

Jochen Lepper
Hans-Hermann Neumann
Erwin Stadlbauer
Jutta Weber

**Methodenentwicklung zur Ressourcenschonung
und zum Bautenschutz an den historischen
Dacheindeckungen mit Solling-Sandsteinplatten
des Jagdschlusses Clemenswerth
bei Sögel im Emsland, Niedersachsen**



**Abschlussbericht zu den maßnahmenorientierten Untersuchungen im Rahmen des
DBU-Forschungsprojektes**

Aktenzeichen der Deutschen Bundesstiftung Umwelt: 24278

Projektbeginn: 10.10.2006, Laufzeit: 24 Monate



Impressum:

Landkreis Emsland
Ordeniederung 1
D-49716 Meppen
Tel.: 05931/44-0
Fax : 05931/44-3621
Meppen, 2010

Inhaltsverzeichnis

I.	Geowissenschaftliche Untersuchungen an Sandstein-Dachplatten von Schloss Clemenswerth in Sögel von Hans-Hermann Neumann.....	5
1	Einleitung und Zielsetzung	5
2	Typische Verwitterungsformen an den Dächern	6
3	Untersuchungskonzept	9
3.1	Maßnahmenorientierte Untersuchungen	11
3.1.1	Untersuchungsmethoden	11
3.1.2	Proben	13
3.2	Einpassung geeigneter Konservierungsmaßnahmen in den Bauablauf	19
4	Untersuchungsergebnisse	21
4.1	Untersuchungen an Proben aus dem Vorratskeller	21
4.1.1	Mineralogie und Gefüge	21
4.1.2	Porositätskenndaten.....	24
4.1.3	Verwitterungsprofile (dyn. E-Modul)	25
4.1.4	Hygrische Quellung vor und nach Behandlung	27
4.1.5	Hydrophobierende Imprägnierung	29
4.2	Untersuchungen an Proben des Pavillons Münster	29
4.2.1	Mineralogie und Gefüge	30
4.2.2	Porositätskenndaten.....	38
4.2.3	Festigkeitsprofile	42
4.2.4	Hygrische Quellung vor und nach Behandlung	44
4.2.5	Testbeschichtung/imprägnierende Hydrophobierung.....	49
4.2.6	Entfernung von Teer.....	50
4.3	Bauwerksfremdes Austauschmaterial	51
4.3.1	Mineralogie und Gefüge	52
4.3.2	Porositätskenndaten.....	59
4.3.3	Festigkeitsprofile	61
4.3.4	Hygrische Quellung parallel und senkrecht zur Schichtung	63
4.3.5	Wasseraufnahmekoeffizient vor und nach Beschichtung.....	67
5	Interpretation der Ergebnisse	70
5.1	Bewertung der ermittelten Kennwerte im Hinblick auf die unterschiedenen Makrotypen	70
5.2	Art und Ursache der Schäden an den Dachplatten.....	71
5.3	Konsequenzen für die Konservierung.....	71
5.4	Modellcharakter der Untersuchungen.....	73
6	Ausblick	74

II.	Kathodolumineszenz-Untersuchungen ausgewählter Solling-Sandsteinplatten am Jagdschloss Clemenswerth von Jutta Weber	75
1	Einführung	75
2	Fragestellung	75
3	Probenauswahl	76
4	Kathodolumineszenz-Mikroskopie	76
4.1	Grundlagen	76
4.2	Anwendungsbereiche und KL-Eigenschaften	76
4.3	Untersuchungsverlauf	78
5	Ergebnisse	79
5.1	Sedimentpetrographische Charakterisierung.....	79
5.2	KL-Charakteristika der makroskopisch klassifizierten Plattentypen	80
5.3	KL-Charakteristika überdeckter und frei bewitterter Plattenbereiche	84
5.4	Korrelation der KL-Charakteristika mit Gefüge und Ablagerungsmilieu	86
5.5	Korrelation der KL-Chakteristika mit den geochemischen Befunden	87
6	Diageneseparameter im Vergleich zum Roten Wesersandstein	88
7	Prognosen zum Verwitterungsverhalten von Solling-Sandsteinplatten	90
8	Abschließende Bewertung und Ausblick	92
III.	Geowissenschaftliche und denkmalpflegerische Untersuchungen - Materialeigenschaften, Verwitterungsresistenz, Verfügbarkeit und Ressourcenschonung von Erwin Stadlbauer und Jochen Lepper.....	93
1	Einleitung	93
2	Geologie und bautechnische Eigenschaften d. Buntsandstein-Dachplatten ...	94
3	Das Jagdschloss Clemenswerth als Untersuchungsobjekt	95
4	Zustand der Dachplatten, Materialgruppen, Probenauswahl und Untersuchungsmethoden	96
5	Untersuchungsergebnisse	99
5.1	Mineralogie und Petrografie	99
5.2	Geochemische Analysen.....	101
5.3	Physikalisch-mechanische Kennwerte (Neumann 2010)	104
5.4	Ursachen der Steinschäden (Neumann 2010).....	105
5.5	Notwendigkeit, Möglichkeit und Risiko der Konservierung.....	105
6	Geologische Verfügbarkeit und Vorräte	106
7	Verantwortungsvoller Umgang mit den Ressourcen u. Schlussfolgerungen	107
IV.	Literaturverzeichnis	109

I. Geowissenschaftliche Untersuchungen an Sandstein-Dachplatten von Schloss Clemenswerth in Sögel

von Hans-Hermann Neumann

1 Einleitung und Zielsetzung

Die sichtbaren Schäden an den Dacheindeckungen der sieben Pavillons und der Gloriette des in den Jahren 1737 bis 1747 erbauten Jagdschlusses Clemenswerth bei Sögel im Emsland machen eine Instandsetzung dringend erforderlich, um eine nachhaltige Schädigung auch anderer Bauwerksteile durch defekte Dächer zu verhindern. Die Dacheindeckung besteht aus Solling-Sandstein, für den es heute keinen in Betrieb befindlichen Steinbruch mehr gibt. Aus der Zeit von 1803 - 1969, als sich das Schloss in Arenbergischem Besitz befand, sind drei Neueindeckungen bekannt. Erhaltungsmaßnahmen stellen auch Abdichtungen auf der Rückseite der Dachsteinplatten mit Teer dar, die bei Neueindeckungen z.T. auf die Außenseite gelangten.

Durch begleitende maßnahmenorientierte Untersuchungen sollte geklärt werden, ob und welche Konservierungen generell zu einer Verlängerung der Standzeit führen und ob auch Restaurierungsmöglichkeiten geschädigter Platten zwecks Wiederverwendung bestehen. Die durchgeführten Untersuchungen sollen Modellcharakter haben, um für andere Denkmäler oder historische Bauwerke mit Buntsandsteinplatten, die als Dachsteine eingesetzt wurden, nutzbar zu sein, zumal bisher keine wissenschaftlich abgesicherten, aber auch praxistauglichen Instandsetzungskonzepte existieren.

Die Dachsteinplatten sind überlappend verbaut, so dass 2/3 der Platte durch die darauffolgende Reihe überdeckt und damit nicht der freien Bewitterung ausgesetzt sind. Diese Art der Verlegung schützt den hölzernen Dachstuhl durch drei übereinander lagernde Platten. Im oberen Bereich weisen die Dachsteinplatten ein Loch auf, durch das sie ein Nagel auf den Holzlatten des Dachstuhls fixiert. Die Vermörtelung sorgt für eine zusätzliche Befestigung und für die weitgehende Winddichtigkeit.

Charakteristische Schäden sind das Aufplatzen der Dachsteinplatten entlang von oberflächenparallelen Schichtflächen sowie Schalenbildungen und -ablösungen an der frei bewitterten Oberfläche.

Für die Instandsetzung musste zunächst auf die ungeschädigten abgebauten Dachsteinplatten zurückgegriffen werden. Da diese aber nicht ausreichten, erfolgte eine Ergänzung mit Dachsteinplatten in Zweitverwendung, d.h. diese stammten von anderen Gebäuden, waren visuell intakt und konnten wieder eingesetzt werden.

2 Typische Verwitterungsformen an den Dächern

Am Beispiel des Pavillons Hildesheim sollen die wesentlichen Schäden beschrieben werden. Abb. 1 gibt einen Überblick über die Eingangsseite des Pavillons.



Abb. 1: Pavillon Hildesheim. Dachfläche über dem Eingangsbereich

Charakteristische Schäden bilden starke Abschalungen parallel zur Schichtung, die bereits im linken Bereich des Daches deutlich sichtbar sind, wie der Abb. 2a zu entnehmen ist. Die Schalendicke beträgt ca. 2 bis 5 mm, im Mittel etwa 3 mm. Im unteren Bereich handelt es sich um eine Mehrfachschale, die letztlich den gesamten Plattenquerschnitt umfasst, größtenteils bereits abgefallen ist und damit einen Einblick in den Untergrund, d.h. auf die Platte darunter, zulässt. Den Verbund erzeugt eine Vermörtelung. In Abb. 2b ist die Mehrfachschalenbildung anhand eines weiteren Beispiels dieses Pavillons dargestellt. Der linke Bildbereich dokumentiert zwei Einzelschalen. Viele Platten zeigen aber auch nur den oberflächlichen Verlust sehr dünner Schalen, wie Abb. 2c exemplarisch darstellt. Hier handelt es sich nur noch um den Rest einer großflächigen Schale. Große Teile fehlen bereits.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Abb. 2: Charakteristische Verwitterungsformen der Dachsteinplatten.

- a+b: Einfach- und Mehrfachschaalenbildung parallel zur Schichtung;
- c: dünne Schale;
- d: Rissbildung an der Vorderkante (siehe Pfeil);
- e: Moos-, Algen-, Flechten- und Schimmelpilzbewuchs (Schwärzepilze)
- f: Besonders starker Bewuchs findet sich zwischen den vertikalen Plattenkanten

Des Weiteren ist auch ein vom unteren Rand ausgehendes Aufplatzen der Platten parallel zur Schichtung zu beobachten. Die untere Vorderkante und die seitlichen Bruchkanten sind am stärksten gefährdet, da hier ablaufendes Regenwasser aufgrund der starken Anisotropie der Platten im Hinblick auf die Schichtung und damit auch die Wasseraufnahme in sehr viel größerem Umfang eindringen kann als über die Oberfläche. Abb. 2d gibt das Schadensbild exemplarisch wieder. Solche Schäden waren nur nach dem Anstellen einer Leiter, d.h. bei geringem Betrachtungsabstand sichtbar. Damit war das tatsächliche Schadensausmaß deutlich größer als das von unten sichtbare.

Zudem zeigten die Dachplatten einen starken Bewuchs durch Algen, schwarze Schimmelpilze, Moos und Flechten (Abb. 2e). Besonders starker Bewuchs und Umlagerungen von in Trockenperioden abgestorbenem und zerfallenem Bewuchs finden sich zwischen den vertikalen Stoßkanten (stellen Vertiefungen dar). Hier erfolgt die Trocknung aufgrund des Bewuchses langsamer (Abb. 2f). Zusätzlich zu der Schwärzung aus dem Bewuchs kommen noch Teeranteile von ursprünglich auf der Rückseite beschichteten Plattenteilen hinzu.

Die geringste Oberflächenveränderung weisen die nahezu vertikal eingebauten Platten in Höhe der Erkeroberkante auf. Zudem liegt hier z.T. ein geringfügiger Dachvorsprung vor. Selbst bei geringen Abweichungen aus der Senkrechten ist bereits ein Bewuchs feststellbar.

Hinsichtlich der Himmelsrichtung der Dachflächen sind graduelle Unterschiede im Verwitterungsbild erkennbar, die aber aufgrund ihrer Komplexität und der sternförmigen und damit nicht gleichorientierten Ausrichtung der Pavillons nicht exakt zu erfassen sind.

3 Untersuchungskonzept

Zunächst erfolgte eine erste Inaugenscheinnahme der Schäden sowie eine Entnahme einzelner kleiner Proben aus dem Dachbereich und von zwei Dachplatten aus einem Vorratskeller, die für kleinere Instandsetzungen zur Verfügung stehen, um die wesentlichen makroskopischen Unterschiede zu erfassen und darauf aufbauend die weitere Vorgehensweise zu bestimmen.

Anhand der Sichtung der unverbauten Platten ließen sich zwei Arten von Dachplatten unterscheiden:

- ein plattiger Typ und
- ein massiver Typ.

Ob weitere Typen vorhanden sind, wurde anhand eines Dachsteinplattenkontingents von dem Pavillon Münster untersucht. Die Differenzierung orientierte sich an der Vorgehensweise der die Instandsetzung durchführenden Dachdeckerfirma. Im Hinblick auf mögliche Konservierungsmaßnahmen sind aus anwendungspraktischer Sicht entweder sämtliche Dachplatten oder lediglich die weniger beständigen zu behandeln. Letzteres setzt einfache, vor Ort anwendbare makroskopische Unterscheidungskriterien voraus.

Deshalb soll kurz die Vorgehensweise für die Neueindeckung unter Verwendung vorhandenen Materials einschließlich der Auswahlkriterien beschrieben werden. Für die Inaugenscheinnahme im Rahmen des gemeinsam anberaumten Ortstermins wurden sämtliche Dachsteine der NW-/SW- und SE-Seite des Walms in drei Drahtkörbe gelagert. Zunächst erfolgte eine Differenzierung in Platten, die wieder eingesetzt und in Platten, die nicht wieder verwendet werden können. Entscheidendes Kriterium bildet dafür die Aufspaltung parallel zur Oberfläche.

Wenn Risse am Rand sichtbar waren und bereits ein Aufspalten stattfand oder wenn nach Abschlagen der losen Teile keine ausreichende Plattenstärke mehr vorlag, wurde von einer erneuten Verwendung abgesehen. Platten, deren Ränder nachgearbeitet werden mussten, durften eine Mindestgröße nicht unterschreiten.

Nach Vermischung dieser Dachplatten mit Ergänzungsmaterial von anderen Objekten erfolgte ein Einbau, wobei keine Rücksicht auf die ursprüngliche Position im Dach genommen wurde, zumal darüber auch keine Dokumentation vorlag und dies anscheinend auch bei den früheren Neueindeckungen so erfolgte.

Eine Reinigung, die zur Entfernung von Moos und sonstigen Algen-/Pilzbewuchs dient, fand nicht statt. Auch die bei einigen Platten sichtbaren Teerbeschichtungen wurden nicht entfernt. Teer befand sich in der Regel auf der Rückseite und den bewitterten Seitenflächen, einschließlich der Unterkante. Allerdings wurden einseitig mit Teer behandelte Platten so eingebaut, dass die Teerschicht nicht wieder im Außenbereich als Sichtfläche auftritt.

Um einen Eindruck von der Größe des jeweiligen wieder verwendbaren Anteils zu erhalten, wurden die beiden Plattenkategorien (wieder verwendbar/ nicht wieder verwendbar) der Walmflächen gezählt und in Tab. 1 zusammengestellt.

Tab. 1: Wieder verwendbare und nicht wieder verwendbare Dachplatten

Walmseite	Wieder verwendbar	nicht wieder verwendbar	Wieder verwendbar	nicht wieder verwendbar
	[Anzahl]	[Anzahl]	[%]	[%]
NW-Seite	24	31	44	56
SW-Seite	20	32	38	62
SE-Seite	17	20	46	54

Bei den aussortierten Platten handelte es sich stets um Dachplatten, die ein stark ausgeprägtes Lagengefüge mit guter Spaltbarkeit aufwiesen. Dieses resultiert zumeist aus Muskovit- oder Tonmineralanreicherungen auf den Schichtflächen. Unter den wieder verwendbaren Platten treten sowohl massiv als auch plattig erscheinende Dachplatten auf.

Nach der ersten Sortierung auf Basis einer Sichtprüfung erfolgte eine weitere Überprüfung der wieder verwendbaren Dachplatten anhand einer Percussionsprüfung, d.h. mittels vorsichtigen Abklopfens mit einem Dachdeckerhammer konnte eine weitere Differenzierung nach dem erzeugten Klang vorgenommen werden. Kombiniert wurde diese als üblich zu bezeichnende Methode mit einer weiteren Sichtprüfung. Auf dieser Grundlage ließen sich vier Typen unterscheiden:

- Typ 1: plattiger Sandstein, der bei Anschlagen mit einem Hammer einen „vibriierenden“ Klang aufweist. Anscheinend liegen bereits interne Störungen des Gesteinsgefüges entlang der Schichtflächen (Spaltflächen) vor, die aber am Rand noch nicht sichtbar sind. Diese Steine fallen in der Regel noch aus der Kategorie der wieder verwendbaren Dachsteine heraus.
- Typ 2: plattiger Dachstein mit „dumpfem“ Klang. Häufig ist eine ausgeprägte Plattigkeit feststellbar.
- Typ 3: Dachsteine mit „festerem“ Klang. Die Spaltbarkeit, d.h. die Plattigkeit ist weniger stark ausgeprägt als bei Typ 2.
- Typ 4: massiver Typ mit charakteristischer „hellerer“ Klangfarbe. Keine oder nur geringfügige Spaltbarkeit.

Ergänzungsplatten, die bereits an anderen Objekten eingesetzt waren, hatten sich demgemäß bereits als verwitterungsresistent erwiesen. Dementsprechend handelt es sich nach visueller Beschreibung fast ausschließlich um massive Platten, die keine oder nur eine geringe Spaltbarkeit in der Plattenebene aufweisen. Die farbliche Bänderung an den Bruchkanten weist aber ebenfalls auf eine Schichtung hin. Ein Einordnungsversuch, d.h. Typisierung mittels Percussionsprüfung, wurde nicht vorgenommen.

Die beschriebene Vorgehensweise führt im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit der Maßnahme zu einer deutlichen Steigerung, auch wenn dies nicht zeitlich messbar sein wird, da nicht genau bekannt ist, zu welchen Zeitpunkten die früheren Neueindeckungen stattfanden. Insgesamt handelt es sich um eine „positiv“- Auswahl. Allerdings müssen im Mittel mehr als 50 % der ursprünglichen Dachsteine ersetzt werden. Möglicherweise ist die Austauschrate an anderen Pavillons bzw. anders orientierten Flächen etwas geringer. Für die vorangegangenen Neueindeckungen bedeutete dies vermutlich eine noch höhere Austauschrate, da noch

frisches Material aus den Steinbrüchen in seiner gesamten Variationsbreite zur Verfügung stand und der positive Auswahleffekt wahrscheinlich geringer war.

3.1 Maßnahmenorientierte Untersuchungen

Obige Vorgehensweise legt die Richtung der durchzuführenden Untersuchungen fest. Aufgrund der sichtbaren Schäden ist es nicht praktikabel, ausgesondertes Material zu restaurieren, da durch ein Verkleben von Spaltflächen oder Rissen nie die Dauerhaftigkeit des wieder verwendeten Materials erreicht werden würde. Die Verklebung könnte nur mit kunstharzgebundenen Stoffen durchgeführt werden, durch die wiederum neue Trenn- oder Grenzflächen erzeugt werden würden, die die technischen Eigenschaften der Platten merklich beeinflussen.

Dementsprechend erfolgte die Untersuchung ausschließlich an den wieder verwendbaren Platten, sei es

- Material aus dem Keller des Pavillons Hildesheim,
- nach Prüfung wieder verwendetes Ausbaumaterial oder
- Objektfremdes Ergänzungsmaterial.

Material aus dem Keller des Pavillons Hildesheim (Proben mit der Ziffer 1) wurde letztlich nicht eingebaut.

Die ausgewählten Untersuchungsmethoden sind maßnahmenorientiert. Darunter sind Methoden zu verstehen, die notwendig sind, um entscheiden zu können, ob und welche Maßnahmen aus dem Spektrum zur Verfügung stehender Instandsetzungsverfahren sinnvoll sind. Basierend auf die Erstaugenscheinnahme lässt sich bereits eine Eingrenzung durchführen.

Zudem mussten die ausgewählten Untersuchungsmethoden zur Klärung der Schäden und der Ermittlung spezifischer Kenndaten dienen. Außerdem sollte überprüft werden, ob sich die makroskopische Differenzierung auch in den Kenndaten widerspiegelt. Nur auf diesem Weg wäre eine selektive Behandlung von Platten zur Verbesserung der Verwitterungsbeständigkeit möglich.

3.1.1 Untersuchungsmethoden

Basierend auf obige Ausführungen wurden die Proben mit nachfolgenden Verfahren untersucht:

- Polarisationsmikroskopie zur Analyse des Mineralbestands und des Gefüges des verwitterten und unverwitterten Bereiches der Dachplatten. Dabei wurden petrografische Dünnschliffe von der frei bewitterten Vorderkante hergestellt. Die Randzone stellt den verwitterten Bereich dar. Der Kernbereich wird als nicht oder nur wenig veränderter Bereich betrachtet. Aufgrund der Merkmalsunterschiede kann auf die Art der Verwitterung geschlossen werden. Außerdem sollte damit die makroskopische Unterteilung abgeglichen werden. Mögliche geringe Unterschiede zwischen der bewitterten und der überdeckten Plattenseite, bei der möglicherweise eine Kondensatbildung zum Tragen kommt, vernachlässigt die mikroskopische Untersuchung, zumal durch die Auflösungsgrenze des Polarisationsmikroskops geringe Unterschiede nicht mehr differenzierbar sind.

- Messung der Ultraschalllaufzeit entlang von Tiefenprofilen, um daraus den dyn. E-Modul zu bestimmen zwecks Beurteilung der Elastizitätsentwicklung gemäß BOOS und GROBE (1995). Dabei sollten Gefügeauflösungen entlang der frei bewitterten Vorderkante erkannt werden. Des Weiteren war zu ermitteln, ob und wenn ja, wie groß die Unterschiede in der Festigkeit parallel und senkrecht zur Schichtung sind. Zudem erfolgte an ausgewählten Proben ein Vergleich zwischen der frei bewitterten und der überdeckten Fläche. Der Vergleich der Platten untereinander gibt Auskunft darüber, ob die makroskopische Differenzierung sich auch in der Elastizität widerspiegelt.
- Messung der Porenradienverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie, um Möglichkeiten einer späteren Behandlung mit Steinschutzmitteln bewerten zu können. Zugleich dient die Porenradienverteilung zum Abgleich der Makrotypen. Darüber hinaus wurde die Quecksilberdruckporosimetrie durchgeführt, um zusätzlich zu der mittels Polarisationsmikroskopie beschriebenen Gefügeausbildung einen weiteren wichtigen Parameter für die Charakterisierung des Gesamtgefüges einschließlich Porosität zu erhalten, welcher mittels Lichtmikroskop nicht zugänglich ist (FITZNER 1988, FITZNER & SNETHLAGE, 1982, GRIMM 1990).
- Prüfung der hygrischen Quellung der unbehandelten Proben mittels Multidilatometer, um indirekt zu überprüfen, inwieweit quellfähige Tonminerale vorhanden und schadensursächlich oder am Schadensprozess beteiligt sind. Auch hier wird geprüft, inwieweit das Quellmaß mit den vor Ort unterschiedenen Typen korreliert.

Für die Bestimmung des hygrischen Quellvermögens wurde aus der unteren und/oder oberen Plattenhälfte mittig ein ca. 3 cm breiter und ca. 15 cm langer Gesteinsstreifen trocken mit der Gesteinssäge mit diamantbesetzter Trennscheibe heraus gesägt. Die Messung der hygrischen Quellung erfolgte mittels eines Multidilatometers mit vier Messuhren, die im Abstand von 0,3; 1,9; 3,5 und 5,1 cm von der Unterkante bzw. der Oberkante der Dachsteinplatte senkrecht zur Schichtung aufgesetzt wurden. Die Zeitintervalle für die Messungen betragen 10 Min., 30 Min., 1 Std., 5 Std. und 24 Std. Analog wurde die Untersuchung nach der Tränkung der Proben mit dem Quellminderer durchgeführt.

- Die Bestimmung des Verbrauchs von Quellminderer. Um die aufgenommene Menge in l/m^2 angeben zu können, wurden die Flächen der Prüfkörper, über die der Schutzstoff aufgenommen wurde, zunächst ausgemessen und zur Gesamtprüfkörperfläche summiert. Die Bestimmung der Eindringtiefe erfolgte am Querbruch, indem jeder Prüfkörper, nach Abschluss des kapillaren Saugens, ca. 3 - 4 cm von der jeweils innen liegenden Schnittkante aufgebrochen wurde. Die Eindringtiefe wurde visuell ermittelt (nass/trocken), da ein chemischer Nachweis für diese Art von Untersuchung erst hätte entwickelt werden müssen und im Hinblick auf die aufgenommenen Mengen (Nachweisgrenze der zu betrachtenden Verbindungsanteile) auch nicht als erfolgversprechend angesehen wurde.
- Die Bestimmung des Verbrauchs und der Eindringtiefe einer hydrophobierenden Imprägnierung.
- Die optische Anpassung einer Beschichtung mit Siliconharzlasur.
- Die Ermittlung des W-Wertes von beschichteten Austauschplatten im Vergleich zu den unbeschichteten.
- Versuche zur Entfernung des Teers mittels organischer Lösemittel und Reinigung mit einem Partikelstrahlverfahren.

3.1.2 Proben

Im Rahmen einer ersten Inaugenscheinnahme wurden zwei unverbaute Dachsteinplatten aus dem Kellerraum des Pavillons Hildesheim für eine erste Untersuchung entnommen. Sie stellen nach optischen Gesichtspunkten mehr oder weniger die beiden Endglieder von stark geschichtetem plattigem Material einerseits und massivem Material andererseits dar.

Von der Leiter aus erfolgte eine Probenahme an den Pavillons Hildesheim und Coellen. Auch abgefallene Schalen von Dachsteinen der Pavillons Hildesheim und Paderborn wurden für die labortechnischen Untersuchungen sichergestellt (Tab. 2).

Da lediglich die Proben P 1-1 und P 1-7 für die gemeinsame Untersuchung der Projektpartner ausreichend groß waren, wurde auf die Untersuchung der Proben P 1-2 bis P 1-6 verzichtet.

Nach Beginn der Instandsetzung wurden drei Walmflächen des Pavillons Münster genauer betrachtet und nach Beendigung der oben beschriebenen Prüfung durch den Fachhandwerker entsprechende Platten für die Untersuchung ausgewählt. Abb. 3a gibt die nicht wieder verwendbaren Platten nach der Überprüfung in der Übersicht eines Walmfeldes wieder. In der Detailaufnahme Abb. 3b treten die entstandenen Spaltflächen deutlich sichtbar hervor.

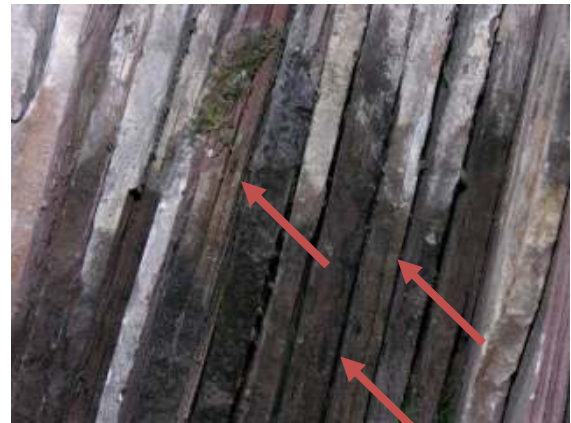
Tab. 2: Proben des ersten Objekttermins.

Proben Nr.	Art	Herkunft	Bemerkungen
1-1	unverbaut	Keller Haus Hildesheim	Stark plattiges Material. Muskovit auf den Schichtflächen angereichert.
1-2	abgefallen	Haus Hildesheim	Von der Westseite des Hauses Hildesheim abgefallene, dünnlagige Schale. Hier wird der Bewuchs auf der bewitterten Seite sehr gut deutlich.
1-3	Ausbauprobe	Haus Coellen	Dachsteinstück, welches von innen aus dem Verband entnommen wurde und demzufolge nicht der direkten Bewitterung ausgesetzt war. Dennoch sind helle Verfärbungen, die auf Abläufer bzw. Kondensatbildung auf der Innenseite hindeuten. Undichtigkeiten im Dach wurden provisorisch mit Hartfaserplatten geschlossen. Südseite von innen beprobt.
1-4	abgefallen	Haus Paderborn	Abgeplatzte Schale von einem Dachstein, die an dem Haus Paderborn angelehnt stand. Mit mikrobiellem Bewuchs.
1-5	Ausbauprobe	Haus Hildesheim	Platte bereits entlang seiner Spaltflächen aufgeplatzt und damit aus mehreren Schalen von ca. je 3 mm Dicke bestehend. Vorderseite des Hauses Hildesheim.
1-6	Ausbauprobe	Haus Hildesheim	Seitenfläche des Hauses Hildesheim (Nord- bzw. Nordwestseite). Es handelt sich dabei um eine etwas dickere Platte mit weniger Spaltflächen. Insgesamt erscheint die Platte massiver. Auf der Rückseite war die Platte mit Teer zur Abdichtung versehen. Insgesamt wurde die Platte im Überlappungsteil mit Mörtelbatzen zusätzlich befestigt. Auf der Oberseite ist deutlich Algenbewuchs in verschiedenen Generationen sichtbar.
1-7	unverbaut	Keller Haus Hildesheim	Massives Material. Helle Punkte an den Bruchkanten weisen auf alterierte Feldspäte hin.

Die wieder verwendbaren Platten sind in der Übersicht in Abb. 3c und im Detail in Abb. 3d dargestellt. In der Seitenansicht, mit Blick auf die Kanten, sind keine Risse erkennbar. Diese Platten wurden einer weiteren Differenzierung unterzogen.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Abb. 3: Ausgebaute Dachplatten, Pavillon Münster

- a+b: Übersicht und Detail der nicht wieder verwendbaren Platten (Pfeile markieren Risse);
 c+d: Übersicht und Detail der wieder verwendbaren Platten;
 e: Platte 2-5 → Typ 2;
 f: Platte 2-6 → Typ 4

Tab. 3 fasst die verschiedenen Typen einer Walmfläche zusammen. Differenziert wird nach Sichtprüfung und Percussionsprüfung (Typ 1 - 4). Die wieder verwendbaren Platten wurden nummeriert, so dass eine Rückverfolgung durchführbar wäre. Zusätzlich wurden die Dicke und prägnante Merkmale bestimmt, wie z.B. eine Teerbeschichtung, wiedergegeben.

Tab. 3: Differenzierung der Dachsteine in vier Typen nach der „Klangprobe“

Typ	Platten-Nr.	Art	Dicke [cm]	Charakteristika
1	2-11	plattig	1,93	auf der Rückseite Teer, desgleichen an den Außenrändern
2	2-2	plattig	1,85	
	2-3	ausgeprägter plattenartiger Aufbau	1,2	
	2-5	ausgeprägter plattenartiger Aufbau	1,7	
	2-8	massiv	2,3	im unteren Bereich der Rückseite Teer
	2-12	plattig	1,86	Teer im unteren Bereich
	2-13	plattig	1,35	Teer im unteren Bereich
	2-18	plattig	1,45	auf der Rückseite Teer, desgleichen an den Außenrändern
	2-24	plattig	2,05	auf der Rückseite Teer
3	2-1	plattig	1,85	
	2-4	plattig	1,25	wirkt stark schuppig an den Außenrändern, ansonsten ist eine zentrale massive Lage vorhanden
	2-15	plattig, wirkt aber massiver als die anderen Platten dieses Typs	1,4	Teer auf der Rückseite
	2-16	plattig	1,6	schuppt stark ab
	2-19	plattig	1,8	rückseitig partiell Teer
	2-21	plattig	2,0	Teer im unteren Bereich der Rückseite
	2-6	massiv	1,8	ebenfalls Teerreste
4	2-7	massiv	1,96	ebenfalls Teerreste
	2-9	plattig	1,78	Teer auf der Rückseite
	2-10	plattig/massiv	1,76	ebenfalls Teerreste
	2-14	massiv	1,7	ebenfalls Teerreste
	2-17	massiv	2,25	
	2-20	massiv	2,28	ebenfalls Teerreste
	2-22	massiv	1,8	Teer auf der Rückseite
	2-23	massiv	2,22	Teer auf der Rückseite

Für die labortechnischen Untersuchungen fiel die Auswahl auf nachfolgende Dachplatten:

- Typ 1: Platte 2-11
- Typ 2: Platte 2-5 und 2-12
- Typ 3: Platte 2-16 und 2-21
- Typ 4: Platte 2-6 und 2-20

Stellvertretend für Typ 2 gibt Abb. 3e Platte 2-5 wieder, welche den überdeckten und frei bewitterten Bereich zeigt. Erstgenannter lässt keine Mörtelreste erkennen, sondern ausschließlich Lockermaterial, was auf eine beschädigte oder fehlende Vermörtelung schließen lässt. Reste abgestorbener Algen und Schwärzepilze verursachen im Wesentlichen die Schwarzfärbung der Oberfläche. Abb. 3f repräsentiert Typ 4 mit Platte 2-6. Diese Platte weist noch Mörtelreste auf. Beide Platten lassen zudem die Nagellöcher erkennen.

Die Ergänzungsplatten wiesen ebenfalls Nagellöcher auf. Allerdings war nicht mehr erkennbar, wie groß der überdeckte und der frei bewitterte Bereich waren. Tab. 4 gibt einen Überblick über die Anzahl und Dicke der Platten.

Tab. 4: *Ergänzungsmaterial*

Proben Nr.	Dicke [cm]
3-1b	2,05
3-2b	1,71
3-3b	1,70
3-4b	1,95
3-5b	1,72
3-6b	1,60

Für die gemeinsame Untersuchung der Dachsteinplatten mit den Projektpartnern wurden die Dachsteinplatten der 1. und 2. Probenahme (kenntlich durch die vorangestellte Zahl 1 und 2 bei der Probenbezeichnung) nach dem Schema in Abb. 4 zerteilt.

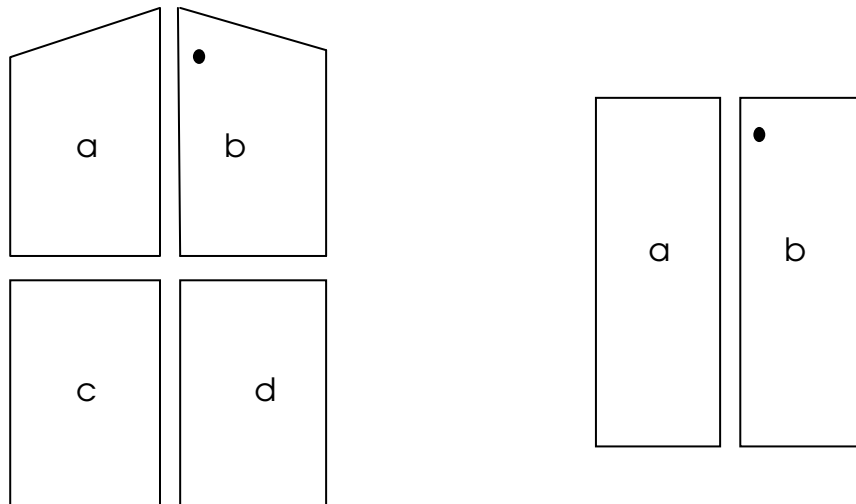


Abb. 4: Zerteilung der Ausbauplatten sowie der Platten aus dem Vorratskeller. Extrem große Platten mussten zunächst quer und anschließend längs geschnitten werden. Kürzere Platten konnten der Länge nach aufgeteilt werden. Die Plattenteile a und c bzw. a wurden den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und die Teile b und d bzw. d wurden von der Remmers Fachplanung bearbeitet.

Aufgrund der etwas abweichenden Untersuchungen sowie der Option, behandelte/unbehandelte Plattenteile ggf. später auch am Objekt testen zu können, erfolgte am Ergänzungsmaterial eine etwas andere Aufteilung, wie sie Abb. 5 schematisch wiedergibt.

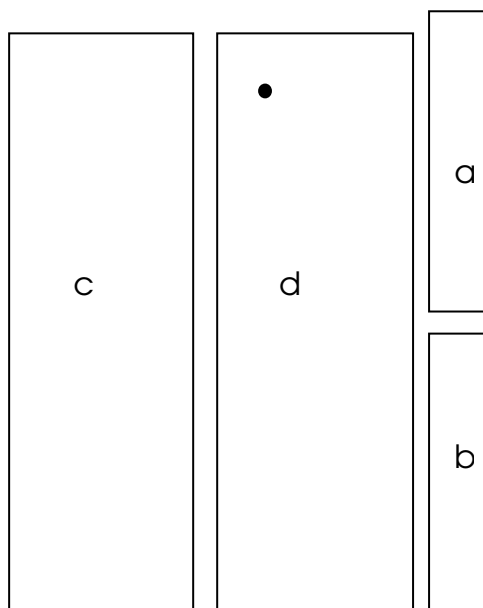


Abb. 5: Zerteilung des Austausch- bzw. Ergänzungsmaterials. Teilprobe a wurde jeweils den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Die Untersuchung von Teilprobe b erfolgte durch die Remmers Fachplanung. Teilprobe b wurde beschichtet und Teilprobe d blieb unbehandelt.

3.2 Einpassung geeigneter Konservierungsmaßnahmen in den Bauablauf

Grundsätzlich muss eine praxismgerechte Konservierungsmaßnahme in den Bauablauf eingepasst werden, um keine hohen zusätzlichen Kosten zu erzeugen. Da bisher zu der Thematik des Forschungsprojektes keine grundlegenden Kenntnisse vorliegen, auf die hätte zurückgegriffen werden können, bestand zeitlich letztlich keine Möglichkeit, die Untersuchungen und sich daraus ergebende geeignete Maßnahmen bis zur Fertigstellung der Dächer in den Bauablauf zu integrieren. Dennoch mussten mögliche Konservierungsmaßnahmen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit auf ihre Praxistauglichkeit hin beurteilt werden. Deshalb soll kurz der Bauablauf anhand von Abb. 6 skizziert werden.

Die von verschiedenen Objekten gesammelten wieder verwendbaren Dachsteinplatten wurden von Fa. Müller angeliefert, ansonsten fanden sämtliche Maßnahmen vor Ort statt. Bezüglich möglicher Konservierungsmaßnahmen muss ebenfalls gewährleistet sein, dass sie unmittelbar auf der Baustelle oder ohne größere teure Zwischenschritte andernorts erfolgen.

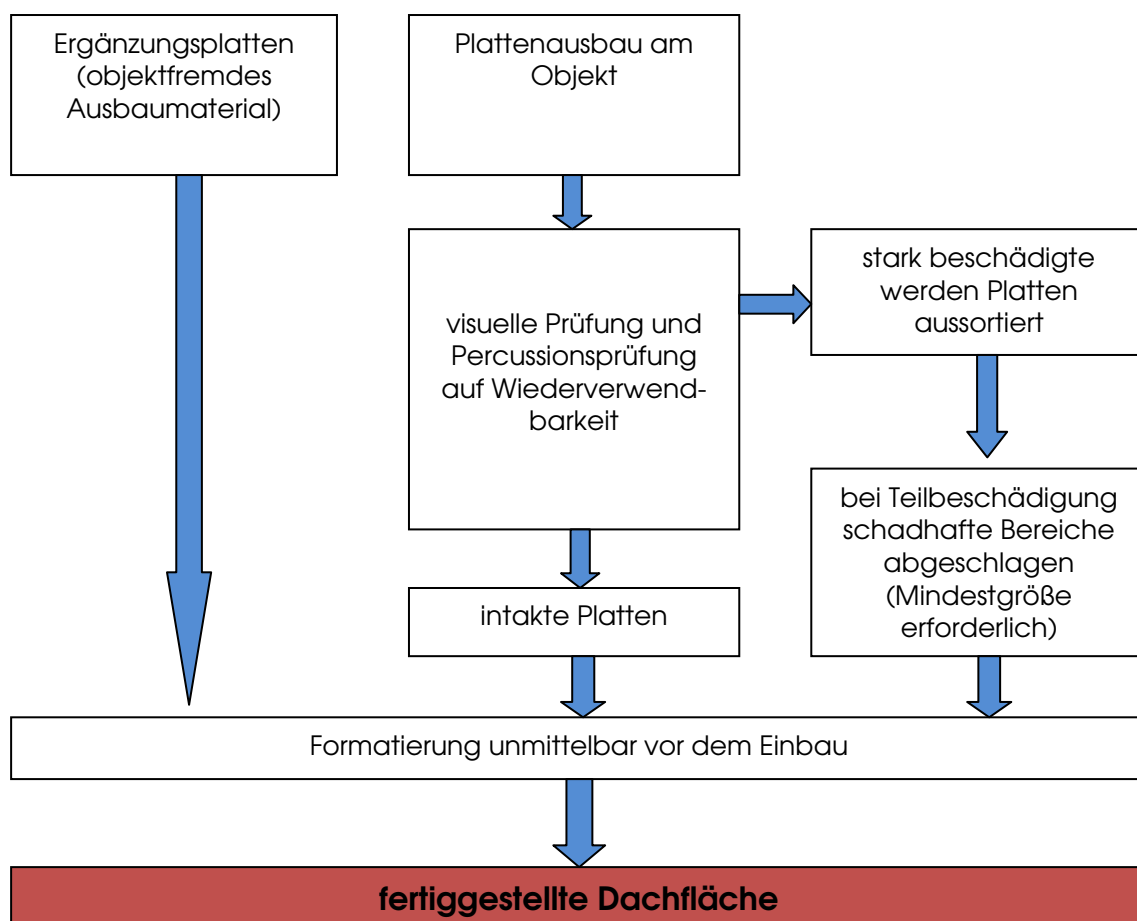


Abb. 6: Bauablauf

In Abb. 7 ist ein Dachbereich unmittelbar nach seiner Fertigstellung wiedergegeben. Die Aufnahme zeigt, dass die Dachsteinplatten sehr unterschiedliche Formate aufweisen. Dementsprechend ist, bezogen auf die vorhandenen Längen und Höhen der neu einzudeckenden Bereiche, eine Anpassung im Format nötig, was aus den z.T. frisch abgeschlagenen Kanten hervorgeht. Eine Reinigung der Platten fand weder vor noch nach ihrem Einbau statt.



Abb. 7: Fertiggestellte Dachfläche (Ausschnitt)

Die Formatierung unmittelbar vor dem Einbau hat Konsequenzen für die möglichen Behandlungsmaßnahmen. Sollen selektiv Platten behandelt werden, muss der Schutzstoff den gesamten Plattenquerschnitt durchtränken, damit bei dem Abschlagen überstehender Plattenränder ungeschützte Bereiche nicht wieder an die Oberfläche gelangen.

Alternativ wäre auch eine Behandlung der Dachflächen nach Fertigstellung denkbar. Dies setzt aber eine Reinigung der Oberfläche einschließlich der Entfernung des Bewuchses voraus. Als Beschichtung käme eine Siliconharzlasur in Frage, die so rezeptiert werden kann, dass die Originaldachplattenfarbe durchschimmert, ohne die technischen Eigenschaften wie eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit bei gleichzeitiger Wasserabweisung der Oberfläche zu verändern. Zudem ist eine Reversibilität der Beschichtung gegeben.

