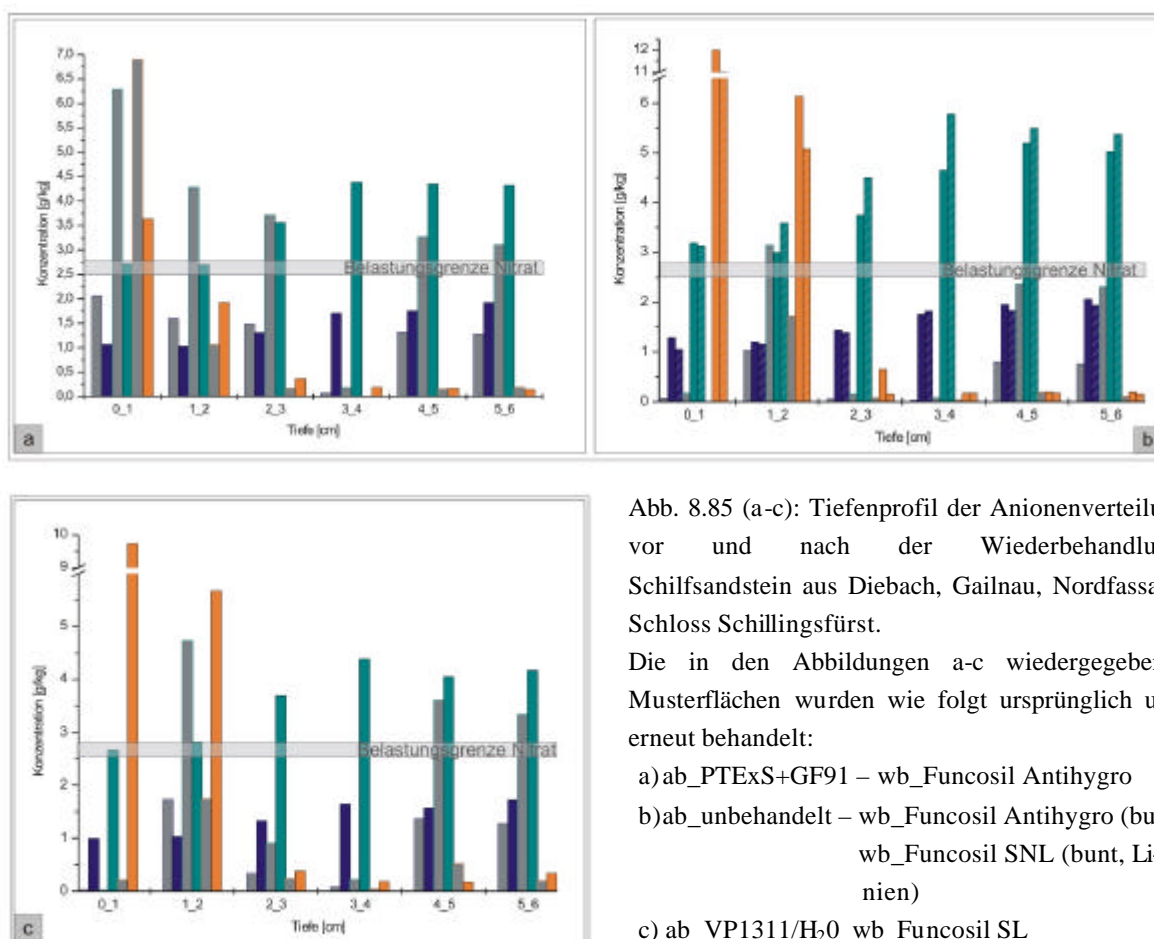


Abb. 8.85 (a-c): Tiefenprofil der Anionenverteilung vor und nach der Wiederbehandlung. Schilfsandstein aus Diebach, Gailnau, Nordfassade Schloss Schillingsfürst.

Die in den Abbildungen a-c wiedergegebenen Musterflächen wurden wie folgt ursprünglich und erneut behandelt:

- a) ab_PTEXS+GF91 – wb_Funcosil Antihygro
- b) ab_unbehandelt – wb_Funcosil Antihygro (bunt)
wb_Funcosil SNL (bunt, Linien)
- c) ab_VP1311/H₂O_wb_Funcosil SL

Der Anstieg des Salzgehaltes im vordersten Fassadenbereich könnte erneut ein Indiz dafür sein, dass die Ionen mit den Behandlungsmitteln von der Oberfläche, wo sie zum Teil als Effloreszenzen sichtbar sind, in tiefere Bereiche eingeschwemmt wurden. Der Rücktransport an die Oberfläche bei der nachfolgenden Verdunstung könnte vielleicht dadurch behindert worden sein, da die Ionen in die

Polysiloxanfilme bzw. die Tensidstruktur eingebunden werden. Die erreichten Gehalte liegen für das Nitrat, wie bereits erwähnt, an der Belastungsgrenze und für die Sulfationen ungefähr 35 g/kg darunter (Belastungsgrenze für Sulfat = 15 g/kg Probe). Daher muss mit einer Gefährdung des Bausteins gerechnet werden. In der Zone zwischen 1-2 cm zeigen beide Diagramme (8.85_b und 8.85_c) einen Anstieg der Ionenkonzentrationen des altbehandelten Zustandes. Die Konzentrationen, die nach den Wiederbehandlungstests gemessen wurden, entsprechen denen des davor liegenden Bereichs. Die erhöhten Gehalte treten aber noch im Bereich der eingedrungenen Agenzien auf. Sie reagieren demnach nicht hinter der Eindringfront der Schutzmittel mit dort eventuell vorhandener Feuchtigkeit. Die Gefahr einer dadurch forcierten Schalenbildung ist also nicht gegeben.

Vergleicht man die drei unterschiedlichen Musterflächen auf Originalmaterial (8.85_a-c), so scheint es, dass der Haftvermittler, der gemeinsam mit der Mikroemulsion PTEXS appliziert wurde (8.85_a), sozusagen als „Ionen- bzw. Schadstofffalle“ fungiert.

9. Diskussion

In den folgenden Ausführungen werden die Ergebnisse zur Wiederbehandlung der untersuchten Sandsteinvarietäten zusammengefasst dargelegt und interpretiert. Daraus ergaben sich sowohl Empfehlungen für Schutzmittelkombinationen als auch für notwendige Untersuchungsschritte bei einer Wiederbehandlung, die im Anschluss dargelegt sind.

Die Untersuchungen zur Wiederbehandlung des Regensburger Grünsandsteins an der Alten Pinakothek und des Schilfsandsteins an Schloss Schillingsfürst haben gezeigt, wie vielfältig die Probleme auf Grund der verschiedenen Gesteinseigenschaften und Vorbehandlungen im Einzelnen sein können. Es lassen sich daher keine generellen Vorschriften machen, was nach den bisherigen Erfahrungen in der Steinkonservierung nicht zu erwarten war. Wohl aber können die Untersuchungsschritte aufgezeigt werden, die vorzunehmen sind, um die mit einer Wiederbehandlung verknüpften Fragen zu klären.

1. Mikroskopische Untersuchungen

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV

Vorzustand:

Zum Teil konnten weitreichende, zusammenhängende Gelfilme detektiert werden, die bei stärkerer Vergrößerung jedoch häufig gestörte Kontakte zwischen Mineralkörnern und Kieselgelfilmen aufwiesen. Des Weiteren gab es Schrumpfungsrisse in den Gelpaketen.

Wiederbehandlung:

In Folge der Wiederbehandlung konnten lang aushaltende, geschlossene Gelfilme beobachtet werden. Es gibt viele fehlstellenfreie polymere Kornbrücken und Zwickelfüllungen, die den Zusammenhalt der Quarzkörner stabilisieren.

Schloss Schillingsfürst, Schilfsandstein, Original- und Austauschmaterial

Vorzustand:

Es waren nur geringe bzw. nahezu keine Reste des Polysiloxanfilms nachweisbar. Demnach ist die wasserabweisende Wirkung nicht mehr gegeben.

Wiederbehandlung:

Weitreichende, das Korngefüge überkleidende Polysiloxanfilme haben sich ausgebildet. Allerdings lagerten sich diese zumeist oben auf den Tonmineralrasen ab und nicht in die Mineralzwischenräume, was nur einen mäßigen hydrophobierenden Effekt nach sich zieht. Das optisch beste Resultat erzielte die Applikation von Funcosil SNL.

2. Bestimmung der Porosität

2.1 Effektiver Porenraum

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV:

Im Vergleich zum altbehandelten Material kam es durch die applizierten Schutzmittel zu einer Verringerung des effektiven Porenraums um 6,5-42 %, wobei die stärksten Reduzierungen bei den dichteren Varietäten I und II zu beobachten waren. Herausragend bezüglich der Absenkung der

Porosität war der elastifizierte Festiger Remmers 300E. Aufgrund der erhöhten Gelplattengröße ist er in der Lage, weitere Porenräume zu überbrücken, was wiederum mit einer stärkeren Reduktion der effektiven Porosität einhergeht.

Schloss Schillingsfürst, Original- und Austauschmaterial:

Die prozentuale Minderung der Porosität fällt gegenüber dem Grünsandstein deutlich geringer aus, was im speziellen darin begründet liegt, dass sich die extrem dünnen Polysiloxanfilme im Gegensatz zu den Kieselgelen nicht wesentlich auf die Größe des Porenraums auswirken. Die Reduktion der effektiven Porosität fiel auf Austauschmaterial (Schleerith) deutlich geringer aus, als bei dem Gestein aus Diebach/Gailnau, was eventuell bei den speziellen Proben auf unterschiedliche Tongehalte zurückzuführen ist. Die Behandlung mit Funcosil Antihydro erbrachte keine wesentliche Veränderung der effektiven Porosität.

Für die Untersuchung von hydrophobierten Proben ist die Bestimmung der effektiven Porosität über die Wasseraufnahme unter Vakuum nicht eindeutig geeignet, obgleich die Hydrophobierung durch das Vakuum gestört wird. Es wird empfohlen, zum Zweck der Porenraumdiagnostik an derartigen Proben die Quecksilberporosimetrie anzuwenden.

2.2 Quecksilber Porosimetrie

Schloss Schillingsfürst, Original- und Austauschmaterial:

Das Porenradialmaximum des altbehandelten Originalmaterials liegt im Kapillarporenraum zwischen 7-20 μm . Das Maximum des altbehandelten Austauschmaterials ist enger begrenzt und liegt zwischen 7-10 μm . Die Wiederbehandlung mit Funcosil SNL führt zu einer Verschiebung des Porenmaximums zu größeren Durchmessern (10-20 μm). Im unteren Mikroporenbereich scheint der Quecksilberzutritt durch das Einbringen des Polysiloxanfilms nicht wesentlich blockiert zu sein. Somit dürften sich auch keine erheblichen Behinderungen des Wasserdampftransportes ergeben.

2.3 Sorptionsisothermen

Schloss Schillingsfürst, Original- und Austauschmaterial:

Durch die doppelte Applikation von Funcosil SL und Funcosil Antihydro auf Originalmaterial ist die Wasserdampfadsorption bereits im unteren Luftfeuchtigkeitsbereich (hygroskopisch) gegenüber dem altbehandelten Zustand reduziert.

Die Wasserdampfadsorptionsisothermen der Wiederbehandlungen auf Austauschmaterial streuen sehr weit, liegen aber alle unter der des unbehandelten Materials. Der hydrophobe Siloxanfilm blockiert OH-Gruppen auf der Oberfläche, welche H_2O Moleküle anlagern würden. Die Verwendung von Funcosil SNL und SL bzw. die Kombinationsbehandlung aus Funcosil Antihydro und SL führte im Bereich der Kapillarkondensation zu besonders deutlichen Absenkungen der Sorptionsmengen. Die Gesamtwasseraufnahmen bei 93 % relative Luftfeuchtigkeit variieren sehr stark (0,4 % und 1,3 %).

Die Richtlinie zur Bewertung der Kompatibilität und Dauerhaftigkeit von Konservierungsmaßnahmen an Naturstein (SASSE & SNETHLAGE 1996) fordern, dass die Fläche unter der Wasserdampfadsorptionsisotherme des behandelten Materials kleiner oder gleich der Fläche des unbehandelten Materials sein soll. Diese Vorgabe konnte im Rahmen der dargelegten Wiederbehandlungstests eingehalten werden.

3. Prüfung der feuchtigkeitsrelevanten Parameter

3.1 Kapillare Wasseraufnahme (w-Wert)

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV:

Vorzustand

Die erste Konservierungsmaßnahme erwies sich als fortwährend wirksam (w -Werte $< 0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$).

Wiederbehandlung:

Durch die Wiederbehandlung im Labor und an der Fassade konnte die kapillare Wasseraufnahme deutlich gesenkt werden. Mit wenigen Ausnahmen (verdünntes Funcosil OH + Funcosil H auf Varietät III und IV) erfüllten alle Tests das $0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ -Kriterium, wonach keine Gefahr besteht, dass das Porengefüge eine beträchtliche Menge Wasser aufnehmen kann, welche das Gestein für längere Zeit feucht halten und Salze mobilisieren könnte.

Schloss Schillingsfürst, Schilfsandstein, Original- und Austauschmaterial:

Neben der Minderung der Quellneigung war die Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme das Hauptanliegen der Wiederbehandlung des Schilfsandsteins.

Vorzustand:

Das ursprünglich applizierte UNIL 190S zeigt nahezu keine wasserabweisende Wirkung mehr. Die Wasseraufnahmen überschreiten die Obergrenze eines noch akzeptablen w -Wertes ($0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$) zumeist um ein Vielfaches. Eine erneute Hydrophobierung ist für den dauerhaften Erhalt der Fassade unerlässlich.

Wiederbehandlung:

Mit einer Ausnahme führten alle Hydrophobierungsmittel im Labor und am Objekt zu einer Senkung des w -Wertes unterhalb $0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ (Ausnahme: Funcosil SNL/Austauschmaterial/Fassade $0,7 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$). Im Labortest konnten die w -Werte sogar unter die erstrebenswerte Grenze von $0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ herabgesetzt werden. In Anbetracht der sehr hohen w -Werte des unbehandelten, unverwitterten Schilfsandsteins kennzeichnen die Ergebnisse der Wiederbehandlung – auch wenn sie z.T. nicht das $0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ -Kriterium erfüllen – eine erfolgreiche Konservierungsmaßnahme.

Die Mikroemulsion Funcosil WS war bezüglich der Reduktion des w -Wertes vollkommen unwirksam und kann daher für die Wiederbehandlung des Schilfsandsteins nicht empfohlen werden.

3.2 Wasserdampfdiffusions -Widerstandszahl (μ -Wert), Wasserdampfdiffusions -Leitfähigkeit (Sd-Wert), Künzel Zahl

Die Wiederbehandlungstests waren generell mit einem deutlichen Anstieg des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes verknüpft. Für eine Abschätzung der damit verbundenen Gefährdung für die Bausubstanz werden die entsprechenden Sd-Werte und Künzel Zahlen mit in Betracht gezogen. Diese Parameter dienen der Bewertung, ob die Fassade trotz erhöhter μ -Werte die Möglichkeit hat, nach einem Regenereignis wieder vollständig abzutrocknen.

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV:

Würde man nur den μ -Wert betrachten, könnte weder eine kombinierte Behandlung mit Funcosil OH und Funcosil H, noch die alleinige Applikation von Funcosil H empfohlen werden. Unter Hinzunahme

von Sd-Wert und Künzel Zahl relativiert sich jedoch dieses Ergebnis. Die Sd-Werte sind nach der Wiederbehandlung z.T. deutlich unterhalb 0,35 m und liegen somit im Grenzbereich zwischen mittel- und hochwasserdampfdurchlässigem Material. Die Künzel Zahlen aller wiederbehandelten Grünsandsteinvarietäten befinden sich unterhalb des empfohlenen Richtwerts von $0,1 \text{ kg/m-h}^{-0,5}$, wonach gewährleistet ist, dass das Gestein nach einem Regenereignis wieder vollständig austrocknen kann. Die Künzel Zahl sollte nur bedingt zur Bewertung einer Hydrophobierung hinzugezogen werden, weil bei der Berechnung die Fugen, welche Risikobereiche für eindringende Feuchtigkeit darstellen, nicht berücksichtigt werden.

Schloss Schillingsfürst, Schilfsandstein, Original- und Austauschmaterial:

Verallgemeinernd können die Ergebnisse des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes dahingehend betrachtet werden, dass es in Folge der Wiederbehandlung bezogen auf den unbehandelten, unverwitterten Materialzustand zu einem deutlichen Anstieg der μ -Werte kam, die Ergebnisse jedoch zum großen Teil noch innerhalb der empfohlenen Richtlinien einer 20 %igen Steigerung liegen. Eine einfache und verdünnte Applikation ist generell mit einem geringeren Anstieg des μ -Wertes verbunden, als die doppelte oder unverdünnte Anwendung.

Die Wiederbehandlungstests ergaben eine deutliche Senkung der w-Werte und einen mäßigen Anstieg der μ -Werte. Daher sind die resultierenden Künzel Zahlen = $0,1 \text{ kg/mh}^{-0,5}$. Abgesehen von der Verwendung von Funcosil Antihydro, das nicht auf die Reduzierung der Wasseraufnahme ausgerichtet ist, einer Probestfläche auf Austauschmaterial, die mit Funcosil SNL behandelt wurde und der bereits erwähnten Applikation der Mikroemulsion WS, besteht entsprechend den Ergebnissen keine Gefahr einer dauerfeuchten Fassade.

Die Untersuchungen zeigten, dass die beiden Schilfsandsteinvarietäten nicht als einheitlich angesehen werden sollten. Die Anwendung gleicher Schutzmittel hatte deutlich unterschiedliche μ -Werte zur Folge. Einer geplanten Maßnahme sollten aus diesem Grunde stets umfangreiche Voruntersuchungen zu Grunde liegen.

3.3 Hygrische Dilatation

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV:

Die Kennwerte der unbehandelten und unverwitterten Grünsandsteinvarietäten, die eine deutliche Staffelung von niedrigeren Werten für die Varietäten I und II und entsprechend höheren für Varietät III und IV anzeigen, erlauben eine Zuordnung des Gesteins in die Kategorie nicht quellender Materialien.

Es kann festgestellt werden, dass es bei den Steinfestigern Funcosil OH zu Absenkungen und bei Remmers 300E zu nur mäßigen Steigerungen der hygrischen Dilatation gekommen ist. Zum Teil sind die Dehnungsbeträge nach der Wiederbehandlung im Bereich der vordersten Bohrkernscheibe abgesenkt und in der darauf folgenden Zone (1 cm) gesteigert, eine Beobachtung, die sehr gut mit der Bestimmung der Sulfationenkonzentration korreliert.

Aus den Ergebnissen kristallisiert sich die Applikation von Funcosil OH gegenüber der Verwendung von Funcosil H als vorteilhaft heraus. Die Festigung scheint das Gefüge in der Art zu stabilisieren, dass die Dehnung der teilweise stark sulfatbelasteten Quader effektiv unterbunden wird.

Was die gesteigerten Sulfatgehalte anbetrifft, kann gefolgert werden, dass im Bedarfsfall vor einer erneuten Behandlung eine Entsalzung vorgenommen werden sollte, um die mechanische Beanspruchung durch den Wechsel von Hydratation und Kristallisation einzudämmen.

Schloss Schillingsfürst, Schilfsandstein, Original- und Austauschmaterial:

Bekanntermaßen sind die Mikroporen (< 100 nm) für hohe Dilatationen verantwortlich. Diese Porengrößen werden häufig durch die Schutzmittel nicht erreicht, weil sie immer mit Wasser gefüllt sind (Kapillarkondensation). Daher ist es nicht erstaunlich, dass die Mehrzahl der applizierten Agenzien nicht in der Lage waren, die hygri-sche Bewegung des Gefüges und die daraus resultierenden Dehnungen abzuwenden. Die Applikation der Silane bzw. der oligomeren Siloxane verursachte sogar in den meisten Fällen eine enorme Steigerung der hygri-schen Dilatation. Dagegen wirken die quellmindernden Tenside, Funcosil Antihygro, gerade in diesem Mikroporenbereich. Die Verwendung im Rahmen der Wiederbehandlung kann durchaus empfohlen werden. Die Feuchtedehnung konnte um ca. 30 % gegenüber dem altbehandelten Material abgesenkt werden. In einem Fall wurde durch die doppelte Applikation von Funcosil Antihygro sogar eine 70 %ige Senkung erzielt. Die kombinierte Behandlung aus Funcosil Antihygro und Funcosil SL vermochte sowohl eine Minimierung der Quellneigung als auch der Wasseraufnahme zu erzeugen.

Zusammenfassend betrachtet, kann aufgrund des negativen Einflusses auf die hygri-sche Dilatation die Anwendung von unverdünntem Funcosil SNL für die Wiederbehandlung von Schilfsandstein an Schloss Schillingsfürst nicht empfohlen werden.

Dagegen zeigt sich, dass verdünnte Anwendungen von Vorteil sind. Verdünntes Funcosil SNL auf Schleerither Austauschmaterial konnte die Gesamtwasseraufnahme absenken, ohne die Dehnung zu verstärken. Die Wiederbehandlung mit Funcosil SL ist auch empfehlenswert.

Die Wiederbehandlung mit UNIL 290 führte zu einer Steigerung der Dilatation um 100 % gegenüber dem altbehandelten Material. Damit war zwar erst das Niveau des unbehandelten Materials erreicht, doch ist die sprunghafte Steigerung als Ausschlusskriterium zu bewerten.

4. Prüfung der Festigkeitsparameter

4.1 Biaxiale Biegezugfestigkeit

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV:

Zum momentanen Zeitpunkt kann für die Fassade der Alten Pinakothek und die entsprechenden Grünsandsteinvarietäten festgestellt werden, dass trotz nachweislich abnehmender Wirkung im äußeren Fassadenbereich keine erneute Festigung erforderlich ist. Dennoch ist eine regelmäßige Kontrolle der Festigkeitsparameter anzuraten.

Mit einer Ausnahme (Varietät IV) führte die Wiederbehandlung mit Funcosil OH + Funcosil H im Labor und von Funcosil H am Objekt zu relativ harmonischen Festigkeitsprofilen in Bezug auf das unbehandelte, unverwitterte Gestein. Durch die Verwendung verdünnter Festiger (Funcosil OH, Remmers 300E) konnten bei nahezu gleichem Festigkeitszuwachs die Eindringtiefen gesteigert werden.

Die Gegenüberstellung der Werte der spezifischen Dehnung e (Verhältnis β_{BZ} und E-Modul) für alle untersuchten Proben ergab, dass mit Sicherheit davon ausgegangen werden kann, dass durch die erneute Konsolidierung keine Überfestigung der Außenzone verursacht wird, sondern das Verhältnis β_{BZ}/E -Modul des unbehandelten Materials nahezu gewahrt werden kann. Es konnte bestätigt werden,

dass bei Anwendung elastifizierter Kieselsäureester die Entwicklung des E-Moduls harmonischer verläuft. Bei dennoch gleichwertigem Festigkeitszuwachs ist er in problematischen Fällen dem konventionellen Festiger vorzuziehen.

Schloss Schillingsfürst, Schilfsandstein, Original- und Austauschmaterial:

Die Wiederbehandlung des Schilfsandsteins zielte nicht primär auf eine Steigerung der Festigkeit ab. Dennoch konnte durch die Applikation der Alkyltrialkoxysiloxane sowohl eine geringe Steigerung der β_{BZ} als auch des E-Moduls detektiert werden. Die deutlichste Steigerung unter den Hydrophobierungsmitteln erzielte Fungosil SNL auf Austauschmaterial (Schleerith). Die Applikation des verdünnten Festigers Silex OH bewirkte auf Originalmaterial (Diebach/Gailnau) eine deutliche Steigerung der Biegezugfestigkeit. Allerdings ging die Behandlung ebenso mit einer überproportionalen Steigerung des E-Moduls einher und ist aus diesem Grund nicht zu empfehlen.

4.2 Ultraschalluntersuchungen

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV:

Bei allen Varietäten führt die Wiederbehandlung zu einer deutlichen Steigerung der Longitudinalwellengeschwindigkeit im Bereich der vorderen 2,0 cm. An dieser Stelle bleibt anzumerken, dass die verschiedenen Messmethoden unterschiedliche Eindringtiefen an sich einander entsprechenden Proben erbrachten. Dieses Phänomen ist wohl hauptsächlich auf die verschiedene Auflösung der Methoden zurückzuführen. In Abhängigkeit von der Gesteinsvarietät, dem applizierten Schutzmittel und dessen Wirkstoffgehalt konnten Steigerung der Longitudinalwellengeschwindigkeit von 200-800 m/s detektiert werden.

