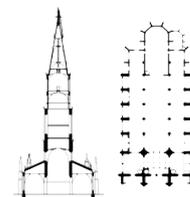


Wissenschaftliche Begleitung und Versuche



Versuchskörper Zwischengalerie

Im Hinblick auf einen Langzeitversuch zu Restaurier- und Fugenmörteln sowie zur Fassung und Oberflächenbehandlung von exponierten Werkstücken aus Sandstein war 2004 auf der Zwischengalerie auf allen vier Turmseiten eine Serie von Prüfkörpern aufgestellt worden. Anlässlich einer ersten Untersuchung wurde eine Fotodokumentation erstellt und auf den Fotos eine Schadenskartierung vorgenommen.

Festzustellen waren zwei Hauptphänomene: Verwitterungen des Steins und Verwitterungen einiger angebrachter Mörtel.⁹ Am Stein waren Ablätterungen, Absandungen, Salzausblühungen und Krusten festgestellt worden. Am Mörtel war festzustellen, dass gewisse Mörtelprodukte nach 6 Jahren ohne Service ziemlich massive Schäden zeigen, und dass andere Mörtel praktisch schadenfrei sind. Erfreulicherweise durfte festgestellt werden, dass die in der Münsterbauhütte gemischten Mörtel vorwiegend der zweiten Gruppe angehören.

Getestet werden an den Prüfkörpern auch Beschichtungssysteme und Schutzanstriche: Interessanterweise sind hier noch praktisch nirgends Verwitterungen zu beobachten. Auch die Hydrophobierung (wasserabweisende Wirkung) war noch immer sehr ausgeprägt.

Bei den Fugenmörteln war 2004 das Ziel, eine relativ weiche Mischung zu finden. Das damals als Entscheidungshilfe hinsichtlich der anstehenden Turmrestaurierung angelegte Experi-

ment sollte vor allem das Elastizitätsverhalten am Bau simulieren. Dies als empirische Ergänzung zu den bereits im Jahr 2000 zusammen mit dem TFB (Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton) Wildegg durchgeführten Versuchsreihen zur Optimierung des Fugenmörtels.¹⁰ Bereits bei der Auswahl der Fugenmörtel für das Achteck wurde auf die seit 2004 laufende Versuchsreihe zurückgegriffen. Um die Erkenntnisse der Versuche so weit wie möglich zu objektivieren, wurden die Prüfkörper zusätzlich von Christine Bläuer und Bénédicte Rousset beurteilt. Dabei kam häufig die Benetzungsmethode mit Pipetten bzw. Tropfflaschen zur Anwendung, um Risse oder hydrophobe Oberflächen sichtbar zu machen. Die Wissenschaftlerinnen trugen ihre Beobachtungen direkt auf die Kartierungen ein.

In der näheren Zukunft sollen stärkere Schäden an den Prüfkörpern der Ostseite in einem ersten Durchgang restauriert werden, ähnlich wie wenn sie am Bauwerk angetroffen würden. Damit wird die Beobachtung auf Restaurierungsmethoden und Reparaturmöglichkeiten ausgeweitet. Die Versuchsreihe wird bis auf weiteres fortgeführt. Kontrollen sollen alle zwei Jahre durchgeführt werden. Dabei soll besondere Sorgfalt darauf verwendet werden, die Dokumentation à jour zu bringen und zu systematisieren.



9 Tätigkeitsbericht der Berner Münster-Stiftung 2004, S. 33; Tätigkeitsbericht 2005, S. 45; Tätigkeitsbericht 2009, S. 40.

10 Tätigkeitsbericht der Berner Münster-Stiftung 2000, S. 23.

Quelle: Dr. Christine Bläuer, CSC Fribourg, „Versuchskörper Zwischengalerie / Ergänzende Auswertung“, Bericht R.0156.01 vom 17.12.2010. Fotos S. 44-45 (l.m. und l.u.): CSC Fribourg.