4 Untersuchungsergebnisse

Nachfolgend sind die Untersuchungsergebnisse dargestellt. Dabei wurden der Mineralbestand und das Gefüge ausschließlich qualitativ analysiert, da quantitative Angaben durch die Projektpartner erfolgen.

4.1 Untersuchungen an Proben aus dem Vorratskeller

Tab. 5 gibt einen Überblick über die an den Proben 1-1d und 1-7d durchgeführten Untersuchungen. Die aus den fein aufgelösten Ultraschallmessungen gewonnenen Messwerte für die Berechnung des dyn. E-Moduls wurden, ausgehend vom Plattenrand, parallel und senkrecht zur Schichtung durchgeführt. Die Bestimmung des Quellmaßes vor und nach der Behandlung bezieht sich auf Messlinien parallel zur Schichtung, da in diese Richtung deutlich größere Werte als parallel zur erwarten waren.

Tab. 5: An den Proben des Vorratskellers durchgeführte Untersuchungen

Proben-Nr.	Typ	Dünnschliff	E-Modul-Profil	Dilatationsprofil vor Behandlung	Dilatationsprofil nach Behandlung	Quecksilberdruckporosimetrie
1.1d	-	X	X	X	X	-
1.7b	-	X	X	X	X	X

4.1.1 Mineralogie und Gefüge

Von den beiden aus dem Vorratskeller stammenden Proben besitzt P1-1d ein ausgeprägtes Lagengefüge, was bereits zu dünnen Abplatzungen an den Rändern führte. Demgegenüber wirkt P1-7d massiv, wobei durch Farbunterschiede dennoch Schichtungsmerkmale sichtbar werden. Zudem sind weiße, umgewandelte Kristalle erkennbar, die als alterierte Feldspäte interpretiert werden. Tab. 6 gibt eine zusammenfassende Beschreibung der polarisationsmikroskopischen Analyse wieder.

Abb. 8 a zeigt den Rand der Platte 1-1d. Der Riss (dünne Schale) folgt der Längsausrichtung von Muskovitplättchen. Deutlich erkennbar am Hell-/Dunkel-Unterschied ist das Lagengefüge. Das Detail Abb. 8b zeigt stellvertretend den helleren Bereich, der durch Quarz sowie einem begrenzten Feldspatanteil dominiert wird.

In den feinkörnigen dunklen Lagen sind neben Muskovit feinkörnige Mineralphasen, wie Tonminerale und Eisenverbindungen, die mittels Polarisationsmikroskopie nicht eindeutig identifizierbar sind, stärker angereichert. Einen Ausschnitt aus einer solchen Lage repräsentieren Abb. 8 c und 8d mit parallelen und gekreuzten Polarisatoren.

Tab. 6: Mineralphasen und Gefüge der Proben aus dem Vorratskeller

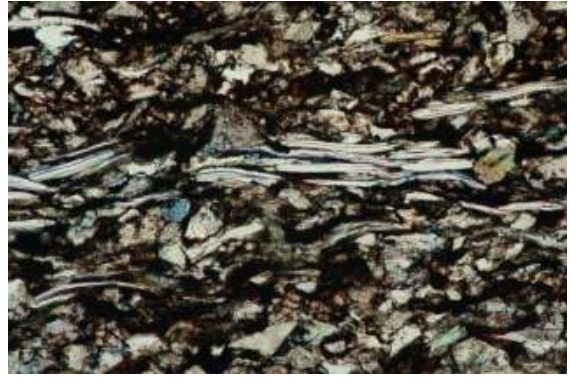
Proben Nr.	Minerale/Gefüge	Beschreibung
1-1d	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> • Quarz (38 - 63 μm \emptyset in feiner körnigen Lagen und 127 μm bei Qz-dominierten Lagen • Muskovit (190 - 380 μm Länge) • Feldspat • weitere Schichtsilikate, darunter anscheinend Chlorid und nicht näher identifizierbare Tonminerale
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> • stark ausgeprägtes Lagengefüge • dazwischen aber auch quarzkorndominierte Lamellen mit Quarzkorn-/Quarzkornkontakten, die aber stark zurücktreten • nur geringer Anteil lichtmikroskopisch sichtbarer Poren • ansonsten bilden andere Schichtsilikate, z.B. Chlorid, die in der Größe mit dem Glimmer übereinstimmen, das Lagengefüge. Daneben bilden aber auch bräunliche feinkörnige Minerale (vermutlich Tonminerale), die mit dem Polmi nicht näher zu differenzieren sind, das Lagengefüge
1-7d	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> • Quarz (63 - 127 μm \emptyset) • Feldspat größtenteils alteriert • sehr geringer Glimmeranteil
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> • nur leichtes Lagengefüge in der Übersichtsvergrößerung erkennbar. Nahezu kein Glimmer, sondern Textur hauptsächlich durch Korngrößenunterschiede • Quarzkörner bilden z.T. zusammenhängende Aggregate (Quarze mit autigenen Anwachssäumern) • Feldspäte z.T. stark verwittert, dadurch sekundäre Porosität (Probe mit der höchsten sichtbaren Porosität)

Deutlich unterscheidet sich davon der massive Plattentyp, vertreten durch Probe 1-7d, obgleich in der Übersichtsaufnahme Abb. 8e ebenfalls ein Lagengefüge erkennbar ist. Dieses resultiert vielmehr aus Korngrößenunterschieden und dem Wechsel im Quarzanteil. Ist die Quarzkorngröße und der -anteil geringer, finden sich wiederum im Durchlicht dunkel erscheinende, feinkörnige Minerale.

Auffällig ist die größere sichtbare Porosität in den grobkörnigeren Bereichen. Einen Ausschnitt bildet Abb. 8f. Reliktstrukturen von Kristallen weisen auf einen hohen Anteil alterierter Feldspäte hin. In keiner der anderen untersuchten Proben wurde ein derart hoher mikroskopisch sichtbarer Porenanteil detektiert.



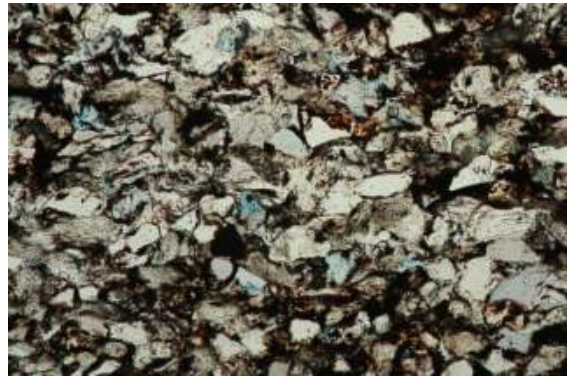
a)



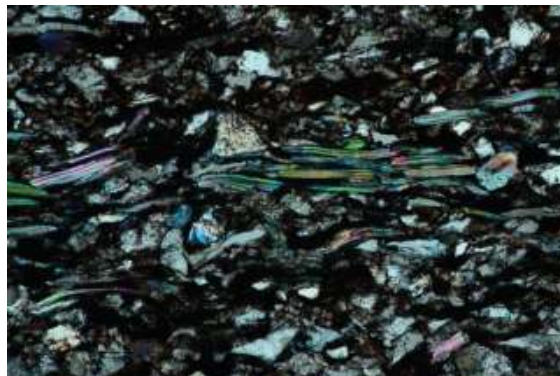
b)



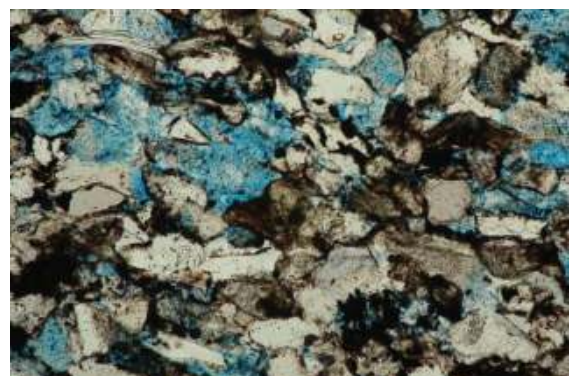
c)



d)



e)



f)

Abb. 8: Probe 1-1d (a-d) und Probe 1-7d (e, f).

- a: Übersicht über den geschädigten Rand von 1-1d, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm;
- b: Dichteres Gefüge, II Nicols, lange Bildkante 1,0 mm
- c: Lagengefüge mit Muskovit, II Nicols, Lange Bildkante 1,0 mm
- d: wie c, nur X Nicols
- e: Übersicht, II Nicols, lange Bildkante: 8,5 mm
- f: Detail, II Nicols, lange Bildkante 1,0 mm

4.1.2 Porositätskenndaten

Die Porenradienverteilung wurde nur von Platte 1-7d untersucht, da diese potenziell als Ergänzungsmaterial in Frage kam, nicht aber Platte 1-1d, deren Standzeit als gering einzustufen ist. Dies resultiert zunächst aus der bereits bei der unverbauten Platte feststellbaren Schalenbildung und des extrem plattigen Charakters. Die vergleichenden Laboruntersuchungen mit dem Ausbaumaterial bestätigten die Bewertung. Tab. 7 gibt die mittels Quecksilberdruckporosimetrie als Zweifachmessung bestimmten Porenkenndaten sowie die Dichte wieder.

Tab. 7: Porositätskenndaten (Quecksilberdruckporosimetrie).

Probe-Nr.	Typ	Spez. Porenvolumen [mm ³ /g]	Mittlerer Porendurchmesser [µm]	Rohdichte [g/cm ³]	Reindichte [g/cm ³]	Gesamtporosität [Vol%]
1.7b-A	-	75,1	1,8	2,19	2,62	16,5
1.7b-B	-	77,6	1,7	2,20	2,65	17,1

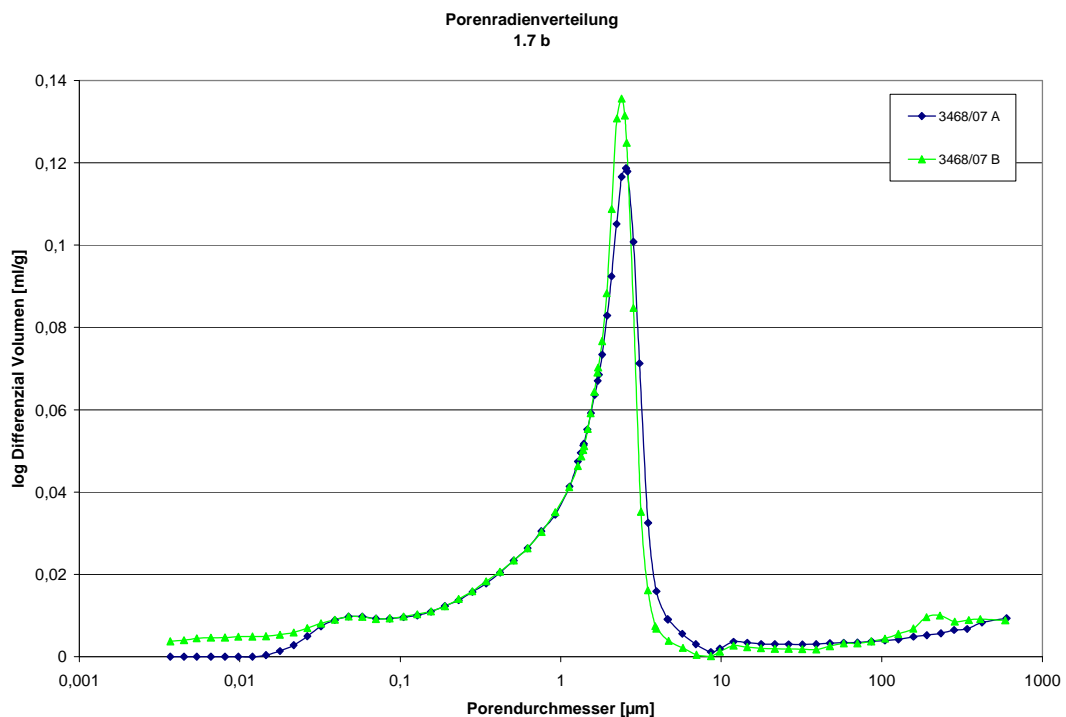


Abb. 9: Porenradienverteilung der Probe aus Platte 1-7d

Die Porenradienverteilung zeigt ein ausgeprägtes Maximum bei ca. 1,8 μm . Diese Poren sind nicht im Dünnschliff sichtbar. Die darin beschriebenen sichtbaren Poren spiegeln sich in dem Anstieg der Porenradien in dem Bereich zwischen 10 und 1000 μm wieder.

4.1.3 Verwitterungsprofile (dyn. E-Modul)

Der dyn. E-Modul wurde als Tiefenprofil senkrecht und parallel zur Schichtung der beiden unverbauten Platten ermittelt (Tab. 8). Bezogen auf seine Festigkeitswerte liegt der plattige Typ sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung deutlich unter den Werten des massiven Typs. Ein Festigkeitsabfall zur Vorderkante ist nicht zu erwarten, da die Platten nicht verbaut waren (Abb. 35).

Tab. 8: E-Modul-Messungen.

Proben-Nr.	E-Modul			
	senkrecht Schichtung (unten)	parallel Schichtung (unten)	senkrecht Schichtung (oben)	parallel Schichtung (oben)
1.1d	X	X	-	-
1.7b	X	X	-	-

Probe 1.7 b + 1.1 d

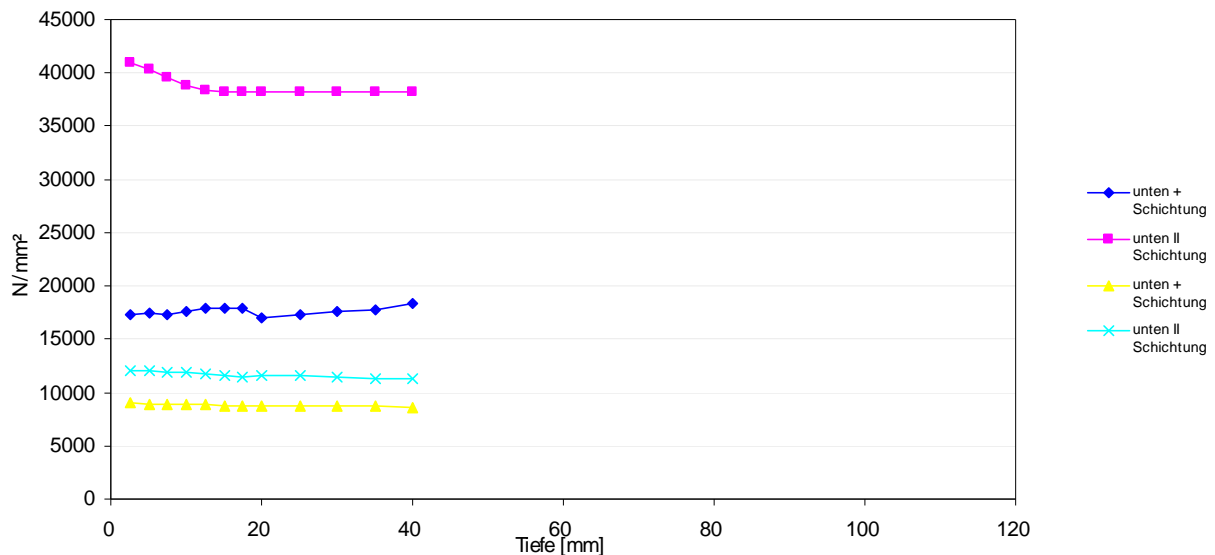


Abb. 10: Tiefenprofile. Probe 1.7b - massiver Typ (rosa/ blau). Probe 1.1d - plattiger Typ (türkis/gelb)

Die Tiefenprofile sind für beide Platten ausgehend vom Rand in Abb. 10 dargestellt. Wie zu erwarten, zeigen sich im Tiefenprofil der unverbauten Platten keine Gradienten mit einem Festigkeitsabfall zum Rand hin, da diese Platten noch nicht der langjährigen Verwitterung ausgesetzt waren.

Unterschiede bestehen zum einen plattenintern und zum anderen zwischen den beiden Platten. Wie zu erwarten, weist die Platte 1-1d stellvertretend für ausgeprägt plattige Dachsteine sehr viel geringere Werte auf als die massiver erscheinende Platte 1-1d.

4.1.4 Hygrische Quellung vor und nach Behandlung

Nachfolgend sind die Vergleichsergebnisse zwischen den Prüfkörpern vor und nach Behandlung (Tab. 9) mit dem Quellminderer der beiden unverbauten Platten dargestellt.

Tab. 9: Untersuchung der hygrischen Quellung vor und nach Behandlung mit einem Quellminderer

Proben-Nr.	hygrische Dilation			
	vor Behandlung		nach Behandlung	
	unten	oben	unten	oben
1.1d	X	-	X	-
1.7b	X	-	X	-

Bei der unverbauten plattigen Probe 1-1d beginnt die Quellung sehr schnell und überschreitet im letzten Messsegment schon nach 10 Min. den für Sandsteine mit quellfähigen Tonmineralen kritischen Wert von 0,5 mm/m und erreicht den Maximalwert von 2,9 mm/m in 5,1 cm Tiefe nach 24 Stunden. Über den gesamten Messzeitraum findet keine Dehnung im vorderen Bereich statt (Abb. 11a).

Nach Rücktrocknung wurde die Wirkstoffaufnahme an dieser Probe bestimmt (Tab. 10). Aufgrund der geringen Porosität und damit schwachen Durchlässigkeit ist diese deutlich niedriger als in der anderen Probe. Eine Prüfung des Querbruches an einer anderen Teilprobe belegt, dass nicht der gesamte Querschnitt durchtränkt wurde.

Tab. 10 Wirkstoffaufnahme von Quellminderer durch kapillares Saugen

Probe	Fläche [cm ²]	Verbrauch [l/m ²]	Eindringtiefe [mm]
1-1d	46,2	0,3	12
1-7b	38,4	2,8	26

Nach der Behandlung mit dem Quellminderer reduziert sich der Maximalwert im hinteren Messsegment nach 24 Stunden auf 2,35 mm. Der Anstieg des Quellmaßes verringert sich in der ersten Stunde nicht merklich. Allein das Tiefenprofil variiert (Abb. 11b).

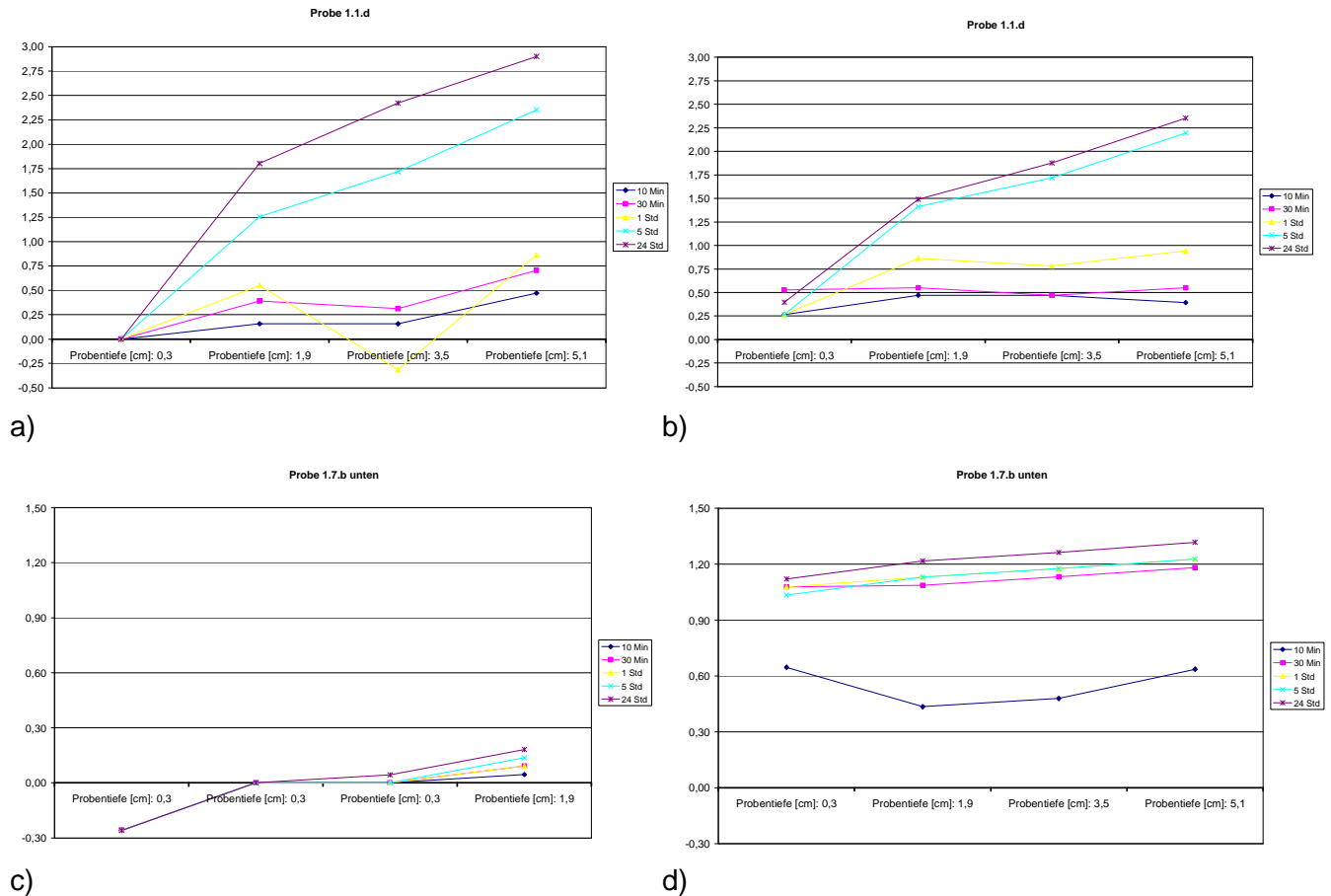


Abb. 11: Quellmaß der unverbauten Proben vor und nach Behandlung mit einem Quellminderer. Die Messung erfolgte in 0,3 cm, 1,9 cm, 3,5 cm und 5,1 cm vom Plattenrand entfernt. Messintervalle waren 10 Min., 30 Min., 1 Std., 5 Std., 24 Std.

- a) Probe 1-1d, vor Behandlung
- b) Probe 1-1d, nach Behandlung mit Quellminderer
- c) Probe 1-7d, vor Behandlung
- d) Probe 1-7d, nach Behandlung mit Quellminderer

Probe 1-7d zeigt ein völlig anderes Quellverhalten. Entweder liegt ein sehr geringer Quellbetrag im hinteren Segment vor oder aber es kommt sogar bei Feuchtaufnahme zu einer Kontraktion im vorderen Bereich (Abb. 11c). Anstatt dass die Werte gleichbleiben bzw. zumindest im noch nicht kritischen Bereich verbleiben, steigen sie in der mit Quellminderer behandelten Probe deutlich an und erreichen über die gesamte Profiltiefe bereits nach 30 Minuten Beträge >0,5 mm/m (Abb. 11d). Dabei bleibt der Maximalwert nach 24 Stunden von 1,32 mm/m, der wiederum im hinteren Segment liegt, deutlich unter dem Maximum der Probe 1-1d.

4.1.5 Hydrophobierende Imprägnierung

Um durch eine hydrophobierende Imprägnierung als Konservierungsmaßnahme die Wasseraufnahme zu senken und Aufplatzungen entlang der Schichtflächen zu verhindern, müssen die Platten unter Berücksichtigung des Bauablaufs über den gesamten Querschnitt durchtränkt werden. Ansonsten würden bei der endgültigen Formatierung während des Einbaus wieder nicht hydrophobierte Kanten entstehen, über die eine Wasseraufnahme durch kapillares Saugen erfolgt. Die vorgenommenen Versuche zur freiwilligen Aufnahme von Wirkstoff führten nicht zu einer den gesamten Querschnitt umfassenden Durchtränkung.

4.2 Untersuchungen an Proben des Pavillons Münster

Die an den Ausbauproben durchgeführten Untersuchungen sind der Tab. 11 zu entnehmen. Im Hinblick auf die Elastizität (dyn. E-Modul) und die Dilatation vor und nach der Behandlung bedeuten zwei Kreuze, dass sowohl eine Messung am Rand der frei bewitterten Platte als auch am gegenüberliegenden Rand, der durch andere Platten überdeckt war, erfolgten. Zwei Kreuze bei der Kategorie "Quecksilberdruckporosimetrie" bedeuten, dass zwei makroskopisch unterschiedliche Bereiche aufgetrennt wurden und deren Porenradienverteilung gesondert untersucht wurde. Zusätzlich erfolgte auch die Untersuchung einer Durchschnittsprobe. Darüber hinaus repräsentiert die Probe 2-21b/d den unteren frei bewitterten und den überdeckten Rand, deren Porenradienverteilung gleichermaßen untersucht wurde.

Tab. 11: An den Ausbauproben durchgeführte Untersuchungen

Proben-Nr.	Typ	Dünnschliff	E-Modul-Profil	Dilatationsprofil vor Behandlung	Dilatationsprofil nach Behandlung	Quecksilberdruckporosimetrie
2-5b	2	X	X	-	-	X
2-6d	4	X	-	X	X	X
2-11b	1	X	X/X	X/X	X/X	X
2-12b	2	X	X/X	X/X	-	X
2-16b	3	X	-	-	-	X
2-20b/d	4	X	X	X/X	X	X
2-21b/d	3	X	X/X	X	X	X/X

4.2.1 Mineralogie und Gefüge

Die Anordnung der Proben folgt der makroskopischen Typisierung gemäß visueller Kontrolle und Percussionsprüfung, d.h. Proben eines Typs werden tabellarisch zusammengefasst, um den Vergleich im Hinblick auf die mikroskopischen Analysen einfacher durchführen zu können (Tab. 12 - 14).

Tab. 12: Makrotyp 1 (Probe 2-11b)

Proben-Nr.	Minerale/Gefüge	Beschreibung
2-11b Typ 1	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (89 - 190 μm \varnothing, MW: ca. 127 μm) Muskovit (127 - 633 μm Länge, MW: ca. 380 μm, Dicke: 2 μm) Feldspat weitere Schichtsilikate, darunter anscheinend Chlorid und nicht näher identifizierbare Tonminerale
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> mikroskopisch kein ausgeprägtes Lagengefüge erkennbar, außer am oberen Rand inselartige Verwachsung der Quarzkörner. Die Inseln werden durch „Quarzkornbrücken“ verbunden. an bestimmten Stellen ziehen feinkörnige Bänder durch, die nicht von zusammengewachsenen Quarzen überbrückt werden Feldspat ist stark verwittert und bildet eine sekundäre Porosität
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> Teer teilweise Bewuchs

Makrotyp 1 mit Probe 2-11b fällt vom „Klangbild“ her aus dem Rahmen. Diese Platte weist einen lagigen Aufbau auf. In der Übersicht (Abb. 12a) befindet sich eine feinkörnigere stärker rot erscheinende Lage am Rand (Oberflächenzone der Platte). Die Detailaufnahme Abb. 12b stammt aus dem Bereich mit höherem Quarzanteil. Zugleich sind die Quarzkörner auch größer als in den Lamellen mit höherem Schichtsilikat- und Eisenphasenanteil. Dort, wo mehrere Quarzkörner aneinander grenzen, ist die Zementation (authigene Quarzsäume) sehr gut und nahezu porenfüllend ausgebildet. Das klastische Ursprungskorn zeigt in den meisten Fällen im Polarisationsmikroskop noch einen dunklen Saum. Die Quarze bilden „quasi“ kleine zusammengewachsene „Inseln“, die z.T. Quarzkörner überbrücken. In den im Durchlicht dunkleren Zonen fehlt die Überbrückung und Stabilisierung des Gefüges durch Quarzzemente. Neben den auch in den stärker zementierten Bereichen erkennbaren Hellglimmern sind auch Feldspäte, die häufig eine Alteration aufweisen und durch Anlösung im großen Maße die sekundäre Porosität bewirken, vorhanden.

Von den wieder zu verwendenden Platten besitzen die beiden Proben 2-5b und 2-12b mehr oder weniger das am stärksten ausgeprägte Lagengefüge und tendenziell die schlechteste Zementation, erkennbar anhand der vielen dunklen Bestandteile im Dünnschliff. Diese resultieren wiederum aus nicht näher differenzierbaren Schichtsilikaten und eisenhaltigen Mineralphasen.

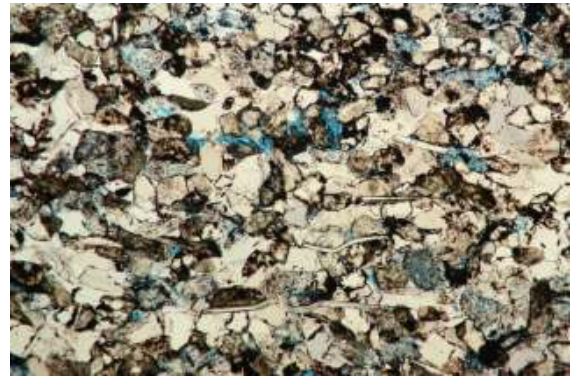
Abb. 12 c gibt einen Überblick über die Vorderkante der Probe. Auf der Oberfläche findet sich mikrobieller Bewuchs. Die Detailaufnahme Abb. 12d zeigt mittig eine stark zementierte Zone, in der Quarz und Feldspatkörner vorherrschen. Die Quarzkörner sind im Zuge der Diagenese weitergewachsen und lassen ihre Ursprungsform häufig noch anhand einer randlichen Durchstäubung (Schmutzsaum aus dem Ablagerungsgebiet) erkennen, während die Feldspäte sich davon auch schon bei mittlerer Vergrößerung anhand einer durchgehenden Durchstäubung, Anlösungserscheinungen und Kristallform (sofern noch +/- idiomorph) unterscheiden.

Tab. 13: Makrotyp 2 mit den Proben 2-5b und 2-12b

Proben-Nr.	Minerale/Gefüge	Beschreibung
2-5b Typ 2	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (63 - 127 μm \emptyset in Bereichen mit mehr Tonmineralen und Eisenphasen in quarzdominierten Lagen >127 μm) Feldspat größtenteils alteriert Glimmeranteil erkennbar aber geringerer als in P1-1d
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> Lagengefüge sichtbar, aber weniger stark ausgeprägt als in Probe 1.1d in den dunkleren verwitterungsanfälligeren Lagen finden sich vor allem feinkörnige braune Minerale (> 4μm), bei denen es sich allem Anschein nach um Tonminerale handelt. Zudem sind einzelne Hellglimmer und Chlorid in den Lagen sichtbar in den massiveren Lagen liegen Quarzkörner vor, die aufgrund dunkler Säume häufig noch den Umriss des Altkorns erkennen lassen und damit einen hohen Anteil an Quarzzement, der die Körner stark verkittet hat, belegen äußerst geringe sichtbare Porosität
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> Bewuchs an der Oberseite und Vorderkante (unten)
2-12b Typ 2	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz(127 - 190 μm in gröberen Lagen, 63 μm in feiner körnigen Lagen Glimmer 127 - 254 μm) Feldspat (stark alteriert)
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> Lagengefüge (sehr dünne Lage, große Wechselrate) wenig Hellglimmer, aber feinkörnige braune Substanz (Tonminerale, Eisenverbindungen), die mehr oder weniger Lagen bilden. Darin können kleine Quarzkörner eingebettet sein der Anteil an inselartig verwachsenen Quarzen ist vergleichsweise gering die Quarzkornverwachsungen überbrücken nicht die feinkörnigen braunen Lagen es ist eine hohe sichtbare Porosität vorhanden Teer liegt an der Außenseite vor. Im Gegensatz zu den anderen Proben reicht der Teer ins Gefüge hinein
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> Teer, reicht ins Gefüge hinein z.T. Bewuchs



a)



b)



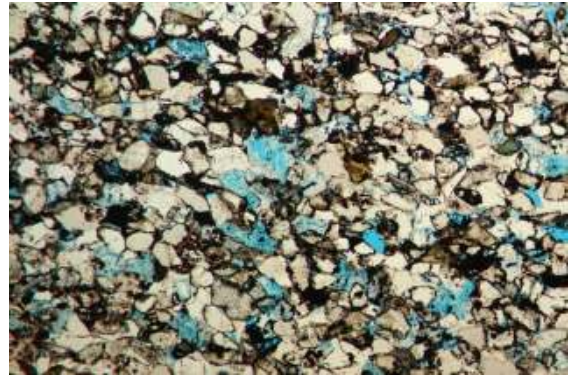
c)



d)



e)



f)

Abb. 12: Makrotyp 1 mit Probe 2-11b (a, b) und Makrotyp 2 mit Probe 2-5b (c, d) und Probe 2-12b (e, f)

a: Übersicht, mit plattig absonderndem Bereich am oberen Rand, II Nicols, Lange Bildkante 8,5 mm

b: Ausschnitt, II Nicols, lange Bildkante 2,2 mm

c: Übersicht mit Bewuchs auf der Oberfläche, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm

d: Ausschnitt, II Nicols, Lange Bildkante 2,2 mm

e: Übersicht mit Teer auf der Oberfläche, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm

f: Ausschnitt, II Nicols, Lange Bildkante 2,2 mm

Während der Lagenwechsel innerhalb der Probe 2-5b sich kaum in der Übersicht erfassen lässt, also großmaßstäblicher verläuft und die einzelnen Lamellen nicht so stark voneinander abgegrenzt sind, ist dieser in Probe 2-12b sehr viel kleinräumiger, wie der Vergleich mit Abb. 12e bestätigt. Bei den Anlagerungen auf der Oberfläche handelt es sich um Teerreste.

Zudem fällt der deutlich höhere Anteil an mikroskopisch sichtbaren Poren auf. Diese treten in größerer Anzahl in den durch Quarz- und Feldspatkörner dominierten Bereichen auf. Zugleich befinden sich hier größere Körner als in den im Durchlicht braunen (makroskopisch rötlich) Lamellen. Abb. 12f gibt einen solchen Ausschnitt wieder. Dabei wird deutlich, dass es sich bei den großen Poren aufgrund von Kornrelikten vorwiegend um eine sekundäre Porosität, die aus dem Zerfall von Feldspatkörnern resultiert, handelt.

Tab. 14: Makrotyp 3 mit den Proben 2-16b und 2-21d

Proben-Nr.	Minerale/Gefüge	Beschreibung
2-16b Typ 3	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (63 - 101 μm \varnothing in feiner körnigen Lagen und 127 - 190 μm in Qz-dominierten Lagen Muskovit (63 - 380 μm Länge, MW: 127 μm) Feldspat, wenig, nur partiell alteriert weitere Schichtsilikate, darunter anscheinend Chlorid und nicht näher identifizierbare Tonminerale
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> Lagengefüge sichtbar, insbesondere durch einen deutlichen Anteil an Hellglimmern ansonsten aber viele „Inseln“ aus Quarzkornaggregaten, die quasi ein Gerüst bilden diese wechseln mit Lagen, in denen Schichtsilikat an Schichtsilikat grenzt, und keine Gefügestabilisierung durch Quarzkornbrücken vorliegt, hier sind die Quarzkörner deutlich kleiner nur einzelne sichtbare Poren, damit ist dessen Anteil gering
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> Verschmutzung Bewuchs
2-21d Typ 3	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (63 - 127 μm \varnothing in feiner körnigen Lagen, MW: 76 μm; und 101 - 252 μm in Qz-dominierten Lagen, MW: 127 μm) Feldspat deutlicher Glimmeranteil (190 - 760 μm, MW: 252, Dicke 25 - 38 μm)
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> in einer Lage sehr hohe sichtbare Porosität (siehe Abbildung) randlich mehr Hellglimmer und deutliches Lagengefüge
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> Bewuchs auf der Oberseite Teer an der Vorderkante

Makroskopisch ist das Lagengefüge im Makrotyp 3 besser erkennbar als mikroskopisch, wie Abb. 13a dokumentiert. In den im Anschliff rötlichen Lagen finden sich wiederum weniger und kleinere Quarzkörner als in den damit wechselnden Lagen. Die feiner körnigen Lagen enthalten auch Hellglimmer und einen höheren Anteil an im Polarisationsmikroskop nicht identifizierbaren Schichtsilikaten und eisenhaltigen Verbindungen.

In Abb. 13b befindet sich oberhalb der Mitte eine stärker durch Quarzzement verfestigte Lage. Die authigenen Anwachssäume der Quarze lassen zwischen den Körnern kaum noch eine Restporosität erkennen. Unterbrochen wird das Gefüge durch Feldspäte, die Anlösungen zeigen, sowie in geringem Umfang auch durch im Durchlicht bräunliche, sehr feine Minerale.

In dieser Lage ist der Quarzanteil so hoch, dass die Quarzzementation diese noch weitgehend überbrückt. In den feiner körnigen Lagen ist die Quarzzementation sehr viel geringer. Eine Überbrückung fehlt oft, so dass diese Bereiche bei hygrothermischer Wechselbeanspruchung bevorzugte Trennflächen darstellen.

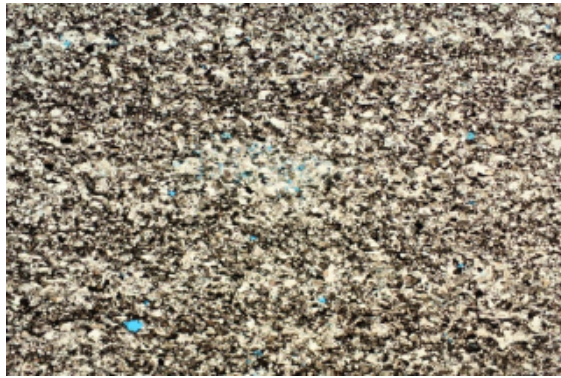
Weniger intensiv ausgeprägt ist das Lagengefüge in Probe 2-21d, die ebenfalls zum Makrotyp 3 zählt, wie die Übersichtsaufnahme Abb. 13c darstellt. Allerdings ist der Anteil an großen, mikroskopisch sichtbaren Poren innerhalb der Probe sehr unterschiedlich, wie der Vergleich mit Abb. 13d bestätigt. Diese porenreiche Zone war über die gesamte Plattenlänge zu verfolgen. Entgegen den anderen Proben, in welchen die mikroskopisch sichtbaren Poren vorwiegend auf die Feldspatan- und -auflösung zurückgehen, scheint das in dieser Probe nur teilweise zuzutreffen. Üblicherweise unterscheidet sich die Korngröße des Feldspats nicht von der der Quarzkörner, d.h. Partikellösungsporen sind durch die Feldspatkorngröße limitiert, zumal sie gut miteinander verwachsene Quarze umgeben, die nicht ohne weiteres einer Anlösung unterliegen. Hier sind aber die Poren oft deutlich größer als die Feldspäte.

Deutlicher wird dies in Abb. 13e am Plattenrand, an welchem vereinzelt größere Poren auftreten. Möglicherweise waren in diesen Bereichen weniger verwitterungsresistente (sei es im Steinbruch oder am Bauwerk) Mineralphasen, wie z.B. Calcit, eingebaut. Die Oberseite dokumentiert zudem den mikrobiellen Bewuchs auf der Platte.

Probe 2-21d enthält noch einen deutlichen Hellglimmeranteil, wie Abb. 13f dokumentiert. Teilweise sind die Muskovite vor der Quarzzementation durch Kompaktion deformiert worden, wie schichtflächenparallel ein geregelter Glimmer in der rechten oberen Bildhälfte zeigt.

Auch der Makrotyp 4, zu dem überwiegend massive Platten gehören, lassen makroskopisch anhand von Farbunterschieden im Querbruch noch ein Lagengefüge erkennen. Im Dünnschliff äußert sich dies wiederum in Korngrößenunterschieden sowie der Abnahme des Quarzkornanteils in den feiner körnigen Lagen. Abb. 14a gibt das Gefüge in der Übersicht wieder. Im oberen Bildteil ist eine solche feiner körnige, im Durchlicht bräunlichere Lage erkennbar.

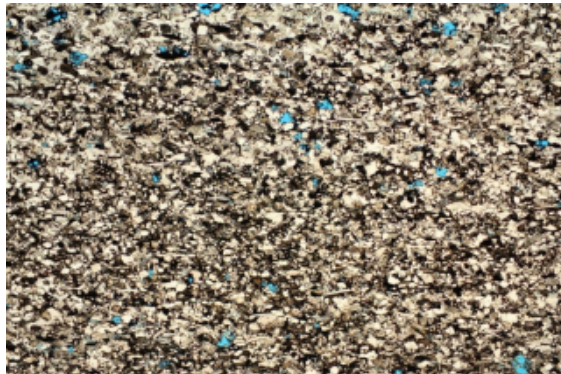
Der Ausschnitt in Abb. 14b stellt die gute Zementation in einer im Durchlicht helleren, grobkörnigeren Lage dar. In diesem zementierten Korngerüst finden sich vereinzelt Hellglimmer. Der Anteil an mikroskopisch sichtbaren Poren ist gering.



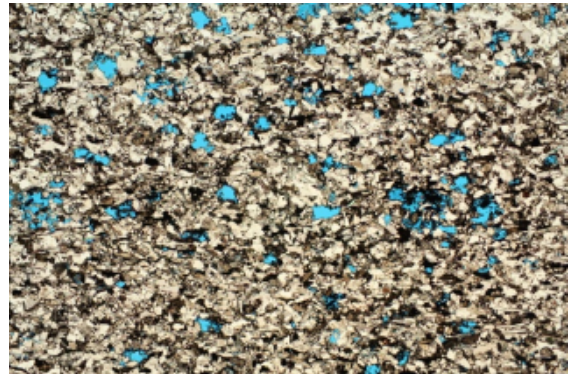
a)



b)



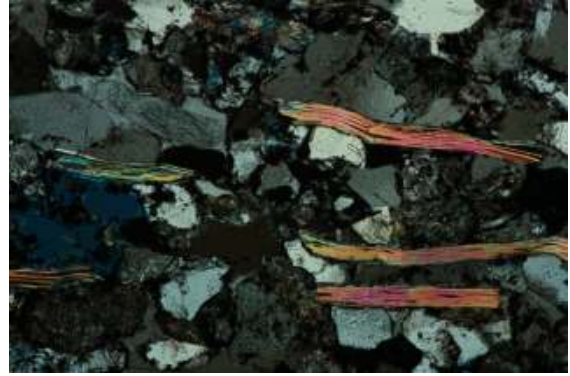
c)



d)



e)



f)

Abb. 13: Makrotyp 3 mit den Proben 2-16b und 2-21d

- a: Gefügeübersicht über Probe 2-16b, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- b: Detail aus stärker quarzdominierter Lage, II Nicols. Lange Bildkante 2,2 mm
- c: Probe 2-21d mit wenigen sichtbaren Poren, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- d: Gleiche Probe mit vielen sichtbaren Makroporen, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- e: Plattenrand. Nur bei stärkerer Vergrößerung wird das Lagengefüge noch sichtbar (dunklere Zone knapp unter der Oberfläche), II Nicols, lange Bildkante 2,2 mm
- f: Teilweise treten noch Hellglimmer parallel zur Oberfläche orientiert auf, X Nicols, lange Bildkante 1,0 mm

Auch die andere Probe (2-20d) lässt am Rand (Abb. 14c) noch das Lagengefüge erkennen, insbesondere im Vergleich mit dem Gefüge in Plattenmitte, welches Abb. 14d repräsentiert. Darin sind keine Korngrößenunterschiede und wechselnde Anteile zwischen den verschiedenen Komponenten zu beobachten. Mikroskopisch sichtbare Poren resultieren aus der Feldspatauflösung.