Eine Erhöhung der Eindringtiefe durch die Verwendung verdünnter Festiger konnte mit dieser Messmethode nicht gefunden werden.

Zusätzlich zu den Messungen der Longitudinalwellengeschwindigkeit wurden einige Signale (doppelte Laufzeit) fouriertransformiert. Die resultierenden Fouriersignale zeigen in allen Fällen eine zumeist sehr deutliche Dämpfung der Amplitude. Demnach geht als Folge einer (Wieder-)behandlung mit festigenden Substanzen ein Anstieg der Geschwindigkeit der v_L -Welle mit einer Dämpfung der Amplituden in der Fourier-Transformation einher. Mit der verwendeten Versuchsanordnung ist es nicht möglich, verlässliche Aussagen über die Art des applizierten Schutzmittels zu machen, ob es sich z.B. um einen elastifizierten oder konventionellen Festiger handelt. Aber der theoretische Ansatz, dass Änderungen der Grenzflächeneigenschaften in einem Material zu unterschiedlichen Streu- und Dämpfungserscheinungen führen, findet mit dieser Auswertungsmethode Bestätigung. Es ist empfehlenswert, diese Untersuchungen an Sandsteinen fortzusetzen und damit das Anwendungsfeld der Fourier-Transformation von Zeitsignalen der Longitudinalwellenmessung zu erweitern.

Schloss Schillingsfürst, Schilfsandstein, Original- und Austauschmaterial:

Anders als die Resultate der Biaxialen Biegezugfestigkeit weisen die Longitudinalwellengeschwindigkeiten nicht auf einen Festigkeitszuwachs hin.

4.3 Bohrwiderstandsmessungen

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV:

Die Bohrwiderstandsmessung ist geeignet, um die Festigkeit in Folge einer Wiederbehandlung mit Kieselsäureestern zu bestimmen. Die erzielten Resultate korrelieren in den meisten Fällen sehr gut mit den entsprechenden Ergebnissen der Biegezugfestigkeit und der Longitudinalwellenmessungen. Allerdings ist es aufgrund der gering gewählten Messtiefe von einem Zentimeter nicht möglich, eine Aussage bezüglich der Eindringtiefe der Schutzmittel zu treffen. Für folgende Messungen ist es ratsam, die Untersuchungstiefe mindestens auf zwei Zentimeter auszudehnen, um eine bessere Korrelationsmöglichkeit der verschiedenen Messmethoden zu gewährleisten.

Schloss Schillingsfürst, Schilfsandstein, Original- und Austauschmaterial:

Das Phänomen der Festigkeitssteigerung in Folge der erneuten Hydrophobierung konnte auch mit Hilfe der Bohrwiderstandsmessung bestätigt werden.

5. Salzbestimmung

Alte Pinakothek, Regensburger Grünsandstein, Varietät I-IV

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass, bezogen auf den altbehandelten Zustand, in den meisten Fällen in Folge der Wiederbehandlung eine Steigerung der Sulfatgehalte, z.T. auch über die Belastungsgrenze hinaus, beobachtet werden konnte. Varietät III fiel wiederholt durch grenzwertüberschreitende Nitratkonzentrationen des altbehandelten Materials auf, die allerdings stets nach der erneuten Behandlung auf $= 2,5 \text{ g/kg}$ reduziert waren. Eine Migration der Salze konnte nicht nachvollzogen werden. Die Entwicklungen der Anionenkonzentrationen in Folge der erneuten Konservierung der Regensburger Grünsandsteinvarietäten bezüglich der Ausbildung von Schalen sind eher unbedenklich.

Schloss Schillingsfürst, Schilfsandstein, Original- und Austauschmaterial

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen Süd- und Westfassade bezüglich ihrer Nitrat- und Sulfationenkonzentrationen zu verzeichnen, woraus wiederum verschiedene Schadensphänomene resultieren können. Auch konnte festgestellt werden, dass die Sulfat- und Chloridgehalte des Originalmaterials deutlich über denen des Austauschmaterials liegen. Ebenso scheint eine Abhängigkeit der Ionenkonzentration von der ursprünglichen Behandlung offensichtlich. Speziell an der Südfassade von Schloss Schillingsfürst konnten hohe Nitratgehalte ermittelt werden, die wohl auf die Nutzung des Gebäudes zurückzuführen sind. Durch die Wiederbehandlung mit Funcosil SL und verdünntem Funcosil SNL haben sich diese Gehalte z.T. deutlich gesteigert. Da die NO_3^- Konzentrationen in manchen Bausteinen auch im Bereich hinter der ermittelten Eindringtiefe des neuen Schutzmittels erhöht ist, kann eine Gefährdung der Bausubstanz nicht ausgeschlossen werden. Nach der Applikation von unverdünntem Funcosil SNL konnte eine Absenkung unter die Belastungsgrenze detektiert werden. Generell muss allerdings die erhöhte Nitrationkonzentration des altbehandelten Materials als kritisch betrachtet werden, da entweder die Kristalle oder die hydratisierten Phasen den Porenraum für einzubringendes Schutzmittel verlegen und dessen Eindringen erschweren.

Es kam in Folge der erneuten Behandlung auch vereinzelt zu grenzwertigen Anstiegen der Ionenkonzentration (NO_3^- und SO_4^{2-}) im Bereich 0-1 cm. In diesem Fall waren Ausblühungen an der

Oberfläche beobachtet worden und es kam demnach möglicherweise zu einer Einschwemmung der Salzfracht.

6. Visuelles Erscheinungsbild

Ein Glanz oder Grauschleier konnte an keinem der Objekte beobachtet werden. Die Hydrophobierung ging am Schilfsandstein von Schloss Schillingsfürst mit einer geringen, an der Alten Pinakothek mit einer deutlichen Vertiefung der Gesteinsfarbe einher.

7. Empfehlenswerte Schutzmittel

Unter Berücksichtigung oben angeführter Bedingungen und Einschränkungen ist für die vorgestellten Gesteine eine Wiederbehandlung unter Einhaltung des Risiko / Nutzen Verhältnisses durchführbar. Es sollte allerdings im Vorfeld einer, als notwendig erscheinenden, erneuten Konservierung zunächst unbedingt geprüft werden, ob durch angemessene Reinigungsmaßnahmen die Hydrophobierung wieder aktiviert werden kann und man so auf eine, die Dampfdiffusion deutlich beeinträchtigende, erneute wasserabweisende Einstellung des Materials verzichten könnte.

Unter Berücksichtigung aller ermittelten Ergebnisse kristallisieren sich folgende Konservierungsmittel als empfehlenswert für eine wiederbehandelnde Maßnahme auf den untersuchten Substraten heraus: Generell ergaben die Resultate, dass eine verdünnte Applikation der Schutzmittel sowohl für eine harmonische Entwicklung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes als auch der hygri-schen Dilatation günstiger ist. Demnach können für die Wiederbehandlung des Regensburger Grünsandsteins sowohl Funcosil OH, verdünnt mit Ethanol (1:2) und Remmers 300E, verdünnt mit Ethanol (1:2) empfohlen werden.

Von den an Schloss Schillingsfürst untersuchten Schutzmitteln hat sich unter Abwägung aller Pro und Contra nur die verdünnte Applikation des anhydrolisierten Silans Funcosil SNL als empfehlenswert erwiesen. In unverdünnter Form neigt dieses Schutzmittel hauptsächlich zu einer nicht vertretbaren Steigerung der hygri-schen Dilatation. Im Gegensatz dazu führt Funcosil SL zu zufrieden stellenden Ergebnissen bei der hygri-schen Dilatation, stellt allerdings für eine Konservierungskonzept der gesamten Fassade von Schloss Schillingsfürst bezüglich der Steigerung des Wasserdampfdiffusions-Widerstandes eine Gefährdung für das Austauschmaterial aus Schleerith dar.

Zur Minderung der Quellneigung und mit Hinblick auf die Auswirkungen auf andere Parameter ist die Verwendung von Funcosil Antihygro uneingeschränkt zu empfehlen. Zur gleichzeitigen Absenkung der Wasseraufnahme wurde versuchsweise im Nachhinein Funcosil SL aufgetragen. Bezüglich der Absenkung des w-Wertes war diese Schutzmittelkombination erfolgreich, kann allerdings aufgrund des negativen Einflusses auf den Wasserdampfdiffusions-Widerstand keinesfalls befürwortet werden. Eine festigende Behandlung mit Silex OH kann aufgrund des stark angestiegenen E-Moduls ebenfalls nicht empfohlen werden.

In Zukunft muss weiter an der Optimierung der Eindringtiefen gearbeitet werden, da die noch vorhandenen organischen Reste der siliziumorganischen Substanzen unpolar sind und das Eindringen der neuen Schutzmittel erschweren. Es bleibt auch zu empfehlen, dringend weitere Schutzmittel bezüglich ihrer Tauglichkeit für wiederbehandelnde Maßnahmen an Sandsteinen zu überprüfen.

Ein Abrücken von den Richtlinien, die in SNETHLAGE (1997) und SNETHLAGE & WENDLER (1996) zur Bewertung einer erfolgreichen Konservierungsmaßnahme aufgestellt worden sind, ist nicht notwendig. Um eine Gefährdung des Materials zu vermeiden, eignen sich diese Normen auch für die Bewertung einer Wiederbehandlung.

8. Empfehlungen

Es müssen einer erneuten konservierenden Maßnahme unbedingt umfangreiche Tests im Labor und an der Fassade vorausgehen, da die petrologische Bandbreite der Gesteine doch an den meisten Objekten sehr variabel sein kann und sich daran sehr voneinander abweichende Resultate ergeben können. Um eine Risikoabschätzung für das gesamte Objekt fassen zu können, sind fundierte Voruntersuchungen unablässig. Für die Bewertung und Durchführung von Wiederbehandlungen mit Steinfestigern und Hydrophobierungsmitteln lassen sich folgende Untersuchungen als besonders geeignet empfehlen: (Deren Umfang kann sich reduzieren, wenn in den Archiven einschlägige Berichte gefunden werden.)

Planmaterial

Ein steingerechtes Aufmass der betreffenden Fassadenabschnitte bzw. anderweitig geeignetes Planmaterial für eine EDV-gestützte Dokumentation sollte zur Verfügung stehen.

Restaurierungsgeschichte

Im Vorfeld jeglicher Maßnahmen ist die Archivrecherche über vorangegangene Maßnahmen unverzichtbar. Die Nachforschungen sollen klären, ob an dem fraglichen Objekt oder Objektabschnitt ältere Konservierungen belegbar sind und mit welchen Konservierungsmitteln die Behandlungen ausgeführt worden sind.

Bei Maßnahmen, die nicht länger als vielleicht 20 oder 30 Jahre zurückliegen, ist es auch nicht aussichtslos, nach Berichten über Materialuntersuchungen zu den Gesteinen und der Wirksamkeit der ausgesuchten Konservierungsmittel zu forschen.

Kartierungen

Bestandskartierung

Wenn noch keine Bestandskartierung vorhanden sein sollte, so ist diese in jedem Fall nachzuholen. Die Untersuchungen dieses Berichts haben gezeigt, wie verschiedenartig selbst geologisch und genetisch verwandte Gesteine sind, so dass die Verteilung der Gesteinsvarietäten an einem Objekt bekannt sein muss. Ohne eine Gesteinskartierung kann kein dem Objekt individuell angepasstes Konservierungsprogramm entwickelt werden.

Schadenskartierung

Eine Schadenskartierung ist erforderlich, um den Ist-Zustand festzuhalten und um gegebenenfalls dokumentierte Vorzustände zu vergleichen. Die Schadenskartierung sollte maßnahmenbezogen sein, d. h. es sollten nicht nur die wichtigsten Schadensformen, sondern auch die Schadensintensitäten kartiert werden, um darauf aufbauend ein Maßnahmenkonzept ableiten zu können.

Reinigung

Sollte eine Reinigung angezeigt sein, so wird die Einhaltung der im Leitfaden Steinkonservierung formulierten Regeln empfohlen (SNETHLAGE 1997).

Festigung

Um zu entscheiden, ob eine erneute Festigung nötig ist oder nicht, bedarf es der Bestimmung von mindestens einem Festigkeitsprofil einer jeden Gesteinsvarietät. Das Festigkeitsprofil liefert Ausmaß und Tiefe der Entfestigung des Gesteins und legt somit die bei der Wiederbehandlung zu erzielende Eindringtiefe fest.

Folgende Methoden eignen sich für die Messung von Festigkeitsprofilen. Die Vor- und Nachteile jeder Methode werden nachfolgend erläutert:

- **Biaxiale Biegezugfestigkeit**

Benötigt wird ein Bohrkern von mindestens 4,5 cm Durchmesser. Der Bohrkern wird trocken in Scheiben von 5 mm Dicke geschnitten. Jede Scheibe wird einzeln bei Ringauflage bis zum Bruch belastet. Aus der Aneinanderreihung der Messungen wird das Festigkeitsprofil zusammengesetzt. Es werden folgende Messgrößen erhalten:

Biaxiale Biegezugfestigkeit β_{BZF}

Statischer E- Modul (Biegezug)

Bruchdehnung e

Vorteile:

Die drei Materialeigenschaften Biegezugfestigkeit, E-Modul und Bruchdehnung sind erforderlich, um eine Überfestigung zu erkennen und deren mögliches Risiko abzuschätzen.

Nachteile:

Zerstörende Probenahme. Auflösung in 5 mm Schritten

- **Bohrwiderstand**

Ein WIDIA oder Diamantbohrer von 5 mm Durchmesser wird mit konstantem Anpressdruck oder konstantem Vorschub in das Gestein gebohrt. Die Kraft, die nötig ist, das Loch zu bohren, wird registriert und in Gestalt eines Bohrhärteprofils wiedergegeben. Aus der Form des Bohrhärteprofils kann man qualitativ Entfestigungen und deren Tiefenverlauf erkennen. Folgende Messgröße wird erhalten:

Bohrwiderstand

Vorteile:

Das Verfahren ist nur minimal zerstörend, weil die Löcher von 5 mm Durchmesser leicht gefüllt werden können und sowieso kaum erkennbar sind. Die Apparatur ist leicht transportabel, vor Ort einsetzbar. Zahlreiche Bohrhärteprofile können in kurzer Zeit gemessen werden, so dass ein statistischer Überblick über die Gesteinsvarietäten gewonnen wird.

Nachteile:

Die Bohrhärteprüfung ist eine qualitative Prüfung zur Festigkeit. Jeder Bohrer hat eine individuelle Schärfe und Abnutzung. Profile Vor-Nach-Behandlung sollten unbedingt mit demselben Bohrer gebohrt werden, um die Abnutzung des Bohrers gegebenenfalls korrigieren zu können.

- **Ultraschallgeschwindigkeit**

Ein Bohrkern wird senkrecht zur Längsrichtung in Schritten von 3 bis 5 mm durchschallt. Aufgezeichnet wird die Ultraschallgeschwindigkeit, im Normalfall die Geschwindigkeit der p-Welle, die über die Länge des Bohrkerns zu einem Profil zusammengesetzt wird. Auf jeden Fall ist ein Messgerät zu bevorzugen, bei dem die Form des empfangenen Signals abgerufen werden kann. Messgeräte mit Festeinstellung sind nicht geeignet. Folgende Messgrößen werden erhalten:

Ultraschallgeschwindigkeit v_p

Dynamischer E-Modul (nur mit speziellen Messköpfen und formatierten Prüfkörpern)

Vorteile:

Einfache und schnelle Messung. Der dynamische E-Modul liefert zusätzliche Informationen vergleichbar dem statischen E-Modul.

Nachteile:

Zerstörende Probenahme. Je nach verwendetem Ultraschallgeber ist die Auflösung relativ ungenau (Die Wellenlänge der Ultraschallwelle ist zu berücksichtigen). Bei Sandsteinen liegen die zu erwartenden Ultraschallgeschwindigkeiten in einem recht engen Bereich zwischen ca. 2 – 3,5 km/s. Etwas höher sind die Ultraschallgeschwindigkeiten in karbonatischen Sandsteinen, weil die Ultraschallgeschwindigkeit in Calcit und Dolomit weitaus höher ist als in Quarz. Die Unterschiede der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen unverwittert – verwittert und unbehandelt – behandelt bewegen sich deshalb häufig an der Grenze der Messgenauigkeit bei 0,2 km/s.

- **Laborversuche**

An entsprechend formatiertem und im Konstantklima 20/65 konditionierten Probenmaterial sollten verschiedene, alternative Steinfestiger erprobt und mit den oben genannten Methoden geprüft werden. Die Werte vor und nach der Behandlung sind gegenüber zu stellen. Es ist sicherzustellen, dass eine ausreichende Eindringtiefe erzielt und das Festigkeitsdefizit aufgefüllt wurde. In einer Darstellung Biegezugfestigkeit – E-Modul ist zu überprüfen, ob das Risiko einer Überfestigung gegeben ist. Ziel der Laborversuche ist die Festlegung derjenigen Steinfestiger, die an einer Musterfläche am Objekt auf Praxisanwendung getestet werden sollen.

- **Objekterprobung**

Die ausgewählten Steinfestiger werden an Musterflächen unter Praxisbedingungen appliziert. Die Untersuchung über eine erfolgreiche Anwendung erfolgt mit dem gleichen Untersuchungsprogramm wie im Labor, wobei je nach Möglichkeit die oben genannten Untersuchungsmethoden zum Einsatz kommen. Die Auswahl des bestgeeigneten Mittels erfolgt unter Berücksichtigung von:

Mittelaufnahme

Eindringtiefe

Festigkeitszunahme

E-Modul Veränderung

Genauere Ausführungen finden sich im Leitfaden Steinkonservierung (SNETHLAGE 1997).

Hydrophobierung

Den Ist-Zustand einer Hydrophobierung beurteilt man am besten mit zahlreichen Karsten-Messungen am Objekt. Die Messwerte sind mit Hilfe der Korrekturformel in w-Werte und b-Werte umzurechnen, um einen zahlenmäßigen Vergleich zu haben. Zusätzlich empfiehlt sich die Entnahme von Bohrkernen, deren Zahl und Größe im Einzelfall festzulegen ist. Es kann auf Bohrkerne, die für die

Bestimmung der Festigkeit entnommen worden sind, zurückgegriffen werden. Unterschiedliche Gesteinsvarietäten sind getrennt zu behandeln.

- Karsten-Messung

An beliebig vielen Stellen wird die kapillare Wasseraufnahme mit dem Karsten'schen Prüfröhrchen gemessen. Die Messwerte werden in w-Werte und b-Werte umgerechnet. Die w-Werte können auch in ihrer flächigen Verteilung kartiert werden.

Vorteile:

Zerstörungsfreies, sicheres und schnelles Messverfahren. Flächige Kartierung bei ausreichender Anzahl von Messungen möglich.

Nachteil:

Kein direkter Hinweis auf Tiefenwirkung der Hydrophobierung

- w-Wert Bestimmung am Bohrkern

Im Labor wird die kapillare Wasseraufnahme an der Vorderseite und an der unbehandelten Rückseite des Bohrkerns bestimmt. Die Messwerte werden in w-Werte und b-Werte umgerechnet. Der Vergleich behandelt – unbehandelt liefert ein Maß für die verbliebene Restwirksamkeit. Die Tiefenverteilung der Hydrophobierung kann mit Befeuchten des Bohrkerns oder mit Hilfe von Wassertropfen bestimmt werden.

Vorteil:

Absoluter W-Wert gemäß DIN Vorschrift und Tiefenwirkung der Hydrophobierung

Nachteil:

Zerstörendes Prüfverfahren. Punktartige Fehlstellen in der Hydrophobierung werden möglicherweise übersehen.

- Laborversuche

Verschiedene Hydrophobierungsmittel werden an geeignetem Probenmaterial, am besten an Bohrkernen aus Originalgestein, versuchsweise getestet. Geprüft wird auf Eindringtiefe und Wirksamkeit. Über die Bestimmung des w-Werts und des b-Werts hinaus sollte die Änderung der Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ bestimmt werden.

- Objekterprobung

Die aus den Laborversuchen als bestgeeignet hervorgegangenen Mittel werden an Musterflächen am Objekt unter Praxisbedingungen appliziert. Wirksamkeit und Eindringtiefe werden mit Hilfe von Karsten-Messungen und Bohrkernen geprüft. Zusätzlich zu w-Wert und b-Wert wird die Messung der Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ empfohlen.

- Auswertung

Eine wirksame Hydrophobierung wird gemäß Übereinkunft bei w-Werten $< 0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ angesetzt. Eine Wiederbehandlung sollte durchgeführt werden, wenn an allen Stellen einer Fassade, aber auch zum Beispiel nur an den Schlagregen exponierten Bereichen der w-Wert über $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ ansteigt. In diesem Fall besteht das Risiko, dass bei den in Deutschland herrschenden klimatischen Bedingungen eine Austrocknung nicht mehr gewährleistet ist.

w-Wert und b-Wert ergeben für sich allein noch kein vollständiges Bild, die Auswirkungen einer Hydrophobierung zu beurteilen. Mit Hilfe von w-Wert, Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ und

Schichtdicke der hydrophobierten Zone sollte die Künzelzahl berechnet werden und eine Beurteilung hinsichtlich einer möglichen Dampfsperre vorgenommen werden.

Weitere Maßnahmen und Untersuchungen

Wegen Steinantragungen, Natursteinaustausch und Farbfassungen auf Stein wird auf den Leitfaden Steinkonservierung verwiesen (SNETHLAGE 1997).

Durchführung der Wiederbehandlung

Die hier skizzierten Voruntersuchungen fließen in ein Leistungsverzeichnis ein, welches die Grundlage für eine qualifizierte Ausschreibung darstellt. Dabei ist es sicherlich ein Vorteil, die Empfehlungen des Untersuchungsberichts in graphischer Form als Kartierung bildlich darzustellen. Ein besonderer Hinweis gilt einer möglichst detaillierten Beschreibung der Anwendungsbedingungen.

Wer kann Untersuchungen und Maßnahmen durchführen?

Die Wiederbehandlung von Natursteinen erfordert noch höhere Sorgfalt und Verständnis der Materialparameter als eine Erstbehandlung. Nur der Einsatz von Fachlabors und Fachfirmen kann den gewünschten Erfolg sicherstellen.

10. Literatur

Adams, A.E., McKenzie, W.S., Guilford, C. (1984): Atlas of sedimentary rocks under the microscope, Longman, ISBN 0582301181.

Alfes, C. (1989): Korrelation zwischen Gefüge und Strukturparametern sowie mechanischen Eigenschaften beispielhafter Gesteinsvarietäten. Bautenschutz - Bausanierung, Sonderausgabe, pp. 51-55.

Allen, T. (1981): Particle Size Measurement, Chapman and Hall, London, New York, 680 S..

Arnold, A. (1990): Salze: lästige weiße Ausblühungen oder Hauptschadensursache?, In: Jahresberichte Steinerfall – Steinkonservierung 2, R. Snethlage (ed.), Ernst & Sohn, Berlin, pp. 1-9.

Arnold, A., Zehnder, K., Küng, A. (1989): Verwitterung und Erhaltung von Wandmalerei - Salzverwitterung-Raumklima-Konservierung, In: Schweizer & Villger (ed.): Methoden zur Erhaltung von Kulturgütern, Bern, Stuttgart, pp.63-70.

Auras, M. (1993): Stone conservation by impregnation with polyurethane, Proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress, Conservation of Stone and Other Materials, Paris, June 29 – July 1 1993, M.-J. Thiel (Ed.), London SPON, pp. 717-724.

Bartsch, C., Dietrich, H., Unterstab, A. (1989): Zur Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von anderen petrographischen Parametern bei Sandsteinen, Zeitschrift f. angew. Geol., 35(5), pp. 149-152, Berlin.

Boos, M. (1999): Möglichkeiten und Grenzen der Steinfestigung im Kieselsäureester-System. Einsatzmöglichkeiten elastifizierter Kieselsäureestertypen, 5. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen „MSR '99“, Aedificatio Publishers, Freiburg, Esslingen, pp. 1305-1314.

Boos, M., Grobe, J., Hilbert, G., Wendler, E. (1997): Möglichkeiten und Grenzen im KSE-System, Bautenschutz-Bausanierung, 20. Jahrgang, Nr. 8, pp. 39-41.

Boyer, D.W. (1987): A field and laboratory testing program. Determining the suitability of deteriorated masonries for chemical consolidation, Association for Preservation Technology Bulletin, 19 (4), pp. 45-52.

Charta von Venedig – Internationale Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (1964): Arbeitsblätter des Bayer. Landesamtes f. Denkmalpflege 1994, München.