(r.) Der Tröpfchentest zeigt die immer noch vorhandene Hydrophobie der meisten Anstrichsysteme.

(l.) Schäden in einzelnen Mörteln sind bereits sichtbar.



(l.o.) Übersichtsfoto der Prüfkörper auf der Brüstung der Zwischengalerie (Südseite).

(l.m.) Gleicher Mörtel, einmal vergütet und einmal rein mineralisch. Der vergütete Mörtel zeigt bereits eine deutliche Rissbildung (Detail l.u.). Im Vergleich dazu ist der Mörtel rechts davon bisher, abgesehen von einzelnen Verfärbungen, in einwandfreiem Zustand.

(r.) Auszüge aus der Schadenskartierung vom Juni 2010, ergänzt durch CSC Fribourg am 28.09.2010. Der unbehandelt belassene Stein (Kartierung oben) zeigt nach gut 5 Jahren ein deutlich beginnendes Schadensbild. Die Schutzschicht (Aufmörtelung) des Versuchskörpers darunter scheint dagegen in sehr gutem Zustand.

Versuchskörper Zwischengalerie Süd, Zustand Mai 2010

Versuchskörper Nr.: 9
Steinmaterial: Gurten Sandstein, unbehandelt
Mörtel: ---
Bemerkungen:
Typisches Schadensbild

Legende:

Mörtel	
Absanden	
Abschuppen	
Abblättern	
Riss	
Fehlstelle	

BERNER MÜNSTER-STIFTUNG
 MÜNSTERKAPPELLSTRASSE 13 • 7000 FRIBOURG • TEL. 031 41 11 11 • FAX 031 41 11 11
 E-MAIL: info@bernermuensterstiftung.ch • WWW: WWW.BERNERMUNSTERSTIFTUNG.CH Datum: 1.6.10 Visum: PV

Versuchskörper Zwischengalerie Süd, Zustand Mai 2010

Versuchskörper Nr.: 3
Steinmaterial: Gurten Sandstein, ungefestigt
Mörtel: Kernmörtel + MBH 311
Bemerkungen:
*Mörtel in sehr gutem Zustand.
 Ganz leichte Spürschicht.*

Legende:

Mörtel	
Absanden	
Abschuppen	
Abblättern	
Riss	
Fehlstelle	

BERNER MÜNSTER-STIFTUNG
 MÜNSTERKAPPELLSTRASSE 13 • 7000 FRIBOURG • TEL. 031 41 11 11 • FAX 031 41 11 11
 E-MAIL: info@bernermuensterstiftung.ch • WWW: WWW.BERNERMUNSTERSTIFTUNG.CH Datum: 1.6.10 Visum: PV

Salze

Im Allgemeinen wurde dem Thema der Salze am Berner Münster in den letzten Jahren wenig Beachtung geschenkt, da es als nicht relevant erachtet wurde. Im letzten Jahr konnten allerdings an diversen restaurierten und un-restaurierten Stellen ungewöhnliche Ausblühungen beobachtet werden. Für 2011 ist ein Projekt geplant, mit dem eine erste Übersicht über eventuelle Salzprobleme am Münster erstellt werden soll. Mit CSC sollen bisher bekannte Stellen, die Salzausblühungen zeigen, genauer untersucht werden. Das Projekt soll einerseits so weit wie möglich die Ursachen abklären, dann aber auch die Gefährlichkeit und die Schäden, die von Salzen verursacht werden.

Im Vergleich mit anderen Bauwerken scheint das Problem am Münster nicht dramatisch, bedarf jedoch einer vertieften Abklärung. Am unteren Achteck waren zum Beispiel im Sommer an drei nahe beieinander liegenden Stellen pelzartige Salzausblühungen festzustellen. Der beunruhigende Befund wurde vom CSC untersucht. Trotz Anwendung sämtlicher zur Verfügung stehender Untersuchungsmethoden und Beizug von europäischen Experten konnte die Ursache des inzwischen von Dr. Christine Bläuer „Mübernitt“ getauften Phänomens bislang nicht eruiert werden. Die plausibelste Vermutung läuft darauf hinaus, dass in einer lange zurückliegenden Arbeitsphase ein nicht näher bekanntes Material zur Anwendung gekommen war.