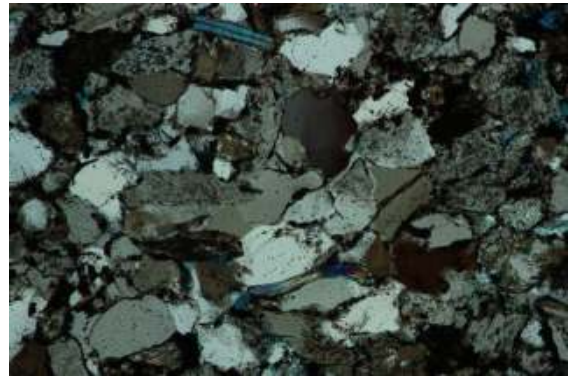
Die ausgeprägte Zementation durch authigene Quarzanwachssäume geben Abb. 14e mit parallelen Polarisatoren und Abb. 14f mit gekreuzten Polarisatoren wieder. Insbesondere letztgenannte Aufnahme lässt zudem sehr gut die Feldspatanlösung erkennen (siehe Pfeil).

Tab. 15: Makrotyp 4 mit den Proben 2-6d und 2-20d

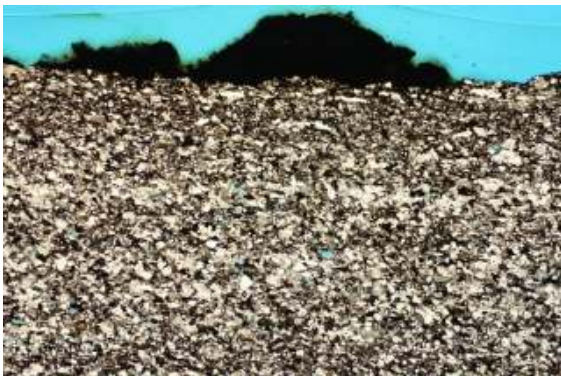
Proben-Nr.	Minerale/Gefüge	Beschreibung
2-6d Typ 4	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (127 µm Ø MW.) Feldspat geringer Glimmeranteil
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> Lagengefüge schlecht ausgeprägt; noch erkennbar an den einzelnen parallel zu den Spaltflächen der Dachsteinplatte ausgerichteten Hellglimmern, an eisenhaltigen Partikeln, Korngrößenunterschieden und bevorzugte Ausrichtung der Quarzkornverwachsung der Anteil an miteinander verwachsenen Quarzkörnern ist sehr hoch. Die Verwachsung erfolgt über Flächenkontakte. Zwischen einzelnen Quarzen ist in quarzdominierten Bereichen keine Porosität mehr erkennbar. geringe sichtbare Porosität in Form unregelmäßig verteilter Makroporen
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> Teer an der Vorderkante Bewuchs auf der freibewitterten Außenseite
2-20d Typ 4	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (51 - 127 µm Ø am feiner körnigen Plattenrand, MW: 63 µm; und 63 - 190 µm im Qz-dominierten Bereich, MW: 127 µm) Feldspat geringer Glimmeranteil am Rand (127 - 630 µm, MW: 190 Länge)
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> der Querschnitt belegt eine gute Verzahnung der Quarzkörner über Quarzanwachssäume nur zum Plattenrand hin ist ein Lagengefüge nachweisbar mäßige bis geringe sichtbare Porosität durch den festgestellten Aufbau nur leichtes Abschuppen an der Oberfläche
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> am Rand Teer nachgewiesen



a)



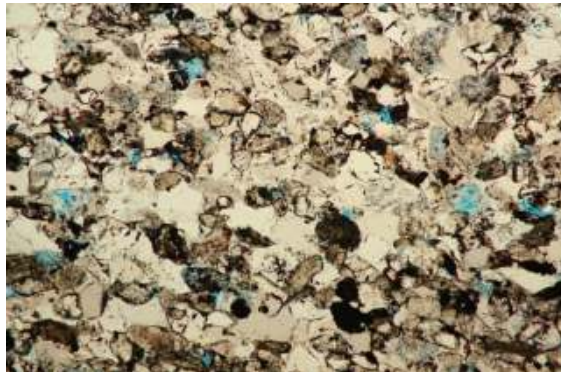
b)



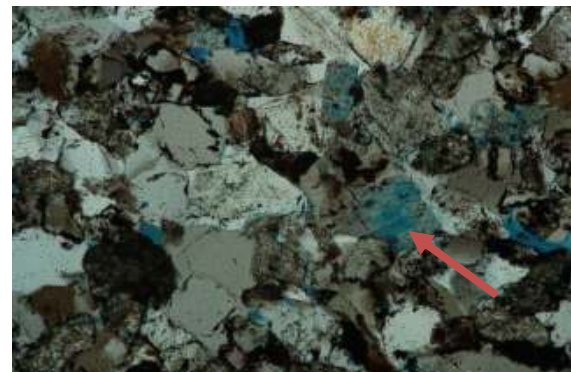
c)



d)



e)



f)

Abb. 14: Makrotyp 4 mit den Proben 2-6d und 2-20d

- a: Übersicht über Probe 2-6d. Schichten sind nur noch an geringen Hell-/Dunkel-Unterschieden erkennbar, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- b: Vereinzelt Hellglimmer, ansonsten ist das Korngerüst durch Quarzanwachssäume stark zementiert, X Nicols, lange Bildkante 1,0 mm
- c: Übersicht über Probe 2-20d mit Teer (oben), II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- d: Unterschiede in der Zementation und Mineralzusammensetzung lassen sich bei einem Vergleich von c und d erkennen;
- e: Am stärksten zementierter Bereich, II Nicols, lange Bildkante 2,2 mm
- f: Neben der Zementation wird die Feldspatlösung deutlich, X Nicols, lange Bildkante 1,0 mm

4.2.2 Porositätskennndaten

Eine Übersicht über die Porositätskennndaten gibt Tab. 16. Es handelt sich dabei um die im Zusammenhang mit der Bestimmung der Porenradienverteilungen ermittelten Werte. Die Tabelle enthält auch die Zuordnung zu den Makrotypen. Dabei fällt auf, dass unterschiedliche Proben eines Typs bereits in ihrer Gesamtporosität teilweise sehr stark variieren, wie z.B. die Proben 2-5b und 2-12b des Makrotyps 2. Erstgenannte Probe weist eine Gesamtporosität von 7,6 Vol%, während letztgenannte eine Gesamtporosität von 14,2 bzw. 15,6 Vol% aufweist. Ähnlich deutlich schwankt auch die Gesamtporosität zwischen den Proben des Typs 3.

Tab. 16: Porositätskennndaten (Quecksilberdruckporosimetrie). Bei dem Kürzel A und B wurde jeweils bei der gleichen Probe eine Doppelbestimmung vorgenommen, um die Variationsbreite zu erfassen. Bei den Proben mit dem Kürzel B und C wurden zwei Teilproben untersucht, von der die Probe B makroskopisch dichter erscheint und die Probe C eine höhere Makroporosität besitzt

Probe-Nr.	Typ	Spez. Porenvolumen [mm ³ /g]	Mittlerer Porendurchmesser [µm]	Rohdichte [g/cm ³]	Reindichte [g/cm ³]	Gesamtporosität [Vol%]
2-5b	2	30,5	1,9	2,49	2,69	7,6
2-6d	4	34,8	0,25	2,42	2,64	8,4
2-11b	1	54,5	1,2	2,31	2,64	12,6
2-12b-A	2	62,5	1,6	2,27	2,65	14,2
2-12b-B	2	69,1	1,5	2,26	2,67	15,6
2-16d	3	29	0,19	2,48	2,67	7,2
2-20b	4	39,9	0,65	2,39	2,64	9,5
2-21b-B	3	43,1	0,57	2,38	2,66	10,3
2-21b-C	3	50	0,82	2,31	2,63	11,6
2-21d-B	3	46,5	0,52	2,36	2,65	11,0
2-21d-C	3	63,4	0,59	2,24	2,62	14,2

Diese Situation spiegelt sich auch in den Porenradienverteilungen wieder, die Abb. 15a-f darstellt.

Grundsätzlich liegt bei jeder Platte ein ausgeprägtes Porenradienmaximum vor, welches unter Berücksichtigung der logarithmischen Skalierung entweder deutlich $<1 \mu\text{m}$ oder $>1 \mu\text{m}$ ist. So sind diese aber nicht spezifisch für die Makrotypen. Beispielsweise zeigt Probe 2-5b des Makrotyps 2 ein ausgeprägtes Maximum wenig oberhalb $0,1 \mu\text{m}$ und deutlich unter $1 \mu\text{m}$ (Abb. 15b). Demgegenüber weist Probe 2-12b des gleichen Typs ein Porenradienmaximum zwischen 1 und $10 \mu\text{m}$ auf (Abb. 15c). Allerdings deutet sich an der Schulter dieses Peaks ein kleineres Maximum zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und $1 \mu\text{m}$ an, so dass ein Zusammenhang vermutet werden kann.

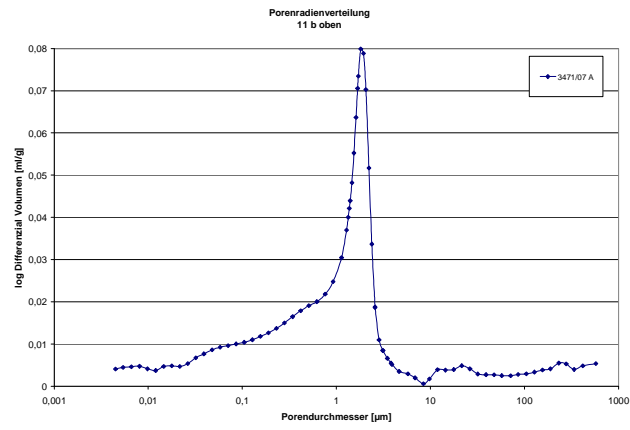
Zwei verschiedene Lagen des Porenradienmaximums zeichnen sich auch im Makrotyp 4 ab. Probe 2-6d besitzt die größte Anzahl von Poren im Bereich zwischen $0,1$ und $1 \mu\text{m}$ (Abb. 15e) und Probe 2-20d zwischen 1 und $10 \mu\text{m}$ (Abb. 15f). Ein weiteres kleines Maximum an der Schulter des Hauptmaximums liegt nicht vor.

Bei Makrotyp 3 weisen die beiden Proben 2-16d (Abb. 15d) und 2-21d (Abb. 16a und b) das gleiche Porenradienmaximum für kleine Porengrößen auf. Dabei war in Probe 2-16d zusätzlich eine grob poröse Lage im Mikroskop detektierbar, deren Verteilung der Poreneingangsradien gesondert nach der grob porösen Lage, des feinporösen Bereichs sowie einer Durchschnittsprobe untersucht wurde.

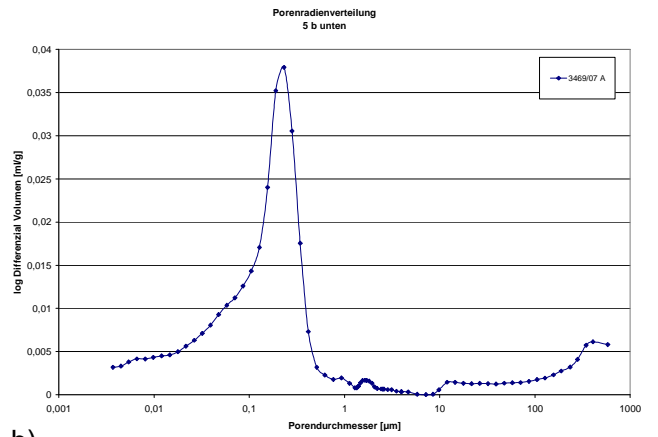
Zugleich erfolgte an dieser Probe sowohl die Porenanalyse des überdeckten und des frei bewitterten Bereichs. Nachfolgende Differenzierung fand in den Diagrammen statt:

- A: die blaue Kurve entspricht der Durchschnittsprobe
- B: die grüne Kurve zeigt die Porenverteilung in der makroskopisch nicht porösen Schicht
- C: die rosa Kurve stellt die Porenverteilung in der makroskopisch porösen Lage dar

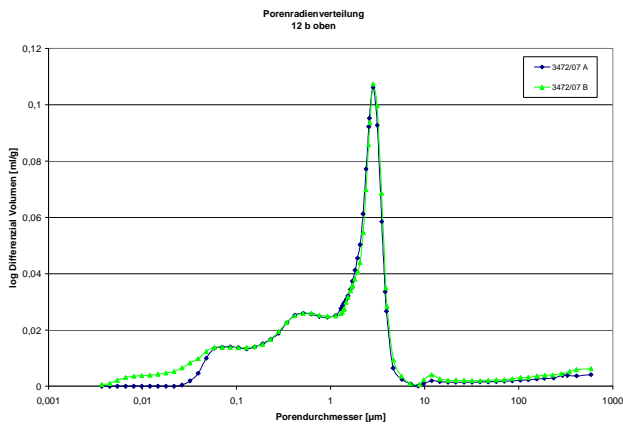
Für die Interpretation ist die Skalierung der Y-Achse zu beachten. Bei dem Vergleich der Diagramme fällt auf, dass das Maximum im feinen Bereich (grüne Kurve) sich nicht verschoben, aber der Porenanteil im frei bewitterten Bereich zugenommen hat. Dies gilt auch für das Maximum zwischen $0,1$ und $1 \mu\text{m}$ im makroskopisch porösen Bereich. Zudem bildete sich im frei bewitterten Bereich ein zweites Maximum im Bereich $>10 \mu\text{m}$ durch die Verwitterungsprozesse aus. Dabei deuten die mikroskopischen Untersuchungen insbesondere auf die Feldspatanlösung bzw. -auflösung hin.



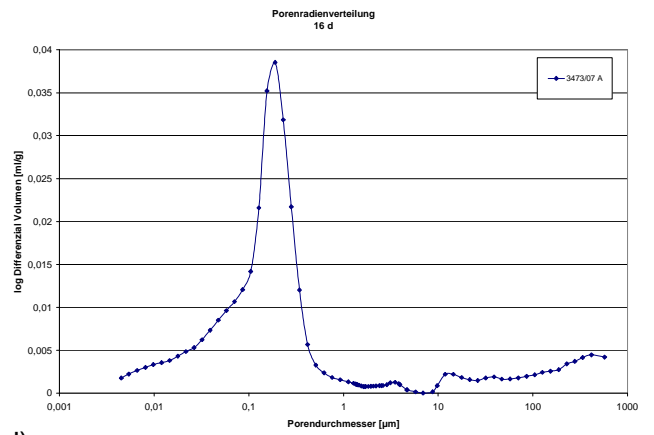
a)



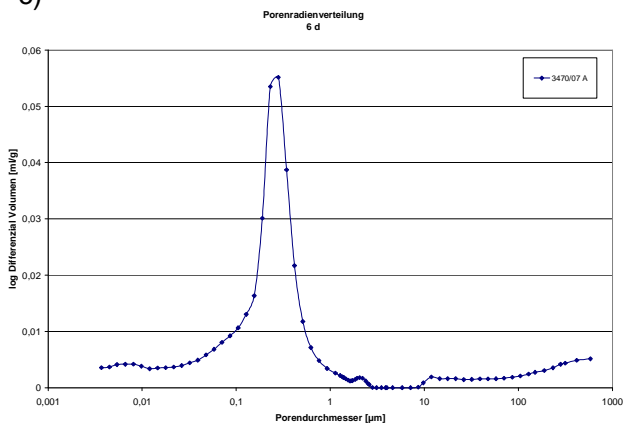
b)



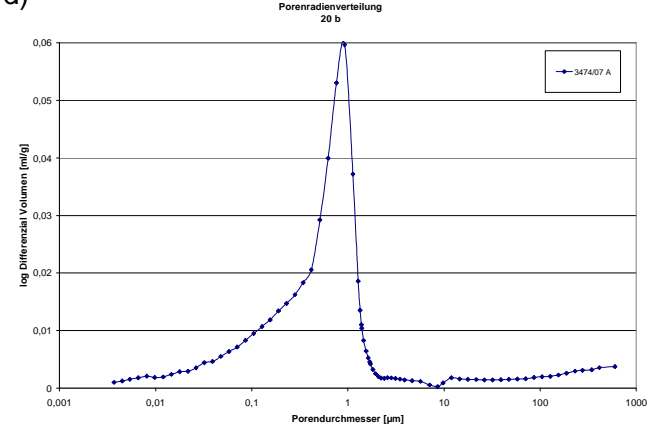
c)



d)



e)



f)

Abb. 15: Porogramme

a: Makrotyp 1, Probe 2-11b

b/c: Makrotyp 2, Probe 2-5b (b) und Probe 2-12b (c)

d: Makrotyp 3, Probe 2-16b

e/f: Makrotyp 4, Probe 2-6d (e) und Probe 2-20d (f)

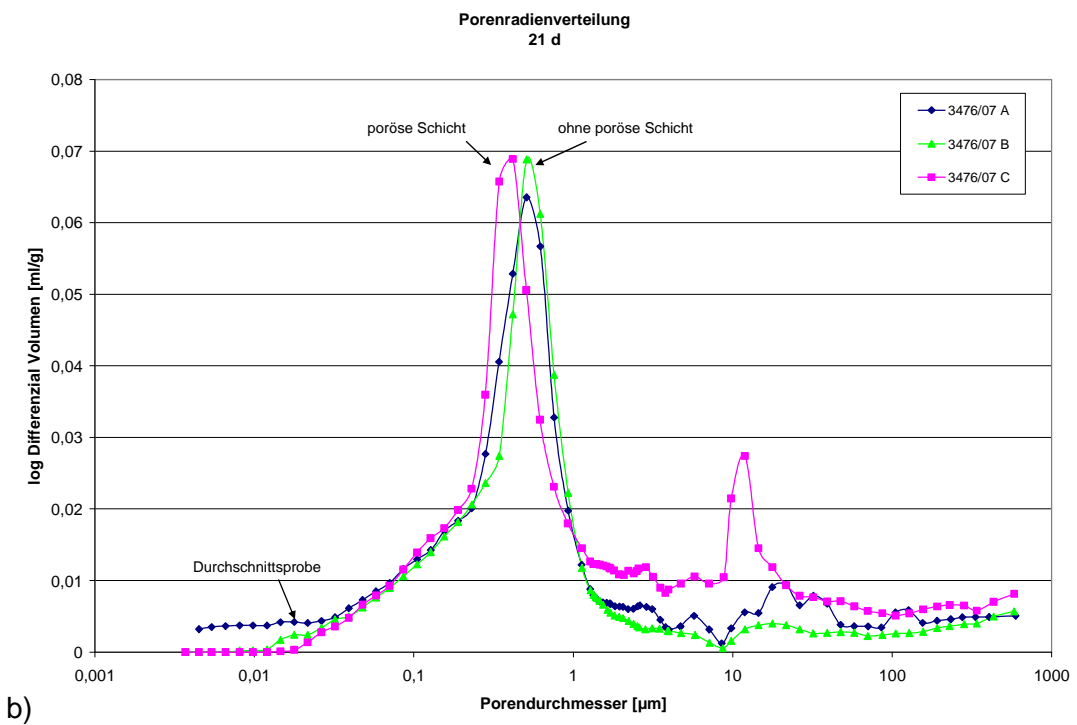
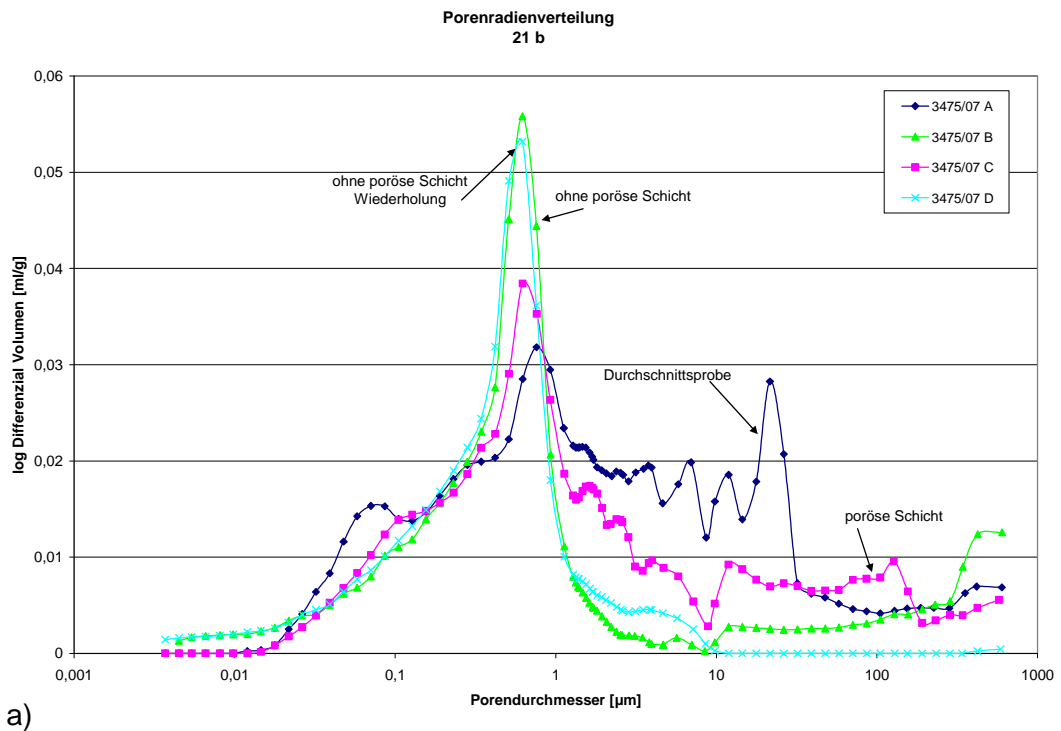


Abb. 16: Porogramme der Probe 2-21d (Makrotyp 3) in makroskopisch unterscheidbaren Bereichen sowie aus der bedeckten und frei bewitterten Plattenhälfte

a: bedeckte Plattenhälfte

b: frei bewitterte Hälfte

4.2.3 Festigkeitsprofile

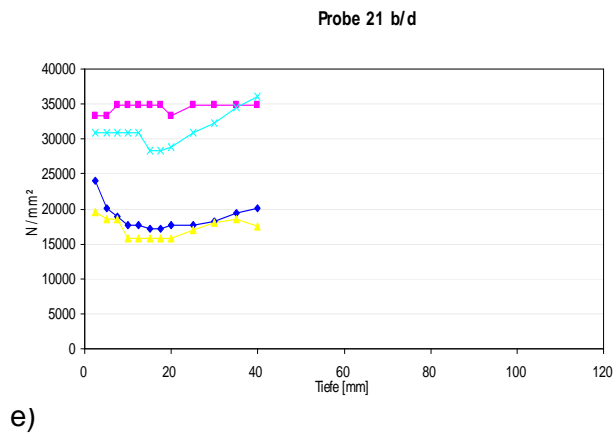
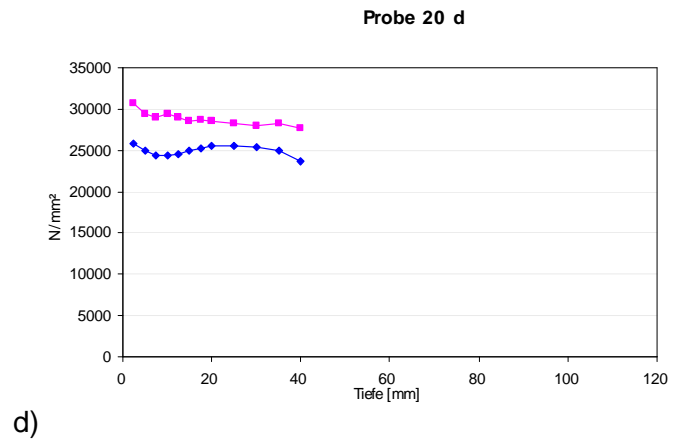
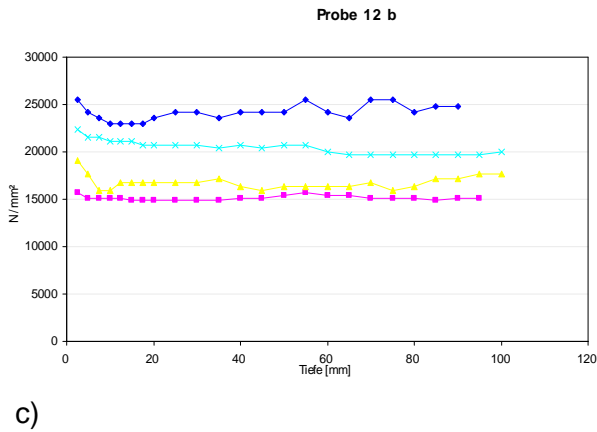
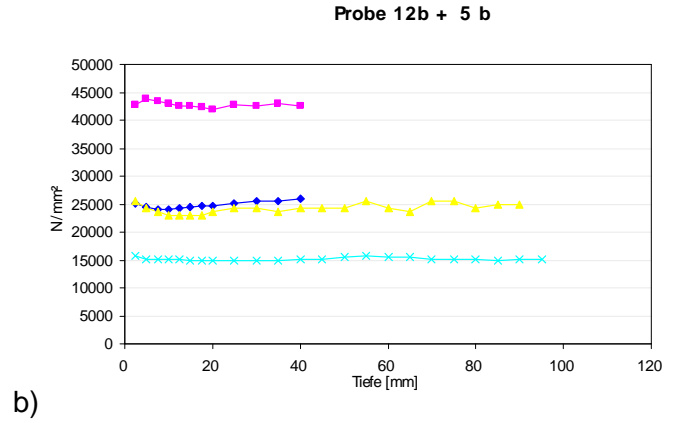
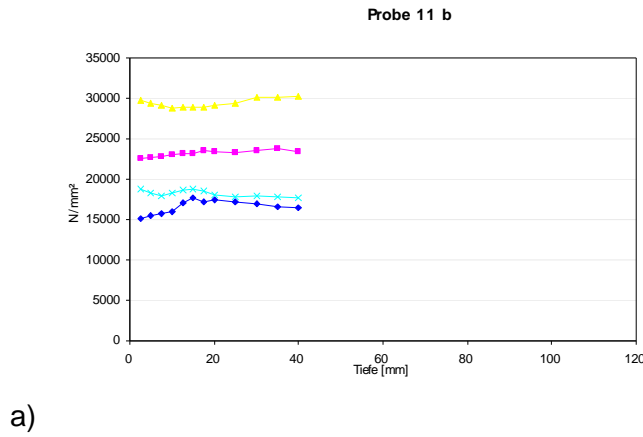
Der dyn. E-Modul wurde als Tiefenprofil senkrecht und parallel zur Schichtung aus fein aufgelösten Messungen der Ultraschalllaufzeit berechnet. Stets erfolgte die Untersuchung der wetterseitigen Unterkante. Um zu überprüfen, ob die nach Aussage vorhandene Kondensatbildung im Bereich des ungedämmten Dachbodens Schäden bzw. Veränderungen des nicht dem Außenklima ausgesetzten Plattenteils hervorgerufen hat, wurden exemplarisch auch Tiefenprofile von einigen Oberkanten senkrecht und parallel zur Schichtung aufgenommen. Tab. 17 gibt eine Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen.

Tab. 17: Proben von denen der dyn. E-Modul aus Ultraschalllaufzeiten berechnet wurde

Proben-Nr.	Typ	E-Modul			
		senkrecht Schichtung (unten)	parallel Schichtung (unten)	senkrecht Schichtung (oben)	parallel Schichtung (oben)
2-5b	2	X	X	-	-
2-6d	4	-	-	-	-
2-11b	1	X	X	X	X
2-12b	2	X	X	X	X
2-16b	3	-	-	-	-
2-20b/d	4	X	X	-	-
2-21b/d	3	X	X	X	X

Abb. 17a bis e umfasst die wichtigsten verschiedenen Situationen unter Berücksichtigung der differenzierten Makrotypen sowie des Vergleichs zwischen frei bewittertem und bedecktem Bereich. Dabei wurden die Werte aus dem bedeckten Bereich an der Horizontalen in Plattenmitte gespiegelt, so dass die Tiefenprofile des frei bewitterten und bedeckten Messabschnittes in den Diagrammen für den direkten Vergleich übereinander liegen. Allen Proben gemeinsam ist die starke Anisotropie parallel und senkrecht zur Schichtung.

Bei der Probe 2-11b ist erkennbar, dass die Teilproben von der bewitterten Unterkante einen geringeren dyn. E-Modul sowohl senkrecht als auch parallel zur Schichtung besitzen als die der dachbodenseitigen Oberkante. Ein Elastizitätsabfall innerhalb des jeweiligen Profils zur Außenkante hin, wie es häufig bei Mauerwerken aus stark verwittertem Naturwerkstein vorkommt, ist nicht detektierbar (Abb. 17b).



Legende:

- a) 2-11b: rosa - senkrecht zur Schichtung, frei bewittert
blau - parallel zur Schichtung, frei bewittert
gelb - senkrecht zur Schichtung, bedeckt
türkis - parallel zur Schichtung, bedeckt
- b) 2-5b: rosa - senkrecht zur Schichtung, frei bewittert
blau - parallel zur Schichtung, frei bewittert
2-12b: gelb - senkrecht zur Schichtung, bedeckt
türkis - parallel zur Schichtung, bedeckt
- c) 2-12b: blau - senkrecht zur Schichtung, frei bewittert
rosa - parallel zur Schichtung, frei bewittert
türkis - senkrecht zur Schichtung, bedeckt
gelb - parallel zur Schichtung, bedeckt
- d) 2-20d: rosa - senkrecht zur Schichtung, frei bewittert
blau - parallel zur Schichtung, frei bewittert
gelb - parallel zur Schichtung, bedeckt
- e) 2-21b/d: rosa - senkrecht zur Schichtung, frei bewittert
blau - parallel zur Schichtung, frei bewittert
türkis - senkrecht zur Schichtung, bedeckt
gelb - parallel zur Schichtung, bedeckt

Abb. 17: tiefenabhängiger dyn. E-Modul berechnet aus Ultraschallmessungen an Plattenscheiben

Die Proben 2-5b und 2-12b wurden in einem Diagramm dargestellt, da sie makroskopisch den Typ 2 repräsentieren. Zwischen beiden Proben bestehen große Unterschiede im dynamischen E-Modul. Probe 2-12b passt diesbezüglich besser zu Probe 2-11b des Typs 1 (Abb. 17b). Platte 2-5b erreichen den höchsten dynamischen E-Modul.

Von Probe 2-12 wurde ein Tiefenprofil auf der frei bewitterten Seite und der regengeschützten bedeckten Plattenseite senkrecht und parallel zur Schichtung aufgenommen. Unten ist ein höherer E-Modul als oben feststellbar. Der Unterschied zwischen der Messung parallel und senkrecht zur Schichtung ist unten größer als oben (Abb. 17c).

Probe 2-20d (Abb. 17d) repräsentiert den Typ 4 (massiv). Dieser liegt von den Festigkeitswerten in der Größenordnung von Typ 1 (Probe 11b).

Auch von Probe 21b (Typ 3) wurde zwischen „unten“ und „oben“ differenziert. Unten ist der berechnete dynamische E-Modul senkrecht zur Schichtung größer als oben. Zwischen den Messwerten parallel Schichtung sind die Unterschiede etwas geringer (Abb. 17e).

4.2.4 Hygrische Quellung vor und nach Behandlung

Die hygrische Dilatation wurde sowohl an bewitterten als auch bedeckten Plattenhälften vor und nach Behandlung mit einem Quellminderer bestimmt. Aufgrund der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten musste eine Auswahl getroffen werden, die Tab. 18 wiedergibt.

Tab. 18: Untersuchung der hygrischen Quellung vor und nach Behandlung mit einem Quellminderer

Proben-Nr.	Typ	hygrische Dilatation			
		vor Behandlung		nach Behandlung	
		frei bewittert	bedeckt	frei bewittert	bedeckt
2-5b	2	-	-	-	-
2-6d	4	X	-	X	-
2-11b	1	X	X	X	X
2-12b	2	X	X	-	-
2-16b	3				
2-20b/d	4	X	X	X	-
2-21b/d	3	X	-	X	-

Die Messung erfolgte an vier Punkten mit zunehmender Entfernung vom Plattenrand senkrecht zur Schichtung bei Unterwasserlagerung der Proben. Dies entspricht einem „worst case“ Szenario. Bei der Behandlung mit Quellminderer wurden dessen Verbrauch und Eindringtiefe festgehalten (Tab. 19).

Tab. 19 Wirkstoffaufnahme von Quellminderer durch kapillares Saugen

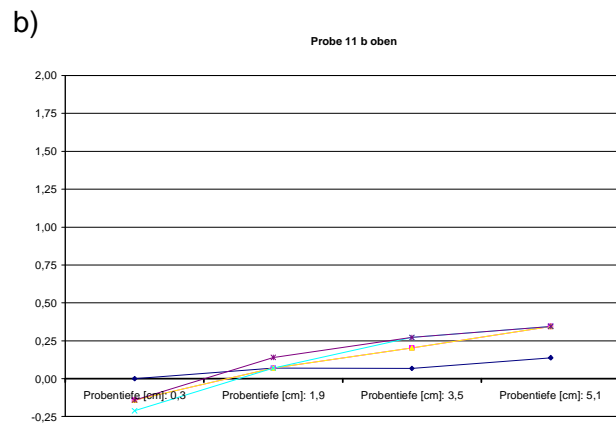
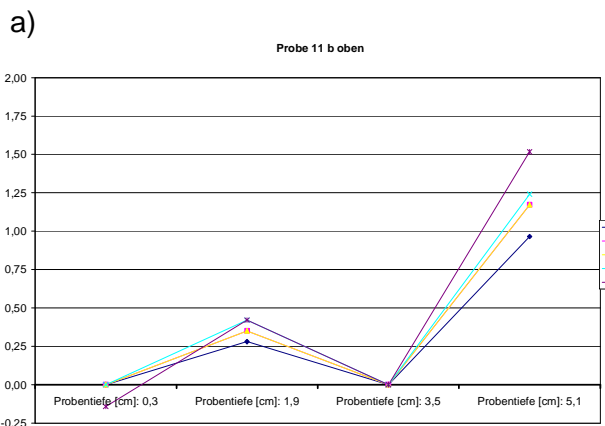
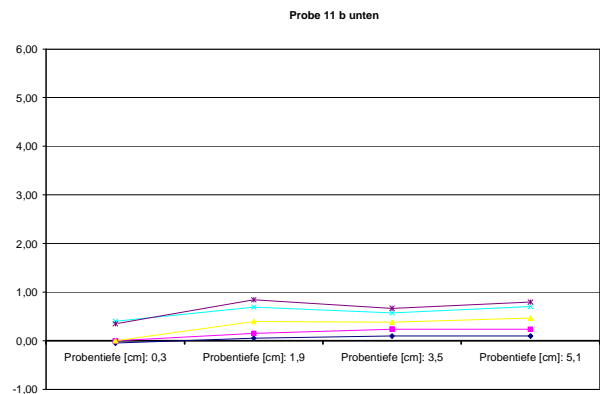
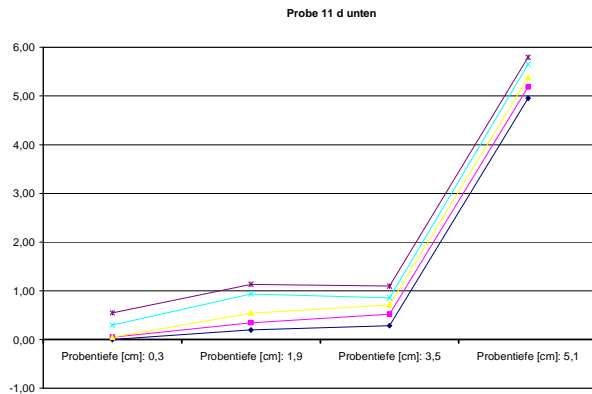
Probe	Typ	Art	Fläche [cm ²]	Verbrauch [l/m ²]	Eindringtiefe [mm]
2-6d	4	frei bewittert	46,5	0,4	19
2-11b	1	frei bewittert	42,6	0,6	18
2-11b	1	bedeckt	45,5	0,9	14
2-12b	2	frei bewittert	50,4	1,0	20
2-21d	3	frei bewittert	32,5	0,8	17

Der Makrotyp 1 mit der untersuchten Probe 2-11b zeigt am vierten Messpunkt der frei bewitterten Fläche bereits nach 10 Minuten Messdauer einen außergewöhnlich hohen Quellbetrag von nahezu 6 mm/m, wie Abb. 18a zu entnehmen ist. Als kritisch ist bereits ein Betrag von 0,5 mm/m zu bewerten. Zum Plattenrand hin nimmt das Quellmaß deutlich ab, bleibt aber für den 24-Stunden-Ablesezeitpunkt für sämtliche Messpunkte über dem kritischen Wert. Für die kurzen Zeitintervalle nimmt der Quellbetrag sukzessive mit Verringerung der Messdauer und zum Plattenrand hin ab.

Durch die Behandlung der Teilprobe mit einem Quellminderer konnte das Quellmaß im Hinblick auf den hohen Betrag drastisch reduziert werden. Auch an den anderen Messpunkten liegt eine Reduzierung vor, allerdings kann das Quellmaß nur bis zu etwa eine Stunde unter dem kritischen Wert gehalten werden (Abb. 18b).

Am bedeckten Plattenrand der Probe 2-11b liegt im unbehandelten Zustand eine vergleichbare Situation vor (Abb. 18c). Auch hier dehnt sich die Probe an dem am weitesten vom Plattenrand entfernten Messpunkt am stärksten, wobei die Dehnung maximal 1,5 mm/m beträgt. Demgegenüber tritt am Plattenrand im Zeitraum zwischen 5 und 24 Stunden eine geringe Kontraktion auf.

Nach der Behandlung mit Quellminderer sinkt der Dehnbetrag an sämtlichen Messpunkten sowie über den gesamten Messzeitraum unter den kritischen Wert von 0,5 mm/m (Abb. 18d). Am Plattenrand ist jedoch eine Kontraktion mit zunehmender Messdauer detektierbar. Der Maximalwert liegt bei -0,25 mm/m.



a)

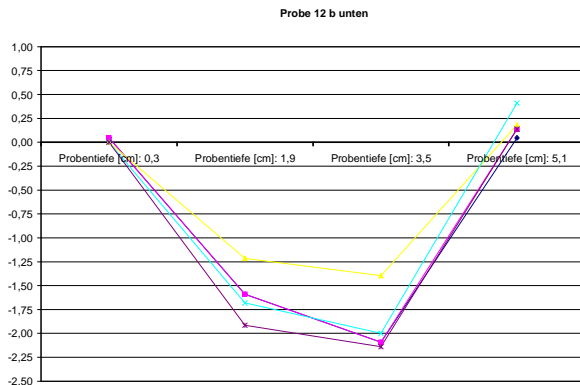
b)

Abb. 18: Makrotyp 1 mit Probe 2-11d (frei bewittert) vor (a) und nach (b) der Behandlung mit Quellminderer sowie Probe 2-11b (bedeckt) vor (c) und nach (d) der Behandlung mit Quellminderer

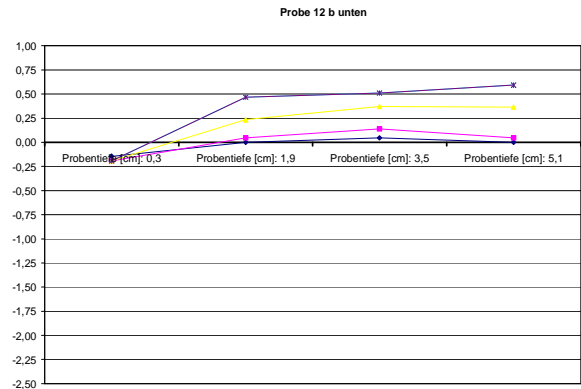


Die untersuchte Probe 2-12b des Makrotyps 2 fällt im frei bewitterten Bereich hinsichtlich ihres Dehnverhaltens völlig aus dem Rahmen, da es am zweiten und dritten Messpunkt zu einer Kontraktion des Materials bis zu -2,25 mm/m kommt, wie Abb. 19a dokumentiert. Der vierte Messpunkt zeigt demgegenüber eine Dehnung, die aber selbst nach 24 Stunden noch nicht 0,5 mm/m erreicht. Durch die Behandlung mit Quellminderer kehrt sich der Prozess um und es kommt an allen Messpunkten zu einer gleichsinnigen Dehnung, die nach 24 Stunden z. T. 0,5 mm/m überschreitet (Abb. 19b).

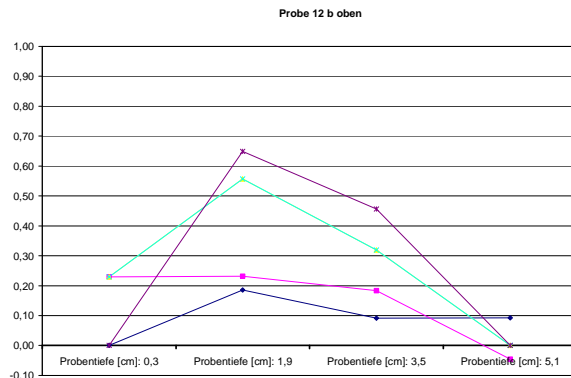
Im bedeckten Bereich dieser Platte liegt im unbehandelten Zustand hingegen eine Dehnung mit den stärksten Beträgen am zweiten und dritten Messpunkt vor, welche z.T. nach 5 Stunden 0,5 mm/m überschreitet (Abb. 19c).