Clooth, G. (1992): Wasser im Porensystem von Sandsteinen vor und nach Polymerimprägnierung, Dissertation, RWTH Aachen, 130 S..

Delgado Rodrigues, J. (1993): Stone Conservation in Portugal: Problems, methods and means, Conservation of Architectural Surfaces: Stone and Wall Covering, Biscontin, G. & Graziano, L. (Ed.), Venice, Italy, 12th-14th March 1992, Il Cardo, Venice, pp. 147-155.

De Witte, E. & Bos, K. (1992): Conservation of ferruginous sandstone used in Northern Belgium, Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Delgado Rodrigues, J., Henriques, F., Telmo Jeremias, F. (Ed.), Lisbon, Portugal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 1113-1125.

DIN 52 103: Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen: Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert.

DIN 52 450: Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern.

DIN 52 615: Wärmeschutztechnische Prüfungen: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen.

Dukes, W.H. (1972): Conservation of stone: Chemical treatments, The Architects' Journal, 23. August 1972. pp. 433-438.

Dullien, F.A.L. (1979): Porous Media – Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, New York, London, Toronto, Sydney, San Francisco, 391 S..

Elektronik-Katalog, Messgeräte/-systeme 90/91 der Firma Rohde & Schwarz, München.

Endlicher, G. (1984): Petrographisch-mineralogische Untersuchungen der Bausteine und Verwitterungskrusten des Regensburger Domes.-Acta Albertina Ratisbonensia, Bd. 42, Naturwiss. Verein, Regensburg, pp. 53-80.

Erfurt, W. & Krompholz R. (1996): Anwendung der Dehnwellenmessung für Baustoffuntersuchungen, Beiträge zur Baustoffforschung, Wissenschaftliche Zeitschrift, 4/5, pp. 95-101.

Esbert, R.M., Valdeoni, L., Ordaz, J. Alonso, F.J., Grossi, C.M. (1989): Ultrasonic Velocity and Humidity in Monumental Stone, Proc. of the European Symp. on Science, Technology and Cultural Heritage, N.S. Baer, S. Sabbioni, A.I. Sors, Bologna, pp.597-600.

Faller, A. & Karotke, E. (1988): Die Rolle der Feuchte bei der Verwitterung von Baustoffen durch Salze, In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Sonderheft 1988, Universität Karlsruhe (TH), SFB 315, pp. 63-68, Ernst & Sohn, Berlin.

Fitzner, B. & Basten, D. (1994): Gesteinsporosität-Klassifizierung, meßtechnische Erfassung und Bewertung ihrer Verwitterungsrelevanz, Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 5, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, pp. 19-32.

Franzen, C. & Griesser, U. J. (2002): Neue Perspektiven für die Bestimmung des Feuchtesorptionsverhaltens von Naturbausteinen, Beitragsband zum 11. Feuchtetag 2002 der MFPA an der Bauhaus Universität Weimar, pp. 221 - 227

Garrecht, H. (1992): Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk, Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe, Heft 15.

Gehrmann, O. & Aigner, T. (2002): Der Schilfsandstein (Obere Trias) bei Heilbronn (SW-Deutschland): Hinweis auf tidale Einflüsse, N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 223, pp. 377-403, Stuttgart.

Gregg, S.J. et al. (1982): Adsorption, Surface Area and Porosity, Academ. Press, London.

Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland, Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege, Arbeitsheft 50, München.

Grobe, J. Boss, M, Wolke, A., Zeine, Ch. (2001): Schutz von Steinoberflächen durch Applikation elastischer Kieselsäure-Ester – Bilanz eines DBU-Projekts, Natursteinkonservierung – Grundlagen, Entwicklung und Anwendung, WTA-Schriftenreihe, Heft 23, 9-32 (2001), Aedificatio Verlag, Freiburg.

Heim, D. (1990): Tone und Tonminerale: Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie, Enke, Stuttgart, 157 S..

Hillger, W. (1983): Verbesserungen und Erweiterungen von Ultraschallprüfverfahren zur zerstörungsfreien Fehlstellen- und Qualitätskontrolle von Betonbauteilen, Dissertation, TU Braunschweig.

Hoferick, Frank (2005): Entsalzung von Skulpturen aus Elbsandstein, Diplomarbeit, Studienrichtung Konservierung und Restaurierung von Objekten aus Stein, FH Potsdam.

Honsinger, D.J. (1990): Strukturmerkmale polymerimprägnierter Sandsteine, Dissertation, RWTH Aachen, 218 S.

Horie, C.V., 1987: Materials of Conservation, Organic Consolidants, adhesives and coatings, Butterworths, London.

http://www.sintechnology.com/in_pro1.htm

Iler, R.K. (1979): The chemistry of silica, Wiley & sons, pp. 866, New York.

Jonas, M. (1996): Einsatzmöglichkeiten der Ultraschall-Frequenzanalyse für die zerstörungsfreie Prüfung von mineralischen Baustoffen und Bauteilen, Dissertation, Universität Dortmund.

Keßler, T (2000): Untersuchung des Einflusses von Quellmindernden Stoffen in Kombination mit Hydrophobierung auf das Quellverhalten des Lettenkohlsandsteines, Diplomarbeit, Georg-August-Universität, Göttingen.

Kießl, K. (1983): Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrschichtigen Bauteilen, Dissertation, Universität Essen.

Klemm, F.C. (2003): Bewertung der Restaurierung von 1995 der Rotmarmorsäulen des Arkadenhofs der „Alten Münze“ in München anhand vergleichender Ultraschalluntersuchungen unter Berücksichtigung der Fourier-Transformation, Diplomarbeit, FH Köln.

Klopfer, H. (1974): Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen, Bauverlag GmbH, Wiesbaden.

Klopfer, H. (1985): Lehrbuch der Bauphysik, Teubner Verlag, Stuttgart.

Kocher, M. (2004): Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen, Dissertation, LMU, München.

Kraus, K. (1985): Experimente zur immissionsbedingten Verwitterung der Naturbausteine des Kölner Doms im Vergleich zu deren Verhalten am Bauwerk, Dissertation, Universität Köln.

Krautkrämer, J. & Krautkrämer, H. (1986): Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin.

Krus, M. (1995): Feuchtetransport und Speicherkoefizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken, Dissertation, Universität Stuttgart, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik.

Künzel, H.M., Kießl, K., Krus, M. (1995): Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 1 (4), pp. 267-279.

Künzel, H.M. (1994): Verfahren zur eindimensionalen und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation, Universität Stuttgart, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik.

Künzel, H.M. (1969): Anforderungen an Außenanstriche und Beschichtungen aus Kunstharzdispersionen, Kunststoffe im Bau, 12, Heidelberg, pp. 6-32.

Kuttruff, H. (1988): Physik und Technik des Ultraschalls, S. Hirzel Verlag, Stuttgart.

Malaga, K, Myrin, M., Lindqvist, J.E. (2004): Consolidation of Gotland Sandstone, Proc. 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, (Kwiatkowski, D. & Löfvendahl, R. ed.), Vol. 1, Stockholm, pp. 447-454.

Mausfeld, S, Hoffmann, S, Ludwig, S. (1990): Der Einfluß der diagenetischen Entwicklung auf den Mineralbestand, das Gefüge und den Porenraum des Regensburger Grünsandsteins. – In: (R. Snethlage ed.), „Steinzerfall – Steinkonservierung“, Band 2 – 1990, pp. 83-101, Verlag Ernst und Sohn, Berlin.

Mayer, H. & Roth, M. (1990): Bausanierung, 13, pp. 1-4.

Meinhardt-Degen, J. & Snethlage, R. (2002): Alte Pinakothek in Munich and Castle Schillingsfürst – Investigation of the effects of re-treatment on consolidated as well as hydrophobed Sandstone façades, Proceedings 13th Euromarble Workshop, 2002.

Meinhardt-Degen, J. & Snethlage, R. (2004): Durability of hydrophobic treatment of sandstone façades – Investigations of the necessity and effects of re-treatment, Proc. 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, (Kwiatkowski, D. & Löfvendahl, R. ed.), Vol. 1, Stockholm, pp. 347-354.

Meng, B. (1993): Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchtevorgängen, Dissertation, Aachener Berichte zur Bauforschung, Bd. 3, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen.

Merkel, B.J. & Planer-Friedrich, B. (2002): Grundwasserchemie, Praxisorientierter Leitfaden zur numerischen Modellierung von Beschaffenheit, Kontamination und Sanierung aquatischer Systeme, S. 28, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

Metz, F. (1992): Zur Charakterisierung von Porenraum und angewandten Gebrauchseigenschaften verschiedener Natursteine, Dissertation, Universität Marburg, 148 S..

Millner, R. u. a. (1987): Ultraschalltechnik – Grundlagen und Anwendungen, VEB Fachbuchverlag, Leipzig.

Möller, U., Schuh, H., Wendler, E. (1992): Längenänderungsverhalten hydrophobierter Sandsteine, Bautenschutz & Bausanierung, 15, Nr. 4, pp. 46-49.

MPA Bremen: Kryo-Mikroskopie im Rasterelektronenmikroskop zur Untersuchung feuchter oder vakuumbeständiger Proben, Amtliche Materialprüfanstalt Bremen – Abteilung Analytische Baustoffmikroskopie.

Neisecke, J. & Hillger, W. (1985): Zerstörungsfreie Ultraschallprüfung von Beton – Erfahrungen in der Praxis, Weiterentwicklungen im Labor, ZfP Bau-Symposium Berlin-Dahlem, 2.-3. Oktober 1985, Tagungsbericht, G. Schickert & D. Schnitger (ed.), BAM, Berlin, pp. 341-353.

Neisecke, J. (1974): Ein dreiparametrisches, komplexes Ultraschall-Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen, Dissertation, TU Braunschweig.

Neisel, J.D. (1995): Rasterelektronische Untersuchungen der Gefügemerkmale von ungeschützten und imprägnierten Sandsteinen nach Verwitterungsbeanspruchung, Dissertation, Universität Aachen.

Nur, A. & Simmons, G. (1969): The effect of saturation on velocity in low porous rocks, *Earth and Planetary Science Letters*, 7, pp. 183-193.

Petzet, M. (1992): Grundsätze der Denkmalpflege, ICOMOS, Hefte des Deutschen Nationalkomitees X, München.

Petzet, M. (1992): Reversibilität – Das Feigenblatt in der Denkmalpflege? – ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees, 8, München, pp. 9-14.

Piacenti, F., Carbonell, R.G., Camaiti, M., Henon, F.E., Luppichini, E. (1995): Protective materials for stone – Effects on stone permeability and gas transport, ICCROM International Colloquium on Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments, Rome, Italy, 19th-21st June 1995, pp. 389-402.

Pimentel, E. (1996): Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tonstein. Dissertation, Institut f. Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), Heft 139.

Randazzo, A.F. & Cook, D.J. (1987): Characterization of dolomitic rocks from the coastal mixing zone of the Floridan aquifer, USA. *Sedimentary geology* 54: 169-192.

Rentsch, W. & Krompholz, G. (1961): Zur Bestimmung elastischer Konstanten durch Schallgeschwindigkeitsmessungen, *Fachzeitschrift der Bergakademie Freiberg*, 13, pp. 492-504.

Richardson, B.A. (1995): Remedial treatment of buildings, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.

Roosevelt, E.: „No one can make you feel inferior without your consent.“

Roth, M. (1984): Siliconate – Siliconharze – Silane – Siloxane: Silicon-Bautenschutzmittel für die Oberflächenimprägnierung von mineralischen Baustoffen, *Kunststoffe im Bau* 19, Nr. 2, pp. 71-74.

Sasse, H.R. & Snethlage, R. (1996): Methods for the Evaluation of Stone Conservation Treatment, In: N.S. Baer & R. Snethlage (eds.): *Saving our Architectural Heritage. The Conservation of Historic Stone Structures*, Dahlem Workshop Report FU Berlin 1996, pp. 223-245, John Wiley & sons, Chichester, New York, Weinheim.

Sasse, H.R., Honsinger, D., Schwamborn, B. (1993): „Pins“- New technology in porous stone conservation, *Proceedings of the International RILEM/UNESCO Congress, Conservation of Stone and Other Materials*, Paris, June 29 – July 1 1993, M.-J. Thiel (Ed.), London SPON, pp. 705-716.

Sasse, H.R. & Honsinger, D. (1989): A new chemical and engineering approach for development and optimization of stone protecting materials, *Proceedings of the European Symposium on Science, Technology and European Cultural Heritage*, Baer, N.S., Sabbioni, C., Sors, A.I. (Ed.), Bologna, Italy, 13-16th June 1989, Butterworth-Heinemann Ltd., pp. 649-652.

Sattler, L. (1992): Untersuchungen zu Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester, Dissertation, Forschungsbericht 9/1992, Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege München.

Sattler, L., Wendler, E., Snethlage, R., Klemm, D.D. (1990): Konservierung von carbonatischem Grünsandstein an der Alten Pinakothek in München. – Bautenschutz & Bausanierung, 13, H. 6, pp. 93-97, Müller Verlag, Köln.

Schamberger, R. (1991): Schloß Schillingsfürst, ehemaliges Residenzschloß, Bericht des Institutes für Konservierung – Restaurierung, Fulda (1990), In: Die Dokumentation in der Bestandsaufnahme - Untersuchung, Bewertung und Restaurierung denkmalpflegerischer Objekte, U. Eickelberg, S. Herppich, J. Zallmanzig (ed.), Bautenschutz – Bausanierung, Verlag R. Müller, Köln (1991), pp. 30-32.

Schuh, H. (1987): Physikalisch Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen, Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Allgemeine und Angewandte Geologie, 6, pp. 17-43.

Schwamborn, B. (1996): Nachtränkung behandelter Natursteinflächen, 4. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Proc., Esslingen.

Sicherheitsdatenblatt UNIL 290, Fa. Dr. Hartmann, Stand 01.02.1997

Sicherheitsdatenblatt Fungosil WS, Fa. Remmers, Stand 07.08.1997

Simon, S. (2001): Zur Verwitterung und Konservierung Kristallinen Marmors, Dissertation, LMU, München.

Snethlage, R. & Meinhardt-Degen, J. (2004): Re-treating sandstone with ethyl-silicates – Is there a risk of over-strengthening the surface, Proc. 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, (Kwiatkowski, D. & Löfvendahl, R. ed.), Vol. 1, Stockholm, pp. 283-289.

Snethlage, R. (2001): Wichtige Aspekte aus dem Leitfaden „Steinkonservierung“, Natursteinkonservierung – Grundlagen, Entwicklung und Anwendung, WTA-Schriftenreihe, Heft 23, 1-8 (2001), Aedificatio Verlag, Freiburg.

Snethlage, R. & Wendler, E. (2000): Chemical Compounds for Conservation of Natural Stone, Vorlesungsskript, LMU München, Fachbereich Geowissenschaften.

Snethlage, R. (1997): Leitfaden der Steinkonservierung, Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

Snethlage, R. & Wendler, E. (1996): Methoden der Steinkonservierung – Anforderungen und Bewertungskriterien, Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, Hrsg. R. Snethlage, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, pp. 3-40.

Snethlage, R., Auras, M., Leisen, H., Sattler, L., Wendler, E. (1996) (A): Alte Pinakothek München, Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, Hrsg. R. Snethlage, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, pp. 151-194.

Snethlage, R., Leisen, H., Sattler, L., Wendler, E. (1996) (B): Schloss Schillingsfürst, Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, Hrsg. R. Snethlage, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, pp. 221-275.

Snethlage, R., Wendler, E., Klemm, D.D. (1995): Tenside im Gesteinsschutz – bisherige Resultate mit einem neuen Konzept zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein, Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I, Hrsg. R. Snethlage, Verlag Ernst & Sohn GmbH, Berlin, pp. 127-146.

Snethlage, R. (1991a): Geologische und mineralogische Eigenschaften als Festigkeitsparameter von Gesteinen, Denkmalpflege und Naturwissenschaften im Gespräch, Workshop in Fulda, 1990, pp. 18-23.

Snethlage, R., Wendler, E., Sattler, L. (1989): The application of laboratory processes and studies to real structures, Proceedings of the European Symposium on Science, Technology and European Cultural Heritage, Baer, N.S., Sabbioni, C., Sors, A.I. (Ed.), Bologna, Italy, 13-16th June 1989, Butterworth-Heinemann Ltd., pp. 255-269.

Snethlage, R. (1984): Steinkonservierung, Forschungsprogramm des Zentrallabors f. Denkmalpflege 1979-1983. – Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Arbeitsheft 22, Verlag Karl M. Lipp, München, 203 S..

Šrámek, J. (1993): Effects of hydrophobisation on stone, Conservation of Architectural Surfaces, Stone and Wall Covering, G. Bisconsin & L. Graziano (Ed.), Venice, Italy 12-14th march 1992, Il Cardo, Venice, pp. 169-175.

Steiger, M. (2004): Influence of salts on the freezing temperature of water: Implications on frost damage to porous materials; Proceedings of the 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Vol. I, Kwiatkowski, D. & Löfvendahl, R. (ed.).

Steininger, F.F. & Piller, W.E. (Hrsg.) (1999): Empfehlungen (Richtlinien) zur Handhabung der stratigraphischen Nomenklatur, Deutsche Stratigraphische Kommission, Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg, 209, Frankfurt a. M..

Torraca, G. (1986): Poröse Baustoffe – Eine Materialkunde für die Denkmalpflege, In: Restaurierung - Konservierung - Technologie, Bd. 2, Der Apfel Verlag, Wien, 130 S.

Utz, R. (2004): Stabilisierung von Lösslehmoberflächen in Archäologischen Grabungen am Beispiel der Terrakottaarmee des Qin Shihuangdi, Dissertation, LMU, München.

Walter, R. (1992): Geologie von Mitteleuropa, 5. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, S. 368.

Weiss, G. (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter, Dissertation, Universität München, Münchner Geowiss. Abh. (B), 9, 118 S..

Wendler, E. (2003): Referat, KSE-Seminar, Mai 2003, HfBK, Dresden.

Wendler, E. (2001): Elastifizierte Kieselsäureester als mineralische Bindemittel für unterschiedliche Konservierungsziele. Praktische Erfahrungen mit dem KSE-Modul-System, Natursteinkonservierung - Grundlagen, Entwicklungen und Anwendungen, WTA – Schriftenreihe, Heft 23, Aedificatio Verlag, Freiburg, pp. 55-78.

Wendler, E. & Prasartset, C. (2000): Old Khmer styled sandstone monuments in Thailand. Aspects of weathering and development of a conservation concept, Proc. 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice June 19-24, 2000, V. Fassina (ed.), Vol. 2, pp. 765-774.

Wendler, E. & Rückert-Thümling, R. (1992): Gefügezerstörendes Verformungsverhalten bei salzbefrachteten Sandsteinen unter hygrischer Wechselbelastung, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, 3. Int. Kolloquium, Wittmann, F.H (Hrsg.), TA Esslingen, pp. 1818-1830.

Wendler, E. & Sattler, L (1991): Anlage einer Musterfläche zur Steinkonservierung am Schloss Schillingsfürst, Teil 1, In: Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung 1991, Verlag Ernst und Sohn.

Wendler, E. & Sattler, L (1990): Anlage einer Musterfläche zur Steinkonservierung am Schloss Schillingsfürst, Teil 2, In: Jahresbericht Steinzerfall – Steinkonservierung 1990, Verlag Ernst und Sohn.

Wendler, E. (1989): Zum Mechanismus der Schalenbildung bei tonigen Sandsteinen, Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung, Bd. 1, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, pp.71-76.

Wittmann, F.H. & Prim, (1983): Mesures de l' effet consolidant d'un produit de traitement – Matériaux et Constructions, 16, pp. 235-242, Paris.

Wittmann, F.H. (1979): Physik poröser Steine, Bautenschutz & Bausanierung, 1-79, pp. 4-7, Filderstadt.

Wurster, P. (1968): Paläogeographie der deutschen Trias und die paläogeographische Orientierung der Lettenkohle in Südwestdeutschland. – Eclogae geol. Helv., 6, pp. 157-166, Basel.

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Geowissenschaften
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Geologisch-mineralogische und materialtechnische Untersuchungen
zur Risikoabschätzung von Folgekonservierungen bei Sandsteinen am Beispiel von
Regensburger Grünsandstein und Grünem Mainsandstein

Anhang

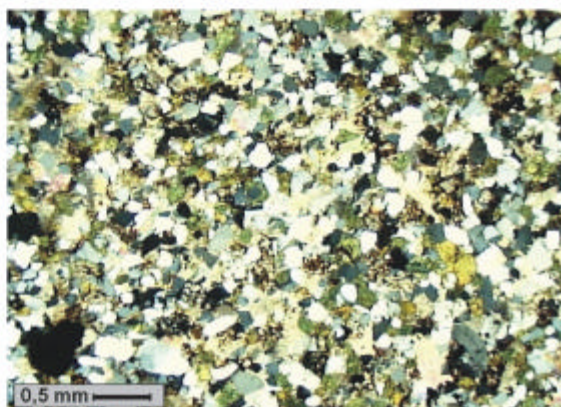
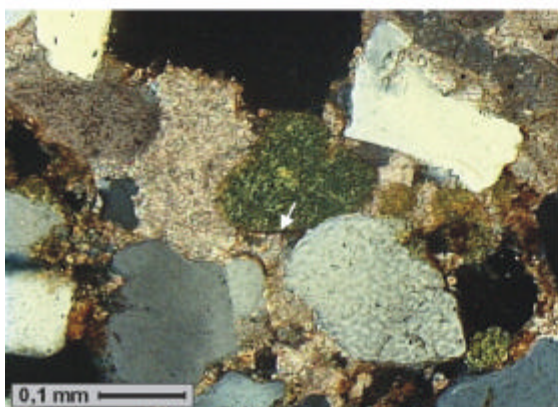
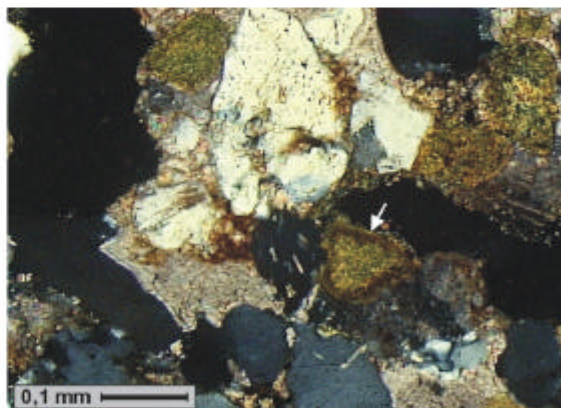
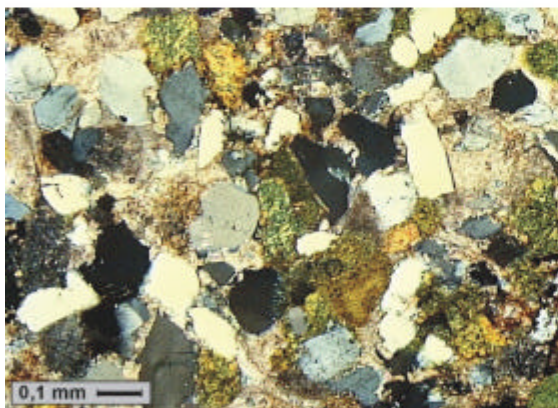
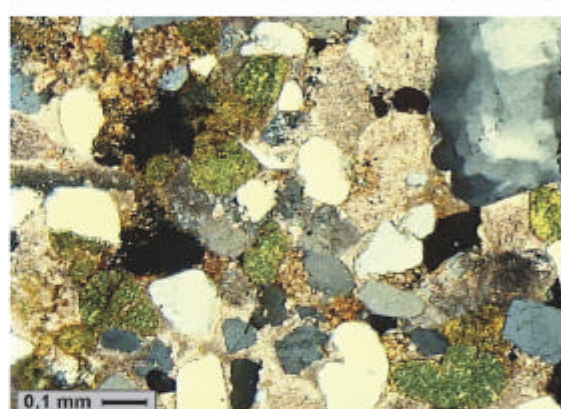
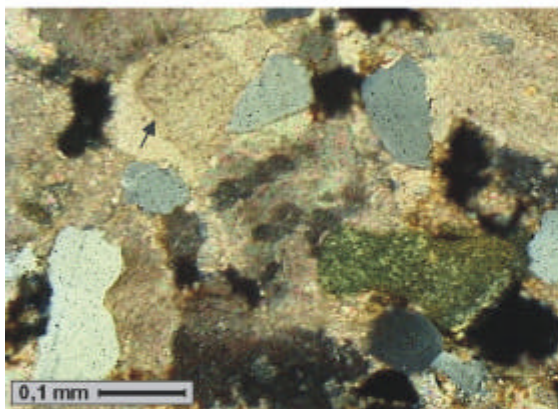
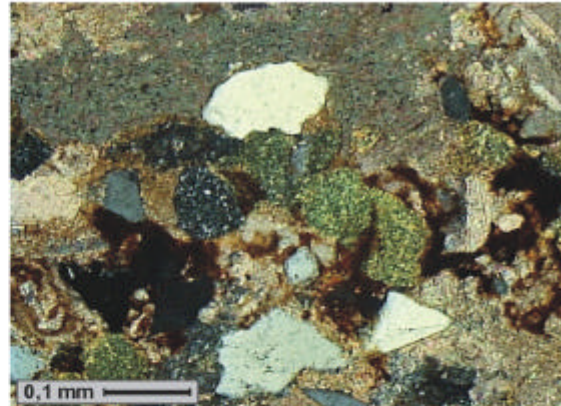
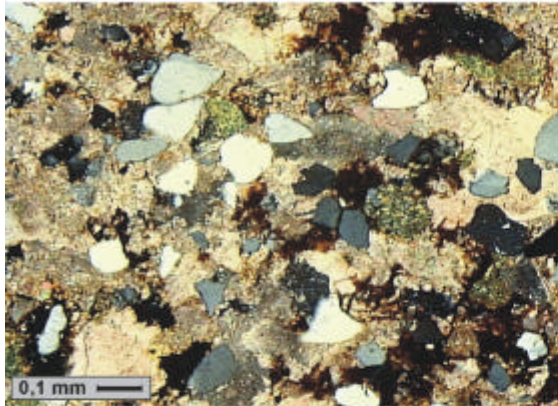