Salzgehalt in Frischmörteln

In den letzten Jahren ist vielerorts die Problematik von Steinrestaurierungen an Mauerwerken mit bereits bestehenden Versalzungen erkannt und diskutiert worden. Hohe Salzkonzentrationen sind nicht nur als unmittelbare Schadensursache von Belang, sondern auch, weil sie die Haftfähigkeit von Aufmörtelungen massiv einschränken und Wechselwirkungen mit diversen Produkten zur Steinrestaurierung zeigen. Die schädlichen Salze können mit gewissen Werkstoffen am Bauwerk unbewusst eingebaut



Salzanalyse im Labor CSC in Fribourg (Fotos: B. Rousset, CSC Fribourg).

werden – bekannt ist in diesem Zusammenhang seit langem der Zement, speziell in stark durchfeuchteten Bereichen. Seit dem 19. Jahrhundert sind zudem Behandlungsmethoden für Steinoberflächen eingesetzt worden, insbesondere Vorläufer der heutigen Steinfestigungsprodukte, über deren Zusammensetzung und Rolle als Schadensursache nur wenig Wissen verfügbar ist. In den nächsten Jahren soll Grundlagenwissen über das Thema zusammen getragen werden, damit besser mit Salzen als potentielle Schadensursache umgegangen werden kann. Im Rahmen der diesjährigen Kampagne wurde mit einer Versuchsreihe zum Thema Alkaligehalte in den am Berner Münster verwendeten zementhaltigen Frischmörteln begonnen. In vergleichbaren Studien konnte nachgewiesen werden, dass das Alter der Mörtel die Salzanalysen stark beeinflussen kann. Der mit Wasser auswaschbare Alkaligehalt nimmt offenbar mit dem Alter der Mörtel ab.

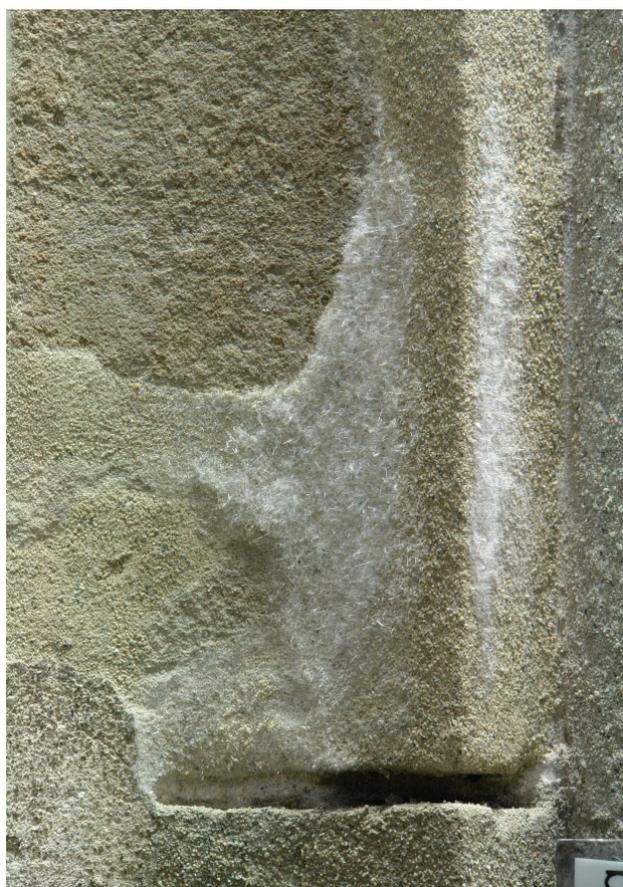
Die Art und Menge der mit Wasser auslaugbaren Salze sollte also auf Empfehlung unserer Expertinnen genau am 28. Tag nach der Anfertigung der Proben bestimmt werden. Peter Völkle er-

stellte 11 Frischmörtelproben, jeweils mit zwei unterschiedlichen Portlandzementen mit identischen Eigenschaften. Die Proben wurden die ersten 14 Tage feucht gehalten, anschliessend bei ca. 15°C gelagert und nach 28 Tagen luftdicht verpackt an CSC geschickt.