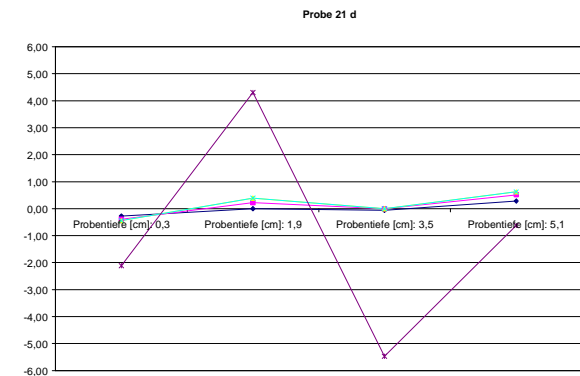
a)



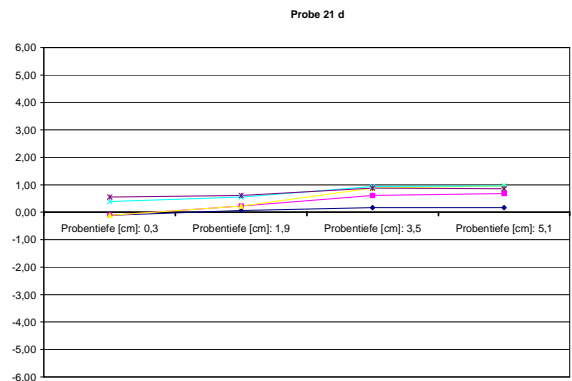
b)



c)



d)



e)

Abb. 19: Makrotyp 2 mit Probe 2-12b (frei bewittert) vor (a) und nach (b) der Behandlung mit Quellminderer sowie Probe 2-12b (bedeckt) vor (c) der Behandlung mit Quellminderer. Makrotyp 3 mit Probe 2-21d (frei bewittert) vor (d) und nach (e) der Behandlung mit Quellminderer

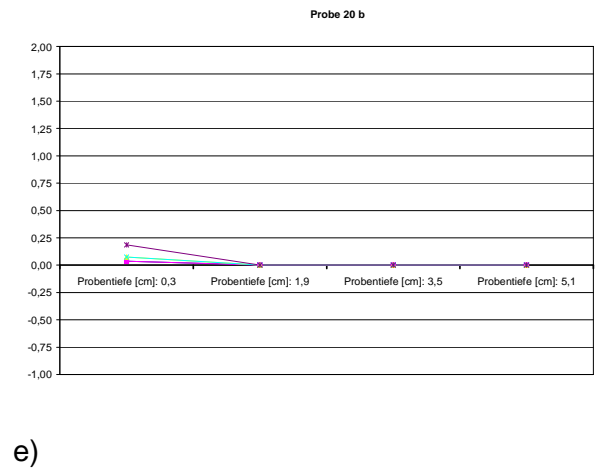
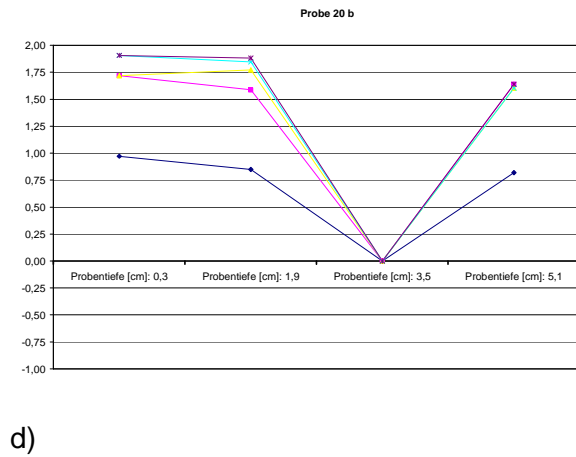
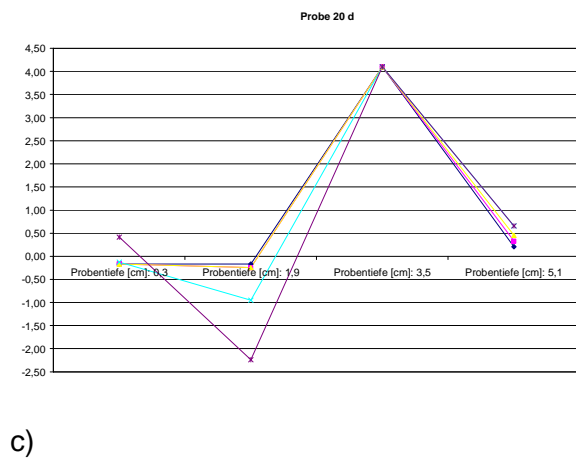
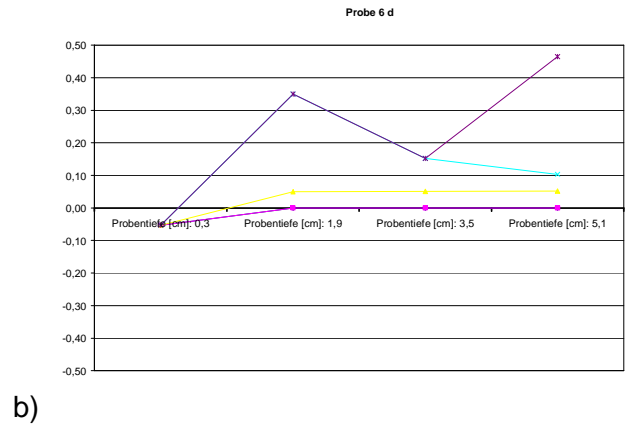
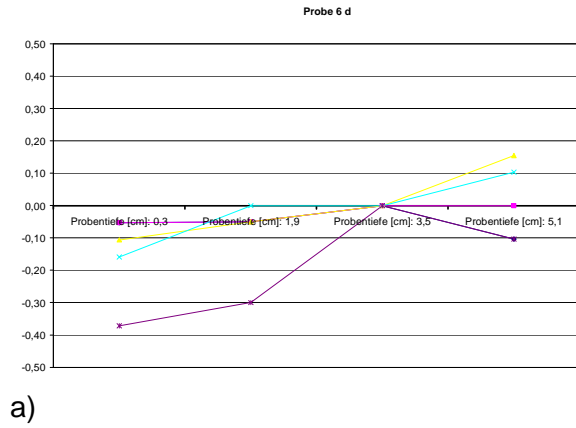


Abb. 20: Makrotyp 4 mit Probe 2-6d (frei bewittert) vor (a) und nach (b) der Behandlung mit Quellminderer sowie die unbehandelte und frei bewitterte Probe 2-20d (c). Probe 2-20b (bedeckt) vor (d) und nach (e) der Behandlung mit Quellminderer

Auch der untersuchte frei bewitterte, unbehandelte Teil der Probe 2-21d des Makrotyps 3 lässt eine kombinierte Dehnung und Kontraktion erkennen, wobei die gegensinnigen Bewegungen im Zeitintervall zwischen 5 und 24 Stunden extrem zunehmen (Abb. 19d). Dabei erreicht die Dehnung einen Betrag von ca. 4 mm/m. Die Kontraktion liegt bei ca. 5 mm/m. Durch die Behandlung mit Quellminderer entsteht eine gleichgerichtete Dehnung, die aber im Endeffekt bis auf 1 mm/m steigt (Abb. 19e).

Die Proben 2-6d und 2-20b bzw. 2-20d des Makrotyps 4 lassen im Prüfzeitraum deutliche Veränderungen erkennen, obwohl dies aufgrund ihres massiven Aufbaus ohne oder mit nur sehr wenigen plattigen Spaltflächen nicht zu erwarten wäre. Probe 2-6d zeigt zunächst eine Kontraktion und an bestimmter Stelle eine Dehnung (Abb. 20a). Nach der Behandlung wird daraus eine geringfügige Quellung mit einem Maximum selbst nach 24 Stunden Prüfung unter 0,5 mm/m (Abb. 20b).

Die frei bewitterte, unbehandelte Probe 2-20d lässt ebenfalls eine Kombination aus Quellung und Kontraktion erkennen (Abb. 20c). Letztere umfasst nach 24 Stunden -2,0 mm/m und findet sich am zweiten Messpunkt vom Rand aus gesehen. Am dritten Messpunkt tritt die Quellung auf mit 4 mm/m bereits nach 10 Minuten Messdauer.

Im dachbodenseitigen, durch andere Platten überdeckten Bereich weist die unbehandelte Probe 2-20b eine hygrische Dehnung von fast 2 mm/m auf (Abb. 20d). Dieser Betrag kann durch den Quellminderer drastisch reduziert werden (Abb. 20e).

4.2.5 Testbeschichtung/imprägnierende Hydrophobierung

Um die Wasseraufnahme der Dachsteinplatten zu reduzieren, wurden verschiedene, für Denkmäler geeignete Beschichtungsmuster auf Siliconharzbasis hergestellt sowie imprägnierende Hydrophobierungen getestet. Die Farbmuster gibt Abb. 21 wieder. Es handelt sich dabei um:

- Historic Schlämmasur mit Gesteinsmehl: rechte Seite oben
- Historic Lasur, eingefärbt: rechte Seite unten
- Siliconharzfarbe LA pigmentiert, 2 Farbtöne: linke Seite unten
- Siliconharzfarbe LA farblos, wenige Pigmente zugesetzt: linke Seite oben

Vor der Beschichtung erfolgte eine Reinigung der Platte mit einem Partikelstrahlverfahren (rotec-Verfahren). Durch die Verwendung von Siliconharzbeschichtungssystemen ist ein reversibler Regenschutz gegeben. Bei dem ersten Produkt handelt es sich um eine halblasierende Siliconharzfarbe mit Feinsandfüllung, der zusätzlich Gesteinsmehl einer gemahlene Solling-Dachsteinplatte zugesetzt wurde. Halblasierend ist auch die Historic Lasur, die mit entsprechend ausgewählten Pigmenten eingefärbt wurde. Diese beiden Materialien sind so konfektioniert, dass sie keine deckende Beschichtung darstellen, sondern sich sehr gut dem Untergrund anpassen lassen. Demgegenüber handelt es sich bei den beiden anderen Materialien um pigmentierte Fassadenfarben.



Abb. 21: Testbeschichtungen (Erläuterung siehe Text)

Darüber hinaus wurden Teilproben der Dachsteinplatten mit zwei verschiedenen imprägnierenden Hydrophobierungsmitteln versehen:

- Funcosil SNL
- Funcosil FC

Bei erstgenanntem Hydrophobierungsmittel handelt es sich um eine hydrophobierende Imprägnierung in Lösemittel. Das andere Produkt ist lösemittelfrei und besitzt eine cremeförmige Konsistenz. Da die Dachsteinplatten vor ihrem Einbau formatiert, also neue Bruchflächen erzeugt wurden, musste die hydrophobierende Imprägnierung den gesamten Querschnitt umfassen, da eine Nachhydrophobierung nach der Formatierung unmittelbar vor dem Einbau als nicht praktikabel angesehen wurde.

Die Probekörper wurden gebrochen und auf den Querbruch Wassertropfen aus einer Mikropipette gegeben. Anhand des Kontaktwinkels konnte grob die Eindringtiefe des Hydrophobats ermittelt werden. Dabei zeigte sich, dass bei der gebräuchlichen Applikationsmethode keine Probe völlig durchtränkt wurde.

4.2.6 Entfernung von Teer

Viele der Dachsteinplatten wurden mit Teer behandelt, vermutlich als zusätzlichen Witterungsschutz oder aber als Abdichtung zur Dachbodenseite. Sofern die Behandlung mit einem Steinschutzmittel in Betracht gezogen wird, muss der Teer entfernt werden. Da PAKs zu erwarten sind, müssen entsprechende Vorsichtsmaßnahmen für den Ausführenden getroffen werden. Der aufzufangende Abtrag ist als Sondermüll zu betrachten.

Verschiedene labortechnische Versuche, den Teer zu lösen (z.B. Xylol), waren nicht erfolgreich, da die Einwirkzeit in Abhängigkeit vom Teerbelag relativ lang sein kann und zum anderen ein Teil in den Porenraum transportiert werden kann.

Die Entfernung des Teers könnte eventuell mit einer Mischung aus Lösemittel V101 und Rofaplast Stellmittel im Verhältnis 93:7 erfolgen. Dieses bildet eine Creme durch die eine lange Einwirkdauer gewährleistet ist. Sie dient dem Anlösen von Teer, der dann mit einem Spachtel entfernt werden kann. Sind noch Reste vorhanden, dann sollte dies ein zweites Mal durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise ist an weiteren Ausbauproben zu testen.

Darüber hinaus wurden Versuche mit dem rotec-Verfahren durchgeführt. Nachdem man Tropfnasen und dickere Beläge mechanisch entfernt hat (abschaben), kann der Teerbelag mit diesem Reinigungsverfahren entfernt werden.

Teer sollte zwingend von den Platten entfernt werden, da die mit Teer behandelten Flächen zwar wasserundurchlässig sind, aber an anderer Stelle Wasser eindringt, sich unkontrolliert im Gefüge verteilt und nicht über die mit Teer behandelten Flächen abgegeben werden kann. Der hohe Anteil an Teer war bei der Erstinaugenscheinahme nicht bekannt bzw. auch nicht sichtbar, da 2/3 jeder Dachsteinplatte durch die nächstfolgenden überdeckt wurden.

4.3 Bauwerksfremdes Austauschmaterial

Als Ersatz für das aussortierte, nicht wieder verwendbare Material stand Ausbaumaterial von anderen Objekten, von denen gebrauchstaugliche Platten nach der Neueindeckung mit anderem Material vom Dachdeckerbetrieb gesichert und gelagert wurden, zur Verfügung. Tab. 20 gibt einen Überblick über die labortechnischen Untersuchungen an 6 ausgewählten Platten.

Tab. 20: Untersuchungen an dem Ersatzmaterial

Proben-Nr.	Typ	Dünnschliff	E-Modul-Profil	Dilatationsprofil vor Behandlung	Dilatationsprofil nach Behandlung	Quecksilberdruckporosimetrie	W-Wert
3-1b	-	X	X	X	-	X	X
3-2b	-	X	X	X	-	X	X
3-3b	-	X	X	X	-	X	X
3-4b	-	X	X	X	-	-	X
3-5b	-	X	X	X	-	X	X
3-6b	-	X	X	X	-	X	X

4.3.1 Mineralogie und Gefüge

Im Unterschied zu den Ausbauproben ist das Lagengefüge weniger gut ausgeprägt und ähnelt am stärksten dem Makrotyp 3 und 4. Es dominieren gröber körnige quarzreiche Lagen, in denen zumeist deutliche authigene Quarzanwachssäume sichtbar sind, die häufig keine oder nur einen geringen Anteil mikroskopisch sichtbarer Restporen hinterlassen haben.

Tab. 21 gibt einen Überblick über die wichtigsten qualitativ erfassbaren Merkmale der Platten 3-1b und 3-2b. Beide Proben lassen noch schwach ein Lagengefüge erkennen, wobei das der Probe 3-2b tendenziell geringfügig stärker ausgebildet erscheint. Die an der Oberfläche bewachsene Platte 3-1b weist in der ehemals frei bewitterten Fläche eine beginnende Schalenbildung (Riss) auf, die von der Vorderkante ausgeht (Abb. 22a).

Tab. 21: Mikroskopische Beschreibung der Ergänzungsplatten 3-1b und 3-2b

Probennr.	Minerale/Gefüge	Beschreibung
3-1b	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (100 - 150 µm Ø in quarzdominierten Lagen) Feldspat größtenteils alteriert Glimmeranteil erkennbar aber gering (150 - 250 µm Länge) weitere Schichtsilikate, möglicherweise Chlorid
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> schwaches Lagengefüge sichtbar Quarzkörner weitergewachsen, dazwischen kaum Poren erkennbar sekundäre, mikroskopisch sichtbare Porosität durch Feldspatlösung
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> Bewuchs an der Oberseite und Vorderkante (unten), vor allem Algen Ablösung einer dünnen Schale am Rand
3-2b	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (100 - 150 µm in gröberen Lagen) Glimmer, weitere feinkörnige Schichtsilikate Feldspat (stark alteriert)
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> plattiges Gefüge, tendenziell stärker als in 3-1b sekundäre Poren durch Feldspatlösung inselartig verwachsene Quarze die Quarzkornverwachsungen überbrücken nur teilweise die feinkörnigen braunen Lagen es ist eine hohe sichtbare Porosität vorhanden
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> z.T. Bewuchs an Vorder- und Oberseite

Abb. 22b zeigt das typische Gefüge in stärkerer Vergrößerung. Die im Durchlicht hellen Körner bilden den Verbund aus Quarzkörnern. Durch dunkle Säume ist z.T. noch die ursprüngliche Konform unmittelbar nach der Ablagerung erkennbar. Durch die Neubildung von Anwachsäumen entstanden stark verkieselte Aggregate aus mehreren Körnern. Dazwischen befinden sich andere Körner, die keine randlichen Zemente aufweisen, aber Partikellösungsporen aufgrund des Feldspatzerfalls. Diese Bereiche überbrücken keine, miteinander verwachsenen Quarzkörner, so dass weiterhin Dehnungen stattfinden können.

Ähnlich stellt sich die Gefügeausbildung in Platte 3-2b dar, wie die Übersicht in Abb. 22c dokumentiert. Auch darin ist das anhand von Farbunterschieden makroskopisch sichtbare Lagengefüge kaum noch nachvollziehbar. Unterhalb der Bildmitte findet sich eine stärker verkieselte, einheitlicher erscheinende, horizontale Lage (blauer Pfeil). Eine feiner körnige Lamelle mit im Durchlicht dunkler wirkenden Mineralen (Schichtsilikate, Eisenverbindungen) tritt nahe dem oberen Bildrand auf (roter Pfeil).

Den stärker verkieselten Bereich zeigt Abb. 22d. Auch hier ist die Verwachsung der Quarzkörner nachvollziehbar. Die mikroskopisch sichtbaren Poren besitzen maximal die Größe der Körner und weisen häufig noch stark angelöste Relikte auf, bei denen es sich wiederum vorwiegend um Feldspäte handelt. Dementsprechend stellen sie sekundäre Intrapartikelporen dar.

Muskovite treten in dieser Platte nur sehr unregelmäßig verteilt auf, wie z.B. nahe der Plattenoberfläche (Abb. 22e). Darin lässt sich eine Einregelung der länglichen Kristalle nachvollziehen. Die Oberfläche weist noch deutliche Reste eines Bewuchses aus der vorigen Einbausituation in dem anderen Objekt auf. Die Vergrößerung mit gekreuzten Polarisatoren (Abb. 22f) zeigt zum einen die Zerstörung der Muskovite durch Aufplatzen entlang der bevorzugten Spaltrichtung (rechte obere Bildseite) und zum anderen wiederum die deutlichen Anwachssäume um die Minerale mit den grauen Interferenzfarben. Das Altkorn ist zumeist noch an der feinkörnigen Durchstäubung erkennbar.

Platte 3-3b lässt, verglichen mit den bisher beschriebenen Ergänzungsplatten, ein deutlich unregelmäßigeres Gefüge bei gleichem qualitativen Mineralbestand erkennen, von dem Abb. 23a einen Eindruck vermittelt. Die makroskopisch anhand der Farbunterschiede differenzierbaren Lagen erscheinen im Polarisationsmikroskop bei parallelen Polarisatoren nicht mehr ohne weiteres unterscheidbar. Zumindest besteht das Gefüge im unteren Bildbereich vorwiegend aus Quarz- und in geringerem Umfang aus Feldspatkörnern. Oberhalb dieser Zone findet sich ein deutlicher Hohlraum, der größer ist als die mittlere Korngröße der umgebenden Körner. Damit kann es sich nicht um den Zerfall von Feldspäten handeln, die ansonsten die sekundäre Intrapartikelporosität verursachen.

Abb. 23b gibt einen solchen Hohlraum von anderer Stelle stärker vergrößert wieder. In diesem Bereich sind die sichtbaren Muskovite durch Auffächern entlang ihrer Vorzugsspaltrichtung zerstört.

Einen Ausschnitt aus dem stärker verkieselten Bereich ohne größere Hohlräume, aber mit Partikellösungsporen zeigt Abb. 23c. Die zumeist einen bräunlichen Saum aufweisenden Quarzalkörner lassen breite authigene Anwachssäume erkennen, die zu einem Zusammenwachsen der Körner führten. Dazwischen blieben keine mikroskopisch sichtbaren Restporen erhalten. Diese größeren Areale werden durch andere Körner ohne Anwachssäume unterbrochen.

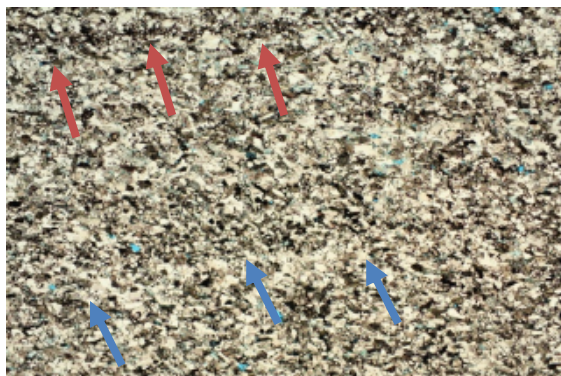
In der stärkeren Vergrößerung mit gekreuzten Polarisatoren in Abb. 23d sind an zwei Körnern die authigenen Anwachssäume mit Pfeilen (rot und blau) markiert.



a)



b)



c)



d)



e)

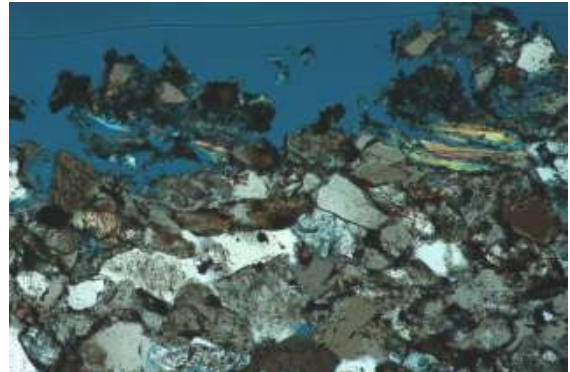


Abb. 22: Ergänzungsplatten 3-1b und 3-2b

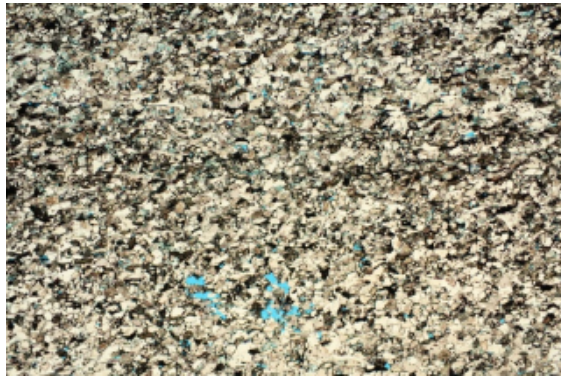
- a: Probe 3-1b, Übersicht, beginnende Schalenbildung am Rand, frei bewitterte Oberfläche: oben; II Nicols; lange Bildkante 8,5 mm
- b: gleiche Probe, Verkieselung und sekundäre Porosität; II Nicols; langer Bildkante 2,2 mm
- c: Probe 3-2b, Übersicht; II Nicols; lange Bildkante 8,5 mm; d: Ausschnitt, Verkieselung; II Nicols; lange Bildkante 2,2 mm
- e: Bewuchs auf der Oberseite; II Nicols, lange Bildkante 2,2 mm
- f: Bewuchs, Muskovit; X Nicols, lange Bildkante 1,0 mm

Auch die Ergänzungsplatte 3-4b weist Partikellösungsporen und unregelmäßig verteilte Hohlräume auf, wie Abb. 23e und Tab. 22 zu entnehmen ist. Makroskopisch sind die einzelnen differenzierbaren Lagen breiter als bei den anderen Proben. Dies äußert sich auch in der mikroskopischen Übersichtsaufnahme. Während im unteren Bildteil eine stärker zementierte Lage dargestellt ist, liegt im oberen Bildteil der weniger zementierte, feiner körnige Bereich vor. Auch darin finden sich Quarzkörner mit authigenen Anwachssäumen, die untereinander verwachsen sind. Sie überbrücken aber nicht die gesamte Lage, da der Anteil an Feldspäten und lichtmikroskopisch nicht differenzierbaren Schichtsilikaten zu groß ist. Diese erscheinen im Durchlicht braun.

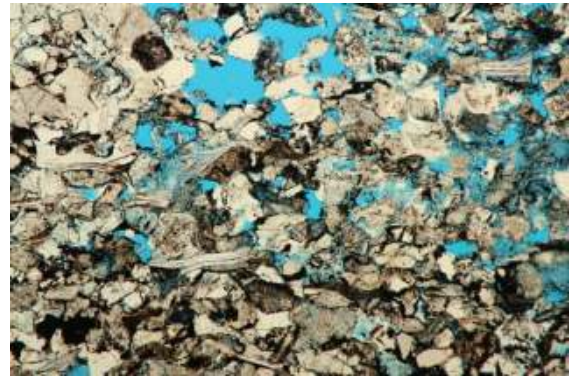
Tab. 22: Mikroskopische Beschreibung der Ergänzungsplatten 3-3b und 3-4b

Probennr.	Minerale/Gefüge	Beschreibung
3-3b	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (100 - 150 µm Ø) Feldspat alteriert Muskovit, z.T. geknickt, höherer Anteil in den feiner körnigen Lagen als in Platte 3-1b und 3-2b
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> deutlich inhomogener als Platte 3-1b und 3-2b Lagengefüge erkennbar punktuell größere Lösungsporen über den ganzen Dünnschliff verteilt Muskovite ein geregelt
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> Bewuchs auf der freibewitterten Außenseite, vermutlich auch Moos
3-4b	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> Quarz (100 - 200 µm Ø im Qz-dominierten Bereich) Feldspat alteriert (Plagioklas aber erhalten) geringer Glimmeranteil
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> Lagengefüge schwach erkennbar durch ein geregelte Muskovite Partikellösungsporen und auch größere Hohlräume (z.B. 150 - 200 und 300 - 350 µm) erkennbar
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> an der Vorderkante Bewuchs (einzelne Körner aus dem Verband gelöst und durch den Bewuchs schwach stabilisiert)

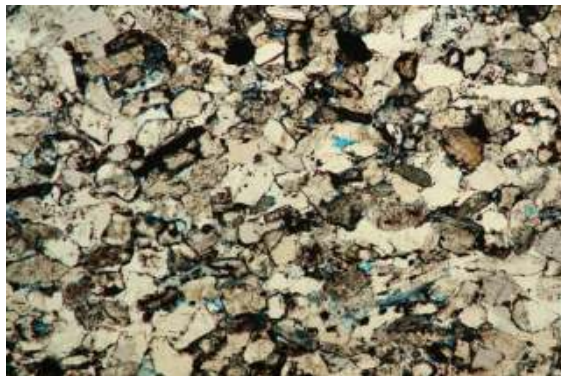
Abb. 23f dokumentiert exemplarisch einen stärker verkieselten Bereich mit Vorherrschen von Quarz- und Feldspatkörnern. Erkennbar sind auch die beschriebenen größeren Hohlräume. Diese enthalten noch nicht gelöste Relikte der ursprünglichen Körner. Dabei handelt es sich vorwiegend um Feldspatreste. Im linken Bildbereich trat demzufolge eine etwas größere Anhäufung von Kalifeldspat auf. Muskovite fehlen in diesem Ausschnitt. Ihr Anteil ist sehr gering.



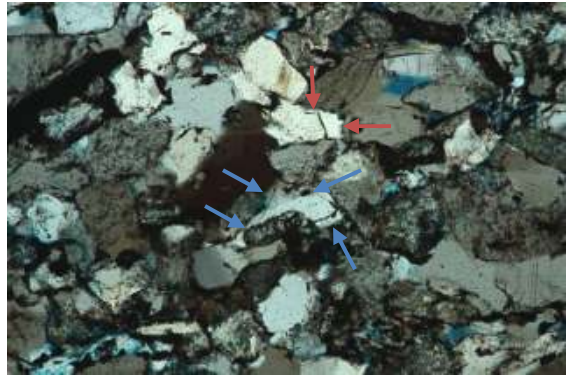
a)



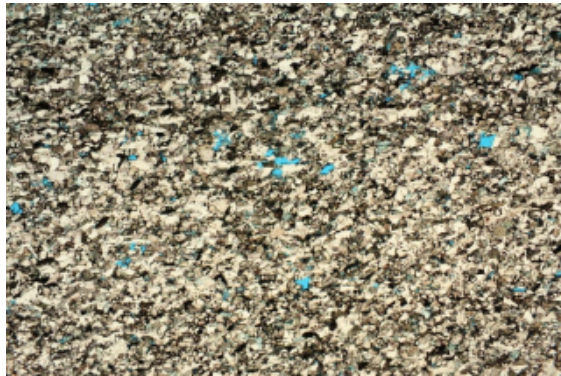
b)



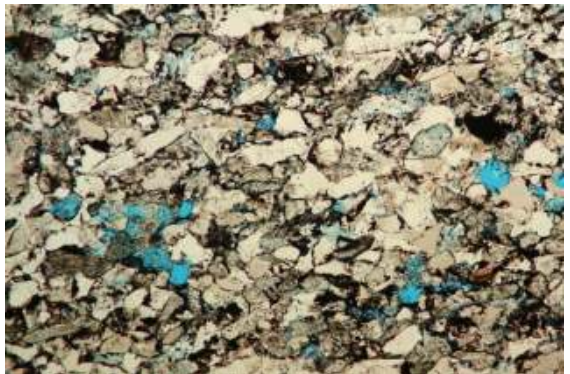
c)



d)



e)



f)

Abb. 23: Ergänzungsplatten 3-3b und 3-4b

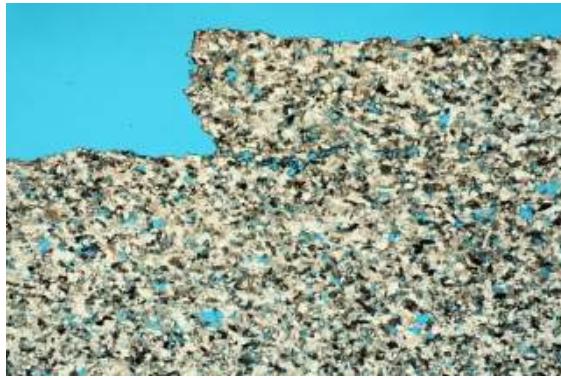
- a: Probe 3-3b, Übersicht, feiner körnige Lage in Bildmitte, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- b: Bereich mit großer Lösungspore, Zerstörung des Muskovits, II Nicols; lange Bildkante 2,2 mm
- c: Ausschnitt mit stärkerer Verkieselung, II Nicols, lange Bildkante 2,2 mm; d: Ausschnitt aus c, X Nicols, lange Bildkante 1,0 mm
- e: Probe 3-4b, Übersicht, oben feiner körnige Lage, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- f: typisches Gefüge, II Nicols, lange Bildkante 2,2 mm

Die Ersatzplatten 3-5b und 3-6b unterscheiden sich hinsichtlich ihres Gefüges vollkommen von den anderen untersuchten Dachsteinplatten. Dies drückt sich beispielsweise auch durch den leicht abweichenden Farbton (makroskopisch) aus. Tab. 23 gibt dies in den wesentlichen Punkten wieder. Einerseits besitzen die Platten geringfügig größere Quarzkörner, siliziklastische Gesteinsbruchstücke (vermutlich Folge der Korngröße) einen größeren mikroskopisch sichtbaren Porenanteil, der zu einem deutlichen Anteil als Interpartikelporosität angesehen wird, resultierend aus der geringeren Verkieselung (weniger und dünnere authigene Quarzanwachssäume). Daneben existieren aber auch Intrapartikelporen bis hin zu Partikellösungsporen. Andererseits fehlt das bei den anderen Proben wenn auch z.T. schlecht nachvollziehbare Lagengefüge.

Tab. 23: Mikroskopische Beschreibung der Ergänzungsplatten 3-5b und 3-6b

Probennr.	Minerale/Gefüge	Beschreibung
3-5b	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> • Quarz (tendenziell >150 µm Ø) • Feldspat alteriert (außer Plagioklas) • siliziklastische Gesteinsbruchstücke • Muskovit selten • Schichtsilikate
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> • Lagengefüge nicht mehr erkennbar • größere Lösungsporen über den ganzen Dünnschliff verteilt • hohe mikroskopisch sichtbare Porosität • Verkieselung geringer als in den anderen Platten • Muskovite nicht ein geregelt
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> • dünne schwarze Schicht an der Vorderkante • beginnende Schalenbildung parallel zur Oberfläche
3-6b	Mineralbestand	<ul style="list-style-type: none"> • Quarz (150 - 250 µm Ø) • Feldspat alteriert (Plagioklas aber erhalten) • siliziklastische Gesteinsbruchstücke • Calcit • geringer Glimmeranteil
	Gefüge	<ul style="list-style-type: none"> • Lagengefüge kaum erkennbar • Calcit aggregatweise porenfüllend auftretend • geringerer Anteil authigener Quarzanwachssäume • Partikellösungsporen und auch größere Hohlräume erkennbar
	Oberfläche	<ul style="list-style-type: none"> • auf der Oberseite Verschmutzung durch Aerosolpartikel

Die Übersichtsaufnahme Abb. 24a vermittelt einen Eindruck von dem beschriebenen Gefüge. Zudem handelt es sich bei dem Ausschnitt um die Oberfläche nach der frei bewitterten Unterkante, an der sich bereits eine dünne Schale bildete, kenntlich an dem Versprung (Schalenverlust) und dem horizontalen Riss.



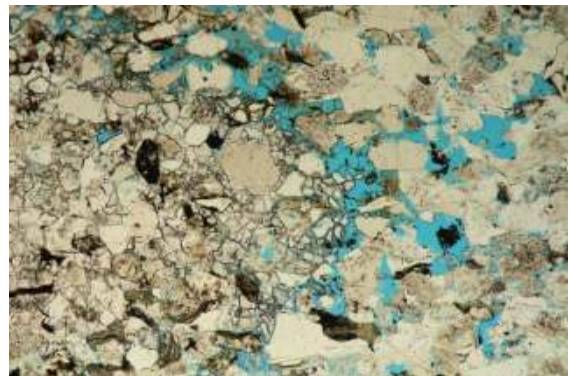
a)



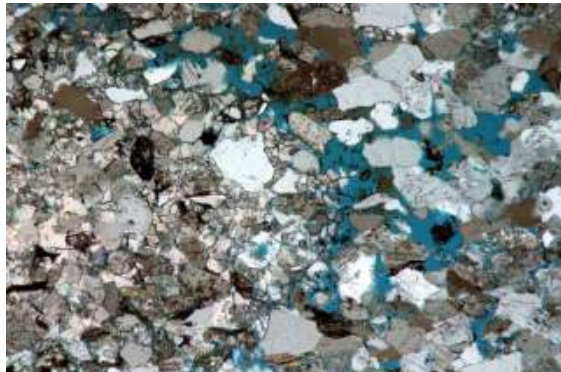
b)



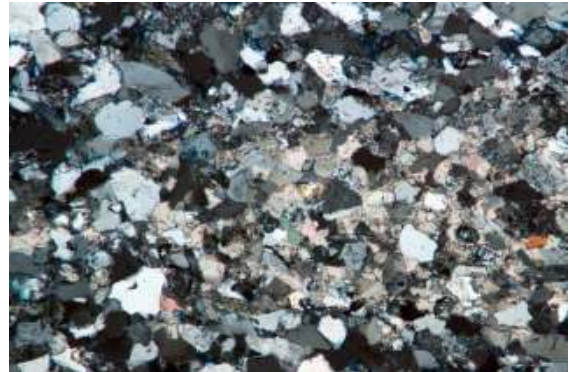
c)



d)



e)



f)

Abb. 24: Ergänzungsplatten 3-5b und 3-6b

- a: Probe 3-5b; Übersicht, Schalenbildung am Rand (obere Bildkante), II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- b: Vorderkante mit dünner schwarzer Schicht, X Nicols, lange Bildkante 2,2 mm
- c: Probe 3-6b, Übersicht von der Vorderkante und Oberfläche (obere und rechte Bildkante), erhöhte Porosität am Rand, dichteres Gefüge durch Calcit, II Nicols, lange Bildkante 8,5 mm
- d: Ausschnitt aus c, am Rand Anlösung der porenfüllenden Karbonatkristalle, II Nicols, lange Bildkante 2,2 mm;
- e: gleicher Ausschnitt wie d, nur X Nicols; f: Calcit im Porenraum, X Nicols, lange Bildkante 2,2 mm

Neben den bereits genannten Komponenten finden sich vereinzelt Muskovite, wie Abb. 24b belegt. In der bei gekreuzten Polarisatoren entstandenen Aufnahme lässt sich keinerlei Einregelung des Glimmers erkennen. An der Vorderkante weist die Platte eine dünne schwarze Schicht (NEUMANN 1994) auf.

Das Gefüge der Platte 3-6b entspricht im Wesentlichen dem der Platte 3-5b, allerdings mit dem Unterschied, dass in dieser Probe Karbonatkristalle vorhanden sind. In der Übersichtsaufnahme Abb. 24c, die ebenfalls die Vorderkante und Oberfläche zeigt, tritt mittig in der unteren Bildhälfte ein ovaler, dunklerer porenfüllender Bereich auf. Dabei handelt es sich um porenfüllenden Calcit.

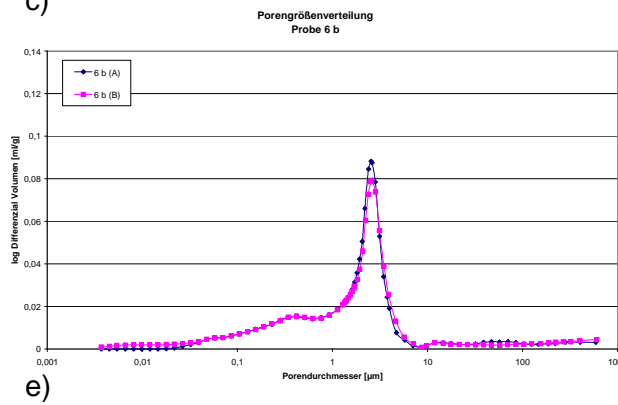
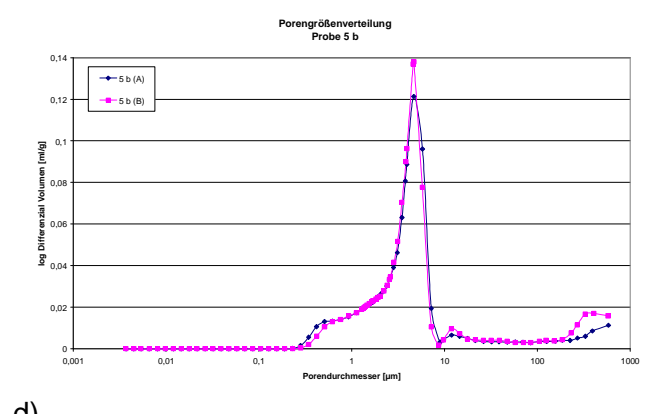
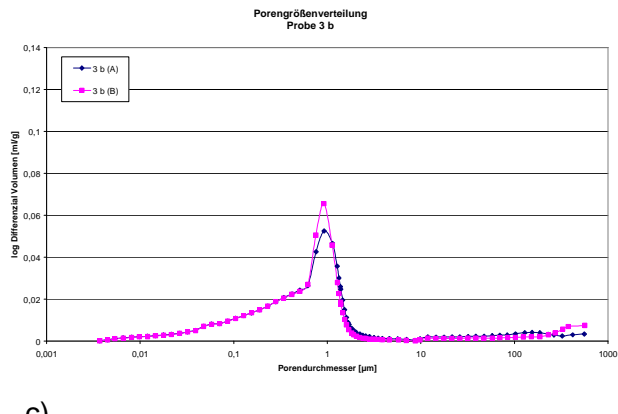
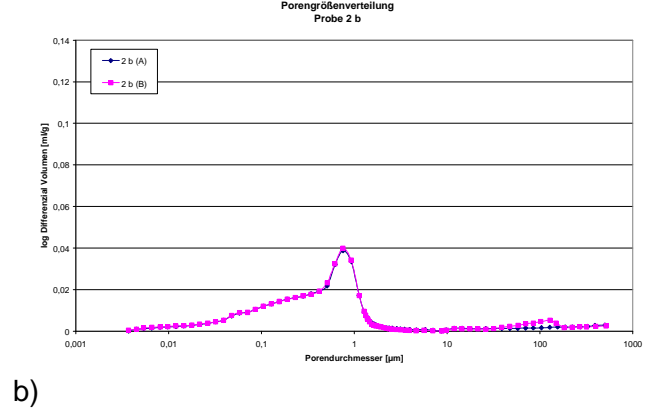
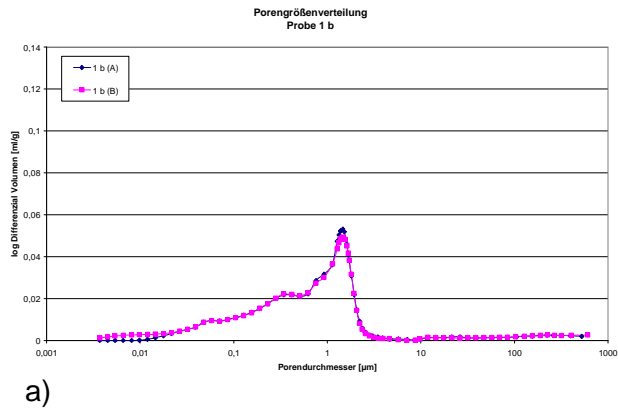
Grundsätzlich ist die mikroskopisch sichtbare Porosität in der unmittelbaren Oberflächenebene (Außenseite und Vorderkante) erhöht, auch angrenzend zu den Calcitkristallen, wie insbesondere die Abb. 24d bestätigt (rechte Bildseite). In die Poren hinein hat sich mikrobieller Bewuchs von der Außenseite her ausgebreitet. Abb. 24e gibt denselben Bereich mit gekreuzten Polarisatoren mit den typischen Interferenzfarben höherer Ordnung von Karbonat wieder. Alle anderen Bereiche mit Karbonaten lassen ein analoges Bild von porenfüllenden Kristallen erkennen. Stellvertretend bestätigt dies Abb. 24f.

4.3.2 Porositätskennndaten

Im Hinblick auf die aus der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelte Gesamtporosität und des mittleren Porendurchmessers unterscheiden sich die Proben 3-5b und 3-6b sehr deutlich von den anderen (**Tab. 24**).

Tab. 24: Porositätskennndaten der Ergänzungsproben, ermittelt durch Quecksilberdruckporosimetrie

Probe-Nr.	Typ	Spez. Porenvolumen [mm ³ /g]	Mittlerer Porendurchmesser [µm]	Rohdichte [g/cm ³]	Reindichte [g/cm ³]	Gesamtporosität [Vol%]
3-1b	-	42	0,73	2,37	2,63	10,0
3-2b	-	33,2	0,47	2,43	2,64	8,1
3-3b	-	42,2	0,69	2,38	2,65	10,0
3-5b	-	58,8	4,33	2,22	2,55	13,1
3-6b	-	47	2,10	2,34	2,62	11,0



- a: Austauschplatte 3-1b
- b: Austauschplatte 3-2b
- c: Austauschplatte 3-3b
- d: Austauschplatte 3-5b
- e: Austauschplatte 3-6b

Abb. 25: Porogramme der Ersatzplatten 3-1b, 3-2b, 3-3b, 3-5b und 3-6b. Doppelbestimmung der Porenradienverteilung

Die Porogramme in der Abb. 25a-e weisen sämtlich ein Porenmaximum auf, dessen Lage für die beiden Gefügetypen unterschiedlich ist. Die Proben 3-1b, 3-2b und 3-3b weisen ein Maximum um 1 µm auf, mit deutlichem Porenanteil im kleineren Bereich, während die sich im Gefüge davon unterscheidenden Proben 3-5b und 3-6b ein Maximum zwischen 1 und 10 µm aufweisen.

Die mikroskopisch sichtbaren Poren, mit Porengrößen von 100 µm und größer sind am rechten Rand der Porogramme z.T. noch erkennbar. Hier ist aber die Auflösungsgrenze dieser Methode zu beachten.