vorgelegt von
Jeannine Meinhardt-Degen
aus
Halle/Saale

München 2005

Farbtafel 1

1	2
3	4
5	6
7	8

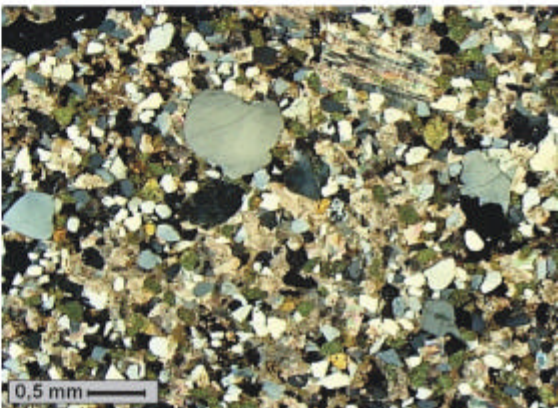
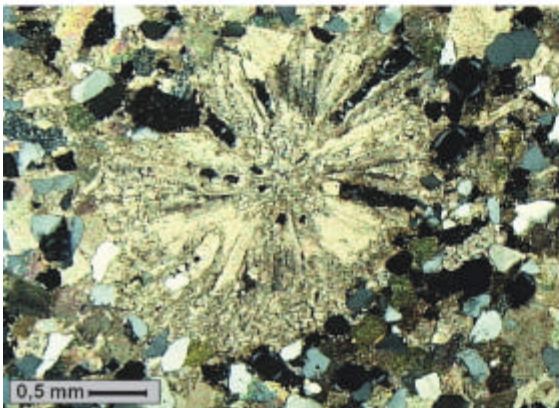
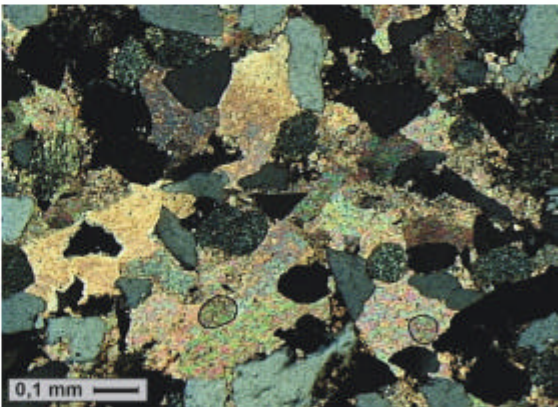
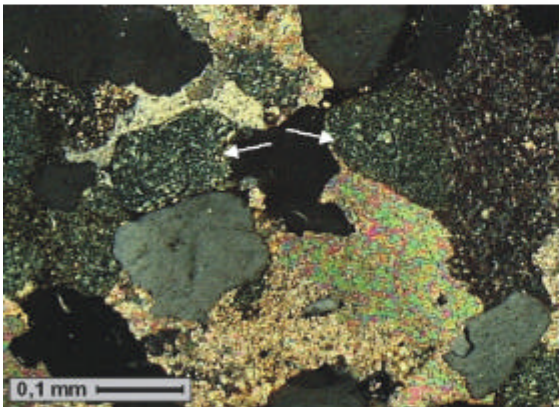
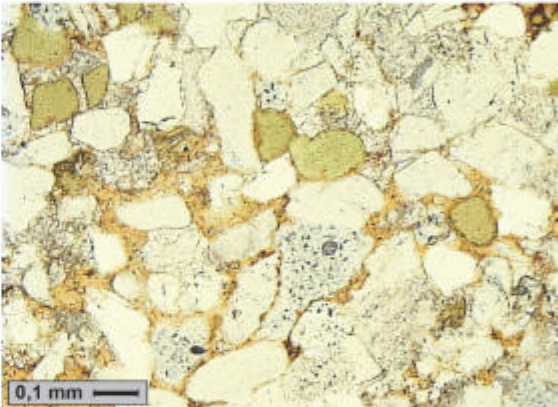
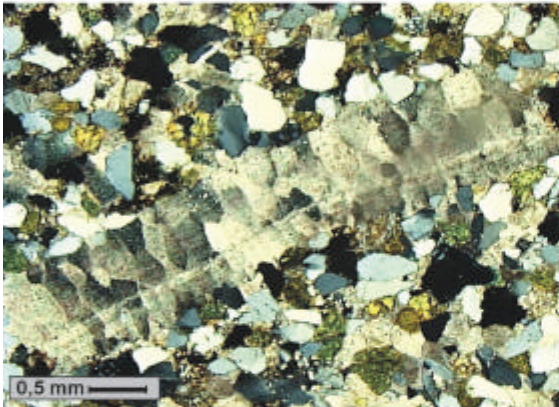
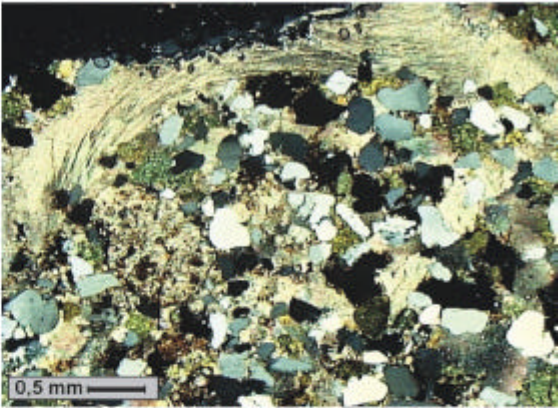
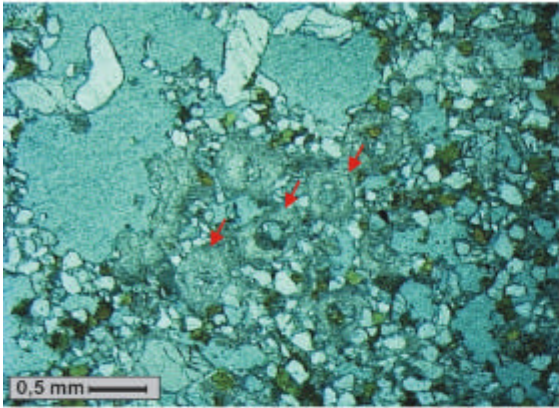


Erläuterungen Tafel 1

- 1/1 Regensburger Grünsandstein, Varietät I, (halbgekreuzte Nicols)
Inequigranulares, schlecht sortiertes Gefüge, wobei die Quarze und die grünen und bräunlichen Glaukonitaggregate von karbonatischem Zement umgeben sind.
- 1/2 Regensburger Grünsandstein, Varietät I, (+ Nicols)
Die Quarze löschen größtenteils undulös aus und besitzen kleine opake Inklusionen und Flüssigkeitseinschlüsse.
- 1/3 Regensburger Grünsandstein, Varietät I, (+ Nicols)
Das Sediment ist eindeutig karbonatisch zementiert. Vereinzelt konnten Schatten auf den Calciten beobachtet werden. Dabei handelt es sich höchstwahrscheinlich Calcitanwachssäume.
- 1/4 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, (+ Nicols)
Inequigranulares, schlecht sortiertes Gefüge, wobei die Quarze und die grünen und bräunlichen Glaukonitaggregate von karbonatischem Zement umgeben sind.
In der rechten oberen Ecke befindet sich ein polykristalliner Quarz.
- 1/5 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, (+ Nicols)
Im Vergleich zu Varietät I treten Kornkontakte (Punkt- und Längskontakt) häufiger auf.
- 1/6 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, (+ Nicols)
Das Glaukonitaggregat rechts der Mitte besitzt einen deutlichen limonitischen Rand (Pfeil). mit einer anfänglichen Limonitisierung identifiziert werden (Tafel 1/7).
- 1/7 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, (+ Nicols)
Nur ein Teil der Glaukonitkörner, die in den Dünnschliffen der Varietät II identifiziert wurden, sind limonitisiert. In diesem Bild ist zu erkennen, dass nur Teilbereiche des mittleren Glaukonitkorns einen bräunlichen Limonitrand zeigen (Pfeil).
- 1/8 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, (+ Nicols)
Neben sehr großen Hohlräumen besitzt diese Varietät eine Reihe kleinerer Hohlräume einheitlicher Größe. Generell ist der Porenraumanteil gegenüber Varietät I deutlich erhöht.

Farbtafel 2

1	2
3	4
5	6
7	8

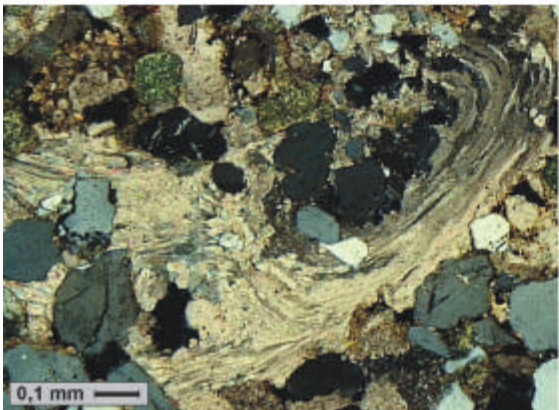
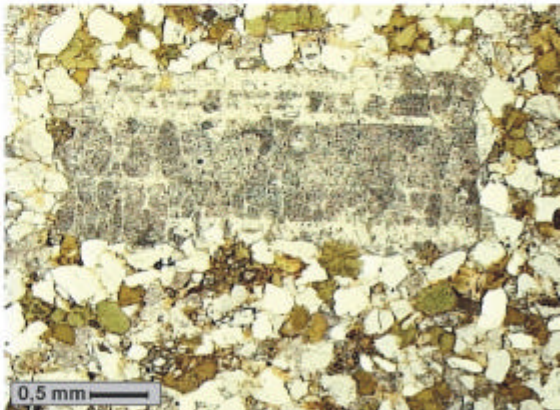
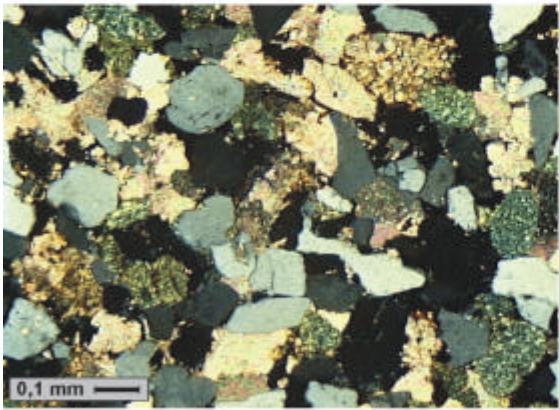
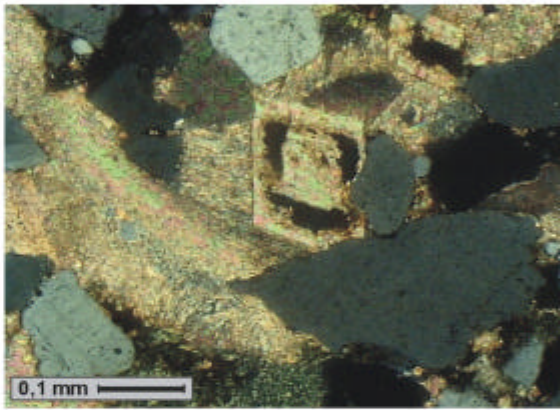
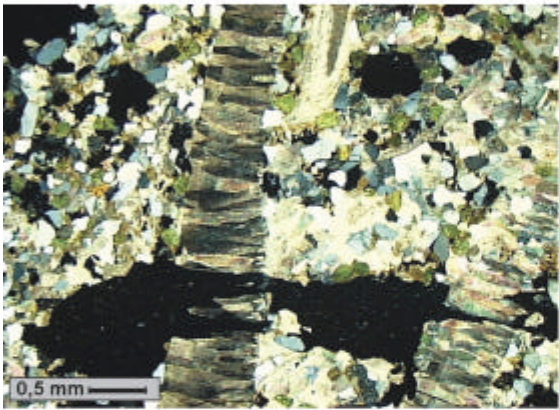
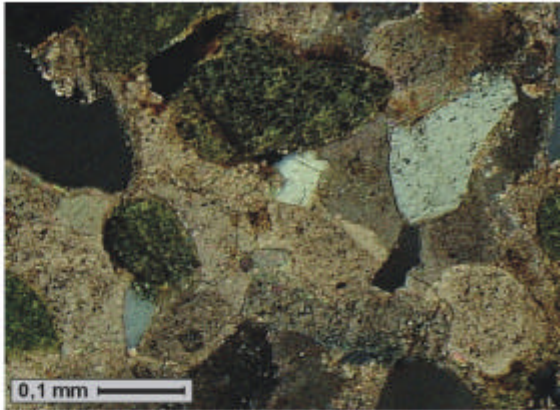
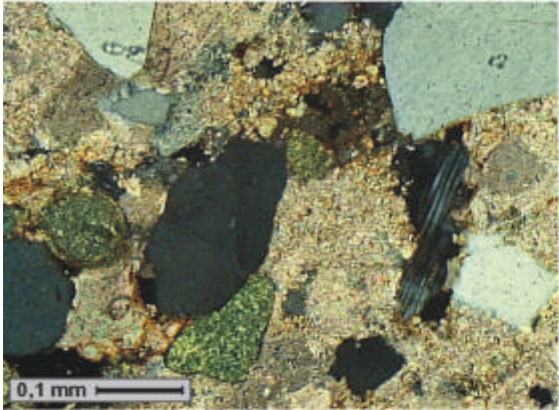


Erläuterungen Tafel 2

- 2/1 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, (halbgekreuzte Nicols)
Der karbonatische Zement besteht hauptsächlich aus großen Calcisparitkristallen. Im Zentrum des Bildes wurden Kristalle beobachtet, die zwar abgerundet sind, aber möglicherweise auf eine rhomboedrische Grundform, typisch für Dolomit, zurückgehen könnten. Es könnte sich eventuell ebenso um Lösungserscheinungen handeln. Beide Interpretationen würden auf eine Dedolomitierung des Karbonats hinweisen. Möglicherweise handelt es sich aber auch um biogene Strukturen.
- 2/2 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, (+ Nicols)
Im Dünnschliffbild bestätigt sich der makroskopische Befund relativer Bioklastenhäufigkeit. Zum Teil wurden sehr große biogene Bruchstücke beobachtet (Tafel 2/2), die hauptsächlich vollkommen rekristallisiert erscheinen (Tafel 2/3). Bei der gebogenen Struktur handelt es sich um das Fragment einer dicken Molluskenschale (Rudist).
- 2/3 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, (+ Nicols)
Dieser Quarz zeigt perlschnurartig aufgereichte Flüssigkeitseinschlüsse und opake Einschlüsse.
- 2/4 Regensburger Grünsandstein, Varietät III, (// Nicols)
Dieses Dünnschliffbild zeigt ein ungleichkörniges, korngestütztes Gefüge. Die Glaukonitkörner zeigen zum Teil limonitische Ränder.
- 2/5 Regensburger Grünsandstein, Varietät III, (+ Nicols)
Ganz vereinzelt konnten im Dünnschliff Gesteinsbruchstücke identifiziert werden (Pfeil).
- 2/6 Regensburger Grünsandstein, Varietät III, (+ Nicols)
Der karbonatische Zement scheint fast ausschließlich calcitisch zu sein und wird durch relativ große Einzelkristalle gebildet. Sieht man das Karbonat als Matrix an, wird in diesem Beispiel erneut sehr deutlich, dass dieses Material keineswegs als korngestützt bzw. komponentengestützt, sondern in vielen Bereichen im erweiterten Sinne als matrixgestützt zu betrachten ist. (Allerdings sei an dieser Stelle nochmals explizit darauf hingewiesen, dass das karbonatische Bindemittel nicht als Matrix betrachtet wird.)
- 2/7 Regensburger Grünsandstein, Varietät III, (+ Nicols)
Auch in Bezug auf den Bioklastengehalt befindet sich diese Grünsandsteinvarietät zwischen der Varietät I und II. In dieser Tafel ist stellvertretend eine biogene Struktur abgebildet.
- 2/8 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, (+ Nicols)
Aufgrund der vielen Bioklasten vermittelt das Dünnschliffbild stellenweise einen sehr heterogenen Eindruck von dem Material.

Farbtafel 3

1	2
3	4
5	6
7	

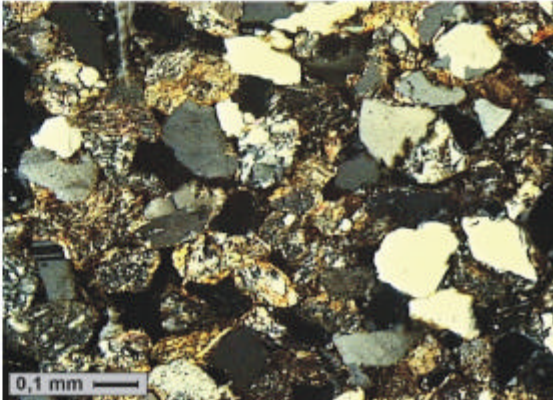
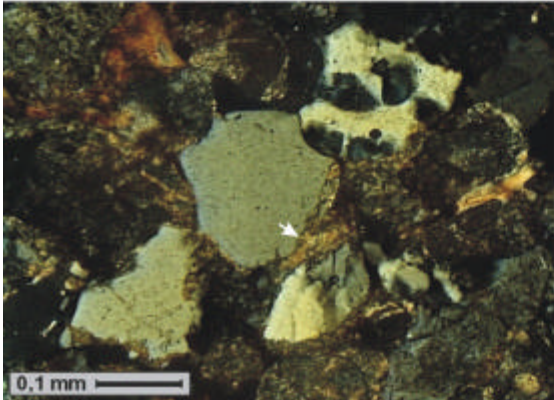
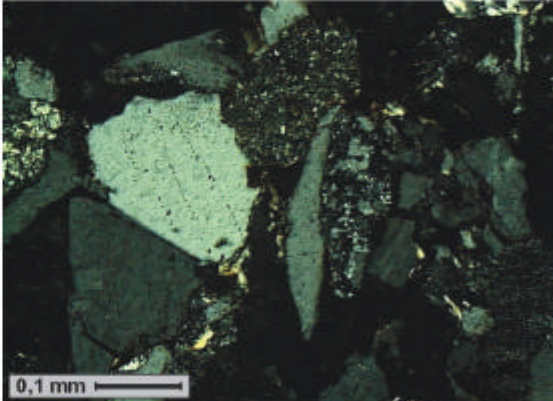
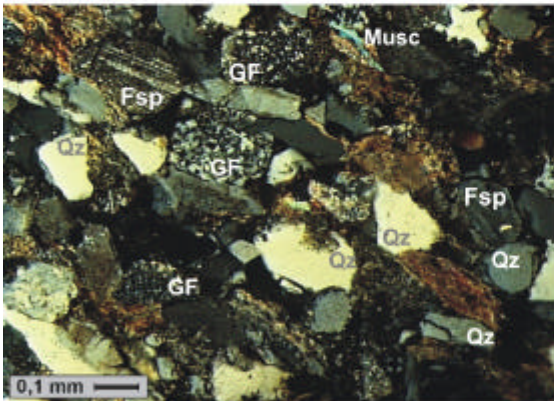
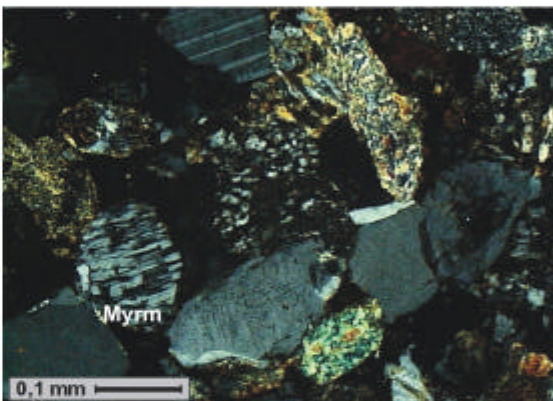
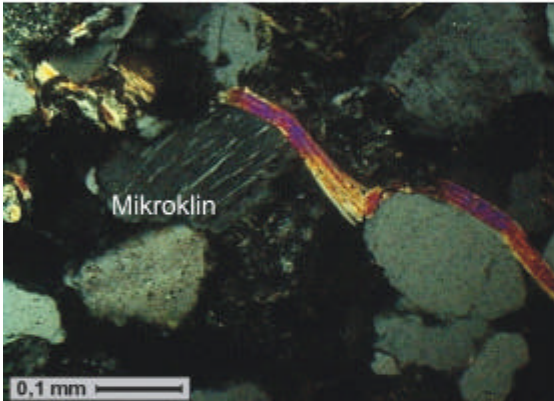
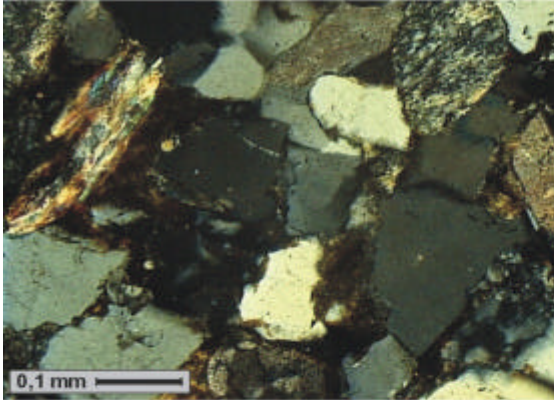


Erläuterungen Tafel 3

- 3/1 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, (+ Nicols)
Es scheinen Bereiche höherer Glaukonitkonzentrationen und solche loserer Verteilung einander abzuwechseln. Die grünlich bis bräunlich-grünen Pellets sind meist gut gerundet und haben eine durchschnittliche Größe von ungefähr 200-230 µm. Limonitische Randbereiche wurden häufig beobachtet. Neben wenigen Gesteinsbruchstücken konnten auch Feldspäte (Plagioklase) identifiziert werden.
- 3/2 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, (+ Nicols)
In dieser Tafel ist ein Glaukonitaggregat abgebildet, das intern kleine schwarze rundliche Komponenten zeigt, die in diesem Dünnschliff häufiger auftraten.
- 3/3 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, (+ Nicols)
In dieser Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass gerade im Kontakt zu Bioklasten durchaus größere Hohlräume auftreten können. Dieser Umstand bzw. die durch die Bioklastenbruchstücke verschiedener Größe hervorgerufene zum Teil recht starke Heterogenität der Varietät IV erschwert eine generelle Aussage zum Verhalten aller Bausteine dieser Varietät an der Fassade der Alten Pinakothek.
- 3/4 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, (+ Nicols)
Auch in dieser Tafel ist ein Dolomithomboeder zu erkennen.
- 3/5 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, (+ Nicols)
Abgesehen von wenigen kleinen Bereichen ist das Gefüge der Varietät IV korngestützt.
- 3/6 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, (// Nicols)
Bei den Untersuchungen an Varietät IV fiel der sehr hohe Anteil unterschiedlicher Bioklasten Bruchstücke auf.
- 3/7 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, (+ Nicols)
Bei den Untersuchungen an Varietät IV fiel der sehr hohe Anteil unterschiedlicher Bioklasten Bruchstücke auf.