Tatsächlich ergab die Analyse der beiden Zementsorten deutlich verschiedene Werte. Zu denken gab, dass der bisher verwendete, schwer erhältliche und teure Portlandkalksteinzement (welcher 1984 aufgrund seines damals nachgewiesenen sehr geringen Anteils an wasserlöslichen Alkalien ausgewählt wurde) in der Versuchsreihe einen höheren Salzgehalt aufwies als identische handelsübliche Produkte. Zur Erhärtung dieses Befundes werden in den nächsten Jahren weitere Chargen und Produkte untersucht. Es kann insgesamt nicht davon ausgegangen werden, dass ein Mörtel, welcher viele Alkalien enthält, auch notwendigerweise viele an seine Umgebung abgibt. Dies hängt stark vom umgebenden Milieu ab.

Im Rahmen der Untersuchungen soll in nächster Zeit auch das Langzeitverhalten von Mikrozement beobachtet werden, welcher am Berner Münster seit einigen Jahren für Injektionen in sehr schmalen Hohlräumen verwendet wird. Nach Auffassung von CSC sollte die Anwendung von Mikrozement in stark salzbelasteten und stark wasserbelasteten Umgebungen eher zurückhaltend erfolgen.

Quelle: CSC Fribourg, „Turmachteck, Nord-Ostseite, Analyse von Ausblühungen auf neuem Mörtel“, Bericht R.0003.06 vom 24.12.2010 / CSC Fribourg: „Salzgehalt in Frischmörteln“, Bericht R.0173.01 vom 19.12.2010.



Salzausblühungen am unteren Turmachteck Nord-Ost auf Restauriermörteln am Gurtensandstein:

(r.o. und r.m.) Das Salz ist innerhalb kurzer Zeit über ein Wochenende auf einem frischen Mörtel auskristallisiert. Weder Zusammensetzung noch Ursprung konnten bisher bestimmt werden. Das unbekannte wasserhaltige, organische Salz wurde inzwischen „Mübernit“ getauft.

(l.) Ausblühungen in der näheren Umgebung des oben genannten Phänomens, diesmal im Bereich von 2004 angelegten Festigungs- und Mörtelversuchen.

Kernmörteloptimierung

Die Rezepturen für Kernmörtel waren 2009 optimiert worden.¹¹ Die mit dem neuen Material angefertigten Werkstücke sind weniger hart und weisen einen besseren Wasserhaushalt auf. Wasser wird im Vergleich zur alten Mischung deutlich schneller wieder abgegeben, was die Frostbeständigkeit erhöhen könnte. Die Anpassung der Rezeptur in Zusammenarbeit mit CSC Fribourg und dem TFB (Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton) Wildegg erfolgte im Bestreben, die Eigenschaften des Mörtels denjenigen des Trägermaterials bestmöglich anzugleichen. Der Kernmörtel für Berner Sandstein war 2002-2003 im Rahmen der Entwicklungsphase zwecks Schwundreduktion ausgemagert worden, d.h. es wurden Feinanteile ausgesiebt. Nun wurde der Mörtel wieder geringfügig weicher gemacht. Es wurden einige zusätzliche Feinanteile wieder zugefügt und Bindemittel reduziert. Mit der Anpassung hat sich die Mörtelrezeptur der originalen Rezeptur, die wir Andreas Walser verdanken, wieder angenähert, allerdings mit deutlich reduziertem Bindemittelanteil. Auf dem härteren Zuger Sandstein wird weiterhin die bewährte, etwas härtere Mischung angewendet. Die neue, voraussichtlich frostbeständigere Mörtelmischung wurde von der TFB Wildegg, diesmal als zusätzlicher Sicherheitsnachweis, auch auf Biegezug- und Druckfestigkeit getestet.