4.3.3 Festigkeitsprofile

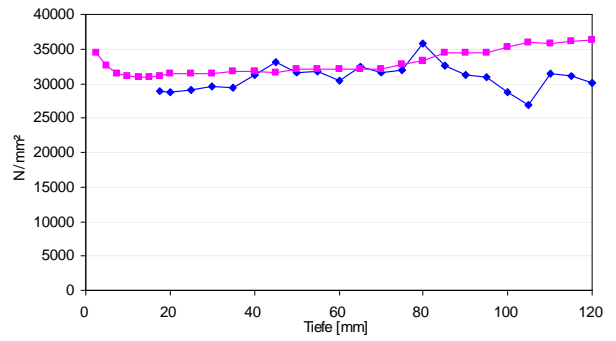
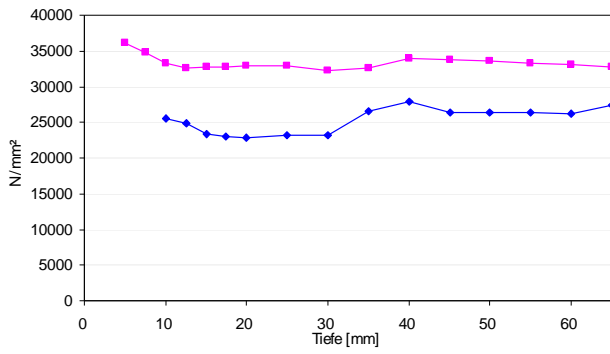
Der aus Ultraschalllaufzeiten berechnete dynamische E-Modul wurde tiefenabhängig senkrecht und parallel zur Schichtung (Tab. 25) im frei bewitterten Bereich der Platten (unten) verglichen.

Tab. 25: Dyn. E-Modul am Austauschmaterial

Proben-Nr.	E-Modul	
	senkrecht zur Schichtung (unten)	parallel zur Schichtung (unten)
3-1b	X	X
3-2b	X	X
3-3b	X	X
3-4b	X	X
3-5b	X	X
3-6b	X	X

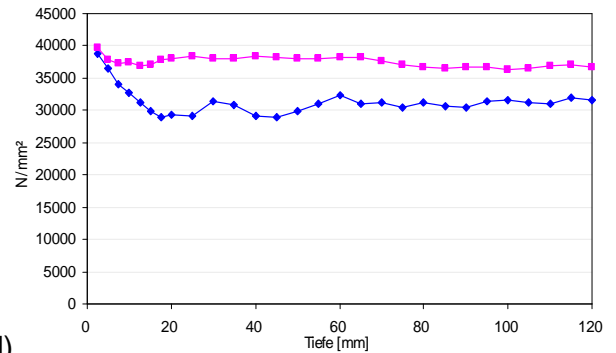
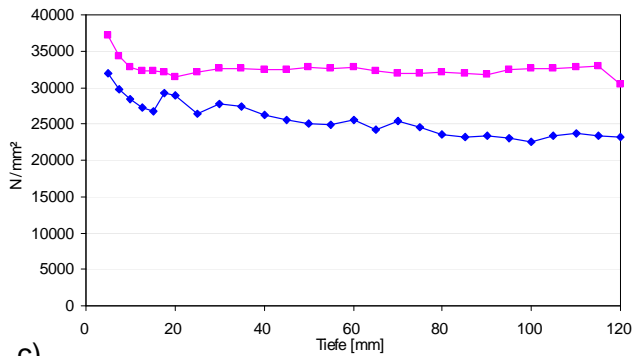
Die in Abb. 26a-f dargestellten Tiefenprofile liegen sämtlich bei höheren Werten, verglichen mit den Ausbauplatten. Zumeist ist der dynamische E-Modul senkrecht zur Schichtung größer als parallel dazu, allenfalls nähern sich die Profile an, wie Abb. 26b.

Mit Ausnahme der Probe 3-5b in Abb. 26e, die im vorderen Bereich senkrecht zur Schichtung einen Festigkeitsverlust aufweist, fehlt dieser den anderen Proben. Hier liegen sogar höhere Werte vor als ab 20 mm Tiefe. Dieser ungewöhnliche Anstieg des dynamischen E-Moduls lässt sich nicht ohne weiteres klären.



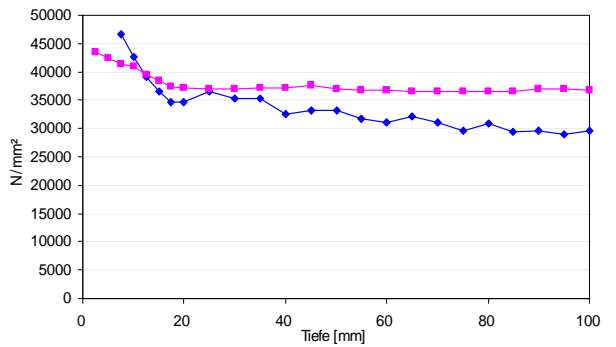
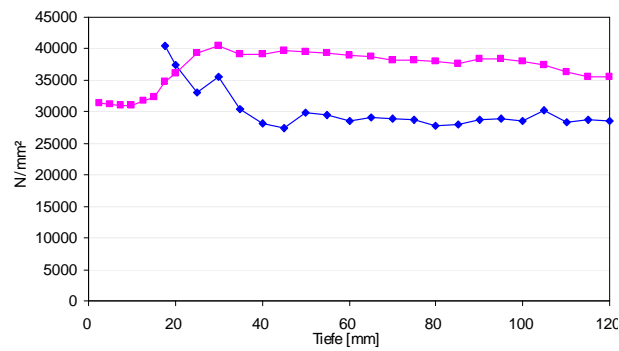
a)

b)



c)

d)



e)

f)

Abb. 26: Tiefenprofile des dyn. E-Moduls der Ergänzungsproben parallel (blaue Kurve) und senkrecht (rosa Kurve) zur Schichtung

a: Probe 3-1b b: Probe 3-2b

c: Probe 3-3b d: Probe 3-4b

e: Probe 3-5b f: Probe 3-6b

4.3.4 Hygrische Quellung parallel und senkrecht zur Schichtung

An sämtlichen Austauschplatten erfolgte eine Bestimmung des Quellmaßes senkrecht und parallel zur Schichtung (Tab. 26) des ehemals frei bewitterten unteren Plattenteils.

Tab. 26: Untersuchungen des Quellmaßes an Austauschmaterial

Proben-Nr.	Dilatationsprofil	
	senkrecht zur Schichtung (unten)	parallel zur Schichtung (unten)
3-1b	X	X
3-2b	X	X
3-3b	X	X
3-4b	X	X
3-5b	X	X
3-6b	X	X

Anders als bei den Ausbauproben ist die zeitabhängige Dehnung gleich gerichtet, wobei zunächst auch eine geringe Kontraktion, wie z.B. anhand von Probe 3-1b in Abb. 27a, nachweisbar war. Zunächst erfolgt die Quellung am Plattenrand etwas geringer als an dem am weitesten vom Rand entfernten Messpunkt. Nach 5 Stunden Messdauer überschreitet die Dehnung den kritischen Wert von 0,5 mm/m. Demgegenüber erreicht das Quellmaß in der Messung senkrecht zur Schichtung mit Ausnahme des Messpunktes am Plattenrand nicht den kritischen Wert (Abb. 27b).

Bis zu 1 Stunde Messzeit bleibt der Dehnbetrag parallel zur Schichtung der Probe 3-2b unkritisch. Danach steigt er bis zu 1 mm/m an (Abb. 27c). Senkrecht zur Schichtung verläuft die Quellung über die Messpunkte etwa gleich und erreicht den Wert 0,5 mm/m erst nach 24 Stunden (Abb. 27d).

In Platte 3-3b steigt der Dehnbetrag vom Plattenrand aus an und endet nach 24 Stunden bei 0,8 mm/m (Abb. 27e). Die Quellung senkrecht zur Schichtung erweist sich als unkritisch (Abb. 27f).

Analog den anderen Austauschplatten erfolgt in Probe 3-4b parallel zur Schichtung die Dehnung, welche im Unterschied zu den anderen Proben den Maximalbetrag über sämtliche Messpunkte nach 5 Stunden erreicht und anschließend wieder abnimmt (Abb. 28a). Die Quellung senkrecht zur Schichtung bleibt unter 0,5 mm/m (Abb. 28b).

Insgesamt weisen diese vom Mikrogefüge (Dünnschliffuntersuchungen) noch eine lagige Textur aufweisenden Platten zwar Dehnbeträge auf, die parallel zur Schichtung als kritisch zu bewerten sind, aber größtenteils deutlich unter den Quellmaßen der plattigen Typen von Ausbaumaterial liegen.

Gegenüber allen Proben anders verhalten sich die Platten 3-5b und 3-6b bezüglich ihrer Quelleigenschaften. Ihr Quellmaß ist vernachlässigbar klein, wie die Abb. 28c, d, e und f bestätigen.

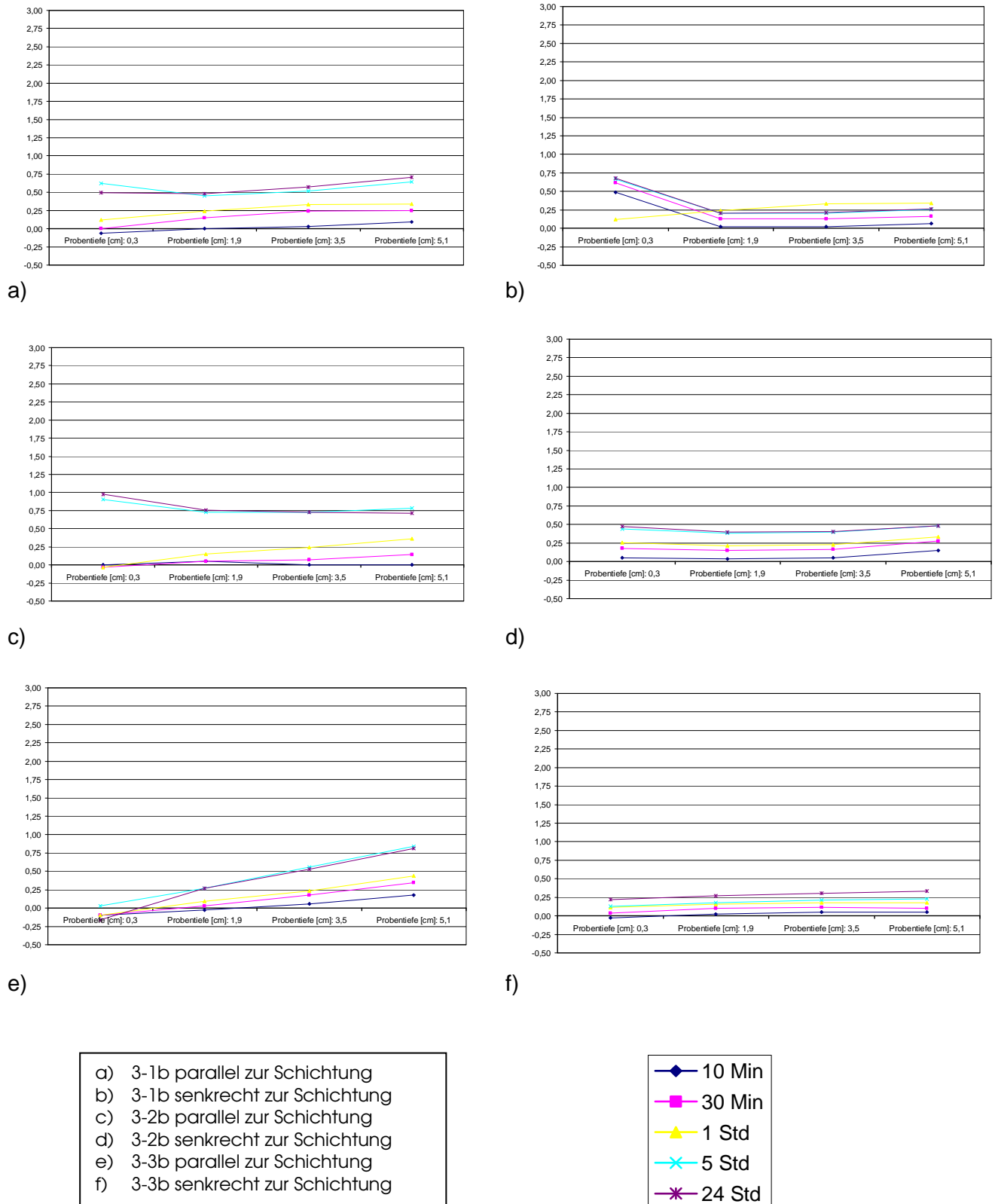
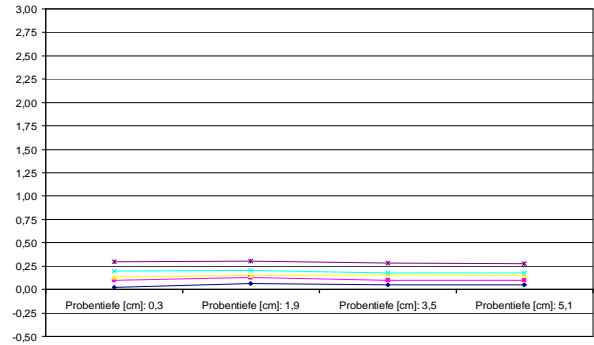
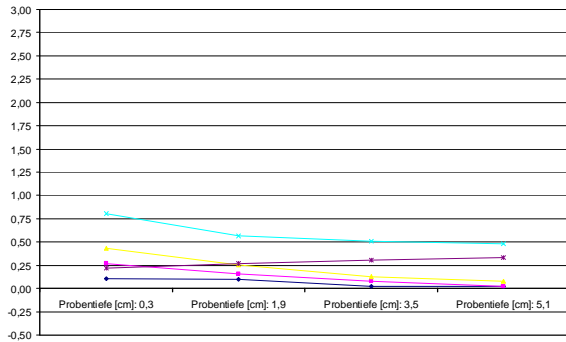
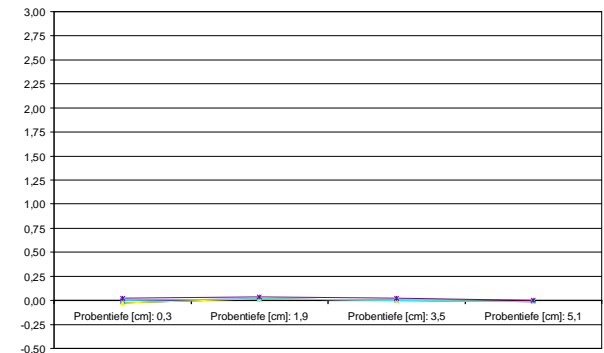
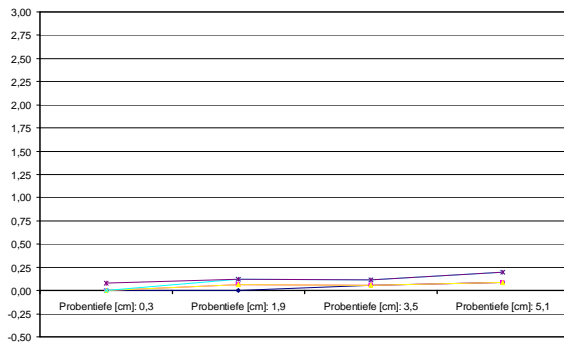


Abb. 27: Quellmaß der Proben 3-1b, 3-2b und 3-3b parallel und senkrecht zur Schichtung in Abhängigkeit von der Zeit und der Entfernung zum Plattenrand



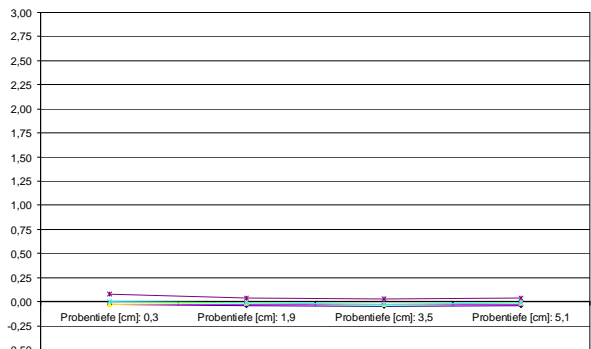
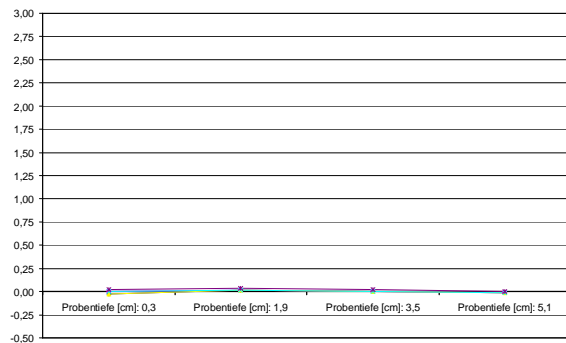
a)

b)



c)

d)



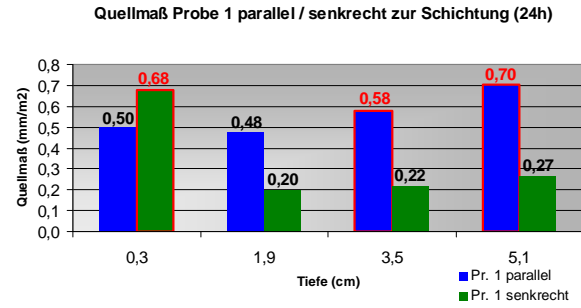
e)

f)

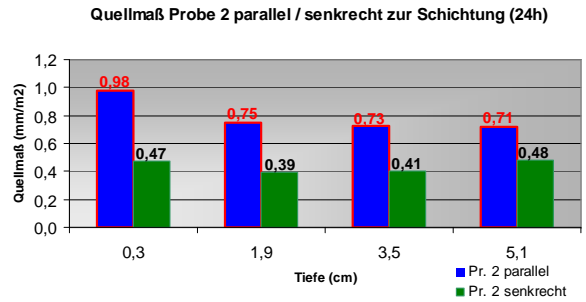
- a) 3-4b parallel zur Schichtung
- b) 3-4b senkrecht zur Schichtung
- c) 3-5b parallel zur Schichtung
- d) 3-5b senkrecht zur Schichtung
- e) 3-6b parallel zur Schichtung
- f) 3-6b senkrecht zur Schichtung



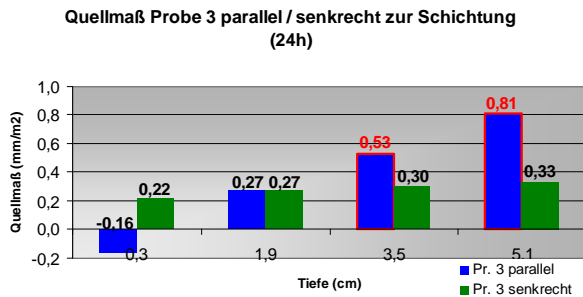
Abb. 28: Quellmaß der Proben 3-4b, 3-5b und 3-6b parallel und senkrecht zur Schichtung in Abhängigkeit von der Zeit und der Entfernung zum Plattenrand



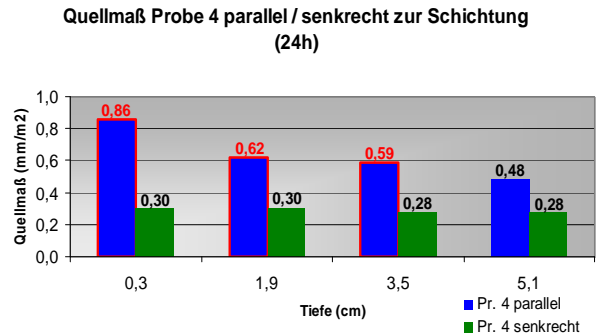
a)



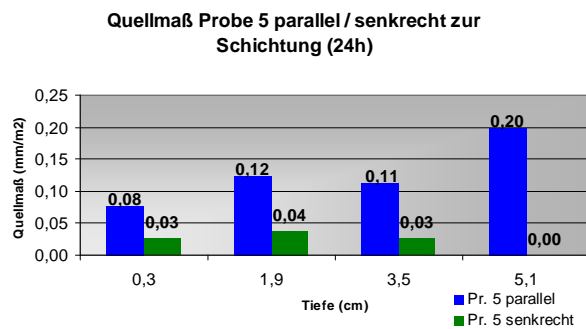
b)



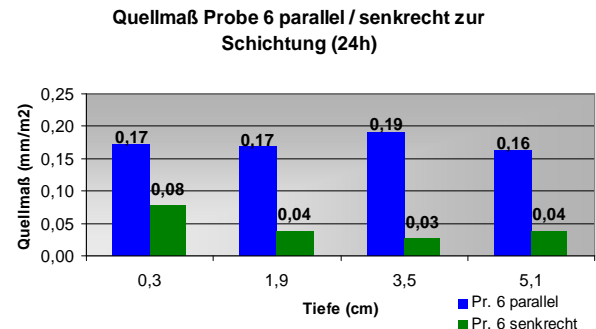
c)



d)



e)



f)?

Abb. 29: Vergleich der 24 Stunden Quellmaße parallel und senkrecht zur Schichtung

Die Gegenüberstellung des nach 24 Stunden erreichten Quellmaßes verdeutlicht noch einmal das Überschreiten des kritischen Wertes von 0,5 mm/m (rot umrandete Säule) in den Proben 3-1b, 3-2b, 3-3b und 3-4b parallel zur Schichtung, während Probe 5-5b und 5-6b unkritisch sind (Abb. 29 a-f).

4.3.5 Wasseraufnahmekoeffizient vor und nach Beschichtung

Während am Ausbaumaterial überprüft wurde, welche Art von Beschichtung vornehmlich unter optischen Gesichtspunkten zur Beschichtung der Platten geeignet ist, sollte am Austauschmaterial die Wirkung einer Beschichtung im Hinblick auf eine Verringerung der Wasseraufnahme überprüft werden. Vorversuche mit dem Wassereindringprüfer nach Karsten, der auch am Bauwerk zur Kontrolle hätte eingesetzt werden können, erwiesen sich als zu unspezifisch, d.h. die Unterschiede vor und nach einer Beschichtung waren nicht groß genug. Deshalb wurde auf die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten in Anlehnung an DIN ISO EN 15148 zurückgegriffen. Dabei erfolgte die Messung senkrecht und parallel zur Oberfläche (Tab. 27).

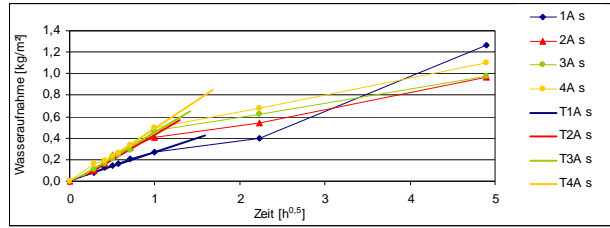
Tab. 27: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten ohne und mit Beschichtung

Proben-Nr.	Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten			
	ohne Beschichtung		Beschichtung mit Siliconharzlasur	
	senkrecht zur Schichtung (unten)	senkrecht zur Schichtung (unten)	parallel zur Schichtung (unten)	parallel zur Schichtung (unten)
3-1b	X	X	X	X
3-2b	X	X	X	X
3-3b	X	X	X	X
3-4b	X	X	X	X
3-5b	X	X	X	X
3-6b	X	X	X	X

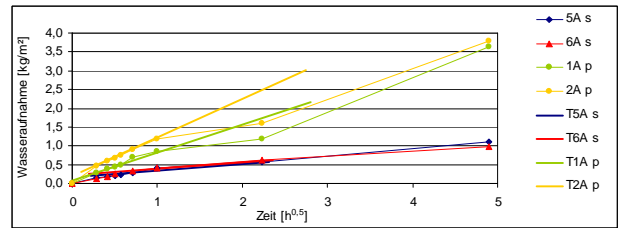
Die Messwerte gibt Tab. 28 wieder, während Abb. 30 a-f die graphische Darstellung dokumentiert. Grundsätzlich ist die zeitabhängige Wasseraufnahme bei den unbehandelten Proben parallel zur Schichtung größer als senkrecht dazu.

Tab. 28: Messwerte

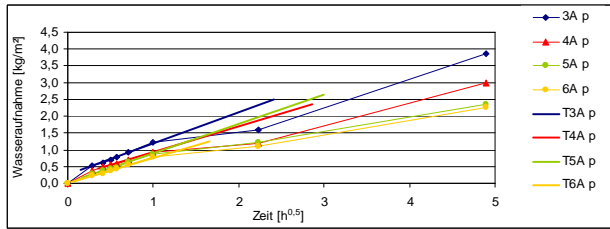
Probandaten			Massenänderung [kg/m ²]							w-Wert [kg/m ² h ^{0,5}]			
Probe-Nr.	Probezeichnung	behandelt mit	Zeit in Stunden							berechnet		nach DIN	
			0,083	0,17	0,25	0,33	0,50	1	5	24	1 h		24 h
1a	senkrecht zur Schichtung	unbehandelt	0,08	0,12	0,14	0,16	0,20	0,27	0,40	1,27	0,3	0,3	0,3
2a	senkrecht zur Schichtung	unbehandelt	0,10	0,16	0,24		0,32	0,41	0,54	0,96	0,4	0,2	0,5
3a	senkrecht zur Schichtung	unbehandelt	0,11	0,17	0,20	0,24	0,29	0,47	0,63	0,98	0,5	0,2	0,5
4a	senkrecht zur Schichtung	unbehandelt	0,16	0,19	0,23	0,26	0,33	0,50	0,68	1,10	0,5	0,2	0,5
5a	senkrecht zur Schichtung	unbehandelt	0,15	0,19	0,21	0,24	0,28	0,40	0,56	1,10	0,4	0,2	0,2
6a	senkrecht zur Schichtung	unbehandelt	0,13	0,18	0,26		0,32	0,42	0,61	0,98	0,4	0,2	0,2
1a	parallel zur Schichtung	unbehandelt	0,28	0,39	0,45	0,49	0,70	0,85	1,20	3,64	0,8	0,7	0,7
2a	parallel zur Schichtung	unbehandelt	0,48	0,59	0,68	0,75	0,91	1,18	1,60	3,80	1,2	0,8	1,0
3a	parallel zur Schichtung	unbehandelt	0,52	0,62	0,71	0,77	0,93	1,22	1,60	3,87	1,2	0,8	0,9
4a	parallel zur Schichtung	unbehandelt	0,37	0,48	0,55	0,58	0,70	0,94	1,20	3,00	0,9	0,6	0,8
5a	parallel zur Schichtung	unbehandelt	0,29	0,38	0,45	0,47	0,62	0,88	1,21	2,34	0,9	0,5	0,9
6a	parallel zur Schichtung	unbehandelt	0,24	0,30	0,37	0,43	0,56	0,80	1,10	2,26	0,8	0,5	0,8
1b	senkrecht zur Schichtung	Historic Lasur	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,15	0,0	0,0	0,0
2b	senkrecht zur Schichtung	Historic Lasur	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,10	0,16	0,61	0,1	0,1	0,1
3b	senkrecht zur Schichtung	Historic Lasur	0,03	0,03	0,04	0,05	0,09	0,12	0,22	0,83	0,1	0,2	0,1
4b	senkrecht zur Schichtung	Historic Lasur	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,06	0,11	0,50	0,1	0,1	0,0
5b	senkrecht zur Schichtung	Historic Lasur	0,03	0,04	0,04	0,00	0,03	0,08	0,12	0,50	0,1	0,1	0,1
6b	senkrecht zur Schichtung	Historic Lasur											0,3
1b	parallel zur Schichtung	Historic Lasur	0,02	0,04	0,04	0,05	0,07	0,11	0,20	1,56	0,1	0,3	0,2
2b	parallel zur Schichtung	Historic Lasur	0,02	0,05	0,05	0,08	0,11	0,20	0,36	2,28	0,2	0,5	0,3
3b	parallel zur Schichtung	Historic Lasur	0,03	0,07	0,08	0,11	0,15	0,27	0,78	1,17	0,3	0,2	0,4
4b	parallel zur Schichtung	Historic Lasur	0,10	0,13	0,16	0,20	0,29	0,44	0,79	3,02	0,4	0,6	0,6
5b	parallel zur Schichtung	Historic Lasur	0,03	0,04	0,04	0,05	0,08	0,13	0,21	0,82	0,1	0,2	0,1
6b	parallel zur Schichtung	Historic Lasur	0,08	0,09	0,11	0,11	0,12	0,18	0,27	1,18	0,2	0,2	0,1



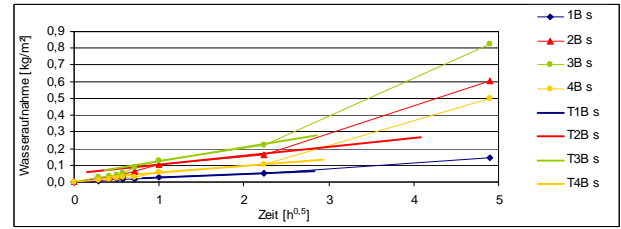
a)



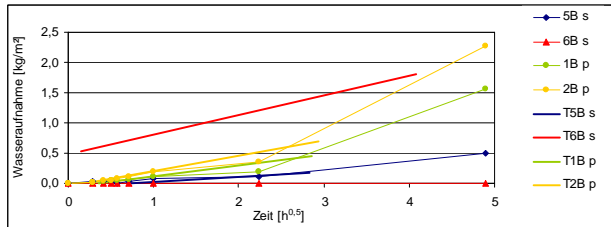
b)



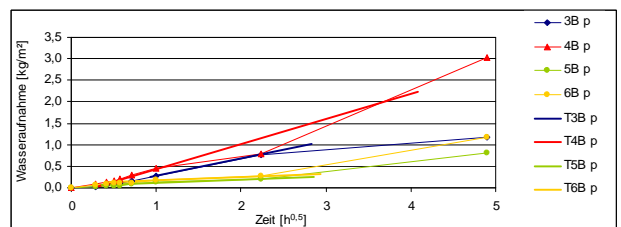
c)



d)



e)



f)

1A s: Probe 3-1b, unbehandelt, senkrecht zur Schichtung
 2A s: Probe 3-2b, unbehandelt, senkrecht zur Schichtung
 3A s: Probe 3-3b, unbehandelt, senkrecht zur Schichtung
 4A s: Probe 3-4b, unbehandelt, senkrecht zur Schichtung
 5A s: Probe 3-5b, unbehandelt, senkrecht zur Schichtung
 6A s: Probe 3-6b, unbehandelt, senkrecht zur Schichtung
 1A p: Probe 3-1b, unbehandelt, parallel zur Schichtung
 2A p: Probe 3-2b, unbehandelt, parallel zur Schichtung
 3A p: Probe 3-3b, unbehandelt, parallel zur Schichtung
 4A p: Probe 3-4b, unbehandelt, parallel zur Schichtung
 5A p: Probe 3-5b, unbehandelt, parallel zur Schichtung
 6A p: Probe 3-6b, unbehandelt, parallel zur Schichtung

B: behandelte Proben

Abb. 30: graphische Darstellung der Wasseraufnahmekoeffizienten entsprechend mit den angelegten Tangenten (T)

Dabei unterscheiden sich die Proben 3-5b und 3-6b deutlich von den anderen Austauschplatten, indem die Wasseraufnahme parallel und auch senkrecht zur Schichtung etwas geringer ist (1 und 24 Stunden-Wert). Vergleichbar gering ist die Wasseraufnahme der Probe 3-1b.

Durch die Beschichtung mit einer Siliconharzlasur kann der Wasseraufnahmekoeffizient deutlich reduziert werden. Dies erscheint insbesondere wichtig für die frei bewitterten Kanten der Platten, an denen das Wasser parallel zur Schichtung in das Gefüge kapillar gesaugt wird.

5 Interpretation der Ergebnisse

5.1 Bewertung der ermittelten Kennwerte im Hinblick auf die unterschiedenen Makrotypen

Die Differenzierung der Ausbaudachplatten nach Sicht- und Percussionsprüfung vor Ort in vier verschiedene Makrotypen spiegeln die ermittelten technischen Kennwerte nicht wieder. Vielmehr lassen sich lediglich zwei Endtypen unterscheiden, zum einen ein plattiger Typ, zum anderen ein massiver Typ. Dazwischen bestehen Übergänge.

Je nach Ablagerungsbedingungen kann der Anteil an feiner körnigen Lagen hinsichtlich Anzahl und Dicke variieren. Dies spiegelt sich auch in der Klassifizierung wieder, die von WEBER (2009) anhand der quantitativ untersuchten Proben vorgenommen wurde. Danach reicht das Spektrum von ausgeprägt glimmerreichen subarkosischen Wacken über weniger plattige glimmerreiche Subarkosen bis hin zu massige glimmerreiche Subarkosen. Diese spiegeln in einem mäandrierenden Flusssystem die Elemente „Schichtfluten“ (LS) bis hin zum Element „Gleithang“ (LA) wieder.

Zu der Variabilität in der Dicke und der Anzahl der Lamellen beeinflussen weitere Parameter die technischen Eigenschaften, die sich aber nicht der makroskopischen Differenzierung zuordnen lassen. Durch die Intensität der Quarzkornverwachsung in den im Durchlicht helleren Bereichen wurde die Interpartikelporosität reduziert. Gegenläufig erweist sich die Feldspatanlösung und -auflösung. Je nach Intensität entstehen weitere feine Poren innerhalb der Feldspäte, d.h. Intrapartikelporen oder, wenn sie völlig aufgelöst wurden, Partikel-lösungsporen. Diese beeinflussen den Wassertransport von den Bruchkanten in Richtung dieser Lamelle maßgeblich.

In den feiner körnigen Lamellen besitzen die Quarzkörner eine geringere Korngröße. Hinzu kommen Tonminerale, Eisenverbindungen und in unterschiedlichem Umfang Muskovit. Die Tonminerale sind für die Quellung verantwortlich. Durch den Wechsel unterschiedlicher Lamellen entsteht im Hinblick auf den Wassertransport ein stark anisotropes Verhalten. Nimmt der Anteil an Quarz in diesen Lagen zu, so kann es durch die Bildung von authigenen Anwachssäumen und der damit einher gehenden Verwachsung benachbarter Quarzkörner zu einer Überbrückung dieser Lage von quarzdominierter zu quarzdominierter Schicht kommen. Das zunehmend starrere Gefüge über die feiner körnigen Lagen hinweg schränkt die Größe der Quellung zusammen mit der Abnahme quellfähiger Tonminerale ein.

Auch die Porenradienverteilung folgt nicht der makroskopischen Differenzierung. Die beiden hauptsächlich zu verzeichnenden Maxima verlaufen in keinem Fall makrotypenspezifisch, wobei labortechnisch nur eine kleine Anzahl untersucht werden konnte. Das betrifft auch die Elastizitätsmessungen (dyn. E-Modul). Lediglich der extrem plattige Typ repräsentiert durch Probe 1-1d aus dem Vorratskeller weist die niedrigsten, sich deutlich von den anderen Proben unterscheidenden Werte auf. Ansonsten liegen keine Unterschiede, abhängig vom Makrotyp, vor.

Die beschriebenen Änderungen verlaufen diskontinuierlich, d.h. nicht gleichgerichtet. Deshalb lässt sich keine Korrelation zwischen labortechnisch ermittelten Eigenschaften und makroskopischer Differenzierung durch Sicht- und Percussionsprüfung herbeiführen. Vielmehr bestehen nicht ohne Weiteres nachvollziehbare Sprünge innerhalb der Gruppen im Hinblick einzelner untereinander verglichener Parameter.

Eine Rückübertragung und somit eine Zuordnung physikomechanischer Eigenschaften auf die differenzierten Makrotypen ist nicht möglich. Daraus ergeben sich einschneidende Konsequenzen für eine mögliche Konservierung, die Abschnitt 5.3 erläutert.

5.2 Art und Ursache der Schäden an den Dachplatten

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen lässt sich die Art und Ursache der am Altbestand festgestellten Schäden spezifizieren. Entscheidend für den Zerfall erweist sich die starke Anisotropie der physikomechanischen Eigenschaften. Einerseits wurden ursprünglich stark geschichtete Platten für die Dacheindeckung ausgewählt, um durch eingeregelter und feinkörnige Minerale einen geringen Wasserdurchtritt durch die bewitterte Oberfläche zu erzielen. Andererseits steht dem ein im Verhältnis viel stärkerer Wassertransport parallel zu Schichtung, ausgehend von den Bruchkanten der Platten, gegenüber.

Ablaufendes Regenwasser wird demgemäß viel stärker über die Kanten aufgenommen. Den Effekt verstärken noch Moose und sonstiger Bewuchs (Algen, Schwärzepilze) entlang der Kanten. Das über die Quarz-/Feldspat dominierten Lagen kapillar aufgenommene Wasser kann senkrecht zur Oberfläche nur schlecht kapillar abgegeben werden. Haupttransportmechanismus ist die Diffusion. Deshalb kommt es bei entsprechenden klimatischen Randbedingungen zu einer Erhöhung des Feuchteanfalls in der Platte.

Durch die langsame Trocknung erreichen die Platten eher ihren maximalen Dehnbetrag als einen geringen. Dabei wurde analog im Mauerwerk verbauter Natursteinquader ein Dehnbetrag von $>0,5$ mm/m als kritisch angesehen, da explizit für Dachsteinplatten aus Buntsandstein keine Grenzwerte in der Fachliteratur existieren.

Zudem wirkt sich der Einbau, d.h. die Überlagerung von zwei Platten im oberen, nicht frei bewitterten verstärkend auf den Schadensprozess aus, da damit eine einseitige Zwängung der Platten besteht.

Bei Mauerwerksquadern findet sich häufig eine Gefügauflockerung im vorderen Bereich, die durch eine Messung des dynamischen E-Moduls im Tiefprofil, in diesem Fall vom Rand ausgehendem Profil, nachgewiesen wird. Bei den Dachsteinplatten fehlt die den gesamten Rand umfassende Gefügauflockerung. Stattdessen ist das vom Rand der frei bewitterten Oberfläche her gegebene Aufplatzen entlang der durch quellfähige Tonminerale charakterisierten Lagen das wesentliche Zerstörungsmerkmal, dass sich vor Ausbildung der Trennflächen mittels dyn.- E-Modulmessung nicht erfassen lässt.

Die Messung der Porenradienverteilung an einer Probe, vergleichend im frei bewitterten und bedeckten Bereich, zeigt eine höhere Porosität in erstgenanntem Bereich. Damit ist eine Porenveränderung durch die Verwitterung nachgewiesen. Diese resultiert allem Anschein nach aus dem weiteren Zerfall der Feldspäte nach dem Einbau der Platten.

Inwieweit durch hohe Feuchtegehalte im Plattenquerschnitt der Schadensprozess auch durch Frosteinwirkung verstärkt wird, ist nicht bekannt, da keine aufwändigen Frost-Tauwechsel-Versuche im Rahmen des Forschungsprojektes vorgenommen werden konnten, die der Einbausituation gerecht werden.

5.3 Konsequenzen für die Konservierung

Im Hinblick auf die verbauten Dachsteinplatten aus Solling-Sandstein liegt eine große Variationsbreite von plattigen bis hin zu massiv erscheinenden Typen als Endglieder vor, wie sie mehr oder weniger die beiden unverbauten Platten repräsentieren.

Durch die Art der Dacherneuerung findet eine Positivauswahl statt. Die schlechten aufgespaltenen Platten oder Platten mit Rissen an der Seite werden aussortiert und nur die noch intakt erscheinenden Dachplatten stehen für eine Wiederverwendung zur Verfügung. Da ein Ersatz von größenordnungsmäßig bis zu 50 % erfolgt, besteht theoretisch die Möglichkeit,

dass auch wieder ein bestimmter Anteil schlechter Platten zum Einsatz kommen könnte. Aufgrund der Erfahrung mit diesem Material ist der Ausführende bestrebt, dies zu vermeiden. Somit fällt letztlich das England des plattigen Typs weg bzw. wird bis auf ein Minimum reduziert.

Die verbleibenden Platten weisen eine unterschiedliche Schichtdicke auf. Dies ist abhängig von dem Anteil an spaltbaren, Schichtsilikat dominierten Lagen, die sich mit quarzdominierten Lagen abwechseln. Die durch Gefügeuntersuchung und Kennwertermittlung festgestellte große Variationsbreite macht es unmöglich, die von dem Dachdecker durch Sichtprüfung und Prüfung durch Anschlagen mit dem Dachdeckerhammer (Percussionsprüfung) vorgenommene Kategorisierung mit labortechnischen Kennwerten zu untermauern und auf Baustellenbedingungen rückzuübertragen als Basis für eine differenzierte Steinbehandlung, um eine längere Standzeit zu erzielen.

Will man Maßnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit durchführen, so kann dies in keinem Fall selektiv für bestimmte Plattentypen erfolgen, da die makroskopische Typisierung nicht mit klaren Grenzen oder Sprüngen technischer Parameter zusammenfällt. Stattdessen müssen sämtliche Platten gleichermaßen einer geeigneten Konservierungsprozedur unterzogen werden.

Dies wäre sicherlich machbar, wenn sich bestimmte Parameter einheitlich in eine Richtung entwickeln bzw. verändern würden. Dies ist aber nicht der Fall, wie die Behandlung der Proben mit einem Quellminderer belegt. Neben dem positiven Effekt bei vielen Proben tritt bei einigen Proben aber auch eine Erhöhung des Quellmaßes auf. Hier gilt es die Anzahl von Proben mit positivem Effekt der mit negativem Effekt gegenüberzustellen und gleichzeitig die Größe des Effektes zu beurteilen. Um aber zu beurteilen, ob der Negativeffekt gegenüber der positiven Wirkung an anderen Platten so klein ist (bezogen auf die Plattenzahl), dass er vernachlässigt werden kann, hätten mehr Platten untersucht werden müssen.

Da ein Quellminderer allein vergleichsweise schnell ausgewaschen wird, zumindest aus dem frei bewitterten Plattenanteil, erfolgt üblicherweise die Kombination mit einer hydrophobierenden Imprägnierung.

Die Kombination von Quellminderer und hydrophobierender Imprägnierung muss an dem betreffenden Material überprüft werden, da je nach Steineigenschaften synergistische, aber in seltenen Fällen auch gegenläufige Effekte auftreten können. Aufgrund der großen Variationsbreite der Dachsteinplatten muss eine vergleichsweise große Anzahl an Platten diesbezüglich überprüft werden.

Da hydrophobierende Imprägnierungen an denkmalgeschützten Objekten aufgrund ihrer Irreversibilität als kritisch angesehen werden, musste zunächst die Applikation dieses Steinschuttmittels unabhängig vom Quellminderer untersucht werden. Dabei zeigte sich, dass das Hydrophobat nicht bis zum Kern der Platte penetrierte. Dies muss aber aufgrund der Formatierung der Platten als Einpassung in die neue Einbauposition vorausgesetzt werden, um den Feuchtetransport parallel zur Schichtung, ausgehend von der neu erzeugten Bruchkante, zu unterbinden.

Zusätzlich zu den behandelten und nach ausreichender Trockenzeit überprüften Querbrüchen von Platten zur Überprüfung des Eindringvermögens zeigen zudem die Porositätsmessungen, dass bei den gegebenen Porenradenmaxima Steinschuttmittel durch freiwilliges kapillares Saugen nicht zum Kern der Platte gelangen.

Da aber das Quellmaß einiger Platten im Bereich von Spitzenwerten für Naturwerksteine liegt (z.B. 6 und 4 mm/m), sollte dennoch darüber diskutiert werden, wie das Eindringen von Wasser zu verhindern ist und ob nicht der Einsatz eines Siliconharzbeschichtungssystems mit lasierender Optik eine Alternative darstellt. Durch eine biozide Ausrüstung kann auch der Neubewuchs bzw. dessen Ausbreitung verzögert werden. Infolgedessen müssen aber Renovierungsintervalle, die denen üblicher Beschichtungen entsprechen, Berücksichtigung finden. Vermutlich verläuft der Abbau der Beschichtung aufgrund der extremen Exposition schneller als üblich bei Fassadenbeschichtungen.

Die Beschichtung erfolgt nach dem Verlegen der Platten an der Dachfläche. Eine vorherige Beschichtung ist aufgrund der Formatierung vor dem Einbau nicht möglich. Dementsprechend sollten im Verbund der Dachsteinplatten mit Mörtel Rissbreiten von $<0,1$ mm nicht überschritten werden.

Aufgrund der dargestellten Situation und durchgeführten Untersuchungen lagen keine praxistauglichen Konservierungsverfahren für die Dachsteinplatten, die sich für die Fassadeninstandsetzung bewährt haben und in den Bauablauf integrierbar waren, vor.

5.4 Modellcharakter der Untersuchungen

Die Herangehensweise an Objekte mit Buntsandsteinplatten als Dächer ist übertragbar. Aus den bisher vorliegenden Kenntnissen ergeben sich Folgerungen für zukünftige, darauf aufbauende Fragestellungen, die Abschnitt 6 nennt.

6 Ausblick

Die Dächer der Pavillons sind inzwischen neu eingedeckt. Eine Einpassung der Untersuchungen in den Bauablauf wurde anfangs vorgenommen, konnte aber nicht zu Ende geführt werden, da zwischen der makroskopischen Einstufung und den technischen Parametern nur eine Korrelation hinsichtlich der Endglieder möglich war, aber nicht eine vollständige Rückübertragung auf die Makrotypen. Als absehbar war, dass nicht sämtliche Untersuchungen in den Bauablauf integrierbar waren, wurde der Bau eines Prüfdaches von den Projektpartnern beschlossen. Die Dachflächen spiegeln verschiedene an den Pavillons verwirklichte Expositionen wieder. Zudem ist der Dachraum unter der Dachfläche als geschlossener, aber zugänglicher Raum ausgebildet.

Zur Zeit werden daran Klimamessungen in Form der Oberflächentemperatur, relativen Luftfeuchte und Raumtemperatur durchgeführt, um zu überprüfen, ob auf den Dachböden Kondensatbildung auftritt. Vergleichsmessungen erfolgen auf einem Dachboden. Die Dachkonstruktion ermöglicht weitere Experimente, z.B. indem Platten beschichtet werden und sowohl visuell als auch im Hinblick auf ihre Wasseraufnahme überprüft werden.

In diesem Zusammenhang kann auch geprüft werden, ob Dachplatten vollständig mit einer hydrophobierenden Imprägnierung, die den gesamten Querschnitt umfasst, zu versehen sind. Dies lässt sich nur experimentell durchführen, indem die Tränkung unter Vakuum verläuft. Dabei muss getestet werden, ob ein einfaches System ausreicht oder ob eine vollständige Penetration des Querschnittes ausschließlich durch das von PUMMER (2008) beschriebene und eingesetzte System möglich ist. Solche Platten können auch vorher mit einem Quellminderer behandelt werden und anschließend die Hydrophobierung erhalten.

Auch die Wirksamkeit von Beschichtungen lassen sich an dem Musterdach testen. Den Beschichtungen können Biozide zugesetzt werden, um den mikrobiellen Bewuchs zu reduzieren. Dies würde eine weitere Maßnahme nach der Entfernung großer, zu dicht an den Pavillons stehender Bäume zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit durch Verzögerung des Bewuchses darstellen.

II. Kathodolumineszenz-Untersuchungen ausgewählter Solling-Sandsteinplatten am Jagdschloss Clemenswerth

von Jutta Weber

1 Einführung

Die Kathodolumineszenz-Untersuchungen (KL) an ausgewählten Solling-Sandsteinplatten wurden im Rahmen des Projektes „Methodenentwicklung zur Ressourcenschonung und zum Bautenschutz an den historischen Dacheindeckungen mit Solling-Sandsteinplatten des Jagdsternschlosses Clemenswerth bei Sögel im Emsland, Niedersachsen“ durchgeführt. Anlass ist die starke Schädigung der Dächer durch Verwitterungseinflüsse und die damit verbundene Neueindeckung mit möglichst originalen Materialien. Hierbei ist die Frage der Wiederverwendbarkeit bereits verbauter Sandsteinplatten sowie der Festigung bereits geschädigter Sandsteinplatten im Rahmen der Ressourcenschonung von Bedeutung.

Um darüber hinaus modellhafte Aussagen zum Verwitterungsverhalten der Solling-Sandsteinplatten für künftige Dacheindeckungs-Projekte treffen zu können, wurden die unterschiedlichen Plattentypen mit einer breiten Palette verschiedener Methoden untersucht. Die Methode der Kathodolumineszenz-Mikroskopie erlaubt detaillierte Aussagen zur Sedimentpetrographie, zur Zementation, zum Mineralbestand sowie zu möglichen Stoffumsetzungen. Sie ist zur sedimentpetrographischen Detailuntersuchung von Sandsteinen besonders gut geeignet und im Rahmen diverser Fragestellungen im Bausandstein der Solling-Folge (Grauer Wesersandstein, Roter Wesersandstein) bereits mehrfach erfolgreich zur Anwendung gekommen (WEBER 2000, LEPPER & WEBER 2001, WEBER & LEPPER, 2002).

2 Fragestellung

Im Rahmen der Kathodolumineszenz-Untersuchungen (KL) wurde den folgenden Fragestellungen nachgegangen:

- a. Charakterisierung der Solling-Sandsteinplatten hinsichtlich der Sedimentpetrographie, insbesondere Zementation und möglicher Stoffumsetzung im Detail - sind Unterschiede zwischen den Proben feststellbar?
- b. Sind Unterschiede in der Zusammensetzung der Sandsteinplatten zwischen überdeckten und frei bewitterten Plattenbereichen feststellbar?
- c. Sind die makroskopischen Unterschiede im Gefüge der Plattentypen durch die Untersuchung mit der KL nachvollziehbar bzw. präzisierbar?
- d. Treten Korrelationen der KL-Befunde mit den geochemischen Parametern auf?
- e. Kann anhand der KL-Befunde eine Verbindung zu Diageneseparametern und Ablagerungsmilieu des Roten Wesersandsteins hergestellt werden?
- f. Ist es möglich, anhand der Sedimentpetrographie und der KL-Befunde Prognosen hinsichtlich des Verwitterungsverhaltens zu treffen?
- g. Sind die Ergebnisse modellhaft auf alternative Fragestellungen zum Verwitterungsverhalten von Solling-Sandsteinplatten übertragbar?

3 Probenauswahl

Probe Nr.	Plattentyp	Bemerkungen
0700030/12-a-1	T2, Ü	Verbaute Platte, Untersuchung des überdeckten und frei bewitterten Bereichs
0700031/12-a-2	T2, FB	
0700034/20-a	T4, Ü	Verbaute Platte, Untersuchung des überdeckten und frei bewitterten Bereichs
0700035/20-c	T4, FB	
0700037/21-c	T3, FB	Verbaute Platte, frei bewittert
0901599/22-a-1	PM-V	Vorratslager, gebraucht, jedoch unverbaut

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Proben: T2 = plattig aufspaltend, lagig und schalig ablösbar, T3 = plattig aufspaltend, jedoch geringer, T4 = massiv, PM-V = Probenmaterial, Vorratslager, Ü = überdeckt, FB = frei bewittert.

4 Kathodolumineszenz-Mikroskopie

Einleitend soll im Folgenden eine kurze Einführung zu den Grundlagen und Möglichkeiten, welche die Kathodolumineszenz-Mikroskopie bei der Untersuchung von Sandsteinen bietet, gegeben werden.

4.1 Grundlagen

Als Lumineszenz wird die Eigenschaft vieler Minerale bezeichnet, bei Energiezufuhr von außen Energie in Form von Licht zu emittieren. Die Kathodolumineszenz wird frei, nachdem die Anregung durch einen externen Elektronenstrahl erfolgte. Hierdurch werden Elektronen im Mineralgitter vom Grundzustand in einen angeregten Zustand überführt, die entstandene Leerstelle wird wieder durch ein Elektron aufgefüllt. Die Energie-Differenz zwischen angeregtem und Grundzustand entspricht der freiwerdenden KL (NEUSER et al. 1994). In reinen Mineralen, die in der Natur nur selten vorkommen, ist die Differenzenergie zu gering, um eine sichtbare Lumineszenz zu erzeugen. Diese kann nur von eingebauten Fremdatomen, sogenannten Aktivatorelementen, ausgehen. Hier eignen sich besonders die in Silikaten und Carbonaten häufig eingebauten Übergangselemente wie Mangan (zwei- und vierwertig), Titan, Blei, Chrom, Cer u.a. (BRUHN 1995).

Zur Untersuchung von Sedimentgesteinen werden gegenwärtig zwei verschiedene Kathodentypen verwendet. Die „kalte Kathode“, die früher ausschließlich verwendet wurde, dient vorwiegend der Untersuchung von Karbonatgesteinen, da diese nur geringe Anregungsenergien benötigen. Mit der Entwicklung der „heißen Kathode“ durch ZINKERNAGEL (1978) wurde schließlich die KL-Untersuchung von Sandsteinen möglich. Grund hierfür sind die KL-Eigenschaften von Quarz, der die Hauptkomponente in vielen Sandsteinen darstellt. Da dieser nur eine schwache, schwer anregbare KL besitzt, sind zur Emission vergleichsweise hohe Energien sowie ein im Hochvakuum gebündelter Elektronenstrahl der „heißen Kathode“ erforderlich.

4.2 Anwendungsbereiche und KL-Eigenschaften

Die KL-Mikroskopie wird in der Sandstein-Petrographie zur Klärung verschiedenster Fragestellungen eingesetzt, wie etwa Kompaktion und Zementation und deren Quantifizierung sowie Rekonstruktion der Quarzzementation (diagenetische Lithifizierungsphasen).

Diese Methode basiert auf den unterschiedlichen KL-Eigenschaften detritischer und authigener Minerale. Während detritische Quarze eine blaue, rotbraune bis violette, selten rote KL aufweisen, besitzt authigener Quarz (Zement) eine fehlende bis kurzlebige, schwache KL im Braun-, Blau- oder Grün-Bereich. Hierdurch ist es möglich, detritische Quarzkörner von Quarzzement zu unterscheiden und zu quantifizieren (HOUSEKNECHT 1991). Die KL von Feldspatmineralen variiert je nach Alterationsgrad. Während frische Feldspäte eine leuchtend blaue KL aufweisen, tendieren in Alteration übergehende Minerale zu ocker- bis bräunlichen, uneinheitlichen Farbnuancen. Dies wird durch die im Verlauf der Alteration stattfindenden Stoffumsetzungsprozesse, die auch die Aktivatorelemente betreffen, verursacht. Durch diese deutlichen Unterschiede ist es möglich, den Anteil frischer und alterierter Feldspäte zu unterscheiden und zu quantifizieren. Tonminerale weisen eine dunkelbraune, uneinheitliche KL auf. Glimmerminerale weisen eine geringe dunkelblaue KL auf. Calcit hingegen tritt deutlich durch eine leuchtend orangerote bis gelbliche KL hervor. Zu weiteren Details sei auf NEUSER et al. (1994) und WEBER (2000) verwiesen.

Diese KL-Eigenschaften können eingesetzt werden, um eine genaue Unterscheidung und Quantifizierung der Mineralanteile in Sandsteinen durchzuführen. Sie ermöglichen darüber hinaus Aussagen zum Anteil sowie der Verteilung von Quarzzement (Stabilisierung des Korngerüsts), zum Anteil alterierter Feldspäte (Schwächung des Korngerüsts, Bildung intragranularer Porosität, Stoffumsetzungsvorgänge) sowie zur Verteilung der Tonminerale. Verwitterungsprozesse, die mit Stoffumsetzungen, Alteration, Mineralauflösung und Gefügeveränderungen einhergehen, können durch die KL-Mikroskopie abgebildet und in gewissem Umfang quantifiziert werden.

Zur Untersuchung der Solling-Sandsteinplatten am Jagdschloss Clemenswerth kann diese Methode daher weitergehende Aussagen zum Bestand sowie zum Verwitterungsverlauf der untersuchten Platten beisteuern.

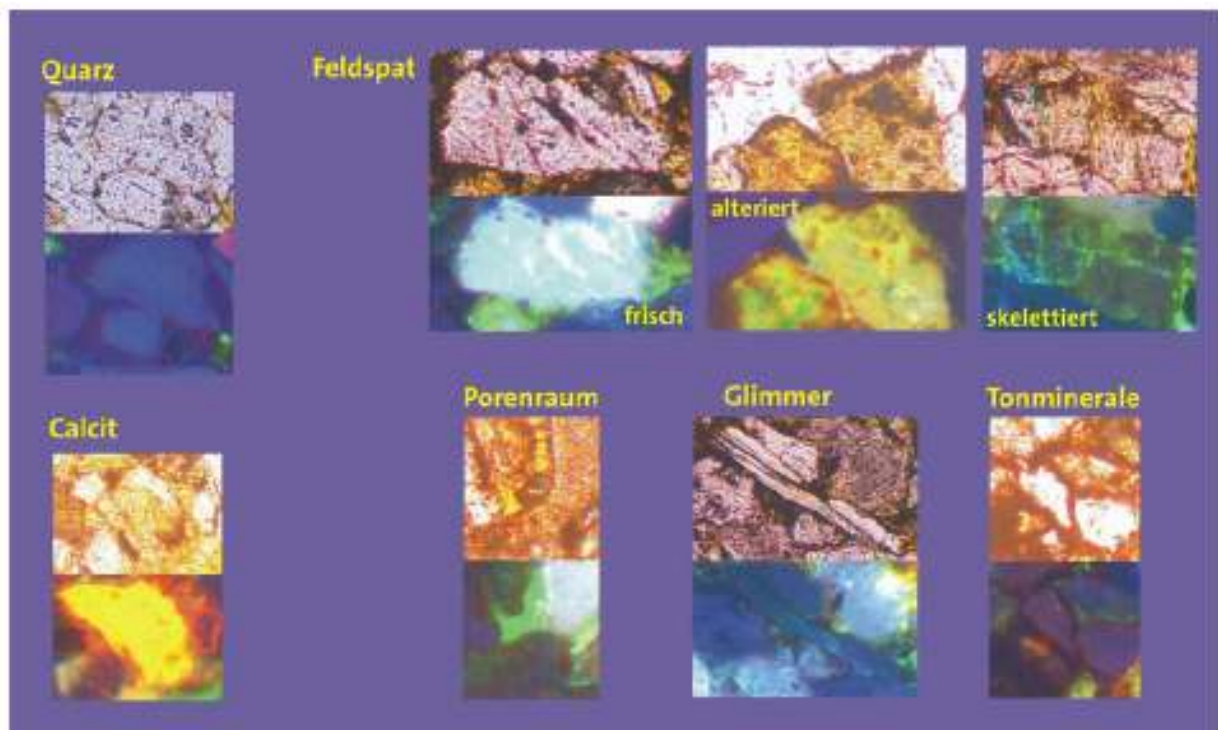


Abb. 1: KL-Eigenschaften von Mineralen in Sandsteinen

4.3 Untersuchungsverlauf

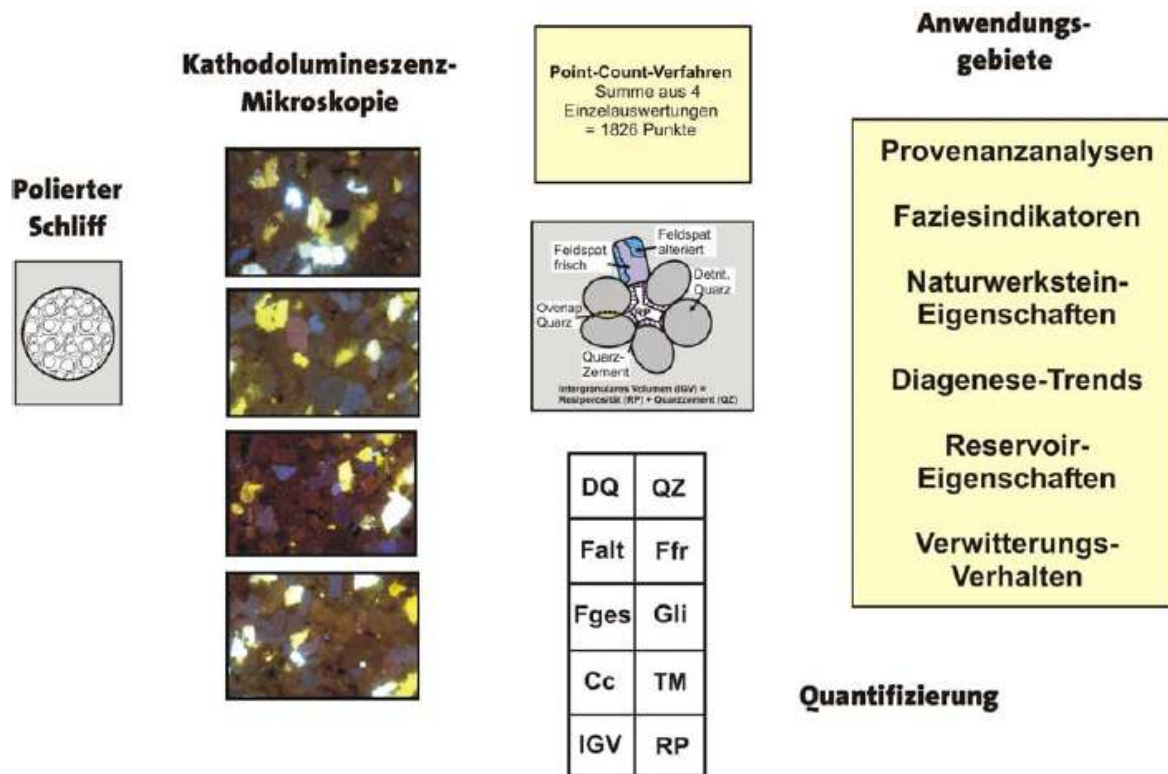


Abb. 2: Untersuchungsablauf und Anwendungsgebiete der Kathodolumineszenz-Mikroskopie

Von den zu untersuchenden Proben wurden in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, Hannover) polierte Dünnschliffe hergestellt. Diese wurden anschließend mit Kohlenstoff besputtert und der Kathodolumineszenz-Mikroskopie (heiße Kathode, NEUSER et al. 1997) zugeführt. Von jeder Probe wurden jeweils vier Bildausschnitte fotografisch dokumentiert (jeweils mit Durchlicht, gekreuzten Polarisatoren und Kathodolumineszenz). Diese Bildausschnitte wurden einem „Point-count-Verfahren“ unterzogen - insgesamt sind pro Probe 1826 Punkte ausgewertet und unterschiedlichen Mineralphasen zugeordnet worden. Diese Ergebnisse bilden die Quantifizierungsgrundlage für die Sedimentpetrographie sowie für die sensitiven Diageneseparameter, die für die Beurteilung der Dachplatten von Bedeutung sind.

5 Ergebnisse

5.1 Sedimentpetrographische Charakterisierung

0700030/12-a-1, Plattentyp 2, überdeckt eingebaut
<ul style="list-style-type: none"> – Subarkosische Wacke, mS, feinsandig, subanguläre Kornform, vorwiegend elongierte, untergeordnet konkav-konvexe Kornkontakte – Hohe intra- und intergranulare Porosität, clusterartig und lagenweise auftretend (sekundäre Porosität) durch Mineralauflösung – Lagengefüge, eingeregelter Körner – starke Feldspatalteration, hoher Tonmineralanteil, vergleichsweise hoher Glimmeranteil – geringe Quarz-Zementation, daher schwache Stabilisierung des Korngerüsts
0700031/12-a-2, frei bewitterter Teil
<ul style="list-style-type: none"> – subarkosische Wacke, mS, feinsandig, subanguläre Kornform, vorwiegend elongierte, untergeordnet konkav-konvexe Kornkontakte – intra- und intergranulare Porosität, clusterartig und lagenweise auftretend (sekundäre Porosität) durch Mineralauflösung – Lagengefüge, eingeregelter Körner – starke Feldspatalteration, hoher Tonmineralanteil, vergleichsweise hoher Glimmeranteil – geringe Quarz-Zementation, daher schwache Stabilisierung des Korngerüsts
0700034/20-a, Plattentyp 4, überdeckt eingebaut
<ul style="list-style-type: none"> – Subarkose, mS, feinsandig, subanguläre Kornform, vorwiegend elongierte, ganz untergeordnet konkavkonvexe Kornkontakte – inter- und intragranulare Porosität hoch, jedoch gleichmäßig verteilt – massiges Gefüge, Körner nicht eingeregelt – frische und stark alterierte Feldspäte, geringer Tonmineralanteil – Stabilisierung des Korngerüsts durch moderate Quarzzementation
0700035/20-c, frei bewitterter Teil
<ul style="list-style-type: none"> – Subarkose, mS, feinsandig, subanguläre Kornform, vorwiegend elongierte, ganz untergeordnet konkavkonvexe Kornkontakte – inter- und intragranulare Porosität hoch, z.T. clusterartig auftretende sekundäre Porosität durch Mineralauflösung – massiges Gefüge, Körner nicht eingeregelt – frische und stark alterierte Feldspäte, geringer Tonmineralanteil – Stabilisierung des Korngerüsts durch moderate Quarzzementation
0700037/21-c, Plattentyp 3, frei bewitterter Teil
<ul style="list-style-type: none"> – Subarkose, mS, feinsandig, subanguläre Kornform, vorwiegend elongierte, untergeordnet konkavkonvexe Kornkontakte – Kornkontakte – inter- und intragranulare Porosität hoch durch clusterartig auftretende sekundäre Porosität (Mineralauflösung) – Lagengefüge, eingeregelter Quarz- und Glimmerminerale – wenig frische, vorwiegend stark alterierte Feldspäte – Stabilisierung des Korngerüsts durch moderate Quarzzementation
0901599/22-a-1, Vorratslager, gebraucht, jedoch unverbaut
<ul style="list-style-type: none"> – Subarkose, mS, feinsandig, subanguläre Kornform, vorwiegend elongierte, ganz untergeordnet konkavkonvexe Kornkontakte – sehr geringe intergranulare Porosität, keine intragranulare, sekundäre Porosität – leichtes Lagengefüge, eingeregelter Glimmerminerale – stark alterierte Feldspäte, geringer Tonmineralanteil – derzeit noch Stabilisierung des Korngerüsts durch schwache Quarzzementation

Tab. 2: Sedimentpetrographie der untersuchten Sandsteinplatten

5.2 KL-Charakteristika der makroskopisch klassifizierten Plattentypen

Die makroskopischen Unterschiede der klassifizierten Plattentypen lassen sich mit der KL-Mikroskopie weiter präzisieren. Das Gefüge wird durch Mineraleinregelung (deutlich: Glimmer), elongierte Körner, schichtparallele Mineralcluster sowie schichtparallel auftretende sekundäre Porosität nachgezeichnet.

Plattentyp 2, verbaut (Probe 12-a-1, 12-a-2):

Die plattig aufspaltenden, leicht verwitterbaren Solling-Sandsteinplatten zeigen eine deutliche Mineraleinregelung, einen primär geringen Quarzzementgehalt, hohe Tonmineralanteile (subarkosische Wacken) und eine clusterförmige, schichtparallel verlaufende sekundäre Porosität, die durch partielle Feldspatauflösung verursacht ist.

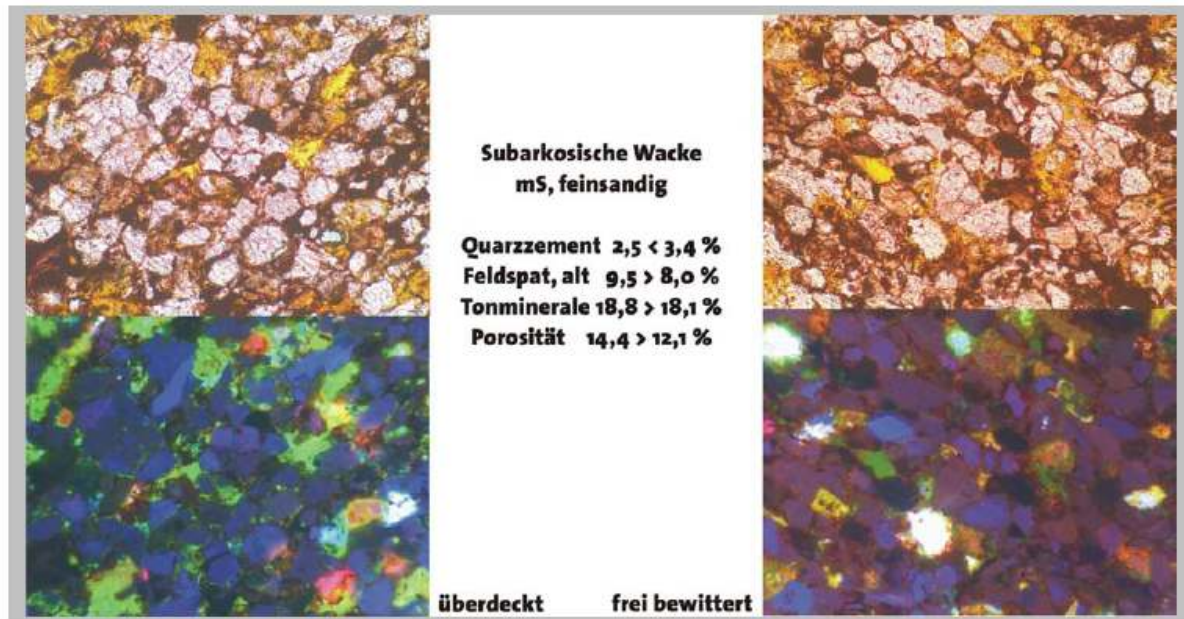
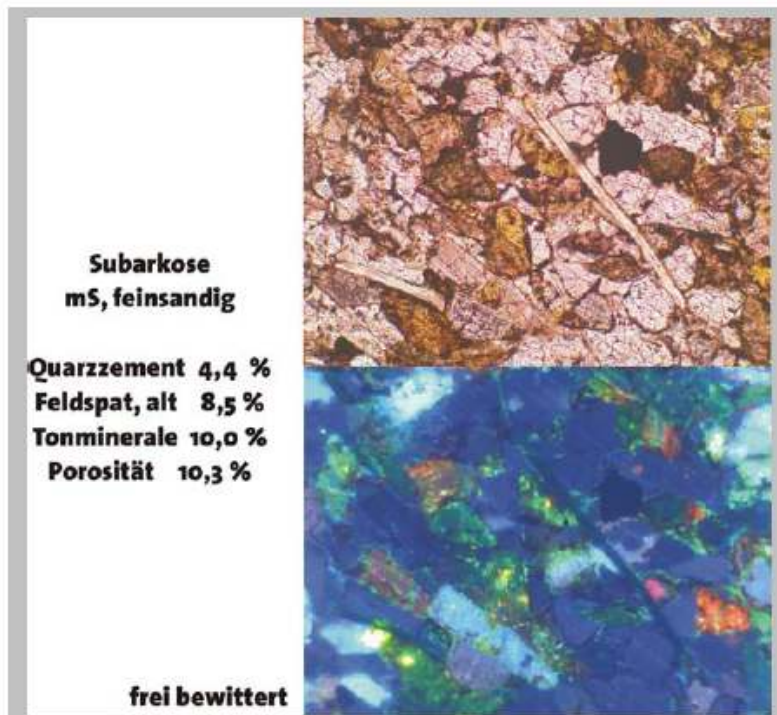


Abb. 3: KL-Charakteristika des Plattentyps 2



Plattentyp 3, verbaut (Probe 21-c):

Die plattig aufspaltenden, weniger verwitterungsanfälligen Solling-Sandsteinplatten zeichnen sich durch vergleichsweise höhere Quarzzementgehalte, geringere Tonmineralanteile sowie eine moderate, gleichmäßige Porositätsverteilung aus.

Abb. 4: KL-Charakteristika des Plattentyps 3

Plattentyp 4, verbaut (Probe 20-a, 20-c):

Die massigen Platten, die die vergleichsweise höchste Verwitterungsresistenz aufweisen, zeigen die höchsten Quarzzementgehalte und den geringsten Tonanteil. Trotz eines hohen Anteils alterierter Feldspäte und einer Porositätssteigerung der frei bewitterten Bereiche ist das Korngerüst stabil.

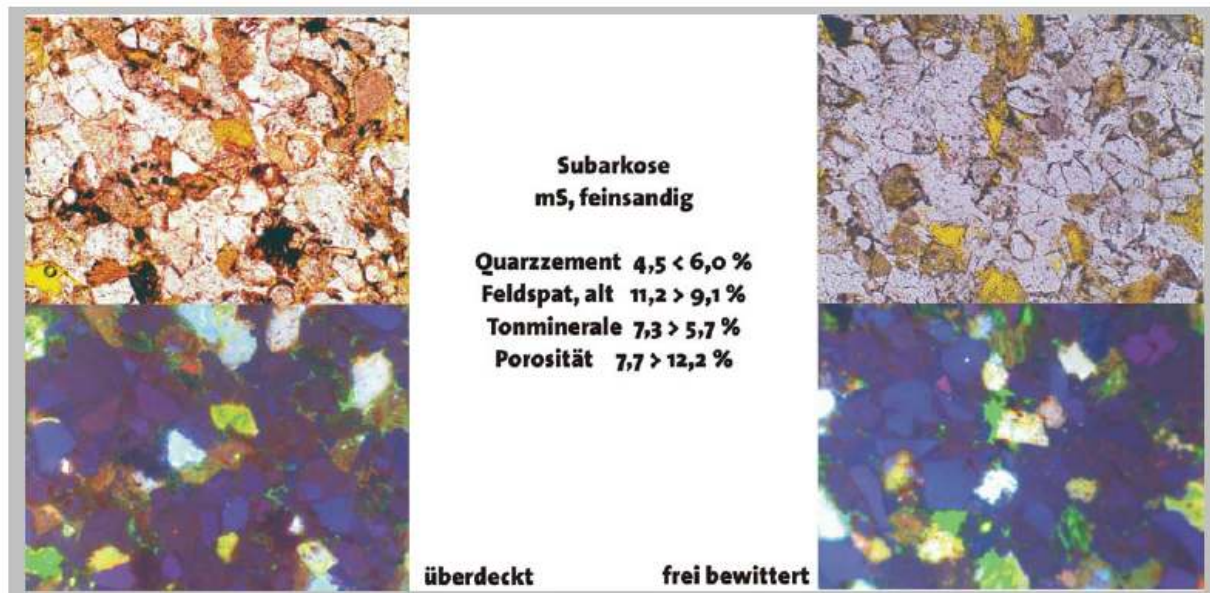


Abb. 5: KL-Charakteristika des Plattentyps 4

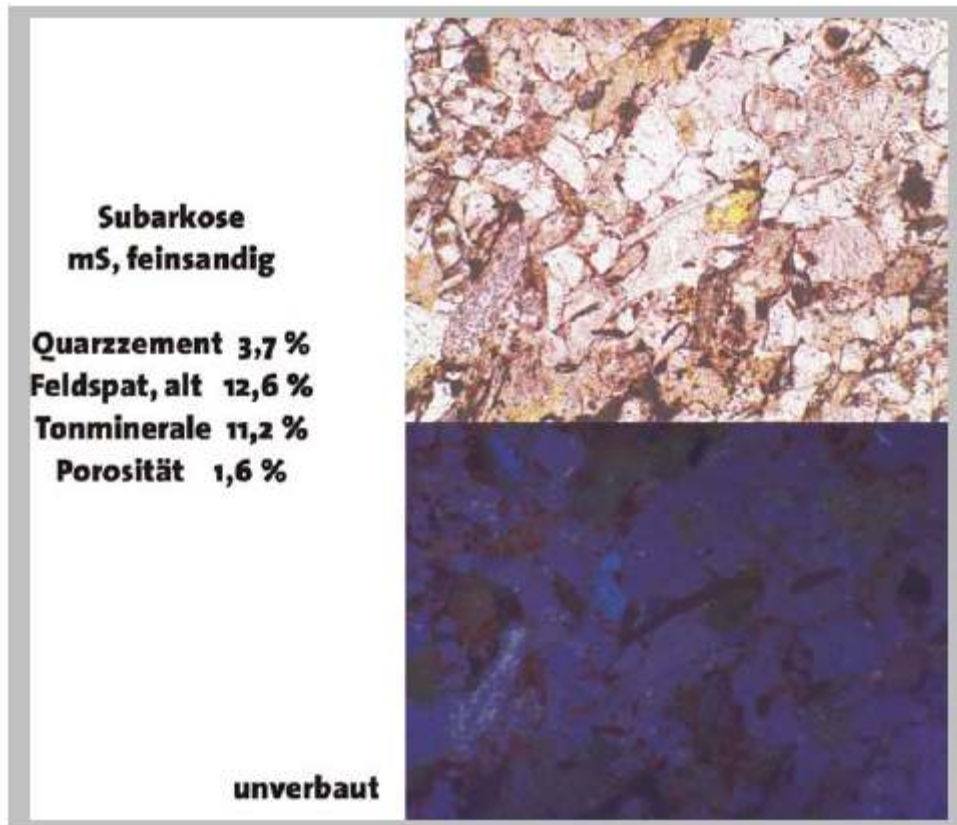
Vorratslager, gebraucht, derzeit unverbaut (Probe 22-a-1):

Abb. 6: KL-Charakteristika der Platte "Vorratslager"

Die unverbaute Solling-Sandsteinplatte aus dem Vorratslager weist die am wenigsten sekundär überprägte Kornzusammensetzung auf. Die primäre Porosität ist sehr gering, sekundäre Porosität nicht feststellbar. Die Körner weisen einen geschlossenen Verband auf. Aufgrund des geringen Quarzzementgehaltes sowie hoher Anteile alterierten Feldspats und Tonminerale ist es jedoch zu erwarten, dass die Platte nach Einbau und damit verbundener Exposition typische Verwitterungsschäden aufweisen wird.

Probe Nr.	0700030/ 12-a-1	0700031/ 12-a-2	0700034/ 20-a	0700035/ 20-c	0700037/ 21-c	0901599/ 22-1-a
Korngröße	mS, fs	mS, fs	mS, fs	mS, fs	mS, fs	mS, fs
Platten-Typ	T2, Ü	T2, FB	T4, Ü	T4, FB	T3, FB	PM-V
Mineral %						
DQ	53,3	59	66,8	63,3	57,6	69,6
QZ	2,5	3,4	4,5	6	4,4	3,7
Ffr	2,5	2,5	4,5	4,5	7,2	-
Falt	9,5	8	11,2	9,1	10,6	12,6
- 1/5 Falt *	1,9	1,6	2,2	1,8	2,1	* n.v.
Falt korr	7,6	6,6	9	7,3	8,5	12,6
Fges	10,1	9,1	13,5	11,8	15,7	12,6
Intergr-P	11,2	7,7	4	9,2	6,8	1,6
Intragr-P	3,2	4,4	3,7	3	3,5	* n.v.
Ges-P	14,4	12,1	7,7	12,2	10,3	1,6
IGV	16,9	15,5	12,2	18,2	14,5	9,5
TM + Hä	18,8	18,1	7,3	5,7	10	11,2
Cc	0,8	0,4	0,8	1	0,6	-
Gli	1,4	0,8	0,9	1,2	2,6	1,3
Summe	100	100	100	100	100	100

Tab. 3: Sedimentpetrographische Kenndaten:

DQ = detritischer Quarz, QZ = Quarzzement, Ffr = Feldspat, frisch, Falt = Feldspat, alteriert, Fges = Feldspat gesamt, Intergr-P = intergranulare Porosität, Intragr-P = intragranulare Porosität, Ges-P = Gesamtporosität, IGV = Intergranulares Volumen, TM + Hä = Tonminerale + Hämatit, Cc = Calcit, Gli = Glimmer (Muscovit). Rote Markierung: sensitive Diagenese-Parameter, mS = Mittelsand, fs = feinsandig, T2 = Plattentyp 2, T3 = Plattentyp 3, T4 = Plattentyp 4, Ü = überdeckt, FB = frei bewittert, PM-V = Probenmaterial, Vorratslager.

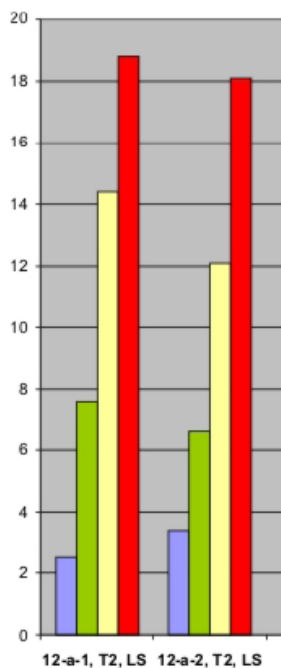
* Aufgrund der zu beobachtenden hohen intragranularen Porosität der partiell aufgelösten alterierten Feldspäte wurde als weiterer Parameter die „Intragranulare Porosität“ (entspricht 1/5 der gezählten Falt-Points) eingeführt. Diese hätte ansonsten bedingt durch die feine Porositäts-Verteilung mit dem Pointcountverfahren nicht erfasst werden können. Der Feldspatgehalt berücksichtigt demnach auch die Mineralauflösung. Die Gesamtporosität setzt sich aus intra- und intergranularer Porosität zusammen. Das Intergranularvolumen (IGV) bezeichnet die Restporosität zuzüglich des Quarzzementgehaltes (= Kompaktionsindikator).

5.3 KL-Charakteristika überdeckter und frei bewitterter Plattenbereiche

Die Proben 12-a-1 und 12-a-2 stammen von einer Platte, die jeweils im überdeckten und frei bewitterten Bereich beprobt wurde. Gleiches gilt für die Proben 20-a und 20-c.

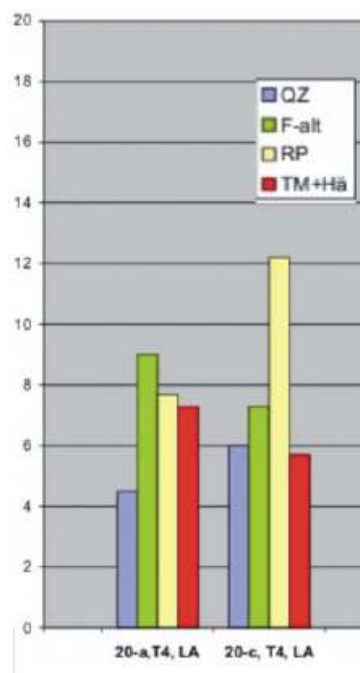
Hintergrund dieser Probenauswahl war es, mögliche Unterschiede in der Mineralzusammensetzung zwischen überdeckten und frei bewitterten Bereichen zu erfassen und zu dokumentieren, die auf Verwitterungsprozesse zurückgeführt werden können.

Probe	0700030/ 12-a-1	0700031/ 12-a-2
Mineral %	T2, Ü	T2, FB
DQ	53,3	59
QZ	2,5	3,4
Ffr	2,5	2,5
Falt	9,5	8
- 1/5 Falt	1,9	1,6
Falt korr	7,6	6,6
Fges	10,1	9,1
Intergr-P	11,2	7,7
Intragr-P	3,2	4,4
Ges-P	14,4	12,1
IGV	16,9	15,5
TM + Hä	18,8	18,1
Cc	0,8	0,4
Gli	1,4	0,8
Summe	100	100



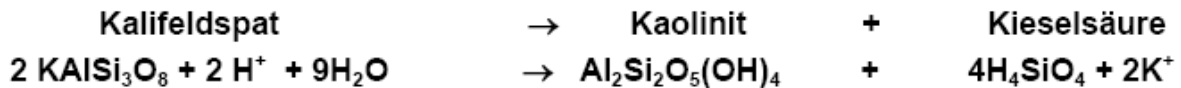
Tab. 4: Untersuchungsergebnisse der Platte 12-a-1/12-a-2. Histogramm: blau = Quarzzement, grün = Feldspat, alteriert, gelb = Gesamtporosität, rot = Tonmineralgehalt.

Probe	0700034/ 20-a	0700035/ 20-c
Mineral %	T4, Ü	T4, FB
DQ	66,8	63,3
QZ	4,5	6
Ffr	4,5	4,5
Falt	11,2	9,1
- 1/5 Falt	2,2	1,8
Falt korr	9	7,3
Fges	13,5	11,8
Intergr-P	4	9,2
Intragr-P	3,7	3
Ges-P	7,7	12,2
IGV	12,2	18,2
TM + Hä	7,3	5,7
Cc	0,8	1
Gli	0,9	1,2
Summe	100	100



Tab. 5: Untersuchungsergebnisse der Platte 20-a/20-c. Histogramm: blau = Quarzzement, grün = Feldspat, alteriert, gelb = Gesamtporosität, rot = Tonmineralgehalt.

Bei der Feldspatalteration entstehen 66 % Tonminerale und 44 % freie Kieselsäure.



(aus BJØRLYKKE 1994)

Während der anschließenden Austrocknungsphasen veränderten diese sauren, Kieselsäure gesättigten Porenlösungen innerhalb der Sandsteinplatte sukzessive ihre Zusammensetzung. Es kam zu einem pH-Anstieg und zu einer Kieselsäure-Anreicherung der Porenlösung, was eine Präzipitation von authigenen Phasen (Quarz, Tonminerale) begünstigte (siehe Abb. 8). Da die Tonminerale jedoch im Gegensatz zum Quarzzement weniger resistent sind, konnten sie bei der folgenden Beregnungsphase teilweise weggeführt werden, während der authigene Quarzzement im Gestein verblieb und so zur Stabilisierung des Korngerüsts beiträgt. Dieser Umsetzungsprozess, der die Anreicherung von Quarzzement in den frei bewitterten Proben erklären kann, sollte im Rahmen vergleichender Untersuchungen näher beleuchtet werden.

5.4 Korrelation der KL-Charakteristika mit Gefüge und Ablagerungsmilieu

Die makroskopischen Unterschiede der klassifizierten Plattentypen bilden sich auch in den KL-Charakteristika ab. Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang mit dem fluviatilen Ablagerungsmilieu des Roten Wesersandsteins (WEBER, 2000). Demnach lassen sich die Typencharakteristika unterschiedlichen Ablagerungsbereichen des fluviatilen Milieus der Oberen Solling-Folge zuordnen (fluviatile Architektur).

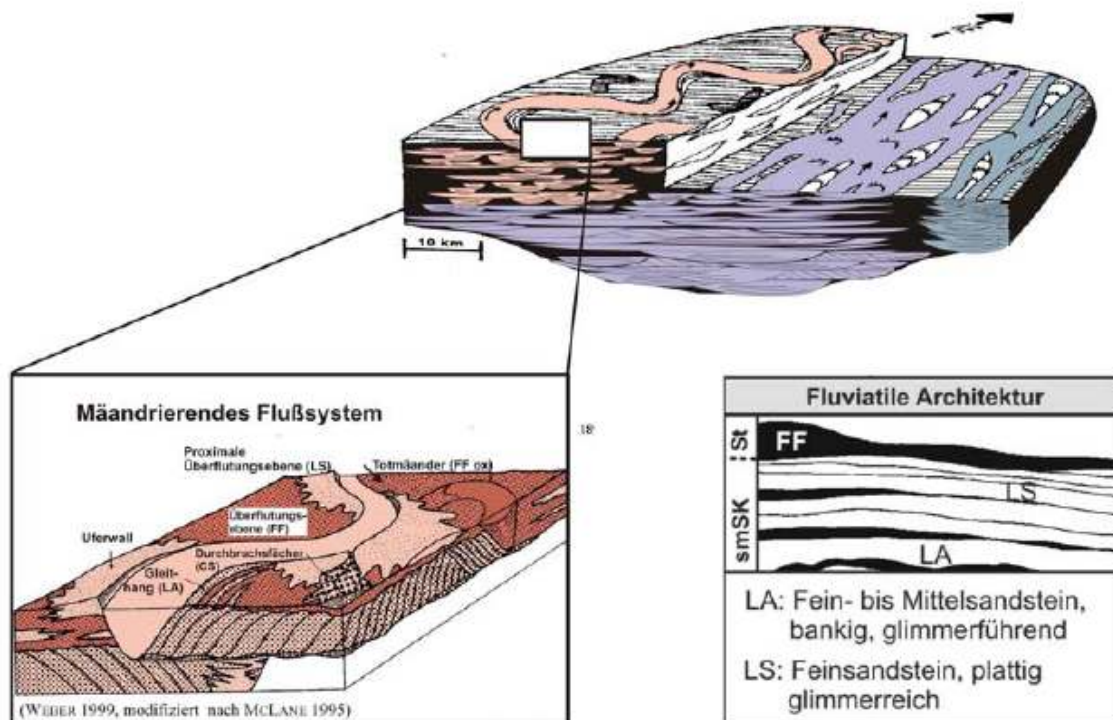


Abb. 9: Ablagerungsmilieu und fluviatile Architektur des Roten Wesersandsteins (Obere Solling-Folge)

Plattentyp 2:

Die ausgeprägt plattigen, glimmerreichen subarkosischen Wacken weisen parallele Schichtung auf und können dem Element "Schichtfluten" (LS) eines mäandrierenden Flusssystemes zugeordnet werden.

Plattentyp 3:

Die weniger plattigen, glimmerreichen Subarkosen weisen eine weniger ausgeprägte parallele Schichtung auf und lassen sich dem Element LA/LS - dem Übergang vom Schichtflutbereich in den Gleithang - zuordnen.

Plattentyp 4:

Die massigen, glimmerarmen Subarkosen können große Sedimentkörper bilden - sie lassen sich dem Element LA (Gleithang) zuordnen. Die gewinnbaren Rohböcke weisen vergleichsweise gute Werksteineigenschaften auf (LEPPER & WEBER 2001).

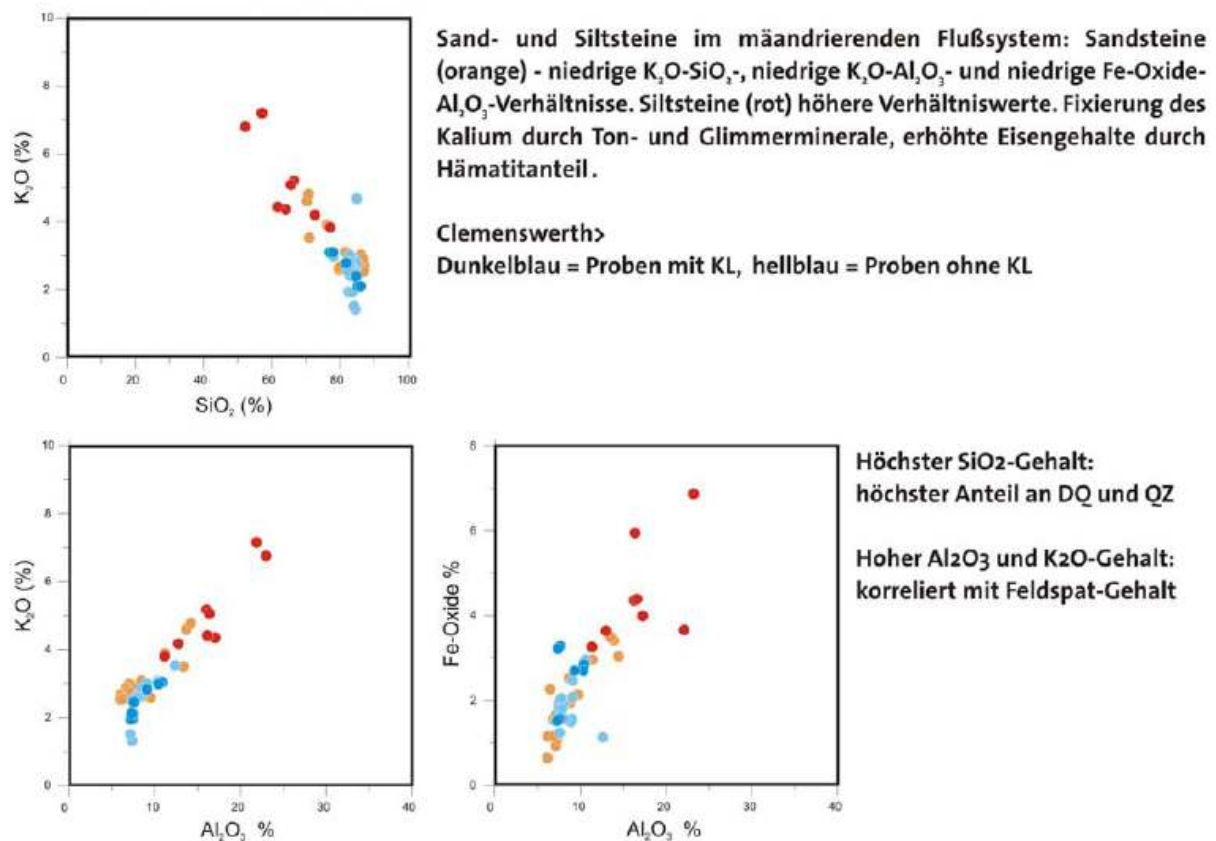
5.5 Korrelation der KL-Chakteristika mit den geochemischen Befunden

Abb. 10: Die RFA-Ergebnisse der Clemenswerth-Proben (Datenbasis: LEPPER & STADLBAUER, in Vorber.) korrelieren mit den Elementoxid-Verhältnissen des Roten Wesersandsteins (modifiziert nach WEBER 2000).

Die KL-Befunde korrelieren ebenfalls mit den Ergebnissen der XRD, RFA sowie KAK. Die durch die halbquantitative XRD ermittelte Mineralzusammensetzung wird durch die Ergebnisse der Sedimentpetrographie bestätigt und präzisiert. Die KL ermöglicht darüber hinaus insbesondere Aussagen zur Quarzzementation, zum Kornverband, zur Feldspatalteration sowie zur Porositätsverteilung. Die RFA zeigt eine eindeutige Zuordnung der Proben zum typischen Roten Wesersandstein der Oberen Solling-Folge. Dies bestätigen vergleichende Elementverhältnisse (siehe Abb. 10).

Darüber hinaus spiegeln sich die hohen Feldspatanteile in entsprechend hohen Al_2O_3 - und K_2O -Werten wieder. Der hohe durch KL ermittelte Quarzanteil korreliert mit dem höchsten SiO_2 -Gehalt der RFA-Beprobung.

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) ist generell sehr gering, sie korreliert jeweils mit dem Anteil an quellfähigen Tonmineralen in den Proben.

6 Diageneseparameter im Vergleich zum Roten Wesersandstein

Der Rote Wesersandstein (Obere Solling-Folge), der als Ressource für die Solling-Sandsteinplatten am Jagdschloss Clemenswerth dient, ist in Bezug auf seine Diagenese-Eigenschaften sehr detailliert untersucht worden (WEBER 2000, LEPPER & WEBER 2001, WEBER & LEPPER 2002).

Es handelt sich im Wesentlichen um zwei Grundtypen, die sich bezüglich ihrer Diageneseparameter voneinander unterscheiden und verschiedenen Ablagerungsräumen im fluviatilen Milieu der Oberen Solling-Folge zugeordnet werden können.

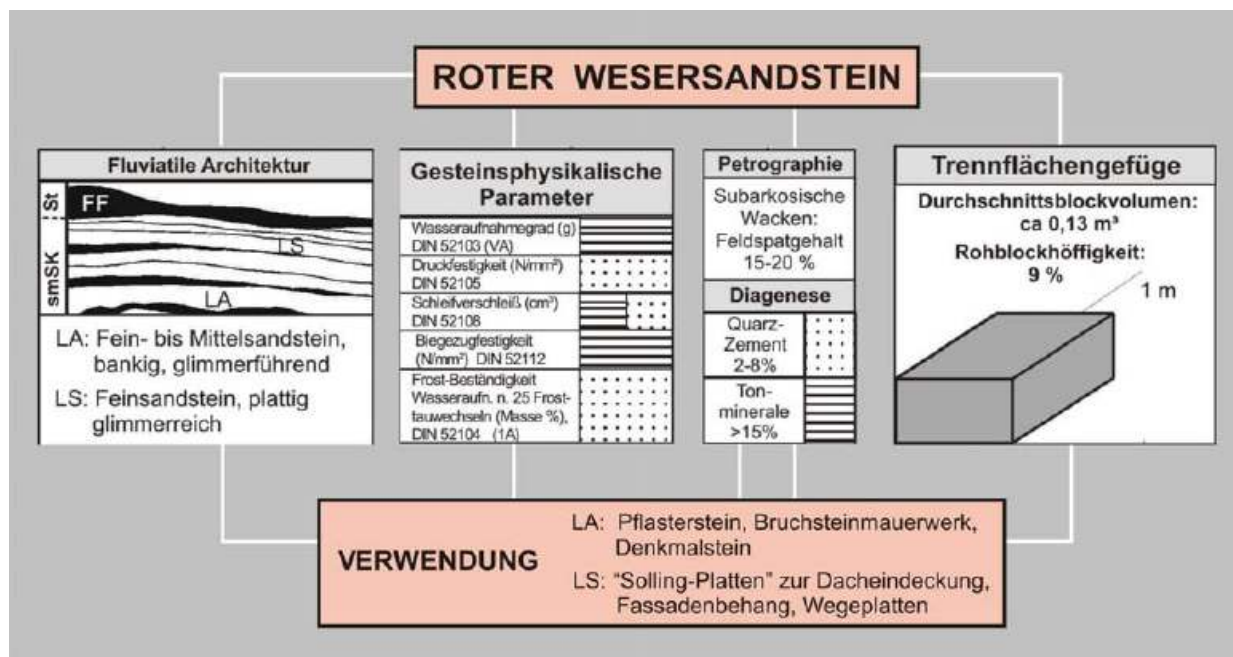


Abb. 11: Diageneseparameter des Roten Wesersandsteins (Obere Solling-Folge, modifiziert nach LEPPER & WEBER 2001).

Grundsätzlich handelt es sich um mäandrierende Flüsse mit klar definierten Ablagerungsbereichen. Während der Grundtyp LA (lateral accretion, Gleithangposition) ein eher bankiges bis massiges Gefüge, Quarzzementgehalte von bis zu 8 % und Tonmineralanteile unter 10 % aufweist, zeichnet sich der Grundtyp LS (laminated sand, Schichtflutbereich) durch ein ausgeprägt plattiges, Ton- und Glimmer reiches Gefüge, Quarzzementgehalte um 2 % sowie Tonmineralanteile über 15 % aus. Der Anteil an alterierten Feldspäten ist im Fall des Grundtyps LS durch den Einfluss saurer Porenlösungen im Diageneseverlauf höher.

Die untersuchten Solling-Sandsteinplatten von Clemenswerth waren mehr oder weniger, jedoch ausnahmslos, im Rahmen ihrer wiederholten Verwendung der Verwitterung ausgesetzt.

Dies zeigt sich vor allem durch eine verstärkt auftretende sekundäre Porosität, die durch rezente Feldspatalteration bedingt ist. Grundsätzlich ist es jedoch - unter Berücksichtigung dieser Verwitterungseffekte - möglich, die Sandsteinplatten von Clemenswerth in das Gesamtbild der Diageneseparameter des Roten Wesersandsteins einzuordnen.

Mit einem Vergleich von Intergranularem Volumen (IGV = Restporosität + Quarzzement) und Quarzzementgehalt - ist es möglich, Aussagen darüber zu treffen, wann das Korngerüst nach Kompaktion durch Quarzzementation stabilisiert wurde. Dies gibt gleichzeitig an, welche Prozesse bei der Lithifizierung eher im Vordergrund standen - Kompaktion oder Zementation. Ein Vergleich der Clemenswerth-Proben mit den IGV/QZ-Daten des Roten Wesersandstein zeigt, dass sie ebenfalls vorwiegend durch Kompaktion lithifiziert worden sind. Die Zementation zeigt lediglich eine untergeordnete Rolle. Die leichte vertikale Verschiebung der Clemenswerth-Werte zu einem höheren IGV resultiert aus deren sekundärer Porosität. Da sich das IGV aus der Restporosität und dem Quarzzementgehalt zusammensetzt, führt eine verwitterungsbedingte sekundäre Porosität automatisch zu einer sekundären Erhöhung des IGV.

Ohne Berücksichtigung der sekundären Porosität würden die Clemenswerth-Proben genau im Bereich des Roten Wesersandsteins plotten. Die Werte, die dem Roten Wesersandstein am nächsten kommen, weisen die geringste sekundäre Porosität auf, während die Proben mit der höchsten sekundären Porosität die deutlichsten Verschiebungen aufweisen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Diageneseparameter der Clemenswerth-Proben sehr gut mit denen des Roten Wesersandsteins korrelieren. Darüber hinaus sind rezente Verwitterungseffekte deutlich von diagenetischen Effekten im erdgeschichtlichen Verlauf zu unterscheiden - durch die sekundäre Porosität, die am IGV/QZ-Diagramm anhand einer deutlichen Verschiebung erkennbar ist.

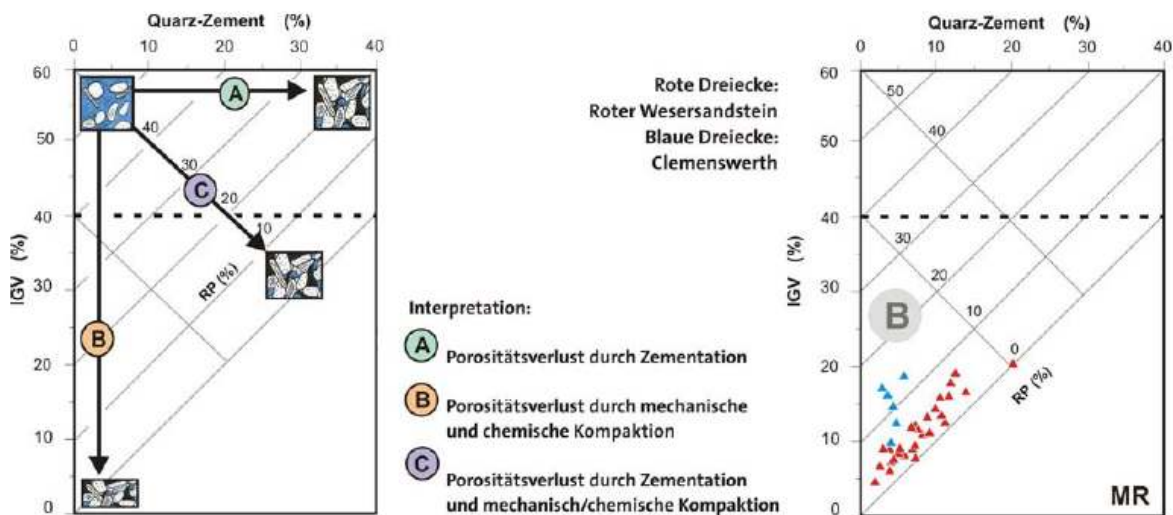


Abb. 12: Diageneseparameter des Roten Wesersandsteins (rote Dreiecke) und der Clemenswerth-Proben (blaue Dreiecke).

7 Prognosen zum Verwitterungsverhalten von Solling-Sandsteinplatten

Die KL- und Sedimentpetrographie-Befunde in Kombination mit dem Gefüge lassen Prognosen zum Verwitterungsverhalten der Solling-Sandsteinplatten zu. Je höher der primäre Gehalt an Quarzzement und je niedriger der primäre Tongehalt, umso verwitterungsresistenter ist die Platte. Weist die Platte darüber hinaus massiges anstatt lagiges Gefüge auf, wirkt sich dies ebenfalls positiv auf die Verwitterungsresistenz aus. Dies trifft auf den Plattentyp 4 zu (Probe 20a/20c). Selbst bei zunehmender Feldspatauflösung kommt es - auch aufgrund von möglicher Quarzzementneubildung - nicht zum Zusammenbruch des Korngerüsts. Das massige Gefüge ohne Korneinregelung bedingt darüber hinaus, dass es nicht zur Bildung bevorzugter Bahnen für Verwitterungslösungen und schichtparallel auftretender sekundärer Porosität durch Mineralauflösung kommt.

Solling-Sandsteinplatten des Typs 4, die dem Architekturelement LA zugeordnet werden können, haben demnach die vergleichsweise höchste Verwitterungsresistenz und damit die für die weitere Verwendung günstigste Prognose.

Je geringer der primäre Quarzzementgehalt und je höher der primäre Tonmineralgehalt, umso stärker können Verwitterungslösungen eindringen und das Korngerüst schädigen. Kommt lagiges Gefüge hinzu, kann es entlang der schichtparallel vorkommenden verwitterungsanfälligeren Minerale (Feldspäte, Glimmer, Tonminerale) zu lagenweiser, clusterartig auftretender sekundärer Porosität durch Feldspatauflösung kommen. Die so entstehenden schichtparallel auftretenden Wasserwegsamkeiten führen schließlich zur lagenparallelen Auflösung des Kornverbandes (Abplatzen, Aufspalten).

Dies trifft insbesondere auf die Solling-Sandsteinplatten des Typs 2 - sowie in geringerem Maße -des Typs 3 zu (Proben 12-a-1/12-a-2 und 21-c).

Solling-Sandsteinplatten des Typs 2, die dem Architekturelement LS zugeordnet werden können, zeigen demnach die ungünstigste Verwitterungsprognose.

Solling-Sandsteinplatten des Typs 3 weisen mittlere Quarzzement- und Tonmineralgehalte auf, was in engem Zusammenhang mit mäßig plattigem bis bankigem Gefüge steht und den Typ 3 als Übergangstyp zwischen Typ 2 und Typ 4 charakterisiert.

Die ebenfalls untersuchte, unverbaute Solling-Sandsteinplatte aus dem Vorratslager, welche die geringste Porosität und das stabilste Korngerüst aufweist, verfügt über einen primär geringen Quarzzementgehalt, gepaart mit einem hohen Tonmineralgehalt. Diese Kombination sowie der hohe Anteil bereits in Alteration begriffener Feldspäte lässt vermuten, dass die Platte bei weiterer Verwendung einem eher ungünstigen Verwitterungsverlauf unterliegt. Sie wird wahrscheinlicher dem Schadensbild des Plattentyps 2 bzw. 3 entsprechen, als die relative Stabilität des Plattentyps 4 zu beizubehalten.

Probe Nr.	0700030/ 12-a-1	0700031/ 12-a-2	0700034/ 20-a	0700035/ 20-c	0700037/ 21-c	0901599/ 22-1-a
Korngröße	mS, fs	mS, fs	mS, fs	mS, fs	mS, fs	mS, fs
Platten-Typ	T2, Ü	T2, FB	T4, Ü	T4, FB	T3, FB	fr-PM
Fluviatile Architektur	LS	LS	LA	LA	LS/LA	LS
Sensitive Diageneseparameter (Mineral %)						
QZ	2,5	3,4	4,5	6	4,4	3,7
Falt	7,6	6,6	9	7,3	8,5	12,6
Intergr-P	11,2	7,7	4	9,2	6,8	1,6
Intragr-P	3,2	4,4	3,7	3	3,5	* n.v.
Ges-P	14,4	12,1	7,7	12,2	10,3	1,6
TM + Hä	18,8	18,1	7,3	5,7	10	11,2

Tab. 6: Zusammenfassung der sensitiven Parameter. LS = laminated sand, LA = lateral accretion (weitere Abkürzungen siehe Tab. 3)

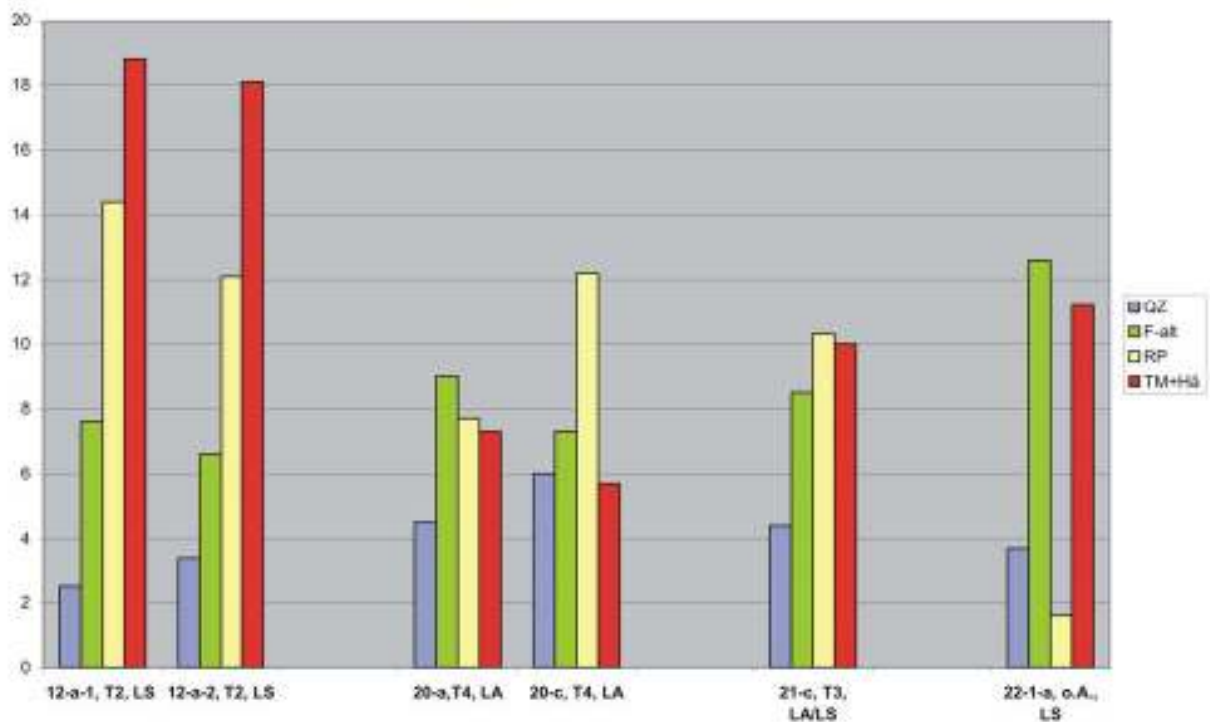


Abb. 13: Histogramm - Trends sensitive Diageneseparameter

8 Abschließende Bewertung und Ausblick

Die KL-Mikroskopie stellt eine detaillierte und erweiternde Methode zur Untersuchung der Eigenschaften und zur Prognostizierung des Verwitterungsverhaltens von Dachsteinplatten der Oberen Solling-Folge (Roter Wesersandstein) dar. Die Ergebnisse präzisieren die geochemischen und mineralogischen Untersuchungen (LEPPER & STADLBAUER, in Vorb.) und erlauben darüber hinaus eine Korrelation sowohl mit dem makroskopischen Gefüge als auch mit dem fluviatilen Ablagerungsmilieu der Oberen Solling-Folge (mäandrierendes Flusssystem, Architekturelemente LA, LS, WEBER 2000, LEPPER & WEBER 2001).

Daneben gibt es Hinweise auf diagenetische Umsetzungsprozesse innerhalb der Platten im Verlauf der Verwitterung, die in engem Zusammenhang mit Feldspatalteration und Quarzauthigenese stehen (WEBER 2000, WEBER & RICKEN 2005).

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse der Kathodolumineszenz-Mikroskopie basieren auf einer exemplarischen Auswahl typischer Solling-Sandsteinplatten. Sie geben erste Hinweise auf Zusammenhänge zwischen makroskopischem Gefüge, Sedimentpetrographie, Quarzzementation, Feldspatalteration und Porositätsentwicklung einerseits und Ablagerungsmilieu in Kombination mit fluviatiler Architektur andererseits in Bezug auf den Verlauf der Verwitterung. Dies bestätigt und ergänzt die bestehenden Erkenntnisse zur Charakterisierung der Naturwerkstein-Eigenschaften des Roten Wesersandsteins (WEBER & LEPPER 2002).

Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse ist es naheliegend, die Kathodolumineszenz-Mikroskopie grundsätzlich als ergänzende Methode in das Untersuchungsspektrum zum Verwitterungsverhalten von Solling-Sandsteinplatten mit einzubeziehen und damit modellhaft die Ergebnisse im Rahmen vergleichbarer Fragestellungen weiter zu vertiefen.

III. Geowissenschaftliche und denkmalpflegerische Untersuchungen - Materialeigenschaften, Verwitterungsresistenz, Verfügbarkeit und Ressourcenschonung

von Erwin Stadlbauer und Jochen Lepper

1 Einleitung

In den vergangenen Jahren mussten die in Solling-Sandstein (Buntsandstein) gedeckten Dächer der sog. Pavillons des Jagd Schlosses Clemenswerth instandgesetzt werden. Ein Modellprojekt des Landkreises Emsland, das aus Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert wurde, diente der Untersuchung der Solling-Dachplatten, um die Schadensursachen und die Erhaltungsmöglichkeiten im Sinne der Ressourcenschonung zu klären.

In Anbetracht der schwindenden Ressource „Solling-Platte“ wurden folgende Projektaufgaben bearbeitet:

- Charakterisierung des Solling-Sandsteins als Geo- und als Baumaterial sowie als Ressource (Dachdecker-Firma Müller, Dr. Neumann / Remmers Fachplanung, NLD in Kooperation mit dem Geozentrum Hannover sowie Dr. Lepper und Dr. Weber)
- Prüfung der Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von Konservierungsmaßnahmen an Sandsteinprüfkörpern im Labor und mittels Freibewitterung (Dr. Neumann / Remmers Fachplanung)
- Untersuchung der bauphysikalischen Rahmenbedingungen zur Schadensvorsorge und Langzeittest von Materialprüfkörpern in Freibewitterung (LK EL und Remmers Fachplanung)

Die Charakterisierung des Steinmaterials wurde mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt. Interessant war zunächst die handwerkliche Beurteilung der auf Schloss Clemenswerth vorhandenen Solling-Platten. Diese wurden hinsichtlich des optischen Zustands und mittels Klangprobe in Gruppen unterteilt (Fa. Müller in Zusammenarbeit mit Dr. Neumann / Remmers Fachplanung). Die geowissenschaftliche Charakterisierung der Dachplatten-Gruppen erfolgte dann anhand von Stichproben, die petrografisch, physikalisch und geochemisch untersucht wurden (WEBER 2009, NEUMANN 2010).

Nachfolgend werden zunächst die geologischen Grundlagen und die bautechnischen Eigenschaften des Buntsandsteins aus dem Solling dargestellt. Danach werden die geochemischen Materialdaten der Dachplatten von Clemenswerth erläutert und mit den Kennwerten des Solling-Sandsteins verglichen. Diese Ergebnisse werden dann im Zusammenhang mit den Daten von WEBER (2009) und NEUMANN (2010) diskutiert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Denkmalpflege interpretiert.

2 Geologie und bautechnische Eigenschaften der Buntsandstein-Dachplatten

Die Sandstein-Dachplatten von Schloss Clemenswerth werden gemeinhin -und wie auch anderenorts üblich- verallgemeinernd als „Solling-Platten“ bezeichnet. Es sind dies Dachplatten, die handwerklich aus Rotsandsteinen geschlagen wurden. Hierfür eignet sich im gesamten norddeutschen Raum nur ein spezifischer Sandstein-Typ, der regional begrenzt einzig im südniedersächsisch-nordhessisch-ostwestfälischen Buntsandstein-Bergland an der Oberweser vorkommt und sich auch nur hier zur traditionellen Herstellung von handgespaltenen Dach- (und Fassadenbehang-) Platten eignet (LEPPER 2000, LEPPER et al. 2000).

Das räumlich begrenzte Vorkommen dieser plattig aufzuspaltenden Sandsteine ist zurückzuführen auf spezifische paläogeographische und fließdynamische Sedimentationsbedingungen zur Buntsandstein-Zeit, in der diese Sandsteine ursprünglich als lockere Fluss-Sande abgelagert wurden:

In dem reliefarmen mitteleuropäischen kontinentalen Sedimentationsbecken führten weitläufige Fluss-Systeme aus südlichen Richtungen während eines nur kurzen erdgeschichtlichen Zeitraumes von nur wenigen 100.000 Jahren große Mengen einer fein- bis mittelkörnigen Sandfracht in das Gebiet des heutigen Weserberglandes, wo diese als Lockersedimente abgelagert wurden. Unter der Auflast jüngerer Deckschichten verfestigte der Komplex dieser Lockerablagerungen im Laufe der Erdgeschichte zu diversen Sedimentgesteinen (Sandsteine, Schluffsteine, Tonsteine). Im Schichtkomplex der sog. Solling-Folge finden wir daher heute über- und nebeneinander verbreitet sandige Rinnenablagerungen, Uferwall-Sedimente und Ablagerungen von Durchbruchsfächern, feinere Absätze auf den weiten Überflutungsebenen und schließlich Totarm-Ablagerungen in abgehängten Fluss-Schlingen (WEBER 2000). Ebenfalls in dieser Zeitspanne abgelagerte tonige Binnensee-Sedimente bleiben hier außer Betracht. Im Hinblick auf die Herstellung von Sandstein-Platten, die zur Dachdeckung oder als Fassadenbehang geeignet sind, interessiert hier allerdings nur ein ca. 30 - max. 60 m mächtiges Schichtpaket des geologisch als Bausandstein der Solling-Folge bezeichneten Schichtabschnitt im höchsten Mittleren Buntsandstein. Insgesamt erreicht der Buntsandstein im Weserbergland Mächtigkeiten von 600 - 1300 m, aber nur wenige 10-er Meter davon sind nur für die Gewinnung von Rohsteinen für die Sandsteinplatten-Herstellung geeignet. Entgegen der landläufig verbreiteten Vermutung, dass die plattige Absonderung der Sandsteine einem oberflächennahen Verwitterungsprozess zuzuschreiben ist, konnte WEBER (2000) vielmehr primäre Ursachen herausarbeiten. Es sind dies ablagerungszeitliche und diagenetische Charakteristika: feinlamellierte, parallel-ebenschichtige Sandablagerungen finden sich nur im hoch-energetischen Ablagerungsmilieu eines oberen Flussregimes außerhalb der eigentlichen Rinnen, wo auf der proximalen Überflutungsebene nach heftigen Regenfällen ephemere Schichtfluten derartige Sandablagerungen hinterlassen können. Im Zuge der nachfolgenden Diagenese und einer damit verbundenen relativ hohen mechanisch-chemischen Kompaktion, aber nur moderaten Kieselsäure-Zementation, verfestigen die Lockersande der Überflutungsebene zu feinlamellierten, parallel-ebenschichtigen Sandsteinen, die entsprechend ihrem Feldspat-Gehalt sediment-petrographisch als subarkosische Wacken zu bezeichnen sind (WEBER 2000).

Regionalgeologische Untersuchungen dieser laminierten subarkosischen Wacken im natürlichen Gesteinsverband charakterisieren diese wie folgt: Hauptkomponente: 60-80 % Quarz (detritisch und authigen), 15-20 % Feldspat (hauptsächlich Kalifeldspat), 2-8 % Quarzzement, bis < 30 % Ton- (Illit, Kaolinit, Chlorit) und parallel zur Schichtung eingeregelt Glimmerminerale (WEBER 2000, WEBER & LEPPER 2002).

Die von WEBER (2009) in Ihrem Untersuchungsbericht über eine exemplarische Auswahl von Dachplatten ermittelten Charakteristika (Detritischer Quarz 53,3 - 69,6 %; Feldspat 9,1 - 15,7; Quarzzement 2,5 - 6; Tonminerale + Hämatit 5,7 - 18,8; Glimmer 0,8 - 2,6 %) korrespondieren weitgehend mit den zuvor aufgeführten Geländebefunden (WEBER 2000).

Petrophysikalische Kennwerte wurden im Rahmen des Rohstoffsicherungsprogramms des früheren Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung (heute Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie) ermittelt: Trockenrohdichte 2,24-2,42 g/cm³, Gesamtporosität 11,0-15,9 %, Wasseraufnahmegrad 8,2-14,4 g, Wasseraufnahme 2,77-4,62 % massebezogen, Druckfestigkeit 46,4-110,2 N/mm², Biegezugfestigkeit 10,0-18,8 N/mm², Frost-Tau-Wechsel-Widerstand 0,03-0,23 Gew.-% (LEPPER 1997). Diese wenigen ausgezeichneten Bänke, die in der Regel nicht mächtiger als 1,5 m werden, lassen sich an ihren textuell vorgezeichneten Inhomogenitätsflächen, die im Querbruch erkennbar sind, handwerklich zu dünnen Sandsteinplatten aufspalten. Von der Gesamtmächtigkeit des Buntsandsteins sind es also nur wenige Meter, die hierfür geeignet sind. Und diese sind auch nicht flächenhaft im Buntsandstein an der Oberweser verbreitet, sondern oberflächennah für einen Gesteinsabbau nur begrenzt zugänglich. Entsprechend dem zwiebelschalen-förmigen Aufbau des Buntsandstein-Gewölbes zwischen Bodenwerder -Kassel und Bad Karlshafen- Hardegsen finden sich diese spezifischen Gesteinsschichten in begrenzter Verbreitung nur im Bereich der Nord- und Westabdachung des Sollings, im Vogler und in dem nördlichen Teilbereich der Westabdachung des Reinhardswaldes (LEPPER 2002). Nur hier waren in der Vergangenheit die sog. Solling-Platten, die als Dachstein-Platten aber auch als Fassadenbehang verbreitet Verwendung fanden, abzubauen, nicht jedoch im zentralen und östlichen Solling oder im Bramwald oder auf den zentralen Höhen des Reinhardswaldes, wo das andersartig ausgebildete Gestein für diese spezielle Verwendung hingegen nicht geeignet ist.

3 Das Jagdschloss Clemenswerth als Untersuchungsobjekt

Das Jagdschloss Clemenswerth wurde von 1737 bis 1747 als achtstrahliger Jagdstern mit zentralem Hauptschloss und acht umgebenden Pavillons errichtet. Für die Dachdeckung wurden unterschiedliche Materialien verwendet: Kupfer für das Hauptschloss, ostfriesische Dachpfannen (Ziegel aus Weener) sowie „Höxter Dachsteine“ bzw. „Solling-Platten“ aus dem Weserbergland für die Pavillons, das Kapuzinerkloster und die Gloriette im Klostergarten. Nur zwei der acht Pavillons (Mergentheim und Coelln) waren aufgrund ihrer architektonischen Sonderstellung vollständig in Sandstein gedeckt. Bei den anderen Pavillons wurden vermutlich aus Kostengründen nur die dem Zentralbau bzw. dem Schlossplatz zugewandten Dachflächen und die Seitenflächen mit den Solling-Platten gedeckt, während für die Rückseiten die schlichteren Ziegel-Dachpfannen zur Anwendung kamen (WAGNER 1987).

Die Sandsteinplatten wurden seinerzeit in einem Schema verlegt, das eine fachgerechte Reparatur von einzelnen Teilbereichen erschwert. So mussten und müssen auch heute bei Reparaturen in der Regel alle Dachplatten sachgerecht abgenommen, auf Wiederverwendbarkeit geprüft, mit geeigneten (wieder verwendbaren) Platten ergänzt und nach dem bekannten Schema verarbeitet werden. Seit 1803 bis 1969 sind drei große Dachreparaturen durchgeführt worden (POPPE 1987).

Bei der letzten großen Maßnahme der 1960er Jahre wurden alle acht Pavillons und die Gloriette völlig neu eingedeckt. Aufgrund dieser früheren Maßnahmen wurden die Dächer somit zum Teil schon mehrfach umgedeckt. Ob das ursprüngliche Dachplattenmaterial inzwischen vollständig ersetzt werden musste oder ob noch vereinzelt Platten der Barockzeit vorhanden sind, ist unklar. Weiter ist nicht belegt, ob für den Austausch von schadhafte Platten ausschließlich wieder verwendbares „Altmaterial“ eingesetzt wurde oder ob dabei auch bruchfrisches Material aus dem Solling Verwendung fand.

In der Folgezeit nach 1969 wurden nur die rückwärtigen Bereiche der Pavillondächer mit den Dachziegeln restauriert, während an den Solling-Platten nur kleinere Maßnahmen erfolgt sind, die sich in Teilen leider als unsachgemäß erwiesen haben (am Pavillon Coelln in den frühen 1980er Jahren sowie an den Dächern von Klosterkapelle und Kapuzinerkloster in den frühen 1990er Jahren).

Diese Informationen sowie die Schäden, die in jüngster Zeit festgestellt wurden, und der Maßnahmenplan von 2005 wurden in einem ausführlichen Bericht des Landkreises Emsland zusammengefasst (BRÖRING 2005).

Die Umsetzung erfolgte von 2006 bis 2009 in drei Bauabschnitten mit folgenden Arbeiten:

- Komplette Abnahme der Dach- und Mansardflächen an sieben Pavillons und an der Gloriette
- Zwischenlagerung der wieder verwendbaren Platten nach Größe und Wiedereindeckung unter Verwendung von „neuem“ Altmaterial aus dem Lagerbestand der Fa. Müller aus Nieheim
- Beginn an den Pavillons Paderborn, Hildesheim und Münster (erster Abschnitt), Fortsetzung und Abschluss an den Pavillons Mergentheim und Coelln (zweiter Abschnitt) bzw. den Pavillons Clemens August und Osnabrück sowie an der Gloriette (dritter Abschnitt).

4 Zustand der Dachplatten, Materialgruppen, Probenauswahl und Untersuchungsmethoden

Die Solling-Platten sind traditionell überlappend verbaut. Nur etwa 1/3 der Platten ist der Freibewitterung ausgesetzt, während 2/3 der Fläche von anderen Platten überdeckt wird. NEUMANN (2009) beschreibt die wichtigsten Schadensformen der Dachplatten, wie sie vor Beginn der Projektarbeit am Pavillon Hildesheim beispielhaft sichtbar waren:

- Ein- bis mehrfache Schalenbildung parallel zur natürlichen Schichtfläche mit Schalendicken von 2-5 mm, im Mittel 3 mm;
- Aufspalten bzw. Aufplatzen der Platten vom unteren Rand ausgehend, der auf dem Dach der stärksten Feuchteeinwirkung ausgesetzt ist;
- Starker Bewuchs durch Moos, Flechten, Algen und schwarze Schimmelpilze insbesondere in den Stoßfugen der Platten, die in Ablafrichtung des Regenwassers verlaufen.

Die Schäden sind feuchtebedingt und die Intensität der Schäden ist gesteinspezifisch sowie expositionsabhängig unterschiedlich ausgeprägt. Bei der handwerklichen Qualitätskontrolle zur Wiederverwendung wurden daher die Dachplatten grundsätzlich ausgemustert, die am Rand schon sichtbare Risse bzw. ein schichtparalleles Aufspalten zeigten („plattiger Typ“) und die nach dem Abschlagen der schadhaften Partien keine ausreichenden Maße mehr aufwiesen (Mindestdicke ca. 10-12 mm). Als höchstwertig wird der sog. „massive Typ“ eingestuft, der beim Anschlagen keine oder nur geringe Spaltbarkeit zeigt. Der Anteil des unbrauchbaren Materials war mit rund 50-60 % relativ hoch, wobei die stärksten Ausfälle in SW-Exposition zu verzeichnen waren, d.h. in Richtung der größten Schlagregenbelastung.

Diese Vorauswahl ergab am Pavillon Münster einen Anteil von nur rund 43 % an Dachplatten, die aufgrund ihrer (Rest-)Maße für die Wiederverwendung in Frage kamen. Im nächsten Schritt erfolgte die qualitative Typisierung anhand der (mehr oder weniger plattigen bzw. massiven) optischen Eigenschaften sowie mittels Klangprobe beim Anschlagen mit dem Dachdeckerhammer.

Es ergaben sich dadurch insgesamt vier Gruppen (NEUMANN 2010):

- Typ 1: Plattiges Material mit „vibrierendem“ Klang; mindere Qualität, die in der Regel von der Wiederverwendung ausgeschlossen wird;
- Typ 2: Plattiges Material mit „dumpfem“ Klang. Mindere Qualität mit eingeschränkter Wiederverwendbarkeit;
- Typ 3: Plattiges Material mit „festerem“ Klang. Brauchbare Qualität bei geringerer Spaltbarkeit im Vergleich zum Typ 2;
- Typ 4: massiver Typ mit charakteristischer „hellerer“ Klangfarbe. Keine oder nur geringfügige Spaltbarkeit.

Die detaillierten Untersuchungen zur Charakterisierung der Solling-Platten konnte aus Zeit- und Kostengründen nur mit einer relativ geringen Auswahl an Stichproben durchgeführt werden.

Es handelt sich um insgesamt 37 Proben aus drei verschiedenen Serien:

- Serie 1: 7 Proben von Plattenmaterial unterschiedlicher Herkunft (Serie 1; Nummer 1-1 bis 1-7; näher untersucht wurden zwei Proben aus dem Vorratslager im Keller des Pavillons Hildesheim),
- Serie 2: 24 Proben des Pavillons Münster (Nummer 2-1 bis 2-24) und
- Serie 3: 6 Proben aus dem Lagerbestand der Fa. Müller (Nummer 3-1 bis 3-6).

Von den 37 Proben wurden repräsentative Vertreter der vier Materialgruppen ausgewählt und diese wurden schrittweise mit unterschiedlichen Methoden untersucht (vgl. die Übersicht in Tabelle 1). Diese maßnahmenorientierten Untersuchungen hatten zwei Ziele. Einerseits sollte geklärt werden, ob die makroskopisch definierten Materialgruppen 1 bis 4 anhand von mineralogisch-petrografischen Eigenschaften bzw. mittels physikalischer und chemischer Kennwerte verifiziert werden können. Von besonderem Interesse war dabei der Vergleich von unterschiedlich exponierten Bereichen einzelner Dachplatten (freibewitterte und überdeckte Partien der Serie 1: Proben 1-1 und 1-7, Serie 2: Proben 2-5, -6, -11, -12, -16, -20, -21).

Andererseits dienten Konservierungstests dazu, deren Anwendbarkeit und Wirksamkeit sowie die möglichen Risiken zu prüfen. Eingesetzt wurden ein Quellminderer auf Tensidbasis (Antihydro/Fa. Remmers), zwei Hydrophobierungsmittel (Funcosil SNL, Lösemittel haltig und Funcosil FC, Lösemittel frei) sowie Schutzbeschichtungen auf Siliconharzbasis (Historic Lasur und Siliconharzfarbe LA). Zudem wurden einige Reinigungsproben mittels Wirbelstrahlverfahren (rotec) und mit Lösemitteln durchgeführt, insbesondere zur Entfernung von Teerbelägen, die auf den Platten fallweise vorhanden sind.

Tabelle 1: Übersicht der Dachplatten-Proben und der durchgeführten Untersuchungen
(überwiegend von NEUMANN 2010; WEBER 2009 (A); STADLBAUER & LEPPER
anhand von Daten des Geozentrums Hannover (B), diese Arbeit)

	Material- Typ	Qualitativer Mineral- bestand u. Gefüge	Geochemische Analysen, Mineralphasen- Bestimmung	Porosi- metrie	E-Modul	Hygrische Dehnung	Konservierungs- Tests
Methode	Einordnung nach Aussehen (Neumann u. Fa. Müller): Nur roter Sandstein außer 3-6 !	Polari- sations- Licht- mikroskop	A: Polarisations- Lichtmikroskop u. Kathoden- luminiszenz B: Röntgenbeugung u. -fluoreszenz, C-Bestimmung	Hg- Druck- Methode	Ultra- schall-Unter- suchung (parallel u. senkrecht zur Schichtung)	Multi-Dilato- meter (parallel u. senkrecht zur Schichtung)	1: Quellminderer (auf Tensid-Basis) 2: Beschichtung / Wasseraufnahme (Siliconharzlasur/ w-Wert, DIN ISO EN 15148)
Proben- Nummer							
1-1	(1)	+	B		+	+	1
1-2 bis 1-6	keine						
1-7	(4)	+	B	+	+	+	1
2-1	3						
2-2	2						
2-3	2						
2-4	3						
2-5	2	+	B	+	+		1
2-6	4	+	B	+		+	1
2-7	4						
2-8	2						
2-9	4						
2-10	4						
2-11	1	+	B	+	+	+	1
2-12	2	+	A und B	+	+	+	1
2-13	2						
2-14	4						
2-15	3						
2-16	3	+	B	+			1
2-17	4						
2-18	2						
2-19	3						
2-20	4	+	A und B	+	+	+	1
2-21	3	+	A und B	+	+	+	1
2-22	4						
2-23	4						
2-24	2						
3-1	3 - 4	+	A und B				2
3-2	3 - 4	+	A und B				2
3-3	3 - 4	+	A und B				2
3-4	3 - 4	+	A und B				2
3-5	4	+	A und B				2
3-6	Grau! 4	+	A und B				2

5 Untersuchungsergebnisse

Die vier Materialtypen, die mittels Sicht- und Percussionsprüfung anhand der Dachplatten des Pavillons Münster definiert wurden, können anhand der Untersuchungsergebnisse nicht verifiziert werden (NEUMANN 2010). Nur die makroskopische Differenzierung von „plattigem“ und „massivem“ Material wird anhand der Daten bestätigt. Diese zwei Gruppen sind als Endglieder einer Mischungsreihe zu verstehen, die in Bezug auf den Mineralbestand, das Gefüge und die gesteintechnischen Eigenschaften kontinuierliche Übergänge zeigen.

5.1 Mineralogie und Petrografie

Der von NEUMANN (2010) mikroskopisch qualitativ ermittelte Mineralbestand wurde mittels Röntgenbeugung quantifiziert. Die Hauptbestandteile sind Quarz (> 90 %; Hauptkomponente) und Feldspat (als Nebenkompone mit ca. 5 % in den Proben 2-5, 2-16 und 2-21, in allen anderen Proben in geringeren Anteilen). Als Nebenkompone (< 5 %) und im Spurenbereich (< 1 %) treten Schichtgitter-Silikate auf, die summarisch als Muskovit-Illit-Gruppe ermittelt wurden. Als Spuren-Bestandteile sind außerdem die Silikatminerale Chlorit und Kaolinit sowie Hämatit enthalten, das für die Rotfärbung des Sandsteins verantwortliche Eisenoxid (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Ergebnisse der halbquantitativen Phasenanalyse mittels Röntgenbeugung
(Proben der Serien 1 u. 2; Mischung der Materialtypen 1-4; Daten der BGR, Hannover)

Proben-Nr.	Hauptkomponente	Nebenkompone	Nebenkompone - Spuren	Spuren
1-1, (Typ 1)	Quarz		Feldspat, Muskovit-Illit	Chlorit, Hämatit
1-7, (Typ 4)	Quarz		Feldspat	Muskovit-Illit, Hämatit, ± Chlorit
2-5, Typ 2	Quarz	Feldspat	Muskovit-Illit	Chlorit, Hämatit
2-6, Typ 4	Quarz		Feldspat	Muskovit-Illit, Hämatit ± Kaolinit oder Chlorit
2-11, Typ 1	Quarz		Feldspat	Muskovit-Illit, Hämatit
2-12, Typ 2	Quarz		Feldspat	Muskovit-Illit, Hämatit, Chlorit
2-16, Typ 3	Quarz	Feldspat	Muskovit-Illit	Chlorit, Hämatit
2-20, Typ 4	Quarz		Feldspat	Muskovit-Illit, Hämatit, ± Chlorit
2-21, Typ 3	Quarz	Feldspat	Muskovit-Illit	Hämatit, ±Chlorit

Die Korngrößen der Minerale liegen überwiegend im Bereich von weniger als 0,5 mm, nur einzelne Muskovite reichen darüber. Die Quarzkörner variieren zwischen rund 0,1 bis 0,2 mm. Charakteristisch für die Solling-Platten ist das Lagengefüge, das je nach Materialtyp unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Das Lagengefüge entsteht insbesondere durch die graduell wechselnde mittlere Korngröße der Quarzkörner und durch die schichtparallele Anreicherung und Längseinregelung der Schichtgitter- und Tonminerale. So ist kaum verwunderlich, dass die plattigen Materialtypen die höchsten Gehalte an Glimmer- und Tonmineralen der Muskovit-Illit-Gruppe aufweisen. Im Gegensatz dazu sind diese Minerale in den Proben der überwiegend massiven Materialgruppe 3-4 nur in Spuren nachweisbar (vgl. Tabelle 2: Proben-Nr. 1-7, 2-6 und 2-20; Tabelle 3: alle Proben).

Tabelle 3: Ergebnisse der halbquantitativen Phasenanalyse mittels Röntgenbeugung
(Proben der Serie 3: überwiegend massive Materialtypen 3-4; Daten der BGR, Hannover)

Proben-Nr.	Hauptkomponente	Haupt. – Nebenk	Nebenk.	Nebenk. - Spuren	Spuren
3-1	Quarz			Feldspat	Muskovit-Illit, Hämatit
3-2	Quarz			Feldspat	Muskovit-Illit, Hämatit,
3-3	Quarz		Feldspat		Muskovit-Illit, Hämatit, Kaolinit oder Chlorit
3-4	Quarz		Feldspat		Muskovit-Illit, Hämatit ± Kaolinit oder Chlorit
3-5	Quarz	Feldspat			Muskovit-Illit, Gips, Kaolinit oder Chlorit, Hämatit
3-6	Quarz		Feldspat		Muskovit-Illit, Calcit, Kaolinit oder Chlorit

Die angesprochene „plattige“ bzw. „massive“ Ausbildung der Dachsteine dürfte am ehesten auf kleinräumig wechselnde/unterschiedliche fließdynamische Ablagerungsbedingungen auf der ansonsten weitflächig angelegten Überflutungsebene zurückzuführen sein. Nach WEBER (2009) reicht das Spektrum von ausgeprägt plattigen und glimmerreichen subarkosischen Wacken bis hin zu massigen glimmerreichen Subarkosen. Diese spiegeln in dem mäandrierenden Flusssystem, das in der Zeit des höchsten mittleren Buntsandsteins im Bereich des heutigen Solling existiert hat, die unterschiedlichen Ablagerungsmilieus „Schichtflut“ und „Gleithang“ wieder.

5.2 Geochemische Analysen

Für die chemische Analyse mittels Röntgenfluoreszenz (RFA) wurden insgesamt 15 Proben der Dachplatten-Serien 1-3 ausgewählt (vgl. Tabelle 1). 7 der 15 Proben stammen aus der Serie 2 und nur hier wurden die frei bewitterten Partien mit den überdeckten Bereichen getrennt beprobt. So ergaben sich insgesamt 22 Analysen (15 + 7) auf die wichtigsten Haupt- und Spurenelemente (vgl. Anhang: Auflistung der vollständigen Datensätze).

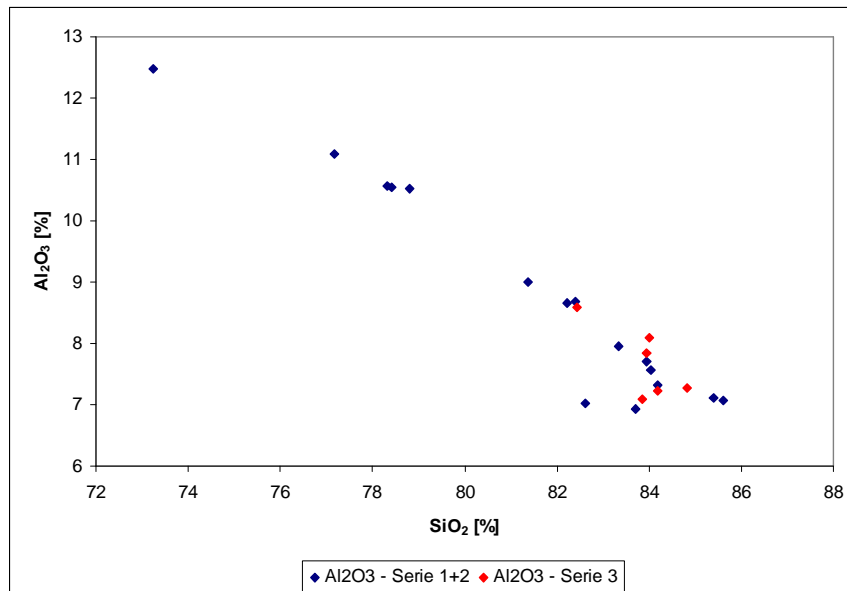


Abbildung 1: Korrelation der SiO₂- und Al₂O₃-Gehalte von 15 Solling-Dachplatten.

Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang: Bei steigendem SiO₂-Gehalt (von ca. 73 % bis 86 %) sinkt der Al₂O₃-Gehalt (von ca. 12,5 % auf 7 %).

Die blauen Symbole zeigen die Proben der Serien 1 und 2 (Mischgruppe aus plattigen und massiven Typen, die auch mittels Röntgenbeugung untersucht wurden; vgl. Tabelle 2); die roten Symbole zeigen die überwiegend massiven Proben der Serie 3 (Dachplatten aus dem Lagerbestand der Fa. Müller).

Das Ergebnis der RFA-Analysen kann vor dem Hintergrund des schon bekannten Mineralbestands der Proben vorhergesagt werden (Tabellen 2 und 3). Die drei wichtigsten Minerale der Sandstein-Platten sind Quarz (SiO₂), Feldspat und Muskovit. Während der Quarz ausschließlich aus Siliziumdioxid besteht, handelt es sich bei Feldspat und Muskovit um Silikat-Minerale, die neben Silizium auch Aluminium und weitere Elemente enthalten (Feldspat: die Feldspatzusammensetzung entspricht vermutlich einer Mischung aus Ca-freiem Albit (Na[AlSi₃O₈]) und Ca-armem Oligoklas (Na,Ca[AlSi₃O₈]; Muskovit bzw. Hellglimmer: KAl₂[AlSi₃O₁₀]).

Die deutliche Korrelation von SiO₂ und Al₂O₃ ist somit einfach zu erklären (vgl. Abbildung 1): Die Dachplatten der Serien 1 und 2 bilden eine Mischgruppe der plattigen und massiven Materialtypen 1-4 (blaue Symbole). Im Gegensatz dazu bestehen die Dachplatten der Serie 3 ausschließlich aus den überwiegend massiven Materialtypen 3-4 (rote Symbole). Die hohen SiO₂- und die relativ niedrigen Al₂O₃-Gehalte dieser Probengruppe entsprechen dem petrografischen Befund des überwiegend massiven Typs: Viel Quarz und relativ wenige Minerale, die Aluminium enthalten (neben Feldspat und Muskovit auch Illit/KAl₂[(Si,Al)₄O₁₀][OH]₂ * nH₂O, Kaolinit/Al₄[Si₄O₁₀][OH]₈ und Chlorit/z.B. (Mg,Fe)Al[AlSi₃O₁₀][OH]₈).

Chlorit ist das einzige der identifizierten Minerale, das Magnesium enthält. So ist die in Abbildung 2 erkennbare deutliche Korrelation von SiO_2 und MgO fast ausschließlich auf die Variation der Chlorit-Gehalte zurückzuführen: Relativ hohe Gehalte nicht nur an Glimmer, sondern auch an dem glimmerähnlichen Chlorit in den plattigen Dachstein-Typen (Tabelle 2), dagegen relativ wenig Glimmer und Chlorit im überwiegend massiven Material (Tabelle 3).

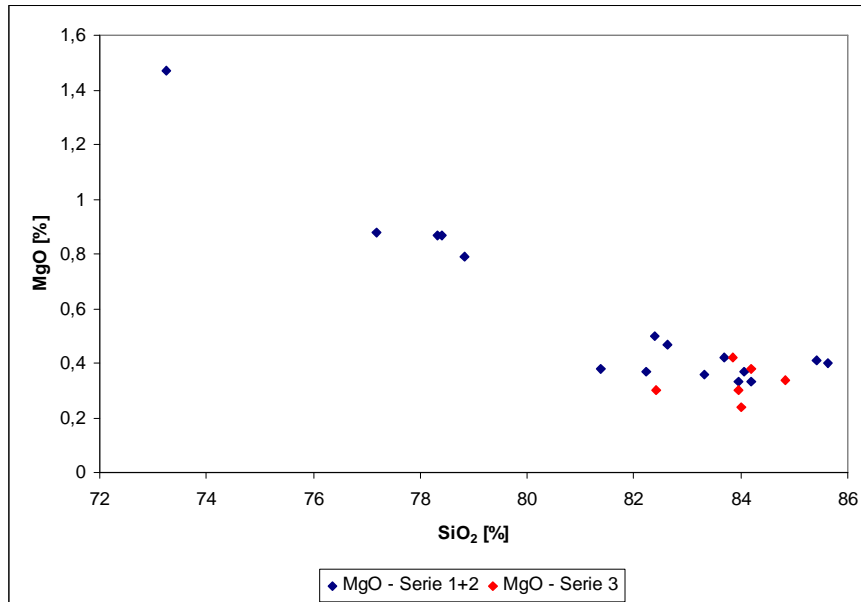


Abbildung 2: Korrelation der SiO_2 - und MgO-Gehalte von 15 Solling-Dachplatten.

Es zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang: Bei steigendem SiO_2 -Gehalt (von ca. 73 % bis 86 %) sinkt der MgO-Gehalt (von ca. 1,5 % auf 0,3-0,4 %); vgl. Abb. 1 zur Erläuterung der blauen und roten Symbole.

Die in Abbildung 3 gezeigte Korrelation von SiO_2 und CaO ergibt einen überraschenden Befund: Die sonst relativ homogene Probengruppe der Serie 3 weist zwei „Ausreißer“ auf. Es handelt sich um die Proben 3-5 und 3-6 mit CaO-Gehalten von ca. 0,75 bzw. 1,55 %. Dieser hohe CaO-Gehalt weicht von den Werten der übrigen Proben stark ab, die im Bereich von ca. 0,1 bis 0,5 % variieren.

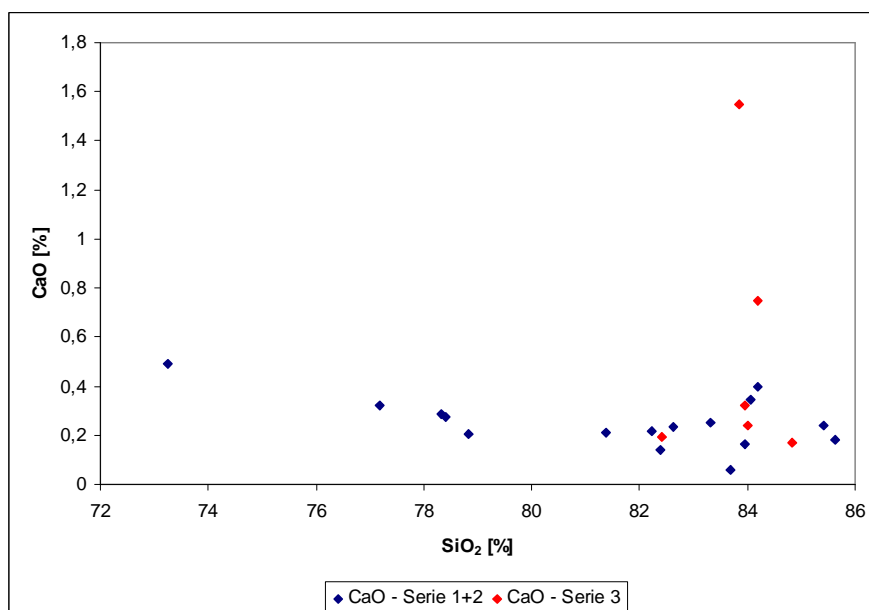


Abbildung 3: Korrelation der SiO_2 - und CaO-Gehalte von 15 Solling-Dachplatten.

Bei steigendem SiO₂-Gehalt (von ca. 73 % bis 86 %) variiert der CaO-Gehalt der meisten Proben nur wenig (von ca. 0,5 - 0,1 %); Ausnahme: Die Proben 3-5 und 3-6 der Serie 3 (rote Symbole; vgl. Abb. 1 zur Erläuterung).

Der Blick auf die Tabelle 3 gibt die Erklärung: Im Gegensatz zu allen anderen Proben enthalten die Proben 3-5 und 3-6 im Spurenbereich als kalziumhaltige Minerale einerseits Gips/CaSO₄ * 2 H₂O und andererseits Calcit/CaCO₃. Der Calcit-Gehalt der Probe 3-6 darf als primärer Anteil dieses besonderen Plattenmaterials angesehen werden, das im Gegensatz zu allen anderen Solling-Dachplatten kein roter, sondern ein grauer Sandstein ist. Dementsprechend ist auch der Negativ-Befund in Bezug auf den ansonsten meist vorhandenen Hämatit nicht verwunderlich. Der Gips-Gehalt der Probe 3-5 wird als sekundärer Bestandteil interpretiert, der vermutlich durch Umwandlung aus früher vorhandenem Calcit oder durch Kristallisation aus sulfathaltigen Lösungen entstanden ist (Einwirkung von „saurem“ Regen oder von anderen Umwelteinflüssen?).

Aufgrund dieser Calcit- und Gips-Befunde wurden alle 15 Proben der Serien 1-3 mit der LECO-Methode untersucht, um die Gehalte an Kohlenstoff (C) und Schwefel (S) genauer zu ermitteln. Der Gesamt-Gehalt an Kohlenstoff (C_{ges}) wird dabei in Bezug auf den organischen (C_{org}) und den anorganischen Anteil (C_{carb}) getrennt ermittelt. In der nachfolgenden Tabelle werden nur die Proben aufgelistet, die nennenswerte C-Gehalte von mehr als 0,05 % aufweisen.

Tabelle 4: Kohlenstoff- und Schwefel-Bestimmung mittels LECO-Verfahren

(Proben mit C_{carb} > 0,05 %; S-Bestimmung mit der Probenserie 3; Daten der BGR, Hannover)

Proben-Nr.	C_{gesamt}	C_{organisch}	C_{carbonatisch}	CaCO₃ <small>(berechnet)</small>	S_{gesamt} (alle Werte in %)
1-1	0,09	0,02	0,07	0,58	-
3-1	0,08	0,05	0,05	0,41	0,01
3-2					0,28
3-5					0,30
3-6	0,34	0,03	0,31	2,5	0,01

Nur drei von 15 Proben zeigen carbonatische Kohlenstoffgehalte, die rechnerische Calcit-Anteile von ca. 0,4 bis 2,5 % ergeben. Erhöhte Schwefelgehalte wurden nur an zwei Proben der Serie 3 ermittelt, zum einen in Probe 3-5 (in der Gips nachgewiesen wurde) und zum anderen in Probe 3-2, die aufgrund des ähnlich hohen S-Gehalts ebenfalls (sekundären, umweltbedingten) Gips enthalten kann.

5.3 Physikalisch-mechanische Kennwerte (Neumann 2010)

Tabelle 5: Porosimetrische Kennwerte (Hg-Druck-Methode, Fa. Remmers)

Proben-Nr.	Spezifisches [mm ³ /g]	Mittlerer [µm]	Gesamt-Porosität [Vol.%]
1-7, (Typ 4)	75,1 und 77,6	1,7 und 1,8	16,5 und 17,1
2-5, Typ 2	30,5	1,9	7,6
2-6, Typ 4	34,8	0,25	8,4
2-11, Typ 1	54,5	1,2	12,6
2-12, Typ 2	62,5 und 69,1	1,5 und 1,6	14,2 und 15,6
2-16, Typ 3	29	0,19	7,2
2-20, Typ 4	39,9	0,65	9,5
2-21, Typ 3	43,1 u. 50 u. 46,5 u. 63,4	0,57 u. 0,82 u. 0,52 u. 0,59	10,3 u. 11,6 u. 11,0 u. 14,2
Mittelwerte von 5 Proben der Serie 3:			
3-1,-2,-3,-5,-6	44,6	1,65	10,4

Die Porenradienverteilung zeigt keine erkennbare Systematik, die im Zusammenhang mit den Materialtypen 1 bis 4 stehen könnte. Dies gilt auch für die Messwerte des dynamischen E-Moduls. Eine Zuordnung der physikomechanischen Eigenschaften zu den Makrotypen ist nicht möglich.

Die hygrische Dehnung des Dachplattenmaterials ergibt extrem unterschiedliche Werte, die teils sehr niedrig und teils sehr hoch liegen, z.B.:

- Probe 1-1 mit Höchstwerten von 2 - 3 mm/m nach 24 Stunden sowohl vor als auch nach der Behandlung mit Quellminderer.
- Probe 1-7 mit Werten um 0,2 mm/m nach 24 Stunden unbehandelt und mit etwa 1,2 mm/m nach der Behandlung mit Quellminderer.
- Probe 2-11 zeigt mit über 5 mm/m den höchsten Wert, der allerdings mit Quellminderer auf ca. 0,5 mm/m abgesenkt werden konnte.

Besonders problematisch erscheinen die oft extremen Unterschiede des Quellverhaltens im Vergleich von der Außenkante mit dem zentralen freibewitterten Bereich wie auch mit dem überdeckten Bereich der Dachplatten. Während die Dehnung an den Kanten meist nur sehr geringe Werte zeigt, werden im Abstand von wenigen Zentimetern die oben schon genannten Höchstbeträge erreicht.

Die kapillare Wasseraufnahme ist parallel zur Schichtung deutlich höher als in senkrechter Richtung. Die w-Werte senkrecht zur Schichtung liegen meist im Bereich von weniger als 0,5 kg/m²/h^{0,5}, d.h. im Bereich der Wasserabweisung. Parallel zur Schichtung liegen die w-Werte jedoch oft deutlich über dem genannten Wert und so ist es unvermeidbar, dass an den Kanten der Dachplatten das ablaufende Regenwasser zumindest teilweise aufgesaugt wird. In Wechselwirkung mit den quellfähigen Bestandteilen der Sandsteinplatten (Tonminerale) sind die Grenzbereiche zwischen den feuchten und den trockenen Partien durch Spannungsaufbau besonders beansprucht und gefährdet. Aufschlussreich sind in diesem Zusammenhang auch die im Labor der BGR in Hannover ermittelten Messwerte hinsichtlich der Kationenaustauschkapazität (KAK) des Steinmaterials. Diese Werte, die mit dem Anteil an quellfähigen Tonmineralen korrelierbar sind, zeigen im Vergleich der freibewitterten und der überdeckten Partien deutliche Unterschiede. Somit geben die KAK-Werte, die von 0,4 bis 1,8 meq/100g reichen, eine wichtige Grundlage zum Verständnis der im cm-Bereich stark variierenden Dehnungsbeträge der Dachplatten.

5.4 Ursachen der Steinschäden (Neumann 2010)

Folgende Schadensfaktoren werden durch Feuchteeinwirkung ausgelöst und verstärkt:

- die starke Anisotropie der physiko-mechanischen Eigenschaften (schadensrelevante Beispiele: hygrische Dehnung von deutlich mehr als 0,5 mm/m und extrem unterschiedliche kapillare Wasseraufnahme parallel und senkrecht zur Schichtung);
- Spannungsaufbau in der Kontaktzone von freibewitterten und überdeckten Platten;
- Oberflächenparalleles Aufbrechen und Abplatzen von Schichtflächen insbesondere entlang von glimmerreichen Lagen;
- Feldspatverwitterung im historischen Zeitmaßstab am Bauwerk führt zum Zuwachs an kapillaraktiven Poren und zur Intensivierung der feuchtebedingten Schadensprozesse; vgl. Probe 2-21 in Tabelle 5: die detaillierte porosimetrische Untersuchung der freibewitterten Zone bestätigt die getroffene Aussage; die Ergebnisse der KL-Untersuchungen von Weber 2009 bestätigen dies zusätzlich.

5.5 Notwendigkeit, Möglichkeit und Risiko der Konservierung

Die Untersuchungen zeigen, dass die aktuelle Dachsanierung mit relativ hohen Verlusten an Solling-Platten von etwa 50-60 % verbunden war. Das nicht wieder verwendbare Material war vermutlich überwiegend von „plattigem“ Charakter. Es ist nicht auszuschließen, dass dieses Material schon bei der Wiederverwendung im Rahmen der letzten großen Instandsetzung in den 1960er Jahren schon die ermittelten Schwächen des plattigen Materialtyps aufwies. Weiter ist fraglich, ob in diesem Zusammenhang eine strenge Qualitätskontrolle stattfand oder ob es sich dabei um eine kostengünstige Lieferung handelte, deren beste Qualität und Verarbeitung nicht vorrangig waren.

Aufgrund der ausgeprägten Anisotropie der Materialeigenschaften führen die in Freibewitterung unvermeidlichen Wechsel der Befeuchtung und Trocknung unweigerlich zu Schäden, beim überwiegend plattigen Material deutlich früher als bei den überwiegend massiven Dachplatten. Von entscheidender Bedeutung sind dabei vermutlich die bautechnischen und bauphysikalischen Rahmenbedingungen in Bezug auf die einwandfreie Wasserabführung (Vermeidung von unnötiger Feuchtebelastung) sowie hinsichtlich der ungehinderten Trocknung des feuchten Materials mittels Kapillartransport. Einseitige Beschichtungen oder Abdichtungen, z.B. mittels Innendämmung von Dachräumen, können sich dabei negativ auswirken.

Hinsichtlich der Möglichkeit und des Risikos der Konservierung wurden im Rahmen dieses Projektes wichtige Erkenntnisse gewonnen. Die vollständige Durchtränkung oder Imprägnierung des Porenraums (z.B. mit flüssigen Konservierungsmitteln zur Festigung, Quellminderung oder Hydrophobierung) der anisotropen Dachplatten kann nicht gelingen und sollte daher unterbleiben. Aussichtsreich erscheint dagegen der reversible Oberflächenschutz mittels Schlamm- oder Farblasur. Entscheidend ist dabei die wirkungsvolle und gleichzeitig substanzschonende Reinigung der Flächen. Hier wurden z.B. mit dem rotec-Verfahren gute Reinigungsergebnisse an Prüfkörpern erzielt, die seitens des Landkreises Emsland auf einer eigens dafür gebauten Vorrichtung auf Schloss Clemenswerth einem langfristigen Freibewitterungstest unterzogen werden.

Der Freibewitterungsstand simuliert die originale Dachdeckung. Er dient zur praxisgerechten Exposition und Begutachtung von Dachplatten-Prüfkörpern insbesondere zur Wirksamkeit und Beständigkeit sowie auch zur ästhetischen Qualität von Schutz- und Verschleißschichten. Das Risiko von Fehlschlägen oder von ungeahnten Folgeschäden von Konservierungsmaßnahmen sollte dadurch eingegrenzt bzw. ausgeschlossen werden.

6 Geologische Verfügbarkeit und Vorräte

Die aktuelle Verfügbarkeit (Ressourcen) von den sog. „Solling-Platten“ wird grundsätzlich von einer Reihe von Faktoren bestimmt:

- geologische Gegebenheiten
- genehmigte Abbaustellen
- handwerkliche Expertise
- Lagervorräte

Die Ausführungen in Kap. 2 haben gezeigt, dass nur in definierten Schichtabschnitten und räumlich begrenzter Verbreitung, d.h. streng ortsgebunden, die Voraussetzungen gegeben sind, geeignetes Spaltmaterial für die Herstellung von Dachplatten zu gewinnen (gleichermaßen trifft diese Feststellung natürlich auch für die historischen Fassaden-behangplatten zu).

Während in historischen Zeiten in Hunderten von Steinbrüchen, die oftmals kaum die Dimension von Steinkuhlen überschritten, Spaltmaterial gewonnen wurde, sind es unter den heute genehmigten 14 Wesersandstein-Abbaustellen nur noch einige wenige, die geeignetes Spaltmaterial liefern können. Diese finden sich sowohl in dem Abbaurevier des nördlichen Solling als auch im Raum Karlshafen. Aufgelassene, historische Steinbrüche, in denen früher Spaltmaterial gewonnen wurde, lassen sich auch heute noch bezeichnen, Abbaugenehmigungen liegen allerdings für diese nicht vor und wären, verbunden mit erheblichem Planungsaufwand, erst zu beantragen.

Die letzten Steinhauer, die während ihrer Berufstätigkeit noch in handwerklicher Technik Dachplatten geschlagen haben, dürften heute 80 Jahre und älter, größtenteils jedoch bereits verstorben sein. Damit ist diese, einstmals die Baulandschaft im Weserbergland (LEPPER 2000, LEPPER et al. 2000) und dessen angrenzenden Gebiete prägende, handwerkliche Expertise, die in den späten Nachkriegsjahren (Beton-Zeitalter) nicht weiter tradiert wurde, heute praktisch ausgestorben.

Vereinzelte wurden von Liebhabern historischer Baumaterialien beim Abbruch historischer Bausubstanz in vergleichsweise bescheidenem Umfang noch wieder verwendbare Dachsteinplatten sichergestellt. In größerem Umfang ist den Verfassern nur von dem westfälischen Dachdecker-Unternehmen Müller in Nieheim und vom Rentamt Corvey bekannt, dass nennenswerte Vorratslager von Sandsteinplatten angelegt wurden. Diese Reserven sind jedoch begrenzt und dürfen keinesfalls darüber hinwegtäuschen, dass bei jeder Dachumdeckung schadhafte Altplatten ausgemustert und durch Ersatzplatten aus den schwindenden und unter den gegebenen Umständen nicht erneuerbaren Vorräten ersetzt werden müssen.

7 Verantwortungsvoller Umgang mit den Ressourcen und Schlussfolgerungen

Das Problembewusstsein hinsichtlich der schwindenden Ressource des vorhandenen Bestands an Solling-Dachplatten ist in der Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege noch nicht allgemein verbreitet. Konkrete Ansätze zur Lösung des Problems sind vereinzelt erkennbar, aber eine dringend erforderliche länderübergreifende Initiative im Bereich des Weserberglandes ist noch nicht ergriffen worden. In dieser Hinsicht hat im Oktober 2009 immerhin ein Treffen bzw. eine gemeinsame Bereisung von Vertretern der westfälischen, hessischen und niedersächsischen Landesdenkmalpflege stattgefunden. Die Überlegungen und Ergebnisse wurden in einem Aktenvermerk des NLD Hannover zusammengefasst (KELLMANN 2009): Anlass war zum einen die Fertigstellung der Masterarbeit an der HAWK Hildesheim zum Thema „Solling-Plattendächer“ im Sommersemester von ALBRECHT (2009). Zum anderen sollte die Fa. Müller in Nieheim/Westfalen in die Überlegungen einbezogen werden.

Zur Qualitätsbeurteilung von neu eingedeckten Sandsteinflächen und zur Förderpraxis in den Landkreisen Hörter und Holzminden wurden folgende Punkte für wichtig erachtet:

- Die Beschaffung von brauchbarem Altmaterial wird immer schwieriger und die Kosten haben sich seit 2003 verdreifacht.
- Die Materialknappheit ist mit dem zunehmenden Risiko verbunden, dass neben dem hochwertigen Altmaterial auch minderwertige Ware recycelt wird.
- Es fällt auf, dass zunehmend Sandsteindächer in die Sanierung kommen, die erst vor rund 20-30 Jahren mit Altmaterial eingedeckt wurden! Die früher anerkannte Dauerhaftigkeit im Bereich von 50-100 Jahren scheint nicht mehr gegeben zu sein, wodurch die Rechtfertigung der erhöhten Kosten und der öffentlichen Förderung hinfällig wird.
- Bislang liegt kein allgemein anerkanntes Verfahren der Qualitätskontrolle der Dachdecker vor, während und nach Abschluss der Maßnahme; „blindes“ Vertrauen ist nicht gerechtfertigt!
- Gravierende Fehlerquellen sind insbesondere die mangelnde Hinterlüftung der Dächer und fehlende Bauunterhaltung.
- Der Erfahrungsaustausch der Fachleute muss organisiert und dringend verbessert werden.
- Die Entwicklung und Abstimmung von gezielten Förderkonzepten zur Erhaltung der Sandsteindächer im Bereich der Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege ist erforderlich, z.B. im Rahmen der Dorferneuerungsprogramme.

Diese Anregungen und Forderungen bieten vielfältige Ansatzpunkte für eine wirkungsvolle Zukunftsinitiative. Die Ergebnisse des DBU-Förderprojektes zur Ressourcenschonung der Solling-Dachplatten des Jagdschlusses Clemenswerth sind in dieser Hinsicht von größtem Interesse. Es wurden dabei nicht nur die lokalen Erfordernisse berücksichtigt, sondern auch maßnahmenorientiert und modellhaft geforscht.

Die Schlussfolgerung ist dreigeteilt:

- a) Die kontinuierliche Wartung und Pflege der noch vorhandenen Sandsteindächer ist zu verbessern: Qualitätskriterien und Qualitätsstandards werden benötigt und müssen in die Praxis eingeführt werden.
- b) Die Möglichkeiten zur Wiederbelebung der handwerklichen Tradition zur Gewinnung und Bearbeitung der Solling-Platte sind zu prüfen.
- c) Solange die Ressource der „Solling-Dachplatte“ begrenzt ist und zu schwinden droht, müssen zur Ressourcenschonung auch die Möglichkeiten der Konservierung von Altmaterial genutzt sowie die Ansätze und Ergebnisse dieses Projektes weiterverfolgt werden.

IV. Literaturverzeichnis

ALBRECHT, B (2009)

BJØRLYKKE, K. (1994): Fluid flow processes and diagenesis in sedimentary basins. - In: PARNELL, J. (Hrsg.): Geofluids: origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins. - Geological Society Special Publication, 78: 127-140.

BOOS, M.; GROBE, J. (1995): Grundlagen und Beispiele zur zerstörungsfreien Ermittlung von Festigkeitsprofilen an Natursteinen. - Jahresberichte Steinzerfall - Steinkonservierung, 1995, 91-94, Verlag Ernst & Sohn

DIN EN ISO 15148: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweise Eintauchen

FAHLBUSCH, O. (1940): Die Dachbekleidungen im Kreise Einbeck seit dem 16. Jahrhundert.- Kunde, 8 (1940): 26-30.

FITZNER, B. (1988): Untersuchung der Zusammenhänge zwischen dem Hohlraumgefüge von Natursteinen und physikalischen Verwitterungsvorgängen. - Mitt. Ing. u. Hydrogeologe., H 29, 217S., Aachen

FITZNER, B.; SNETHLAGE, R. (1982): Einfluss der Porenradienverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine. - Bautenschutz und Bausanierung, 5, 97-103

FÜCHTBAUER, H. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine. - 1141 S.; Schweizerbart, Stuttgart.

GRIMM, W.-D. (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik. - Deutschland, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 50, 650S. HOUSEKNECHT, D. (1991): Use of cathodoluminescence petrography for understanding compaction, quartz cementation and porosity in sandstones. In: Barker, C.E., Kopp, O.C. (Eds.), Luminescence Microscopy: Quantitative and Qualitative Aspects. SEPM, Short Course Notes 25, pp. 59-66.

JAHNS, W. (1999): Die Privatisierung des staatseigenen Betriebes „Administration der Sollinger Steinbrüche“ und die Familie Haarmann.- Jb. Landkrs. Holzminden, 17: 31-50; Holzminden.

JAHNS, W. (2000): Die Administration der Sollinger Steinbrüche von 1828 bis 1870.- Jb. Landkrs. Holzminden, 18: 43-86; Holzminden.

JAHNS, W. (2001): Das Sollinger Steinwesen von 1660 bis 1830.- Jb. Landkrs. Holzminden, 19: 51-88; Holzminden.

JAHNS, W. (2002): Die Administration der Sollinger Steinbrüche von 1900 - 1962.- Jb. Landkrs. Holzminden, 20:41-58; Holzminden.

JAHNS, W. (2003): Der Handel mit Sollingsteinen und die Weserschiffahrt.- Jb. Landkrs. Holzminden, 21: 7-31; Holzminden.

KASPAR, F. (2001): Bedeckt und Bedacht. Zur Geschichte von Dacheindeckungen und Fassadenbehang in Nordwestdeutschland.- Denkmalpfl. u. Forschung Westfalen, 37; Münster.

- KELLMANN, T. (2004): Zur Geschichte und Verbreitung der Dachplatten aus dem Solling.- Arbeitsh. Denkmalpflege Niedersachsen, 31: 410-413; Hannover.
- KELLMANN, T. (2009): Sandsteinplatten-Dächer. Interner Vermerk des NLD Hannover mit drei Anlagen, insgesamt 8 Seiten.
- LEPPER, J. (2000): Der Wesersandstein - ein historisches Baumaterial: Vorkommen, materialkundliche Aspekte, Verwendung. - Ber. Denkmalpflege Nieders., 3/2000: 129-132, 4 Abb., 1 Tab.; Hannover.
- LEPPER, J. (2002): Ein Sockel aus Sandstein - die Geologie des Reinhardswaldes.- In: Reinhardswald - Eine Kulturgeschichte: 103-133; Kassel (Euregio-Verlag).
- LEPPER, J. (2007): Die Bau- und Ornamentgesteine vom Weserrenaissance-Schloss Bevern.- Jahrb. Ldkrs. Holzminden, 25: 101-114; Holzminden.
- LEPPER, J. (2007): Wesersandstein - ein Exportschlager?- Sonderausgabe Täglicher Anzeiger 175 Jahre Landkreis Holzminden 01.09.2007: S. 36; Holzminden.
- LEPPER, J. (2007): Naturwerkstein - kein Baurohstoff wie all die anderen!- Z. dt. Ges. Geowiss., 158/4: 685-693; Stuttgart.
- LEPPER, J., MÜLLER DEVRIES, M. & STADLBAUER, E. (2000): Der Wesersandstein im Stadtbild von Holzminden. - Ber. Denkmalpflege Nieders., 3/2000: 135-136, 6 Abb.; Hannover.
- LEPPER, J. & STADLBAUER, E. (in Vorbereitung): Geochemische und mineralogische Befunde zu den Solling-Sandsteinplatten am Jagdsternschloss Clemenswerth.
- LEPPER, J. & WEBER, J. (2001): Integratives Bewertungskonzept für eine siliziklastische Naturwerkstein-Lagerstätte im Roten Wesersandstein bei Bad Karlshafen.- Z. angew. Geol. 47 (2001) 2: 79-86; Hannover.
- NEUMANN, H.-H. (1994): Aufbau, Ausbildung und Verbreitung von schwarzer Gipskrusten, dünner schwarzer Schichten und Schalen sowie damit zusammenhängender Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein. - Schriftenreihe Angewandte Analytik 24, Dissertation FB Chemie d. Univ. Hamburg, 178 S.
- NEUMANN, H.-H. (2010): Maßnahmenorientierte Untersuchungen im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes „Methodenentwicklung zur Ressourcenschonung und zum Bautenschutz an den historischen Dacheindeckungen mit Solling-Sandsteinplatten des Jagdsternschlosses Clemenswerth bei Sögel im Emsland, Niedersachsen“. Remmers-Fachplanung, Lönigen und LK Emsland, Meppen.
- NEUSER, R.D. (1997): The present state of optical cathodoluminescence microscopy: developments and facilities at the Ruhr-University, Bochum. - Gaea heidelbergensis, 3: 253.
- PUMMER, E. (2008): Vacuum circulation process. Innovative stone conservation. - 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 15-20 Sept. 2008, Torun, Poland, Vol. II, 481-488
- WEBER, J. (2000): Kieselsäurediagenese und gekoppelte Sedimentarchitektur - eine Beckenanalyse des Reinhardswald-Troges (Norddeutsches Becken, Solling-Folge, Mittlerer Buntsandstein.- Kölner Forum geol. Paläont., 7: 3-165; Köln.

WEBER, J. (2009): Kathodolumineszenz-Untersuchungen ausgewählter Solling-Sandsteinplatten am Jagdschloss Clemenswerth; Untersuchungsbericht im Rahmen des DBU-Projektes „Methodenentwicklung zur Ressourcenschonung und zum Bautenschutz an den historischen Dacheindeckungen mit Solling-Sandsteinplatten des Jagdsternschlosses Clemenswerth bei Sögel im Emsland, Niedersachsen“. LK Emsland, Meppen.

WEBER, J., & LEPPER, J. (2002): Depositional environment and diagenesis as controlling factors for petro-physical properties and weathering resistance of siliciclastic dimension stones: integrative case study on the “Wesersandstein” (northern Germany, Middle Buntsandstein). In: Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A., 2002. Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 205, 103-114 ; London.

WEBER, J. & RICKEN, W. (2005): Quartz cementation and related sedimentary architecture of the Solling Formation, Reinhardswald Basin, Germany. - Sed. Geol. Spec. Publ., 175; 459-477.

Verfasser:

Dipl.-Geol. Dr. Jutta Weber, Gustav-Laforsch-Str. 49 76646 Bruchsal,

Dr. Hans-Hermann Neumann, Remmers Fachplanung GmbH, Lönningen,

Prof. h.c. Dr. Erwin Stadlbauer, Nds. Landesamt für Denkmalpflege Hannover und
Dr. Jochen Lepper, Ahldener Str. 10E, 30625 Hannover