Farbtafel 4

1	2
3	4
5	6
7	8

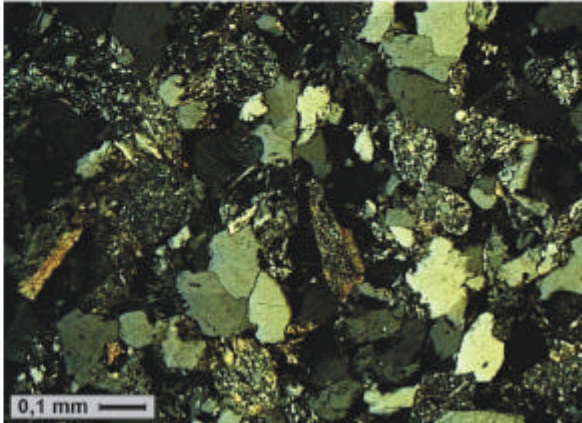
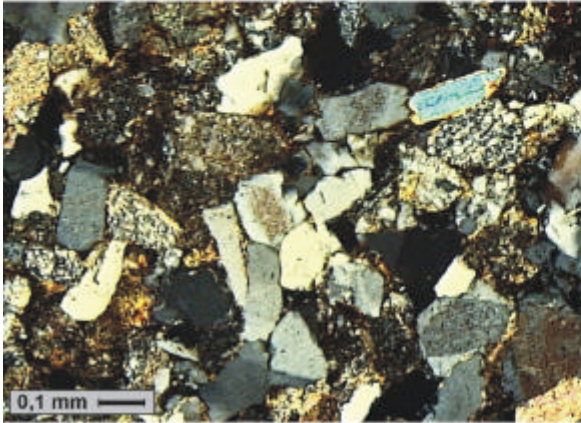


Erläuterungen Tafel 4

- 4/1 Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial), (+ Nicols)
Die Komponenten des Originalmaterials bilden ein relativ gut sortiertes, gleichkörniges und korngestütztes Gefüge, das stellenweise durch etwas loser gepackte Bereiche aufgebockert wird. Anhand der engen Kornkontakte ist zu erkennen, dass dieses Sediment eine deutliche Kompaktion erfahren hat.
- 4/2 Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial), (+ Nicols)
Bei den Glimmern handelt es sich um Muskovit (Farben II. Ordnung). Bis auf wenige Ausnahmen zeigen sie im Übersichtsbild eine gleichartige Einordnung.
- 4/3 Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial), (+ Nicols)
Es ist auffällig, dass die Glimmer häufig verbogen sind, was ebenfalls auf diagenetische Prozesse zurückzuführen ist. Links der Mitte ist des Weiteren ein Mikroklin erkennbar.
- 4/4 Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial), (+ Nicols)
Die Komponenten sind kantengerundet bis angerundet. Der Feldspatgehalt beträgt ungefähr 5 % und wird sowohl von Kalifeldspäten als auch Plagioklasen bestimmt. Links der Mitte zeigt der Feldspat myrmektische Entmischungen (Myrm).
- 4/5 Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial), (+ Nicols)
Die Gesteinsfragmente, die sowohl magmatischen als auch metamorphen Ursprungs sind, machen ungefähr 35-40 % der Komponenten aus und sind größtenteils relativ gut gerundet. (Fsp-Feldspat, GF-Gesteinsfragment, Qz-Quarz, Musc-Muscovit).
- 4/6 Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial), (+ Nicols)
Stellenweise sind mehrere Minerale eng über Punkt- oder Längskontakte miteinander verbunden.
- 4/7 Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial), (+ Nicols)
Die meisten Kornkontakte kommen indirekt, über eine tonig-chloritische Matrix zustande.
- 4/8 Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial), (+ Nicols)
Die Matrix enthält feinkörnige, doppelbrechende Ton- und Glimmerminerale. Es handelt sich dabei um feinkörnigen Muskovit (Sericit). Die goldenen wolkigen Erscheinungen feinkörniger Glimmer sind ebenso auf Feldspäten und den Gesteinsfragmenten bzw. in deren engeren Randzonen zu beobachten.

Farbtafel 5

1	2

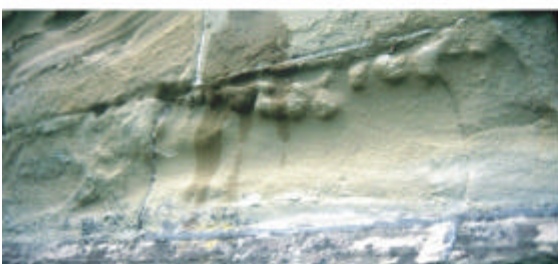
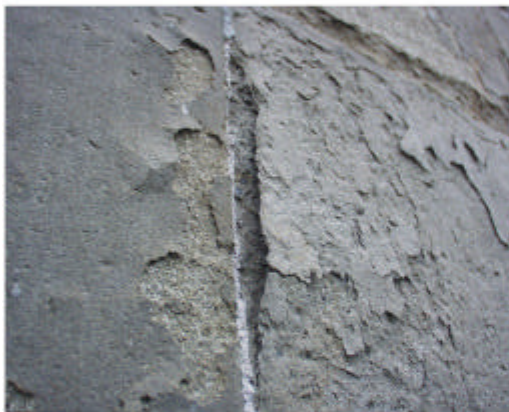


Erläuterungen Tafel 5

- 5/1 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), (+ Nicols)
Die Komponenten des Austauschmaterials bilden ein relativ gut sortiertes, gleichkörniges und korngestütztes Gefüge. Im Gegensatz zu dem Originalmaterial finden sich seltener Bereiche lockeren Gefüges. Dennoch ist wohl davon auszugehen, dass beide Materialien die gleiche Kompaktion erfahren haben
- 5/2 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), (+ Nicols)
Dem Originalmaterial entsprechend wurden Punkt- und häufig Längskontakte der Komponenten untereinander beobachtet. Neben indirekten tonig-chloritischen Matrixkontakten, die den Hauptanteil bilden, gibt es auch kieselige, direkte Korn-zu-Korn-Bindungen.

Farbtafel 6

1	2
3	4
5	6
7	8

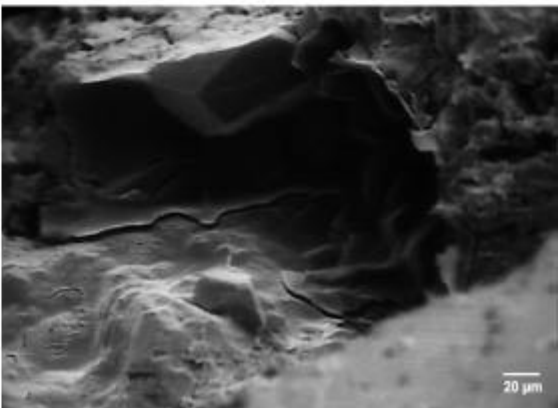
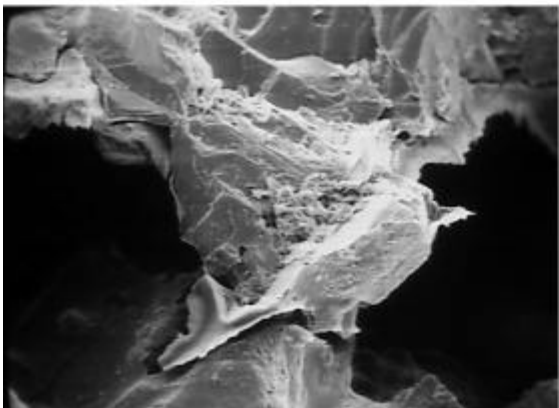
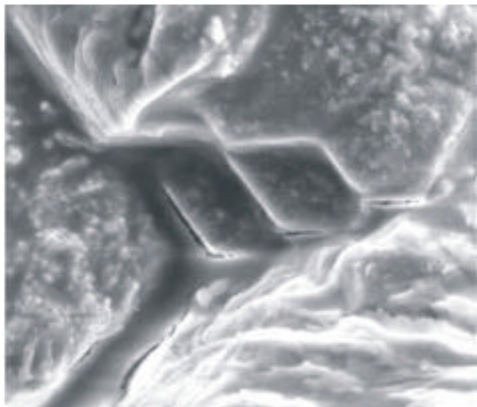
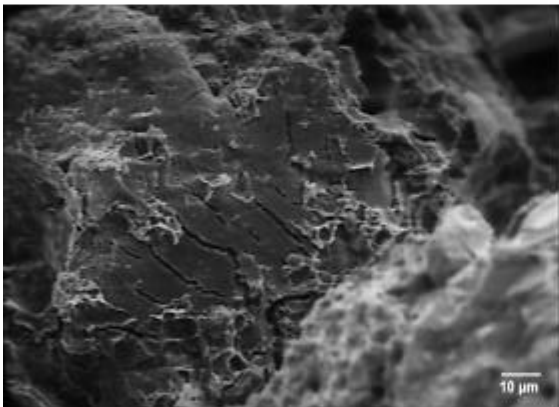
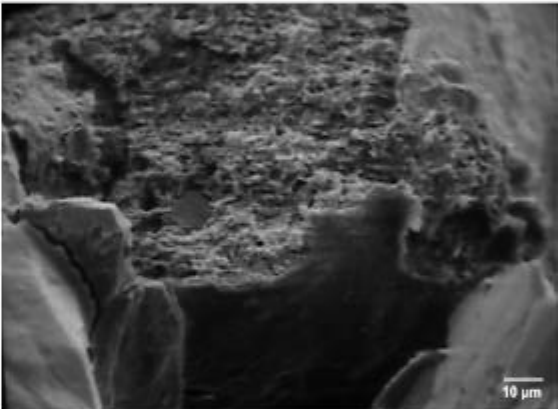
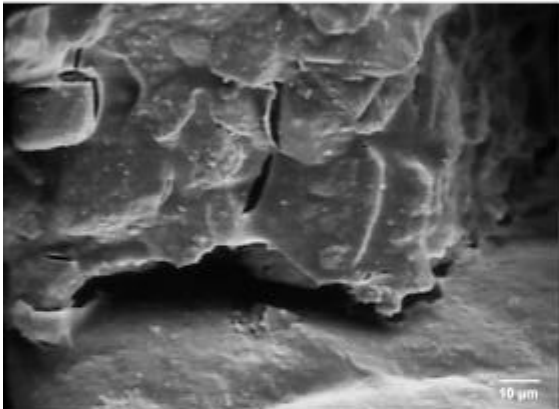
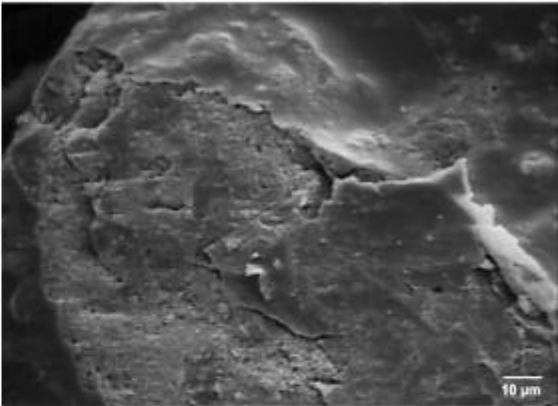
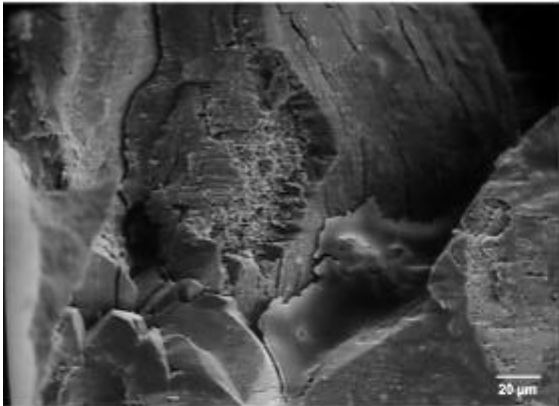


Erläuterungen Tafel 6

- 6/1 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau (Originalmaterial)
Dieses Bild zeigt eine uneben zurückgewitterte Oberfläche eines Quaders aus Originalmaterial. Der Materialverlust kommt durch eine Kombination aus Absanden, Abbröckeln und Abschuppen zustande. Schloss Schillingsfürst, Südfassade.
- 6/2 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau (Originalmaterial)
Dieses Bild zeigt oberflächenparallele Ablösung von Schuppen und kleinen Schalen. Schloss Schillingsfürst, Nordfassade.
- 6/3 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau (Originalmaterial)
Auch in diesem Bild sind oberflächenparallele Ablösungen zu beobachten. Im linken Bild- teil löst sich eine dünne „Tapeten“ vom mürben Untergrund ab. Bei den hellen Flecken handelt es sich um Effloreszenzen (Gipsnester). Der rechts angrenzende Quader zeigt eine große Schale, die sich in viele einzelne Schuppen auffiedert. Durch Spannungen löste sich diese Schale ungleichmäßig vom Untergrund ab. Schloss Schillingsfürst, Nordfassade.
- 6/4 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau (Originalmaterial)
Der im Zentrum abgebildete Quader zeigt eine mehrlagige Schalenbildung. Ein Reiben über die Oberfläche erinnert eher an einen nur sehr gering verfestigten Sand als an ein Gestein. Schloss Schillingsfürst, Nordfassade.
- 6/5 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial)
Dieses Bild zeigt sehr dünne, gipshaltige „Tapeten“, die sich ähnlich einer abbröckelnden Farbe von der Oberfläche ablösen. Das Gestein, das darunter liegt ist zumindest peripher mürbe und sandet ab. Schloss Schillingsfürst, Südfassade.
- 6/6 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial)
Auch dieses Bild zeigt eine bearbeitete Oberfläche mit dünnen Ablösungen, ähnlich einer Farbschicht. Zum Teil gibt es blasige, spröde Aufwerfungen. Der Unterschied zu den „Tapeten“ in Tafel 6/5 besteht darin, dass das Material unter der abgelösten Schicht nicht so mürbe, sondern eher fest ist. Schloss Schillingsfürst, Südfassade.
- 6/7 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau (Originalmaterial)
Dieses Bild zeigt Verwitterungsstrukturen, die auf ein extremes Absanden zurückzuführen sind. Derartige Ausprägungen finden sich nur an der Nordfassade von Schloss Schillingsfürst.
- 6/8 Schilfsandstein aus Diebach/Gailnau (Originalmaterial)
Dieses Beispiel zeigt eine in sich sehr konsistente, feste Schale, die über eine aufgelockerte Mürbezone mit dem „intakten“ Gestein verbunden ist. Von der Oberfläche der Schale löst sich ebenfalls eine sehr dünne „Haut“ blasig ab. Der Pfeil deutet auf Effloreszenzen (Gips). Schloss Schillingsfürst, Nordfassade.

Farbtafel 7

1	2
3	4
5	6
7	8



Erläuterungen Tafel 7

Alle Abbildungen dieser Tafel stammen von REM Untersuchungen an Regensburger Grünsandstein und geben den „Stand 2001“ wieder. Damit repräsentieren sie den Zustand der Konservierung, ungefähr 14 bis 17 Jahren nach der Applikation.

- 7/1 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Im Zentrum des Bildes ist aufgrund eines Ausbruchs deutlich die Dicke des Gelfilms erkennbar, der sich um dieses Mineral legt. Auch das Umfeld erscheint von diesem Kieselfilm, der aus der Applikation von Wacker OH resultiert, bedeckt zu sein. Speziell im Hintergrund des Bildes sind deutlich Schrumpfungsriffe im Gelfilm feststellbar. Des Weiteren kann im vorderen Bildbereich ein, den Porenraum überspannender Polysiloxanfilm beobachtet werden. Es ist offensichtlich, dass die Polysiloxane deutlich gering mächtigere Filme ausbilden als die Kieselsäureester. Der aus der Behandlung mit Wacker H resultierende Film setzt sich auch auf dem Mineral im rechten Bildbereich fort.
Eine Vergrößerung dieses Ausschnittes ist in Tafel 7/2 abgebildet.
- 7/2 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Vergrößertes Detail aus Tafel 7/1. In dieser Darstellung wird die extreme Feinheit des wasserabweisenden Gelfilms besonders deutlich. Kleinste Unebenheiten in der Mineraloberfläche prägen sich durch den Gelfilm. Es kommt bereichsweise zu Ablösungen (Luminiszenzen).
- 7/3 Regensburger Grünsandstein, Varietät III, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Der gesamte Bildausschnitt ist mit Gel überkleidet, allerdings ist der Kontakt des oberen Aggregats zum Untergrund über einen intakten Gelfilm nicht mehr gegeben. Das, das zentrale Mineral umkleidende Gel scheint nur einen dünnen Film ausgebildet zu haben. Diese pergamentähnliche Ausbildung weist Risse auf und einzelne Gelschollen lösen sich vom mineralischen Untergrund.
- 7/4 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Der geschlossene Gelfilm im rechten und unteren Teil des Bildes wird im zentralen Bereich durch eine abschuppende Gelfilmüberkleidung unterbrochen.
- 7/5 Regensburger Grünsandstein, Varietät II, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Gelfilm auf der Kornoberfläche. In der oberen linken Ecke durchzeichnende Strukturen des Untergrundes. Diverse Risse durchziehen den Gelüberzug. Auf dieser Oberfläche wiederum befinden sich schuppige, sehr dünne Gelfilmreste, die vermutlich von der hydrophobierenden Behandlung herrühren, in dieser Ausbildung allerdings keinen wasserabweisende Effekt mehr bewirken.
- 7/6 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Diese Abbildung zeigt einen einheitlichen Gelüberzug des mineralischen Untergrundes. Der Untergrund paust sich relativ gut durch den Gelfilm hindurch. In dem Porenraum überspannenden Bereich sowie an steileren Abrisskanten der Mineraloberfläche kam

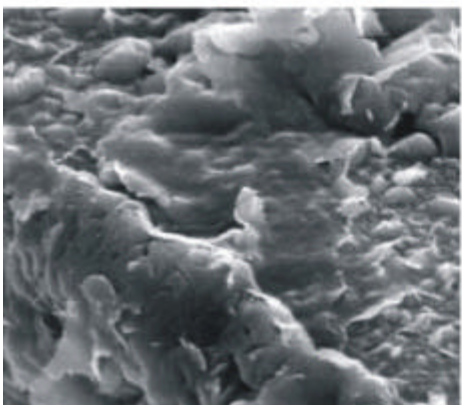
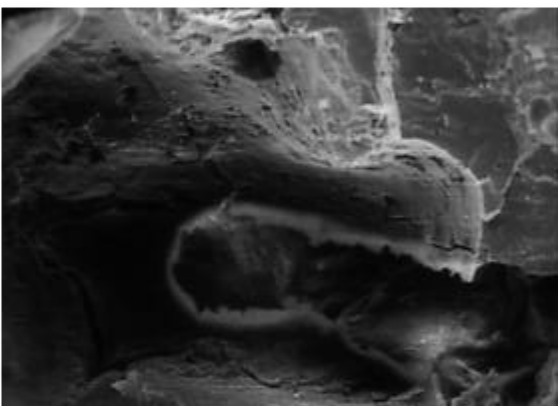
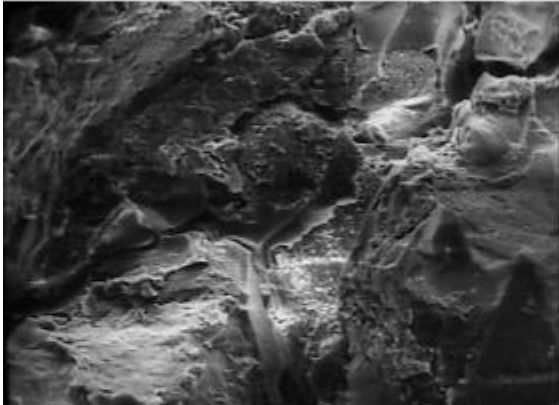
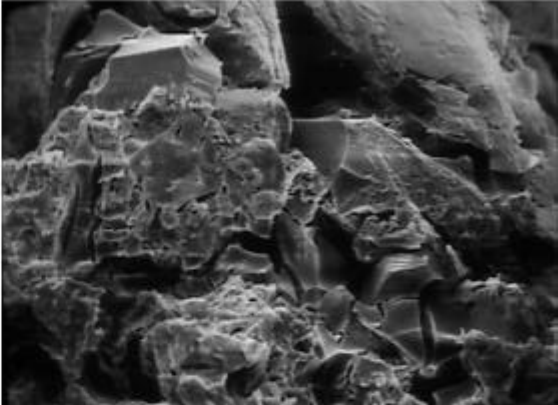
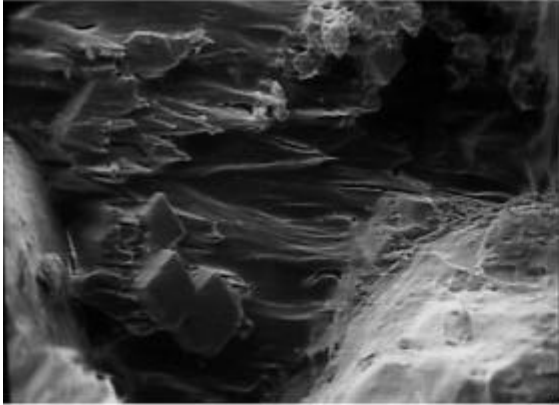
es zu Rissen, die ihrerseits die umfassende Wirksamkeit der Behandlung beeinträchtigen.
1350fache Vergrößerung.

7/7 Regensburger Grünsandstein, Varietät III, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Diese Abbildung zeigt eine nicht mehr kraftschlüssige Verbindung zwischen einem Feldspat (oben) und einem Quarz, der seinerseits einen Gelüberzug besitzt. Auf dem Feldspat liegen kleine schuppige Gelreste, die rechts in den Porenraum hinein ragen. Der Gelfilm im Kontaktbereich beider Mineralkörner legte sich gleich einem Tuch auf die ursprüngliche Morphologie. Durch fortschreitende Alterung des Gels, die mit Gelkontraktion einhergeht, verlor der Gelfilm im Kontaktbereich der Minerale die Haftung zum Untergrund, was durch die Luminiszenzen deutlich wird.
2000fache Vergrößerung.

7/8 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
In dieser Tafel ist ein sehr einheitlicher Gelüberzug der mineralischen Oberfläche dargestellt. Mineralflächen, die senkrecht zu diesem Gelfilm liegen, sind ebenfalls von Gelflächen bedeckt, die wiederum keinen kraftschlüssigen Kontakt zum übrigen Gelfilm haben.

Farbtafel 8

1	2
3	4
5	6
7	



Erläuterungen Tafel 8

Alle Abbildungen dieser Tafel stammen von REM Untersuchungen an Regensburger Grünsandstein und geben den „Stand 2001“ wieder. Damit repräsentieren sie den Zustand der Konservierung, ungefähr 14 bis 17 Jahren nach der Applikation.

- 8/1 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H Striemig, schuppig ausgebildeter Gelfilm, der einen Porenraum überspannt. Im unteren Bildteil sind einige Calcitminerale eingeschlossen. Der Kontakt des Gels zum Aggregat in der rechten Bildhälfte scheint sehr stabil zu sein. Die Mineralkörner am Bildrand sind ebenfalls von Gel überzogen.
2000fache Vergrößerung.
- 8/2 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H Die untere Bildhälfte weist eine besonders starke Gelfüllung auf, die hier stückig zerbrochen ist (Schrumpfungsrisse). Aber auch die Mineralaggregate im Hintergrund zeigen Gelüberzüge, die allerdings losgelöst von denen im Vordergrund sind. Ebenso wird der dazwischen liegende Porenraum nicht überspannt.
3500fache Vergrößerung.
- 8/3 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H Diese Abbildung zeigt verschiedene Erscheinungsformen eines Gelfilms auf einer mineralischen Oberfläche. Es liegt jedoch keine erstrebenswerte, einheitlich geschlossene Gelüberdeckung vor. Im Zentrum des Bildes fallen die tuchartigen Porenraumauskleidungen auf, die randlich bereits eine Ablösung vom Untergrund aufweisen. Des Weiteren zeigen die beiden großen Mineralaggregate in dem rechten unteren und dem linken oberen Bildausschnitt einen Gelüberzug. Einzelne Gelplatten sind am oberen Bildrand zu sehen.
2000fache Vergrößerung.
- 8/4 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H In dieser Tafel sind die einzelnen Mineralkörner (Quarz und Glaukonitaggregate) unterschiedlich homogen von einem Gelfilm überdeckt. Auf dem Quarz im rechten oberen Bildteil ist die Kontaktzone eines ursprünglich angrenzenden Minerals erkennbar (durch Präparation entfernt). Diese beiden Mineralkörner waren offensichtlich über einen Schutzmittelfilm miteinander verbunden. Zum Teil werden auch Porenräume von Gelsegeln überspannt, die jedoch Risse aufweisen und somit nicht die optimale Festigungswirkung der Konservierung erhalten bleibt. Das Glaukonitaggregat im Vordergrund besitzt an seiner Oberfläche eine Art Flickenteppich aus Gelresten. Diese Erscheinung ist wahrscheinlich der Präparation zuzuschreiben, da in den Bereich der jetzt erkennbaren Gelreste ursprünglich andere Mineralkörner im „Gel“-Kontakt zum Glaukonit standen.
2000fache Vergrößerung.
- 8/5 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H Sowohl im Hintergrund als auch im Vordergrund sind die Gelfilme auf der mineralischen Oberfläche sehr gut zu erkennen. Hauptaugenmerk bei dieser Abbildung liegt zum einen

auf der leicht abschuppenden Gelfilmüberkleidung im oberen Bildteil und vor allem in der Unterbrechung der Anbindung an das Glaukonitaggregat unten rechts. Die Minerale sind zwar mit einem Gelfilm überkleidet, allerdings ist nicht in allen Fällen eine kraftschlüssige Verbindung zu benachbarten Komponenten gewährleistet, was wiederum mit einer Einbuße an Festigkeit einhergeht.