11 Tätigkeitsbericht der Berner Münster-Stiftung 2009, S. 41.



(o.) Anfertigung von Kernmörtelproben für die Laboranalyse durch CSC Fribourg 2009/2010. Die Mörtel wurden möglichst realitätsnah an vertikal aufgestellten Prüfkörpern erstellt.

(u.) Resultat der Biegezug- und Druckfestigkeitsanalyse des angepassten Kernmörtels. Rot eingefügt zum Vergleich: Werte des bisher am Berner Münster verwendeten Kernmörtels (Originalrezeptur A. Walser, Restaurator).



Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton
 Service de recherches et conseils techniques en matière de ciment et béton
 Ricerca e consulenza tecnica per cemento e calcestruzzo
 Technical Research and Consulting on Cement and Concrete

CH-5103 Wildegg
 Lindenstrasse 10
 Telefon 062 887 72 72
 Fax 062 887 72 70
 E-Mail info@tfb.ch

Prüfbericht
 Auftragsnummer: 103415-02 Seite 1

Berner Münster-Stiftung
 Münsterbauhütte Bern
 Herr Peter Völkle
 Langmauerweg 18
 3003 Bern

Objekt: Berner Münster
 Bauteil: Überprüfung Kernmörtel 25 Probeneingang Labor: 09.03.2010
 Interne Auftragsnummer: 09.03.2010

Angaben des Auftraggebers : Betonsorte: Zement: Zement und NHL. kg/m3
 Betonlieferant: Rezeptur.Nr.: GK: mm
 Bemerkungen:

Druckversuch SN EN 1015-11 Prüfkörper : Bohrkern
 Serie Bezeichnung: Bk1 - Bk3
 Prüfdatum: 01.04.2010 27 Tage nach Herstellung: 05.03.2010 geprüft durch: re
 Bemerkung:
 Probenlagerung TFB: bis Prüfung
 Bemerkungen: Lagerung gemäss SN EN 1015-11

Bez.	Abmessungen [mm]		Masse [g]	Rohdichte [kg/m³]	Bruchlast [kN]	Festigkeit [N/mm²]
	d	h				
Bk 1	49.9	50.5	186.2	1890	19.0	9.5
Bk 2	49.9	49.5	182.8	1890	18.8	9.5
Bk 3	49.9	50.8	185.5	1870	18.0	9.0
Mittelwert				1880		9.5
Standardabweichung				11.4		0.3

Bez.	Abmessungen [mm]		Masse [g]	Rohdichte [kg/m³]	Bruchlast [kN]	Festigkeit [N/mm²]
	d	h				
Bk 1	49.9	50.2	199.1	2030	51.3	26.0
Bk 2	49.9	49.4	196.3	2030	52.9	27.0
Bk 3	49.9	50.4	201.5	2040	55.1	28.0
Mittelwert				2030		27.0
Standardabweichung				8.5		1.0

Stv. Laborleiter / P. Spieler: Wildegg 09.04.2010

Die Prüfergebnisse haben nur Gültigkeit für die untersuchten Proben. Dieser Bericht darf nicht auszugeweiht kopiert werden.
 Unversiebelte Proben werden nach der Prüfung 6 Monate aufbewahrt. Das Auftragsdokument wird während 13 Jahren archiviert.
 Der Auftraggeber kann die Dienstleistungen innerhalb von 30 Tagen beanstanden. Bitte beachten Sie die "Allgemeinen Geschäftsbedingungen". Weitere Informationen: www.tfb.ch.