2000fache Vergrößerung.

8/6 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Der mineralische Untergrund in diesem Bild ist sehr einheitlich von einem Gelfilm bedeckt. Das luminiszierende Band im Vordergrund des Bildes, das an ein aufgesperrtes Drachenmaul erinnert, ist auf ein durch die Präparation entferntes Mineralkorn zurückzuführen, das offensichtlich ebenfalls in diesen Gelfilm integriert war und diese Abrisskante zurückgelassen hat.

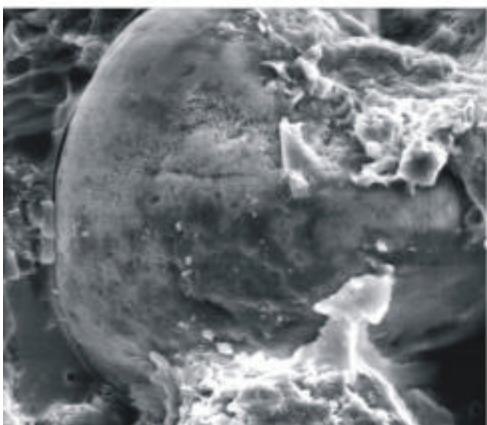
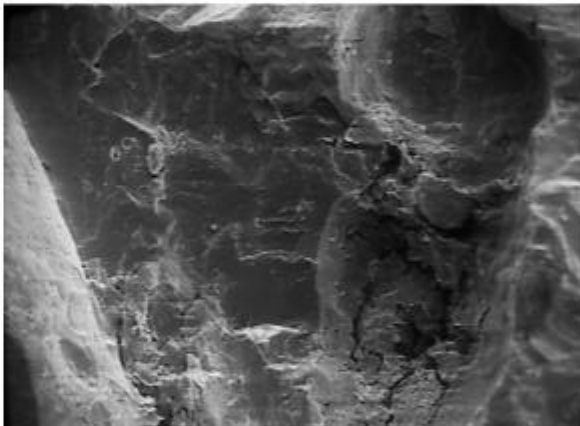
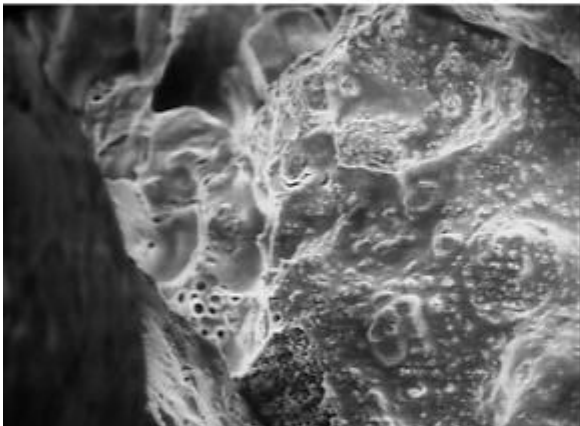
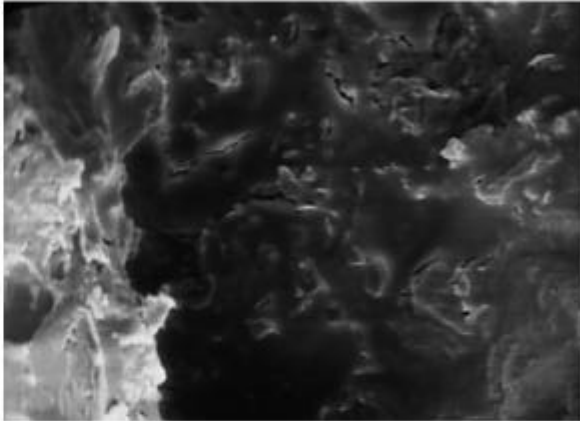
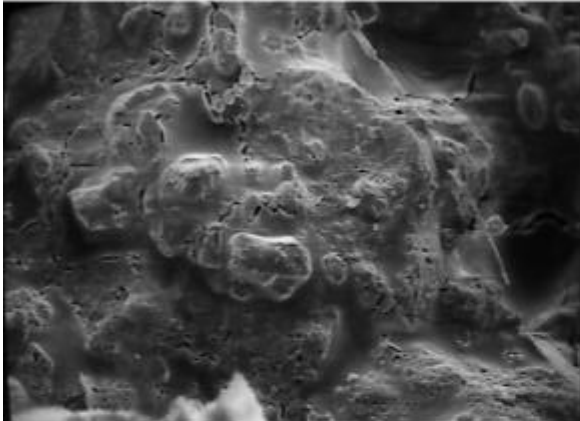
2000fache Vergrößerung.

8/7 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Dieses Bild zeigt einen dünnen Polysiloxanfilm. An der Kante im vorderen Bildbereich ist zu erkennen, dass der Silikonharzfilm unterbrochen ist und in der senkrechten Fläche nur in einzelnen Fladen Fortsetzung findet.

5000fache Vergrößerung.

Farbtafel 9

1	2
3	4
5	



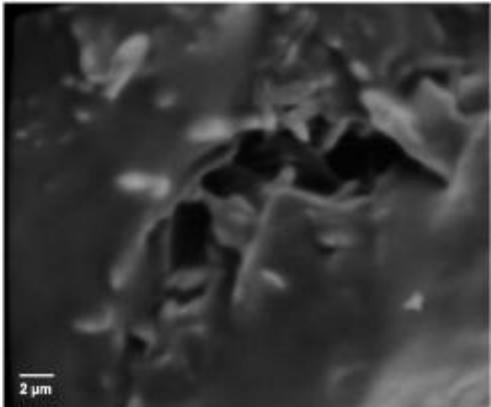
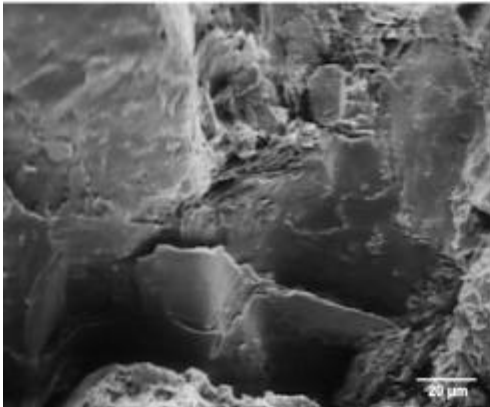
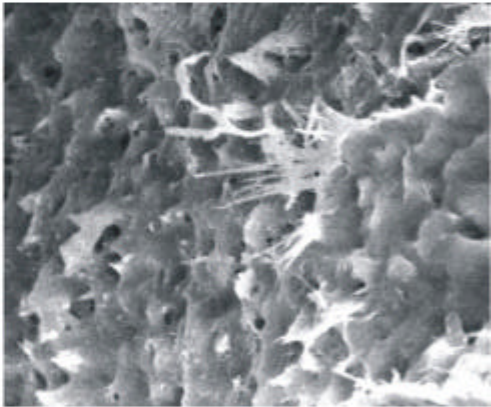
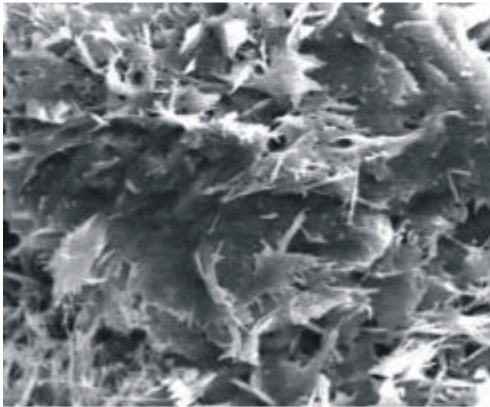
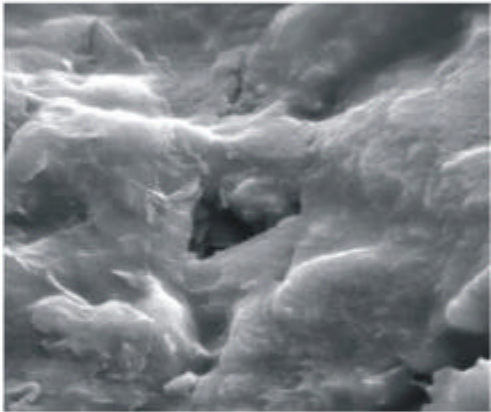
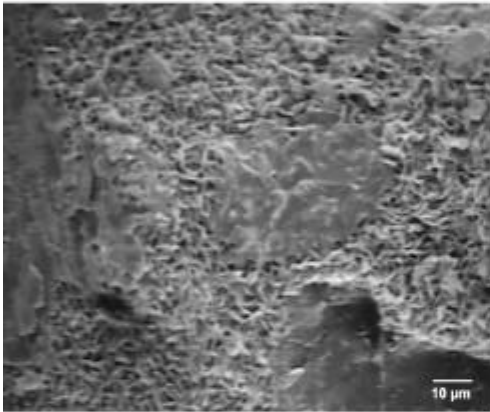
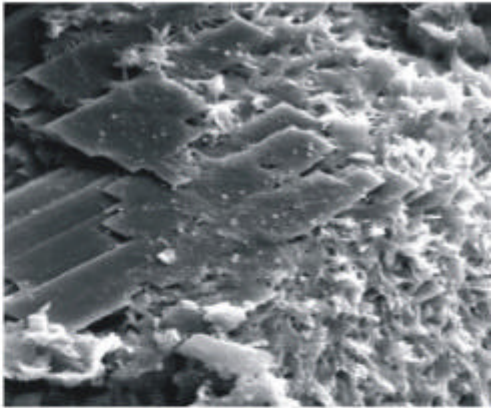
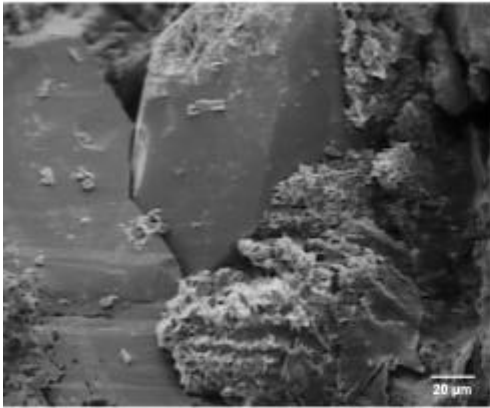
Erläuterungen Tafel 9

Alle Abbildungen dieser Tafel stammen von REM Untersuchungen an Regensburger Grünsandstein und geben die Ergebnisse der Wiederbehandlung im Labor wieder.

- 9/1 Regensburger Grünsandstein, Varietät III, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Diese Abbildung zeigt einen nahezu geschlossenen Gelfilm. Die Aufnahme wurde ungefähr 9 Monate nach der Wiederbehandlung der Probe im Labor gemacht. Es sind deutlich löchrige Rissmuster zu erkennen, die jedoch nicht an die typischen Schrumpfungsrisse erinnern.
1350fache Vergrößerung.
- 9/2 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Auch bei dieser Probe der Varietät IV konnten nach der Wiederbehandlung bereits beschriebene löchrige Unterbrechungen des Gelfilms beobachtet werden. Der Gelüberzug scheint nicht sehr mächtig zu sein, da sich der mineralische Untergrund sehr gut hindurch paust. Ansonsten konnte durch die erneute Konservierungsmaßnahme ein nahezu einheitlicher Gelfilm sowohl über die mineralischen Komponenten als auch den dazwischenliegenden Porenraum gelegt werden.
2000fache Vergrößerung.
- 9/3 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
An der unteren Bildkante dieser Tafel wird an einer wahrscheinlich durch die Präparation gestörten Stelle des Gelfilms erkennbar, wie dünn dieser ist. Der Untergrund prägt sich extrem deutlich hindurch. Aufgrund der geringen Mächtigkeit dieses Films ist davon auszugehen, dass an dieser Stelle das Ergebnis der nachträglichen hydrophobierenden Behandlung dokumentiert wurde. Dennoch, der Schutzfilm stellt einen weitreichenden und geschlossenen Überzug der darunter liegenden mineralischen Oberfläche dar. Dieses Resultat lässt sich auch an den - im Vergleich zu den Daten der altbehandelten Proben - optimierten physikalischen Kennwerten nachvollziehen.
Die löchrige Struktur im linken unteren Bildteil lässt sich wahrscheinlich auf ein darunter liegendes Bioklastenbruchstück zurückführen.
2000fache Vergrößerung.
- 9/4 Regensburger Grünsandstein, Varietät III, 1987 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
In dieser Tafel ist ein mit Kieselgel erfüllter Porenraum abgebildet. Die Abdrücke stammen von Mineralkörnern, die durch die Präparation verloren gegangen sind.
1350fache Vergrößerung.
- 9/5 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV, 1984 behandelt mit Wacker OH und Wacker H
Diese Abbildung zeigt ein Glaukonitaggregat, das fest in dem Gelfilm eingefasst ist und selber auch teilweise von Gel überkleidet ist.
775fache Vergrößerung.

Farbtafel 10

1	2
3	4
5	6
7	8



Erläuterungen Tafel 10

Der erste Teil der Abbildungen dieser Tafel stammen von REM Untersuchungen an Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial) bzw. Schleerith (Austauschmaterial) rund 23 Jahre (Südfassade), 22 bis 18 Jahre (Westfassade) und 10 Jahre (Nordfassade) nach der ersten Applikation. Die Darstellungen illustrieren sehr gut die ermittelten Parameter der Wasseraufnahme. Die gemessenen w -Werte liegen zum Teil derartig hoch (siehe Kapitel 8.3.1.1.2), dass die Detektion von nur fragmentartig erhaltenen „Polysiloxanfetzen“, die nahezu wirkungslos sind, nicht weiter überraschte.

- 10/1 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1978 behandelt mit UNIL 190 S
Dieses Bild zeigt ein dichtes Korngefüge (Quarz). Die Porenwandungen im rechten Bildteil sind mit einem kartenhausartigem Tonmineralrasen überwachsen. Es scheint, dass nur die rechte Bildhälfte bzw. der Tonmineralrasen von einem hydrophobierenden Polysiloxanfilm überkleidet ist. Allerdings ist dieser Gelfilm nicht geschlossen und einheitlich, sondern legt sich in einzelnen Schollen auf den mineralischen Untergrund auf.
- 10/2 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Abbildung zeigt einen Feldspat, überwachsen von einem kartenhausartigem Tonmineralrasen. Zwischen den einzelnen Komponenten des Tonmineralrasens kann man feine „Polysiloxansegel“ erahnen. Der entsprechende w -Wert beträgt $1,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$.
1100fache Vergrößerung.
- 10/3 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S
In dieser Tafel ist eine Detailaufnahme eines Tonmineralrasens mit auflagernden Polysiloxanfilmresten dargestellt. Zum einen ist zu erkennen, dass die aus hydrophobierenden Behandlungen resultierende Polysiloxanfilme sehr dünn sind. Der mineralische Untergrund prägt sich sehr deutlich hindurch. Zum anderen ist es augenscheinlich, dass die verhältnismäßig großen ungeschützten Oberflächen soviel Wasser aufnehmen und quellen können, dass die wenigen geschützten Bereiche nahezu keine Auswirkungen haben. Des Weiteren kann Feuchtigkeit von den Seiten her an die vermeintlich geschützten Bereiche gelangen und zur Quellung der Tonminerale führen.

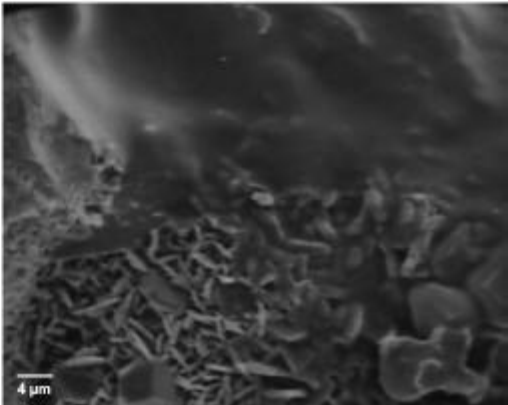
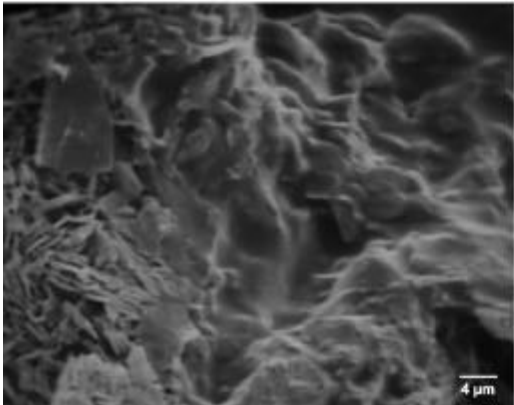
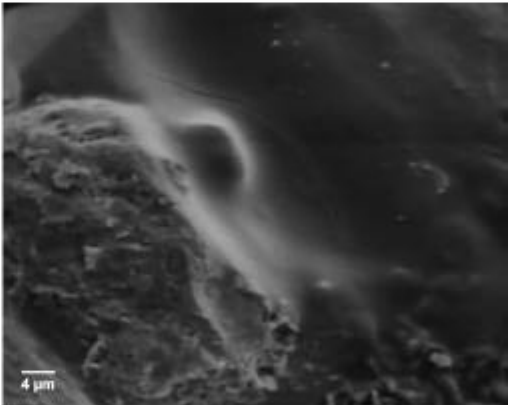
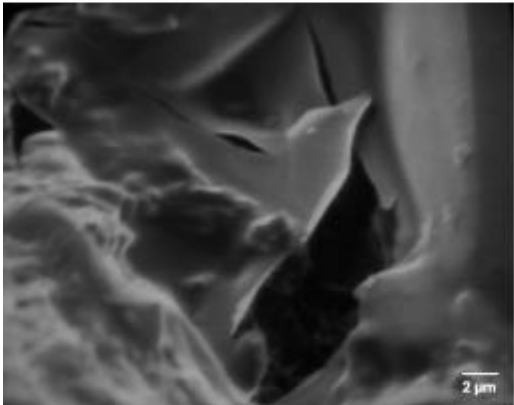
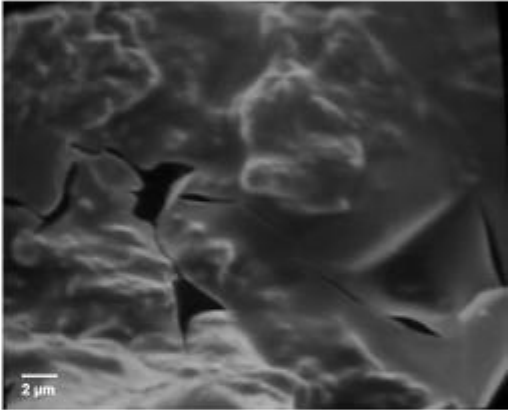
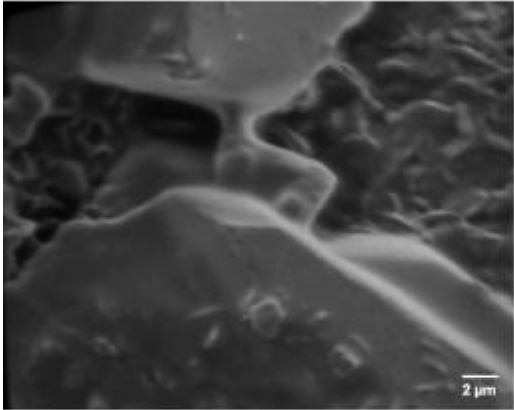
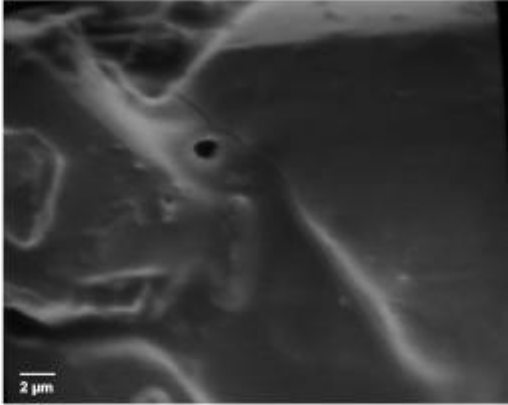
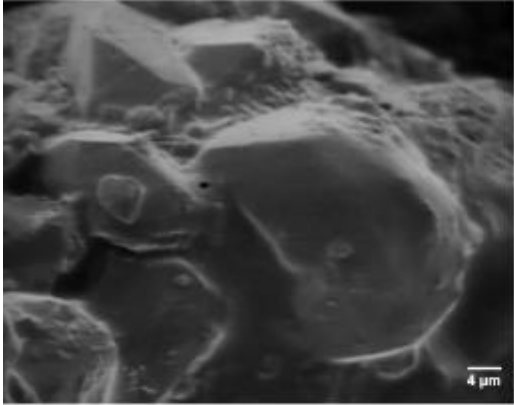
Die weiteren Bilder dieser Tafel stammen von REM Untersuchungen an Schilfsandstein aus Diebach und Gailnau (Originalmaterial) bzw. Schleerith (Austauschmaterial) und geben Ergebnisse der Wiederbehandlung im Labor wieder.

- 10/4 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S
Dieser über das Korngefüge reichende geschlossene Polysiloxanfilm ist das Resultat einer doppelten Applikation von Funcosil SNL. Die Morphologie paust sich durch den Polysiloxanüberzug hindurch und es gibt nur wenige Fehlstellen. Der entsprechende w -Wert beträgt $0,05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$. Bezüglich der Absenkung der Wasseraufnahme kann diese Wiederbehandlung als erfolgreich eingestuft werden.
3500fache Vergrößerung.

- 10/5 Schilfsandstein aus Diebach/Gailau (Originalmaterial), ursprünglich unbehandelt
 Der Tonmineralrasen in diesem Bild zeigt eine unvollständige, dennoch großflächige Auskleidung mit einem Polysiloxanfilm. An vielen Stellen stoßen Tonmineralgespinste (Illitnetzwerk) durch diesen Film hindurch bzw. stören Löcher dessen Kontinuität. Das Einbringen von Funcosil Antihygro in den ursprünglich unbehandelten Porenraum führte zu einer Absenkung des w-Wertes von $3,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ auf $1,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$, obgleich die Wirkung von quellmindernden Tensiden (Antihygro) nicht auf die Absenkung der kapillaren Wasseraufnahme abzielt.
 2000fache Vergrößerung.
- 10/6 Schilfsandstein aus Diebach/Gailau (Originalmaterial), ursprünglich unbehandelt
 Der Polysiloxanfilm, der den Tonmineralrasen (Chloritrasen) überdeckt, erscheint homogener und überbrückt das dichte Korngefüge großflächiger. Vereinzelt ragen Illitstengel aus diesem Verband. Die Quellneigung in dem Fassadenbereich, aus dem diese Probe stammt konnte durch die Behandlung mit Funcosil Antihygro von $3623 \text{ } \mu\text{m/m}$ auf $1232 \text{ } \mu\text{m/m}$ gedrittelt werden.
 2000fache Vergrößerung.
- 10/7 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
 Dieses Material wurde zweimal mit UNIL 290 wiederbehandelt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Porenraum-auskleidenden Tonmineralrasen großflächig von einem Polysiloxanfilm überzogen sind. Wahrscheinlich ist es der geringeren Vergrößerung zuzuschreiben, dass dieser Schutzfilm etwas rauher erscheint, als in den anderen Bildern dieser Tafel beschrieben. Der Schutzfilm legt sich offensichtlich nicht kontinuierlich über das gesamte Gefüge. Dennoch konnte der w-Wert von $6,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ („Stand 2001“) auf $0,11 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ abgesenkt werden, was für eine wirkungsvolle Konservierungsmaßnahme spricht.
- 10/8 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
 In diesem Bild ist eine Detailaufnahme des aus einer einmaligen Wiederbehandlung mit Funcosil WS resultierenden Schutzfilms erkennbar. Der Polysiloxanfilm legt sich als eine Art Decke über den Tonmineralrasen. Durch den Film prägen sich stellenweise die Tonminerale hindurch. Die nicht verschlossene Öffnung wird durch einen Polysiloxanfilm überbrückt. Der w-Wert, der nach der Wiederbehandlung ermittelt wurde, liegt bei $4,9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$. Vor der Behandlung wurde an der Fassade $2,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ gemessen. Da die Wasseraufnahme höchstwahrscheinlich durch die erneute Behandlung nicht gesteigert worden ist, zeigt dieses Phänomen, dass der Schilfsandstein sehr heterogen ist und die Messung im Jahr 2001 an einer Stelle des Quaders gemessen wurde, der weniger Ton enthalten hat. Demnach kann keine Aussage zum Effekt der Wiederbehandlung mit Funcosil WS getroffen werden.

Farbtafel 11

1	2
3	4
5	6
7	8



Erläuterungen Tafel 11

Alle Abbildungen dieser Tafel stammen von REM Untersuchungen an Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial) und geben die Ergebnisse der Wiederbehandlung an der Fassade wieder.

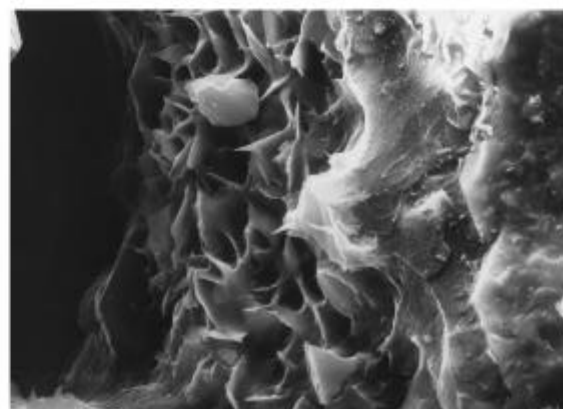
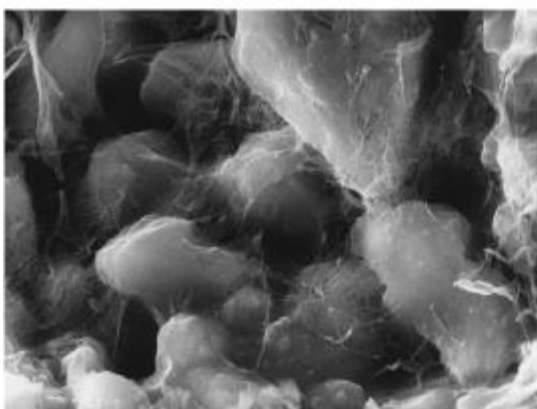
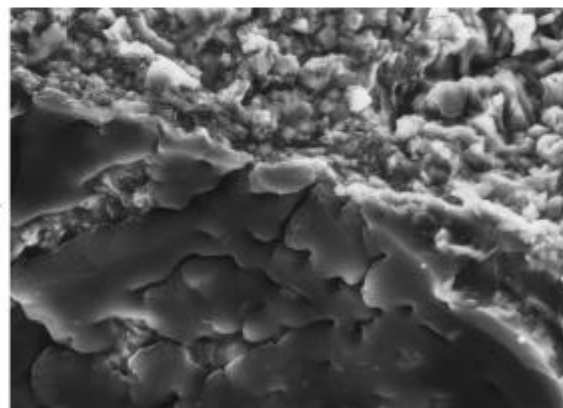
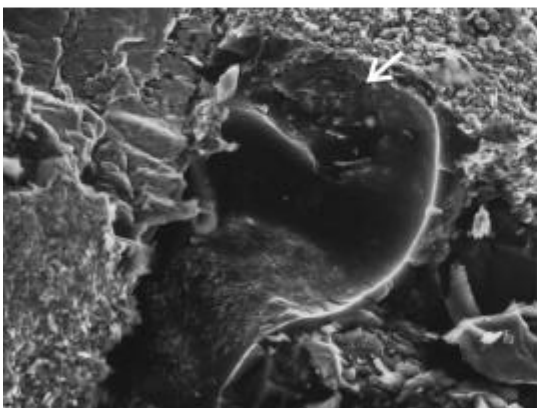
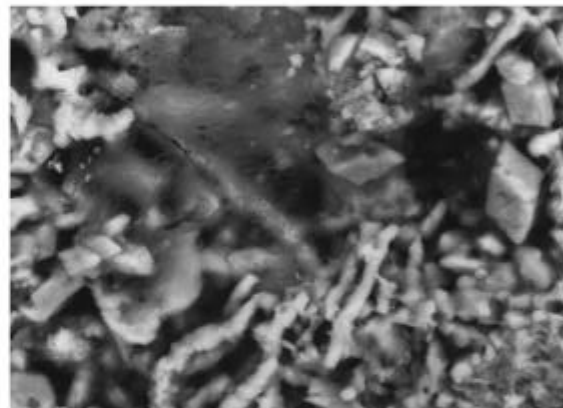
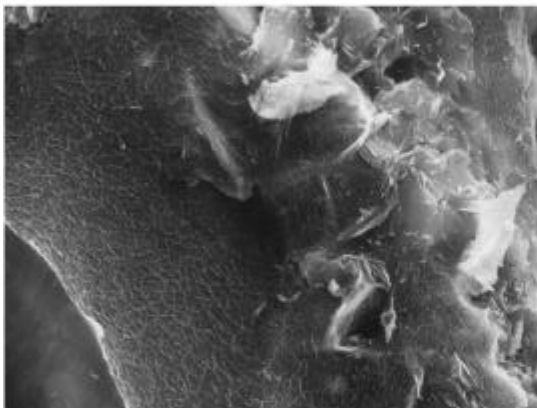
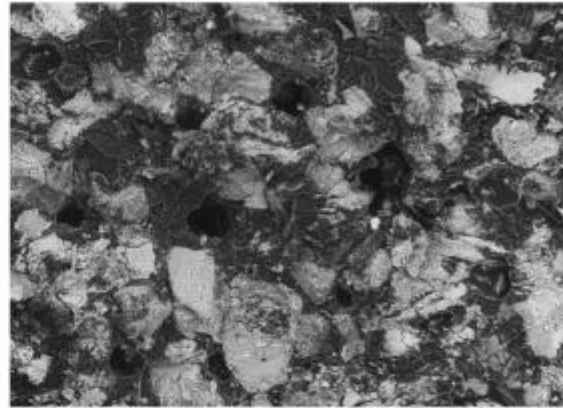
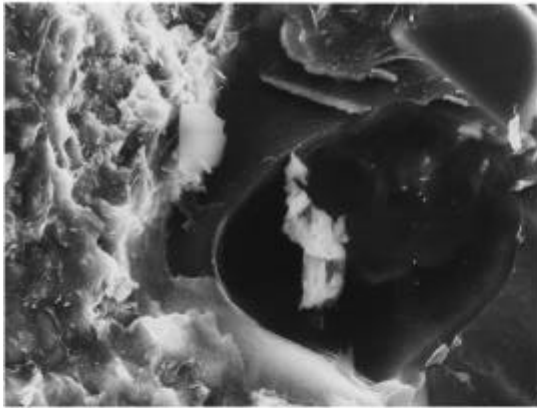
- 11/1 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Probe wurde einmal mit Funcosil SNL wiederbehandelt. Das gesamte Korngefüge in diesem Bildausschnitt ist von einem sehr einheitlichen Polysiloxanfilm überzogen. Der w-Wert konnte von $3,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ auf $0,01 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ abgesenkt werden. Bezüglich der Reduktion der kapillaren Wasseraufnahme ist diese Behandlung eindeutig als erfolgreich zu bewerten. Links der Mitte dieses Bildes befindet sich ein kleines Loch. Eine Detailaufnahme dieser Stelle ist in Tafel 11/2 abgebildet.
- 11/2 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Bei dieser Abbildung handelt es sich um eine Detailaufnahme der Tafel 11/1. Oberhalb des kleinen Lochs ist ein kleiner Riss erkennbar. Dieser Riss befindet sich in der „Polysiloxanbrücke zwischen zwei Mineralen, die über diesen Film miteinander verbundensind. Derartige Zonen sind offensichtlich Schwachstellen. Dennoch wird dieser Haarriss wohl nicht entscheidend die Wirksamkeit des Schutzfilms beeinträchtigen. Gerade auch in dieser großen Vergrößerung ist die Feinheit und Homogenität des aus der Wiederbehandlung mit Funcosil SNL resultierenden Schutzfilms zu erkennen.
- 11/3 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Abbildung stammt von der gleichen Probe wie in Tafel 11/1 und 11/2 beschrieben. Es ist auch hier deutlich zu erkennen, dass der gesamte Bildausschnitt von einem einheitlichen Schutzfilm vollständig überzogen ist. Im Zentrum ist erneut eine Polysiloxanbrücke zwischen zwei Mineralen abgebildet. An der unteren Bildkante, aber auch in der rechten Bildhälfte prägt sich sehr deutlich die mineralische Oberfläche durch den Schutzfilm hindurch, was wiederum dessen geringe Mächtigkeit unterstreicht. Wiederbehandelt mit Funcosil SNL.
- 11/4 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Abbildung wurde ausgewählt, um erneut die geringe Stärke des aus hydrophobierenden Behandlungen resultierenden Schutzfilms zu betonen. Der Polysiloxanfilm aus der Wiederbehandlung mit Funcosil SNL erinnert sowohl in dieser als auch in der folgenden Abbildung im übertragenen Sinne eher an ein Pergament. Abgesehen von den Fehlstellen vermittelt dieses Bild sehr gut den Eindruck, dass sich der Polysiloxanfilm dicht auf die mineralische Oberfläche auflegt. Der löchrige Bereich überspannt einen Porenraum. Möglicherweise kam es in Folge der Probenpräparation zur Zerstörung des fragilen Schutzfilms.
- 11/5 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Hierbei handelt es sich um eine Detailaufnahme der Abbildung in Tafel 11/4. Im rechten Bildteil ist noch genauer erkennbar, wie eng sich der Polysiloxanfilm mit dem unterk-

gernden Substrat verbindet. Die geringe Stärke des Schutzfilms wird erneut sehr deutlich (Funcosil SNL).

- 11/6 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Dieses Photo wurde ebenfalls ungefähr 6 Monate nach einer einmaligen Wiederbehandlung mit Funcosil WS aufgenommen. Im oberen Teil des Bildes ist ein sehr dichter Schutzfilm erkennbar, der in der linken Bildecke eher schuppigen Charakters ist.
- 11/7 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Die Probe wurde nach einer Wiederbehandlung mit der Mikroemulsion Funcosil WS untersucht. Diese Abbildung zeigt eine Detailaufnahme eines Tonmineralrasens (Illitrasen) mit großflächiger Polysiloxanfilmbedeckung. Anders als bereits betrachtet, folgt dieser Schutzfilm geschmeidig der Morphologie des Untergrundes und zieht sich auch zwischen die „Kartenhausstrukturen“. Allerdings gibt es gleich angrenzend an den vermeintlich geschützten Bereich ungeschützte Zonen, durch die Feuchtigkeit ein das Tonpaket eindringen kann. Es liegt zwar eine wasserabweisende Wirkung vor, sie ist jedoch nicht umfassend genug. Der ermittelte w -Wert dieser Probe liegt bei $4,9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ und übertrifft somit bei weitem den Wert der altbehandelten Fassade ($2,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$) und auch den Wert des unbehandelten Materials. Wie bereits bei Tafel 15/1 näher erläutert sind diese Schwankung bzw. die offensichtliche Unwirksamkeit der Wiederbehandlung auf deutliche mineralogische Schwankungen im Material zurückzuführen.
- 11/8 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Aufnahme zeigt im Detail den Kontakt des Schutzfilms zum darunter liegenden Tonmineralrasen. Im oberen Teil des Bildes ist ein intakter Polysiloxanüberzug zu erkennen, der ebenfalls aus einer Wiederbehandlung mit Funcosil WS stammt. Die Morphologie der tonigen Matrix prägt sich in einigen Bereichen hindurch. In dieser Zone kann man davon ausgehen, dass der wasserabweisende Effekt wirksam ist. Im unteren Bildabschnitt liegen allerdings nur einzelne Fetzen eines Polysiloxanfilms auf der Kartenhausstruktur der Tonminerale. Die Wirkung der Konservierung ist somit nicht umfassend und wie der gemessene w -Wert ($4,9 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$) der entsprechenden Probe belegt, an bestimmten Stellen des Quaders unzureichend.

Farbtafel 12

1	2
3	4
5	6
7	8



Erläuterungen Tafel 12

Alle Abbildungen dieser Tafel stammen von Kryo-REM Untersuchungen an Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial) und geben den „Stand 2001“ wieder. Damit repräsentieren sie den Zustand der Konservierung, ungefähr 24 Jahre (Südfassade) und ca. 18 Jahre (Westfassade) nach der ersten Applikation. Wenn nicht anders vermerkt, wurden die Proben im Vorfeld der Untersuchungen 1,5 Stunden unter Wasser gelagert.

- 12/1 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1978 behandelt mit UNIL 190 S
Es ist zu erkennen, dass der Porenraum im Zentrum des Bildes komplett mit Wasser erfüllt ist. Die Fehlstelle ist bei der Präparation durch die Eröffnung einer Luftblase entstanden. Diese Probe scheint offensichtlich nicht hinreichend vor Wasseraufnahme geschützt zu sein.
SE-Bild, 1000fache Vergrößerung.
- 12/2 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S
Dieses Photo zeigt eine Übersichtsaufnahme einer altbehandelten Probe, die zunächst 50 Stunden über aqua dest. gelagert konditioniert wurde und vor der Kryo-Präparation weitere anderthalb Stunden im Wasser gelegen hat. Die Probe hat freiwillig leicht und schnell viel Wasser aufgenommen. Das Resultat dieser erleichterten Wasseraufnahme zeigt diese Aufnahme: Bei den dunklen Flecken handelt es sich um wassergefüllten Porenraum, die Löcher entsprechen Großporen, die nicht ganz mit Wasser gefüllt sind. Generell sind viele Wassermenisci erkennbar. Die hellen Bereiche sind Minerale.
RE-Bild, 60fache Vergrößerung.
- 12/3 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1978 behandelt mit UNIL 190 S
Der Ausschnitt zeigt in der rechten oberen Bildecke einen Tonmineralrasen, der nahezu vollständig von Wasser erfüllt ist. Der linke Bildteil zeigt den angrenzenden wassererfüllten Porenraum. Der dieser Probe entsprechende w -Wert liegt bei $6,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$. Demnach ist die ursprünglich applizierte Hydrophobierung vollkommen unwirksam. Der w -Wert übertrifft sogar den des unbehandelten Materials, was wohl einem schwankenden Tonmineralgehalt innerhalb eines Quaders zuzuschreiben ist.
SE-Bild, 3000fache Vergrößerung.
- 12/4 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Im Zentrum des Bildes ist eine Art Gewebe erkennbar. Laut Herbert Juhling von der Amtlichen Materialprüfanstalt in Bremen (freundl. mündl. Mitteilung) handelt es sich dabei um im Wasserfilm gelöstes Salz. Das diffuse, semitransparente Erscheinungsbild, das untypisch für einen Polysiloxanfilm wäre, ist demnach auf die Entmischung der Lösung zurückzuführen. Diese Probe bzw. der ihr entsprechende Fassadenbereich enthält im Vergleich zu anderen Abschnitten der Fassade von Schloss Schillingsfürst höhere Gehalte an allen untersuchten Anionen.
RE-Bild, 900fache Vergrößerung.
- 12/5 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S

Dieses Photo zeigt eine altbehandelte Probe, die zunächst 50 Stunden über aqua dest. gelagert konditioniert wurde und vor der Kryo-Präparation weitere anderthalb Stunden im Wasser gelegen hat. Im Zentrum des Bildes ist ein mit Wasser ausgekleideter Porenraum erkennbar, der durch die Präparation eröffnet wurde. In Tafel 12/6 ist eine Detailaufnahme (Pfeil) dieses Bildes zu sehen.

RE-Bild, 350fache Vergrößerung.

- 12/6 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S
Dieses Photo ist ein Ausschnitt der bereits unter Tafel 12/5 beschriebenen Probe. Eindrucksvoll wird hier verdeutlicht, wie das Wasser von einem weiten Porenraum in engere Poren weitergeleitet wird. Der Wasserfilm wird in die Tiefe gesogen. Im oberen Teil des Bildes kann man auf dem tonigen Bindemittel feine Wassersäume erkennen. Der dieser Probe entsprechende w-Wert liegt bei $1,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ und zeigt somit an, dass das Material nur noch unzureichende wasserabweisende Eigenschaften besitzt.

RE-Bild, 1300fache Vergrößerung.

- 12/7 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Bei diesem spinnennetzartigen Gewebe handelt es sich wahrscheinlich um die Relikte des ursprünglich eingebrachten Schutzmittels. Darauf wiederum hat sich ein dünner Feuchtigkeitsfilm gelagert, der Salze enthält (freundl. mündl. Mitteilung H. Juhling, Amtl. Materialprüfanstalt Bremen). Die Kombination aus unterlagerndem Polysiloxan und dem salzhaltigen Feuchtigkeitsfilm würde dadurch bestätigt werden, dass diverse Risse im Schutzfilm-Kornkontakt auftreten, die Wasser allein so nicht verursachen könnte. Genaueren Aufschluss hätte die EDX-Analyse geben können; allerdings ist dieser Film zu dünn, um mit dieser Methode analysiert werden zu können. Diese Probe bzw. der ihr entsprechende Fassadenbereich enthält im Vergleich zu anderen Abschnitten der Fassade von Schloss Schillingsfürst höhere Gehalte an allen untersuchten Anionen.

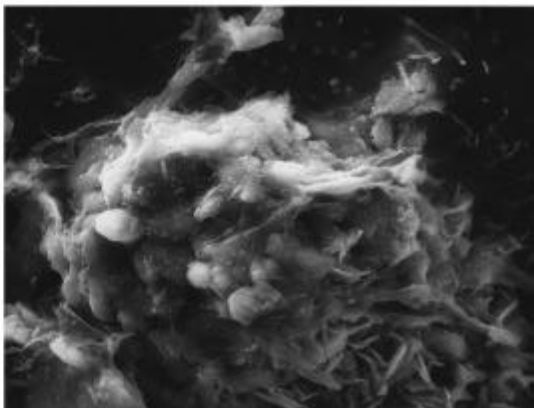
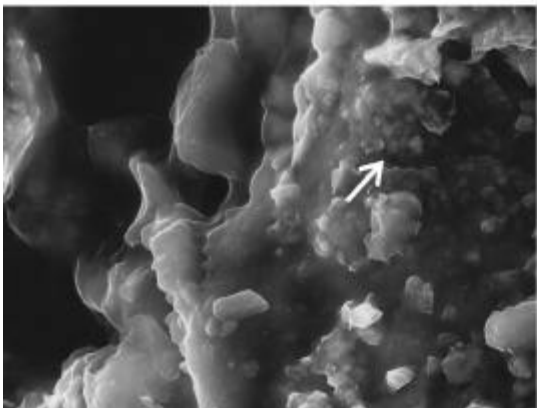
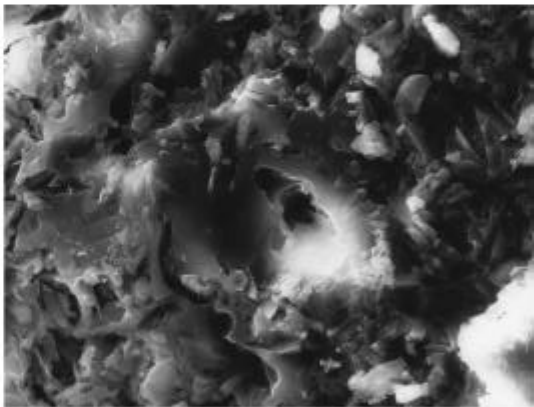
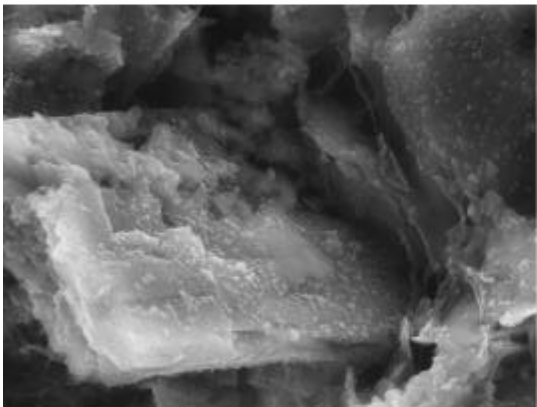
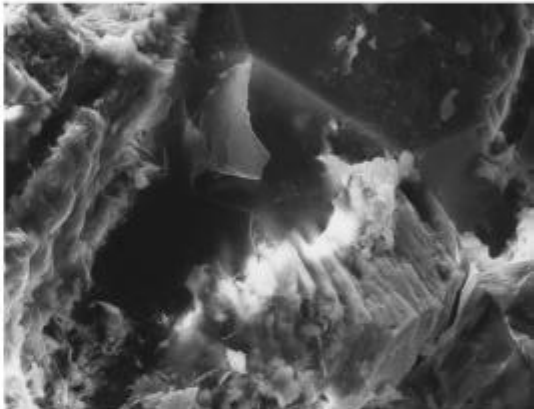
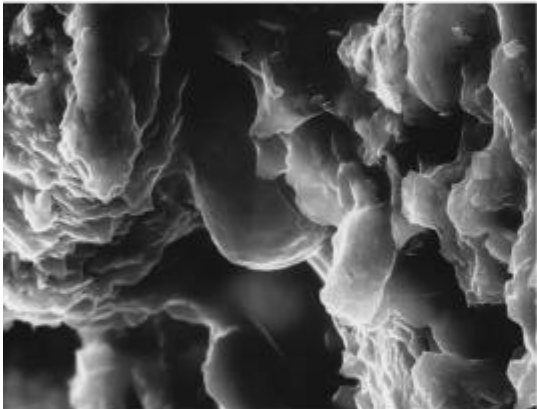
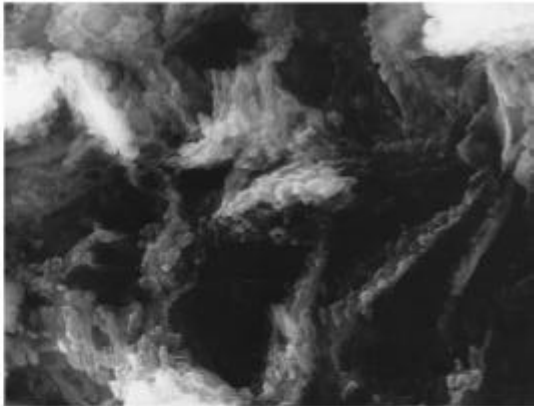
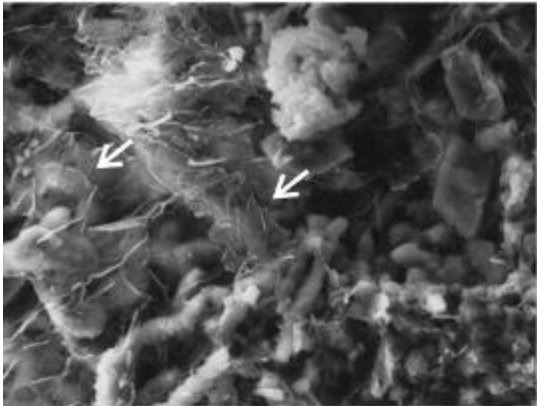
SE-Bild, 3500fache Vergrößerung.

- 12/8 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1978 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Probe wurde vor der Untersuchung für ungefähr 30 Minuten in Wasser gelagert. Zwischen den Kartenhausstrukturen spannen sich deutlich Wassersegel aus. In der rechten Bildhälfte ist eine Wasserabrissskante zu sehen. Die wasserabweisende Wirkung der ursprünglichen Konservierung scheint nicht mehr wirksam zu sein. Der entsprechende w-Wert liegt bei $6,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$.

SE-Bild, 1500fache Vergrößerung.

Farbtafel 13

1	2
3	4
5	6
7	8



Erläuterungen Tafel 13

Die erste Abbildung dieser Tafel stammt von einer Kryo-REM Untersuchung an Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial) und gibt den „Stand 2001“ wieder. Damit wird der Zustand der Konservierung, ungefähr 24 Jahre (Südfassade) und ca. 18 Jahre (Westfassade) nach der ersten Applikation repräsentieren.