Festigungsüberwachung

Nachdem vor einigen Jahren das aktuelle Grundlagenwissen zur Festigung von Bauteilen¹² erarbeitet wurde, haben die Expertinnen vom CSC die Ausführung am Bau am Beispiel der Lombachkapelle beratend und analysierend begleitet. Christine Bläuer und Bénédicte Rousset waren während der Arbeiten unmittelbar anwesend. Angesichts der komplexen Vorgänge bei einer Festigung spielen nicht nur die verwendeten Materialien und die Analyse des Resultats, sondern auch die näheren Umstände der Applikation eine wichtige Rolle. Die Dosierung und Anwendung von Festigern erfolgt in der Regel angepasst an die jeweiligen Schadensbilder. Intakte Oberflächen werden sehr zurückhaltend, stark zersetzte Oberflächen stärker gefestigt.

Bohrwiderstandsmessungen

Die Berner Erkenntnisse zu Festigungen wurden vor mehreren Jahren auf nationaler Ebene auch in das 4K-Projekt (Kathedralen Basel, Lausanne, Fribourg und Bern) eingebracht. Aus diesem Projekt resultierte die Erkenntnis, dass die Ergebnisse einer Festigungsmassnahme kaum mit zerstörungsfreien Methoden zu messen sind. Damit am Spornpfeiler der Lombachkapelle keine Bohrkerne gezogen werden mussten, wurde diesmal auf die Methode der Bohrwiderstandsmessung zurückgegriffen. Das Ziel von Bohrwiderstandsmessungen sind klarere Aussagen, ob entfestigte Oberflächen nach dem Festigen wieder ein gleichmässiges Festigkeitsprofil aufweisen.

2006 in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule durchgeführte Versuche hatten keine ausreichenden Resultate erbracht, da das damals neu entwickelte Gerät nicht den Anforderungen entsprach. Für die diesjährige Versuchsreihe wurde auf ein seit Jahren bewährtes Gerät, welches von der Fachhochschule Bern zur Verfügung gestellt wurde, zurückgegriffen. Dabei wurden mit einer speziellen Bohrmaschine Löcher bis zu 4 cm Tiefe gebohrt.

Die Versuche waren nun erstmals erfolgreich. Bei diesem Verfahren wird während des Bohr-



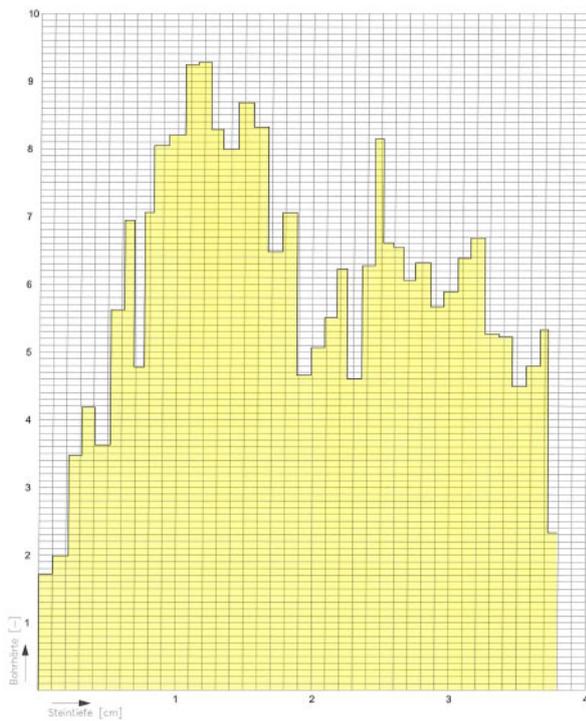
vorgangs laufend der Bohrwiderstand aufgezeichnet. Anhand der resultierenden Kurven kann aufgrund der Härteunterschiede auf Lockerzonen, Schalenbildungen, Einschlüsse etc. geschlossen werden. Die Methode wird als zerstörungsfrei bezeichnet: Jede Bohrung ist gleichzeitig eine Messung und hinterlässt ein Loch von 3 mm Durchmesser. In die Bohrwiderstandsversuche wurden verschiedene Arten von Verwitterungszuständen am Berner Sandstein mit einbezogen. Es wurden jeweils zwei Bohrungen gemacht – einmal vor und einmal nach dem Festigen. Die Interpretation der Untersuchungsergebnisse steht noch aus. Aus ihr erhoffen wir uns klarere Erkenntnisse über Wirkung und Eindringtiefe einer Kieselsäurefestigung des Steins.

12 Tätigkeitsbericht der Berner Münster-Stiftung 2007, S. 45-46.

**(o.) Wissenschaftlerinnen beim Feldversuch:
Begleitung der Festigungsarbeiten 1:1 auf der Baustelle
durch Christine Bläuer / Bénédicte Rousset.**

Berner Münster-Stiftung, Münsterbauhütte
Bestimmung der Steinhärte durch Bohrwiderstandsmessung

Nr. 2



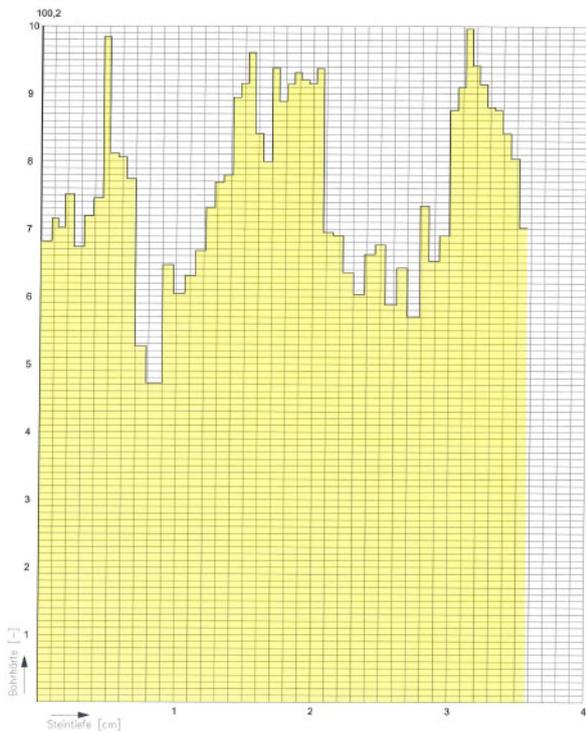
Gerät: Durabo
Geschwindigkeit: II
Datum: 15.09.2010

Münster Bern, Pfeiler 65
Bohrung 2

Auswertung:
ERFASSUNG UND KARTIERUNG VON
SCHÄDEN AN NATURSTEINBAUWERKEN
BERATUNG BEI DER INSTANDSETZUNG
HERMANN
SCHÄFER

Berner Münster-Stiftung, Münsterbauhütte
Bestimmung der Steinhärte durch Bohrwiderstandsmessung

Nr. 2a



Gerät: Durabo
Geschwindigkeit: II
Datum: 24.11.2010

Münster Bern, Pfeiler 65
Bohrung 2a

Auswertung:
ERFASSUNG UND KARTIERUNG VON
SCHÄDEN AN NATURSTEINBAUWERKEN
BERATUNG BEI DER INSTANDSETZUNG
HERMANN
SCHÄFER



Bohrwiderstandsmessung am Pfeiler 65 Süd:

**(l.o.) Festigkeitsprofil vor dem Festigen.
(l.u.) Festigkeitsprofil nach der Festigung mit Kieselsäure-
rester. Auswertung durch: Hermann Schäfer, Erlensee
(D).**

**(r.o.) Bohrwiderstandsmessungen am Pfeiler 65 Süd: Aus-
führung der Bohrung durch Peter Völkle, unter strenger
Beobachtung durch CSC Fribourg (Bénédicte Rousset).**

(r.u.) Detailaufnahme der Bohrung mit 3mm Durchmesser.