- 13/1 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Die Probe wurde vor der Untersuchung eine Stunde im Wasser gelagert. Es konnte nicht einvernehmlich geklärt werden, ob die in dieser Abbildung erkennbaren filigranen Gebilde einer ungesättigten Salzlösung, also einem Wasserfilm oder eher einem Polysiloxanfilm entsprechen. Zum einen besitzen die einzelnen „Segel“ erneut eine gewebeartige Internstruktur, die bereits in anderen Tafeln (12/4, 12/7) als ungesättigte Salzlösung (Entmischungen) charakterisiert wurden. Andererseits vermitteln die schuppige Struktur und diverse Risse (siehe Pfeile) doch eher die Erscheinung eines gealterten Polysiloxanfilms. Die Schicht war leider zu dünn, um eine klärende EDX-Analyse vornehmen zu können. SE-Bild, 900fache Vergrößerung.

Alle weiteren Abbildungen dieser Tafel stammen ebenfalls von Kryo-REM Untersuchungen an Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), geben allerdings die Ergebnisse der Wiederbehandlung im Labor wieder. Wenn nicht anders vermerkt, wurden die Proben im Vorfeld der Untersuchungen 1,5 Stunden unter Wasser gelagert.

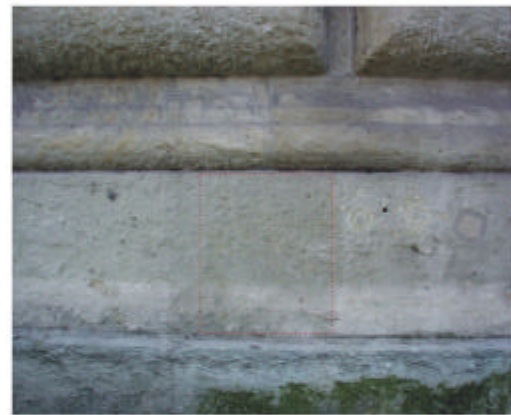
- 13/2 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Probe wurde im Labor zweimal hintereinander mit Funcosil SNL wiederbehandelt. Im Bild ist der Ausschnitt der Kartenhausstruktur eines Tonmineralrasens zu erkennen. Zwischen den einzelnen Tonmineralen waren anders als bei dem altbehandeltem Material keine aufgespannten Wasserfilme detektierbar. Allerdings zeigte das Analysebild neben einem deutlichen Al - und Si-Peak (Ton und Gel) auch einen eindeutigen Sauerstoffpeak, ein Indiz für das Vorhandensein von Wasser. Bei den perlenschnurartigen und vernetzten Strukturen auf den Tonmineraloberflächen handelt es sich um einen Polysiloxanfilm. Mit Hinblick auf den eindeutigen Sauerstoffpeak lagert auf der behandelten Tonoberfläche ein dünner Wasserfilm. Der dieser Probe entsprechende w-Wert beträgt $0,05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ und zeigt bezüglich der kapillaren Wasseraufnahme eine erfolgreiche Wiederbehandlung an. SE-Bild, 9000fache Vergrößerung.

- 13/3 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1978 behandelt mit UNIL 190 S
Das Material wurde im Labor zweimal hintereinander mit UNIL 290 wiederbehandelt. Das Photo zeigt sehr anschaulich eine homogene Schutzfilmüberkleidung des Korngefüges. Stellenweise paust sich der mineralische Untergrund sehr deutlich durch den Polysiloxanfilm hindurch. Wasser konnte bei dieser Untersuchung nicht detektiert werden. Die EDX-Analyse ergab einen dominanten Si-Peak (Gel) in diesem Bereich der Probe. SE-Bild, 1800fache Vergrößerung.

- 13/4 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1978 behandelt mit UNIL 190 S
In dieser Abbildung wird die bereits unter Tafel 13/3 näher erläuterte Probe an anderer Stelle untersucht. Im Zentrum des Bildes ist eine sich ablösende Schuppe eines Polysiloxanfilms erkennbar. Bei der nebulösen Phase unter diesem abgelösten Span handelt es sich um Wasser, das aufgrund des unzulänglichen Schutzfilms eindringen konnte. Unterhalb dieser Struktur kann ein homogener Polysiloxanfilm beobachtet werden. Am linken Bildrand ist das Korngefüge ebenso von einem Silikonharzfilm überzogen.
SE-Bild, 700fache Vergrößerung.
- 13/5 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Probe wurde im Labor zweimal hintereinander mit Funcosil SNL wiederbehandelt. Vor der Kryo-REM Untersuchung lagerte das Material über Nacht unter Wasser. Im Bild ist der Ausschnitt der Kartenhausstruktur eines Tonmineralrasens zu erkennen. Der mineralische Untergrund erscheint erneut von einem Polysiloxanfilm überzogen. Zwischen den einzelnen Mineralen haben sich stellenweise Polysiloxanbrücken ausgebildet. Das Korngefüge ist nicht vollständig von einem Schutzfilm überzogen, dennoch war der w-Wert nach dieser Wiederbehandlung von $1,7 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ auf $0,05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ reduziert.
SE-Bild, 3500fache Vergrößerung.
- 13/6 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1977 behandelt mit UNIL 190 S
Die Probe wurde 50 Stunden bei 100% r.Lf. im Exsikkator gelagert. Diese Probe wurde im Labor hintereinander zunächst mit Funcosil Antihygro und anschließend mit Funcosil SL wiederbehandelt. Die Abbildung zeigt einen Tonmineralrasen, der unzureichend von einem Polysiloxanfilm überkleidet ist.
SE-Bild, 1300fache Vergrößerung.
- 13/7 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1978 behandelt mit UNIL 190 S
Diese Probe wurde im Labor zweimal in Folge mit UNIL 290 wiederbehandelt. Vor der Untersuchung lagerte die Probe die ganze Nacht unter Wasser. Im Bild ist eine mit einem Schutzfilm überkleidete Porenwandung zu erkennen. Im rechten Bildteil fand der Polysiloxanfilm anscheinend nur unzureichend Anbindung an den mineralischen Untergrund. Aus diesem Grund konnte sich an diesen Stellen ein Wasserfilm etablieren. Die Grenze zwischen Polysiloxan und Wasserfilm ist jeweils durch die hellen, luminiszierenden Abrisskanten erkennbar.
SE-Bild, 2000fache Vergrößerung.
- 13/8 Schilfsandstein aus Schleerith (Austauschmaterial), 1983 behandelt mit UNIL 190 S
Die hier untersuchte Probe wurde im Labor zweimal in Folge mit Funcosil SNL wiederbehandelt. Vor der Untersuchung lagerte die Probe über Nacht unter Wasser. Die Abbildung zeigt ein Tonminerapaket, welches mit einem Schutzfilm überkleidet ist. Nahe der unteren Bildkante sind noch „ungeschützte“ Tonminerale erkennbar. Ringsherum ist Wasser angrenzend. Zwischen den einzelnen Komponenten der Kartenhausstruktur ist kein Wasser detektierbar gewesen. Der entsprechende, nach dieser Behandlung gemessene w-Wert beträgt $0,05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ und bestätigt eine erfolgreiche hydrophobierende Behandlung mit Funcosil SNL. SE-Bild, 1500fache Vergrößerung.

Farbtafel 14

1	2
3	4
5	6
7	8



Erläuterungen Tafel 14

Die Abbildungen dieser Tafel zeigen alle Musterflächen, die im Rahmen der Wiederbehandlungstests an der Nordfassade der Alten Pinakothek angelegt worden sind.

- 14/1 Regensburger Grünsandstein, Varietät I
Die Musterfläche wurde mit Funcosil H wiederbehandelt. Es ist im Vergleich zum vorherigen Zustand eine leichte Verdunklung eingetreten, die aber eher als Intensivierung des eigentlichen Farbtons zu charakterisieren ist. Eine Glanzentwicklung wurde nicht festgestellt.
Alte Pinakothek, Nordwestlicher Kopfbau
- 14/2 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV
Die Wiederbehandlung erfolgte mit Funcosil H. Die dadurch hervorgerufene Intensivierung des Farbtons lässt den Baustein deutlich dunkler erscheinen. Eine Glanzentwicklung wurde nicht festgestellt.
Alte Pinakothek, Nordwestlicher Kopfbau
- 14/3 Regensburger Grünsandstein, Varietät II
Auf diesem Quader wurden zwei Musterflächen angelegt, die in sich noch ein weiteres Mal unterteilt sind. Links wurde verdünntes Remmers 300E appliziert, wobei die untere Hälfte der Musterfläche zusätzlich mit Funcosil H hydrophobiert (mit Restfestigung) wurde. Auf der rechten Seite wurde unverdünntes Remmers 300E angewendet und im unteren Teil ebenfalls nachträglich mit Funcosil H hydrophobiert. Beide Musterflächen zeigen im Vergleich zum umgebenden Gestein eine deutliche Farbintensivierung, wobei die nachträgliche Applikation von Funcosil H die unteren Bereiche sehr stark nachdunkelt.
Alte Pinakothek, Nordwestlicher Kopfbau
- 14/4 Regensburger Grünsandstein, Varietät III
In diesem Falle wurde verdünntes Funcosil OH (MEK, 1:2) verwendet. Die Nachdunklung des Materials ist nur minimal. Das Ergebnis ist als sehr zufrieden stellend zu bewerten.
Alte Pinakothek, Nordwestlicher Kopfbau
- 14/5 Regensburger Grünsandstein, Varietät II
Dieser Quader befindet sich auf der Musterfläche, die im Jahr 1978 von der Firma Bayplan angelegt worden ist. Im Rahmen der ersten Konservierungsmaßnahmen in den 1980er Jahren ist dieser Quader nicht noch einmal behandelt worden. Bereits vor der Wiederbehandlung mit Funcosil H konnte auf der Oberfläche eine glänzende, wächserne Abscheidung beobachtet werden. Die erneute Behandlung des Quaders führte zu einer akzeptablen Intensivierung der ursprünglichen Gesteinsfarbe.
Alte Pinakothek, Musterfläche 0 (siehe Abbildung 7.3 im Text)

- 14/6 Regensburger Grünsandstein, Varietät I
Ebenso wie der Quader in Tafel 14/5 befindet sich dieser Baustein auf der ehemaligen Musterfläche der Firma Bayplan (1978), allerdings wurde er auch im Rahmen der Konservierungsmaßnahmen 1988/89 behandelt und repräsentiert somit bereits den Status eines wiederbehandelten Gesteins. Die Wiederbehandlung (2002) erfolgte mittels Funcosil H. Die dicht relativ helle Oberfläche erfuhr dadurch ebenfalls nur eine zu vertretende Farbtintensivierung.
Alte Pinakothek, Musterfläche 0 (siehe Abbildung 7.3 im Text)
- 14/7 Regensburger Grünsandstein, Varietät III
Auf dieser Musterfläche wurde Funcosil H appliziert. Die Farbänderung ist minimal.
Alte Pinakothek, Nordöstlicher Kopfbau
- 14/8 Regensburger Grünsandstein, Varietät IV
Die auf diesem Quader angelegte Musterfläche ist zweigeteilt. Auf dem gesamten Bereich wurde der verdünnte Festiger Funcosil OH (Ethanol 1:2) appliziert und im unteren Teil der wiederbehandelten Fläche wurde im Nachhinein mit Funcosil SNL hydrophobiert. Die Farbänderung der Zone, die ausschließlich gefestigt wurde, ist als geringfügig einzustufen. Die nachträgliche Hydrophobierung hat jedoch zu einem deutlichen Nachdunkeln der eigentlichen Gesteinsfarbe geführt.
Alte Pinakothek, Nordöstlicher Kopfbau

Farbtafel 15

1	2	3
4	5	
6	7	



Erläuterungen Tafel 15

Die Abbildung dieser Tafel zeigen exemplarisch die Auswirkungen der Wiederbehandlung an Quadern der Südfassade von Schloss Schillingsfürst

- 15/1-15/3 Diese Abbildung zeigt die frisch angelegte Musterfläche, die mit verdünntem Funcosil SNL (Ethanol 1:1) behandelt wurde. In 15/2 liegt der günstige Fall vor, dass die Eindringtiefe der Substanz seitlich mit verfolgt werden kann. Die erreichte Tiefe beträgt einen Zentimeter. Das nebenstehende Bild zeigt die Erscheinung der Musterfläche, ungefähr drei Monate nach Applikation. Der Übergang zum umgebenden Material ist zwar erkennbar, die Nachdunklung des Gesteins ist allerdings als durchaus akzeptabel einzuordnen.
- 15/4-15/5 Anders als der in Tafel 15/1-15/3 beschriebene Quader, der eine sehr homogene und intakte Oberfläche besitzt, zeigt dieser Baustein die bereits in Tafel 6 beschriebenen tapetenartigen Ablösungen. Tafel 15/4 zeigt die frisch angelegte Musterfläche (Funcosil SL). Bei der Entnahme der Bohrkern, ca. 3 Monate nach Anlage der Musterfläche, konnte keine optische Veränderung der Gesteinsoberfläche mehr festgestellt werden.
- 15/6-15/7 Der in diesen beiden Abbildungen dargestellte Quader erweitert das Spektrum der vorgestellten Gesteinsoberflächen. In diesem Fall ist eine rückgewitterte, leicht absandende Fläche gewählt worden. Die Applikation der Mikroemulsion Funcosil WS rief keine wesentlichen optischen Veränderungen der Gesteinsoberflächen hervor (3 Monate später). Eventuell ist stellenweise eine leichte Farbintensivierung erkennbar, aber keinesfalls kam es zu einer Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes.

Tab. 1: Zum Zweck der Wiederbehandlungstest im Labor und an der Fassade applizierte Schutzmittel (APM)

Varietät	ursprüngliche Behandlung	Wiederbehandlung Labor	Wiederbehandlung Fassade
I	1978: Wacker OH + Wacker H 1984: Wacker OH + Wacker H	2x Funcosil OH + Funcosil H	Funcosil H
I	1987: Wacker OH + Wacker H	2x Funcosil OH + Funcosil H	Funcosil H
II	1978: Wacker OH + Wacker H		Funcosil H
II	1987: Wacker OH + Wacker H	2x Remmers 300E + Funcosil H	a) Remmers 300E/Ethanol 1:2 b) Remmers 300E/Ethanol 1:2 + Funcosil H c) Remmers 300E d) Remmers 300E + Funcosil H
III	1984: Wacker OH + Wacker H	2x Funcosil OH + Funcosil H	Funcosil H
III	1987: Wacker OH + Wacker H	2x Funcosil OH/MEK 1:2 + Funcosil SNL	Funcosil OH/MEK 1:2
IV	1987: Wacker OH + Wacker H	2x Funcosil OH + Funcosil H	Funcosil H
IV	1984: Wacker OH + Wacker H	2x Funcosil OH/MEK 1:2 + Funcosil SNL	a) Funcosil OH/Ethanol 1:2 b) Funcosil OH/Ethanol 1:2 + Funcosil SNL

Tab. 2: Zum Zweck der Wiederbehandlungstest im Labor und an der Fassade applizierte Schutzmittel (OM-Originalmaterial aus Diebach/Gailnau, AM-Austauschmaterial aus Schleerith) (SSF)

Varietät	ursprünglich Behandlung	Wiederbehandlung Labor	Wiederbehandlung Fassade
OM	UNIL 190S	Funcosil Antihygro	
OM	UNIL 190S	Funcosil SL	Funcosil SL
OM	BDAC 0.2 m		Funcosil SNL
OM	VP1311/H ₂ O 1:9	Funcosil SL	Funcosil SL
OM	unbehandelt	Funcosil Antihygro	Funcosil Antihygro
OM	PTE _x S 66A + GF 91		Funcosil Antihygro
OM	PTE _x S 25A + GF91	2x Funcosil Antihygro	Funcosil Antihygro
OM	unbehandelt		Funcosil SNL
OM	UNIL 190S		Silex OH/Ethanol 1:2
AM	UNIL 190S		Funcosil SNL/Ethanol 1:1
AM	UNIL 190S	Funcosil Antihygro + Funcosil SL	Funcosil SL
AM	UNIL 190S		Funcosil WS
AM	UNIL 190S	Funcosil SNL	Funcosil SNL
AM	UNIL 190S	2x UNIL 290	Funcosil SNL
AM	UNIL 190S	2x Funcosil SNL	Funcosil SNL/Ethanol 1:1
AM	UNIL 190S	Funcosil Antihygro	
AM	UNIL 190S	Funcosil SL	Funcosil SL
AM	UNIL 190S	2x Funcosil SNL	Funcosil SNL
AM	UNIL 190S	2x Funcosil SNL	Funcosil SNL
AM	UNIL 190S	2x Funcosil SL	Funcosil SL

Zusammenfassende Darstellung der Effektivität der verschiedenen applizierten Schutzmittel bezüglich der Resultate in den unterschiedlichen Untersuchungen

Legende x effektiv / empfehlenswert o Überschreiten der Richtlinie / nicht empfehlenswert x/o Grenzwert bzw. wirkungslos cm Eindringtiefe

Methode zur Prüfung der feuchtigkeitsrelevanten Parameter
Kapillare Wasseraufnahme

	Varietät I		Varietät II		Varietät III		Varietät IV		Diebach/Gallnau		Schleerth	
	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade
OH_H	x		x		x		x					
Ohverd		x		x		x		x				
OHverd_Hydro	x		x		x		x					
300E		x		x		x		x				
300E_H	x		x		x		x					
300Everd		x		x		x		x				
300Everd_H		x		x		x		x				
H		x		x		x		x				
SL									x	x	x	x
SNL										x	x	o
SNLverd												x
UNIL 290											x	
Anthygro									o	o	o	
Anthygro_SL											x	
WS												
Silex OH										o		

	Varietät I		Varietät II		Varietät III		Varietät IV		OM		AM	
	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade
OH_H	o (1 cm)	o		o (1 cm)	o	o	o (1 cm)	o				
Ohverd												
OHverd_Hydro					o (1 cm)	x/o (1 cm)	o (1 cm)	x (1 cm)				
300E				o								
300E_H			o	o								
300Everd				o								
300Everd_H				o								
H												
SL									x (1-1,5 cm)	x (1-1,5 cm)	1-1,5 cm o	1-1,5 cm x
SNL									x (1-1,5 cm)			x/o (1 cm)
SNLverd												x (1 cm)
UNIL 290											x (1 cm)	
Anthygro									x (1 cm)	x (1-1,5 cm)		
Anthygro_SL											o (1 cm)	
WS												o (1 cm)
Silex OH												

	Varietät I		Varietät II		Varietät III		Varietät IV		OM		AM	
	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade
OH_H	x		x		x		x					
Ohverd						x		x				
OHverd_Hydro												
300E				x								
300E_H			x	x								
300Everd				x								
300Everd_H				x								
H		x		x								
SL									x	x	x	x
SNL										x	x	o
SNLverd												x/o
UNIL 290											x	
Anthygro									o	o	o	
Anthygro_SL											x	
WS												
Silex OH												

	Varietät I		Varietät II		Varietät III		Varietät IV		OM		AM	
	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade
OH_H	x/o (1 cm)				x/o (1,5-2cm)		x (1 cm)					
Ohverd					m/w/o	o (1-1,5cm)		x (1 cm)				
OHverd_Hydro					x/o (1-1,5cm)		x (1-1,5cm)	o (1 cm)				
300E				x/o								
300E_H			x/o	o								
300Everd				o								
300Everd_H				x/o								
H		o (1 cm)					x/o (1,5-2cm)	x (1,5 cm)				
SL							m/w/o				x (1-2 cm)	x (1-2cm)
SNL										x/o	o (1-2 cm)	o (1-2cm)
SNLverd												x/o (2 cm)
UNIL 290											x/o	
Anthygro									x (1-1,5cm)	x (1-1,5cm)		
Anthygro_SL											x	
WS												
Silex OH												

Für die Fassadenapplikation von Remmers 300E, verdünnt und unverdünnt wurde ein Grenzwert eingezeichnet, obwohl die Daten nicht mehr den empfohlenen Richtlinien entsprechen. Obgleich es nicht durchgängig zu großen Steigerungen der Quellneigung in Folge der Wiederbehandlung mit verschiedenen 300E-Kombinationen kam, kann mit Hinblick auf mögliche Schwankungen eine Wiederbehandlung des Regensburger Grünsandsteins mittels Remmers 300E bzw. des verdünnten Schutzmittels nicht empfohlen werden. Da sich dieser elastifizierte Kieselsäureester sehr günstig auf die Festigkeitsparameter dieses Materials auswirkt, könnte in Anbetracht der dennoch vergleichsweise zumeist eher geringen Dehnungsbeträge in diesem Fall ein Kompromiss eingegangen werden.

Methode zur Überprüfung der Festigkeitsparameter
 Biaxiale Biegezugfestigkeit

	Varietät I		Varietät II		Varietät III		Varietät IV		OM		AM	
	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade
OH_H	x/o (1-1,5cm)				x/o (1,5 cm)		o (1-1,5cm)					
Ohverd							x (2 cm)		x (1,5-2cm)			
OHverd_Hydro					x (2 cm)		x (1,5-2cm)					
300E				x (2 cm)								
300E_H			x/o									
300Everd				± 0 (2 cm)								
300Everd_H												
H		x (1-1,5cm)					±, w-Wert ↓		x (1,5-2cm)			
SL									x (1,5 cm)	x		x (1 cm)
SNL									x (1,5 cm)	x	x (1 cm)	x (1 cm)
SNLverd												x (1 cm)
UNIL 290											x (1 cm)	
Anthygro									x (1,5 cm)	x		
Anthygro_SL											x (1 cm)	
WS												
Silex OH											x/o (1,5 cm)	

Longitudinalwellengeschwindigkeit

	Varietät I		Varietät II		Varietät III		Varietät IV		OM		AM	
	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade
OH_H	x (2 cm)		x (2 cm)		x (2 cm)		x (2 cm)					
Ohverd							x (2 cm)		x (1,5 cm)			
OHverd_Hydro					x (2 cm)		x (1,5 cm)		o (1,5 cm)			
300E				o								
300E_H			x (1,75 cm)	o								
300Everd				o								
300Everd_H				o								
H		o (2 cm)		x (2 cm)			x (2 cm)		x (2 cm)			
SL												
SNL												
SNLverd												
UNIL 290												
Anthygro												
Anthygro_SL												
WS												
Silex OH												

Aus dem Schwankungsbereich des unbehandelten Materials heraus gab es keine signifikanten Steigerungen durch die Wiederbehandlungen (außer SNL).

Bohrwiderstandsmessungen

	Varietät I		Varietät II		Varietät III		Varietät IV		OM		AM	
	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade	Labor	Fassade
OH_H												
Ohverd							o		x			
OHverd_Hydro												
300E				x								
300E_H												
300Everd				o								
300Everd_H												
H		x										
SL												x
SNL											x	
SNLverd												
UNIL 290												
Anthygro												
Anthygro_SL												
WS												
Silex OH												

Curriculum Vitae

Jeannine Meinhardt-Degen
Blumenstraße 13
06108 Halle/Saale

Persönliche Daten

Geburtsdatum: 12.08.1973
Geburtsort: Halle/Saale
Familienstand: verheiratet

Schulbildung

09/1990 - 06/1992 Thomas Müntzer Gymnasium in Halle/Saale
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife
09/1980 - 07/1990 Polytechnische Oberschule in Halle/Saale

Studium

09/1995 - 12/2000 Studium der Geologie/Paläontologie an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
12/2000 Diplom der Geologie/Paläontologie
Thema der Diplomarbeit: Schadenskartierung und Untersuchung von Umwelteinflüssen auf Ziegelbauwerke am Beispiel des Glockenturms der Basilika St. Jakob in Straubing/Niederbayer
Thema der Diplomkartierung: Kartierung des metasedimentären und metamagmatischen Einheiten im Gebiet Evasputs, Farm Nauzerus West 229, Windhoek District, Namibia.
09/1992 – 08/1995 Studium der Medizin an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Berufstätigkeit

05/2001 - 07/2003 Wissenschaftliche Mitarbeiterin im Zentrallabor des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege
Projekt: Die Wiederbehandlung von Denkmälern aus Naturstein am Beispiel von Alter Pinakothek in München und Schloss Schillingsfürst in Franken
Projektleiter: Prof. Dr. Rolf Snethlage
08/2003 - 07/2004 Mitarbeit im Retreatability Project, Getty Conservation Institute, Los Angeles
03/2004 - 04/2004 Forschungsaufenthalt am Getty Conservation Institute, LA
seit 1.05.2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt