

Deutsche Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück

Forschungsprojekt AZ 18669

*Modellhafte Konzeptentwicklung zur Konservierung
umweltgeschädigter Brüstungselemente der
Münster in Freiburg und Ulm (Baden Württemberg)*

Endbericht

2004

Deutsches Bergbau-Museum

Fachbereich Denkmalschutz/Materialkunde



Gefördert durch die

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

49007 Osnabrück - Postfach 17 05

Modellhafte Konzeptentwicklung zur Konservierung umweltgeschädigter

Brüstungselemente der Münster Freiburg und Ulm

Aktenzeichen: 18669

Wissenschaftliche Bearbeitung, verfahrenstechnische Durchführung, restauratorische Instandsetzung

Deutsches Bergbau Museum, Fachbereich Denkmalschutz/Materialkunde, Bochum

Restaurator Facius-Kaiser, Oberscheinfeld

Münsterbauhütte Freiburg

Restaurator Armin Hellstern GmbH, Freiburg

Jbach Steinkonservierung Bischberg/Bamberg

Geologisch Technisches Büro Karin Kirchner, Moers

Herman Schäfer, Schadenserfassung an Naturstein Beratung bei der Instandsetzung, Erlensee

Münsterbauhütte Ulm

Projektbetreuung

Dr. G. Kolb, Landesdenkmalamt Baden Württemberg, Außenstelle Tübingen

Wölbart, Landesdenkmalamt Baden Württemberg

Denkmaleigentümer

Evangelische Kirchenpflege, Ulm

Freiburger Münsterbauverein

Fördermittelgeber

Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück

Landesdenkmalamt Baden Württemberg

Projektkoordination und materialkundliche Untersuchungen

Deutsches Bergbau Museum, Fachbereich Denkmalschutz/Materialkunde, Bochum

Geologisch Technisches Büro Karin Kirchner, Moers

Berichterstatter und redaktionelle Bearbeitung

Dipl.-Ing. Saß, Hüttenmeister Leuschner, Münsterbauhütte Freiburg

Restaurator Armin Hellstern GmbH, Freiburg

Restaurator Egon Facius-Kaiser, Oberscheinfeld

Dipl.-Ing. Ingrid Rommel, Hüttenmeister Völkle; Münsterbauhütte Ulm

Herman Schäfer, Schadenserfassung an Naturstein Beratung bei der Instandsetzung, Erlensee

Deutsches Bergbau Museum, Fachbereich Denkmalschutz/Materialkunde, Bochum

Geologisch Technisches Büro Karin Kirchner, Moers

Vorwort

An den Brüstungselementen der Münster Freiburg und Ulm lassen sich starke Verwitterungsschäden beobachten, die im erheblichen Maße auf die Umweltbelastungen und die exponierte Lage der beiden Bauwerke zurückzuführen sind. Einige Brüstungselemente sind so stark geschädigt, so dass hier die Acrylharzvolltränkung als Schutzmaßnahme angedacht werden muss. Hierzu müssen sie aus dem Baukörper ausgebaut werden. Die heutigen Ausbautechniken führen zu einem teilweisen Verlust der Originalsubstanz. Die Ausbautechnik ist daher zu verbessern, in dem man geeignete Maschinen und Verfahren ausprobiert, und wenn notwendig modifiziert. Hierzu sollte das verbaute Material in seinen Eigenschaften und der derzeitige Zustand der Elemente erfasst werden, um dann die jeweilige geeignete und nachhaltige Schutzmaßnahme auswählen zu können.

Unser Dank gilt dem Fördermittelgeber der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück, und dem Denkmalamt Baden Württemberg, Stuttgart, die diese Projektdurchführung ermöglichten.

Unseren besonderen Dank gilt den beiden Münsterbauhütten Freiburg und Ulm, die die wesentlichen Beiträge für die Erprobung der Sägetechniken und Ausbaurverfahren übernommen haben. Unterstützt wurde das Projekt in allen Phasen durch den begleitenden, fachlichen Rat des Landesdenkmalamtes Baden Württemberg.

Inhalt

1	Einleitung und Zielsetzung.....	7
2	Material- und Schadensaufnahme an den Brüstungselementen am Freiburger Münster	8
2.1	Die Brüstungselemente am Freiburger Münster. Einführung in die Baugeschichte, Beschreibung der Schadenssituation und früherer Restaurierungsmaßnahmen vor dem Projektbeginn	8
2.1.1	Graphische Dokumentation der eingesetzten Materialien und Schadensformen	13
3	Erfassung einiger Materialkennwerte an den Brüstungselementen des Freiburger Münsters.....	27
3.1	Die Buntsandsteine der Brüstungselemente des Freiburger Münsters.....	27
3.1.1	Messungen Vorort (Ultraschallmessungen) und Probenahme.....	27
3.1.1.1	Ultraschallmessungen	27
3.1.1.2	Probenahme	32
3.1.2	Bestimmung ausgewählter Materialkennwerte an den entnommenen Proben des Freiburger Münsters	33
3.1.2.1	Bestimmung der petrografischen und stofflichen Kennwerte.....	33
3.1.2.2	Bestimmung ausgewählter physikalischer Kennwerte	44
3.1.2.3	Bestimmung der wasserlöslichen Salze	45
3.1.2.4	Früher durchgeführte Untersuchungen	47
3.1.2.5	Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen am Freiburger Münster	49
4	Bewertung zur Instandsetzung aufgrund der Schadensaufnahme	54
5	Material- und Schadensaufnahme an den Brüstungselementen am Ulmer Münster.....	55
5.1	Die Brüstungselemente am Ulmer Münster. Einführung in die Baugeschichte, Beschreibung der Schadenssituation und früherer Restaurierungsmaßnahmen vor dem Projektbeginn.....	55
5.1.1	Grafische Dokumentation der eingesetzten Materialien und der Schadensformen	57
6	Erfassung einiger Materialkennwerte an den Materialien der Brüstungselemente des Ulmer Münsters	63
6.1	Der Schlaitdorfer Sandstein der Brüstungselemente des Ulmer Münsters	63
6.1.1	Messungen Vorort (Ultraschallmessungen) und Probenahme.....	63

6.1.1.1	Ultraschallmessungen	63
6.1.1.2	Probenahme Vorort.....	68
6.1.2	Bestimmung ausgewählter Materialkennwerte an den entnommenen Proben des Ulmer Münsters	77
6.1.2.1	Bestimmung der petrografischen und stofflichen Kennwerte.....	77
6.1.2.2	Bestimmung ausgewählter physikalischer Kennwerte	95
6.1.2.3	Bestimmung der wasserlöslichen Salze	96
6.1.2.4	Früher durchgeführte Untersuchungen	98
6.1.2.5	Zusammenfassende Darstellung der Kennwerte der Natursteine an den Brüstungselementen des Ulmer Münsters.....	100
7	Erprobung und Modifizierung der Sägetechniken zum Ausbau der Brüstungselemente.....	103
7.1	Darstellung der Problemstellungen am Freiburger Münster Versuchsläufe und ihre Auswertung	103
7.1.1	Vorversuche.....	103
7.2	Darstellung der Problemstellungen am Ulmer Münster Versuchsläufe und ihre Auswertung	109
7.2.1	Vorversuche.....	109
7.2.2	Darstellung der Problemstellung und Versuchsläufe mit Auswertung am Ulmer Münster	114
8	Arylharzvolltränkung (AVT-Behandlung).....	125
8.1	Trocknungsverhalten, thermische und hygri sche Dehnung der Buntsandsteine und des Schläitdorfer Sandsteins.....	125
8.2	Flankierende Maßnahmen und restauratorische Vorbehandlung zur AVT	127
8.2.1	Restaurierungsbericht der Firma Hellstern zu den Brüstungselementen am Freiburger Münster.....	132
8.2.2	Restaurierungsbericht der Firma Kaiser zu den Brüstungselementen des Ulmer Münsters	146
9	Zusätzliche Untersuchungen zum Ulmer Münster	187
9.1	Mörteluntersuchungen	187
9.2	Immissionsraten und Temperaturmessungen.....	194
9.2.1	Immissionsraten.....	194

9.2.2	Temperaturmessungen.....	199
10	Fazit.....	200
11	LITERATUR.....	203

1 Einleitung und Zielsetzung

Ausgangspunkt für das Vorprojekt war die Überlegung ein anwendungsbezogenes Forschungsprojekt zum Erhalt der Brüstungselemente des Freiburger Münsters aus Buntsandstein und des Ulmer Münsters aus Schlaitdorfer Sandstein durchzuführen.

An den beiden Münstern Freiburg und Ulm kommen starke Verwitterungsschäden an den Brüstungselementen aus dem Mittelalter, dem 19. Jh. und den 30er Jahren vor, die im erheblichen Maße auch auf die Umweltbelastungen und exponierte Lage der beiden Bauwerke zurückzuführen sind.

Es sind hier verschiedene restauratorische und konservierende Maßnahmen notwendig, um die originalen Brüstungselemente zu erhalten. Hierzu ist es erforderlich die Originalsubstanz ohne Materialschädigung auszubauen. Die Schwierigkeit bestand darin, dass die Brüstung nicht aus einem Element sondern aus den vertikal aufgestellten Maßwerksteinen, den horizontal aufgetragenen Abdeckern und den Fuß/Gesimsprofilteilen zusammengesetzt ist. Der Steinschnitt ist an den verschiedenen Brüstungen der beiden Münster Freiburg und Ulm ganz unterschiedlich angelegt, so dass ein geeignetes Abbaukonzept zu erarbeiten ist, das den Verlust originaler Bausubstanz so gering wie möglich hält.

Ein weiteres Problem ist der Verband der Bauteile untereinander, die über Blei- und Mörtelfugen zusammengefügt sind. Die Bauteile müssen in diesen sehr schmalen Fugenbereichen aufgetrennt werden. Dabei müssen die Klammer- und Dübelverbindungen so getrennt werden, dass die Maßwerksteile nicht beschädigt werden.

Ziel dieser Arbeit war, einen Substanzschonenden Ausbau durchzuführen, der es dann ermöglicht stark geschädigte Bauteile mit Hilfe des Acrylharzvolltränkungsverfahrens (AVT-Verfahren) langfristig zu schützen.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde die Aufnahme des Istzustandes (Material-, Schadenskartierung und frühere Maßnahmen) vorgenommen, um festzustellen welche Brüstungselemente aufgrund ihres Schadensausmaßes für eine AVT bzw. herkömmliche Restaurierung in Frage kommen. Es wurden daher ausführliche Dokumentationen zu den Schadensphänomenen an den Brüstungselementen in Freiburg und Ulm durch die beiden Münsterbauhütten angefertigt. Die grafische Dokumentation ist der „Kartierungs-CD“ zu entnehmen.

Verdeckte Schadensbereiche wurden durch eine zerstörungsfreie Prüfmethode (Ultraschallmessungen) dargestellt. Zur näheren Charakterisierung der Natursteine an den Objekten wurden mikroskopische Dünnschliffuntersuchungen, Röntgenfeinstrukturanalysen, Porositätsmessungen, Messungen zur hygri-schen und thermischen Dehnung, Permeabilitätskennwerte und das Wasseraufnahmeverhalten ermittelt.

In Zusammenarbeit mit einem Hersteller einer hydraulischen Wandsäge wurden in Freiburg und Ulm verschiedene Vorrichtungen zum Anbau der Sägeeinrichtung und der Sägevorgang selbst an die jeweiligen Gegebenheiten vorort angepasst.

Die von den Münsterbauhütten unter Zugrundelegung der Material- und Schadenskartierung ausgewählten, stark geschädigten Brüstungselemente wurden nach einer restauratorischen Vorbehandlung der AVT zugeführt.

2 Material- und Schadensaufnahme an den Brüstungselementen am Freiburger Münster

2.1 Die Brüstungselemente am Freiburger Münster. Einführung in die Baugeschichte, Beschreibung der Schadenssituation und früherer Restaurierungsmaßnahmen vor dem Projektbeginn

Das Münster Unserer Lieben Frau in Freiburg (Saß, Juni 1999)

Das Freiburger Münster gehört zu den herausragenden mittelalterlichen Bauten im Südwesten Deutschlands.

An der Stelle einer kleinen Vorgängerkirche wurde der Bau um 1200 von den Steinmetzen und Bildhauern aus Basel im romanischen Stil begonnen. Es entstanden die Vierungskuppel, das Querschiff, zwei Chorflankentürme (die sogenannten „Hahnentürme“) und ein polygonaler Chorabschluss als Teil des geplanten Konzepts einer Basilika.

Unter dem Einfluss der in Frankreich entstehenden Kathedralbauten wurde dieser Plan bald geändert. Hüttenleute aus Straßburg brachten die neuen Ideen des sich rasch ausbreitenden gotischen Stils nach Freiburg.

Seit 1220 wurden die bereits fertig gestellten Bauelemente konsequent in die neue modernere Baustruktur des gotischen Grundplans eingearbeitet.

Es entstanden zwei Ostjoche des Langschiffs, denen man zunächst noch die tastenden Gehversuche der Bauleute jener Zeit anmerkt.

Der romanische Mauerwerksbau wird damit durch die Skelettbauweise der Gotik abgelöst. Mit den verfeinerten Formen der Hochgotik ist dann das Langhaus um 1300 fertig gestellt worden.

Die Errichtung eines frei vor das Langhaus gesetzten Turmfundaments war der Auftakt für einen in der damaligen Welt einmaligen Turmbau.

Zwischen 1280 und 1340 entstand der erste völlig durchbrochene und transparente Kirchturm der Welt. Er wurde Vorbild für viele Türme wie z.B. beim Kölner Dom, beim Ulmer Münster oder beim Dom zu Regensburg. Diese entstanden jedoch erst ca. 500 Jahre später in der Mitte des letzten Jahrhunderts.

Der 116m hohe Freiburger Westturm stellt in seiner kühnen Konstruktion und in seiner großartigen architektonischen Ausformung eine Meisterleistung der mittelalterlichen Baukunst dar.

Jakob Burckhardt, dem berühmten schweizer Kunsthistoriker wird das Wort vom „schönsten Turm der Christenheit“ nachgesagt.

Mit der Entstehung der großartigen Turmpyramide des Westturms wurden die beiden Chorflankentürme aufgestockt.

Der Chor des Freiburger Münsters geht auf den Entwurf eines der führenden Architekten der beginnenden Spätgotik, Johannes von Gmünd, zurück. Er war ein Mitglied der berühmten Baumeisterfamilie Parler und hatte u. a. auch am Basler Münster gearbeitet. Für eine Pfarrkirche, als die das Münster gebaut wurde (Bischofskirche ist das Münster erst seit 1827), ist der Chor ausgesprochen anspruchsvoll. Mit seinem mehrjochigen Binnenchor, dem Umgang und dem Kranz von 13 Kapellen entspricht er den französischen Kathedralchören (Abbildung 1). Die Grundsteinlegung war 1354. Nach ca. 100-jähriger Bauunterbrechung wurde der Chor von 1470 bis in die erste Hälfte des 16. Jh. Zu Ende geführt. Die Weihe war 1513, die Arbeiten an den Chorkapellen zogen sich allerdings noch über 20 Jahre hin (Kempf, 1906; Kempf und Schuster, 1926).

Mit diesem bedeutendem Beitrag der deutschen Sondergotik war der Bau des Freiburger Münsters abgeschlossen. Er zählt damit zu den wenigen bedeutenden gotischen Kirchenbauten, die bereits im Mittelalter fertig gestellt worden sind.

Als letzter Bauteil wurde 1620 die Renaissancevorhalle an den südlichen Querhausgiebel angebaut. Der ursprünglich als Stadtpfarrkirche errichtete Bau wurde 1827 zum Sitz des Erzbischofs und zur Kathedrale.

Das Freiburger Münster zählt mit seiner außerordentlichen reichen künstlerischen Ausstattung, z.B. dem Figurenzyklus in der Vorhalle, den vielen erhaltenen mittelalterlichen Glasmalereien und den überaus

reich ausgestalteten Chorkapellen neben dem Straßburger Münster und dem Münster in Basel zu den bedeutendsten Beispielen mittelalterlicher Baukunst im Süden Deutschlands.

Die Maßwerksbrüstungen befinden sich über den Kapellenwänden und wurden erst später sprich in der Spätgotik, gebaut. Sie überschneiden teilweise eine Anzahl Porträtköpfe und waren daher wohl ursprünglich nicht in dieser Anordnung beabsichtigt. Beim versetzen der Platten hatte man kurzerhand die gotischen Köpfe zurückgespitzt.

Aus den Allgemeinen Geschäftsberichten des Münsterbauvereins von 1937 ist zu entnehmen, dass die Maßwerkplatten in den Jahren 1750-1760, also in spätbarocker Zeit entstanden sind. Weitere schriftliche Angaben zur Entstehungsgeschichte und Ausführung der Brüstungselemente sind nach Angaben der Münsterbauhütte (mdl. Mitteilung Frau Mittmann) nicht bekannt.

Die Maßwerksbrüstungen wurden über den 13 Chorkapellen errichtet, wobei jede Kapelle zwei Brüstungselemente besitzt, die in einem Winkel von 120° zusammenlaufen. Sämtliche Maßwerke sind mit einem leicht profiliertem Brüstungsgesims abgedeckt. Die Maßwerksbrüstungen selbst zeigen sehr unterschiedliche, geometrische Muster.

Freiburger Münster - Schädigung und Gefährdung des Bauwerkes (Saß, April 1999):

Das Freiburger Münster besteht fast ausschließlich aus Buntsandstein aus der engeren und weiteren Umgebung Freiburgs (12 Steinbrüche). Dieses Material ist seit der Entstehung des Münsters um ca. 1200 einem ständigen Alterungs- und Verfallprozess unterworfen. Der Hauptnachteil dieses Sedimentgesteins ist seine Wasseraufnahmefähigkeit.

Eindringendes Regenwasser mit den Schadstoffen der Luft sowie die Einwirkungen von Hitze und Kälte bewirken eine Reihe von Zersetzungsprozessen wie Abschalen, Absanden und Spalt- und Rissebildungen usw. Darüber hinaus führt ein falscher Einbau von Steinelemente im Hinblick auf thermische Einflüsse zu gravierenden Bauschäden wie Risse und Sprengungen.

Der verheerende Luftangriff vom November 1944, der weite Teile der Freiburger Altstadt um das Münster herum zerstört hat, hat außerdem die Bausubstanz stark beeinträchtigt.

Die Schädigung des Steinmaterials zeigt sich grundsätzlich an fast allen Bereichen des Bauwerkes. Ganz besonders ins Auge fallen die Schädigungen an den stark gegliederten Bauelementen wie Ornamenten und Skulpturen, die der Bewitterung durch ihre exponierte Lage ganz besonders ausgesetzt sind. Dies trifft auch für die Maßwerksbrüstungen im Bereich des Chores zu.

Die einmalige Gipsammlung der Freiburger Münsterbauhütte aus der Jahrhundertwende umfasst über 4000 Abgüsse von besonders wichtigen Baugliedern des Münsters.

Der Vergleich der um 1900 angefertigten Abgüsse mit dem heutigen Zustand der Originale vor Ort führt zu der deprimierenden Erkenntnis, dass im Verlauf unseres Jahrhunderts die Schädigung der einzelnen Bauteile wesentlich größer war als in den vergangenen 6 bis 7 Jahrhunderten.

- Beispiele:
1. Kopfkonsole am südlichen Querschiff 1900 – 1990
 2. Eselskonsole am Westturm 1900 – 1990
 3. Strebebogen-Kapitell an der Südseite 1900 – 1990
 4. Blattfries Nördliches Seitenschiff 1900 - 1990

Die Ursachen der erheblichen Schadstoffbelastung der Luft sind in verschiedenen Bereichen zu suchen:

1. Emissionen der Chemie-Großindustrie im Raum Basel und der Industrieanlagen im Elsass (Raum Mulhouse), die von über 30 – 50 km Entfernung unter anderem nachweislich die großen Waldschäden im Belchengebiet und im Freiburger Raum mitverursachen.
Die Auswirkungen auf die Bauwerke Freiburgs sind ebenso offenkundig. Das besonders feuchtwarme Klima des oberen Rheintals mit seinen häufigen Inversionslagen verstärkt die negativen Auswirkungen.
2. Viele Einzelheizungen im dicht besiedelten Altstadtbereich in unmittelbarer Nähe des Münsters.
3. Die bis über 1973 intensive Nutzung des Münsterplatzes als öffentlicher Parkplatz. Seit 1973 sind inzwischen wesentliche Teile der Innenstadt und auch des Münsterplatzes für den Kfz-Verkehr gesperrt.

Sicher hat die Summe dieser Einzelfaktoren zu der enormen Schädigung der Bausubstanz des Freiburger Münsters geführt.

Zur Restaurierung der Maßwerksbrüstungen wurde im Allgemeinen Geschäftsbericht von 1929 erwähnt, dass die Maßwerksgalerie über der St. Annakapelle (heute Alexanderkapelle) in einen Zustand vollkommenen Verfalls war und mehrere Maßwerksplatten samt Brüstungsgesims erneuert werden mussten.

In dem Geschäftsbericht von 1937 wurde festgehalten, dass mehrere Galerieplatten von der Brüstung der Plattform ausgewechselt werden mussten, da das schlechte Steinmaterial (aus den Jahren 1750-1760) sich nicht „sonderlich“ bewährt hat.

1939 erneuerte man Maßwerksplatten über der zweiten Kaiserkapelle (Allgemeiner Geschäftsbericht 1939), und 1940 Maßwerke über der Heimhofer- und Sotherkapelle und über der südlichen bzw. ersten Kaiserkapelle (Unterlagen der Münsterbauhütte von Frau Mittmann zur Verfügung gestellt). Dabei benutzte man „vollständig lagerfreie“ Platten, die zum Schutz vor Witterungseinflüssen mit rohem Leinöl getränkt wurden, ein Konservierungsmittel, das seit 1920 vom Münsterbauamt verwendet wurde und sich lt. Aussagen der Geschäftsberichte gut bewährt hatte (Unterlagen der Münsterbauhütte von Frau Mittmann zur Verfügung gestellt). In der Abbildung 2 ist die zeitliche Zuordnung der einzelnen Maßwerksbrüstungen dargestellt.

Aus späteren Jahren sind keine Restaurierungsmaßnahmen an den Maßwerksbrüstungen bekannt. Nur im Rahmen einer Diplomarbeit der Fachhochschule Köln wurden an der ersten und zweiten Kaiserkapelle die Maßwerksbrüstungen partiell restauriert (Kürten 2000).

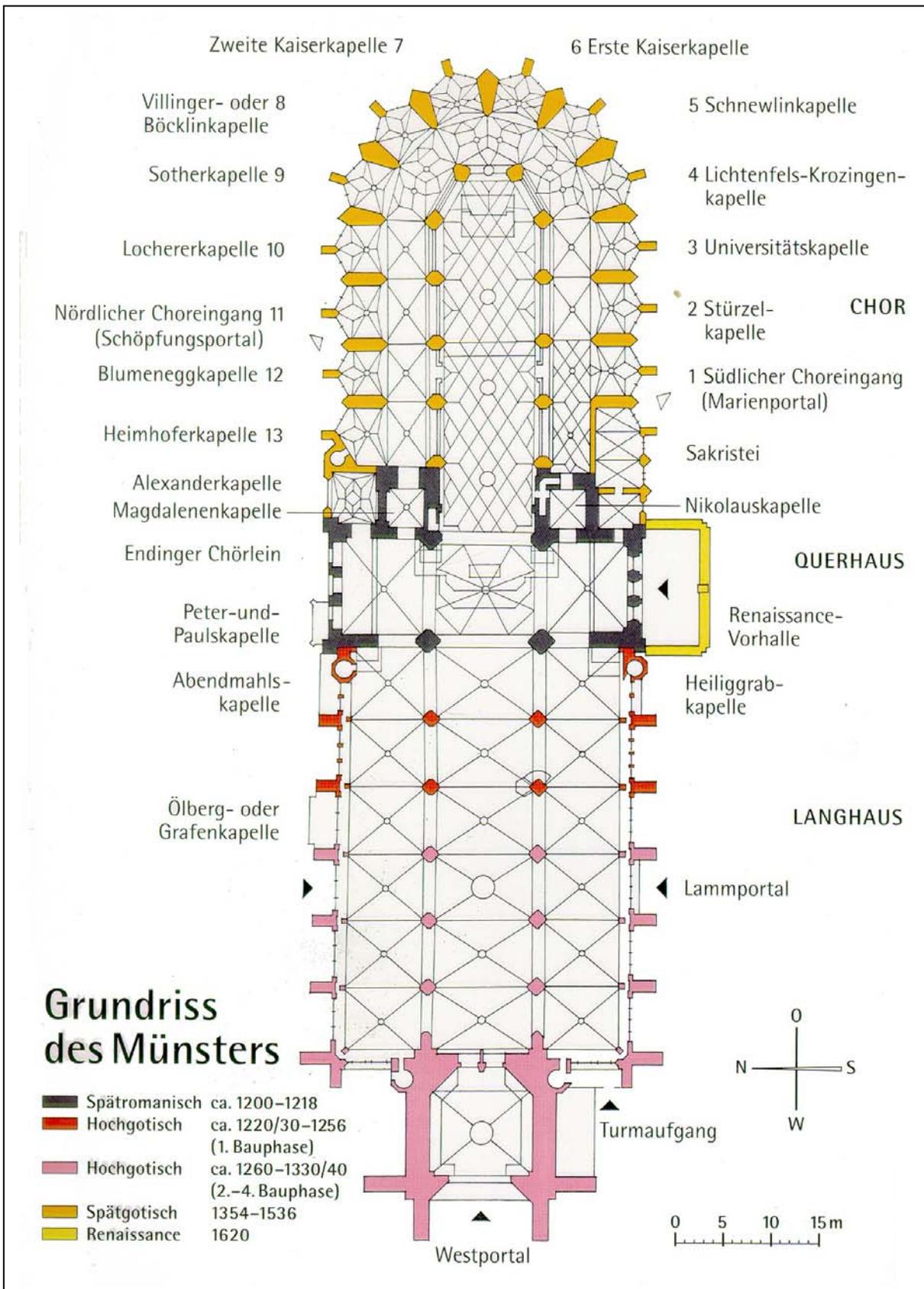


Abbildung 1: verschiedene Bauepochen des Freiburger Münsters (aus: MITTMANN, 2000)

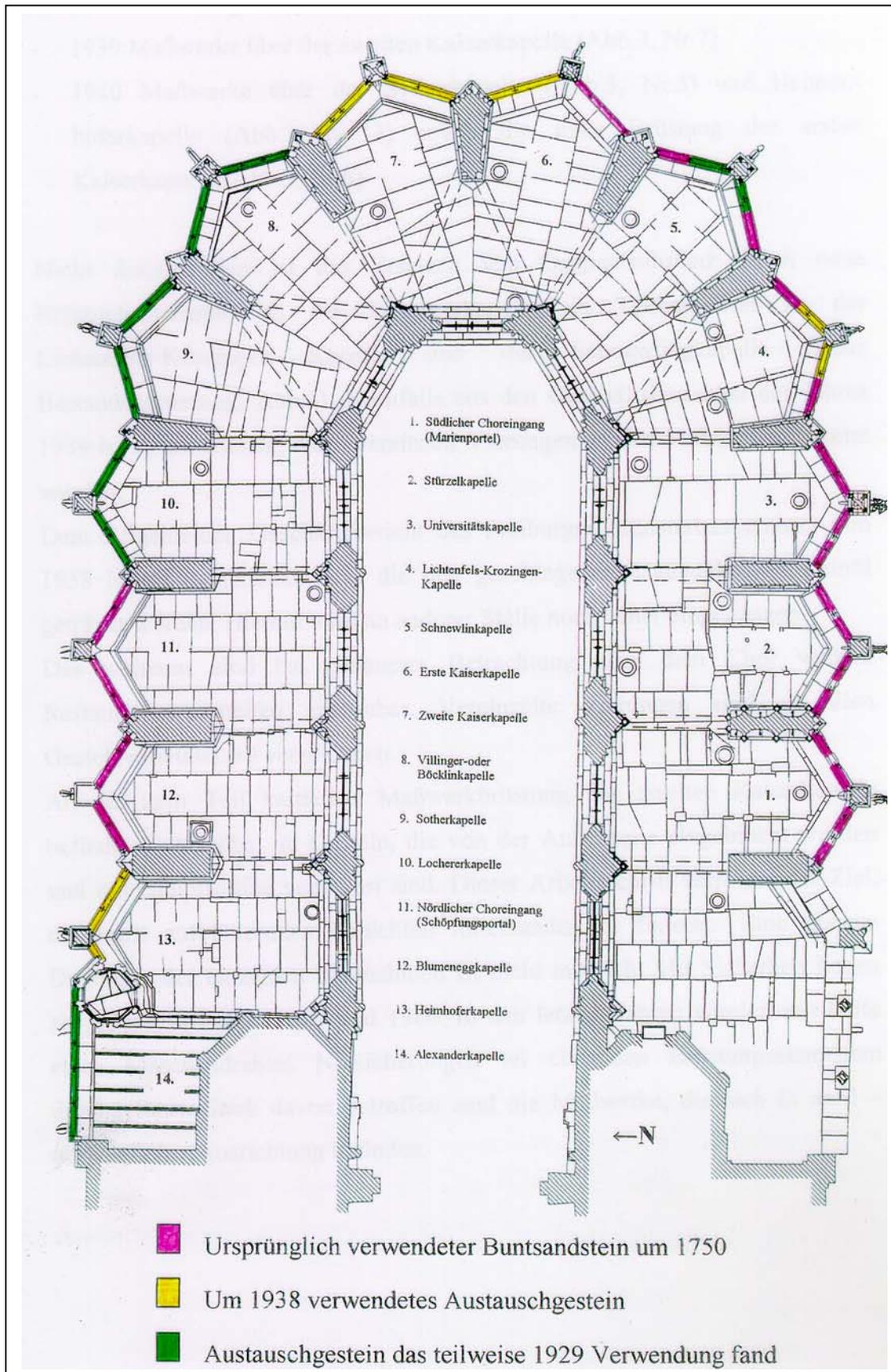


Abbildung 2: zeitliche Zuordnung der einzelnen Maßwerksbrüstungen (aus: KÜR TEN, 2000)

2.1.1 Graphische Dokumentation der eingesetzten Materialien und Schadensformen

Von Seiten der Münsterbauhütte wurden von den einzelnen Maßwerksbrüstungen photogrammetrische Pläne in Auftrag gegeben. Diese waren die Grundlage für die Material- und Schadensdokumentation, die von der Münsterbauhütte selbst durchgeführt wurde.

Das entsprechende Planmaterial zur Material- und Schadensdokumentation ist dem Anhang zu entnehmen.

Wie die Materialdokumentation zeigt, sind an den Maßwerksbrüstungen folgende Buntsandsteine verbaut worden: *Heimbacher Sandstein*, *Almendsberger Sandstein*, *Wölblinsberger Sandstein*

Es handelt sich hierbei um Buntsandsteine, die alle in der unmittelbaren Nähe von Freiburg in der sogenannten „Emmendinger Vorbergzone“ abgebaut worden sind.

Das Originalmaterial ist der *Heimbacher Sandstein*. Er wird dem Mittleren Buntsandstein und dort der Bausandstein-Folge zugeordnet. Er wurde dicht unter der jüngeren Hauptkonglomerat-Folge abgebaut und war aufgrund seines hohen Quarzgehaltes ein sehr harter Stein. In dem Steinbruch wurde ab dem 17. Jahrhundert Material für die Münsterbauhütte abgebaut (Kessler et al., 1980). Bis in die 80er Jahre des 19. Jahrhunderts wurden neben dem Material für die Maßwerksbrüstungen vor allem Steine für Wiederherstellungsarbeiten geliefert (Kessler et al., 1980).

Das Originalmaterial ist noch an folgenden Jochen verbaut: Joch 10 bis 12 Süd, partiell Joch 13 bis 15 Ost und Joch 10 und 11 Nord.

Der *Almendsberger Sandstein* gehört dem Oberen Buntsandstein und zwar der Plattensandstein-Folge an. Es ist eine bis zu 6m mächtige Werksteinbank, die sich in einer ca. 40m Schichtenfolge befindet. Die Gewinnungsstellen lagen am Almendsberg, einem Vorberg bei Emmendingen, und wurden 1923 aufgegeben. Heute ist der Bruch verfallen, es ist nur noch der unbrauchbare Abraum vorhanden (N.N., 1983).

Der *Almendsberger Sandstein* wurde an den Maßwerksbrüstungen vor allem als Reparaturstein verwendet. Es war ein leicht zu bearbeitendes Material und daher häufig für ornamentale und bildnerische Bereiche eingesetzt. Deshalb wurde auch in der Nachkriegszeit versucht, die stillgelegten Brüche wieder zu öffnen. Aber aus wirtschaftlichen Gründen und vor allem aus materialspezifischen Gründen (geringe Verwitterungsbeständigkeit) wurde dies nicht mehr realisiert (N.N., 1983).

Der *Almendsberger Sandstein* wurde an folgenden Jochen kartiert: partiell Joch 13 und 15 Ost, Joch 16 bis 18 Ost, Joch 12, 9 und 8 Nord.

Wie die Literaturrecherchen ergaben wurde der *Almendsberger Sandstein* als Austauschmaterial um 1939 für folgende Joche verwendet (vgl. auch Geschäftsberichte der Münsterbauhütte): Joch 15 Ost (1. Kaiserkapelle), Joch 16 Ost (2. Kaiserkapelle), Joch 18 Ost (Sothor Kapelle) und Joch 8 Nord (Alexander Kapelle).

Zu den übrigen Jochen fanden sich nur Angaben in der Kartierung von Kürten (2000), wo der Hinweis auf ein Austauschgestein um 1929 und um 1938 zu finden ist (Abb.2).

Auch der *Wölblinsberger Sandstein* stammt aus der Plattensandstein-Folge des Oberen Buntsandsteins. Er wurde ab etwa 1500 in den alten Brüchen am Wöplinsberg abgebaut (N.N., 1983). Auch diese Brüche sind heute nicht mehr zugänglich.

Nur einige wenige Werkteile am Joch 14 Ost wurden aus *Wölblinsberger Sandstein* gearbeitet.

Die von der Münsterbauhütte durchgeführte Schadensdokumentation der einzelnen Brüstungselemente wird nachfolgend ausgewertet. Hierzu wurden die Schadensarten tabellarisch aufgelistet und die in den einzelnen Segmenten am häufigsten vorgefunden bewertet (Tabelle 1). Die Bewertung geht von 1 = häufigste bis 3 = geringste.

Tabelle 1: Auswertung der Schadensarten

Bezeichnung	Joch	Abbröckeln	Absanden	Antragung	Aufblättern	Aufwuchs	Ausblühung	Fehlstelle	Mörtel	Rückwitterung	Schale	Kruste	absandene Fläche	rückwitternde Fläche	Risse
Südlicher Choreingang (Marienportal)	Süd 10-1 Außen Innen	2	2			3				1				1	
					1				3	3					1
	Süd 10-2 Außen Innen		2			3				1				1	
						2	3		1		1				
Stürzelkapelle	Süd 11-1 Außen Innen	1	2			2				1				3	
			2							2					1
	Süd 11-2 Außen Innen		2			3				1				1	
										3					
Universitätskapelle	Süd 12-1 Außen Innen		3					3		1				1	3
															1
	Süd 12-2 Außen Innen	3	2					3		1				2	
				3		3		3		3					
Lichtenfels-Krozingen Kapelle	Ost 13-1 Außen Innen		2					2		1					
			2												1
	Ost 13-2 Außen Innen		2			3				1	1				
		3	2					2							
Schnewlinkapelle	Ost 14-1 Außen Innen	2	1					3		1					
			1		3										
	Ost 14-2 Außen Innen	1	2			2				1					
		3	3												

Fortsetzung Tabelle 1

Bezeichnung	Joch	Fortsetzung Tabelle 1													
		Abbröckeln	Absanden	Antragung	Aufblättern	Aufwuchs	Ausblühung	Fehlstelle	Mörtel	Rückwitterung	Schale	Kruste	absandene Fläche	rückwitternde Fläche	Risse
Erste Kaiserkapelle	Ost 15-1 Außen Innen	1	2							1				1	
			3					1							2
	Ost 15-2 Außen Innen	1	2			3				1				1	2
		3													
Zweite Kaiserkapelle	Ost 16-1 Außen Innen	1	2							1	1				1
															1
	Ost 16-2 Außen Innen	2	2							1				1	
		2									1				1
Villinger oder Böcklinkapelle	Ost 17-1 Außen Innen	1	3		2	3				1					
		1	3								3				3
	Ost 17-2 Außen Innen	1	2		2					2	3				2
			2												1
Sotherkapelle	Ost 18-1 Außen Innen	2	3			3				1	1			1	
		3	3								3				1
	Ost 18-2 Außen Innen		2			2				2				1	
			3												1
Lochererkapelle	Nord 12-1 Außen Innen	2	3		3					1					3
			3			1									
	Nord 12-2 Außen Innen		2			1		2						1	
			3		3	1									3

Fortsetzung Tabelle 1

Bezeichnung	Joch	Abbröckeln	Absanden	Antragung	Aufblättern	Aufwuchs	Ausblühung	Fehlstelle	Mörtel	Rückwitterung	Schale	Kruste	absandene Fläche	rückwitternde Fläche	Risse
Nördlicher Choreingang (Schöpfungportal)	Nord 11-1 Außen Innen	2	2			2		2		1				1	
			3			1									2
	Nord 11-2 Außen Innen		1			3		2		1				1	
						1				3					1
Blumeneggkapelle	Nord 10-1 Außen Innen		2			2		2		1				1	3
			2			1									1
	Nord 10-2 Außen Innen	2	2			2		2		1					3
			1			2									1
Heimhoferkapelle	Nord 9-1 Außen Innen	1	2	3		3				1				1	1
	Nord 9-2 Außen Innen		2							1				1	
		3				1		2			1				2
Alexanderkapelle	Nord 8 Außen Innen		2		3	3		1		1				1	
		2	3			1				2					2

Wie dem Planmaterial und der tabellarischen Auflistung zu entnehmen ist, weisen die Brüstungselemente die *Rückwitterung* als häufigste Schadensart auf. Dabei kommt es zu einem Materialverlust von mehr als 5mm (mdl. Mitteilung Leuschner, 2003). Es ist auffällig, dass unabhängig von der Himmelsrichtung eine Rückwitterung an allen Außenseiten der Brüstungselemente festgestellt werden konnte. Die Innenseiten hingegen weisen nur an der Südseite Rückwitterungen auf. An der Ost- und Nordseite konnte dagegen mit einer Ausnahme (Joch 8 Nord) keine Rückwitterung festgestellt werden.

Ebenso kommen *rückwitternde Flächen* jeweils nur an der Außenseite der Brüstungselemente und hier im Bereich der Abdeckungen vor.

Risse wurden vor allem an den Innenseiten der Brüstungselemente aufgenommen.

Unabhängig von der Himmelsrichtung wurden häufig *Absandungen* festgestellt.

Abbröckelungen kommen vor allen an den Brüstungselementen der Ostseite (Joch 14 bis 17) vor.

Besonders auf der Nordseite war *Aufwuchs*, also biologischer Bewuchs, und hier verstärkt an den Innenseiten aufgenommen worden.

Schalen kommen verstärkt an der Ostseite vor. *Fehlstellen* kommen an der Nordseite, partiell auch an der Ost und Südseite vor. Seltener wurden hingegen *Aufblätterungen, Antragungen und Mörtel* aufgenommen.

Viele der Schäden in Form von Rissen und Schalenbildungen sind dadurch entstanden, dass die Elemente im Lager eingebaut wurden.

Brüstungselemente aus Heimbacher Sandstein sind vor allem stark von Rückwitterungen gekennzeichnet.

Die stärksten Schäden weisen die Brüstungselemente auf, die aus Almendsberger Sandstein gearbeitet sind. Es sind dies die Brüstungselemente von den Jochen 15 bis 18 Ost, Joch 8 und 9 Nord; bedingt auch Joch 12.

Aufgrund der Schadenskartierungen würden zunächst die Brüstungselemente der Joche 15 bis 18 Ost für eine Acrylharzvolltränkung in Frage kommen (siehe auch Kapitel 4).

3 Erfassung einiger Materialkennwerte an den Brüstungselementen des Freiburger Münsters

3.1 Die Buntsandsteine der Brüstungselemente des Freiburger Münsters

3.1.1 Messungen Vorort (Ultraschallmessungen) und Probenahme

3.1.1.1 Ultraschallmessungen

Vorort wurden an einigen ausgewählten Maßwerksbrüstungen Ultraschallmessungen (Transmissionsmessungen) durchgeführt. Zu Einsatz kam ein transportables Messgerät der Firma Geotron-Elektronik, Krompholz mit der Bezeichnung Meßsystem UKS 10.

Nachfolgend sind die Messergebnisse umgerechnet in Schallgeschwindigkeiten (m/s) dargestellt. Die Messungen wurden jeweils von der Maßwerksinnenseite aus vorgenommen.

MESSORT: JOCH 14-2 SCHNEWLINKAPELLE

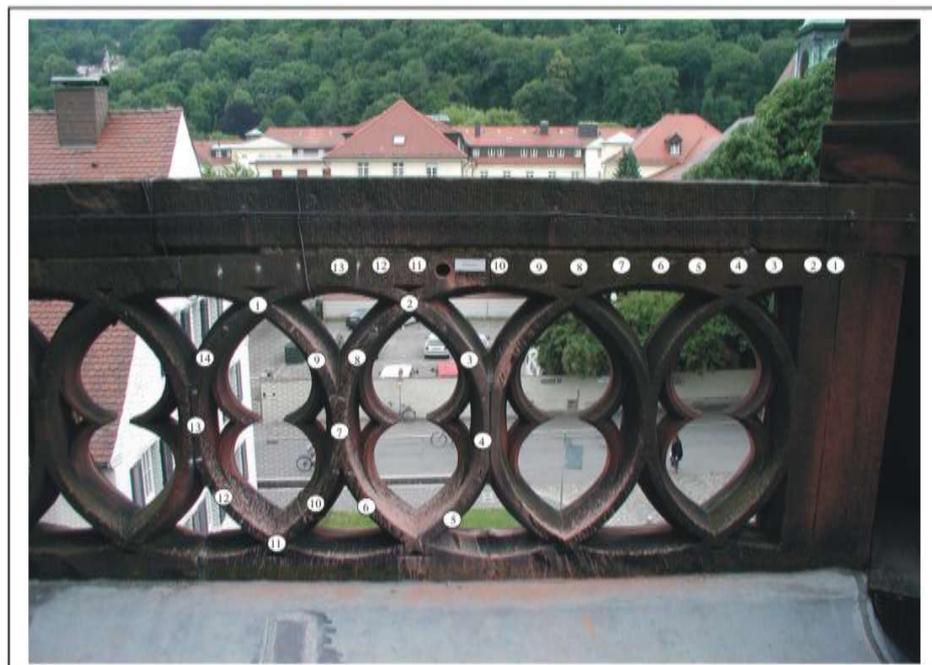
Material: Wölblinsberger Sandstein

Rechte Hälfte der Maßwerkoberkante

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]
1-1	1976
1-2	1994
1-3	2029
1-4	2011
1-5	1994
1-6	2029
1-7	1994
1-8	1947
1-9	1927
1-10	1943
1-11	1943
1-12	1911
1-13	1943

rechtes Maßwerk , linke Hälfte

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]
1-1	1994
1-2	2161
1-3	2141
1-4	2245
1-5	2313
1-6	2313
1-7	2202
1-8	2065
1-9	2336
1-10	2460
1-11	2514
1-12	2245
1-13	2202
1-14	2202



MESSORT: JOCH 15-1 ERSTE KAISERKAPELLE

Material: Heimbacher Sandstein

Rechte Hälfte der Maßwerkoberkante

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]
1-1	1985
1-2	2091
1-3	2148
1-4	2208
1-5	2109
1-6	2339
1-7	2473
1-8	2331
1-9	2363
1-10	2210
1-11	2232
1-12	2255
1-13	2436
1-14	2461

Maßwerkteil

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]
1-1	1880
1-2	2500
1-3	2866
1-4	2238
1-5	2327
1-6	2423
1-7	2440
1-8	2798
1-9	2196
1-10	2500
1-11	2282
1-12	2327
1-13	2423
1-14	2500
1-15	2901
1-16	2474



MESSORT: JOCH 16-2 ZWEITE KAISERKAPELLE

Material: Almendsberger Sandstein

Rechte Hälfte der Maßwerkoberkante

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]
1-1	1731 (Schalen)
1-2	2361
1-3	2248 (Schuppen)
1-4	2269 (Schuppen)
1-5	2248
1-6	2269
1-7	2205 (Schuppen)
1-8	2069 (Schuppen)
1-9	2106
1-10	2033
1-11	2033
1-12	2050
1-13	2087
1-14	2338
1-15	1885 (Aufbeulungen)
1-16	2410
1-17	2461
	1558 (Schale ca. 10cm unter 1-1)

unterer Maßwerkteil

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]
1-1	2103
1-2	2143
1-3	2184
1-4	2206
1-5	1991
1-6	1891
1-7	2184
1-8	2163
1-9	2250
unterer Teil mit abgefallener Schale	
1-10	1776
1-11	1860
1-12	2003
1-13	1563



Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Wölblinsberger Sandstein

Wie der Schadenskartierung zu entnehmen ist, wurden die Messungen an der Maßwerksbrüstung Joch 14-2 alle in einem intakten Bereich durchgeführt. Die Werte liegen zwischen 1911 und 2029 m/s an der oberen Maßwerkskante und zwischen 1994 und 2514m/s am Maßwerk selbst.

Heimbacher Sandstein

Der gemessene Bereich der Maßwerksbrüstung in Joch 15-1 wurde im Jahr 2000 restauriert (KÜR TEN, 2000). Daher wurden hier auch keine Schäden festgestellt. Die Messwert liegen hier zwischen 1985 und 2473 m/s an der oberen Maßwerkskante und zwischen 2196 und 2901 m/s am Maßwerk selbst; nur an der Basis wurden 1880m/s gemessen.

Von dem Hofmaterial wurden Vergleichswerte an Bohrkernen gemessen, die aus intakten Innenbereichen gebohrt wurden. Die Werte liegen zwischen 2927 und 2949 m/s.

Almendsberger Sandstein

Die Messungen an dem Almendsberger Sandstein zeigten in geschädigten Bereichen deutlich niedrigere Werte. In Schalenbereichen wurden Schallgeschwindigkeiten zwischen 1558 und 1731 m/s gemessen, bei Aufbeulungen 1885 m/s. Bereiche mit Schuppenbildungen, die nicht in der Schadenskartierung aufgeführt sind, zeigen Werte zwischen 2069 und 2269m/s.

An dem Maßwerk selbst wurden dort die niedrigsten Werte gemessen, wo sich eine ca. 5cm dicke Schale abgelöst hat und sich jetzt absandend darstellt. Hier liegen die Schallgeschwindigkeiten zwischen 1563 bis 2003 m/s. An intakten Stellen schwanken die Messwerte zwischen 2103 und 2250m/s.

Auch hier wurden Vergleichsmessungen an dem Hofmaterial (Kernmaterial) durchgeführt, wobei es sich auch hier um intaktes Innenmaterial handelt. Die Wert liegen zwischen 2518 und 2543 m/s.

Mit in die Untersuchungen einbezogen wurden die beiden Lahrer Sandsteine, die heute als Ersatzmaterial am Freiburger Münster verwendet werden.

Die Werte für den Lahrer Sandstein liegen bei 2588 m/s für den Typ I (mit Flecken) und bei 2575 bzw. 2713 m/s für den Typ II (ohne Flecken).

Aufgrund der Schadensaufnahmen wurden die Maßwerksbrüstungen der Joche 15 bis 18 ausgewählt. Sie bestehen alle aus Almendsberger Sandstein und weisen je nach Schadensgrad unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten auf. Nachfolgend sind daher die am Joch 16 gemessenen Daten des Almendsberger Sandsteins noch einmal aufgeführt. Betrachtet man die Schallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den Schadensarten so ist eine Tendenz der Abnahme in den Schallgeschwindigkeiten zu erkennen. Daher wäre es sinnvoll nach der Acrylharzvolltränkung wieder Ultraschallaufzeiten zu messen, um einen relativen Vergleich zu bekommen.

Schaden	Schallgeschwindigkeit m/s
intakt (Maßwerk)	2103 - 2250
intakt (Kernmaterial)	2518 - 2543
absanden unter abgelöster Schale	1563 - 2003
Schuppenbildung	2069 - 2269

3.1.1.2 Probenahme

In Absprache mit der Denkmalpflege und der Münsterbauhütte Freiburg wurde für die Materialuntersuchungen nur eine eingeschränkte Anzahl an Bohrkernen (Durchmesser von 30mm und einer maximalen Länge von 60mm) entnommen, um an den Brüstungselementen so wenig wie möglich an Originalsubstanz zu schädigen. Sie wurden an folgenden Positionen gezogen:

Tabelle 2: Bohrkernentnahmestellen am Freiburger Münster

Bohrkern	Entnahmestelle	Material	Schaden
1	Schnewlinkapelle, Joch 14 (innen) Ost	Wölblinsberger Sandstein	intakt
2	Zweite Kaiserkapelle, Joch 16 (innen) Ost	Almendsberger Sandstein	Schale (abgängig)
3	Nördlicher Choreingang Schöpfungsportal, Joch 11 (innen) Nord	Heimbacher Sandstein	Schuppen Aufwuchs
4	Nördlicher Choreingang Schöpfungsportal, Joch 11 (innen) Nord	Heimbacher Sandstein	Schuppen Aufwuchs

Zusätzlich stellte die Münsterbau Hofmaterial des Almendsberger und Heimbacher Sandsteins zu Verfügung. Beide Materialien stammen aus Ausbauteilen des Freiburger Münsters. Die entnommenen Bohrkern wurden für die ausgewählten Untersuchungen zu den Materialkennwerten herangezogen, die in den nachfolgend beschrieben werden.

Parallel zu den Bohrkernen wurden Bohrmehlproben entnommen. Die Probenahmestellen liegen unmittelbar neben denen der Bohrkern, also im Joch 14 Ost (Wölblinsberger Sandstein) im Joch 16 Ost (Almendsberger Sandstein) und in Joch 11 Nord (Heimbacher Sandstein). Diese Proben dienen zur Bestimmung der bauschädlichen Salze.

Zusätzlich wurden von der Münsterbauhütte kleinere Reststücke des neuen Materials zur Vergleichsanalysen zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich um zwei Varietäten des sogenannten „Lahrer Sandsteins“, der in dem Steinbruch der Firma Göhrig in Lahr-Kuhbach (Schwarzwald) abgebaut wird (Pache, 1998). Der Lahrer Sandstein gehört stratigrafisch der Bausandsteinstufe des Mittleren Buntsandstein an (Müller-Sigmund, 2001).

Die Dokumentation der Bohrkern und Bohrmehlproben ist im Kapitel 3.1.2.1 (Bestimmung der petrografischen und stofflichen Kennwerte) bzw. dem Planmaterial zur Material- und Schadenskartierung im Anhang zu entnehmen.

3.1.2. Bestimmung ausgewählter Materialkennwerte an den entnommenen Proben des Freiburger Münsters

3.1.2.1 Bestimmung der petrografischen und stofflichen Kennwerte

Die Bohrkerne wurden zunächst für die geplanten Untersuchungen in Abschnitte unterteilt. Für die petrografische Untersuchung wurden jeweils die vorderen 2 cm der Bohrkerne verwendet. Für die Permeabilitätsmessungen wurden Abschnitte von 5cm Länge abgesägt. Diese Abschnitte wurden anschließend auch für die Wasseraufnahmemessungen verwendet.

Petrografische Untersuchungen

Zunächst unterscheiden sich die untersuchten Proben bereits makroskopisch voneinander. So ist der *Wölblinsberger Sandstein* ein roter, mittelkörniger Sandstein, der „rostbraune“, bis 1cm große Flecken aufweist, bei denen es sich vermutlich um Hämatit handelt. Die Schichtung ist durch eingeregelt Muscovitplättchen zu erkennen.

Der *Almendsberger Sandstein* ist feinkörnig und besitzt somit ein dichteres Erscheinungsbild sowie eine dunkelrote Eigenfarbe. Partiiell sind kleine rostrote Flecken zu erkennen, die jedoch wesentlich kleiner sind als beim Wölblinsberger Sandstein.

Beim *Heimbacher Sandstein* handelt es sich ebenfalls um einen mittelkörnigen Sandstein, er besitzt jedoch größere Mineralkörner als der Wölblinsberger Sandstein. Seine Eigenfarbe ist aufgrund des hohen Quarzgehaltes hellrot. In dem Sandstein sind dunkelrote Tonlinsen eingelagert. Die Schichtung ist durch den Wechsel der Korngrößen und die Tonlinsen erkennbar.

Lahrer Sandstein Typ I (mit Flecken)

Mittelkörniger, durch dunkelrote Tonlagen stark geschichteter (Schichtung im mm-Bereich) rötlicher Sandstein mit auffälligen bräunlichen Flecken sogenannte „Wadflecken“. Dabei handelt es sich um ehemalige Karbonatflecken, die im Bereich von Sickerwässern zu braunen Fe-Mn-Oxidhydraten verwittert sind (Pache, 1998).

Lahrer Sandstein Typ II (ohne Flecken)

Mittelkörniger, rötlicher Sandstein, der keine Schichtung erkennen lässt. Die Körnung ist etwas größer als bei dem Lahrer Sandstein Typ I. Auch fehlen ihm die bräunlichen Wadflecken, dagegen besitzt er größere Tonsteinklasten.



Wöblinsberger Sandstein (Bohrkern 1)



Almendsberger Sandstein (Bohrkern 2)



Heimbacher Sandstein (Bohrkern 3)



Heimbacher Sandstein (Bohrkern 4)



Lahrer Typ I (mit Flecken)



Lahrer Typ II (ohne Flecken)

Nachfolgend werden die mikroskopischen Untersuchungen aufgeführt. In den dazugehörigen Tabellen der Blätter 1 – 8 sind auch die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen und der Gesamtporosität eingeflossen.

Die bereits makroskopisch festgestellten Unterschiede in den Korngrößen spiegeln sich auch im mikroskopischen Bereich wieder. Während der *Almendsberger Sandstein* eine durchschnittliche Korngröße von 0,12mm (Hofmaterial Ø 0,17mm) aufweist (Blatt 1 und 2), besitzt der *Wölblinsberger Sandstein* eine durchschnittliche Korngröße von 0,25mm (Blatt 3).

Beim *Heimbacher Sandstein* variiert die durchschnittliche Korngröße zwischen 0,32 mm (Hofmaterial) und 0,36mm bis 0,46mm (Objektmaterial) (Blatt 4 bis 6). Die relativ hohen Schwankungsbreiten werden dadurch erklärt, dass die Schichtung im Heimbacher Sandstein durch einen Korngrößenwechsel mm- bis cm-Bereich hervorgerufen wird. Dadurch wurden auch bei den Objektproben (Bohrkern 3 und 4), die ca. 30cm voneinander entfernt liegen und aus demselben Maßwerkstück stammen, stark schwankende Korngrößen gemessen.

Die Lahrer Sandsteine besitzen eine durchschnittliche Korngröße von 0,25mm bei Typ I (mit Flecken) und von 0,37mm bei Typ II (ohne Flecken) (Blatt 7 und 8).

Mit Hilfe der Mikroskopie und Röntgendiffraktometrie konnten folgende Zusammensetzungen und Gefügemerkmale in den Buntsandsteinproben festgestellt werden:

Tabelle 3: mineralogische Zusammensetzung

	Hauptkomponente	Nebenkompente	Bindemittel	Gefüge
Wölblinsberger Sandstein	Quarz	Mikroclin Kaolinit Muscovit Hämatit	Wenig Ton, partiell limonitisch, Quarzkörner mit Anwachssäumen	Schichtung durch eingeregelt Muscovitplättchen
Almendsberger Sandstein (Objektmaterial)	Quarz Mikroclin	Albit Muscovit Hämatit	Tonig bis kaolinitisch, wenig limonitisch	Schichtung durch eingeregelt Muscovitplättchen
Almendsberger Sandstein (Hofmaterial)	Quarz Mikroclin Kaolinit	Calcit Illit/Muscovit Hämatit	Limonitisch bis tonig, partiell kieselig	Schichtung durch eingeregelt Muscovitplättchen
Heimbacher Sandstein (Objektmaterial)	Quarz	Mikroclin Kaolinit Muscovit Hämatit (wenig)	Wenig Ton, partiell limonitisch Korn-Korn-Kontakte	Schichtung durch Korngrößenunterschiede
Heimbacher Sandstein (Hofmaterial)	Quarz	Mikroclin Kaolinit Muscovit Hämatit (wenig)	Tonig bis kaolinitisch Quarzanwachssäume	Schichtung durch Korngrößenunterschiede
Lahrer Sandstein Typ I	Quarz Mikroclin	Muscovit Hämatit (wenig)	Quarz mit Anwachssäumen	Starke Schichtung durch Tonlagen
Lahrer Sandstein Typ II	Quarz	Mikroclin Illit/Montmorillonit Hämatit (wenig)	Quarz mit Anwachssäumen	Keine Schichtung erkennbar

Joch 14 (innen) Ost; Schnewlinkapelle



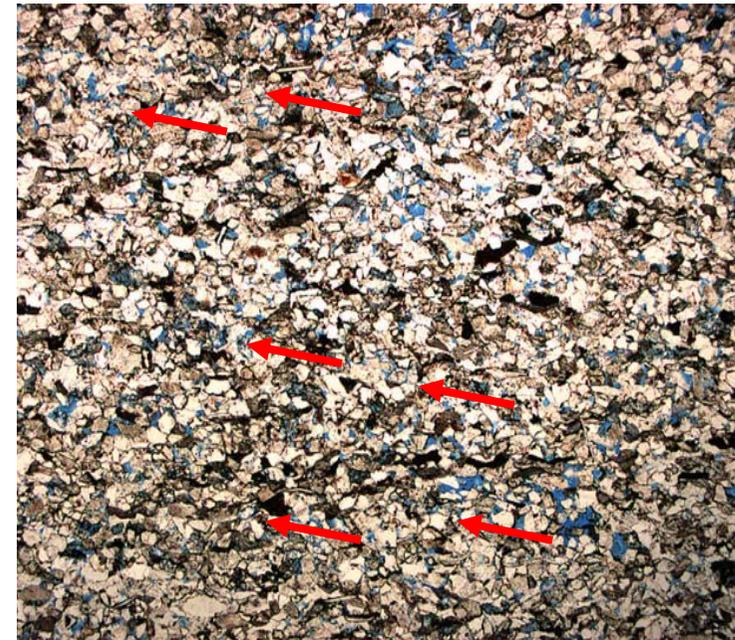
1mm

Wölblinsberger Sandstein (Bohrkern 1): Porenraum blau angefärbt, normal polarisiertes Licht. Die Bildoberkante zeigt die Probenaußenseite mit einer Schmutzkruste (mit Gipsaggregaten)

Gesamtporosität	18,5 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	1285mD

Mineralgehalt	Bindemittel	Korngröße:
Quarz Mikroclin, Muscovit Kaolinit, Hämatit	Wenig Ton, partiell limonitisch Quarzkörner mit Anwachssäumen	Min 0,10m Max 0,52mm Ø 0,25mm
	Gefüge: keine Schichtung sichtbar Höherer Anteil an fleckenartig verteiltem Limonit; Gipsaggregate	

Joch 16 (innen) Ost; zweite Kaiserkapelle



1mm

Almendsberger Sandstein (Bohrkern 2): Porenraum blau angefärbt, normal polarisiertes Licht. Bildoberkante entspricht Probenaußenseite.

Gesamtporosität	9,0 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	Zu wenig Material

Mineralgehalt	Bindemittel	Korngröße:
Quarz	tonig bis kaolinitisch	Min 0,07mm
Muscovit	wenig limonitisch	Max 0,20mm
Mikroklin, Albit	Gefüge: durch eingeregelt Glimmerminerale (Muscovit) hervorgerufene Schichtung (siehe Pfeile)	Ø 0,12mm
Hämatit		

Joch 11 (innen) Nord; nördlicher Choreingang Schöpfungsportal



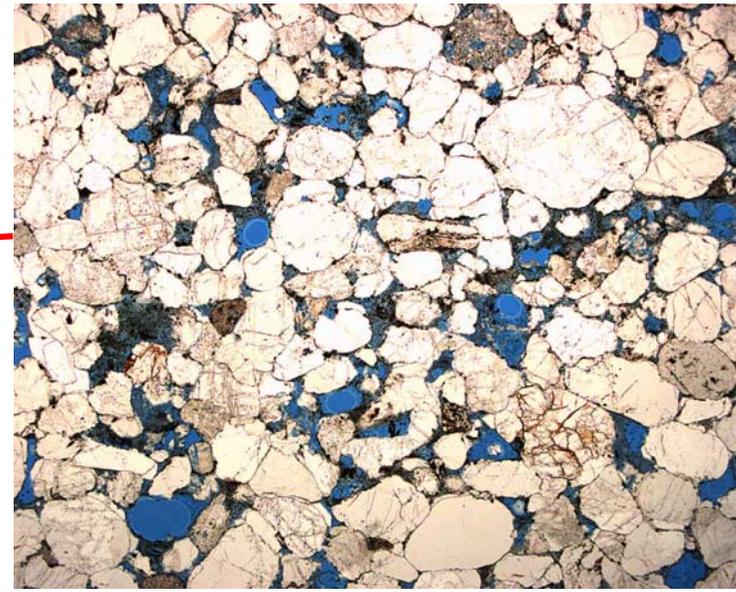
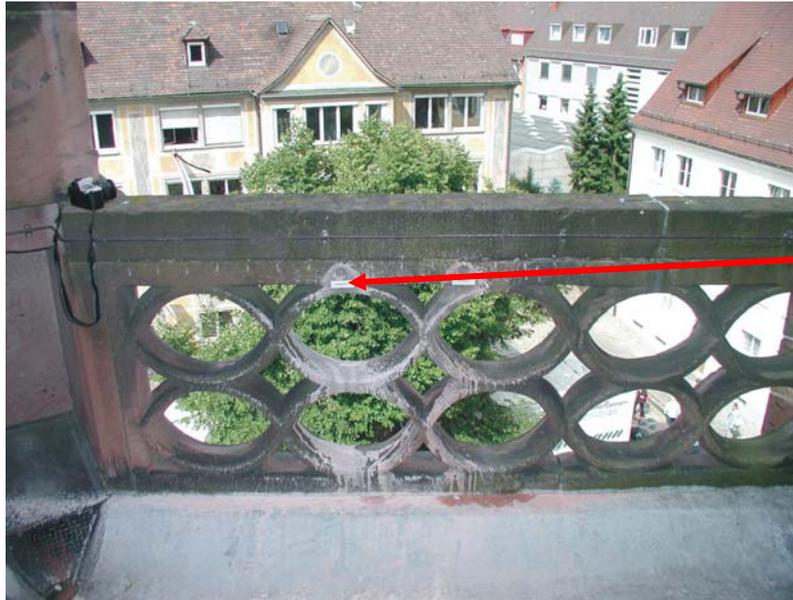
1mm

Heimbacher Sandstein (Bohrkern 3): Porenraum blau angefärbt, normal polarisiertes Licht. Das Gefüge ist zur Probenaußenseite (= obere Bildkante) hin aufgelockert.

Gesamtporosität	14,2 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	176mD

Mineralgehalt	Bindemittel	Korngröße:
Quarz	wenig Ton, partiell limonitisch	Min 0,08mm
Mikroclin	Korn-Korn-Kontakte	Max 0,96mm
Hämatit	Gefüge: Schichtung durch Korngrößenunterschiede	Ø 0,36mm
Kaolinit	lockeres Gefüge	

Joch 11 (innen) Nord; nördlicher Choreingang Schöpfungsportal



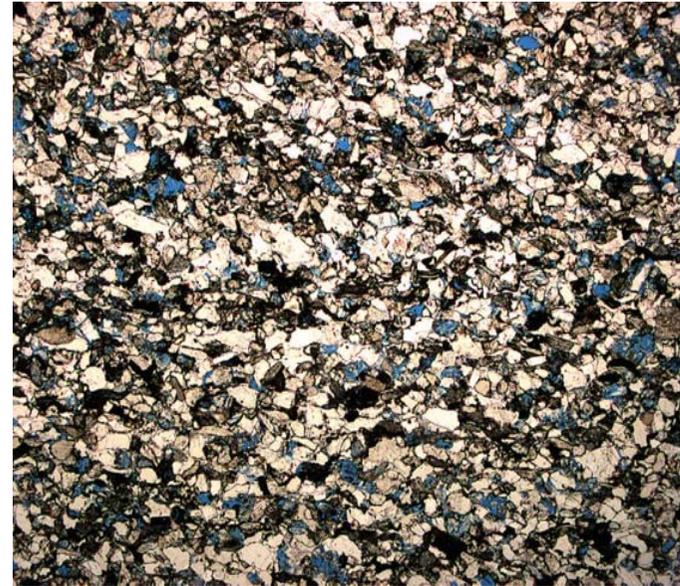
1mm

Heimbacher Sandstein (Bohrkern 4): Porenraum blau angefärbt, normal polarisiertes Licht. Aufgelockertes Gefüge.

Gesamtporosität	13,0 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	32 mD

Mineralgehalt	Bindemittel	Korngröße:
Quarz	Wenig Ton, partiell limonitisch	Min 0,20m
Mikroclin, Muscovit	Korn-Korn-Kontakte	Max 0,90mm
Hämatit	Gefüge:	Ø 0,46mm
Kaolinit	lockeres Gefüge	

Almendsberger Sandstein, Hofmaterial



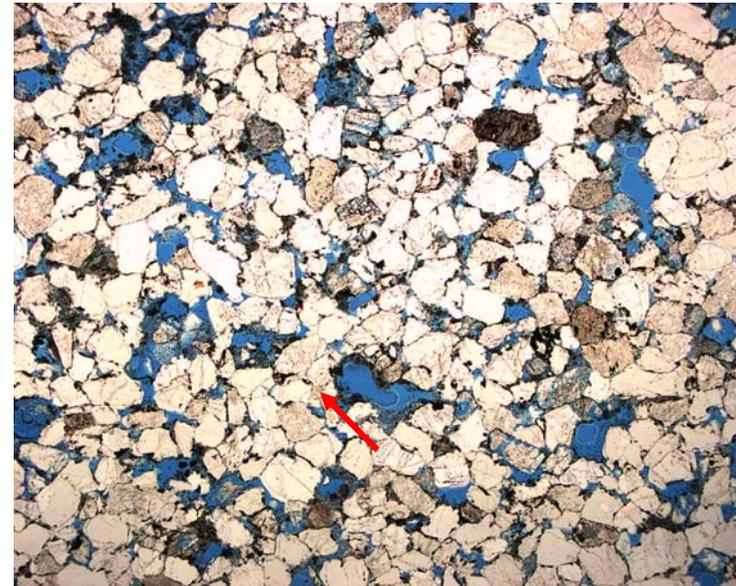
1mm

Gesamtporosität	7 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	Bohrkern 1: 183 mD
	Bohrkern 2: 24mD
	Bohrkern 3: 76mD

Almendsberger Sandstein: Porenraum blau angefärbt, normal polarisiertes Licht. Probenaußenseite = obere Bildkante. Material zeigt durch eingeregelte Glimmerminerale eine deutliche Schichtung.

Mineralgehalt	Bindemittel	Korngröße:
Quarz Mikroclin, Illit Kaolinit, Calcit Hämatit	limonitisch bis tonig, partiell kieselig	Min 0,04m
	Gefüge: eingeregelte Glimmerminerale Gips in den Hohlräumen	Max 0,54mm
		Ø 0,17mm

Heimbacher Sandstein (Hofmaterial)



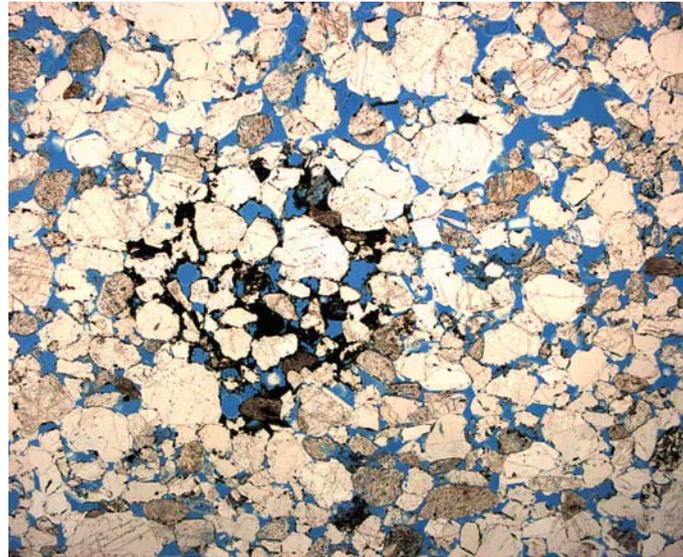
1mm

Heimbacher Sandstein: Porenraum blau angefärbt, normal polarisiertes Licht. Gipsaggregate im Porenraum (siehe Pfeil).

Gesamtporosität	20,5 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	Bohrkern 1: 130mD Bohrkern2: 79mD

Mineralgehalt	Bindemittel	Korngröße:	
Quarz	tonig bis kalonitisch	Min	0,12m
Mikroclin, Muscovit	Quarzanwachssäume	Max	0,54mm
Hämatit	Gefüge:	Ø	0,32mm
Kaolinit	Gipsaggregate		

Lahrer Sandstein Typ I (mit Flecken)



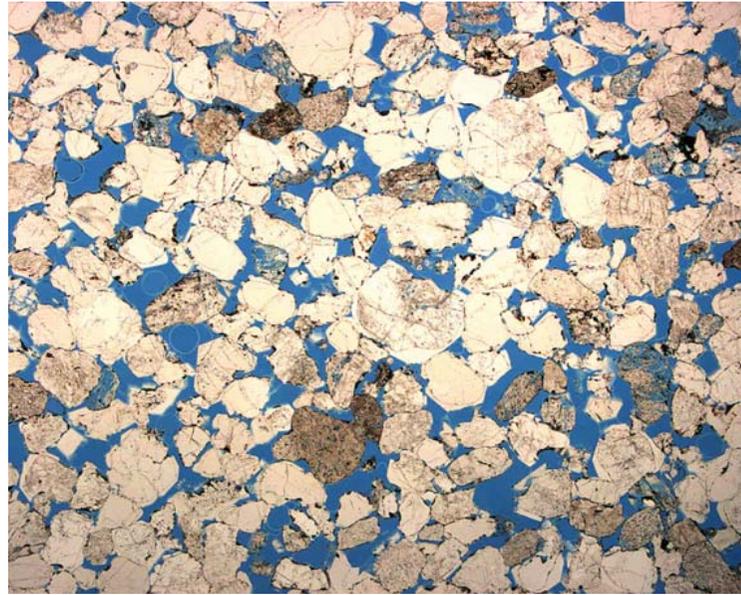
1mm

Gesamtporosität	18,5 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	917 1048 1601

Lahrer Sandstein Typ I: Porenraum blau angefärbt, normal polarisiertes Licht. Poröses Gefüge mit fleckenartigen Ansammlungen (Wadflecken).

Mineralgehalt	Bindemittel	Korngröße:	
Quarz	Quarz mit Anwachssäumen	Min	0,08mm
Mikroclin	Korn-Korn-Kontakte	Max	0,78mm
Muscovit	Gefüge: keine Schichtung sichtbar porös	Ø	0,25mm
Hämatit			

Lahrer Sandstein Typ II (ohne Flecken)



1mm

Gesamtporosität	19,0 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	Wegen zu hoher Permeabilität nicht messbar

Lahrer Typ II: Porenraum blau angefärbt, normal polarisiertes Licht. Keine Schichtung erkennbar, Gefüge porös.

Mineralgehalt	Bindemittel	Korngröße:	
Quarz	Quarz mit Anwachssäumen	Min	0,18mm
Mikroclin	Korn-Korn-Kontakte	Max	0,62mm
Hämatit	Gefüge: keine Schichtung sichtbar porös	Ø	0,37mm
Illit/Montmorillonit			

Stoffliche Untersuchungen

Die Gesamtporosität wurde zunächst über die Durchlichtmikroskopie bestimmt. Parallel hierzu wurden Messungen mit Hilfe der Quecksilberhochdruckporosimetrie vorgenommen. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle aufgelistet.

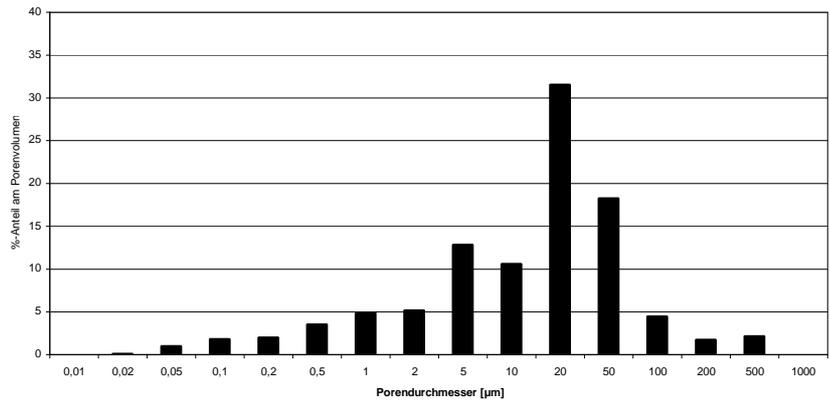
Tabelle 4: Ergebnisse der Porositätsmessungen

Probe	Mikroskopie [Vol.-%]	Hg-Porosimetrie [Vol.-%]
Wölblinsberger	18,4	24,0
Almendsberger (Objektprobe)	5,4	13,5
Almendsberger (Hofmaterial)	7,0	18,6
Heimbacher (Objektprobe 1)	13,3	14,2
Heimbacher (Objektprobe 2)	13,0	13,7
Heimbacher (Hofmaterial)	20,5	19,6
Lahrer Typ I (mit Flecken)	17,8	18,5
Lahrer Typ II (ohne Flecken)	20,1	19,0

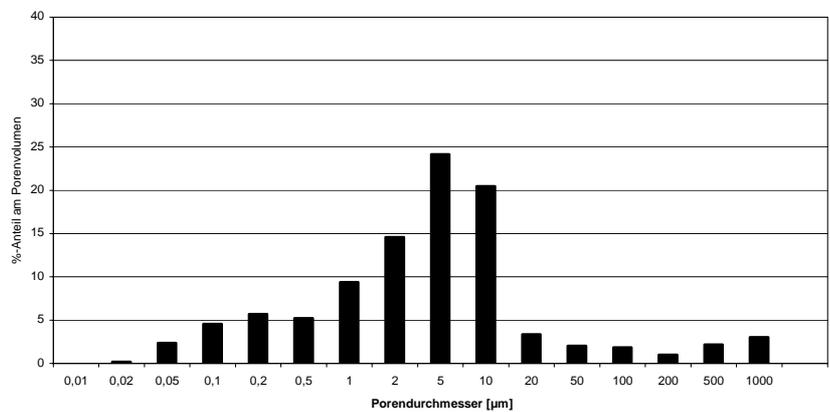
Wie die Ergebnisse zeigen stimmen die Messungen zunächst weitestgehend überein. Auffällig sind jedoch beim Wölblinsberger und noch stärker beim Almendsberger Sandstein (Objektprobe und Hofmaterial) die über die Mikroskopie ermittelten, niedrigeren Messwerte. Dies wird dadurch erklärt, dass mit Hilfe der beiden Untersuchungsmethoden unterschiedliche Porendurchmesser erfasst werden. Während die Durchlichtmikroskopie Porengrößen zwischen ca. 25µm und 25mm erfasst, werden mit Hilfe der Quecksilberhochdruckporosimetrie 1nm und max. 1mm gemessen (Grimm 1990). Da das Porenradialmaximum bei den Almendsberger Sandsteinproben bei 5µm liegt, wurden mikroskopisch wesentlich kleinere Werte gemessen.

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Porendurchmesserverteilung in % für ausgewählte Porendurchmesserbereiche aufgeführt. .

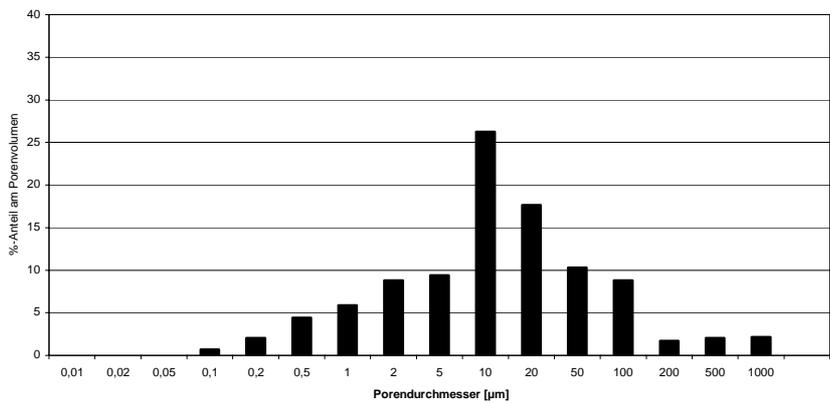
Wöblinsberger (BK1)
Gesamtporosität 24,0 Vol.-%



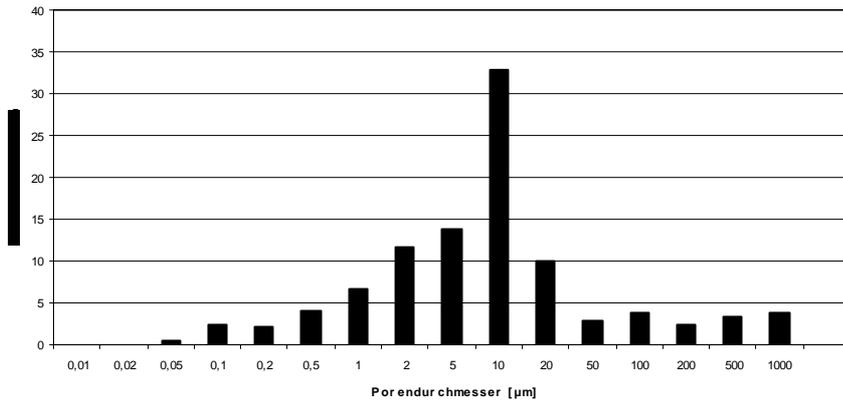
Almendsberger (BK2)
Gesamtporosität 13,5 Vol.-%



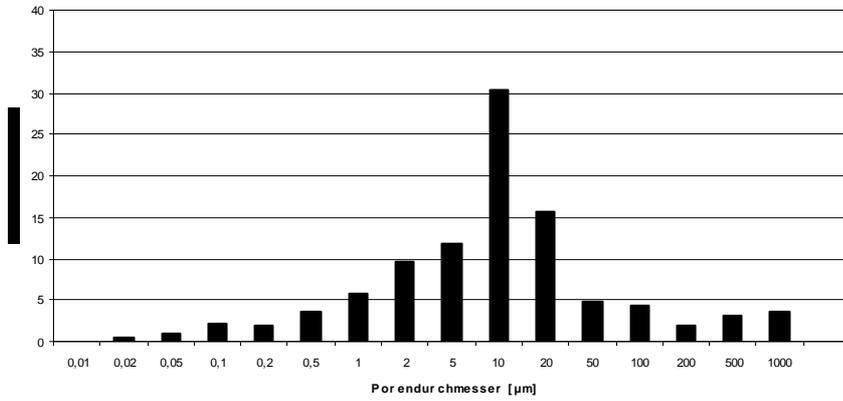
Almendsberger (Hofmaterial)
Gesamtporosität 18,6 Vol.-%



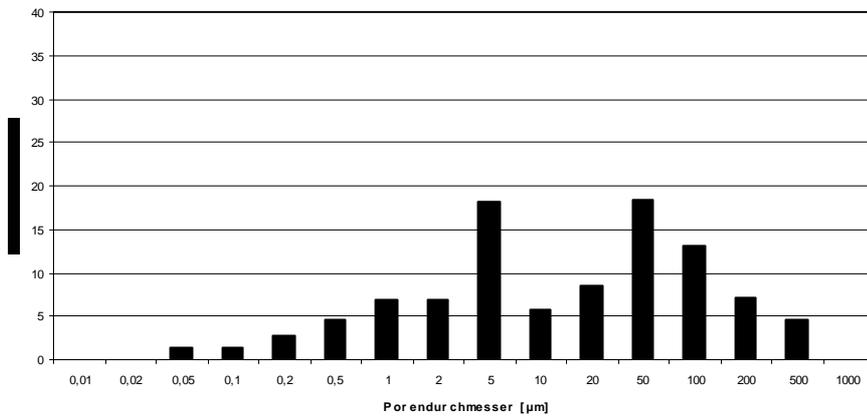
Heimbacher (BK4)
Gesamtporosität 13,7 Vol.-%



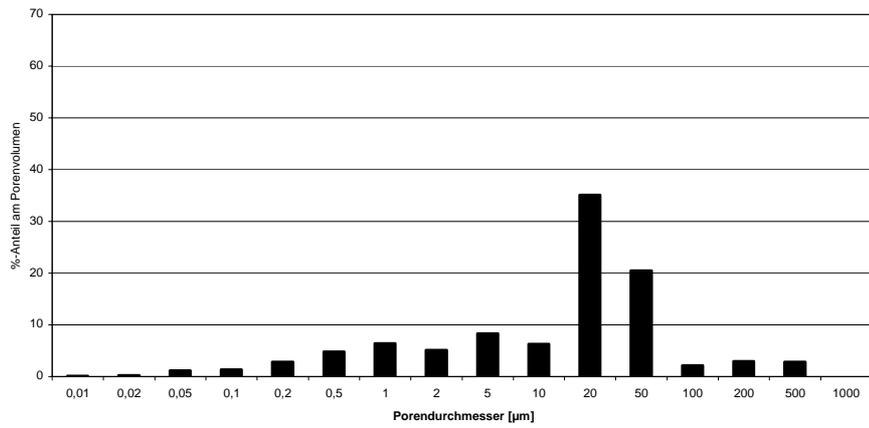
Heimbacher (BK3)
Gesamtporosität 14,2 Vol.-%



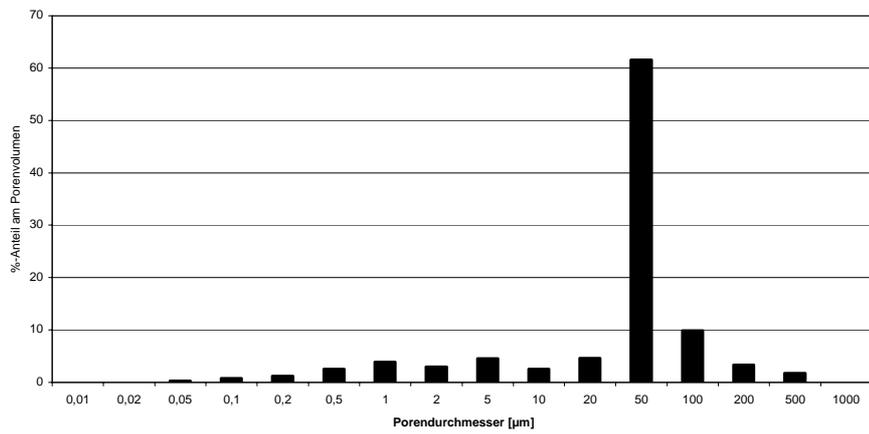
Heimbacher (Hofmaterial)
Gesamtporosität 19,6 Vol.-%



Lahrer Typ I (mit Flecken)
Gesamtporosität 18,5 Vol.-%



Lahrer Typ II (ohne Flecken)
Gesamtporosität 19,0 Vol.-%



An den Bohrkernabschnitten wurden von der Firma Jbach Steinkonservierung, Bamberg die Permeabilitäten (Luftmessung) mit Hilfe der Hasslerzelle gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die Messungen wurden senkrecht zur Schichtung vorgenommen. Nur bei dem Lahrer Sandstein Typ II war keine Schichtung zu erkennen.

Tabelle 5: Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen

Probe	Permeabilitäten [mD]
Wölblinsberger	1265
Almendsberger (Objektprobe)	26
Almendsberger (Hofmaterial)	183 24 76
Heimbacher (Objektprobe 1)	176
Heimbacher (Objektprobe 2)	32
Heimbacher (Hofmaterial)	130 79
Lahrer Typ I (mit Flecken)	917 1048 1601
Lahrer Typ II (ohne Flecken)	wegen zu hoher Permeabilitäten nicht messbar!

Von den Objektproben zeigte der Wölblinsberger Sandstein mit 1265mD den höchsten Wert. Deutlich niedrigere Werte besitzen der Almendsberger (24 bis 183 mD) und Heimbacher Sandstein (32 bis 176 mD); sie sind jedoch beide in eine Gruppe einzustufen. Die höchsten Werte wurden bei dem Lahrer Sandstein Typ I gemessen, wo die Werte zwischen 917 und 1601mD liegen. Bei dem Lahrer Sandstein Typ II waren die Werte wegen zu hoher Permeabilitäten nicht messbar.

3.1.2.2 Bestimmung ausgewählter physikalischer Kennwerte

An den Bohrkernabschnitten für die Permeabilitätsmessungen wurden auch die kapillare Wasseraufnahme in Anlehnung an EN 1925 (DIN 52 617) gemessen. Dabei wird die Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit gemessen und anschließend der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) berechnet.

Bei dem Lahrer Sandstein Typ II konnten aufgrund des größeren Probestücks zusätzlich Vergleichsmessungen an Würfeln vorgenommen werden.

In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse sowie die Bewertung der Messungen aufgeführt. Die Bewertung in w-Wert-Klassen wurde folgendermaßen nach Sneathlage (1997) vorgenommen:

- gering saugend: $w < 0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
- mittel saugend: $w = 0,5\text{-}3,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
- stark saugend: $> 3,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$

Tabelle 6: Ergebnisse der w-Wert Berechnung

Probe	Durchträngung nach [h]	w-Wert [$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$]	Bewertung [nach Sneathlage,1997]
Wölblinsberger	2	4,58	stark saugend
Almendsberger (Objektprobe)	24	0,40	gering saugend
Almendsberger (Hofmaterial)	4	2,43	mittel saugend
	4	2,31	mittel saugend
	4	2,72	mittel saugend
	6	1,93	mittel saugend
	5	3,51	mittel saugend
Heimbacher (Objektprobe 1)	24	0,78	mittel saugend
Heimbacher (Objektprobe 2)	24	0,52	mittel saugend
Heimbacher (Hofmaterial)	2	2,68	mittel saugend
	5	1,90	mittel saugend
	24	0,94	mittel saugend
Lahrer Typ I (mit Flecken)	4	2,00	mittel saugend
	24	0,91	mittel saugend
	3	2,90	mittel saugend
	21	0,93	mittel saugend
	5	2,02	mittel saugend
	4	2,37	mittel saugend
Lahrer Typ II (ohne Flecken)	30	8,18	stark saugend
	30	8,09	stark saugend
	30	7,90	stark saugend
	8	14,45	stark saugend
	9	13,03	stark saugend
	30	8,19 (W)	stark saugend
	30	7,87 (W)	stark saugend
	30	8,07 (W)	stark saugend

(W) = Würfel

Von beiden Hofmaterialien und den beiden Lahrer Sandsteinen war genügend Probenmaterial vorhanden, um die hygrische Dehnung messen zu können. Der Almendsberger Sandstein hat eine

hygrische Dehnung von \varnothing 0,51mm/m und der Heimbacher Sandstein von \varnothing 0,10mm/m. Der Lahrer Sandstein Typ I hat eine hygrische Dehnung von 0,02-0,08mm/m, bei dem Lahrer Typ II war keine hygrische Dehnung messbar.

3.1.2.3 Bestimmung der wasserlöslichen Salze

An ausgewählten Maßwerksbrüstungen wurden Bohrmehlproben im Tiefenprofil entnommen (von innen nach außen), um so die Belastung der Natursteine durch bauschädlichen Salze ermitteln zu können. Dies ist im Hinblick auf geplante Restaurierungsmaßnahmen wichtig.

Tabelle 7: Bestimmung der bauschädlichen Salze

Schnewlinkapelle, Joch 14 (innen) Ost; Wölblinsberger Sandstein				
Probe	Entnahmetiefe [cm]	Sulfat [%]	Nitrat [%]	Chlorid [%]
1-1	0 – 1	0,007	0,001	0,006
1-2	1 - 2,5	0,007	0,001	0,006
1-3	2,5 – 3,5	0,003	0,001	0,003
1-4	3,5 - 5	0,060	0,001	0,006
1-5	5 – 6	0,007	0,001	0,006
1-6 (feucht)	6 – 7	0,008	0,001	0,007
1-7	7 – 8	0,011	0,002	0,008
1-8	8 – 9	0,009	0,001	0,007
1-9 (feucht)	9 - 10	0,007	0,001	0,006
Zweite Kaiserkapelle, Joch 16 (innen) Ost; Almendsberger Sandstein				
Probe	Entnahmetiefe [cm]	Sulfat [%]	Nitrat [%]	Chlorid [%]
2-1	0 – 1*	0,177	0,100	0,034
2-2	1 - 2	0,084	0,131	0,042
2-3	2 – 3	0,042	0,165	0,051
2-4	3 – 4	0,037	0,143	0,044
2-5	4 – 5	0,068	0,122	0,042
2-6	5 – 6	0,069	0,121	0,036
2-7	6 – 7	0,073	0,101	0,030
2-8	7 – 8	0,099	0,091	0,031
2-9	8 – 9	0,124	0,077	0,029
2-10	9 - 10	0,085	0,041	0,021

Nördlicher Choreingang Schöpfungsportal, Joch 11 (innen) Nord, Heimbacher Sandstein				
Probe	Entnahmetiefe [cm]	Sulfat [%]	Nitrat [%]	Chlorid [%]
3-1	0 – 1	0,010	0,009	0,005
3-2 (Tonlinse)	1 - 3	0,011	0,006	0,006
3-3	3 – 3,3	0,122	0,019	0,054
3-4	3,3 – 4	0,010	0,004	0,008
3-5	4 – 5	0,002	0,004	0,003
3-6 (feucht)	5 – 6	0,003	0,002	0,003
3-7	6 – 7	0,002	0,002	0,003
3-8	7 – 8	0,003	0,002	0,003
3-9	8 – 9	0,002	0,002	0,003
3-10	9 - 10	0,002	0,002	0,003

* die ersten 10 cm sind bereits als Schale abgewittert

Zusätzlich wurde die Bestimmung auch in der äußersten Zone (ca. 5mm) der entnommenen Bohrkernproben vorgenommen.

Tabelle 8: Bestimmung der bauschädlichen Salze (Bohrkernproben)

Probe	Sulfat [%]	Nitrat [%]	Chlorid [%]
Wölblinsberger	0,024	0,001	0,004
Almendsberger (Objektprobe)	0,062	0,102	0,040
Almendsberger (Hofmaterial)	0,080	0,002	0,008
Heimbacher (Objektprobe 1)	0,003	0,002	0,006
Heimbacher (Objektprobe 2)	0,001	0,001	0,004
Heimbacher (Hofmaterial)	0,001	n.n.	0,004
Lahrer Typ I (mit Flecken)	0,033	n.n.	0,008
Lahrer Typ II (ohne Flecken)	0,022	n.n.	0,007

n.n. =nicht nachweisbar.

Nach der WTA-Norm 4-5-99/D sind die Sulfat- und Chloridanteile in allen Gesteinsproben in der Belastung als gering einzustufen.

Die Nitratanteile sind nur beim Joch 16 (Almendsberger Sandstein) bis in ca. 7cm Tiefe als mittlere Belastung einzuordnen. Hier könnte eventuell eine Entsalzung bei herkömmlicher Restaurierung notwendig sein. Alle anderen Nitratwert an den Brüstungen waren deutlich niedriger und damit vernachlässigbar.

3.1.2.4 Früher durchgeführte Untersuchungen

Literaturwerte aus verschiedenen Berichten, die von der Münsterbauhütte in Freiburg in Kopie zur Verfügung gestellt wurden und werden nachfolgend zusammenfassend aufgeführt.

I) Wisser (1994)

Material	Wasseraufnahmegrad (massebezogen) [M.-%]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Hygrische Dehnung [mm/m]
Almendsberger Sandstein	Ø 5,45 ¹⁾	Ø 51,0 ¹⁾	0,3 ¹⁾⁺²⁾
Lahr-Kuhbacher Sdst.	Ø 5,30 ¹⁾	Ø 80,2 ¹⁾	0,1 ¹⁾⁺²⁾

Anmerkung: Lahrer Sandstein nicht genauer definierbar ob Typ I oder II

¹⁾ Mittelwert aus 3 Messungen

²⁾ Probekörper: 4x4x12cm Kantenlänge

Material	Mineralische Zusammensetzung	Lichtmikroskopische Untersuchungen
Almendsberger Sandstein	<u>Hauptkomponenten:</u> Quarz, Tonminerale, Feldspat <u>Nebenbestandteile:</u> Calcit, Glimmer, Hämatit	Feinkörniges Gefüge (Korngröße: max. 0,2mm), Quarzkörner mit einzelnen Feldspatkristallen und unregelmäßig verteiltem Calcit und Glimmer. Tonmineralnester
Lahr-Kuhbacher Sdst.	<u>Hauptkomponenten:</u> Quarz, Feldspat <u>Nebenbestandteile:</u> Tonminerale, Glimmer, Hämatit	Relativ grobkörniges Gefüge (Korngröße max.= 0,4mm) mit gut verzahnten Quarzkörnern.

II) Müller-Sigmund, ALU Freiburg

Material	Petrografische Beschreibung	Mineralische Zusammensetzung
Lahr-Kuhbach Typ I	Stark gebänderter Sandstein mit ausgeprägter Schräg- und Kreuzschichtung, häufig mit mm-großen schwärzlichen Oxid-Hydroxid-Flecken und einzelnen eher bräunlich und diffus erscheinenden Flecken.	Quarz, gleichkörnig bis gut gerundet und Anwachs säumen, Chert; Alkali-Feldspat, Tonminerale Eisenoxid-hydrat, akzessorisch Turmalin
Lahr-Kuhbach Typ I	Undeutlich gelagerter Sandstein weitgehend frei von Oxid-Flecken mit einzelnen cm-großen Quarzklasten und größeren Tonsteinklasten	Wie oben

Material	Wasseraufnahme W_a [Gew.-%]	Rohdichte [g/cm³]
Lahr-Kuhbach Typ I	2,9	2,3
Lahr-Kuhbach Typ I	3,6	2,2

III) KÜRTEEN 2000

Material	Wasseraufnahme W_a [Gew.-%]	w-Wert (nach Karsten) [kg/m²h^{0,5}]	Porosität (Hg- Porosität) [Vol.-%]
Originalmaterial 1. Kaiserkapelle (Heimbacher Sdst.)	5,83	1,17 (senkrecht ss)	18,8
Austauschgestein 2. Kaiserkapelle (Almendsberger Sdst.)			
Varietät I (vergleichbar mit Heimbacher)	4,4	0,82 parallel ss 0,84 senkrecht ss	16,6
Varietät II (vergleichbar mit Almendsberger)	6,05	1,64 parallel ss 2,00 senkrecht ss	18,5

ss = Schichtung

3.1.2.5 Zusammenfassende Bewertung der Untersuchungen am Freiburger Münster

Wie die Schadensdokumentation und die Auswertetabelle 1 zeigen, weisen die stärksten Schäden die Brüstungselemente auf, die aus Almendsberger Sandstein gearbeitet sind. Es sind dies die Brüstungselemente von den Jochen 15 bis 18 Ost, Joch 8 und 9 Nord; bedingt auch Joch 12.

Aufgrund der Schadenskartierungen würden zunächst die Brüstungselemente der Joche 15 bis 18 für eine Restaurierung und Acrylharzvolltränkung in Frage kommen (siehe auch Kapitel 4).

Für die gemessenen Brüstungsbereiche geben sich folgende Schallgeschwindigkeiten für die einzelnen Buntsandsteinvarietäten:

Buntsandstein Varietät	Position	Schallgeschwindigkeit [m/s]
Wölblinsberger	Maßwerksbrüstung	1911 - 2029
	Maßwerk	1994 - 2514
Heimbacher	Maßwerksbrüstung	1985 - 2473
	Maßwerk	2196 - 2901
Heimbacher	Hofmaterial	2927 – 2949
Almendsberger	Maßwerk	2103 - 2250
Almendsberger	Hofmaterial	2518 - 2543
Lahrer Typ I	Hofmaterial	2588
Lahrer Typ II	Hofmaterial	2577 – 2713

Wie die Messungen zeigen, lassen sich die einzelnen Buntsandsteinvarietäten nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Der am stärksten geschädigte Almendsberger Sandstein zeigt in Abhängigkeit der Schadensarten folgende Schallgeschwindigkeiten:

Schaden	Schallgeschwindigkeit m/s
intakt (Maßwerk)	2103 - 2250
intakt (Kernmaterial)	2518 - 2543
absanden unter abgelöster Schale	1563 - 2003
Schuppenbildung	2069 - 2269

Betrachtet man die Werte, so ist zwischen den Schadensarten eine Tendenz der Abnahme in den Schallgeschwindigkeiten zu erkennen. Daher wäre es sinnvoll nach der Instandsetzung (z.B. Acrylharzvolltränkung) wieder Ultraschallaufzeiten zu messen, um einen relativen Vergleich zu bekommen.

Die Bestimmung der wasserlöslichen Salzanteile in den Proben ergab für die Sulfat- und Chloridanteile eine geringe Belastung. Die Nitratbelastung ist nur bei Joch 16 (Almendsberger Sandstein) bis in eine Bauteiltiefe von ca. 7cm eine mittlere Belastung, die bei einer konventionellen Restaurierung eventuell beachtet werden muss.

Die anderen Probenahmebereiche zeigen eine geringe Belastung, die zu vernachlässigen ist.

Die außerdem gemessenen Materialkennwerte wurden in der Tabelle 9 zusammengestellt. Da die für die Instandsetzung zunächst in Frage kommenden Brüstungen aus Almendsberger Sandsteins sind, wird dieser in der Tabelle und in der Auswertung vorrangig bewertet.

Tabelle 9: Materialkennwerte Freiburger Münster

<i>Probe</i>	<i>Farbe/Bezeichnung/ Gefügemerkmal</i>	<i>Korngröße</i>	<i>Gesamtporosität Hg-Porosimetrie [Vol.-%]</i>	<i>Permeabilität [mD]</i>	<i>w-Wert [kg/m²h^{0,5}]</i>	<i>Bewertung [nach Sneathlage,1997]</i>	<i>Wa [Gew.-%]</i>	<i>hygrische Dehnung [mm/m]</i>
Wölblinsberger	roter, mittelkörniger Sandstein, mit „rostbraunen“, bis 1cm großen Flecken. Schichtung durch eingeregelter Glimmer	Ø 0,25mm	24,0	1265	4,58	stark saugend	15,2	n.b.
Almendsberger (Objektprobe)	Feinkörnig, dunkel-roter Sandstein, partiell mit kleinen rostroten Flecken. Schichtung durch eingeregelter Glimmer	Ø 0,12mm	13,5	26	0,40	gering saugend	9,5	n.b.
Almendsberger (Hofmaterial)	Feinkörnig, dunkel-roter Sandstein, partiell kleine rostrote Flecken Schichtung durch eingeregelter Glimmer	Ø 0,17mm	18,6	183 24 76	2,43 2,31 2,72 1,93 3,51	mittel saugend mittel saugend mittel saugend mittel saugend mittel saugend	7,8 10,4 10,9	0,51
Heimbacher (Objektprobe)	Mittelkörnig, hellrot. Schichtung durch Korngrößenunterschiede, Tonlinsen	Ø 0,36- 0,46mm	14,2 13,7	176 32	0,72 0,52	mittel saugend mittel saugend	10,5 8,6	n.b.
Heimbacher (Hofmaterial)	Mittelkörnig, hellrot Schichtung durch Korngrößenunterschiede, Tonlinsen.	Ø 0,32mm	19,6	130 79	2,68 1,90 0,94	mittel saugend mittel saugend mittel saugend	10,7 10,3	0,10

(n. b. = nicht bestimmt)

Fortsetzung von Tabelle 9:

Probe	Farbe/Bezeichnung/ Gefügemerkmal	Korngröße	Gesamtporosität Hg-Porosimetrie [Vol.-%]	Permeabilität [mD]	w-Wert [kg/m ² h ^{0,5}]	Bewertung [nach Snethlage,1997]	Wa [Gew.-%]	hygrische Dehnung [mm/m]
Lahrer Typ I (mit Flecken)	Mittelkörnig, durch dunkelrote Tonlagen stark geschichtet, rötlicher Sandstein mit auffälligen bräunlichen Flecken („Wadflecken“). Stark geschichtet	Ø 0,25mm	18,5	917 1048 1601	2,00	mittel saugend	10,3	0,02
					0,91	mittel saugend	10,3	0,08
					2,90	mittel saugend	10,8	0,07
					0,93	mittel saugend		
					2,02	mittel saugend		
					2,37	mittel saugend		
Lahrer Typ II (ohne Flecken)	Mittelkörniger, rötlicher Sandstein. Ohne Schichtung	Ø 0,37mm	19,0	Wegen zu hoher Permeabilitäte n nicht messbar!	8,18	stark saugend	10,9	nicht messbar
					8,09	stark saugend	10,9	
					7,90	stark saugend	9,1 (W)	
					14,45	stark saugend	9,2 (W)	
					13,03	stark saugend	9,2 (W)	
					8,19 (W)	stark saugend	10,2 (W)	
					7,87 (W)	stark saugend	10,3 (W)	
					8,07 (W)	stark saugend		

Beim Almendsberger Sandstein handelt es sich um einen feinkörnigen, dunkelroten Sandstein, der partiell rostrote Flecken aufweist. Seine Korngröße beträgt \varnothing 0,12 bis 0,17mm. Das Gefüge ist durch eingeregelter Glimmerminerale geschichtet.

Die aufgelagerte Schmutzkruste der Objektprobe weist mikroskopisch Gipsaggregate auf, die sich bei der Bestimmung der wasserlöslichen Anteile noch als gering bewerten lässt.

Im Vergleich zu den anderen Buntsandsteinvarietäten hat der Almendsberger Sandstein mit 0,51mm/m die höchste hygrische Dehnung.

Der Almendsberger Sandstein hat eine Gesamtporosität von 13,5 (Objektprobe) bis 18,6 Vol.-% (Hofmaterial). Erst die dazugehörige Darstellung der Porendurchmesser gegenüber dem %-Anteil am Porenvolumen (Diagramm x und y) lässt deutliche Verschiebungen beim Hofmaterial zu höheren Porendurchmessern erkennen, die eine höhere Permeabilität begünstigen. Gleichzeitig zeigen aber auch die Permeabilitäten, dass es innerhalb des Materials Bereiche mit etwas geringerer Bindung (geringe Tonanteile) gibt, die ebenfalls zu leicht erhöhten Werten beitragen. Insgesamt aber ist der Almendsberger Sandstein als ein gut durchlässiges Material zu bezeichnen.

Bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (w-Wert) in Anlehnung an die DIN 52 617 ergeben sich beim Almendsberger Sandstein Werte zwischen 1,9 bis 3,5 kg/m² h^{0,5}. Hiermit wird das Material als „mittel saugend“ eingestuft. Der bei der Objektprobe geringe w-Wert von 0,4 kg/m² h^{0,5} ist vermutlich auf höhere Tonanteile zurückzuführen.

Die Daten der anderen Buntsandsteinvarietäten sollen als Grundlage für spätere Instandsetzungsmaßnahmen dienen.

4 Bewertung zur Instandsetzung aufgrund der Schadensaufnahme

Aufgrund des äußeren Zustandes aller Brüstungselemente und der Kartierungsergebnisse wurden die Möglichkeiten zur Instandsetzung aufgeführt. Diese sollen auch eine erste Entscheidungsgrundlage dafür sein, welche der untersuchten Brüstungselemente für die Acrylharzvolltränkung in Frage kommen. Dabei erweitert sich die Liste der Brüstungselemente, die für eine AVT-Tränkung in Frage kommen, wie aus der Schadenskartierung resultierte.

D.h. aus der Schadenskartierung würden die Brüstungselemente 15 bis 18 Ost, 8 und 9 Nord und 12 bedingt geeignet sein. Nach augenscheinlicher Durchsicht Vorort würden zusätzlich noch die Brüstungselemente 11 Süd, 13 bis 18 Ost und 8 und 11 Nord in Frage kommen.

Von der Münsterbauhütte Freiburg wurden die drei Brüstungselemente der zweiten Kaiserkapelle (Joch 16 Ost) für die Acrylharzvolltränkung frei gegeben.

Tabelle 10: Bewertung zur Instandsetzung

Bezeichnung	Joch	Rechte Seite (1)		Linke Seite (2)	
		Linkes Maßwerk	Rechtes Maßwerk	linkes Maßwerk	rechtes
Südlicher Choreingang (Marienportal)	10 Süd AUSSEN				
	10 Süd INNEN	Grenzfall für AVT / Restaurierung		Restaurierung	
Stürzelkapelle	11 Süd AUSSEN				
	11 Süd INNEN	Restaurierung		AVT	Re
Universitätskapelle	12 Süd AUSSEN				
	12 Süd INNEN	Restaurierung		Restaurierung	

Bezeichnung	Joch	Rechte Seite (1)		Linke Seite (2)	
		Linkes Maßwerk	Rechtes Maßwerk	linkes Maßwerk	rechtes
Lichtenfels-Krozingen Kapelle	13 Ost AUSSEN				
	13 Ost INNEN	Grenzfall für AVT	Restaurierung	Restaurierung	Gren
Schnewlinkapelle	14 Ost AUSSEN				
	14 Ost INNEN		Restaurierung	AVT	Restaur
Erste Kaiserkapelle	15 Ost AUSSEN				
	15 Ost INNEN	Grenzfall für AVT	[Rest. Kürten 2001]	Restaurierung	Restaur

Bezeichnung	Joch	Rechte Seite (1)			Linke Seite (2)	
		Linkes	mittleres	Rechtes	linkes	mittleres
Zweite Kaiserkapelle	16 Ost AUSSEN					
	16 Ost INNEN	AVT oder neu			Restaurierung AV	
Villinger oder Böcklinkapelle	17 Ost AUSSEN					
	17 Ost INNEN	Grenzfall für AVT Restaurierung			AVT	
Sotherkapelle	18 Ost AUSSEN					
	18 Ost INNEN	AVT			Restaurierung	

Fortsetzung Tabelle 10:

Bezeichnung	Joch	Rechte Seite (1)		Linke Seite (2)	
		Linkes Maßwerk	rechtes Maßwerk	linkes Maßwerk	rechtes
Locherer Kapelle	12 Nord AUSSEN				
	12 Nord INNEN	Restaurierung			
Nördl.Choreingang Schöpfungsportal	11 Nord AUSSEN				
	11 Nord INNEN	AVT		Restaurierung; Grenzfall	
Blumeneggkapelle	10 Nord AUSSEN				
	10 Nord INNEN	Restaurierung		Restaurierung	
Heimhoferkapelle	9 Nord AUSSEN				
	9 Nord INNEN		neu oder AVT		Restaurierung
Alexanderkapelle	8 Nord AUSSEN				
	8 Nord INNEN	Restaurierung oder neu			

5 Material- und Schadensaufnahme an den Brüstungselementen am Ulmer Münster

5.1 Die Brüstungselemente am Ulmer Münster. Einführung in die Baugeschichte, Beschreibung der Schadenssituation und früherer Restaurierungsmaßnahmen vor dem Projektbeginn

Das Münster zu Ulm

Das Ulmer Münster ist ein Bauwerk der Spätgotik. Ungewöhnlich sind die Dimensionen des Bauwerks mit 140m Länge, 52m breite, 41m Höhe im Mittelschiff und einem Hauptturm mit 161,53m Höhe. Dieses Bauprogramm ist auf dem Anspruch begründet, dass beim Gottesdienst alle Bürger der Stadt in der Kathedrale Platz finden (Rommel, 1999)

Aus dem 7. Jahrhundert ist eine „Sammelkirche“ für vermutlich fünf verschiedenen Ansiedlungen bekannt [1]. Diese Kirche „über Veld“, das heißt rund 1km vor den Mauern der Stadt war in unsicheren Zeiten schwer zu erreichen. Zudem wollten die Ulmer Bürger die Bedeutung ihrer Stadt auch durch eine bedeutende Kirche zum Ausdruck bringen. Daher wurde 1377 der Grundstein zum Neubau einer Kirche in der Stadt gelegt. 1381 beginnt der Baumeister Heinrich Parler mit dem Bau am Langhaus; es wird eine dreischiffige Hallenkirche gebaut. Zwei Portale der alten Pfarrkirche über Veld werden abgebrochen und im Münster neu verwendet. Mit dem neuen Baumeister Michael Parler wird er Plan geändert, es wird eine Basilika errichtet, die ein erhöhtes Mittelschiff und eine Obergadenzone aufweist. 1392 hat Ulrich von Ensingen die Vision eines 156m hohen Turmes. 1405 wurde das Münster eingeweiht. Mit den Gewölben wurde jedoch noch nicht begonnen, die Kirche hat ein Notdach. 1449 wird das Chorgewölbe vollendet. 1452 ist die Einwölbung des Nordschiffs vollendet. 1477 bis 1494 wird mit dem Bau des Westturm begonnen. 1492 treten aber schon erste Schäden auf. Sicherungsarbeiten am Turm und der Abriß der Seitengewölbe erfolgt, da die Fundamente und Außenmauern nachgegeben haben. 1543 kommen die Bauarbeiten zum Stillstand. 1844 wird eine neue Bauhütte gegründet. Sie beginnt mit den Sicherungsarbeiten an den Fialtürmen und Strebebögen. Die Osttürme werden ausgebaut.

1885 bis 1890 wird der Hauptturm fertig gebaut. Er ist mit 161,53m der höchste Kirchturm der Welt. 1890 ist der Bau mit dem Anbringen der Kreuzblume auf der Spitze des Turmes vollendet.

Diese vielfältige und lange Baugeschichte prägen das Erscheinungsbild des Ulmer Münsters. Es ist Ausdruck der reichsstädtischen Macht an der Wende vom 14. zum 15. Jahrhundert. Der Turmbau galt nicht nur der Ehre Gottes, sondern zugleich der Manifestation städtischen Selbstbewusstseins (Rommel, 1999).

Die Maßwerksbrüstungen (Rommel 1999):

Die Vielfalt der Maßwerksbrüstungen am Ulmer Münster ist außergewöhnlich. Während sich das spätgotische Maßwerk ringsum an den Fassaden von Chor, Mittel- und den beiden Seitenschiffen sowie am Hauptturm findet, prägen Maßwerke des neogotischen Stils (ab 1845) eindrucksvoll das Erscheinungsbild der Turmaufbauten und Galerien des späten Ausbaus.

Der Bau des Ulmer Münsters geht auf den Entwurf des bekannten Baumeisters der Spätgotik, Henrich II. Parler, zurück. Er war ein Mitglied der berühmten Baumeisterfamilie Parler und hat mit dem Bau des Chores begonnen. Für eine Bürgerkirche, als die das Münster gebaut wurde, (Patrizier und Zunftsleute trugen dazu bei), gehört das Münster als zweitgrößte Kathedrale zu den bedeutendsten Großbauten jener Zeit.

Die Grundsteinlegung war 1377. Nach ca. 150-jährigen Bauzeit wurden die Bauarbeiten am Münster bedingt durch die Reformation, bis in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts eingestellt. Der Weiterbau setzte unter Baumeister Ferdinand Thrän im Jahr 1845 ein, die Arbeiten des Ausbaus zogen sich allerdings noch bis 1890 hin.

In der Zeit des Ausbaus, ab 1845 bis 1890, findet die Vielfalt der Maßwerksformen weitere Verwendung, sichtbar an den jeweils zwölf Brüstungen, den Seitenschiffgalerien sowie an der Chorgalerie. Das gleiche Gestaltungsprinzip findet sich an den höher gelegenen Galerien am

Obergaden des Mittelschiffs wieder. Auch an den Umgängen der mehrgeschossigen Turmaufbauten finden sich verschiedenste Formen der Maßwerke. Trotz der verschiedenen und bewegten Maßwerksmuster bleibt die Fassadenordnung bestehen und wird durch die hochsteigenden Fialen über den Strebepfeilern bestimmt.

Die meisten Maßwerksbrüstungen über den Seitenschiffwänden stammen aus der Bauzeit unter Ferdinand Thrän. Sie sind über unterschiedlich langen Jochen errichtet und immer mit den Fialen der Stütz Pfeiler verbunden. Die Maßwerke sind alle gleich hoch und schließen direkt über der Gesimszone mit dem Blendmaßwerk und Blattfries an. Die Abdecker sind in einer Ebene aufgelegt und ebenfalls mit den Fialen der Stütz Pfeiler verschmolzen. Die Anschlüsse für die seitlichen Maßwerkselemente und Abdecker sind verschieden ausgeführt, sowohl tief in die Fialstämme eingeschnitten aber auch durch die Verwendung auskragender Anschlüsse gebildet.

Nach Angaben in den Münsterblättern aus den Jahren 1890ff entstanden die Brüstungen ab den Jahren 1850. Weitere Unterlagen mit näheren Angaben über die Entstehung und Ausführung der Brüstungen sind bekannt (Pfleiderer, 1907; Wortmann, 1972).

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden nur die Maßwerksbrüstungen aus Schlaitdorfer Sandstein bearbeitet. Diese bestehen im Gegensatz zu Freiburg jeweils aus nur einem Brüstungselement. Sie sind über unterschiedlich langen Jochen errichtet und immer mit den Stütz Pfeilern der Fialen verbunden. Die Maßwerke sind alle gleich hoch und schließen direkt über der Gesimszone mit einem Blendmaßwerk und Blattfries an. Sämtliche Maßwerke sind mit einem leicht profiliertem Brüstungsgesims abgedeckt. Die Maßwerksbrüstungen selbst zeigen sehr unterschiedliche, geometrische Muster. In Joch 6 befindet sich ein Wappen in dem Brüstungselement. Die Länge der Brüstungselemente beträgt ca. 4,2m bis 7,3m.

Einzelne Schadensbilder (Rommel 1999)

Der Verfall des Steinwerkes schreitet immer schneller voran. Die Ursachen des Verfalls sind verschieden:

- Natürlicher Verfall des Steinmaterials
- Weiches ungeeignetes Steinmaterial, das den Umweltbelastungen schlecht standhält
- Umweltverschmutzung, z.B. hat Schwefeldioxid Gipsbildende Wirkung, was zu Schalenbildungen, Absandungen und Abblätterungen führt.
- Erschütterungen infolge von Bombenschäden von 1944 führten u.a. zu Rissbildungen.
- Straßenverkehr, Überschallknall von Flugzeugen; als Folge davon können sich Fugen öffnen und Wasser dringt ein.
- Konstruktive Fehler, etwa die Verwendung von rostendem Eisen im 19. Jahrhundert (wie etwa für Dübel und Klammern); heute wird nicht rostender Stahl verwendet.
- Saurer Regen, der zur Anreicherung von Schadsalzen führt.
- Andere Einwirkungen, wie Hitze und Kälte
- Frühere Ergänzungen mit Restauriermörtel
- Schädigung des Fugenmaterials, wie etwa durch Abriss und Auswaschung.

Das verwendete Steinmaterial, der Schlaitdorfer Sandstein, ist von minderer Qualität und hat sich nicht bewährt. Daher wurden bereits in den 1930er Jahren am Ulmer Münster an den Galerien der Seitenschiffe mehrere Maßwerksbrüstungen einschließlich Abdecker ausgewechselt. Diese Erfahrung hat man auch am Kölner Dom gemacht.

Ab 1987 erneuerte man weitere Maßwerke. Man benutzte hierzu Krensheimer Muschelkalk. Um die Steine vor den Witterungseinflüssen zu schützen, wurden die neuen Brüstungen teilweise mit Festigungs- und Hydrophobierungsmittel getränkt, das seit ca. 1978 vom Münsterbauamt verwendet wurde. Nachuntersuchungen zeigen, dass sich das Konservierungsmittel nicht besonders gut bewährt hat.

5.1.1 Grafische Dokumentation der eingesetzten Materialien und der Schadensformen

An den Maßwerksbrüstungen wurden zwei verschiedene Materialien verbaut:

Schlaitdorfer Sandstein

Krensheimer Muschelkalk

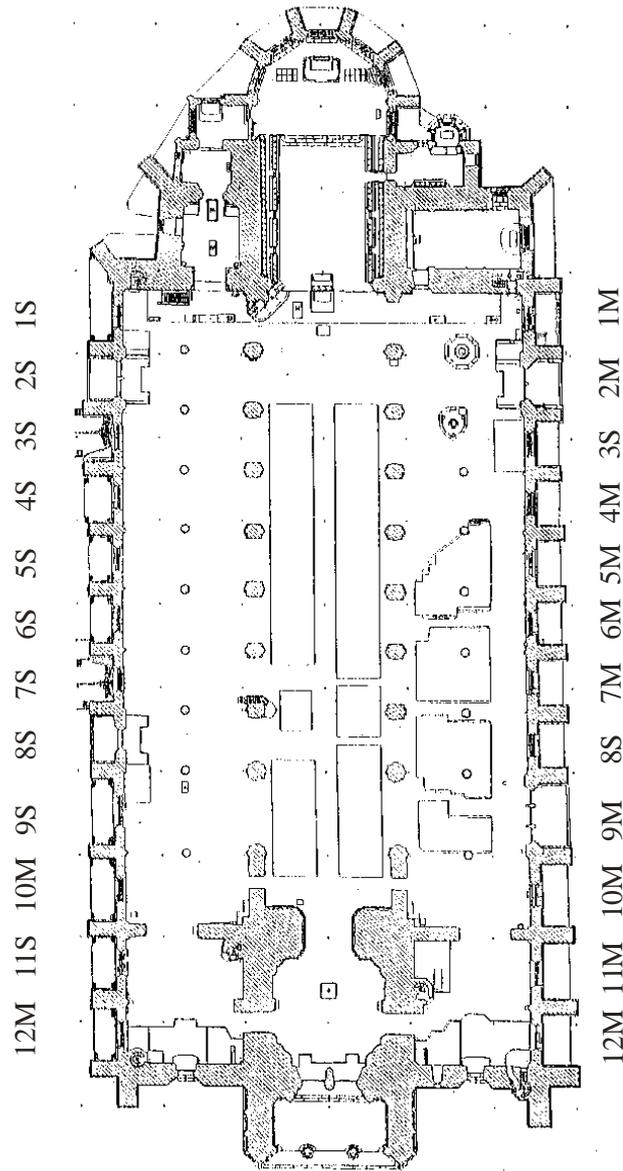
Auf eine detaillierte Materialkartierung wurde hier jedoch verzichtet, da innerhalb der einzelnen Joche nur Schlaitdorfer Sandstein oder Krensheimer Muschelkalk verbaut wurde. In Abbildung 3 sind die Joche mit den jeweiligen Natursteinen gekennzeichnet.

Der *Schlaitdorfer Sandstein* ist dem Keuper zuzuordnen und zählt zu den sogenannten Stubensandsteinen, die früher in zahlreichen Steinbrüchen wie z.B. in Schlaitdorf (Württemberg) abgebaut wurden. Heute kommen die Stubensandsteine nur noch in Pliezhausen-Rübhausen und bei Esslingen vor (Grimm 1990). Für das Ulmer Münster wurden Stubensandsteine vor allem in den Jahren 1844 bis 1850 und 1873 geliefert (Grimm, 1990).

Der Schlaitdorfer Sandstein ist das Originalmaterial. Heute sind nur noch folgende Brüstungen aus diesem Material (Abbildung 3): Südseite Joch 3 und 8; Nordseite Joch 1 bis 9 und 11

Die anderen, bereits in den Jahren 1929 und 1987 erneuerten Maßwerksbrüstungen sind aus Krensheimer Muschelkalk (Abbildung 3). Dieses Material wird in Grünsfeld-Krensheim (Württemberg) abgebaut. Der Krensheimer Muschelkalk ist ein heller bis rotbrauner, dicht gepackter Schalentrümmerkalkstein und stratigrafisch dem Oberen Muschelkalk zuzuordnen (Grimm 1990).

Analog zu Freiburg wurden auch hier von Seiten der Münsterbauhütte photogrammetrische Pläne für die einzelnen Maßwerksbrüstungen in Auftrag gegeben. Diese waren die Grundlage für die Schadensdokumentation, die von dem Büro Hermann Schäfer, Erlensee durchgeführt wurde. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden nur die Brüstungselemente aufgenommen, die aus Schlaitdorfer Sandstein sind. Das entsprechende Planmaterial für die Schadensdokumentation ist dem Anhang zu entnehmen.



1M = Joch 1, Muschelkalk
1S = Joch 1, Schlaitdorfer

Abbildung 3: Ulmer Münster, Grundriss und Bezeichnung der Joche

Die Schadensdokumentation bezieht sich nur auf die Maßwerksbrüstungen aus Schlaitdorfer Sandstein und hier die Vorder- und Rückseite der Brüstungselemente.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Kartierungsarbeiten ausgewertet. Hierzu wurden die Schadensarten tabellarisch aufgelistet und die in den einzelnen Jochen am häufigsten vorgefunden Schadensarten bewertet. Die Bewertung geht von 1 = häufigste bis 5 = geringste

Tabelle 11: Bewertung der Schadensarten der Außenseiten

Joch	Position	Absanden	Abschuppen	Schalenbildung	Alveolarbildung	festsetzende Kruste	Riss	Ausbruch	Schalenverlust	Mörtelantragung	lagerhaftes Aufschalen
1 Nord	Vorderseite	1	2	3	4	3	2	2	3		
	Rückseite	1				5	3	2			4
2 Nord	Vorderseite	1	3	3	4	2		2			3
	Rückseite	1	4	5	3						2
3 Nord	Vorderseite	1			3	2	2	3			3
	Rückseite	1					2	3			4
4 Nord	Vorderseite	1	3	3	2	2		3			
	Rückseite	1		3			2				
5 Nord	Vorderseite	1	2		3	1	3	2			
	Rückseite	1			3						
6 Nord	Vorderseite	1	3			2	3	3		3	
	Rückseite	1					3	3			
7 Nord	Vorderseite	1	3	4	1	2		3			
	Rückseite	1					3				
8 Nord	Vorderseite	1	4		3	2	4	3			
	Rückseite	1		3	4						2
9 Nord	Vorderseite	1	3		4	2		4			
	Rückseite	1	3				4				2
11 Nord	Vorderseite	1	3			2		2		3	
	Rückseite	1	4		4		2	2			
3 Süd	Vorderseite	1	2	3	3	2		3			
	Rückseite	1		3							2
8 Süd	Vorderseite	1	2	3	2	1	3	1			
	Rückseite	1					2	3			

Zusätzlich zur Aufnahme der einzelnen Schadensarten an den Maßwerksbrüstungen des Ulmer Münsters die Schadensintensitäten erfasst. Sie wurden in getrennten Plänen dargestellt. Auch hier wurde eine Auswertung vorgenommen, die in nachfolgender Tabelle 12 aufgeführt ist. Die Abstufung ist analog zu den Schadensarten, d.h. die am meisten verteilte Schadensintensität erhält die Ziffer 1, die geringste die Ziffer 5.

Tabelle 12: Auswertung der Schadensintensitäten der Außenseiten

Joch	Position	Schadensklasse 1 Schadenstiefe 2-4 mm	Schadensklasse 2 Schadenstiefe 5-8 mm	Schadensklasse 3 Schadenstiefe über 8mm	Schadensklasse 4 Verlust	Schadensintensität unter Kruste nicht feststellbar	Ausbruch, Verlust	Riss																																																																																																																																																		
1 Nord	Vorderseite	2	1	3	2	3	2	2																																																																																																																																																		
	Rückseite	1	4	3					2 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	2		Rückseite		1		3 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	3	3	Rückseite	2	1		4 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	3	4	Rückseite	2	1	4	5 Nord	Vorderseite	2	1	3		1	2	4	Rückseite	2	1	4	6 Nord	Vorderseite	2	2	3		2	1	4	Rückseite	3	2		7 Nord	Vorderseite	3	2	1	3	2	3	4	Rückseite	1	2	4	3	5	5	5	8 Nord	Vorderseite	2	1	3	3	2	4	3	Rückseite	1	2	3	4		4		9 Nord	Vorderseite	3	1	4		2	4	4	Rückseite	1	2	3	11 Nord	Vorderseite	4	1	3		2	2	4	Rückseite	1	2		3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-	Rückseite	1	2		8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1
2 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	2																																																																																																																																																			
	Rückseite		1						3 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	3	3	Rückseite	2	1		4 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	3	4	Rückseite	2	1	4	5 Nord	Vorderseite	2	1	3		1	2	4	Rückseite	2	1	4	6 Nord	Vorderseite	2	2	3		2	1	4	Rückseite	3	2		7 Nord	Vorderseite	3	2	1	3	2	3	4	Rückseite	1	2	4	3	5	5	5	8 Nord	Vorderseite	2	1	3	3	2	4	3	Rückseite	1	2	3	4		4		9 Nord	Vorderseite	3	1	4		2	4	4	Rückseite	1	2	3	11 Nord	Vorderseite	4	1	3		2	2	4	Rückseite	1	2		3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-	Rückseite	1	2		8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4	Rückseite	2	1									
3 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	3	3																																																																																																																																																		
	Rückseite	2	1						4 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	3	4	Rückseite	2	1	4	5 Nord	Vorderseite	2	1	3		1	2	4	Rückseite	2	1	4	6 Nord	Vorderseite	2	2	3		2	1	4	Rückseite	3	2		7 Nord	Vorderseite	3	2	1	3	2	3	4	Rückseite	1	2	4	3	5	5	5	8 Nord	Vorderseite	2	1	3	3	2	4	3	Rückseite	1	2	3	4		4		9 Nord	Vorderseite	3	1	4		2	4	4	Rückseite	1	2	3	11 Nord	Vorderseite	4	1	3		2	2	4	Rückseite	1	2		3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-	Rückseite	1	2		8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4	Rückseite	2	1																						
4 Nord	Vorderseite	3	1	3		2	3	4																																																																																																																																																		
	Rückseite	2	1	4					5 Nord	Vorderseite	2	1	3		1	2	4	Rückseite	2	1	4	6 Nord	Vorderseite	2	2	3		2	1	4	Rückseite	3	2		7 Nord	Vorderseite	3	2	1	3	2	3	4	Rückseite	1	2	4	3	5	5	5	8 Nord	Vorderseite	2	1	3	3	2	4	3	Rückseite	1	2	3	4		4		9 Nord	Vorderseite	3	1	4		2	4	4	Rückseite	1	2	3	11 Nord	Vorderseite	4	1	3		2	2	4	Rückseite	1	2		3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-	Rückseite	1	2		8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4	Rückseite	2	1																																			
5 Nord	Vorderseite	2	1	3		1	2	4																																																																																																																																																		
	Rückseite	2	1	4					6 Nord	Vorderseite	2	2	3		2	1	4	Rückseite	3	2		7 Nord	Vorderseite	3	2	1	3	2	3	4	Rückseite	1	2	4	3	5	5	5	8 Nord	Vorderseite	2	1	3	3	2	4	3	Rückseite	1	2	3	4		4		9 Nord	Vorderseite	3	1	4		2	4	4	Rückseite	1	2	3	11 Nord	Vorderseite	4	1	3		2	2	4	Rückseite	1	2		3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-	Rückseite	1	2		8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4	Rückseite	2	1																																																
6 Nord	Vorderseite	2	2	3		2	1	4																																																																																																																																																		
	Rückseite	3	2						7 Nord	Vorderseite	3	2	1	3	2	3	4	Rückseite	1	2	4	3	5	5	5	8 Nord	Vorderseite	2	1	3	3	2	4	3	Rückseite	1	2	3	4		4		9 Nord	Vorderseite	3	1	4		2	4	4	Rückseite	1	2	3	11 Nord	Vorderseite	4	1	3		2	2	4	Rückseite	1	2		3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-	Rückseite	1	2		8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4	Rückseite	2	1																																																													
7 Nord	Vorderseite	3	2	1	3	2	3	4																																																																																																																																																		
	Rückseite	1	2	4	3	5	5	5																																																																																																																																																		
8 Nord	Vorderseite	2	1	3	3	2	4	3																																																																																																																																																		
	Rückseite	1	2	3	4		4																																																																																																																																																			
9 Nord	Vorderseite	3	1	4		2	4	4																																																																																																																																																		
	Rückseite	1	2	3					11 Nord	Vorderseite	4	1	3		2	2	4	Rückseite	1	2		3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-	Rückseite	1	2		8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4	Rückseite	2	1																																																																																																												
11 Nord	Vorderseite	4	1	3		2	2	4																																																																																																																																																		
	Rückseite	1	2						3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-	Rückseite	1	2		8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4	Rückseite	2	1																																																																																																																									
3 Süd	Vorderseite	2	1	3		2	3	-																																																																																																																																																		
	Rückseite	1	2						8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4	Rückseite	2	1																																																																																																																																						
8 Süd	Vorderseite	3	1	3-4		1	1	4																																																																																																																																																		
	Rückseite	2	1																																																																																																																																																							

Die Auswertung der Schadensarten zeigt deutlich, dass die häufigste Schadensart bei allen Jochen das *Absanden* darstellt. Vergleicht man hierzu die Schadenintensität so weisen die absandenden Bereiche meist eine Schadenstiefe von 5-8mm auf.

Als zweit häufigste Schadensart kommen *festhaftende Krusten* vor. Aufgrund ihrer festen Haftung kann hier nicht festgestellt werden, wie tief das Material bereits geschädigt ist. Daher konnte hier keine Angabe zur Schadensintensität abgegeben werden.

In etwa vergleichbarer Häufigkeit kommen an der Nordseite *Abschuppungen* und *Ausbrüche* vor. Auf der Südseite sind dagegen im Joch 8 die Ausbrüche deutlich häufiger.

In unregelmäßiger Verteilung kommen *Schalenbildungen*, *Alveolarbildungen*, *Risse*, *Mörtelantragungen* und *lagerhafte Aufschuppungen* vor.

Bei allen Jochen ist die Vorderseite stärker geschädigt als die Rückseite.

Insgesamt gesehen weist das Joch 7 Nord die stärksten Schäden auf; gefolgt von Joch 8 und 11 Nord sowie Joch 3 Süd. Etwas geringere Schäden zeigt Joch 8 Süd. Die übrigen Joche sind in ihrer Schadensintensität vergleichbar.

Aufgrund der Schadenskartierungen würden zunächst die Brüstungselemente der Joche 7, 8 und 11 für eine Acrylharzvolltränkung in Frage kommen.

Aufgrund der Schadenskartierungen würden die Brüstungselemente der Joche 7 und 11 für eine Acrylharzvolltränkung zunächst in Frage kommen. Daher wird nachfolgend die Zustandsbeschreibung der beiden Joche, die vom Büro Hermann Schäfer, Erlensee verfasst wurde, noch mit aufgeführt.

JOCH 7

Bestand

Die Galerie im Feld 7 läuft über ein Feldbreite von 4,87 Metern, das Galeriemmaßwerk besteht aus drei Steinplatten aus Schlaitdorfer Sandstein. Die Abdeckung, ebenfalls aus Schlaitdorfer Sandstein, ist vierteilig. Die Stoßfugen sind in Bleivergusstechnik hergestellt. Auch die durchgehende, linke seitlichen Anschlussfugen ist gegossen und mit einer dünnen Mörtelschicht überzogen, an der rechten Seite ist hier jedoch kein Bleiverguss nachzuweisen. Die horizontalen Fugen sind mit einem feinen, gelblichen Kalkmörtel ausgeführt.

Zustandsbeschreibung

Steinschäden

An geschützten, nicht permanent berechneten Stellen hat sich eine dicke, schwarze Kruste angelagert. Vielfach hat sich diese Kruste vom Stein abgelöst, der Stein ist hier vorwiegend schuppig bzw. sandend.

Allgemein sorgt ein deutliches Absanden für verwaschene Profilkonturen. Auffälligstes Schadenbild sind tief greifende alveolare Aushöhlungen im Profilbereich. Hierbei treffen sich mitunter die Alveolen von links und rechts des Hauptprofilstranges, sodass mancherorts durch die Verwitterung neue Durchbrüche entstanden sind. Im Bereich der alveolaren Aushöhlungen sind i.d.R.

Salzausblühungen zu beobachten. Vorwiegend an geschützteren Stellen ist ein teilweise intensives Abschuppen festzustellen. An den äußeren Steinen treten Risse auf, vorwiegend Profilablösungen parallel zur Fassade. Die Rückseite sandet nur leicht.

Schadensschwerpunkte

In der Summe am intensivsten geschädigt ist das Mittelstück. Die Seitenteile weisen zwar punktuell sehr starke Schäden auf, diese aber vorwiegend im oberen Drittel des Maßwerkes (linker Stein) bzw. auf der rechten Seite (rechter Stein). Das Schadenbild im unteren bzw. linken Bereich ist nicht so stark ausgeprägt. Es fällt auf, dass die Profilkanten häufig besser erhalten sind, als die Flächen.

Sehr gering geschädigt ist die Abdeckung, hier sind auch in der Untersicht des Profils kaum Schäden anzutreffen, lediglich die Oberseite der Abdeckung ist leicht narbig rückverwittert.

JOCH 11

Bestand

Die Galerie im Feld 11 läuft über ein Feldbreite von 6,33 Metern. Das Galeriemmaßwerk besteht aus vier Steinplatten aus Schlaitdorfer Sandstein, die sieben Steine der Abdeckung sind ebenfalls aus Schlaitdorfer Sandstein. Die Stoßfugen von Galerie und Abdeckung sind mit Blei vergossen, an der linken, durchgehenden Stoßfuge ist im oberen Bereich ebenfalls Blei anzutreffen, ansonsten sind die Fugen mit einem feinen, gelblichen Kalkmörtel geschlossen. In erheblichem Umfang findet sich eine Antragemasse aus feinem, grauem Zementmörtel.

Zustandsbeschreibung

Steinschäden

Verstärkt in der oberen Hälfte der Galerie treten großflächige Krustenbildungen auf. Die Kruste ist häufig perlig und haftet fest auf dem Stein. Ein Schadenbild kann daher oft gar nicht festgestellt werden, es ist jedoch mit erheblichen Gipseinlagerungen im Porengefüge des Steines zu rechnen. Vorherrschende Schadenbild an den zu beurteilenden Stellen ist Absanden, in den Untersichten der Profile hingegen schuppt der Stein eher ab. Die Maßwerknasen im unteren Bereich sind häufig abgebrochen. Da die Bruchstellen mittlerweile angewittert sind, kann heute nur vermutet werden, dass diese Schäden mechanisch durch Darauftreten entstanden ist. Für diese These spricht allerdings die Unversehrtheit der Nasen im oberen Bereich. Der linke Anschlussstein weist mehrfach Risse quer zu

den Profilläufen auf, am nächsten Stein tritt noch ein Riss auf. Salzausblühungen sind vereinzelt im unteren Bereich anzutreffen.

Schadenschwerpunkte

Die Schäden treten vorwiegend auf der Außenseite der Galerie auf, schon zu den Durchbrüchen hin wird das Schadenbild häufig schwächer. Die Rückseite der Galeriemaßwerke ist weitgehend ungeschädigt, nur vereinzelt ist die Oberfläche leicht durch Absanden zurückgewittert.

Die Stein der Abdeckung weisen einige Ausbruchstellen auf, ansonsten ist lediglich die Oberfläche leicht narbig ausgewittert.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse hat die Bauhütte Ulm das Brüstungselement Joch 11 für die Acrylharzvolltränkung freigegeben.

6 Erfassung einiger Materialkennwerte an den Materialien der Brüstungselemente des Ulmer Münsters

6.1 Der Schlaitdorfer Sandstein der Brüstungselemente des Ulmer Münsters

6.1.1 Messungen Vorort (Ultraschallmessungen) und Probenahme

6.1.1.1 Ultraschallmessungen

Analog zu Freiburg wurden auch am Ulmer Münster Ultraschallmessungen vorgenommen. Die Ergebnisse der Messungen sind in den nachfolgenden Blättern dargestellt.

Auswertung der Messergebnisse

Tabelle 13: Ultraschallmessungen am Ulmer Münster

Istzustand	Joch 3, Nord	Joch 9, Nord	Joch 11, Nord	Joch 8, Süd
Intakt	2308 – 2642m/s	2652 – 3097m/s	2647 – 3000m/s	2320 – 2514m/s A 2742 – 3020m/s M
Absanden (MV: 2-4mm)		2841 – 3170m/s	2586 – 2922m/s	2143m/s A 2815 – 3169m/s
Absanden (MV: 5-8mm)				2778 – 3082m/s
Absanden (MV: >8mm)		2121 – 2841m/s		2891 – 3000m/s
Abschuppen		1271 – 1923m/s		
dicke Schmutzkruste	2215 - 2472m/s		2695m/s	
aufblätternde Schmutzkruste			1800m/s	

MV = Materialverlust; A = Abdeckung ; M = Maßwerk

Wie die Messergebnisse zeigen, lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen dem intakten und geschädigten Bereichen erkennen. Dies trifft vor allem für die Partien zu, die bei dem Istzustand Absandungen deutliche Materialverluste aufweisen. Hier ist die geschädigte Oberfläche bereits abgewittert und man trifft sozusagen wieder auf das Kernmaterial.

Deutlich niedrigere Werte Bereiche mit Abschuppungen oder aufblätternder Schmutzkruste.

Das Hofmaterial besitzt Schallgeschwindigkeiten zwischen 3198 – 3343m/s.

Diese Messungen werden auch am Ulmer Münster für einen relativen Vergleich nach der Instandsetzung (z.B. Acrylharzvolltränkung) herangezogen.

MESSORT: JOCH 3 Nordseite

Material: Schlaitdorfer Sandstein
Maßwerk (mittlerer Bereich)

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]	Bemerkung
1-1	2352	intakt
1-2	2632	intakt
1-3	2616	intakt
1-4	2632	intakt
1-5	2642	intakt
1-6	2472	dicke Schmutzkruste
1-7	2215	dicke Schmutzkruste
1-8	2250	dicke Schmutzkruste
1-9	2432	intakt
1-10	2473	intakt
1-11	2308	intakt
1-12	2344	intakt
1-13	2473	intakt
1-14	2500	intakt
1-15	2473	intakt
1-16	2571	intakt
1-17	2308	intakt
1-18	2308	intakt
1-19	2432	intakt
1-20	2557	intakt



MESSORT: JOCH 9 Nordseite
 Material: Schlaitdorfer Sandstein
 Linkes Maßwerk (Rosette)

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]	Bemerkung
1-1	1271	die äußeren 20mm sind abgewittert (Abschuppungen)
1-2	1923	die äußeren 20mm sind abgewittert (Abschuppungen)
1-3	2866	Absanden 2-4mm
1-4	2841	Absanden 2-4mm
1-5	3170	Absanden 2-4mm
1-6	3097	intakt
1-7	2859	intakt
1-8	2652	intakt
1-9	2841	starkes Absanden
1-10	2147	starkes Absanden
1-11	2121	die äußeren 10mm sind abgewittert (Absanden)



Zusätzliche Messungen des Hofmaterials ergaben Schallgeschwindigkeiten von 3198 bzw. 3343 m/s.

MESSORT: JOCH 11 Nordseite
 Material: Schlaitdorfer Sandstein
 Mittleres Maßwerk

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]	Bemerkung
1-1	2903	intakt
1-2	2647	intakt
1-3	2586	Absanden (2-4mm)
1-4	2695	Schmutzkruste
1-5	1800	aufblätternde Schmutzkruste
1-6	2922	Absanden (2-4mm)
1-7	2903	Absanden (2-4mm)
1-8	3000	intakt
1-9	2616	Absanden (2-4mm)
1-10	2296	intakt



Messung Joch 8, Südseite



MESSORT: JOCH 8 Südseite
 Material: Schlaitdorfer Sandstein
 Handlauf bzw. Abdeckung (rechtes Maßwerk)

Material: Schlaitdorfer Sandstein
 rechtes Maßwerk (Rosette)

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]	Bemerkung
1-1	2514	intakt
1-2	2459	intakt
1-3	2542	intakt
1-4	2320	intakt
1-5	2356	intakt
1-6	2406	intakt
1-7	2332	intakt
1-8	2320	intakt
1-9	2143	absandend

Messpunkt	Schallgeschwindigkeit [m/s]	Bemerkung
1-1	2866	intakt
1-2	2760	intakt
1-3	2922	intakt
1-4	2911	Absanden (5-8mm)
1-5	3082	Absanden (5-8mm)
1-6	3061	Absanden (5-8mm)
1-7	3020	intakt
1-8	3000	Absanden (> 8mm)
1-9	3000	Absanden (5-8mm)
1-10	3082	Absanden (5-8mm)
1-11	3125	Absanden (5-8mm)
1-12	3169	Absanden (5-8mm)
1-13	2848	Absanden (5-8mm)
1-14	3080	Absanden (5-8mm)
1-15	3169	Absanden (2-4mm)
1-16	2931	Absanden (2-4mm)
1-17	2815	Absanden (2-4mm)
1-18	2852	Absanden (5-8mm)
1-19	2931	Absanden (5-8mm)
1-20	3036	Absanden (5-8mm)
1-21	2891	Absanden (> 8mm)
1-22	2891	Absanden (2-4mm)
1-23	2742	intakt
1-24	2796	intakt
1-25	2778	intakt
1-26	2778	Absanden (5-8mm)
1-27	2778	Absanden (5-8mm)
1-28	2778	Absanden (5-8mm)

6.1.1.2 Probenahme Vorort

In Absprache mit der Denkmalpflege und der Münsterbauhütte Ulm wurde nur eine eingeschränkte Anzahl an Bohrkernen (Durchmesser von 30mm und einer maximalen Länge von 60mm) entnommen, um an den Brüstungselementen so wenig wie möglich an Originalsubstanz zu schädigen. Sie wurden an folgenden Positionen gezogen:

Tabelle 14: Position der Bohrkernproben

Bohrkern	Position	Material	Schaden
1	Joch 3, Nordseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein	intakt
2	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein	Absanden
3	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, außen	Schlaitdorfer Sandstein	Schalenbildung
4		Schlaitdorfer Sandstein	Abschuppen
5	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, außen	Schlaitdorfer Sandstein	Absanden
6		Schlaitdorfer Sandstein	Absanden
7	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein	Absanden
8	Joch 8, Südseite Seitenschiff, außen	Schlaitdorfer Sandstein	Abschuppen
9		Schlaitdorfer Sandstein	Abschuppen
10	Joch 8, Südseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein	Absanden

Zusätzlich wurde von der Münsterbauhütte folgender Bohrkern für ausgewählte Materialuntersuchungen entnommen.

Bohrkern	Position	Material	Schaden
11	Joch 7, Nordseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein	Absanden

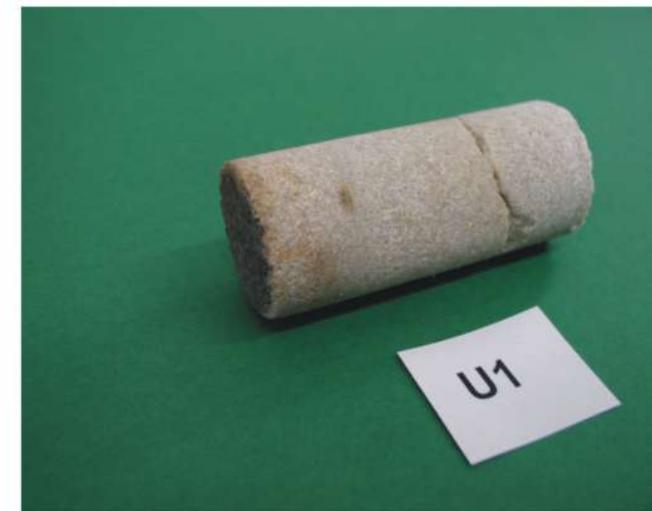
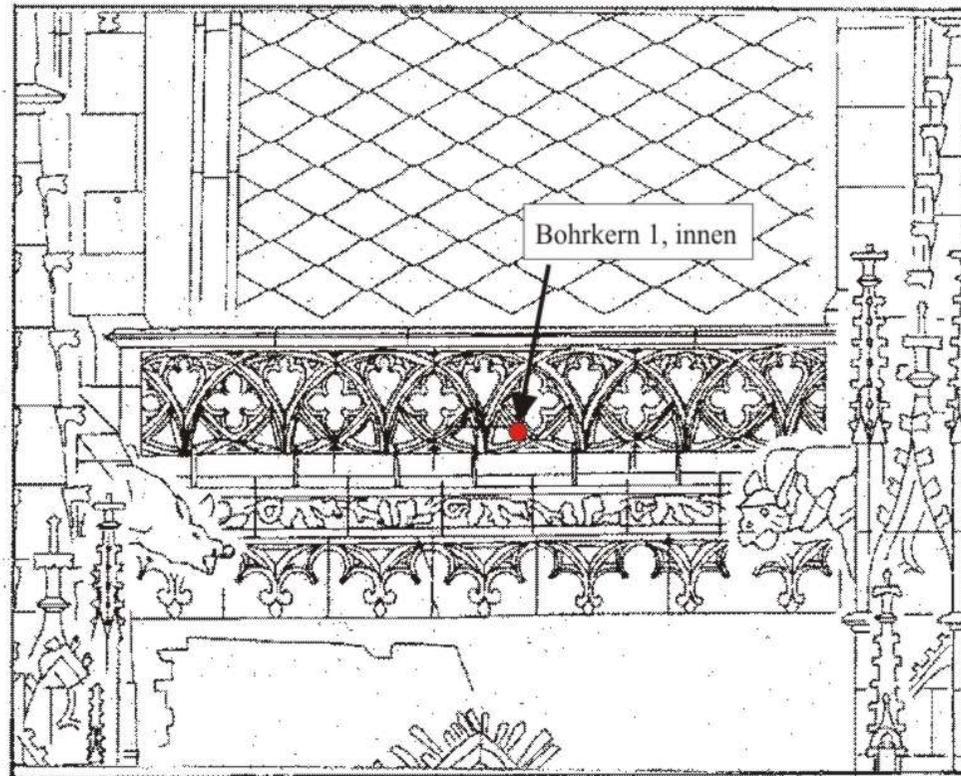
Die Fotodokumentation ist in den nachfolgenden Blättern 9 bis 13 zu entnehmen.

Von der Münsterbauhütte wurde zusätzlich Material des Schlaitdorfer Sandsteins zur Verfügung gestellt, das bereits in früheren Zeiten aus dem Joch 1 der Südseite ausgebaut wurde. Aus diesem Material wurden verschiedene Prüfkörper (Bohrkerne und Würfel) hergestellt.

Die entnommenen Bohrkern und Würfel wurden für die ausgewählten Untersuchungen zu den Materialkennwerten herangezogen, die in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden.

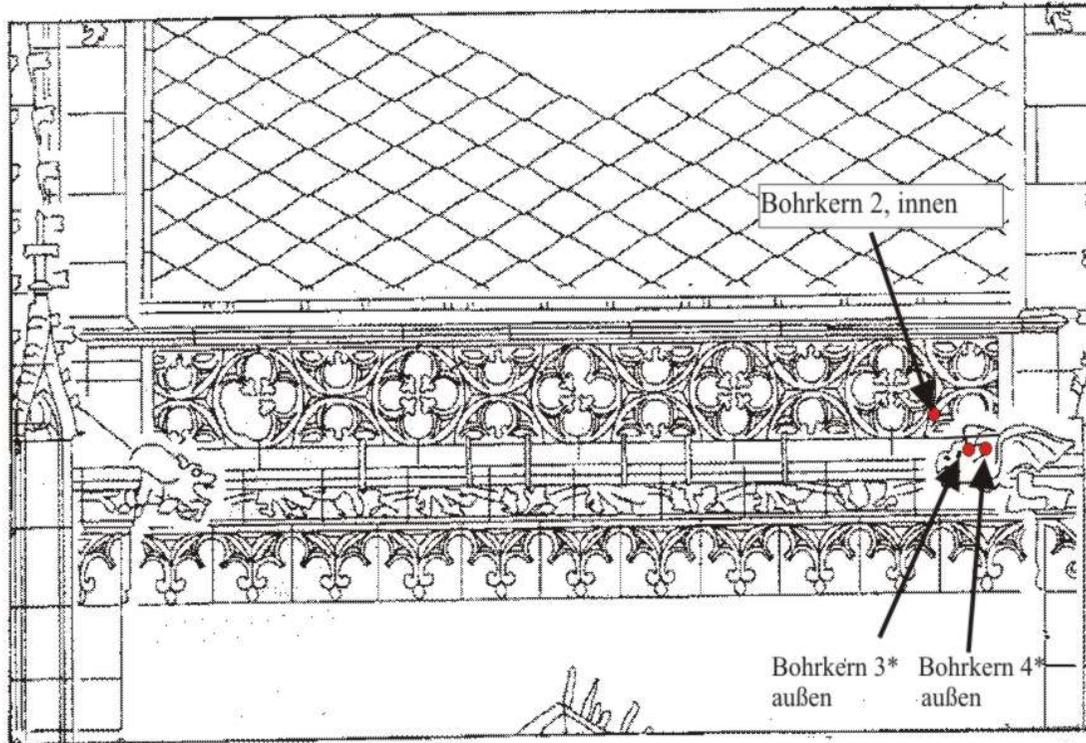
Parallel zu den Bohrkernen wurden Bohrmehlproben entnommen, die zur Bestimmung der bauschädlichen Salze dienen. Die genauen Entnahmestellen sind in den Abbildungen Seite 65 bis 69 und Tabelle 13 zu entnehmen.

Brüstungsmasswerk; 3. Joch Nordseite Seitenschiff

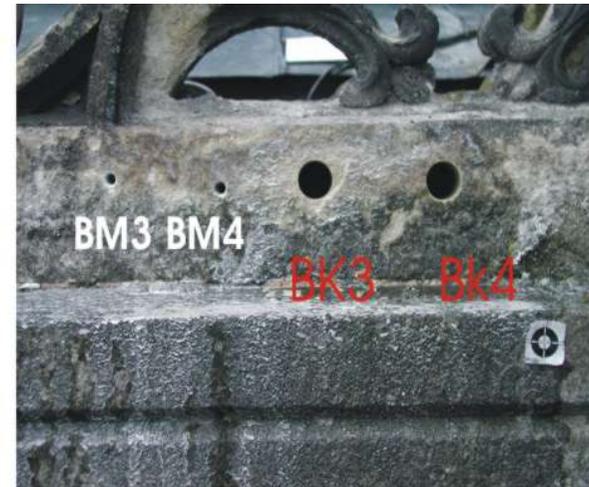


Bohrkern 1 (Schrägaufnahme von vorne)

Brüstungsmasswerk; 9. Joch Nordseite Seitenschiff

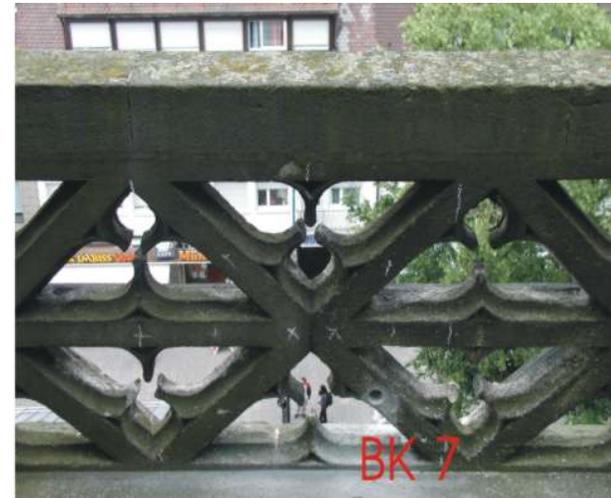
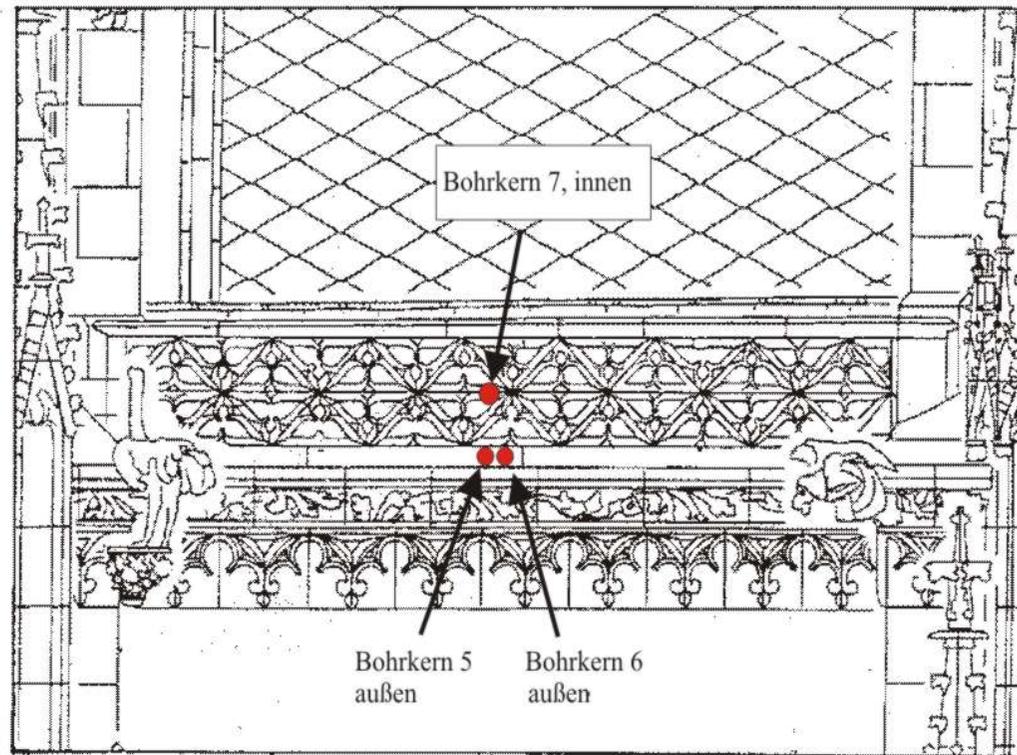


* Entnahmestelle im Sockel
hinter der Figur.



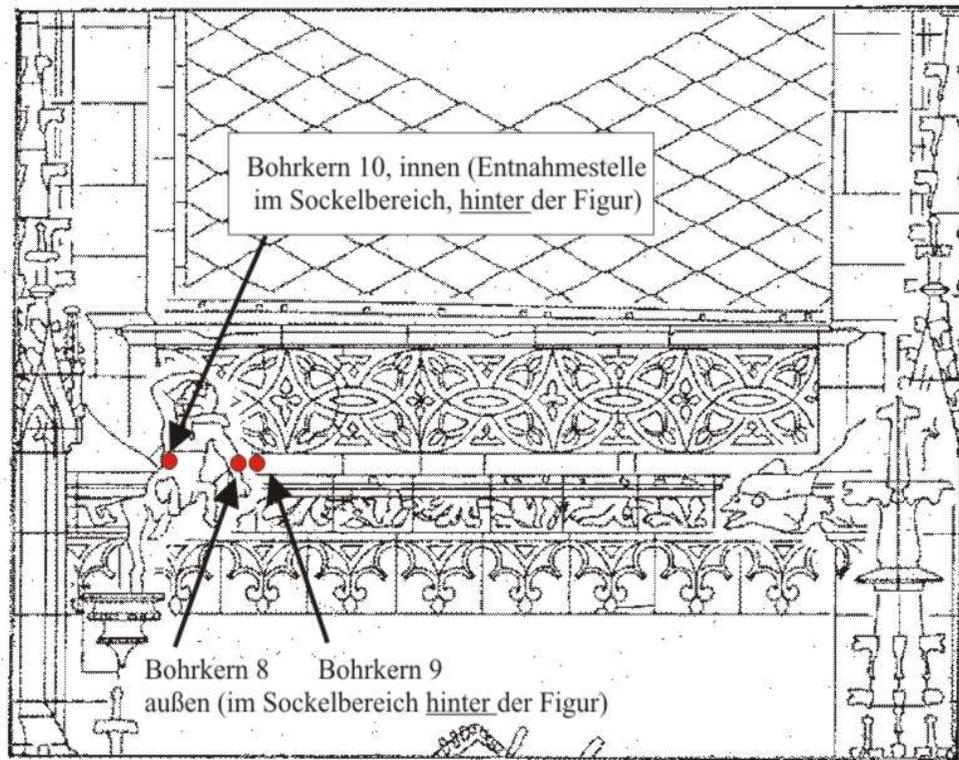
Bohrkern 4 (Schrägaufnahme von vorne)

Brüstungsmasswerk; 11. Joch Nordseite Seitenschiff



Bohrkern 7 (Schrägaufnahme von vorne)

Brüstungsmasswerk; 8. Joch Südseite Seitenschiff



Bohrkern 10 (Schrägaufnahme von vorne)

Brüstungsmasswerk 7. Joch Nordseite Seitenschiff

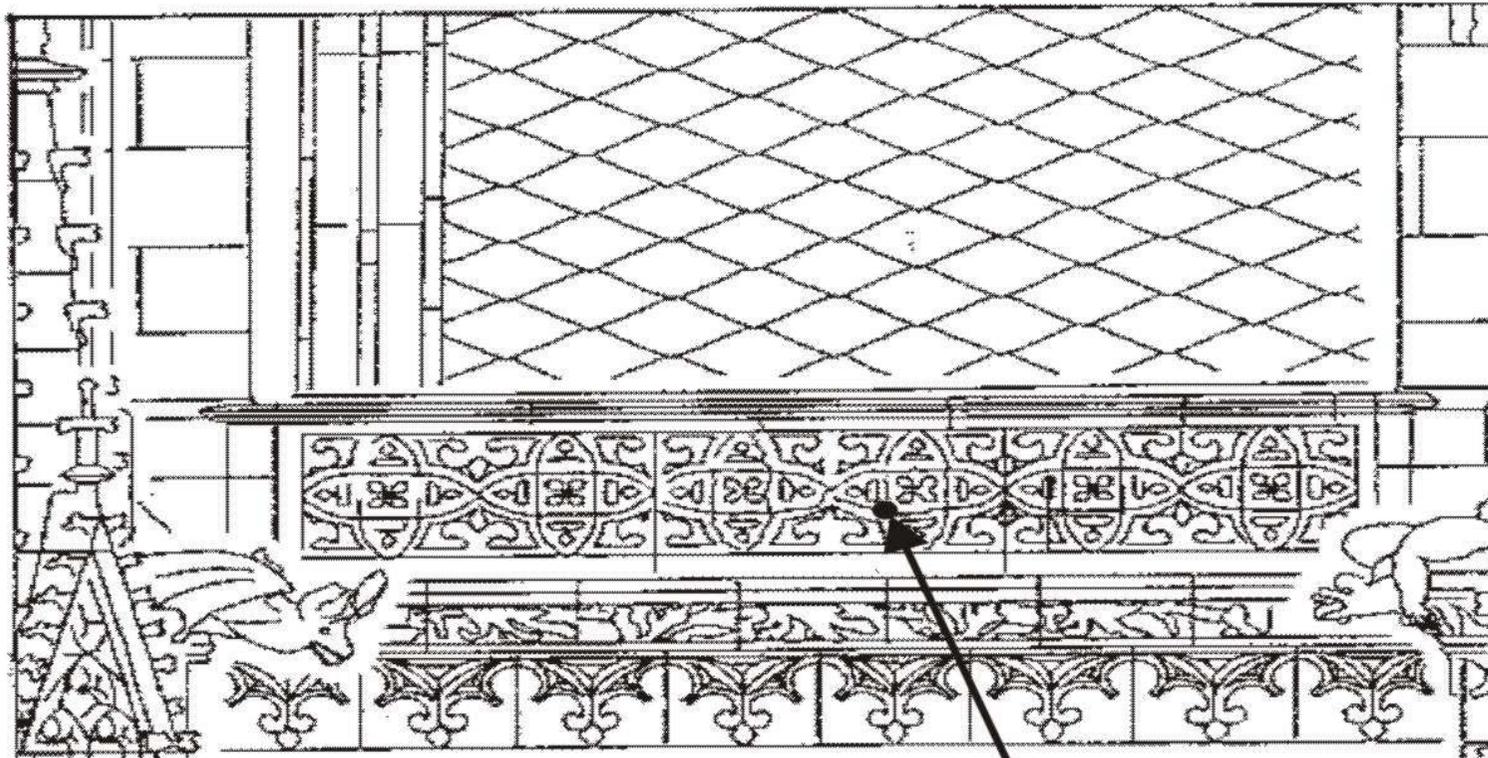
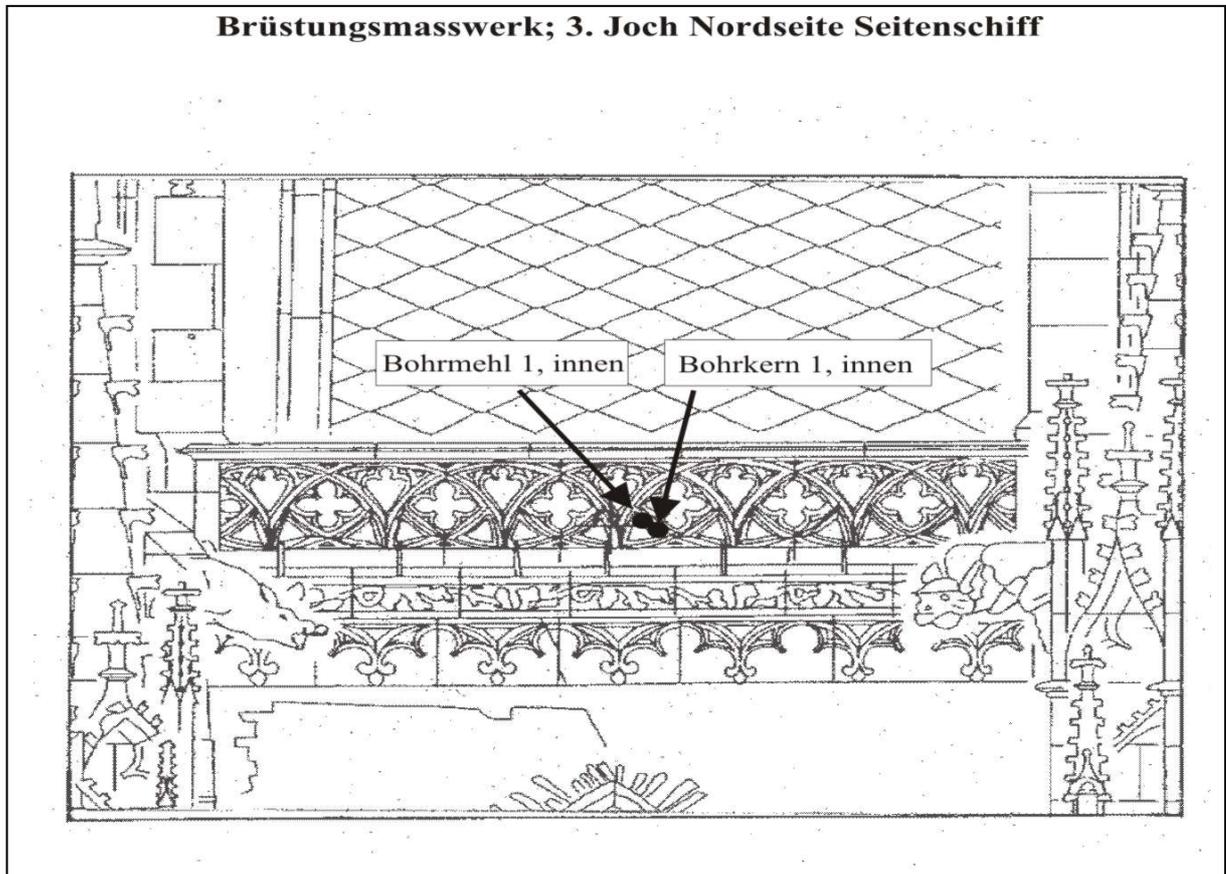
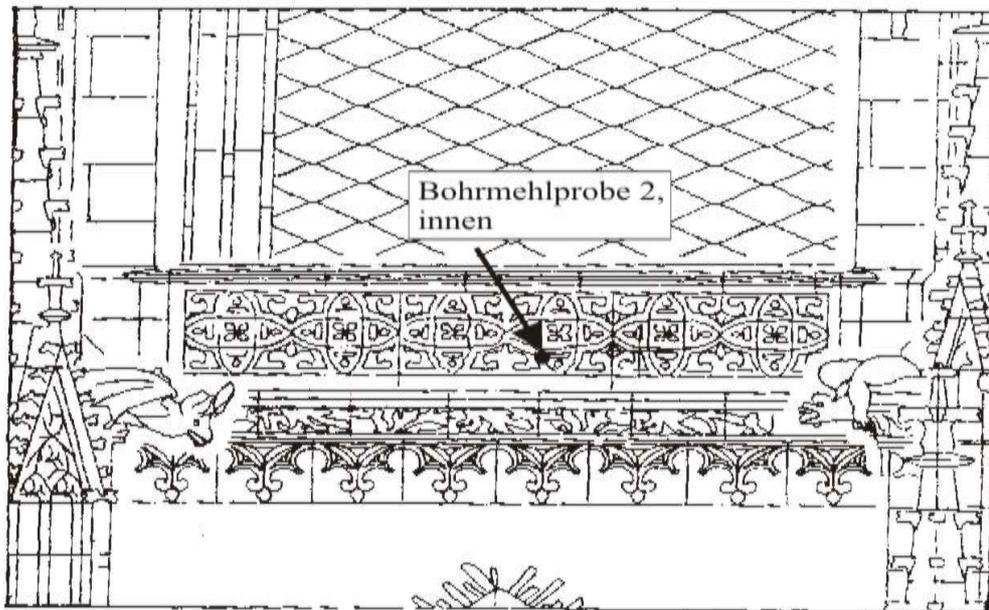


Tabelle 15: Position der Bohrmehlproben

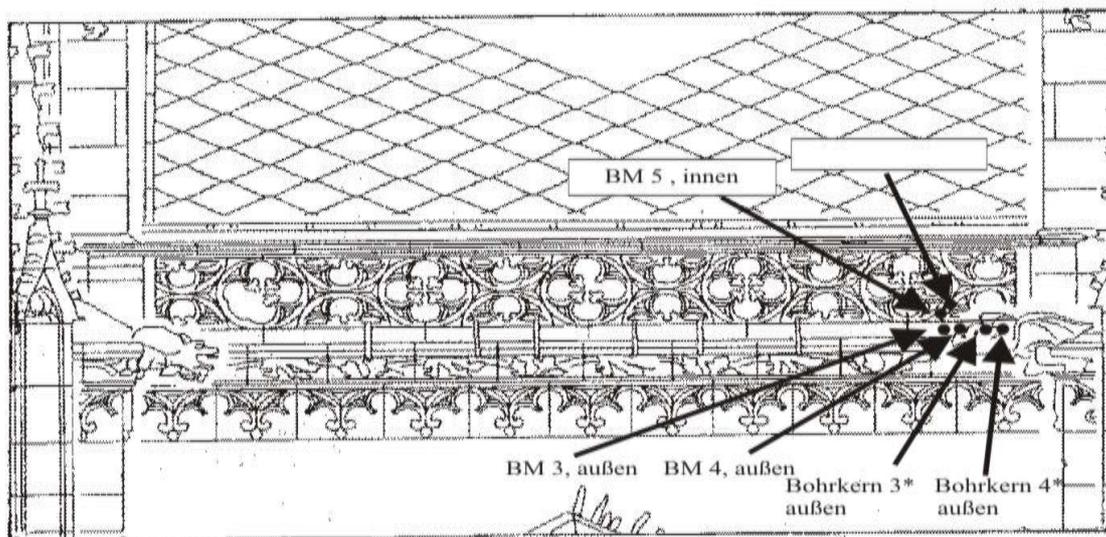
Bohrmehl- probe	Position	Material
1	Joch 3, Nordseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein
2	Joch 7, Nordseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein
3	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, außen	Schlaitdorfer Sandstein
4		Schlaitdorfer Sandstein
5	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein
6	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, außen	Schlaitdorfer Sandstein
7		Schlaitdorfer Sandstein
8	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein
9	Joch 8, Südseite Seitenschiff, außen	Schlaitdorfer Sandstein
10		Schlaitdorfer Sandstein
11	Joch 8, Südseite Seitenschiff, innen	Schlaitdorfer Sandstein



Brüstungsmasswerk ; 7.Joch Nordseite Seitenschiff

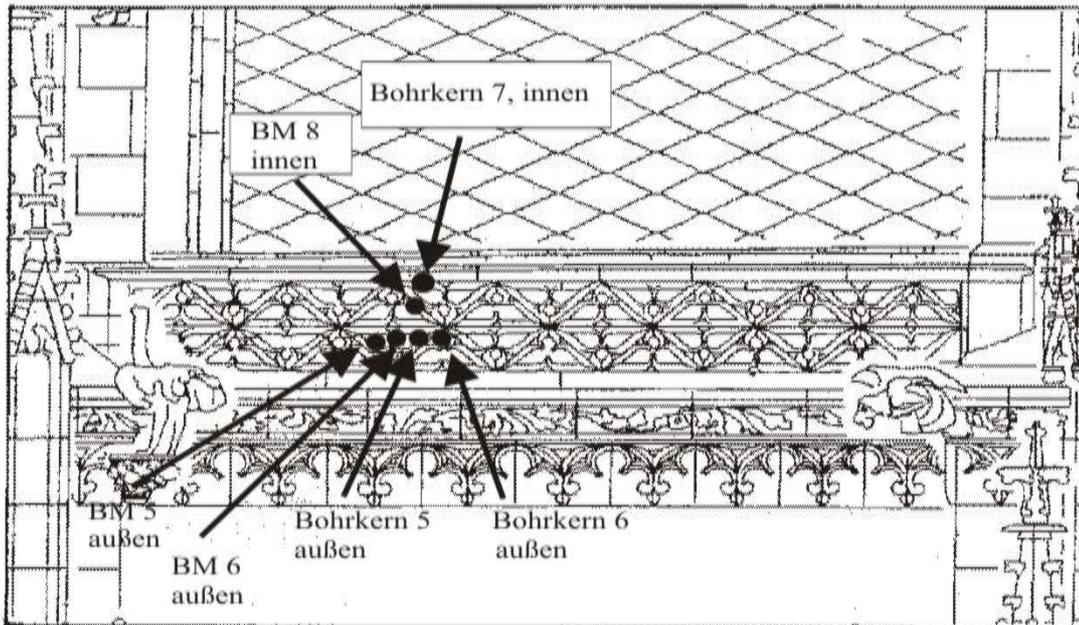


Brüstungsmasswerk; 9. Joch Nordseite Seitenschiff

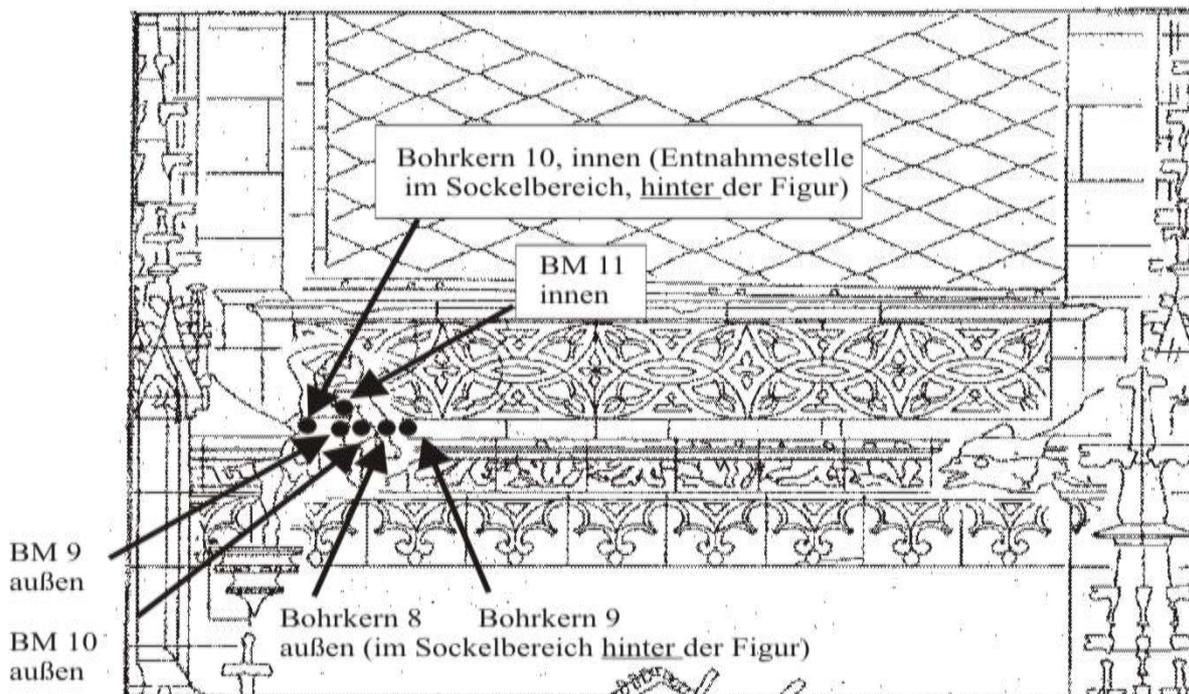


* Entnahmestelle im Sockel
hinter der Figur.

Brüstungsmasswerk; 11. Joch Nordseite Seitenschiff



Brüstungsmasswerk; 8. Joch Südseite Seitenschiff



6.1.2 Bestimmung ausgewählter Materialkennwerte an den entnommenen Proben des Ulmer Münsters

6.1.2.1 Bestimmung der petrografischen und stofflichen Kennwerte

Analog zu Freiburg wurden auch hier die Bohrkernproben zunächst für die geplanten Untersuchungen in Abschnitte unterteilt. Für die petrografische Untersuchung wurden jeweils die vorderen 2 cm der Bohrkernproben verwendet. Für die Permeabilitätsmessungen wurden Abschnitte von 5cm Länge abgesägt. Diese Abschnitte wurden anschließend auch für die Wasseraufnahmemessungen verwendet.

PETROGRAFISCHE UNTERSUCHUNGEN

Bei den am Ulmer Münster untersuchten Natursteinproben handelt es sich ausschließlich um *Schlaitdorfer Sandstein*. Diese unterscheiden sich aber dennoch makroskopisch aufgrund ihrer Korngröße. So wurde zunächst folgende grobe Einteilung getroffen:

Tabelle 16: makroskopische Beschreibung der Bohrkernproben

Bohrkern	Position	makroskopische Körnung	makroskopisches Gefüge
1	Joch 3, Nordseite Seitenschiff, innen	mittelkörnig	keine eindeutige Schichtung
2	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, innen	mittel- bis grobkörnig	keine eindeutige Schichtung
3	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	keine eindeutige Schichtung
4		mittelkörnig	keine eindeutige Schichtung
5	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	keine Schichtung
6		mittelkörnig	keine Schichtung
7		mittelkörnig	Schichtung durch Korngrößenwechsel
8	Joch 8, Südseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	keine Schichtung
9		mittelkörnig	keine eindeutige Schichtung
10	Joch 8, Südseite Seitenschiff, innen	mittelkörnig	keine eindeutige Schichtung
Hofmaterial	Joch 1, Südseite	mittel- bis grobkörnig	keine eindeutige Schichtung
11	Joch 7, Südseite Seitenschiff innen	mittel- bis grobkörnig	keine eindeutige Schichtung

Das zur Verfügung gestellte Hofmaterial ist ein mittelkörniger Schlaitdorfer Sandstein. Die Schlaitdorfer Sandsteinproben besitzen alle eine gelblich-weiße Eigenfarbe im Kernbereich. Die Außenseite der Proben ist jedoch meist durch Witterungseinflüsse grau verfärbt (siehe auch Blätter 9 bis 13). Auffällig war, dass bei allen Bohrkernproben eine rötliche Verfärbung bis in ca. 5mm Tiefe vorhanden ist (siehe auch Blätter 9 bis 13). Dies ist ein für den Schlaitdorfer Sandstein typisches Phänomen, das häufig auftritt – etwa auch am Kölner Dom. Es handelt sich dabei um die Zersetzung des eisenhaltigen Dolomits durch längere andauernde SO₂-Einwirkung im sauren Porenoberflächenmilieu (Kraus, 1985).

Für die mikroskopische Untersuchung wurden die Dünnschliffpräparate so angelegt, dass die ersten ca. 30mm erfasst wurden. Ausnahmen sind Bohrkern 10 und das Hofmaterial. Somit kann ein Vergleich zwischen verwittertem und Kernmaterial angestellt werden.

Die Untersuchungen zeigten, dass es sich bei den Bohrkernproben um einen mittelkörnigen bzw. mittel- bis grobkörnigen Schlaitdorfer Sandstein handelt. Dieser lässt sich nach Mineralgehalt und Korngröße der Quarzminerale zunächst in verschiedene Gruppen einteilen. In den Tabellen 17 und 186 ist die vorläufige Einteilungen, getrennt nach Kernmaterial und verwittertem Material, aufgeführt. Bei der Bestimmung der Mineralgehalte sind die Ergebnisse aus der Röntgendiffraktometrie mit eingeflossen.

Tabelle 17: mikroskopische Untersuchungsergebnisse des Kernmaterials

Mineralgehalt [Vol.-%]		Bindemittel	Gefüge	Porosität [Vol.-%]	KG Quarzminerale [%]		
					0,063- 0,20mm	0,20 – 0,63mm	0,63 - 2,0mm
Gruppe 1: BK 1							
Quarz	82	Kaolinitisch, wenig dolomitischer Zement, häufig nur noch Korn- Korn-Kontakte	Dolomit nesterartig verteilt	18,5	9	74	15
Kaolinit	12						
Dolomit	3						
Feldspat (Albit)	3						
Gruppe 2: BK 2 und 4							
Quarz	70	<u>Kaolinitisch</u> , z.T. tonig, partiell dolomitischer Zement	Dolomit nesterartig verteilt	10,7	8	58	34
Kaolinit	14						
Dolomit	10						
Feldspäte (Albit + Mikroklin)	3 3						
Gruppe 3: BK 5 und 6							
Quarz	76	<u>Kaolinitisch</u> , partiell dolomitischer Zement	Dolomit nesterartig verteilt	10,7	6	58	36
Kaolinit	14						
Dolomit	10						
Gruppe 4: BK 7							
Quarz	82	<u>Dolomitischer Zement</u> , untergeordnet kaolinitisch	Dolomit nesterartig verteilt	16,7	---	58	42
Kaolinit	5						
Dolomit	10						
Feldspat (Mikroklin)	3						
Gruppe 5: BK 9							
Quarz	75	<u>Kaolinitisch und</u> <u>dolomitischer Zement</u>	Dolomit nesterartig verteilt	16,5	2	80	18
Kaolinit	15						
Dolomit	10						

Mineralgehalt [Vol.-%]		Bindemittel	Gefüge	Porosität [Vol.-%]	KG Quarzminerale [%]		
					0,063- 0,20mm	0,20 – 0,63mm	0,63 – 2,0mm
Gruppe 6: BK 10							
Quarz	75	<u>Kaolitisch</u> , z.T. dolomitischer Zement	Dolomit nesterartig verteilt	13,2	7	77	16
Kaolinit	15						
Dolomit	6						
Feldspäte	2						
(Albit + Mikroklin)	2						
Hofmaterial							
Quarz	74-78	<u>Kaolitisches und</u> dolomitisches Bindemittel	Selten idiomorphe Dolomitkristalle	16,9	5	80	15
Kaolinit	8-10						
Dolomit	8-10						
Feldspat	3						
(Mikroklin)	3						
Muscovit							

Tabelle 18: mikroskopische Untersuchungsergebnisse des verwitterten Materials

Mineralgehalt [Vol.-%]		Bindemittel	Gefüge	Porosität [Vol.-%]	KG Quarzminerale [%]		
					0,063- 0,20mm	0,20 – 0,63mm	0,63 – 2,0mm
Gruppe 1: BK 1							
Quarz	84	Kaolinitisch, wenig dolomitischer Zement, <u>meist Korn-Korn-</u> <u>Kontakte</u>	Dolomit nesterartig verteilt partiell Rotfärbung	18,5	10	75	15
Kaolinit	10						
Dolomit	3						
Feldspat (Albit)	3						
Gruppe 2: BK 3							
Quarz	84	<u>wenig</u> dolomitisches und kaolinitisches Bindemittel; z.T. tonig	Wenig dolomitischer Zement	15,4	17	70	13
Kaolinit	5						
Dolomit	5						
Feldspäte	3						
(Albit + Mikroklin)	3						
Gruppe 3: BK 5							
Quarz	84-87	wenig kaolinitisches Bindemittel, <u>dolomitischer Zement</u>	Häufig große Dolomitkristalle partiell Rotfärbung	16,4	2	70	28
Kaolinit	5						
Dolomit	8-10						

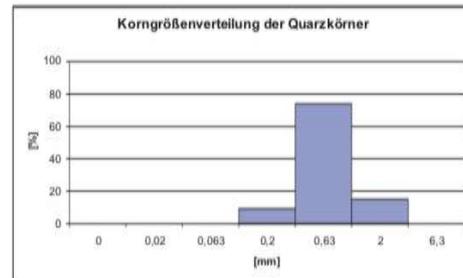
Mineralgehalt [Vol.-%]		Bindemittel	Gefüge	Porosität [Vol.-%]	KG Quarzminerale [%]		
					0,063- 0,20mm	0,20 – 0,63mm	0,63 – 2,0mm
Gruppe 4: BK 7							
Quarz	87	nur noch <u>wenig</u> kaolinitisches und dolomitisches Bindemittel	große Dolomit- kristalle nester- artig verteilt	19,0	10	72	18
Kaolinit	5						
Dolomit	5						
Feldspat (Mikroklin)	3						
Gruppe 5: BK 8							
Quarz	87	nur noch <u>wenig</u> kaolinitischer und dolomitischer Zement	Dolomit nester- artig verteilt, selten idiomorphe Kristalle	17,8	4	81	15
Kaolinit	8						
Dolomit	5						
Gruppe 6: BK 11							
Quarz	81	<u>Kaolinitisch,</u> untergeordnet tonig	Erste Gefügebrauflocke- rungen, Dolomit in Nestern	12,9	3	70	27
Kaolinit	5						
Dolomit	15						
Muscovit	3						
Feldspat (Albit)	6						

Zusätzliche der Ergebnisse in den Blättern 13 bis 19, in denen auch die Messungen der Gesamtporosität und Permeabilität mit aufgeführt.

VARIETÄT 1 (Kernmaterial)



1mm



Gesamtporosität	13,9 Vol.-%
Permeabilität (Luft)	30,0246 mD

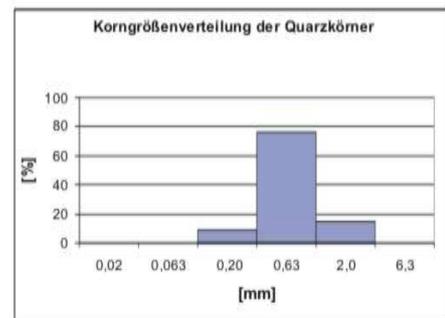
Mineralgehalt:		Bindemittel: Kaolinitisch, wenig dolomitischer Zement, häufig nur noch Korn_korn-Kontakte
Quarz	82	
Kaolinit	12	Gefüge: Dolomit nesterartig verteilt
Dolomit	3	
Feldspäte: Albit	3	

Entnahmebereich: Joch 3 Nordseite; Bohrkern 1 (Maßwerk Innenseite)

VARIETÄT 1 (verwittertes Material)



1000 µm

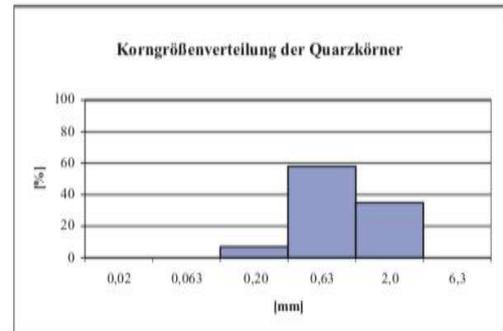
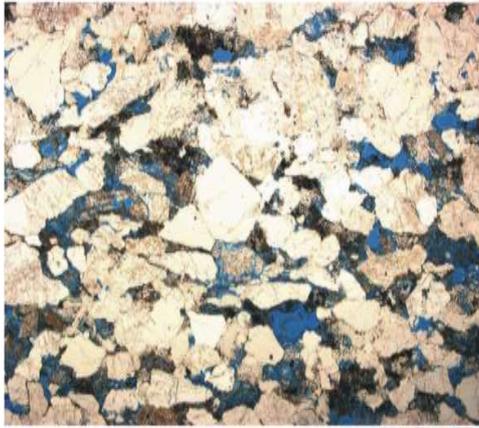


Gesamtporosität	18,5 Vol.-%
Permeabilität	mD

Mineralgehalt:		Bindemittel: Kaolinitisch, wenig dolomitischer Zement, häufig nur noch Korn-Korn-Kontakte	Bemerkungen: Probenaußenseite mit Schmutzkruste; Serizitisierung (Verwitterung) der Feldspäte; Bindemittelverluste zu Außenseite hin (Erhöhung der Porosität)
Quarz	84 Vol.-%		
Kaolinit	10 Vol.-%	Gefüge: Dolomit nesterartig verteilt	
Dolomit	3 Vol.-%		
Feldspat: Albit	3 Vol.-%		

Entnahmebereich: Joch 3, Nordseite; Bohrkern 1 (Brüstungsmasswerk innen)

VARIETÄT 2 (Kernmaterial)

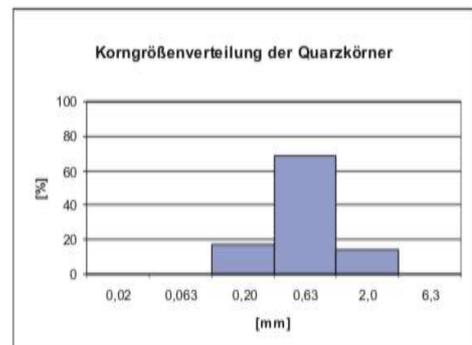
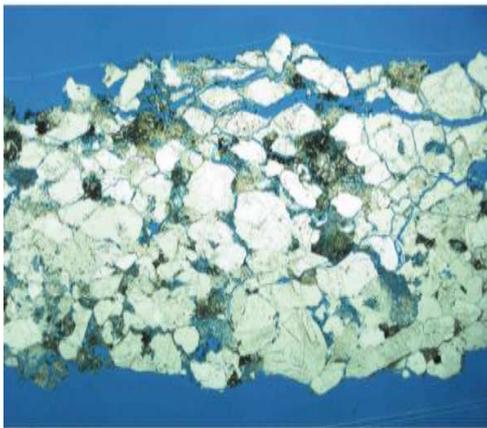


1000 µm

Gesamtporosität	10,7 Vol.-%	Mineralgehalt:	Bindemittel:	
Permeabilität	mD			
		Quarz	70 Vol.-%	Kaolinitisch, z.T. tonig, partiell dolomitischer Zement
		Kaolinit	14 Vol.-%	
		Dolomit	10 Vol.-%	Gefüge:
		<i>Feldspäte:</i>		
		Albit	3 Vol.-%	
		Mikroklin	3 Vol.-%	

Entnahmebereich: Joch 9 Nordseite; Bohrkern 2 (Maßwerk Innenseite) und Bohrkern 4 (Außenseite)

VARIETÄT 2 (verwittertes Material)

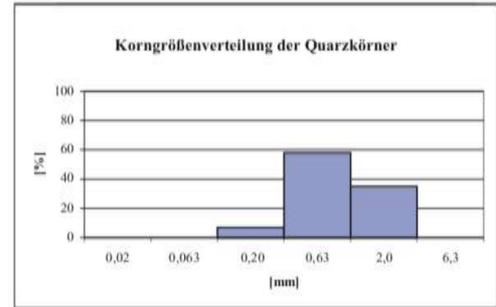


1000 µm

Gesamtporosität	15,4 Vol.-%	Mineralgehalt:	Bindemittel:	Bemerkungen:
Permeabilität	mD			
		Quarz	84 Vol.-%	Starke Gefügearlockerungen durch Rissbildungen; dolomitischer Zement ist z.T. aufgelöst
		Kaolinit	5 Vol.-%	
		Dolomit	5 Vol.-%	Gefüge:
		<i>Feldspäte:</i>		
		Albit	3 Vol.-%	
		Mikroklin	3 Vol.-%	

Entnahmebereich: Joch 9 Nordseite; Bohrkern 3 (Sockel innen)

VARIETÄT 3 (Kernmaterial)

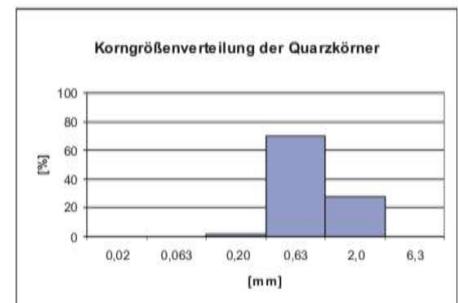


Gesamtporosität	10,7 Vol.-%
Permeabilität	mD

Mineralgehalt:	Bindemittel:
Quarz 76 Vol.-%	Kaolinitisch, partiell dolomitischer Zement
Kaolinit 14 Vol.-%	
Dolomit 10 Vol.-%	Gefüge:
	Dolomit nesterartig verteilt

Entnahmebereich: Joch 11 Nordseite; Bohrkern 5 und Bohrkern 6 (Sockel Außenseite)

VARIETÄT 3 (verwittertes Material)

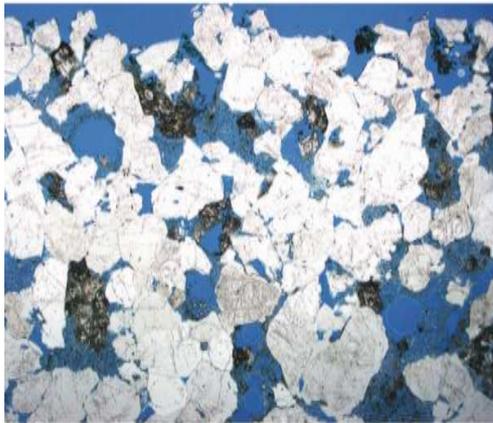


Gesamtporosität	16,4 Vol.-%
Permeabilität	mD

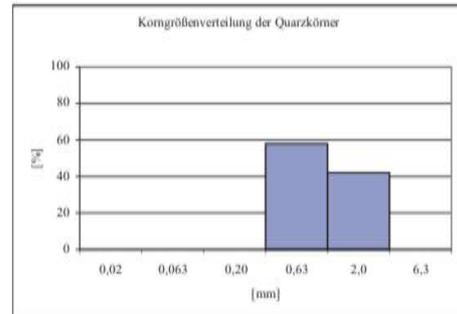
Mineralgehalt:	Bindemittel:	Bemerkungen: Starke Gefügauflockerungen durch Rissbildungen (bis 3mm Tiefe); Risse verlaufen z.T. auch durch die Mineralkörner; z.T. Dedolomitierungen Erste Salzkristalle an der Außenseite
Quarz 84-87% Vol.-%	wenig kaolinitisches Bindemittel, sondern Dolomit-Zement	
Kaolinit 5 Vol.-% Dolomit 8-10 Vol.-%	Gefüge: Häufig große Dolomitkristalle	

Entnahmebereich: Joch 11 Nordseite; Bohrkern 5 (Sockel außen)

VARIETÄT 4 (Kernmaterial)



1000 µm



Gesamtporosität	16,7 Vol.-%
Permeabilität	mD

Mineralgehalt:		Bindemittel:
Quarz	82 Vol.-%	Dolomitischer Zement, untergeordnet
Kaolinit	5 Vol.-%	kaolinitisch,
Dolomit	10 Vol.-%	Gefüge:
<i>Feldspat:</i>		Dolomit nesterartig verteilt
Mikroclin	3 Vol.-%	

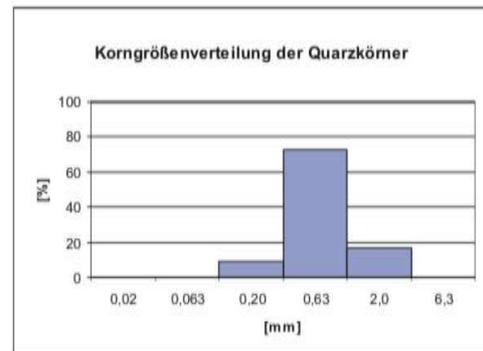
Entnahmebereich: Joch 11 Nordseite; Bohrkern 7 (Maßwerk Innenseite)

VARIETÄT 4 (verwitterter Bereich)



Gefügauflockerungen (siehe rote Pfeile)

1000 µm

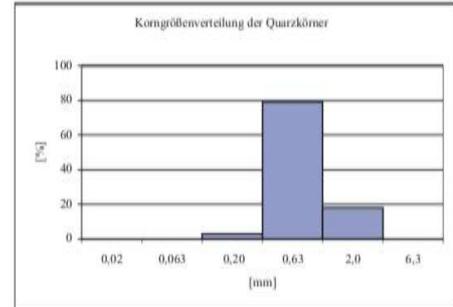
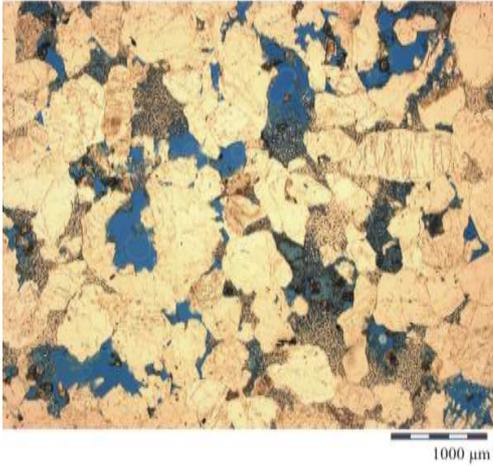


Gesamtporosität	19 Vol.-%
Permeabilität	mD

Mineralgehalt:		Bindemittel:	Bemerkungen: Locker aufsitzende Schmutzkruste auf der Außenseite; starke Gefügauflockerungen durch Rissbildungen (bis 2mm Tiefe); Erste Salzkristalle im Porenraum zur Außenseite hin
Quarz	87 Vol.-%	Nur noch wenig kaolinitisches und dolomitisches Bindemittel	
Kaolinit	5 Vol.-%	Gefüge: Größere Dolomitkristalle, nesterartig verteilt	
Dolomit	5 Vol.-%		
<i>Feldspat:</i>			
Mikroclin	3 Vol.-%		

Entnahmebereich: Joch 11 Nordseite; Bohrkern 7 (Maßwerk Innenseite)

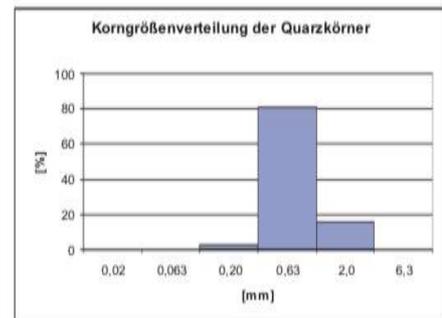
VARIETÄT 5 (Kernmaterial)



Gesamtporosität	16,5 Vol.-%	Mineralgehalt:		Bindemittel:	kaolinitisch und dolomitischer Zement
Permeabilität	mD	Quarz	75 Vol.-%		
		Kaolinit	15 Vol.-%	Gefüge:	Dolomit nesterartig verteilt
		Dolomit	10 Vol.-%		

Entnahmebereich: Joch 8 Südseite; Bohrkern 9 (Sockellaußenseite)

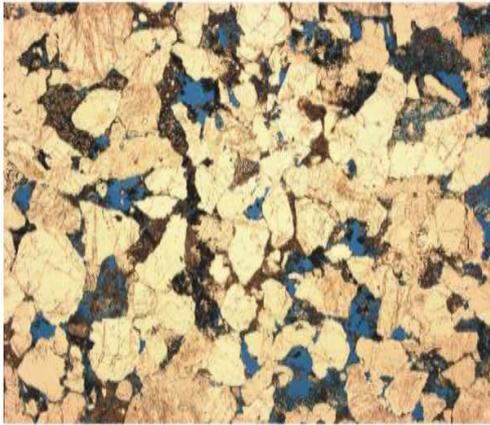
VARIETÄT 5 (verwittertes Material)



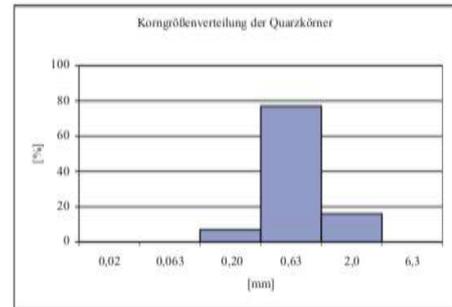
Gesamtporosität	17,8 Vol.-%	Mineralgehalt:		Bindemittel:	Nur noch wenig kaolinitisches und dolomitisches Bindemittel (stark untergeordnet tonig)	Bemerkungen:	Locker aufsitzende Schmutzkruste auf der Außenseite; starke Gefügeflockungen durch Rissbildungen (bis ca.4mm Tiefe); Risse verlaufen häufig durch die Mineralkörner
Permeabilität	mD	Quarz	87 Vol.-%				Wenig Salzkristalle im Porenraum zur Außenseite hin
		Kaolinit	8 Vol.-%	Gefüge:	Dolomit nesterartig verteilt, selten idiomorphe Kristalle		
		Dolomit	5 Vol.-%				

Entnahmebereich: Joch 8 Südseite; Bohrkern 8 (Sockel Außenseite)

VARIETÄT 6 (Kernmaterial)



1000 µm

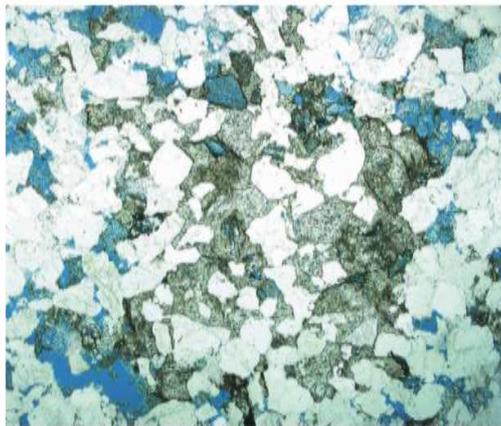


Gesamtporosität	13,2 Vol.-%
Permeabilität	mD

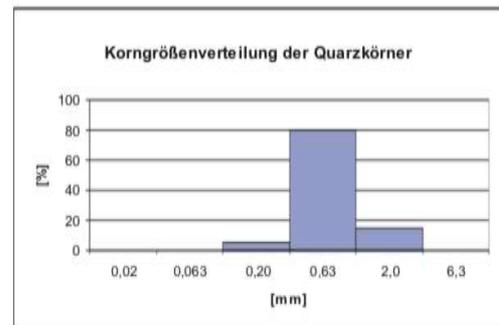
Mineralgehalt:	Bindemittel:
Quarz 75 Vol.-%	Kaolinitisch , z.T. dolomitischer
Kaolinit 15 Vol.-%	Zement
Dolomit 6 Vol.-%	Gefüge:
<i>Feldspäte:</i>	Dolomit nesterartig verteilt
Albit 2 Vol.-%	
Mikroclin 2 Vol.-%	

Entnahmbereich: Joch 8 Südseite; Bohrkern 9 (Sockelaußenseite)

HOFMATERIAL



1000 µm

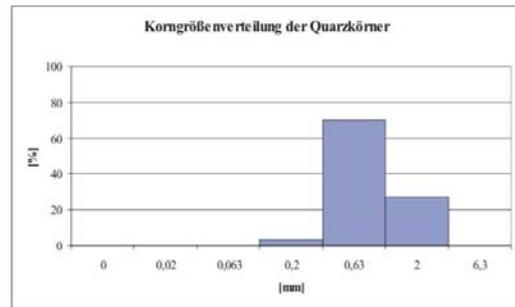
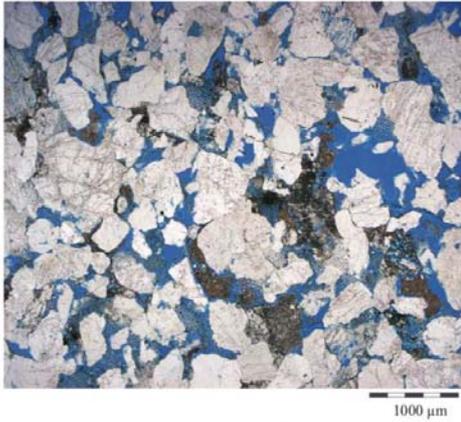


Gesamtporosität	16,9 Vol.-%
Permeabilität	mD

Mineralgehalt:	Bindemittel:	Bemerkungen: Das Bindemittel ist sehr inhomogen verteilt
Quarz 74- 78 Vol.-%	Kaolinitisch und dolomitisches Bindemittel (untergeordnet auch tonig)	
Kaolinit 8-10 Vol.-%	Gefüge:	
Dolomit 8-10 Vol.-%	selten idiomorphe Dolomitkristalle	
<i>Feldspat:</i>		
Mikroclin 3 Vol.-%		
Muscovit 3 Vol.-%		

Entnahmbereich: Joch 1 Hofmaterial

Verwittertes Material



Gesamtporosität	12,9 Vol.-%
Permeabilität	zu wenig Probenmaterial

Mineralgehalt		Bindemittel
Quarz	80 Vol.-%	Kaolinitisch untergeordnet tonig
Kaolinit		
Dolomit		
Feldspat (Albit)		
Muscovit		Gefüge: Dolomit in Nestern, Risse durch die Quarzkörnern

Entnahmebereich: Joch 7, Nordseite; Bohrkern 11 (Maßwerkinnenseite)

Betrachtet man die Kernmaterialien so lassen sich anhand der Mineralanteile folgende Unterschiede erkennen:

Zunächst besitzen alle 6 Schichten als Hauptkomponenten Quarz, gefolgt von Kaolinit und Dolomit. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrem Feldspatanteilen:

Gruppe 1 besitzt nur Albit

Gruppe 2 und 6 besitzen Albit und Mikroklin

Gruppe 3 und 5 besitzen keine Feldspäte

Gruppe 4 besitzt nur Mikroklin und das Hofmaterial zusätzlich noch Muscovit

Zusätzlich zur prozentualen Korngrößenanalyse wurden die Auswertungen der Bildanalyse (Minimal-, Maximal- und Durchschnittswert) den Kernmaterialien gegenüber gestellt. Die Einteilung der Sandsteinproben erfolgte nach DIN 4022.

Tabelle 19: Gegenüberstellung der Korngrößenanalysen

Bohrkern	Position	Korngröße Min/max	Ø	Einteilung	Korngröße [%]			Einteilung
					0,063- 0,20mm	0,20- 0,63mm	0,63- 2,00mm	
2	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, innen	0,16/1,30	0,58	mittel- bis grobkörnig	7	58	35	mittel- bis grobkörnig
4	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, außen	0,18/1,64	0,53	mittelkörnig	8	58	34	mittel- bis grobkörnig
5	Joch 11, Nordseite	0,20/0,90	0,54	mittelkörnig	2	70	28	mittelkörnig
6	Seitenschiff, außen	0,12/1,10	0,41	mittelkörnig	9	73	17	mittelkörnig
7	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, innen	0,26/1,30	0,63	grobkörnig	---	58	42	mittel- bis grobkörnig
9	Joch 8, Südseite Seitenschiff, außen	0,10/1,05	0,49	mittelkörnig	3	79	18	mittelkörnig
10	Joch 8, Südseite Seitenschiff, innen	0,10/1,00	0,47	mittelkörnig	7	77	16	mittelkörnig
Hof- material		0,14/1,00	0,45	mittelkörnig	5	80	15	mittelkörnig
11	Joch 7, Nordseite Seitenschiff innen	0,12/1,18	0,50	mittelkörnig bis grobkörnig	3	70	27	mittelkörnig

Dabei wird deutlich, dass sich einige Bohrkern von mittelkörnigen in den mittel- bis grobkörnigen Bereich verschieben.

Betrachtet man alle mikroskopischen Ergebnisse, so kann festgestellt werden, dass es sich bei den Schlaitdorfer Sandsteinproben um eine Varietät handelt, die aufgrund von Korngrößenunterschieden Übergangsschichten zeigt.

Die dünnstufmikroskopische Untersuchung der äußeren Zonen lässt folgende Verwitterungsphänomene erkennen:

- Mikrorisse in den äußeren Zonen (bis in ca. 4mm Tiefe)
- Serizitisierung (Verwitterung) der Feldspäte,
- Dedolomitisierung (Rückwitterung),
- Salzkristalle und
- höhere Gesamtporosität gegenüber dem Kernmaterial

STOFFLICHE UNTERSUCHUNGEN

Die Gesamtporosität wurde zunächst über die Durchlichtmikroskopie bestimmt. Parallel hierzu wurden Messungen mit Hilfe der Quecksilberhochdruckporosimetrie vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 20 und den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

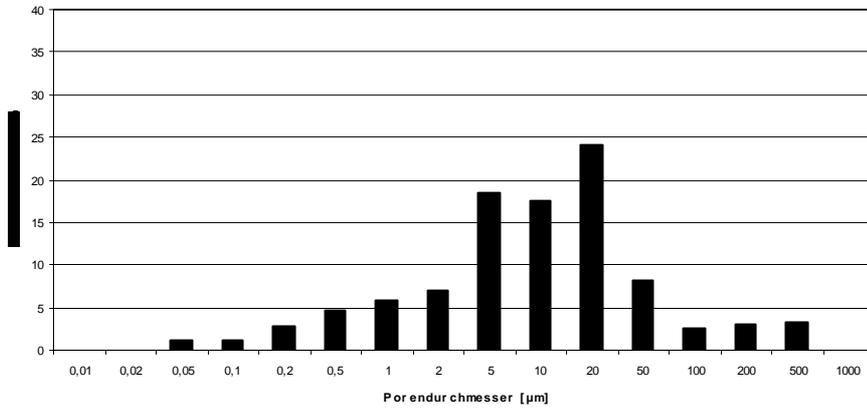
Tabelle 20: Ergebnisse der Porositätsmessungen des Kernmaterials

Bohrkern	Joch	Mikroskopie [Vol.-%]	Hg-Porosimetrie [Vol.-%]
1	Joch 3, Nordseite Seitenschiff, innen	18,5	13,9
2	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, innen	10,0	10,7
3	Joch 9, Nordseite	n.b.	11,9
4	Seitenschiff, außen	7,5	11,8
5	Joch 11, Nordseite	12,0	16,5
6	Seitenschiff, außen	8,4	16,8
7	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, innen	17	16,7
8	Joch 8, Südseite	12	16,2
9	Seitenschiff, außen	12	16,5
10	Joch 8, Südseite Seitenschiff, innen	12	13,6
11	Joch 7, Nordseite Seitenschiff innen	13	15,9
Hofmaterial	(Joch 1, Südseite)	16,9	14,7

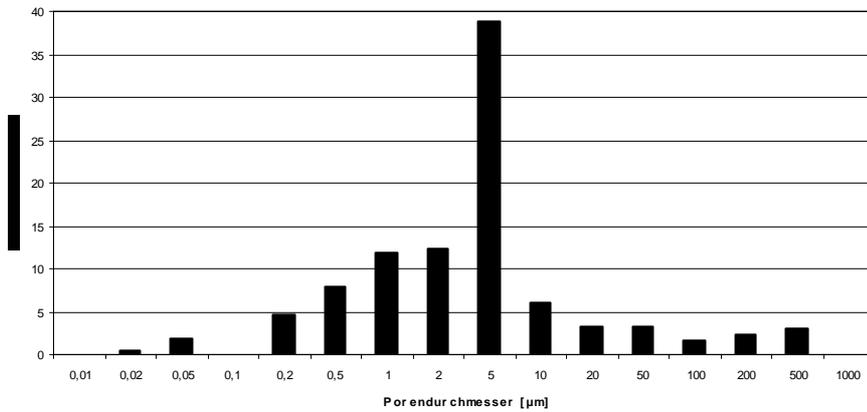
Wie die Ergebnisse zeigen stimmen die Messungen zunächst weitestgehend überein. Auffällig sind jedoch bei Bohrkerne 4 und 6 die über die Mikroskopie ermittelten, niedrigeren Messwerte. Dies wird dadurch erklärt, dass mit Hilfe der beiden Untersuchungsmethoden unterschiedliche Porendurchmesser erfasst werden. Während die Durchlichtmikroskopie Porengrößen zwischen ca. 25µm und 25mm erfasst, werden mit Hilfe der Quecksilberhochdruckporosimetrie 1nm und max. 1mm gemessen (Grimm 1990).

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Porendurchmesserverteilung in % für ausgewählte Porendurchmesserbereiche aufgeführt.

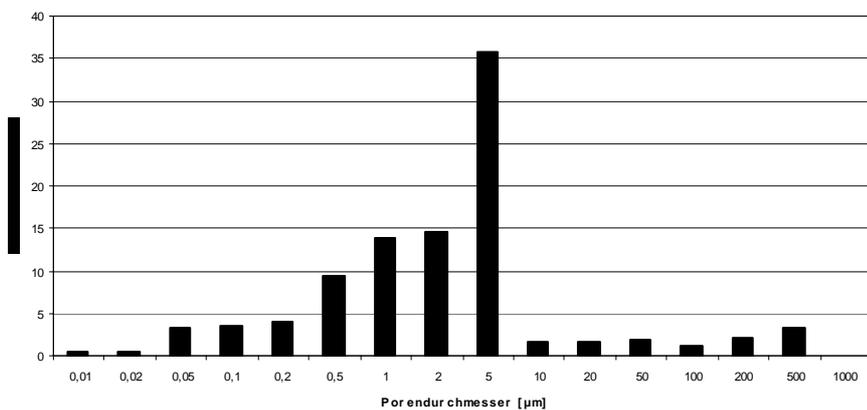
Schlaitdorfer Sandstein (BK 1)
Gesamtporosität 13,9 Vol.-%



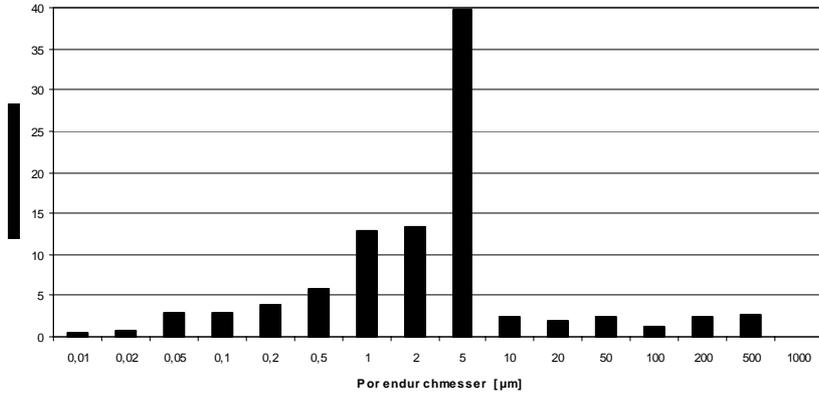
Schlaitdorfer Sandstein (BK 2)
Gesamtporosität 10,7 Vol.-%



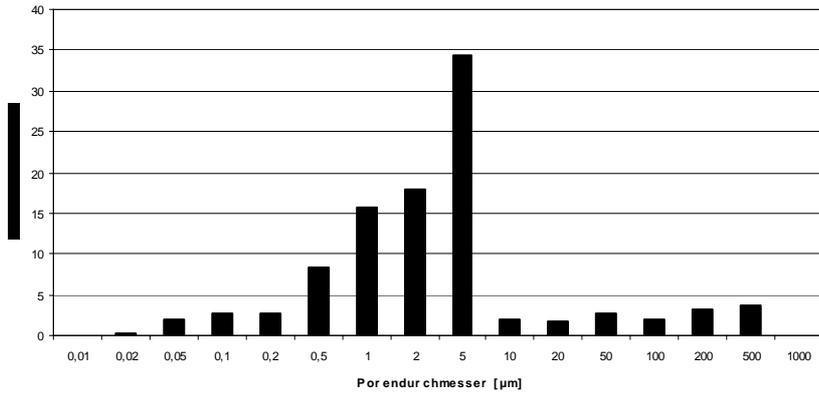
Schlaitdorfer Sandstein (BK 3)
Gesamtporosität 11,9 Vol.-%



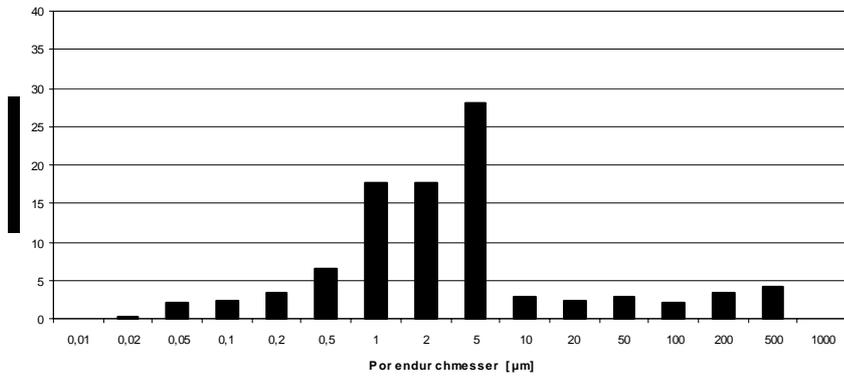
Schlaitdorfer Sandstein (BK 4)
Gesamtporosität 11,8 Vol.-%



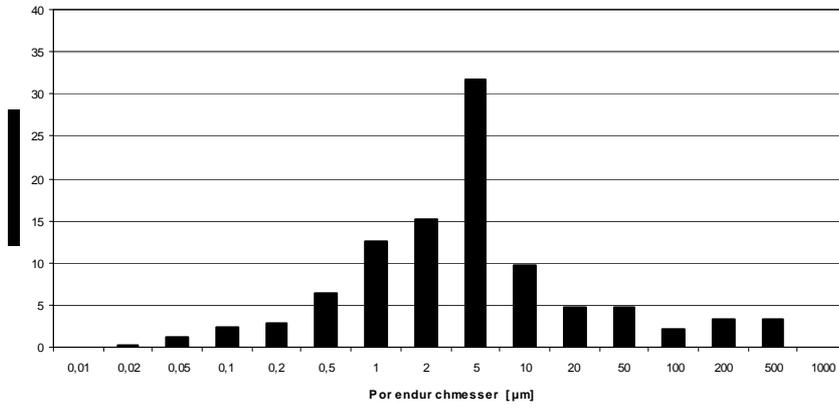
Schlaitdorfer Sandstein (BK 5)
Gesamtporosität 16,5 Vol.-%



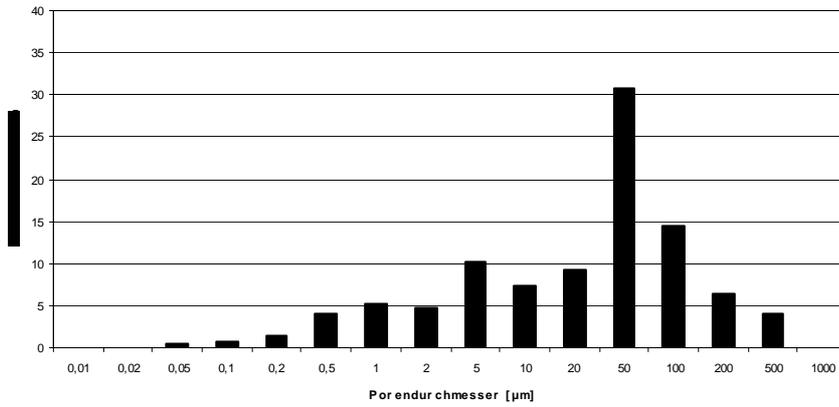
Schlaitdorfer Sandstein (BK 6)
Gesamtporosität 16,8 Vol.-%



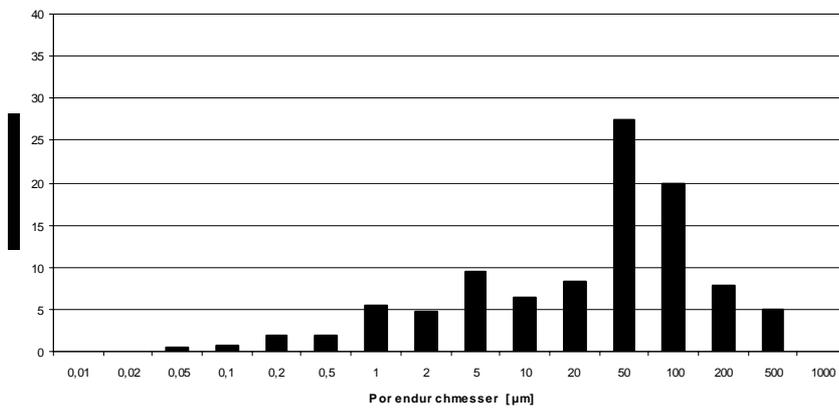
Schlaitdorfer Sandstein (BK 7)
Gesamtporosität 16,7 Vol.-%



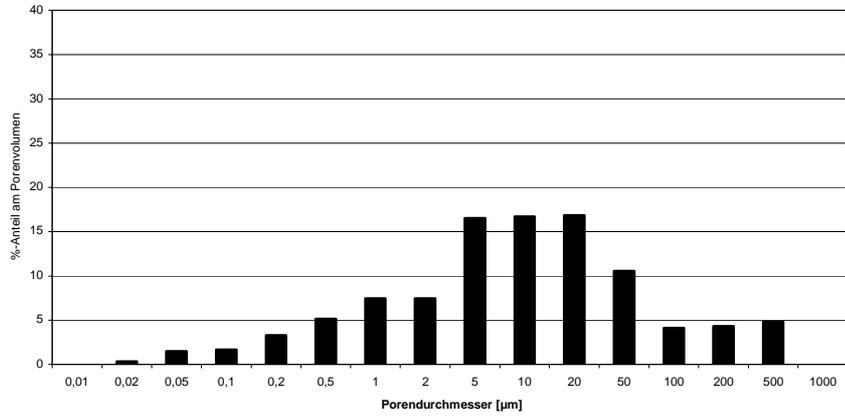
Schlaitdorfer Sandstein (BK 8)
Gesamtporosität 16,2 Vol.-%



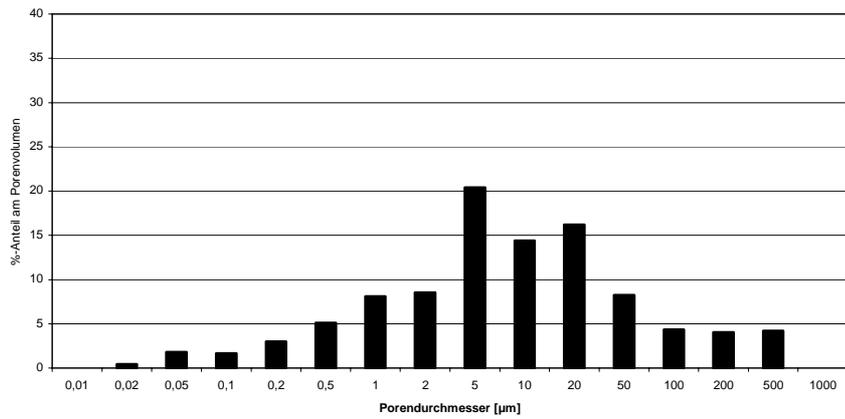
Schlaitdorfer Sandstein (BK 9)
Gesamtporosität 16,5 Vol.-%



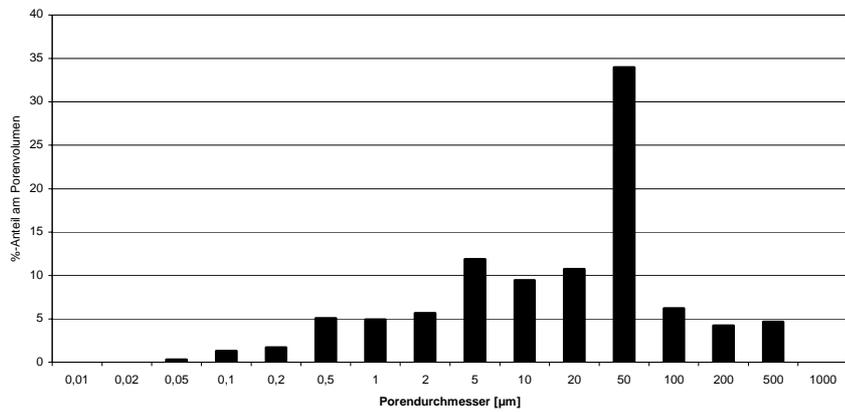
Schlaitdorfer Sandstein (BK 10)
Gesamtporosität 13,6 Vol.-%



Schlaitdorfer Sandstein, (Hofmaterial)
Gesamtporosität 14,7 Vol.-%



Schlaitdorfer Sandstein (BK 11)
Gesamtporosität 15,9 Vol.-%



Vergleicht man die Verteilung der Porendurchmesser, so liegen die Bohrkern 2, 3 und 4 in einer Gruppe der Porendurchmesser mit vergleichbaren prozentualen Porenanteilen. Noch deutlicher wird dies bei den Bohrkern 5, 6 und 7. Bei beiden Gruppen lassen sich auch ähnliche Korngrößenverteilungen der Quarzminerale feststellen. Bei den Bohrkern 1, 8, 9, 10, Hofmaterial und 11 verschieben sich die Porendurchmesser zu größeren Poren hin ($> 10\mu\text{m}$).

An einigen ausgewählten Bohrkern wurden von der Firma Jbach Steinkonservierung, Bamberg Permeabilitätsmessungen (Luftmessungen) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 21 aufgelistet.

Tabelle 21: Permeabilitätsmessungen

Bohrkern	Joch	Permeabilität [mD]
3	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, außen	19
		26
4		22
5	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, außen	71
		74
6		109
7	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, innen	55
8	Joch 8, Südseite Seitenschiff, außen	wegen zu hoher Permeabilitäten nicht messbar
9		wegen zu hoher Permeabilitäten nicht messbar
Hofmaterial	(Joch 1, Südseite)	257
		449

Wie die Tabelle 21 zeigt, liegen die Permeabilitätswerte zwischen 19 und 74mD, lediglich Bohrkern und das Hofmaterial zeigt eine leicht erhöhte Permeabilität.

Bei Bohrkern 8 und 9 ist die Permeabilität so hoch, dass sie nicht mehr messbar war.

6.1.2.2 Bestimmung ausgewählter physikalischer Kennwerte

An ausgewählten Bohrkernabschnitten wurde die kapillare Wasseraufnahme nach DIN 52 617 gemessen. Dabei wird die Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit gemessen und anschließend der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) berechnet.

Von dem Hofmaterial konnten aufgrund des größeren Probestücks zusätzlich Vergleichsmessungen an Würfeln vorgenommen werden.

In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse sowie die Bewertung der Messungen aufgeführt. Die Bewertung in w-Wert-Klassen wurde folgendermaßen nach Snethlage (1997) vorgenommen:

- gering saugend: $w < 0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
- mittel saugend: $w = 0,5\text{-}3,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
- stark saugend: $w > 3,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$

Tabelle 22: Ergebnisse der w-Wert Berechnung

Probe	Joch	Durchtränkung nach [h]	w-Wert [kg/m²h^{0,5}]	Bewertung [nach Snethlage,1997]
Bohrkern 2	Joch 9, Nord innen	3	0,88	mittel saugend
Bohrkern 3	Joch 9 Nord außen	23	0,5	gering saugend
		23	0,47	gering saugend
Bohrkern 4		24	0,49	gering saugend
		23	0,49	gering saugend
Bohrkern 5	Joch 11 Nord außen	4,3	2,33	mittel saugend
		3,3	2,69	mittel saugend
Bohrkern 6		3	3,2	stark saugend
		3,2	2,82	mittel saugend
Bohrkern 7	Joch 11 Nord innen	2	2,86	mittel saugend
		2	2,44	mittel saugend
Bohrkern 8	Joch 8 Süd außen	2	3,69	mittel saugend
Hofmaterial		2	2,76	mittel saugend
		2	2,08	mittel saugend
		3	2,43	mittel saugend
		23	0,89	mittel saugend
		2	2,64 (W)	mittel saugend
		2	2,96(W)	mittel saugend
		3	2,57(W)	mittel saugend
Bohrkern 11	Joch 7 Nord innen	0,5	5,25	stark saugend

(W) = Würfel

In der Regel handelt es sich um „mittel saugende“ Sandsteine, die in etwa 3 Stunden kapillar durchtränkt sind. Auffällig sind die Proben aus Joch 9 (Bohrkern 3 und 4), die als „gering saugend“ (nach 24 Std.) eingestuft werden.

Als „stark saugend“ wird der Bohrkern 11 aus dem Joch 7 bewertet. Betrachtet man die Porendurchmesser-Verteilung, so zeigt diese Probe eine deutliche Verschiebung zu größeren Poren hin.

Die bei der prozentualen Verteilung der Porendurchmesser auftretenden Gruppen lassen sich in der Tendenz auch mit dem w-Wert darstellen.

6.1.2.3 Bestimmung der wasserlöslichen Salze

An ausgewählten Maßwerksbrüstungen wurden Bohrmehlproben im Tiefenprofil entnommen, um so die Belastung der Natursteine durch bauschädlichen Salze ermitteln zu können. Die ist im Hinblick auf geplante Restaurierungsmaßnahmen wichtig.

Tabelle 23: Bestimmung der bauschädlichen Salze

3 Nord (innen nach außen)				
Probe	Entnahmetiefe [cm]	Sulfat [%]	Nitrat [%]	Chlorid [%]
1-1	0-1	0,06	0,09	0,02
1-2	1-2	0,07	0,07	0,02
1-3	2-4	0,19	0,06	0,01
1-4	4-7	0,25	0,07	0,02
1-5	7-10	0,26	0,07	0,02
7 Nord (innen nach außen)				
2-1	0-1	0,05	0,05	0,02
2-2	1-2	0,05	0,06	0,02
2-3	2-4	0,07	0,07	0,02
2-4	4-7	0,09	0,07	0,02
9 Nord (außen nach innen)				
3-1	0-1	3,06	0,02	0,005
3-2	1-2	0,26	0,01	0,004
3-3	2-4	0,02	0,005	0,003
3-4	4-7	0,01	0,002	0,002
3-5	7-9 (Eisen!)	0,02	0,001	0,003
9 Nord (außen nach innen)				
4-1	0-1	2,20	0,03	0,01
4-2	1-2	0,05	0,02	0,006
4-3	2-4	0,02	0,01	0,004
4-4	4-7	0,03	0,002	0,003
4-5	7-10	0,01	0,002	0,002
9 Nord (innen nach außen)				
5-1	0-1	0,02	n.n.	0,002
5-2	1-2	0,01	n.n.	0,002
5-3	2-4	0,004	n.n.	0,002
5-4	4-7	0,006	n.n.	0,002
5-5	7-10	0,006	n.n.	0,002

n.n. = nicht nachweisbar

Fortsetzung von Tabelle 23:

11 Nord (außen nach innen)				
Probe	Entnahmetiefe [cm]	Sulfat [%]	Nitrat [%]	Chlorid [%]
6-1	0-1	4,72	0,04	0,01
6-2	1-2	0,15	0,02	0,01
6-3	2-4	0,04	0,01	0,004
6-4	4-7	0,02	0,004	0,003
6-5	7-10	0,02	0,004	0,003
11 Nord (außen nach innen)				
7-1	0-1,5	0,91	0,01	0,006
7-2	1,5-2	0,11	0,002	0,004
7-3	2-4	0,04	0,003	0,003
7-4	4-7	0,02	0,003	0,002
7-5	7-10	0,21	n.n	0,002
11 Nord (innen nach außen)				
8-1	0-1	0,05	0,004	0,003
8-2	1-2	0,02	n.n	0,002
8-3	2-4	0,01	0,003	0,002
8-4	4-7	0,01	0,004	0,005
8-5	7-10	0,01	0,005	0,003
8 Süd (außen nach innen)				
9-1	0-1	0,91	n.n	0,003
9-2	1-2	0,05	n.n	0,002
9-3	2-4	0,02	0,001	0,005
9-4	4-7	0,02	0,001	0,002
9-5	7-10	0,02	0,001	0,002
8 Süd (außen nach innen)				
10-1	0-1	0,88	0,003	0,004
10-2	1-2	0,004	0,002	0,002
10-3	2-4	0,001	n.n	0,002
10-4	4-7	0,001	n.n	0,002
10-5	7-10	0,001	n.n	0,002
8 Süd (innen nach außen)				
11-1	0-1	0,04	0,01	0,005
11-2	1-2	0,56	0,02	0,005
11-3	2-4	0,18	0,02	0,004
11-4	4-7	0,03	0,01	0,004
11-5	7-10	0,02	0,02	0,004

n.n. = nicht nachweisbar

Insgesamt sind die Sulfatanteile als gering einzustufen. Nur bei einigen Proben findet man in den ersten 10mm erhöhte Sulfatanteile, die auf eine Oberflächenverschmutzung hindeuten. Es sind dies die Proben aus Joch 8 (Süd), Joch 9 und 11 (Nord).

Die Chlorid- und Nitratanteile sind in allen Proben als gering zu bewerten.

6.1.2.4 Früher durchgeführte Untersuchungen

I) Untersuchungsbericht FMPA Qualitätskontrolle mit zerstörungsfreien bzw. -zerstörungsarmen Maßverfahren zur schnellen Ermittlung der Qualität von Werksteinen aus dem Stubensandstein vom Bruch Pliezhausen (Steinbruchbetrieb Fauser) (Grassegger et. al) 13.05.1996. Stubensandstein Bruch Pliezhausen

Prüfung	Werte	Bemerkungen
Ultraschall	3,3 km/s	Sehr dichte feinkörnige Varietäten
	2,92 km/s	Parallel zur Schichtung bei deutlichen
	2,7 km/s	Senkrecht zur Schichtung Schichtungen
	2,6 – 2,9 km/s	Bei Proben mit deutlichen Fehlstellen, Löchern erhöhter Porosität
	3,6 km/s	Bei sehr gut zementierten Proben
Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN 52 103	4 – 6,5 Gew.-%	Relativ stark saugend Aber relativ kurze Trocknungszeiten

II) Untersuchungsbericht FMPA Ulmer Münster Bauabschnitt Südturm 05.03.1998
Werte zu Schlaitdorfer Sandstein von Pfeiler 18, stark verwittert (Grassegger et al.)

Prüfung	Werte			Bemerkungen
Mineralbestand	Quarz Dolomit 15% Kaolinit-Zemente 6-7%			Verwitterte Probe
Lösliche Salze	Chlorid (M.-%)	Nitrat (M.-%)	Sulfat (M.-%)	
	0,002	0,001	0,008	Gut erhaltene Probe
	0,002	0,001	1,105	Schadhaft
Wasseraufnahme	5,01 M.-%			Schwach verwittert
	5,19 M.-%			Mittelstark verwittert
	6,37 M.-%			Stark verwittert
Porosität (errechnet)	11,52			Schwach verwittert
	11,94			Mittelstark verwittert

Ergänzung zum Bericht

Probe	optischer Mineralbestand (grob geschätzt)	Korngröße	Gefüge und Bindemittel	Porosität geschätzt	Besonderheiten
Schlaitdorfer stark verwittert	50% Quarz 20-30% Dolomit 10 % Feldspäte Rest Tonminerale, Glimmer etc.	ca. 0,7 bis 1,2mm	Dolomit bildet Nester und häufig Zemente	20 –25%	Dolomitzemente häufig aufgelöst, Tonmineralbereiche gestört, Residuale

Probe	optischer Mineralbestand (grob geschätzt)	Korngröße	Gefüge und Bindemittel	Porosität geschätzt	Besonderheiten
Schlaitdorfer mittel stark verwittert	Wie oben, etwas weniger Dolomit, dafür mehr Tonminerale	Wie oben	Wie oben	ca. 20 %	Dolomite etwas weniger aufgelöst
Schlaitdorfer schwach verwittert	30% Dolomit 50 % Quarz 10-15% Feldspäte, Rest s.o.	Wie oben	Wie oben, Quarz z.T. aber sehr gut zementiert, Dolomit noch gut zementiert	Ca. 20%	Sehr wenig Anlösungsgefüge auch Dolomit gut erhalten

6.1.2.5 Zusammenfassende Darstellung der Kennwerte der Natursteine an den Brüstungselementen des Ulmer Münsters

Wie die Schadensdokumentation zeigt, weisen das Joch 7 Nord die stärksten Schäden auf; gefolgt von Joch 8 und 11 Nord sowie Joch 3 Süd. Etwas geringere Schäden zeigt Joch 8 Süd. Die übrigen Joche sind in ihrer Schadensintensität vergleichbar.

Aufgrund der Schadenskartierungen würden die Brüstungselemente der Joche 7, 8 und 11 für eine Restaurierung und Acrylharzvolltränkung in Frage kommen.

Für die gemessenen Brüstungsbereiche geben sich folgende Schallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Schadens:

Istzustand	Joch 3, Nord	Joch 9, Nord	Joch 11, Nord	Joch 8, Süd
Intakt	2308 – 2642m/s	2652 – 3097m/s	2647 – 3000m/s	2320 – 2514m/s A 2742 – 3020m/s M
Absanden (MV: 2-4mm)		2841 – 3170m/s	2586 – 2922m/s	2143m/s A 2815 – 3169m/s
Absanden (MV: 5-8mm)				2778 – 3082m/s
Absanden (MV: >8mm)		2121 – 2841m/s		2891 – 3000m/s
Abschuppen		1271 – 1923m/s		
dicke Schmutzkruste	2215 - 2472m/s		2695m/s	
aufblätternde Schmutzkruste			1800m/s	

MV = Materialverlust; A = Abdeckung ; M = Maßwerk

Wie die Messergebnisse zeigen, lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen dem intakten und geschädigten Bereichen erkennen. Dies trifft vor allem für die Partien zu, die bei dem Istzustand Absandungen deutliche Materialverluste aufweisen. Hier ist die geschädigte Oberfläche bereits abgewittert und man trifft sozusagen wieder auf das Kernmaterial.

Deutlich niedrigere Werte Bereiche mit Abschuppungen oder aufblätternder Schmutzkruste.

Das Hofmaterial besitzt Schallgeschwindigkeiten zwischen 3198 – 3343m/s.

Diese Messungen können auch am Ulmer Münster für einen relativen Vergleich nach der Instandsetzung (z.B. Acrylharzvolltränkung) herangezogen werden.

Insgesamt sind die Sulfatanteile als gering einzustufen. Nur bei einigen Proben findet man in den ersten 10mm erhöhte Sulfatanteile, die auf eine Oberflächenverschmutzung hindeuten. Es sind dies die Proben aus Joch 8 (Süd), Joch 9 und 11 (Nord).

Die Chlorid- und Nitratanteile sind in allen Proben als gering zu bewerten.

Die außerdem gemessenen Materialkennwerte wurden in den Tabellen 20 und 21 zusammengestellt. Dabei wurde zwischen unverwittertem und verwittertem Material unterschieden.

Tabelle 24: Materialkennwerte Ulmer Münster

Bohrkern	Position	makroskopische Körnung	Gesamtporosität Hg-Porosimetrie [Vol.-%]	Permeabilität [mD]	w-Wert [kg/m ² h ^{0,5}]	Bewertung [nach Snethlage,1997]	Wa [Gew.-%]	hygrische Dehnung [mm/m]
1	Joch 3, Nordseite Seitenschiff, innen	mittelkörnig	13,9	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0,41
2	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, innen	mittel- bis grobkörnig	10,7	n.b.	0,88	mittel saugend	2,9	0,16
3	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	11,9	19 26	0,50 0,47	gering saugend gering saugend	6,9 6,6	n.b.
4		mittelkörnig	11,8	22	0,49 0,49	gering saugend gering saugend	6,8	0,11
5	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	16,5	71 74	2,33 2,69	mittel saugend mittel saugend	9,9 9,9	n.b.
6		mittelkörnig	16,8	109	3,20 2,82	stark saugend mittel saugend	10,1 4,6	0,02
7	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, innen	grobkörnig	16,7	55	2,86 2,44	mittel saugend mittel saugend	9,7 4,1	n.b.
8	Joch 8, Südseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	16,2	wegen zu hoher Permeabilitäten nicht messbar!	3,69	mittel saugend	10,0	n.b.
9		mittelkörnig	16,2	wegen zu hoher Permeabilitäten nicht messbar!	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
10	Joch 8, Südseite Seitenschiff, innen	n.b.	13,2		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Hofmaterial		mittelkörnig	14,7	257 499	2,76 2,08 2,43 0,89 2,64 (W) 2,96(W) 2,57(W)	mittel saugend mittel saugend mittel saugend mittel saugend mittel saugend mittel saugend	8,8 6,9 7,2 (W) 7,2 (W) 7,2 (W) 8,4 (W) 8,5 (W)	0,07 0,09 0,10 0,07 0,07
11	Joch 7, Nordseite Seitenschiff, innen	mittelkörnig	15,6	n.b.	5,25	stark saugend	4,27	n.b.

n.b. = nicht bestimmt

Tabelle 25: Materialkennwerte des verwitterten Materials am Ulmer Münster

Bohrkern	Position	makroskopische Körnung	Gesamtporosität* [Vol.-%]	Gefüge
1	Joch 3, Nordseite Seitenschiff, innen	mittelkörnig	18,5	Dolomit nesterartig verteilt, partiell Rötffärbung
3	Joch 9, Nordseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	15,4	wenig dolomitischer Zement
5	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	16,4	wenig kaolinitisches Bindemittel, dolomitischer Zement
7	Joch 11, Nordseite Seitenschiff, innen	Grobkörnig	19,0	große Dolomitkristalle nesterartig verteilt
8	Joch 8, Südseite Seitenschiff, außen	mittelkörnig	17,8	Dolomit nesterartig verteilt, selten idiomorphe Kristalle
11	Joch 7, Nordseite Seitenschiff, innen	mittelkörnig	12,9	erste Gefügeauflöckerungen, Dolomit in Nestern

* Werte aus den Blättern der mikroskopischen Beschreibung

Wie die petrografischen Untersuchungen gezeigt haben, handelt es sich bei den verbauten Schlaitdorfer Sandsteinen um eine Varietät, die Übergangsschichten aufweist. Diese äußern sich in der unterschiedlichen Quarz-Korngröße. Insgesamt ist diese Varietät als mittel- bis grobkörnig einzustufen.

Vergleicht man die Verteilung der Porendurchmesser der Kernmaterialien, so liegen die Bohrkerne 2, 3 und 4 in einer Gruppe der Porendurchmesser mit vergleichbaren prozentualen Porenanteilen. Noch deutlicher wird dies bei den Bohrern 5, 6 und 7. Bei beiden Gruppen lassen sich auch ähnliche Korngrößenverteilungen der Quarzminerale feststellen.

Bei den Bohrern 1, 8, 9, 10, Hofmaterial und 11 verschieben sich die Porendurchmesser zu größeren Poren hin ($> 10\mu\text{m}$).

Vergleicht man die Werte der mikroskopisch ermittelten Gesamtporositäten in Tabelle 21 (verwitterte Proben) mit denen aus der Tabelle 17 (unverwittertes Material), so zeigt sich in den meisten Fällen eine deutliche Erhöhung der Porositäten im verwitterten Bereich. Nur der Bohrer 1 zeigt keine Veränderung. Die ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass in der mikroskopischen Betrachtung das Gefüge keine deutlichen Veränderungen erkennen ließ.

Die bei der prozentualen Verteilung der Porendurchmesser auftretenden Gruppen lassen sich in der Tendenz auch mit dem w-Wert darstellen. In der Regel handelt es sich um „mittel- bis stark saugende“ Sandsteine, mit Ausnahme einiger weniger Proben, die als gering saugend eingestuft werden mussten. Die hygrische Dehnung liegt zwischen 0,02 bis 0,16mm/m. Eine Sonderstellung nimmt der Bohrer 1 ein, mit einem Messwert von 0,41mm/m. Dieses ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass das Material vorwiegend Quarz-Korn-Korn-Kontakte aufweist.

Die in der Literatur (Grassegger) beschriebene Auflösung der Dolomit konnte bei unseren untersuchten Proben nicht festgestellt werden.

7 Erprobung und Modifizierung der Sägetechniken zum Ausbau der Brüstungselemente

An den beiden Münstern Freiburg und Ulm kommen starke Verwitterungsschäden an den Brüstungselementen aus dem Mittelalter, dem 19. Jh. und den 30er Jahren vor, die im erheblichen Maße auch auf die Umweltbelastungen und exponierte Lage der beiden Bauwerke zurückzuführen sind.

Es sind daher verschiedene restauratorische und konservierende Maßnahmen notwendig, um die originalen Brüstungselemente zu erhalten. Hierzu ist es erforderlich die Originalsubstanz ohne Materialschädigung auszubauen. Die Schwierigkeit bestand darin, dass die Brüstung nicht aus einem Element sondern aus den vertikal aufgestellten Maßwerksteinen, den horizontal aufgetragenen Abdeckern und den Fuß/Gesimsprofilteilen zusammengesetzt ist. Der Steinschnitt ist an den verschiedenen Brüstungen der beiden Münstern Freiburg und Ulm ganz unterschiedlich angelegt, so dass ein geeignetes Abbaukonzept zu erarbeiten ist, das den Verlust originaler Bausubstanz so gering wie möglich hält.

Ein weiteres Problem ist der Verband der Bauteile untereinander, die über Blei- und Mörtelfugen zusammengefügt sind. Die Bauteile müssen in diesen sehr schmalen Fugenbereichen aufgetrennt werden. Dabei müssen die Klammer- und Dübelverbindungen so getrennt werden, dass die Maßwerksteile nicht beschädigt werden.

In Zusammenarbeit mit einem Hersteller einer hydraulischen Wandsäge wurden in Freiburg und Ulm verschiedene Vorrichtungen zum Anbau der Sägeeinrichtung und der Sägevorgang selbst an die jeweiligen Gegebenheiten vorort angepasst.

7.1 Darstellung der Problemstellungen am Freiburger Münster Versuchsläufe und ihre Auswertung

7.1.1 Vorversuche

In einem Vorversuch wurden am Freiburger Münster im Juli 2002 über der 2. Kaiserkapelle Maßwerkteile aufgeschnitten. Für diese Arbeiten wurde eine Elektrowandsäge DS-TSS-E der Firma Hilti eingesetzt.

Nachfolgend werden Auszüge aus dem Protokoll vom 29.07.2002 des Werkmeisters Herr Leuschner, der Münsterbauhütte Freiburg wiedergegeben:

Das Gerät war zum Schneiden von folgenden Materialien vorgesehen: Sandstein, Dübel und Klammern aus Metall, Verbleiungen. Vorbereitend waren die Kapellenmaßwerke mit einem Hängegerüst eingerüstet worden. Es war ein Einrüstabstand von ca. 60cm eingehalten worden, damit die Ankopplung der Maschine problemlos möglich war.

Der Horizontalschnitt in der Mörtelfuge erfolgte schnell und genau. Die Staubentwicklung war nicht sehr groß, da gut abgesaugt werden konnte.

Auch die Klammern konnten schnell durchgesägt werden. Danach wurde das Blei geschnitten, was zu folgenden Problemen führte: der Bleiverguß wurde aus der Fuge herausgeschmiert; nach ca. 5cm Schnitttiefe wich das Sägeblatt in den angrenzenden Stein aus. Trotz Luftkühlung erhitze sich das Sägeblatt so stark, dass es sich verwarf. Die Sägezeit für die 16cm starke Abdeckung betrug fast 30 Minuten.

Fazit:

mit dem eingesetzten Sägeblatt ist das Aufsägen von reinen Bleifugen nicht möglich. Die von der Firma Hilti vorgeschlagene Alternative neben der Bleifuge in Stein zu schneiden, scheidet aus denkmalpflegerischen Gesichtspunkten aus. Die sehr lange Rüstzeit des Gerätes steht in keinem Verhältnis zur Schneidezeit. Das Sägeblatt bedarf einer Bleioptimierung, die einen exakten geradlinigen Schnitt erlaubt.



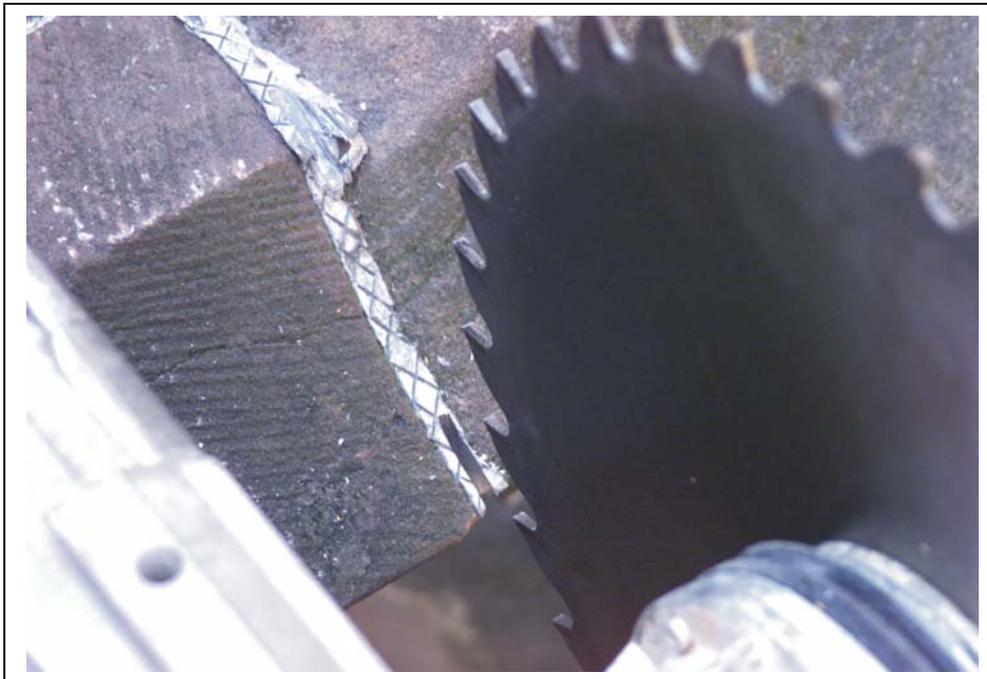
Zusammenbau der hydraulisch angetriebenen Wandsäge am Einsatzort.



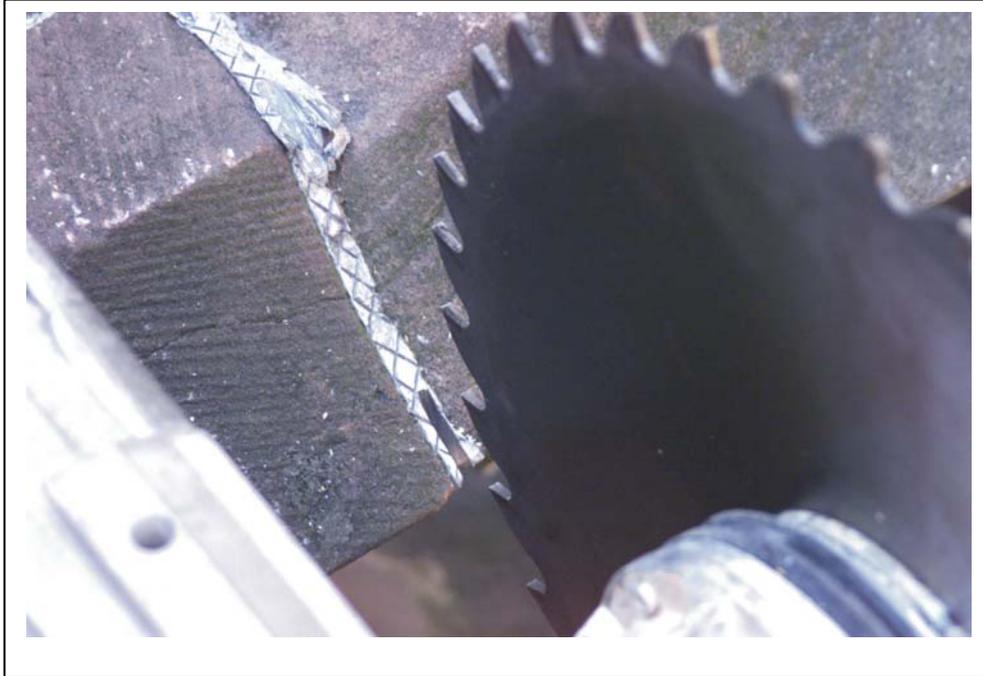
Einrichten und Befestigen der Schienentraverse mit einem gebauten Adapter.



Probelauf in der Bleifuge



Anschneiden des Bleivergusses und Einstellen der Schnittgeschwindigkeit



Schnitt in der Bleifuge mit überzeugendem Ergebnis. Die Verklammerung der Masswerksabdeckung wurde vorher mit der „Flex“ durchtrennt.

Zusätzlich wurde ein Bleisägeversuch mit ADAMANT Flex 2747 durchgeführt.

Bericht zum Bleisägeversuch vom 13. Februar 2003 des Werkmeisters Herr Leuschner, der Münsterbauhütte Freiburg

Hierbei handelt es sich um eine ADAMANT Flex (Typ 2747 der Firma Flex), die mit zwei gegenläufigen Sägeblättern arbeitet. Die Schränkung der hartmetallbesetzten Spezialblätter ist eine Sonderanfertigung der Firma Arentz, Remscheid zum Bleischneiden (herausfräsen).

Metallklammern aus Eisen, Kupfer oder Messing sollten nicht mit diesen Blättern durchtrennt werden, um die Standzeit der Blätter nicht zu verkürzen.

Der Schneideversuch ist zur vollsten Zufriedenheit ausgefallen, weshalb eine neue Flex mit frisch bestückten Blättern übernommen wurde. Bedingt durch die Bauart ist jedoch nur eine maximale Schnitttiefe von 7cm möglich.

Fazit:

- Das Gerät ist absolut tauglich mit den Spezialblättern
- Das Gerät läuft ohne jegliches Schlagen sauber im Schnitt
- Durch das erhöhte baubedingte Eigengewicht fräst sich das Sägeblatt mühelos durch die 6-8mm breiten Bleifugen.

Bleisägeversuch mit einer Hilti Säbelsäge

Im September 2003 wurde ein weiterer Versuch mit einer Elektrosäbelsäge (WSR 1200-PE Pendelhub-Säbelsäge der Firma Hilti) vorgenommen

Bericht zum Bleisägeversuch vom 5. Februar 2004 des Werkmeisters Herr Leuschner, der Münsterbauhütte Freiburg

Es wurde ein sehr grob gezahntes Holzsägeblatt eingesetzt (Typ W-CSRWF23 der Firma Hilti). Bevor man an die Bleifuge der Maßwerksabdeckung kam, wurde die Eisenklammer mit einer Flex durchtrennt. Das Sägeblatt verschmierte nicht, nur der Sägefortschritt war sehr langsam. Für das Aufschneiden benötigte man pro 10cm Bleifuge ca. 1Stunde. Trotzdem konnte - damit parallel zur gegenläufigen Bleikreissäge - eine weitere Möglichkeit zum schonenden Werkstückabbau erfolgreich getestet werden. Mit dieser Methode kann eine Sägeschnitttiefe von etwa 25 cm erreicht werden.





7.2 Darstellung der Problemstellungen am Ulmer Münster Versuchsläufe und ihre Auswertung

7.2.1 Vorversuche

Auch am Ulmer Münster wurde ein Vorversuch mit der Elektrowandsäge DS-TS5-E der Firma Hilti durchgeführt. Die Arbeiten fanden am 05.06.2002 am südlichen Chorturm statt.

Nachfolgend werden Auszüge aus dem Protokoll vom 05.06.2002 des Hüttenmeisters Herr Völkle, Münsterbauhütte Ulm wiedergegeben:

Ziel war auch hier mit Testschnitten zu sehen, ob mit der Säge die vorhandenen Materialien Stahl, Blei, Mörtel und Sandstein durchtrennt werden können. Außerdem sollten die Befestigungsmöglichkeiten der Säge am Gerüst getestet werden.

Die Testschnitte wurden am südlichen Chorturm, Viereckgalerie Nordseite durchgeführt. Ein Schnitt erfolgte horizontal zwischen Abdecker und Brüstung an den mittleren Elementen der Galerie (Mörtelfuge), zwei Schnitte vertikal in die Bleifuge der Abdecker. Hierfür waren kleinere Umbauarbeiten am Gerüst notwendig.

Vorzüge der Maschine:

- Alle vorhandenen Materialien wurden durchtrennt.
- Der Sägeschnitt ist mit 4mm sehr dünn und führt somit kaum zu einem Verlust der Originalsubstanz.
- Das Sägeblatt kann flächig am Stein entlang geführt werden. Dadurch müssten Vertikalschnitte zwischen Brüstung und dahinter liegendem Galeriebelag möglich sein.

Nachteile der Maschine:

- Das Montieren und Einrichten der Halterung dauert lange. Dies könnte evtl. durch eine Verbesserung der bisher provisorischen) Halterung erreicht werden.
- Die Staubentwicklung ist enorm, sie kann wahrscheinlich nur durch das Einhausen der Baustelle verhindert werden. Die Schutzhaube der Maschine könnte zur Staubabsaugung mit zwei Staubsaugeranschlüssen u.U. noch optimiert werden.
- Die Schnittwirkung in Blei konnte noch nicht hundertprozentig nachgewiesen werden. Wichtig erscheint hier die Kühlung der Schnittfläche durch Druckluft zu sein, um ein Verschmieren des Sägeblattes zu verhindern. Evtl. könnte durch das gleichzeitige Schneiden in einem Sandsteinreststück das Verschmieren des Sägeblattes reduziert und gleichzeitig eine bessere Führung des Blattes erreicht werden.

Fazit:

Prinzipiell erscheint die Maschine für den geforderten Einsatz geeignet zu sein. Die aufgelisteten Nachteile sind vermutlich ohne größeren Aufwand zu lösen.







Zusätzlich wurden Testschnitte mit dem Elektrofuchsschwanz der Firma Elu MSS 810 E am südlichen Chorturm sowie im Hof der Münsterbauhütte Ulm durchgeführt.

Nachfolgend werden Auszüge aus dem Protokoll vom 10.06.2002 des Hüttenmeisters Herr Völkle, Münsterbauhütte Ulm wiedergegeben:

Ziel der Testschnitte war es zu sehen, ob mit der Säge die vorhandenen Materialien Stahl, Blei und Mörtel in den Bereichen durchtrennt werden können, die mit der Wandsäge nicht oder nur mit großem Aufwand erreicht werden können. Die Testschnitte wurden am südlichen Chorturm, Viereckgalerie Nordseite sowie im Hof der Münsterbauhütte durchgeführt. An der Viereckgalerie wurde eine Mörtelfuge sowie eine Bleifuge jeweils vertikal durchtrennt, im Hof der Bauhütte wurde eine Bleifuge mit Eisendübel durchtrennt.

Vorzüge der Maschine:

- Alle vorhandenen Materialien wurden durchtrennt, allerdings müssen für die unterschiedlichen Materialien verschiedene Sägeblätter eingesetzt werden.
- Zum ersten Mal wurde auch ein hartmetallbestücktes Sägeblatt eingesetzt. Damit ist das Schneiden von Mörtel und Blei sehr gut möglich.
- Für den Eisendübel wurde ein Metallblatt verwendet, da hier die Hartmetallbestückungen sonst abgerissen werden.
- Die Länge des Sägeblattes kann eingestellt werden. So kann die Flatterneigung des Sägeblattes reduziert werden.
- Bei Bedarf kann die Säge mittels einer Kette am Werkstück fixiert und damit ruhiger geführt werden. Die Sägeblätter sind sehr dünn, das Durchtrennen dünnster Fugen ist möglich.

Nachteile der Maschine:

- Tauchschnitte sind nicht möglich. Somit ist immer ein Schnitt durch das komplette Werkstück notwendig.
- Die Führung der Maschine ist anstrengend, so dass nur kurze Schnittlängen möglich sind.
- Die Kosten für die hartmetallbestückten Sägeblätter sind sehr hoch (30 €/ Stck.)

Fazit:

Mit dem Elektrofuchsschwanz können die geforderten Schnitte gemacht werden. Allerdings ist der Einsatz auf kurze Sägeschnitte begrenzt. Als Ergänzung zur Wandsäge ist der Elektrofuchsschwanz jedoch sicherlich sinnvoll.

7.2.2 Darstellung der Problemstellung und Versuchsläufe mit Auswertung am Ulmer Münster

Die nachfolgend beschriebenen Sägeversuche wurden maßgeblich von der Münsterbauhütte Ulm betreut und in Zusammenarbeit mit dem Gerätehersteller durchgeführt.

Ulmer Münster, nördliches Seitenschiff

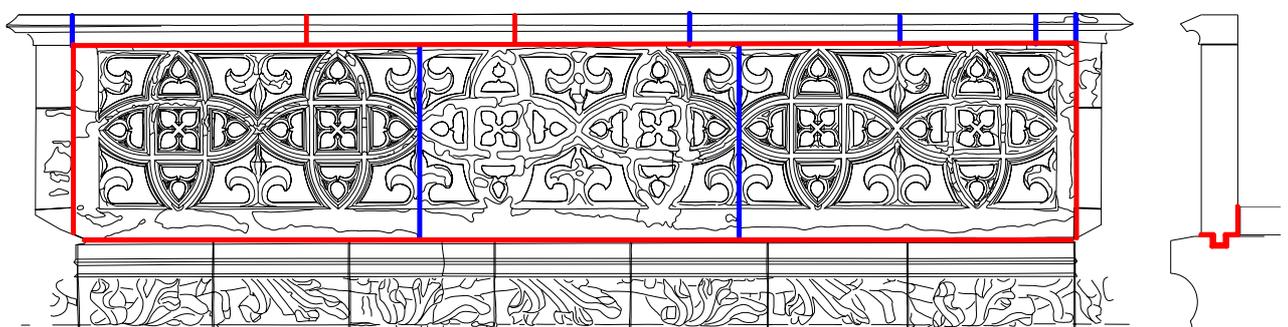
Ausbau der Brüstungselemente in Joch 7

Die Einbausituation der Brüstungselemente

Die Fugen der Brüstungselemente waren mit unterschiedlichen Materialien verfüllt: Alle Horizontalfugen waren mit Mörtel verfügt (rot), ebenso die Fugen an den Anschlüssen zu den Strebepfeilen rechts und links. Die Vertikalfugen der Brüstungselemente und Abdecker waren mit Blei (blau) vergossen, mit Ausnahme von zwei mit Mörtel verfügten vertikalen Fugen zwischen zwei Abdeckern. Die Fugendicke betrug zwischen 3 und 5 mm.



Fugenplan:



Mörtelfuge: —

Bleifuge: —

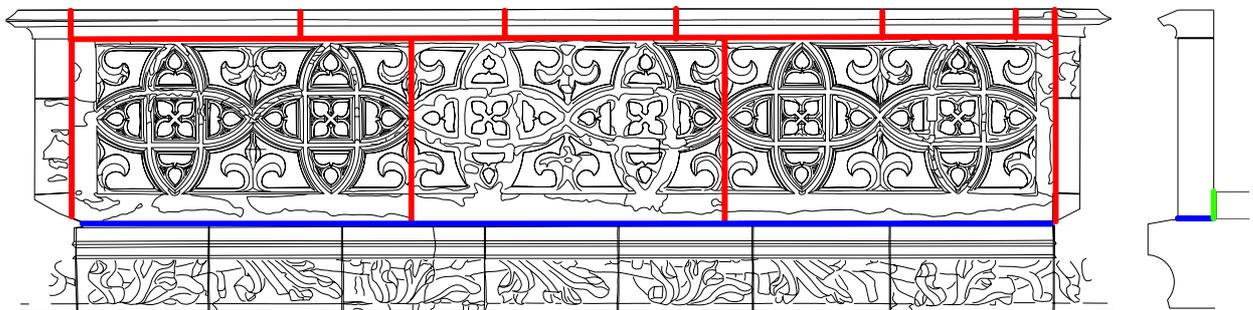
Die unterschiedlichen Sägetechniken

Das Aufsägen der unterschiedlichen Materialien sowie Fugensituationen erforderte ganz unterschiedliche Sägetechniken, da jeweils auf die Besonderheiten von Einbausituation und verwendetem Material Rücksicht genommen werden musste.

Folgende Sägen wurden eingesetzt:

1. Ein Elektrofuchsschwanz mit unterschiedlichen Sägeblättern zum Aufsägen folgender Fugen: Die mit Blei vergossenen Vertikalfugen (3 mm) der Abdecker (inkl. der Eisendübel) sowie der mit Mörtel vergossenen und verfugten Horizontalfugen zwischen Maßwerkbrüstung und Abdecker sowie Vertikalfugen der Maßwerkbrüstung
2. Die Flex zum Auftrennen der mit Mörtel verfüllten Vertikalfuge zwischen Maßwerkbrüstung und Galeriebelag
3. Eine Wandsäge zum Aufsägen der mit Mörtel verfüllten horizontalen Standfuge zwischen Maßwerkbrüstung und Gesims

Sägeplan:



Elektrofuchsschwanz: —

Wandsäge: —

Flex: —

Das Aufsägen der Fugen und der Ausbau der Abdecker

Für diesen Arbeitsschritt wurde ein Elektrofuchsschwanz der Fa. Elu eingesetzt.

Als erstes wurde am zweiten Abdecker von links die Horizontalfuge aus Mörtel aufgesägt, da es hier eine bereits offene, weiche Stelle gab. An dieser Stelle konnte das Sägeblatt ohne weiteres eingeführt und der Schnitt durchgeführt werden. Für den Mörtel wurde ein Sägeblatt der Fa. Hilti (HM Multicut) verwendet, das Besondere an diesen Sägeblättern ist der Besatz mit Hartmetallspitzen. Mit diesem

Blatt konnte bis an die mit Blei vergossenen Eisendübel gesägt werden, dann wurde das Sägeblatt gewechselt, da die Hartmetallspitzen bei der Berührung mit Eisen abgerissen werden. Die Eisendübel wurden mit Sägeblättern der Fa. Bosch (S 1122 VF BIM) durchtrennt. Nach der Horizontalfuge wurden die beiden Vertikalfugen aus Mörtel aufgesägt.

Bei allen Sägearbeiten mit dem Elektrofuchsschwanz wurden die Kanten und Flächen am Naturstein durch Klebeband gesichert, damit keine Schäden an der Oberfläche entstehen konnten.

Vor dem Auftrennen der Eisendübel musste der Abdecker in der Horizontalfuge mit kleinen Holzkeilen gesichert werden, damit er beim entgeltigen Durchsägen nicht nachrutschen und verkanten konnte. Mit diesen Keilen konnte er dann nach und nach hochgehoben und schließlich vorsichtig herausgehoben werden.

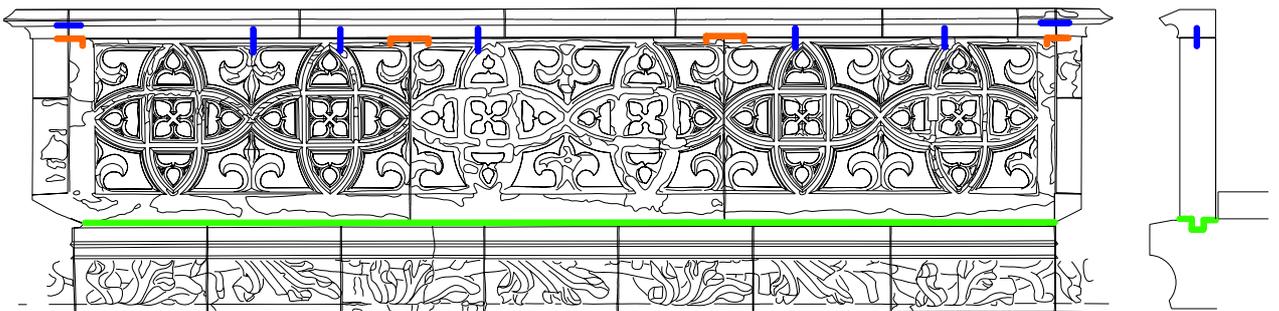
Auf diese Art wurden nun alle Abdecker ausgebaut, wobei der Ausbau des ersten Abdeckers am schwierigsten durchzuführen war. Die nachfolgenden Abdecker waren wesentlich einfacher auszubauen, da eine Seite bereits freigelegt war.





Beim Ausbau der Abdecker wurden folgende Dübel freigelegt:

Dübelplan:



Eisendübel (10 x 10 mm): —

Eisenklammer (6 x 18 mm): —

Steinzapfen: (ca. 60 x 60 mm) —

Das Aufsägen der Fugen an den Maßwerkbrüstungen

1. Das Aufsägen der Vertikalfugen

Nach dem Ausbau der Abdecker wurden im Oberlager der Maßwerkbrüstung die eingebauten Eisenklammern sichtbar. Diese wurden mit der Flex und einem Metallblatt durchtrennt.

Mit dem Durchsägen der vertikalen Bleifugen zwischen den Maßwerkbrüstungen folgte der schwierigste Teil der Sägearbeiten. Aufgrund der sehr dünn ausgearbeiteten Lilie im Maßwerk sowie der starken Verwitterungserscheinungen war hier der Stein nur noch etwa 20 mm stark. Durch das Festigen der Substanz war diese jedoch so stabil, dass die Bleifuge ohne Schäden zu verursachen durchtrennt werden konnte. Auch hier wurde der Elektrofuchsschwanz eingesetzt, wobei wieder das Sägeblatt der Fa. Hilti zum Einsatz kam. Dieses Blatt ist - neben dem Einsatz in Mörtelfugen - auch in Blei gut zu verwenden. Vor allem die groben Zähne ermöglichen ein „spanendes“ Schneiden, was durch die Zugabe von geringen Wassermengen mittels einer Sprühflasche noch verbessert werden konnte. D.h. dass in diesem Fall das Zusetzen/ Zuschmieren des Sägeblatts verhindert wurde.

Auch die beiden mit Mörtel gefüllten Vertikalfugen die den seitlichen Anschluss zum Mauerwerk bilden, wurden mit dem Elektrofuchsschwanz durchtrennt. Hier musste besonders das innenliegende Mauerwerk geschützt werden. Dies geschah durch ein dünnes Zinkblech (0,3 mm), das zwischen das Sägeblatt und Mauerwerk gehalten wurde, um ein Verkratzen der Oberfläche zu verhindern.



2. Das Aufsägen der Fuge zwischen Maßwerkbrüstung und Galeriebelag

Die mit Mörtel verfüllte Fuge zwischen Maßwerkbrüstung und Galeriebelag konnte nur mit einer handgeführten Flex geöffnet werden. Damit das Blatt möglichst nahe an den Brüstungselementen geführt werden konnte, musste es auf einem Stützflansch befestigt und mit einer Ausklink-Schutzhaube versehen werden. Auch hier musste die Steinoberfläche mit einem Zinkblech geschützt werden.



3. Das Aufsägen der Standfuge

Für das Aufsägen der Standfuge war ein hoher Aufwand erforderlich, da hier die herkömmlichen handgeführten Maschinen nicht verwendet werden konnten.

Zum Einsatz kam eine hydraulische Wandsäge WS 400 E der Fa. Cedima, bestückt mit einem 600 mm Wandsägeblatt Spezial für Trockenschnitt.

Vor allem die Befestigung der Säge am Gerüst bzw. am Bauwerk erwies sich als aufwendig, da keine Bohrungen in der Wand gemacht werden konnten, gleichzeitig jedoch eine stabile und exakte Aufhängung benötigt wurde.

Folgende Konstruktion wurde vorbereitet:

Zwischen die aufgehende Wand der Pfeiler wurde ein Gitterträger gestellt, der mit 4 Spindeln in der Nische verspannt wurde. Zusätzlich wurde er in der Mitte horizontal mit dem Gerüst verschraubt, um eine bessere Aussteifung zu erreichen.

An diesen Gitterträger wurden nun acht U-Profile vertikal mittels Gerüstschellen befestigt. Diese U-Profile wurden im oberen Teil mit Langlöchern versehen. Hier konnten die Befestigungsschuhe für die Zahnstangen der Wandsäge angeschraubt und exakt ausgerichtet werden.

An dieser Konstruktion konnte nun der Sägekopf befestigt werden.

Vor dem Sägen der Standfuge wurde das Blatt „trocken“ entlang der Fuge geführt, mehrmals korrigiert bis es schließlich exakt in der Mitte der Fuge verlief. Das eigentliche Sägen der Fuge ging schnell. In zwei Durchgängen konnte auf die gesamte Tiefe der Brüstung der Sägeschnitt durchgeführt werden. Auch hier war es wichtig, schon während des Sägevorgangs ständig schmale Holzkeile in die Fuge zu stecken um ein Nachrutschen der Werkstücke und damit ein blockieren des Sägeblatts zu verhindern.







Der Ausbau der Maßwerkbrüstungen

Mit dem Aufsägen der Standfuge waren nun alle Fugen geöffnet und die einzelnen Brüstungselemente konnten herausgehoben werden. Dazu wurden in Zusammenarbeit mit Herrn Kaiser (Restaurator) zunächst ein Rahmen aus Stahlrohren und Kupplungen zusammengeschrubt. An die Vertikalrohre waren unten dünne Stahlplatten angeschweißt (siehe Bericht Fa. Kaiser). Diese konnten in die aufgesägte Fuge eingeführt werden. Somit erfolgte die Lastaufnahme direkt im Unterlager der Maßwerkbrüstung und entlastete die stark geschwächte Substanz. Mit einem Kettenzug und einer Laufkatze wurde nun die Brüstung herausgehoben. Es musste darauf geachtet werden, dass die Brüstung langsam und gleichmäßig herausgehoben wurde um ein Verkanten zu verhindern.

Der Transport auf dem Galeriebelag erfolgte auf einem Rollwagen bis ins Nachbarjoch. Von dort konnten die Maßwerkelemente mit einem Autokran sicher abtransportiert werden.

Erst nach dem Herausheben der Brüstung war die Befestigung der Elemente im Unterlager zu erkennen: Die Verbindung bestand nämlich aus einem Steinzapfen, der beim Heraussägen durchtrennt worden war. Um den Originalzustand wieder herzustellen, wurde dieser Steinzapfen vorsichtig aus dem Unterlager entfernt und durch den Restaurator wieder kraftschlüssig mit dem Stein verbunden.







8 Arylharzvolltränkung (AVT-Behandlung)

An sich stellt die Acrylharzvolltränkung bei dem Schlaitdorfer Sandstein vom Ulmer Münster und dem Buntsandstein (Almendsberger Sandstein) vom Freiburger Münster aufgrund von Erfahrungen aus bereits erfolgreich behandelten Objekten keine Schwierigkeit dar.

Dies trifft auch bei den Schlaitdorfer Sandsteinen zu, die in ihrer Verwitterungszone die für ihn typischen Eisenanreicherungen zeigen.

8.1 Trocknungsverhalten, thermische und hygrische Dehnung der Buntsandsteine und des Schlaitdorfer Sandsteins

Unabhängig von der Steinsorte werden alle Exponate vor der Acrylharzvolltränkung einem mehrstufigen Trocknungsverfahren unterzogen. Dies ist die grundsätzliche Voraussetzung für eine optimale Durchtränkung der Exponate. Um das Trocknungsverhalten im Vorfeld abschätzen zu können wurden an Laborproben (Würfel von 10 x 10 x 10cm) das Wasseraufnahme – und Wasserabgabeverhältnis gemessen. An den Prüfkörpern wurde die vollständige Wasseraufnahme (ohne Vakuum) vollzogen. Der Wassergehalt des Buntsandsteins (Almendsberger Sandstein) betrug vor dem Trocknungsversuch 131g und bei dem Schlaitdorfer Sandstein 77g.

Betrachtet man nun der Verlauf der Wasserabgaben (Abbildung 5 und 6), so besitzt der Buntsandstein nach ca. 360 Std. noch einen Restwassergehalt von 2,75g und der Schlaitdorfer Sandstein einen Restwassergehalt von 5,95g.

Wie Versuche und die Erfahrungen bei der Firma Jbach gezeigt haben, ist es für Natursteine wichtig, dass die Materialien vor der Tränkung nur noch Restwassergehalte ca. 1 % haben sollten. Betrachtet man nun die Versuchsergebnisse, so besitzen sowohl der Buntsandstein als auch der Schlaitdorfer Sandstein bei einer normalen Trocknung (ohne Vakuum,) Restwassergehalte von deutlich über 1%. Für die ausgewählten Brüstungselemente bedeutet dies, dass sie vor der AVT unter Vakuum getrocknet werden müssen, um so die für die AVT notwendigen Restwassergehalte unter 1% zu erreichen. Die Trocknung unter Vakuum hat zudem den Vorteil, dass die Trocknungsdauer verkürzt werden kann.

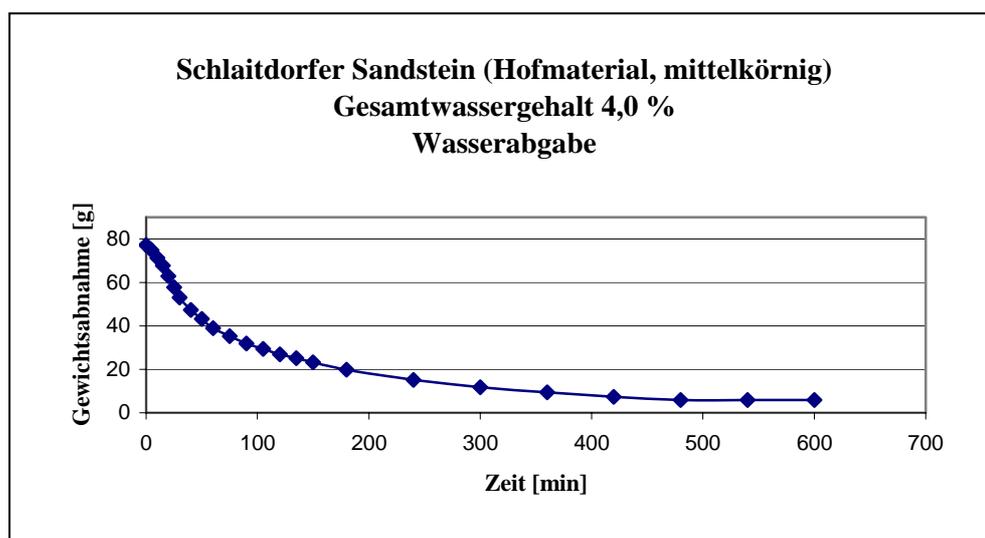


Abbildung 5: Trocknungsverhalten des Schlaitdorfer Sandsteins (mittelkörnig)

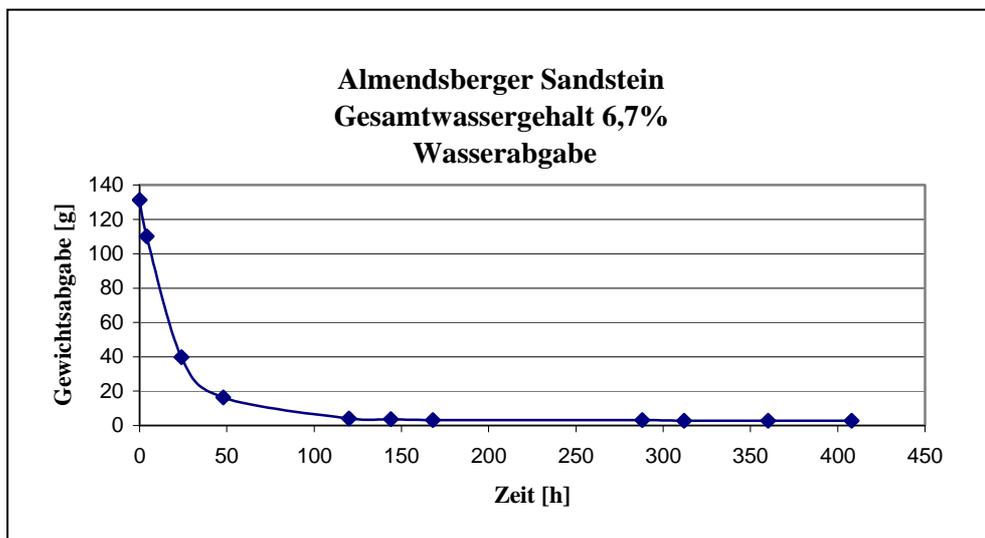


Abbildung 6: Trocknungsverhalten des Almendsberger Sandsteins

Um zu beurteilen wie sich die hygrische und thermische Dehnung auf die vollgetränkten Brüstungselemente auswirken könnten, wurden Prismen der beiden Materialien Schlaitdorfer Sandstein und Almendsberger Sandstein der Acrylharzvolltränkung unterzogen und nach der Aushärtung die hygrische und thermische Dehnung gemessen. Im Vergleich dazu wurden die ungetränkten Prismen gemessen.

Tabelle 26: Thermische und hygrische Dehnung vor und nach der Tränkung

Probe	therm. Dehnung vor AVT [x 10 ⁻⁶ 1/K]	therm. Dehnung nach AVT [x 10 ⁻⁶ 1/K]	hygr. Dehnung vor AVT [mm/m]	hygr. Dehnung nach AVT [mm/m]
Almendsberger Hofmaterial	11,1	13,5	0,5	n.m.
Almendsberger Bohrkern 2	8,0	13,5	n.m.	0,1
Schlaitdorfer Bohrkern 5, Joch 11 (außen)	10,5	9,8	n.m.	n.m.
Schlaitdorfer Bohrkern 6, Joch 11 (außen)	10,4	11,7	0,02	n.m.
Schlaitdorfer Bohrkern 7, Joch 11 (innen)	10,8	14,3	n.m.	n.m.
Schlaitdorfer Bohrkern 5, Joch 7	10,3	14,4	n.m.	n.m.
Schlaitdorfer Bohrkern 5064, Fa. Jbach	12,4	15,9	3,0	n.m.

n.m. bedeutet, dass hier keine Dehnung messbar war

8.2 Flankierende Maßnahmen und restauratorische Vorbehandlung zur AVT

Alle konservatorisch sichernden Maßnahmen müssen vor der Acrylharzvolltränkung durchgeführt werden. Ergänzungen können vor und/oder nach der AVT durchgeführt werden. Es wird hier auf das nachfolgend übernommene Merkblatt der Firma Jbach „Flankierende Maßnahmen zum JBACH Volltränkung mit Acrylharz“ Nr. 6 verwiesen.

„Flankierende Maßnahmen Nr. 6“

Präambel

Neue Erkenntnisse über empfohlene Restaurierungsmaterialien, Verfeinerungen im Verfahrensablauf und Anregungen unserer Partner veranlassen uns, die „Flankierenden Maßnahmen Nr. 5“ durch diese Ausgabe Nr. 6 zu ersetzen. Wir werden in Zukunft die aktuellen Änderungen im Internet besonders herausstellen und bei unseren Angeboten auf die aktuell gültige Version der „Flankierenden Maßnahmen“ aufmerksam machen.

Die aktualisierten Empfehlungen stehen zum Teil im Widerspruch zu früheren Empfehlungen.

Dem kritischen Leser dieser „Flankierenden Maßnahmen Nr.6“ wird auffallen, daß wir entgegen den früheren Aussagen die Anwendung von Epoxidharz sehr stark einschränken. Das betrifft sowohl Klebungen und das Hinterfüllen von Rissen und Schalen als auch die Verdübelungen.

Für das Gelingen der Konservierung nach dem Acrylharz Volltränkungsverfahren (AVT) ist die Grundvoraussetzung, daß alle erforderlichen flankierenden Maßnahmen, die vor der Tränkung vorzunehmen sind, mit höchstmöglicher Gewissenhaftigkeit und Sachkenntnis durchgeführt werden.

Es darf nur mit den für die anschließende Tränkung geeigneten Materialien und unter strikter Einhaltung aller Verarbeitungsrichtlinien und Verfalldaten gearbeitet werden. Die Nichtbeachtung dieser Faktoren kann zu Problemen führen, die vermeidbare Nacharbeiten erforderlich machen.

Bei Unklarheiten ist es ratsam, vor Durchführung der ersten Maßnahmen Kontakt mit uns aufzunehmen. Wir bieten jedem an, bei Erstaufträgen in Zusammenhang mit der AVT mit dem Objekt zu uns zu kommen, um die „Flankierenden Maßnahmen“ bei uns in Scheßlitz und mit Unterstützung unseres Restaurators durchzuführen.

Transportsicherung

Für die Transportsicherung empfiehlt es sich, gefährdete Bereiche mit Kieselsäureester zu festigen. Eventuell dadurch hervorgerufene Inhomogenitäten werden aufgrund der wesentlich höher liegenden Festigkeit nach der Tränkung wieder ausgeglichen (siehe auch „Vorfestigung morbider Bereiche“).

Reinigung

Generell sollten die Objekte vor der Anlieferung gereinigt werden. Schmutzschichten, die vor der Tränkung nicht entfernt werden, können dazu führen, daß sich nach der Tränkung

Reinigungsprobleme

ergeben, da wir durch die Optimierung der Oberfläche inzwischen auch Verschmutzungen mit konservieren. Beim Nachreinigen und damit beim Entfernen der Schmutzschicht kann bei nicht erfolgter Vorreinigung die zwischen der Schmutzaufgabe und der Oberfläche entstandene Schicht aus PMMA sichtbar werden.

Bei Unsicherheiten im Zusammenhang mit der vorherigen Reinigung aufgrund sehr morbider Objekte ist eine Abstimmung mit uns hilfreich.

Restauratorische Maßnahmen vor der Acrylharz Volltränkung

Vorfestigung morbider Bereiche

Eine Vorfestigung mit Kieselsäureester (KSE) hat sich grundsätzlich als sehr positiv herausgestellt, für

sehr morbide Bereiche und Objekte ist diese KSE-Vorfestigung sogar zwingend erforderlich. Wenn wir zum Zweck der Transportsicherung oder zur Herstellung eines „soliden“ Untergrundes für die Antragsarbeiten die Anwendung von KSE empfehlen, ist uns bewußt, daß wir damit u. U. eine Empfehlung aussprechen, die zu einer inhomogenen Situation führt. Diese Empfehlung gilt daher nur, wenn anschließend tatsächlich die AVT durchgeführt wird. Durch die AVT wird dieses ungleichmäßige Festigkeitsprofil überspielt und damit homogenisiert.

Bei Anwendung der KSE-Vorfestigung ist ein längerer Zeitraum der Gesamtrestaurierungs- und Konservierungszeit einzuplanen, da vor Durchführung der AVT sichergestellt sein muß, daß der KSE vollkommen ausreagiert hat. Bekanntlich benötigt KSE zur Reaktion mindestens 4 Wochen, wobei man von einer vorhandenen Luftfeuchte von ca. 70 % ausgeht. Durch Feuchthalten des Objektes (Abdecken mit einer Plastikfolie unter Beigabe eines Wasserbehälters) kann man die relative Luftfeuchte erhöhen. Bei geringerer Luftfeuchte dauert die Reaktion länger.

Vor der Konservierung muß die Reaktion abgeschlossen sein. Wir müssen dieser Tatsache dadurch Rechnung tragen, daß wir mit KSE vorgefestigte Objekte erst dann zur Trocknung freigeben können, wenn die Vorfestigung älter als 28 Tage ist.

Bewährt haben sich die Produkte der Firma Remmers (Funcosil Steinfestiger 100 und Steinfestiger 300 jeweils ohne Hydrophobierungsmittel).

Die modifizierten KSE-Produkte von Motema eignen sich für besondere Anwendungsfälle. Die Verwendung dieser Produkte ist vorher mit dem Hersteller und mit uns abzustimmen.

Im Zusammenhang mit der anschließenden AVT gelten die Empfehlungen zur Vor-Festigung auch für Kalkstein.

Verschließen von Rissen und Hinterfüllen von Schalen

Risse und von außen durch Abklopfen feststellbare Hohlräume müssen vor der Tränkung mit hydraulisch abbindenden Injektionsmitteln (am besten geeignet ist Jahn M 30 Injektionsmittel und dann auch Ledan LD1) hinterspritzt und auf diese Weise verfüllt werden. Dabei kommt es darauf an, diese Risse und Hohlräume möglichst in ihrer gesamten Fläche und Tiefe und nicht nur partiell auszufüllen.

Wird ein Riß nur an der Oberfläche verschlossen, kann es zum Abplatzen der gesamten Schicht kommen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, daß solche innenliegenden Risse und Hohlräume von unserer Tränkflüssigkeit zwar erreicht, aber nicht ausgefüllt werden, da die sehr dünnflüssige Tränkflüssigkeit aus größeren Rissen und Spalten wieder herausläuft. Durch eine sorgfältige Rißversorgung kann sich der Restaurator viele Stunden Nacharbeit ersparen.

Um beim Hinterspritzen einem Auslaufen des Injektionsmittels aus seitlichen oder unten liegenden Verbindungsrissen vorzubeugen oder das Auslaufen zu stoppen, empfehlen wir die Verwendung von Motema Latex, eingedickt mit Aerosil oder Sylothex. Um die Fließfähigkeit des Injektionsmittels zu optimieren, empfiehlt es sich, den Riß unmittelbar vor der Injektion mit einer Mischung 50 : 50 Wasser und Spiritus vorzunetzen.

Streng zu beachten ist, daß das Injektionsmittel unter Feuchthaltung (nasse Tücher, Plastikfolie und Beigabe eines Wasserbehälters) zwei Wochen ausreagieren muß, da das Material ansonsten „verbrennt“. Das Injektionsmittel kann mit Keimfarbpigmenten eingefärbt werden.

Bei großflächigen, lose aufliegenden Schalen empfiehlt es sich, diese abzunehmen und mit geeigneten Systemen wieder anzusetzen. Auch hierzu werden Jahn M 30 oder Ledan LD1 oder zunächst punktuell Epoxidharz und dann Jahn oder Ledan Injektionsmittel verwendet. Die Menge des verwendeten Epoxidharzes sollte generell möglichst klein gehalten werden, da sowohl die hohe thermische Dehnung von Epoxidharz als auch der niedrige Glaspunkt (TG) von Epoxidharz die Qualität der Klebungen negativ beeinflussen. Durch die Verwendung des mineralischen Materials wird auch im Bereich der Klebungen aufgrund der Durchtränkung mit Acrylharz eine homogene Situation geschaffen.

Acrylate oder Polyesterharze dürfen vor der AVT nicht verwendet werden, da sie während der Tränkung quellen und sich u.U. anschließend auflösen.

Wichtiger Hinweis:

Voraussetzung für eine fachgerechte Verarbeitung ist, die vom Hersteller genannten Kriterien bezüglich Mischungsverhältnis, Lagerdauer und Lager- und Verarbeitungstemperatur unbedingt

einzuhalten.

Verdübelung

Alte, treibende Eisendübel und Klammern sollten entfernt werden, wenn dies ohne Gefährdung des Originals möglich ist. Bei statisch beanspruchten Teilen ist der Einbau neuer Edelstahldübel in ausreichend dimensionierten Bohrungen und das Einkleben von Dübeln mit hydraulisch abbindendem Material erforderlich. Für das Verdübeln unter Verwendung von Epoxidharz gilt wiederum, daß die Menge des Harzes möglichst klein gehalten werden sollte.

Bei sehr tiefen – die Statik des Objektes gefährdenden Rissen – müssen auf jeden Fall Edelstahldübel bzw. Klammern in genügender Anzahl gesetzt werden.

Antragungen

Gewünschte Ergänzungen sollten möglichst vor der AVT durchgeführt werden. Für vorherige Antragungen spricht, daß sie mit hydraulisch abbindenden Systemen durchgeführt werden können. Sollte der Untergrund für eine solche Antragung zu morbide sein, ist eine Vorfestigung mit KSE vorzunehmen. (s. Vorfestigung morbider Bereiche)

Bei der Anwendung hydraulisch abbindender Mörtel ist zu beachten, daß jeweils die Schlemmschicht vor der nächsten Antragung abgearbeitet wird. Dies gilt auch für auf Null auslaufende Antragungen. Diese sollte man von vorne herein 2 – 3 mm über „Null“ antragen, so daß man die Möglichkeit hat, die Schlemmschicht nach kurzer Abbindezeit abzuarbeiten.

Die Antragungen müssen nach den strengen Vorschriften der namhaften Hersteller wie Mineros oder Motema durchgeführt werden. Die von diesen Herstellern empfohlene Bewehrung ist nicht erforderlich, da wir die mineralischen Antragungen mit durchtränken.

Es hat sich als sehr vorteilhaft erwiesen, daß auf Null auslaufende Ergänzungen mit KSE gefestigt werden, bevor sie zur AVT kommen. Zur Erhöhung der Geschmeidigkeit und der Festigkeit hydraulisch abbindender Mörtel verwendet man häufig Acryl-Dispersion. Entgegen gängiger Praxis sollte man im Zusammenhang mit der AVT sparsam mit dem Zusatz von Dispersion im Anmachwasser umgehen, da es sonst während der AVT zu Quellungen des Mörtels kommen kann. Positive Erfahrungen zu mineralischen Antragungen liegen mit Mineros und Motema CC-Sandstein vor.

Die Restauriermörtel können durchaus vor der AVT mit mineralischen Farben eingefärbt werden. Die Standfestigkeit dieser Einfärbungen hat sich als sehr gut herausgestellt. Wichtig ist bei dieser Einfärbung, sie im Zweifel vorher zu testen, um sicher zu sein, daß die Farben lösungsmittelbeständig sind.

Bei sehr feinen Antragungen hat es sich bewährt, diese erst nach der AVT mit acrylharzgebundenen Mörteln durchzuführen.

Alte Polyesterantragungen (z.B. mit Akemi) sind gegenüber der Tränkflüssigkeit unbeständig, so daß es zu partiellen Quellungen und dadurch zu teilweisen Ablösungen kommen kann. Solche Antragungen sind daher nach Möglichkeit zu entfernen und durch mineralische Antragungen zu ersetzen.

Salzbelastungen

Salzbelastung schließt die AVT nicht aus; aber auf starke Salzbelastung muß dringend bei der Anlieferung des Objekts hingewiesen werden, damit wir darauf Rücksicht nehmen können - z.B. durch die Verlängerung der Trockenzeit.

Fassungen

Alte farbige Fassungen sollten auf Lösungsmittelbeständigkeit überprüft werden, um festzustellen, ob eine Volltränkung ohne Schäden für die Farbe durchgeführt werden kann. Eventuelle Farbretuschen sollten erst nach der Acrylharz Volltränkung durchgeführt werden.

Sollten bei den vorbereitenden Arbeiten für die Tränkung Fragen und Unklarheiten auftauchen, bitten wir dringend um Kontaktaufnahme mit unserem Restaurator, um mögliche Fehlerquellen früh genug aufzuspüren und Fehler gar nicht erst entstehen zu lassen.

Restauratorische Maßnahmen nach der Acrylharz Volltränkung

Nachträgliche Antragungen mit acrylgebundenen Systemen sollten nur dann vorgesehen werden, wenn dadurch wesentlich mehr Originaloberfläche erhalten werden kann.

Für die restauratorischen Maßnahmen nach der AVT stehen geeignete Mittel auf Acrylbasis zur Verfügung:

Für das Injizieren von Rissen sollte das SS-Acryl-Injektionsharz 220 verwendet werden.

Ergänzungsmaterial sollte mit SS-Acrylharz R41 angesetzt werden.

Eine Produkt- und Anwendungsbeschreibung für beide Harze liegt vor und ist auf Anfrage erhältlich.

Farbretuschen erfolgen nach der Tränkung mit einem Medium aus Transparentlack 2 matt – UV (575) von Lascaux. Das Medium ist auf Wasserbasis und wird verdünnt angewendet. Es gibt den Farbpigmenten so wie der Oberfläche einen UV-Schutz.

Die farbliche Abstimmung erfolgt mit Farbpulver der Keimfarben:

1. Umbra grünlich deutsch dunkel 10210000
2. Umbra grünlich 1020000
3. Rehbraun deutsch 1032000
4. Elfenbeinschwarz 1515000
5. Französisch Goldocker
6. Englischrot

Weiter zu beachten:

Transport zur Konservierungsanlage

Der Transport zur Konservierungsanlage erfolgt immer durch den Restaurator, der die „Flankierenden Maßnahmen“ durchführt oder durch von ihm beauftragte Personen oder Firmen. Der Anlieferer trägt das Transportrisiko - einschließlich des Abladens bei uns - bis das Objekt unseren Hallenboden erreicht hat.

Anlieferungsformblatt

In dem Anlieferungsformblatt müssen u.a. Angaben zu früher durchgeführten Restaurierungen und zu Maßnahmen, die der Anlieferer vorgenommen hat, gemacht werden. Diese Blätter sollten kurzfristig erstellt werden, da nur bei Vorliegen dieser Blätter bei uns die ersten Schritte eingeleitet werden.

Nachreinigung

Die Nachreinigung der Objekte von den Spuren der AVT erfolgt in der Regel bei uns. In Abstimmung mit dem Restaurator kann diese Nachreinigung auch durch den Restaurator vorgenommen werden.

Abstimmung über erforderliche Nachversorgung

Die Nachversorgung der getränkten Objekte wird in der Regel durch den Restaurator durchgeführt. In Sonderfällen kann diese Nachversorgung auch durch unseren Restaurator vorgenommen werden.

Rücktransport

Wie die Anlieferung liegt auch der Rücktransport der getränkten Objekte im Verantwortungsbereich des Restaurators. Der Fahrer des abholenden Fahrzeugs ist für die korrekte Beladung, Sicherung auf dem Fahrzeug und für den Transport bis hin zum Bestimmungsort verantwortlich.

Versetzen

Beim Versetzen der getränkten Objekte ist auf die erhöhte thermische Dehnung zu achten. In einem Rahmen versetzte Objekte oder in Reihe gesetzte Objekte sind mit elastischem Fugenmaterial zu versetzen.

JBACH Steinkonservierung GmbH & Co KG
„Alte Ziegelei“, D 96110 Scheßlitz
Tel: 09542 / 8026 Fax: 09542 / 8029
September 2003

Der Acrylharzvolltränkung unterzogen wurden die Brüstungselemente Joch 7 und 11 des Ulmer Münsters und die der zweiten Kaiserkapelle des Freiburger Münsters.

Nachfolgend sind die Berichte der beiden Restaurierungsfirmen Armin Hellstern GmbH, Freiburg und Restaurierungswerkstätte Egon Kaiser, Oberscheinfeld und aufgeführt. Hier sind alle restauratorischen Vorarbeiten und die Transportvorbereitungen beschrieben.

8.2.1 Restaurierungsbericht der Firma Hellstern zu den Brüstungselementen am Freiburger Münster

Münsterbauhütte Freiburg
z.H. Herrn Leuschner
Schoferstrasse 4

79098 Freiburg

Freiburg, den 24.10.2003

Restaurierungsbericht: über konservatorische und naturstein-
restauratorische Arbeiten an ausgewählten
Maßwerken der Chormäßwerke des Freiburger
Münsters

Balustrade Nr. 31 und 32

- Algizidbehandlung
- Reinigung mit dem Mikrosandstrahler und Ausdünnen der Verschwärzungen
- zweimaliges Auflegen von Zellulose-Bentonitkompressen im wasserführenden Bereich zur Entsalzung
- Untersuchung der Kompressen auf entzogene Salze nach dem Merck'schen Prüfverfahren (Sulfat, Nitrat, Chlorid)
- Teilfestigung mit Remmers Funcosil OH verdünnt mit Aceton (1:1)
- partielle Nachfestigung mit Remmers Funcosil OH
- Verschließen von Schuppen mit Paraloid 75 B

- Verpressen von Rissen nach dem System Kaiser mit Kieselgelinjektionsmaterial
- Schlämmen von schuppenden Bereichen mit einer Syton X30 gebundenen Schlämme
- Schließen von Schalen- und Rissufern mit Syton X30 gebundenem Sandsteinersatzmaterial
- Anböschen von Fehlstellen mit Syton X30 gebundenem Sandsteinersatzmaterial
- Nachfestigung der Antragungen mit Remmers Funcosil OH

Balustrade Nr. 37, 38 und 39

- Reinigung mit dem Mikrosandstrahler und Ausdünnen der Verschwärzungen
- zweimaliges Auflegen von Zellulose-Bentonitkompressen im wasserführenden Bereich zur Entsalzung
- Untersuchung der Kompressen auf entzogene Salze nach dem Merck´schen Prüfverfahren (Sulfat, Nitrat, Chlorid)
- Teilfestigung mit Remmers Funcosil OH verdünnt mit Aceton (1:1)
- partielle Nachfestigung mit Remmers Funcosil OH
- Verpressen von Rissen nach dem System Kaiser mit Jahn M 30
- Abbau
- Schließen von Schalen- und Rissufern mit Motema CC-Mörtel
- Ergänzen von Fehlstellen mit Restauriermörtel Motema CC-Mörtel

Material

Syton X 30	Fa. Kremer Pigmente Hauptstrasse 41-47 88317 Aichstetten
Quarzsande	Fa. Kremer Pigmente Hauptstrasse 41-47 88317 Aichstetten
Steinmehl	Allmannsberger Sandstein Fa. Rauscher F- 67320 Adamswiller
Bentonitkompresse	Interacryl GmbH P.O.Box 940 122 60459 Frankfurt a.M
Funcosil OH GmbH	Remmers Baustofftechnik Postfach 12 55 49624 Lönigen
Aceton	Fa. Kremer Pigmente Hauptstrasse 41-47 88317 Aichstetten
Paraloid 75 B	Fa. Kremer Pigmente Hauptstrasse 41-47 88317 Aichstetten
Kieselgelinjektion Litho-Jet	Facius-Kaiser Restaurierungs- werkstätten GmbH Wiesenweg 3 91483 Oberscheinfeld
Jahn M30 Restaurierungs-	Jahn International techniken B.V.

Motema CC

NL- 3230 AD Brielle

Interacryl GmbH
P.O.Box 940 122
60459 Frankfurt a.M

Fotodokumentation: Chorbalustrade des Freiburger Münsters

Vorzustand
Balustrade Nr. 37 Innenansicht



Offene Lager
mit Substanz-
verlust

Foto 1

Fotodokumentation: Choralustrade des Freiburger Münsters

Vorzustand
Balustrade Nr. 37 Außenansicht

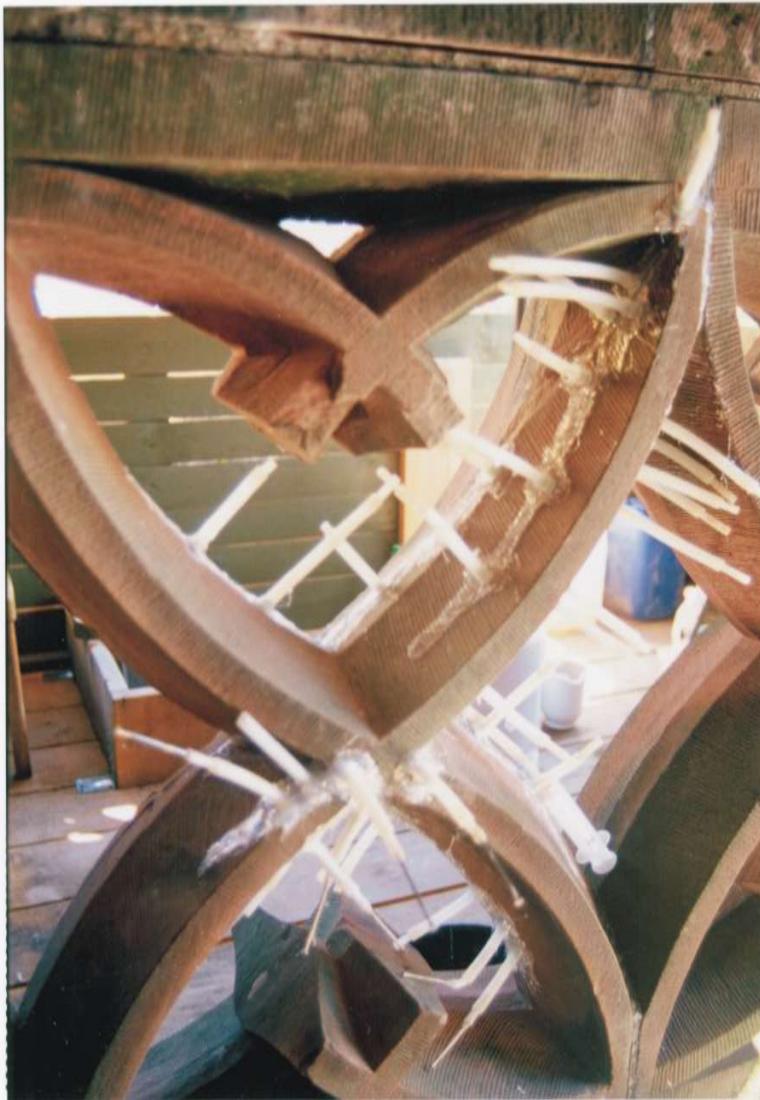


Versandung durch defekten Wasserlauf

Foto2

Fotodokumentation: Chorbalustrade des Freiburger Münsters

Zwischenzustand
Balustrade Nr. 37 Innenansicht



Rissverpressung

Foto 3

Fotodokumentation: Choralustrade des Freiburger Münsters

Vorzustand
Balustrade Nr. 38 Außenansicht

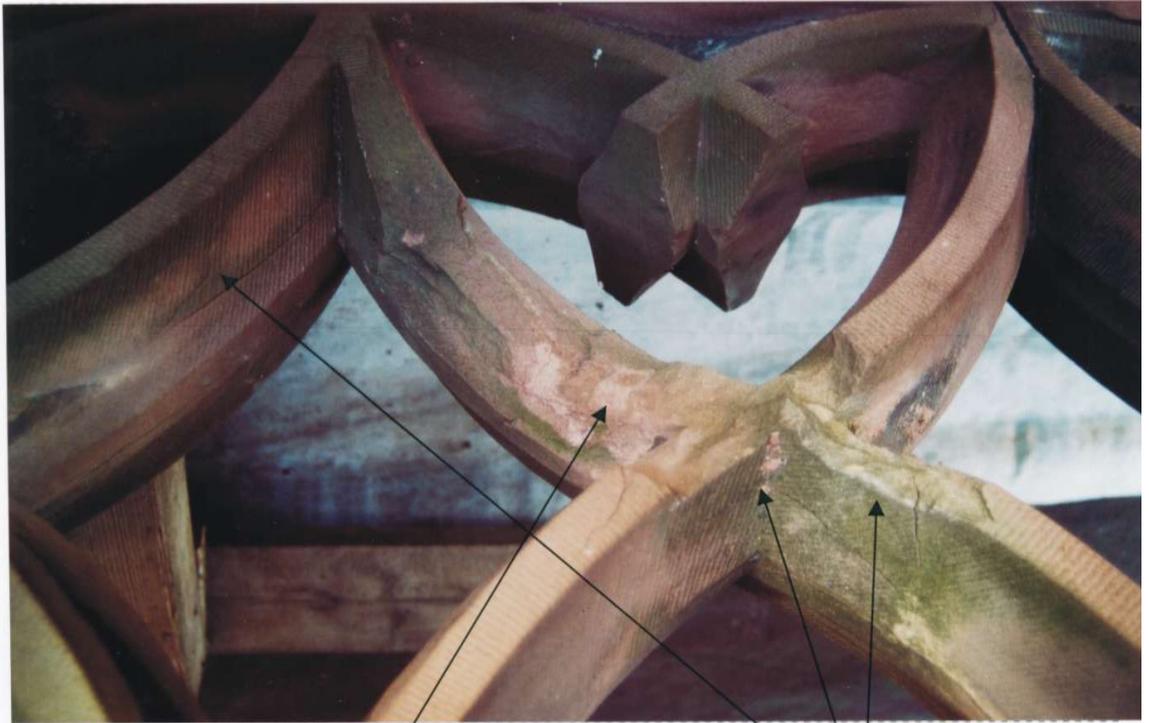


Versandung durch defekten Wasserlauf

Foto 4

Fotodokumentation: Chorbalustrade des Freiburger Münsters

Vorzustand
Balustrade Nr. 39 Außenansicht



hoher Substanzverlust durch abgängige Schalen

offene Lager

Foto 5

Fotodokumentation: Chorbaustrade des Freiburger Münsters

Vorzustand
Balustrade Nr. 31 Außenansicht



offene Lager

Foto 6

Fotodokumentation: Choralustrade des Freiburger Münsters

Vorzustand
Balustrade Nr. 31 Außenansicht

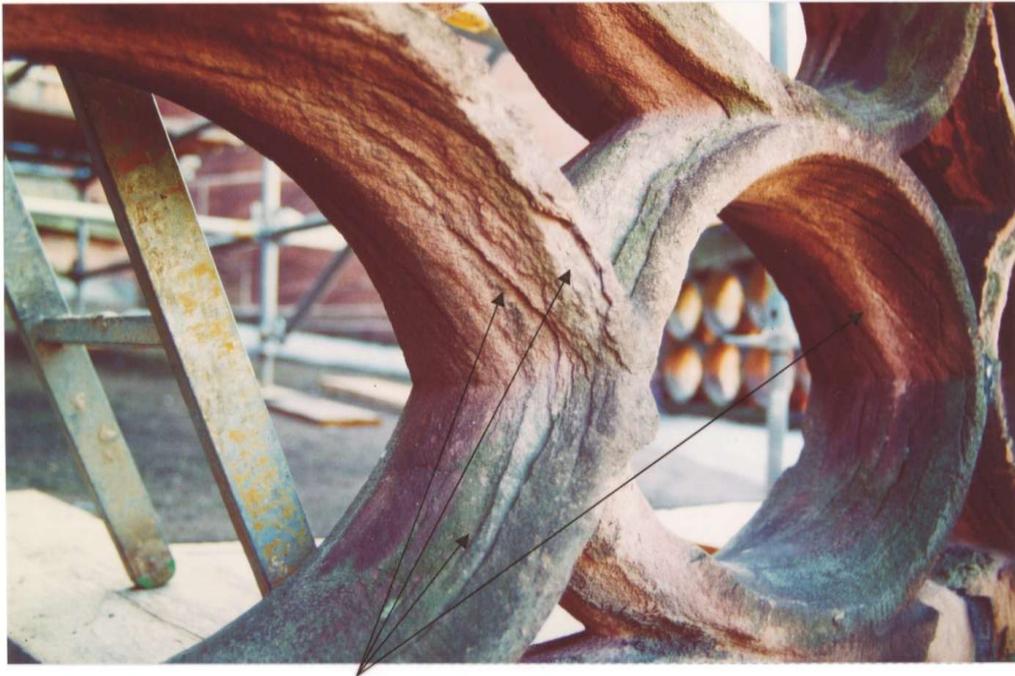


Schalenbildung mit hohem Substanzverlust

Foto 7

Fotodokumentation: Chorbalken des Freiburger Münsters

Vorzustand
Balustrade Nr. 31 Außenansicht

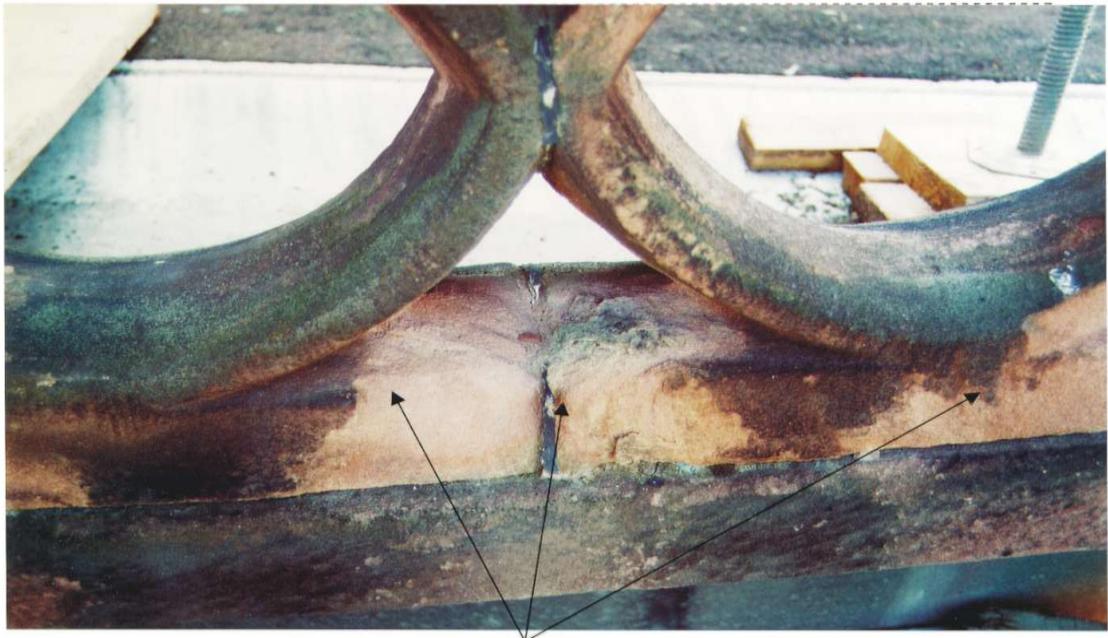


offene Lager mit Schalenbildung und hohem Substanzverlust

Foto 8

Fotodokumentation: Chorbalustrade des Freiburger Münsters

Vorzustand
Balustrade Nr. 31 + 32 Außenansicht



starke Versandung durch stehende Feuchtigkeit mit Schuppenbildung
Verschwärzungen der Steinoberfläche durch Umwelteinflüssen

Foto 9

Fotodokumentation: Chorbalkustrade des Freiburger Münsters

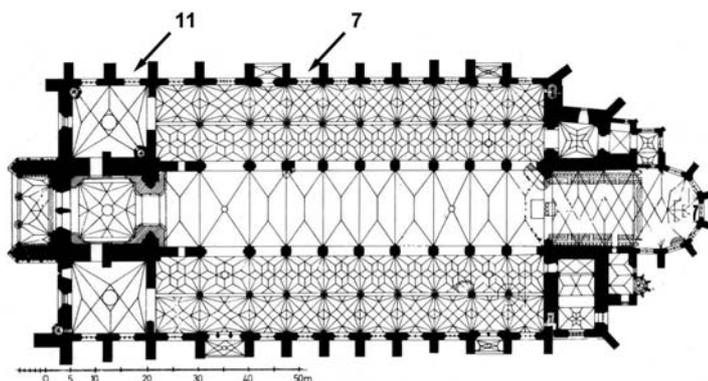
Balkustrade Nr. 31 + 32 Innenansicht



Reinigung mit dem Mikrodampfstrahler

Foto 10

8.2.2 Restaurierungsbericht der Firma Kaiser zu den Brüstungselementen des Ulmer Münsters



"Maßwerkbrüstungen"

Ulmer Münster, Nördliches Seitenschiff

Restaurierungswerkstätte Egon Kaiser Wiesenweg 3 Stierhöfsetten 91483 Oberscheinfeld
Telefon 09167/449

Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11 Dokumentation der
Restaurierungsarbeiten

Inhalt

	Seite
Beschreibung	148
Allgemeines	148
Bericht Brüstung 7	149
Standort	149
Schäden und Schadensursachen	149
Materialien	149
Ziele der Maßnahme	150
Maßnahmen	150
Entfernen loser Krusten	150
Vorfestigung	150
Krustendünnung	151
Klebungen	151
Ergänzungen, Schlämmungen	151
Retuschen	151
Fugenbehandlung	151
Rissverpressung und Dübelung	152
Nachfestigung	152
Transportsicherung	152
Begleitende Untersuchungen	152
Endzustand ohne Acrylharzvolltränkung	152
Abbau und Transport	153
Konservierung Acrylharzvolltränkung	153
Maßnahmen nach der Acrylharzvolltränkung	153
Rücktransport	153
Materialliste	153
Fotoanhang	154

Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11 Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Ort: Auf dem nördl. Seitenschiff über Joch 7 und 11

Vergabestelle: Münsterbauamt Ulm

Restauratoren: Egon Kaiser, Ralf Czarnietzki

Dauer der Restaurierung: Ab Juni 2003

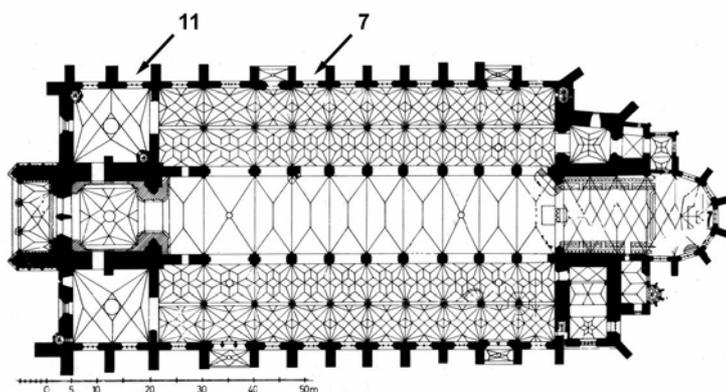
Objekt

2 Maßwerkbrüstungen: Je 3 Einzelteile

Datierung: Ca. 1850 - 1870

Maße: Feld 7: 4,90 m , Feld 11: 6,30 m

Gesteinsart: SCHLAITDORFER SANDSTEIN



Lokalisierung: Nördl. Seitenschiff außen

Bericht Maßwerkbrüstung 7

Standortbeschreibung

Die Maßwerkbrüstungen befinden sich über den Jochen 7 und 11 und sind mit den Stützpfeilern der Fialen verbunden. Sie sind mit einem profilierten Brüstungsgesims abgedeckt. Durch die exponierte Standortsituation sind die Brüstungen extremer Bewitterung wie Schlagregen, Wind und im Winter äußerst starker Belastung durch Schnee und Eis ausgesetzt.

Schäden und Schadensursachen

Schäden:

Biogener Bewuchs

Krusten

Absanden

Abschuppen

Schalenbildung

Stark morbide Zonen

Alveolen

Fehlstellen durch Abwitterung

Ausbrüche durch mechanische Einflüsse

Risse

Die augenfälligsten Schädigungen sind die schwarzen Gipskrusten die eine ausreichende Dampfdiffusion verhindern und zu weiteren Schäden führen. Infolge dieser Krusten kommt es zu Feuchtestau was starke Absandungen und Fehlstellen durch Auflösung der Kornkontakte und des dazwischenliegenden Bindemittels zur Folge hat. Partiiell kommt es zur Absprengung der dichten Krusten mit Verlust der obersten Kornlagen. Die bereits hohe Wasseraufnahme des Steines erhöht sich an bewitterten Flächen deutlich.

Im fortgeschrittenen Stadium der Absandung wittert die Oberfläche alveolar aus, was zu großen Fehlstellen führt. Teile der Brüstung 7 sind dadurch so stark geschädigt, das Profilierungen und Oberflächen vollständig verloren gegangen sind. An einigen Stellen sind die Profilierungen regelrecht unterhöhlt, wodurch eine akute Gefahr des Verlustes besteht. Große Abschnitte der Maßwerkbrüstung können als ausgeprägt fragil bezeichnet werden.

In Bereich des Überganges von Altergänzungen aus Zementmörtel zum Stein treten Risse auf einige Ergänzungen liegen hohl und lösen sich ab. Unter diesen Ergänzungsstellen ist der Naturstein mürbe und sandet stark ab.

Einige, durch Spannungen verursachten Risse gefährden die Stabilität der Brüstungselemente.

Die Oberflächen haben unterschiedlich intensiven biogenen Bewuchs in Form von Algen geringfügig auch Flechten.

Materialien

Beim Gesteinsmaterial handelt es sich um SCHLAITDORFER SANDSTEIN, ein dem Keuper zuzuordnendem Stubensandstein. Er ist gegen Witterungseinflüsse nur mäßig resistent und zeigt häufig Absanden mit alveolartigem Verwitterungsbild.

Die Fugen sind verbleit und treten in verwitterten Bereichen über die Oberflächen hinaus.

Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11
Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Abbildung 1:
Vorzustand Galerie 7: Alveolarbildung, Aus-
höhlungen, Absturzgefährdete hohlliegende
Teile, gesichert durch Drahtschlingen.



Ziel der Maßnahme

Restauratorische Maßnahmen den Substanzerhalt des „Jetzt- Zustandes“ zum Ziel.
Das heißt:

Erhalt der noch intakten Altergänzungen,

Ergänzungen aus konservierenden Gründen, zur Stabilisierung des Gesamtbestandes für
einen Abbau und eine Konservierung durch Acrylharzvolltränkung.

Die längerfristige Beobachtung der Resultate soll Erkenntnisse für weitere Maßnahmen mit
ähnlicher Problemstellung aufzeigen.

Maßnahmen

Entfernung loser Krusten

Bild 2:

Die lose abstehenden Krusten ließen sich
von Hand mittels Spatel vorsichtig entfernen.



Vorfestigung

Partielle Vorfestigung stark absandender Stellen mit Silicasol –Festiger 15% Ausfällrate.

Verbrauch: 2,5 Ltr. (Feld 7).

Nach Reaktionszeit:

Festigung mit KSE OH 75.

Verbrauch: 5 Ltr. (Feld 7).

Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11
Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Krustendünnung

Krusten wurden mittels Micropartikelstrahl vorsichtig reduziert in sensiblen Bereichen mit der Mikrodüse. Als Strahlgut kam Glaspulvermehl 100 μ zur Anwendung, der Arbeitsdruck betrug 1-1,5 Bar. Beläge aus Staub, Schmutz und biogenem Bewuchs konnten dabei gleichfalls abgereinigt werden ohne die Patina sichtbar zu beeinträchtigen.



Klebungen

Herabgefallene oder nur noch lose haftende Bruchstücke wurden mit Epoxydharz punktuell geklebt.

Ergänzungen, Schlämmen Risskittungen

Fehlstellen und Alveolen wurden mit einer Silicasol- gebundenen Steinersatzmasse geschlossen. Schadzonen die durch Absanden Abschuppung, Schalenverlust usw. gekennzeichnet sind wurden mit Silicasol- Microschlämmen dünn beschichtet. Für den oberflächennahen Verschluss von Rissen und Anböschungen kamen Silicasol- Feinmörtel als Kitte zum Einsatz.



Retuschen

Als Retusche wurden Erdpigmente wässrig gelöst (Aqua Spuoka) lasierend auf die Ergänzungen aufgetragen.

Fugenbehandlung

Um das Eindringen von Wasser zu verhindern wurden Flankenrisse an den Bleifugen mit Silicasol- Feinmörtel geschlossen.



Rissverpressung und Dübelung

Durchgehende Risse wurden mit Epoxydharz verpresst und mit V4A Edelstahldübeln vernadelt.

Rundstahl \varnothing 4mm, Bohrung \varnothing 6 mm



Nachfestigung

Gezielte Nachfestigung der Ergänzungen und Schlämmen zur Erreichung der beabsichtigten Endfestigkeit.

Verbrauch 1,75 Liter KSE-OH75

Transportsicherung

Um die Brüstung für den Abbau und den Transport zur Acrylharzvolltränkung zu stabilisieren wurde aus Stahlrohren, Brettern und Polstermaterial ein Transportkäfig hergestellt.

Begleitende Untersuchungen

Um Nachweis über die schrittweise Festigungszunahme zu führen wurden Haftzugmessungen vor und nach der Festigung durchgeführt dabei wurden drei Stufen der Schadensintensitäten vergleichend gemessen.

Begleitend wurden Wassereindringprüfungen nach Karstens vor und nach der Festigung durchgeführt.

Endzustand ohne Acrylharzvolltränkung

Durch die beschriebenen Maßnahmen der Konservierung konnte der allgemeine Festigkeitszustand der 3 Bauteile soweit stabilisiert werden das ein Ausbau und Transport sicher gewährleistet war.

Die Maßnahme galt darüber hinaus als Vorbereitung der im Anschluss folgenden Acrylharzvolltränkung durch Firma Ibach Steinkonservierung.



Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11
 Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Abbau und Transport

Unterstützend zu den Säge- und Abbauarbeiten der Münsterbauhütte wurde unsererseits ein Transportkäfig konzipiert und angebracht.



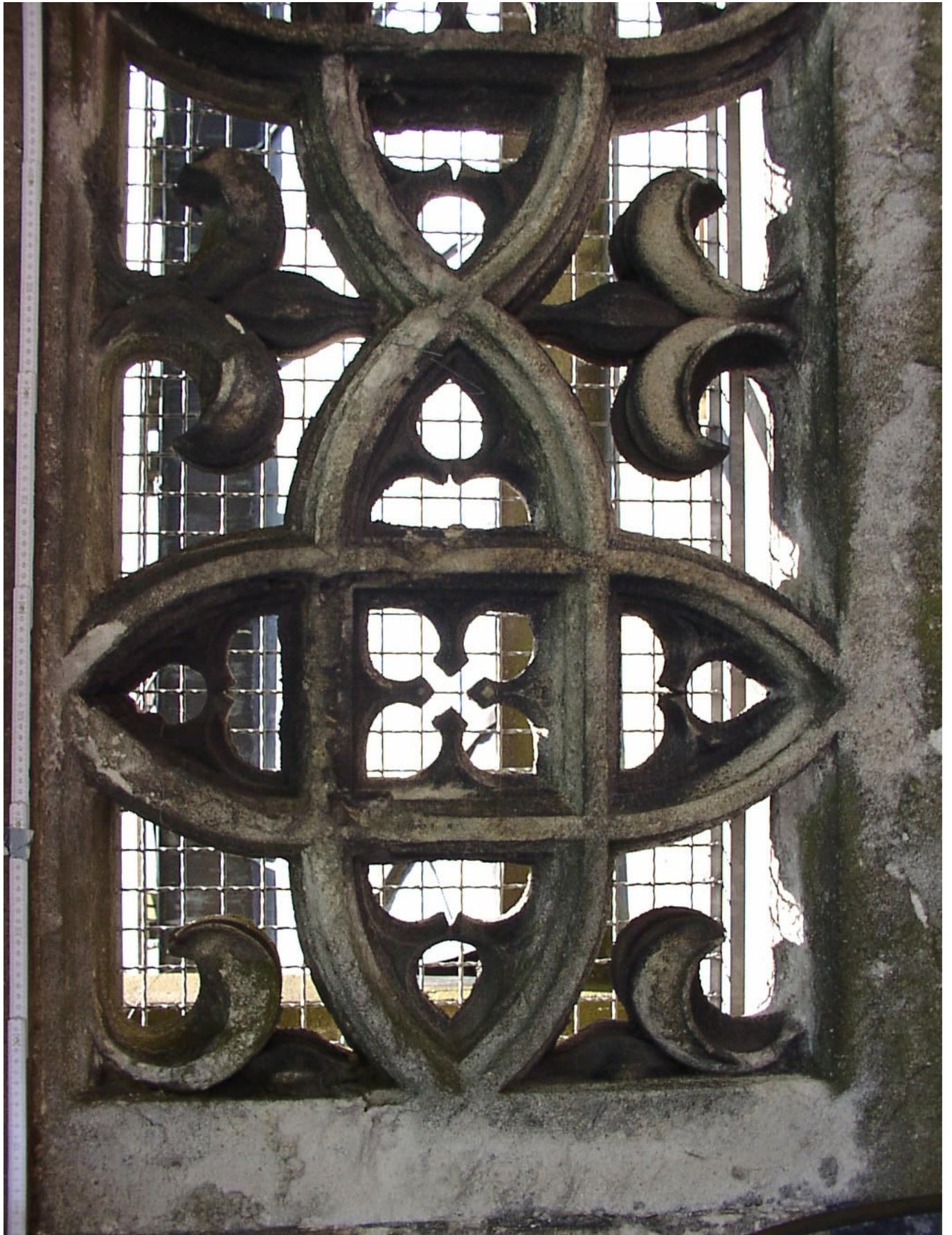
Konservierung Acrylharzvolltränkung

Restauratorische Maßnahmen nach der Acrylharzvolltränkung

Rücktransport

Materialliste

Produkt	Hersteller/ Bezugsquelle
KSE-OH75 Steinfestiger	Scheidel GmbH & Co.KG Jahnstraße 38-42 96114 Hirschaid
Silicasolgebundene Steinersatzstoffe	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld
Epoxyd- Injektionsharz EP Litho- Jet	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld
Silicasol- Festiger Ludox	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld





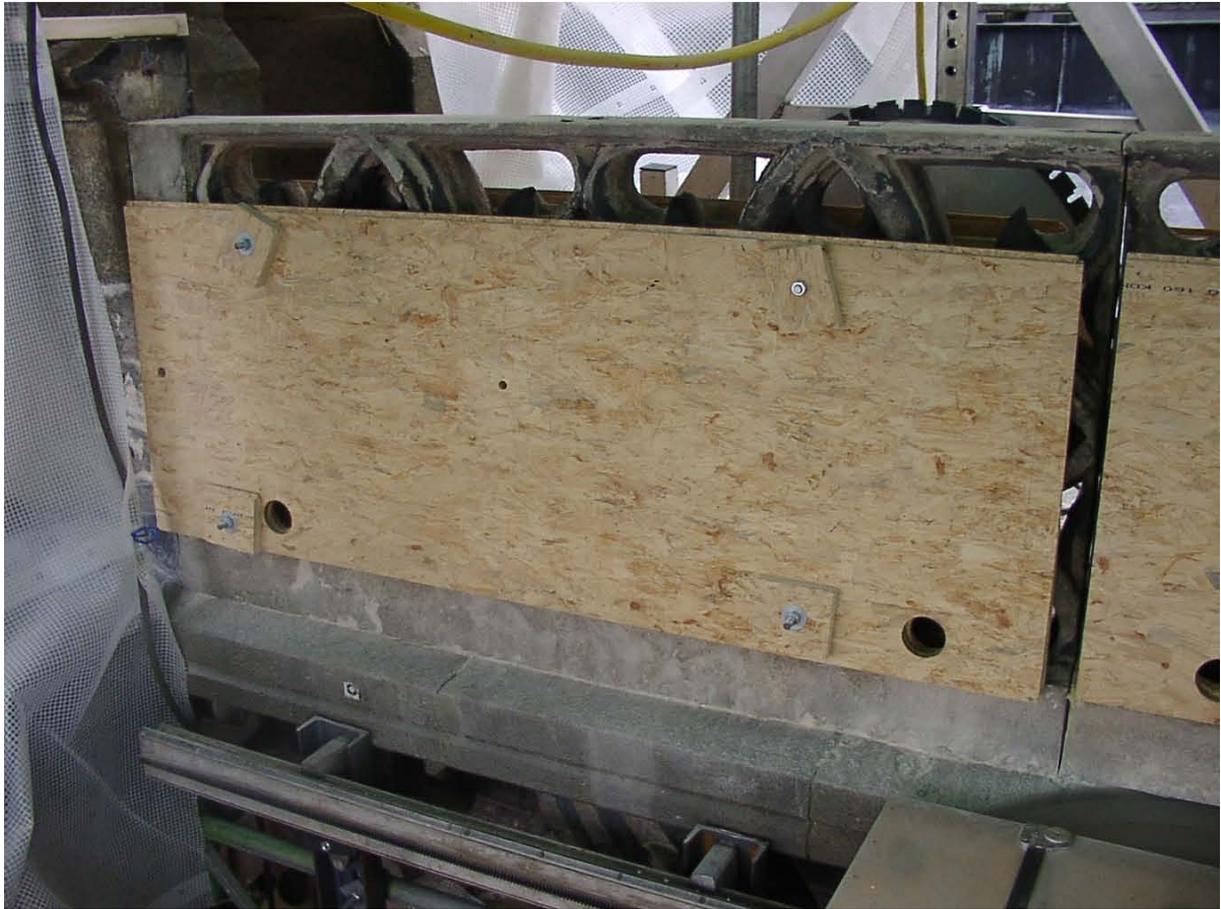


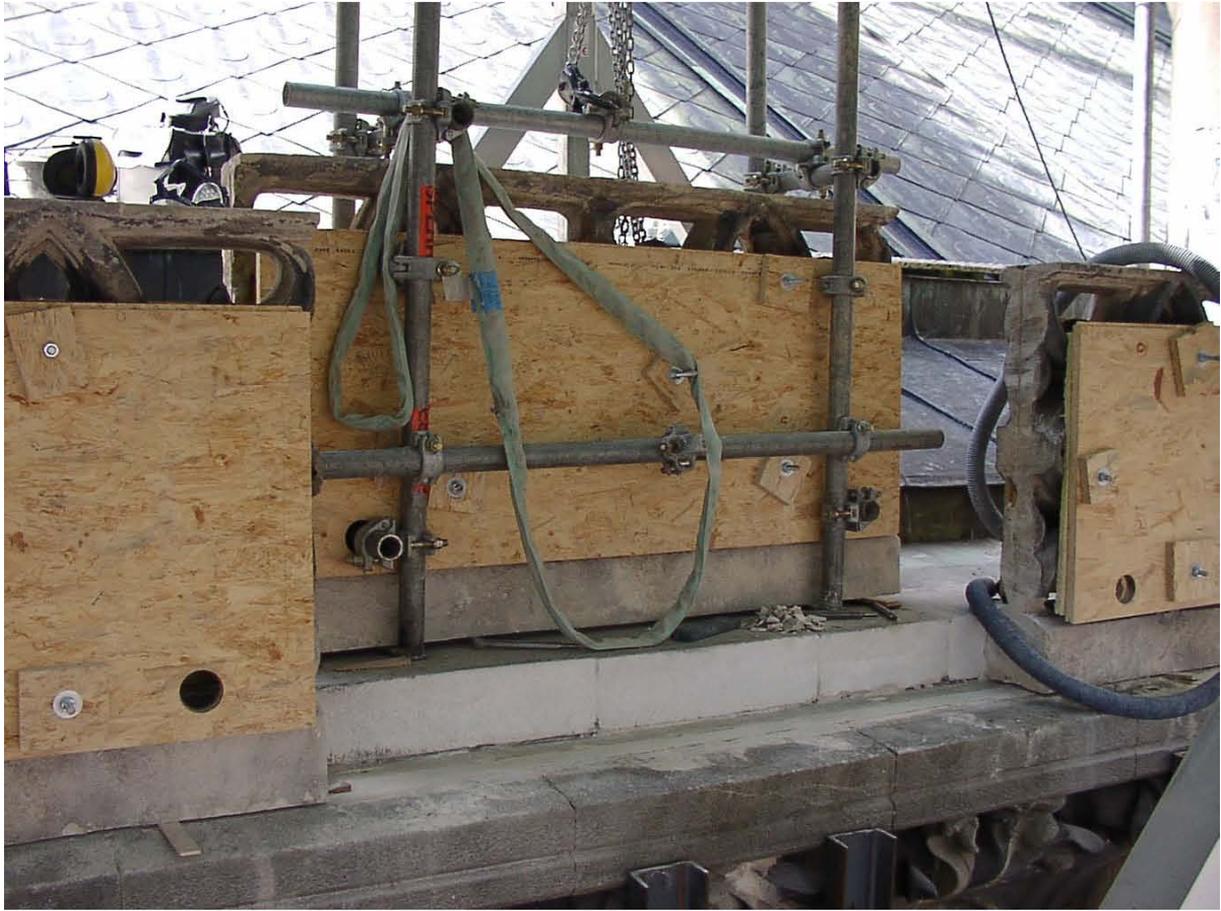


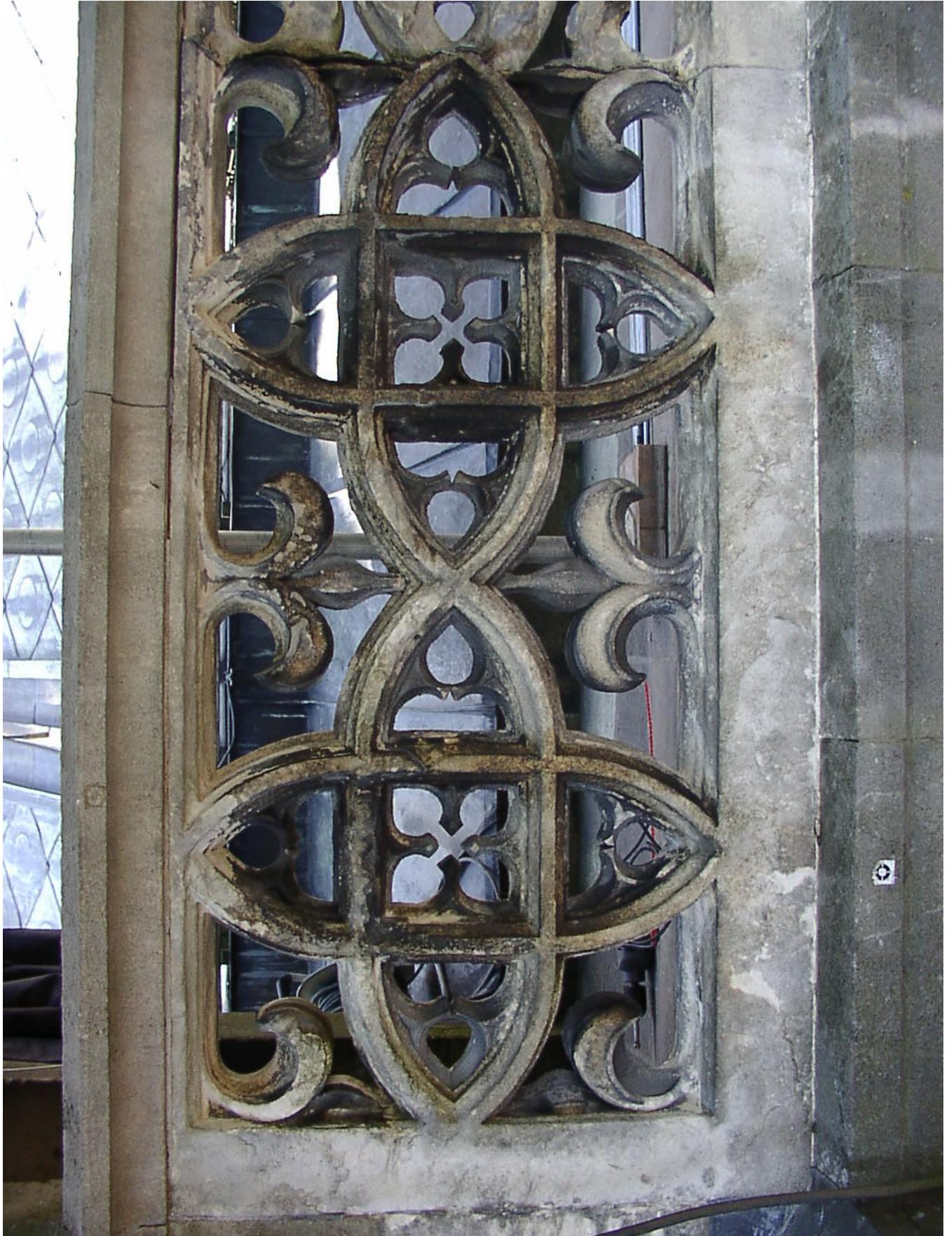




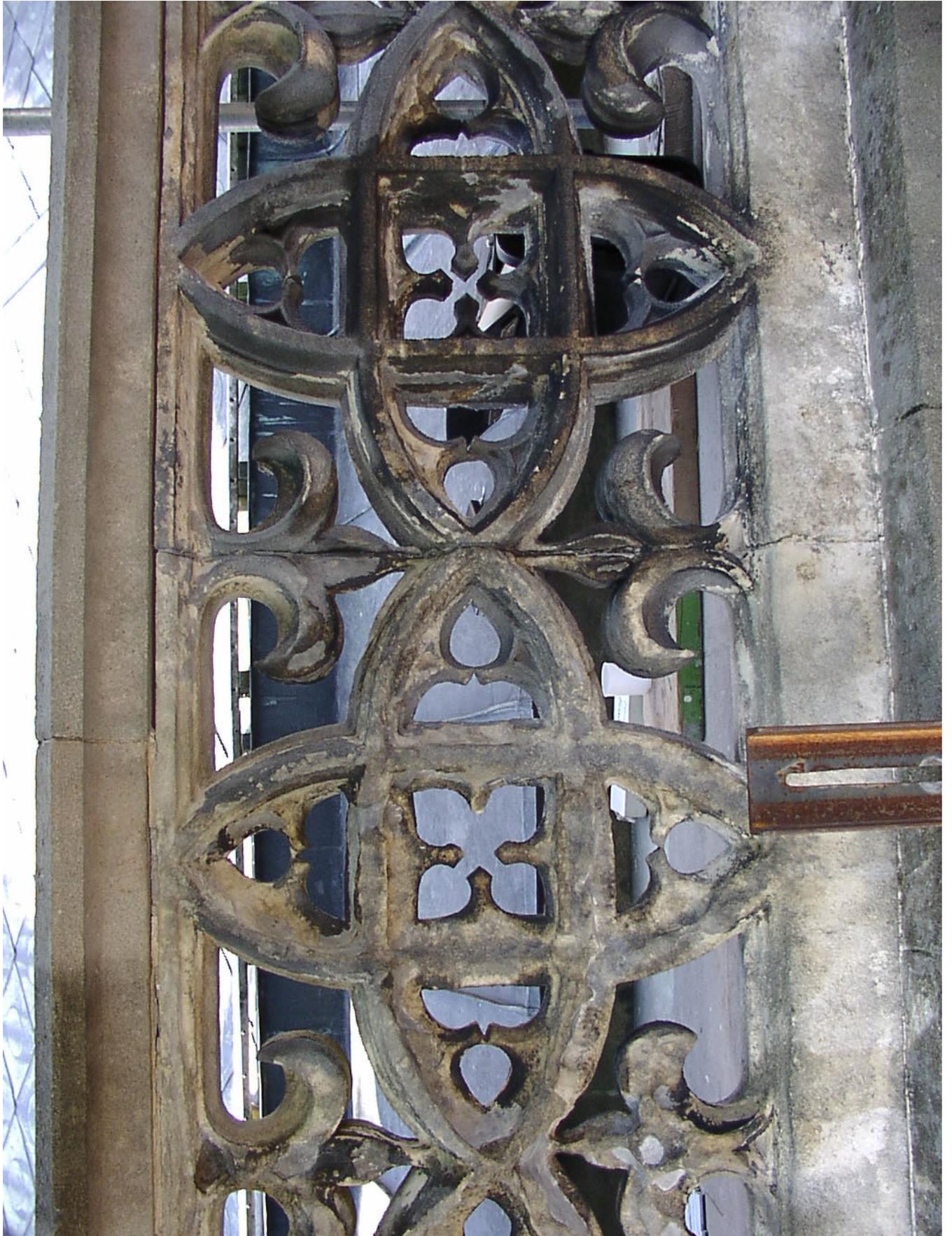














Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11

Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Inhalt	Seite
Bericht Brüstung 11	169
Standort	169
Schäden und Schadensursachen	169
Materialien	169
Ziele der Maßnahme	170
Maßnahmen	170
Entfernen loser Krusten	170
Vorfestigung	170
Krustendünnung	171
Ergänzungen, Schlämmungen	171

Retuschen	171
Fugenbehandlung	171
Rissverpressung und Dübelung	172
Nachfestigung	172
Begleitende Untersuchungen	172
Endzustand	172
Materialliste	173
Fotoanhang 11	175

Bericht Maßwerkbrüstung 11

Standortbeschreibung

Die Maßwerkbrüstungen befinden sich über den Jochen 7 und 11 und sind mit den Stützpfeilern der Fialen verbunden. Sie sind mit einem profilierten Brüstungsgesims abgedeckt. Durch die exponierte Standortsituation sind die Brüstungen extremer Bewitterung wie Schlagregen, Wind und im Winter äußerst starker Belastung durch Schnee und Eis ausgesetzt.

Schäden und Schadensursachen

Schäden:

Biogener Bewuchs

Krusten

Absanden

Abschuppen

morbide Zonen

Fehlstellen durch Abwitterung

Ausbrüche durch mechanische Einflüsse

Risse

Die augenfälligsten Schädigungen sind die schwarzen Gipskrusten die eine ausreichende Dampfdiffusion verhindern und zu weiteren Schäden führen. Infolge dieser Krusten kommt es zu Feuchtestau was starke Absandungen und Fehlstellen durch Auflösung der Kornkontakte und des dazwischenliegenden Bindemittels zur Folge hat. Partiiell kommt es zur Absprengung der dichten Krusten mit Verlust der obersten Kornlagen. Die bereits hohe Wasseraufnahme des Steines erhöht sich an bewitterten Flächen deutlich.

In Bereich des Überganges von Alterergänzungen aus Zementmörtel zum Stein treten Risse auf einige Ergänzungen liegen hohl und lösen sich ab. Unter diesen Ergänzungsstellen ist der Naturstein mürbe und sandet stark ab.

Einige, durch Spannungen verursachten Risse gefährden die Stabilität der Brüstungselemente.

Die Oberflächen haben unterschiedlich intensiven biogenen Bewuchs in Form von Algen geringfügig auch Flechten.

Materialien

Beim Gesteinsmaterial handelt es sich um SCHLAITDORFER SANDSTEIN, ein dem Keuper zuzuordnendem Stubensandstein. Er ist gegen Witterungseinflüsse nur mäßig resistent und zeigt häufig Absanden.

Die Fugen sind verbleit.

Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11
Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Abbildung 1:
Vorzustand Galerie 11:
Deutliche Schwärzung durch Krusten, biogener Bewuchs



Ziel der Maßnahme

Restauratorische Maßnahmen den Substanzerhalt des „Jetzt- Zustandes“ zum Ziel.
Das heißt:
Erhalt der noch intakten Altergänzungen,
Ergänzungen aus konservierenden Gründen, zur Stabilisierung des Gesamtbestandes.
Die längerfristige Beobachtung der Resultate soll Erkenntnisse für weitere Maßnahmen mit ähnlicher Problemstellung aufzeigen.

Maßnahmen

Entfernung loser Krusten

Die lose abstehenden Krusten ließen sich von Hand mittels Spatel vorsichtig entfernen.

Vorfestigung

Partielle Vorfestigung stark absandender Stellen mit Silicasol –Festiger 15% Ausfällrate.

Verbrauch: 0,25 Ltr. (Feld 11).

Nach Reaktionszeit:

Festigung mit KSE OH 75 verdünnt 1:1 mit Aceton

Verbrauch: 7,5 Ltr. (Feld 11).

Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11
Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Krustendünnung

Krusten wurden mittels Micropartikelstrahl vorsichtig reduziert in sensiblen Bereichen mit der Mikrodüse. Als Strahlgut kam Glaspulvermehl 100 μ zur Anwendung, der Arbeitsdruck betrug 1-1,5 Bar. Beläge aus Staub, Schmutz und biogenem Bewuchs konnten dabei gleichfalls abgereinigt werden ohne die Patina sichtbar zu beeinträchtigen.



Ergänzungen, Schlämmen Risskittungen

Fehlstellen wurden mit einer Silicasol- gebundenen Steinersatzmasse geschlossen. Schadzonen die durch Absanden Abschupfung, Schalenverlust usw. gekennzeichnet sind wurden mit Silicasol- Microschlämmen dünn beschichtet. Für den oberflächennahen Verschluss von Rissen und Anböschungen kamen Silicasol- Feinmörtel als Kitte zum Einsatz.



Retuschen

Als Retusche wurden Erdpigmente wässrig gelöst (Aqua Spuoka) lasierend auf die Ergänzungen aufgetragen.

Fugenbehandlung

Um das Eindringen von Wasser zu verhindern wurden Flankenrisse an den Bleifugen mit Silicasol- Feinmörtel geschlossen.



Rissverpressung und Dübelung

Durchgehende Risse wurden mit Epoxydharz verpresst und mit V4A Edelstahldübeln vernadelt.

Rundstahl \varnothing 4mm, Bohrung \varnothing 6 mm



Nachfestigung

Nachfestigung der gesamten Oberfläche mit Ergänzungen und Schlämmen zur Erreichung der beabsichtigten Endfestigkeit.

Verbrauch 4,25 Liter KSE-OH75 und 4,0 Aceton zum Nachwaschen

Begleitende Untersuchungen

Um Nachweis über die schrittweise Festigungszunahme zu führen wurden Haftzugmessungen vor und nach der Festigung durchgeführt dabei wurden drei Stufen der Schadensintensitäten vergleichend gemessen.

Begleitend wurden Wassereindringprüfungen nach Karstens vor und nach der Festigung durchgeführt.

Endzustand

Die bewitterten, schadhafte Oberflächen konnten deutlich messbar konsolidiert werden. Mineralische Anträngung, Schlämme Anböschungen sind fest mit dem Sandstein verbunden und genügen in Farbe und Struktur auch den geforderten ästhetischen Gesichtspunkten. Unregelmäßigkeiten an Bruchkanten und abgewitterten Bereichen konnten durch Schlämmebeschichtungen zurückgedrängt werden. Durch das Zusammenwirken der konservierenden Maßnahmen ist die Wasseraufnahme über die Oberfläche reduziert was eine Verlangsamung der Verwitterungsmechanismen bedeutet. Die Auswahl der mineralischen Ersatzmassen sichert die Möglichkeit zukünftiger regenerativer Pflegemaßnahmen im gleichen Steinersatzstoffsystem in Kombination mit Festigung durch Kieselsäureester.



Münster Ulm, Galerien Seitenschiff Nord, Felder 7 und 11
Dokumentation der Restaurierungsarbeiten

Materialliste	
Produkt	Hersteller/ Bezugsquelle
KSE-OH75 Steinfestiger	Scheidel GmbH & Co.KG Jahnstraße 38-42 96114 Hirschaid
Silicasolgebundene Steinersatzstoffe	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld
Epoxyd- Injektionsharz EP Litho- Jet	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld
Silicasol- Festiger Ludox	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld

KSE-OH75 Steinfestiger	Scheidel GmbH & Co.KG Jahnstraße 38-42 96114 Hirschaid
Silicasolgebundene Steinersatzstoffe	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld
Epoxyd- Injektionsharz EP Litho- Jet	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld
Silicasol- Festiger Ludox	Egon – Kaiser Restaurierungswerkstätte Wiesenweg 3/Stierhöfstetten 91483 Oberscheinfeld

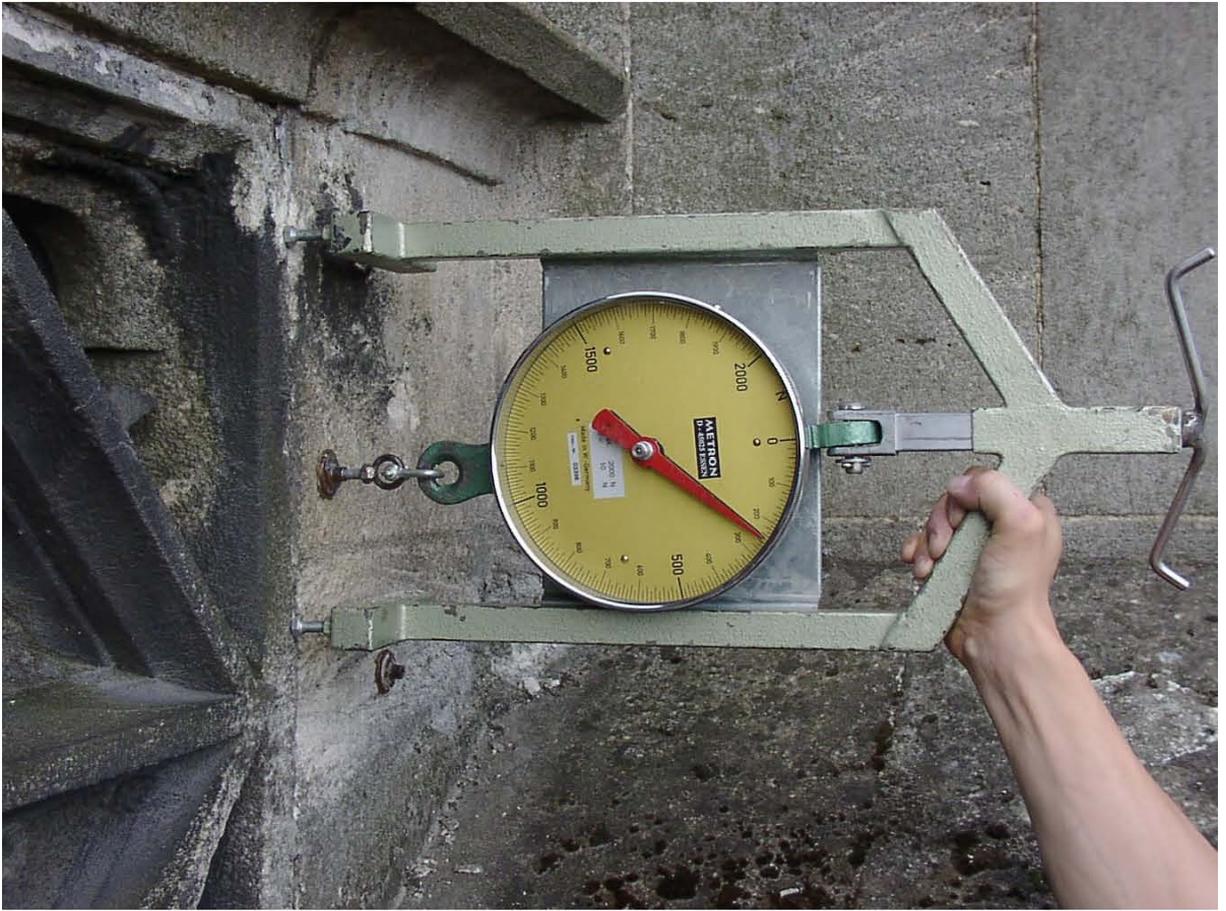










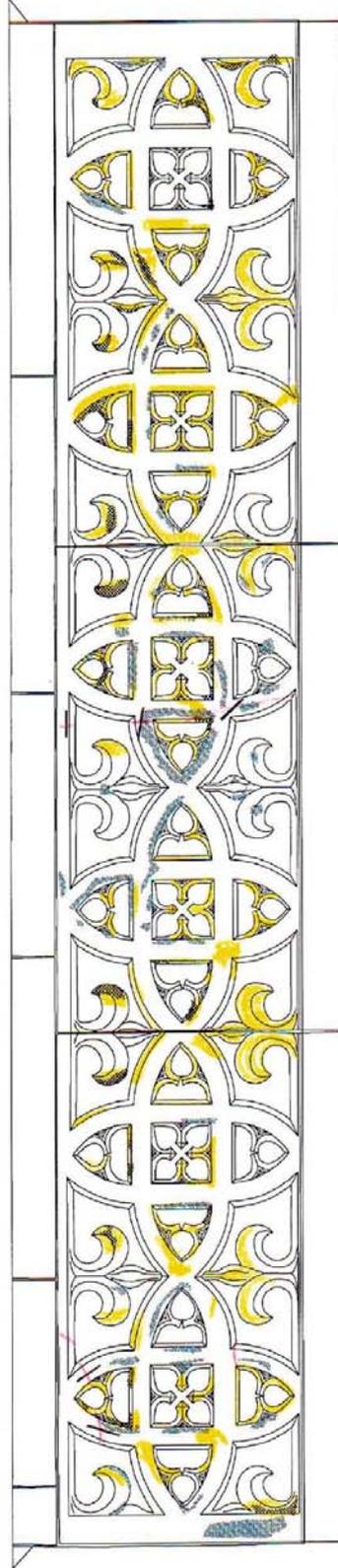
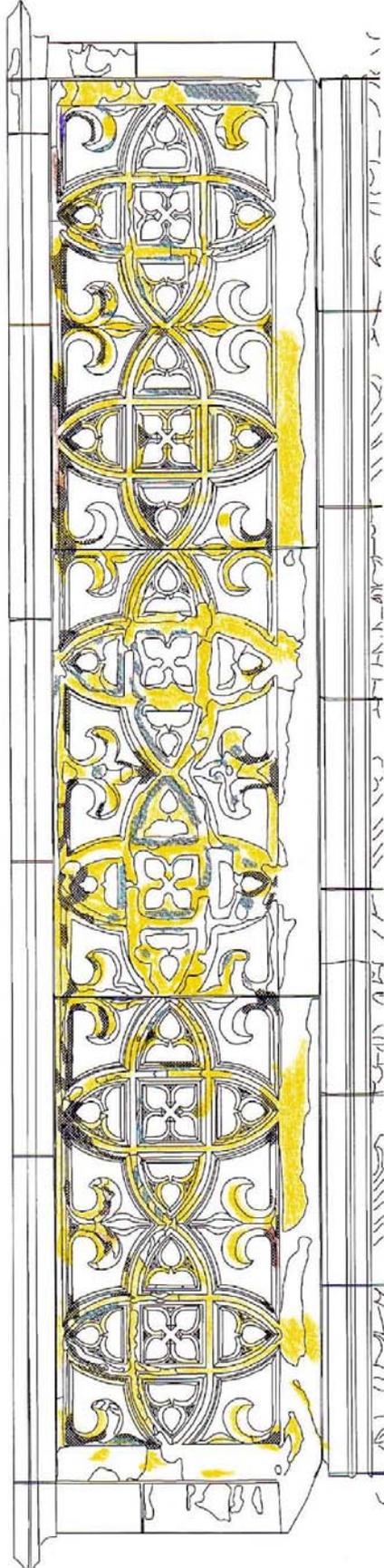








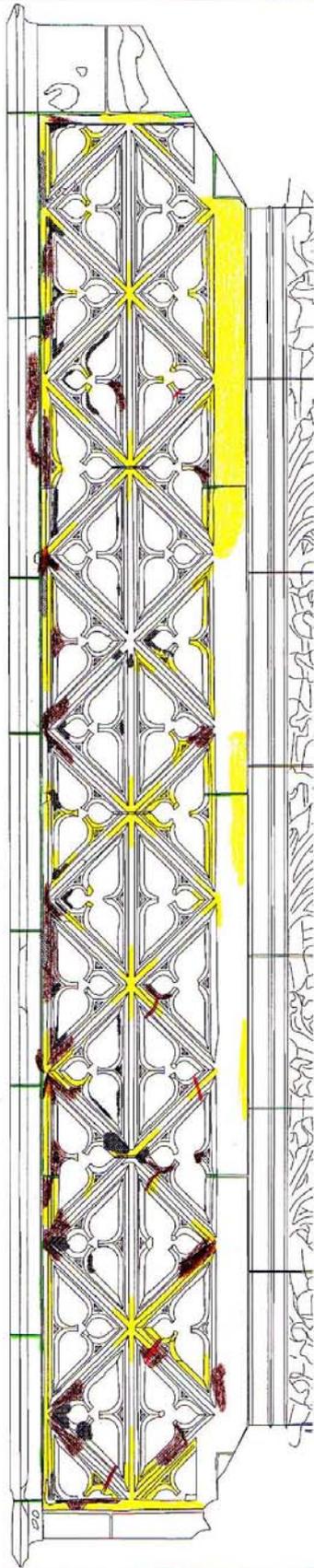




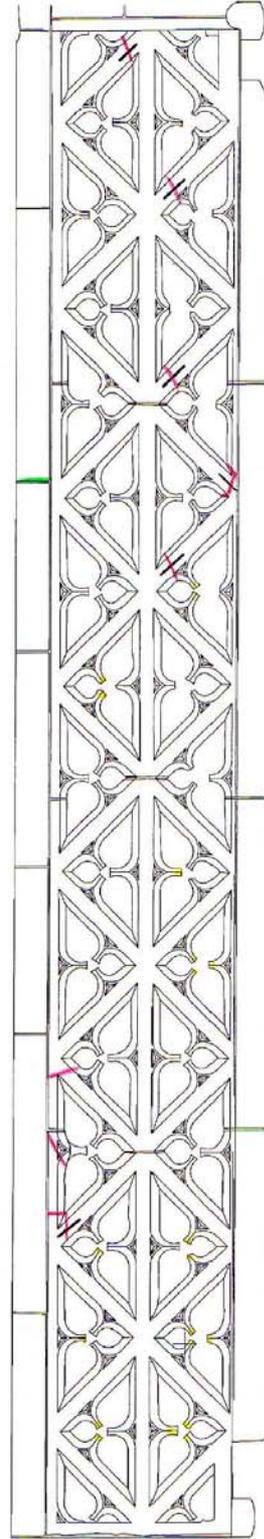
-  Kasseverputzung
-  Ergänzungen
-  Freilegung K&E
-  Anblöschungen / Schlämme
-  Kundenanfrage
-  Vorfestigung Silica-Sol-Lux
-  Annahme von Abhängigkeiten

Münster Ulm	DBU - Projekt	Galarion Seitenschiff, Nordseite Feld 7
Maßstabmaßezeichnung		
Egon Kaiser Restaurierungswerkstätte		
Wiesenweg 3, 91483 Oberschleißfeld		
Bauherr: Prof. Czametzki		
Datum: 04.12.2003		
Telefon: 09167/ 449 Telefax: 09167/ 1289		

Münster Ulm Galerien Seitenschiff, Nordseite Feld 11 Ansicht von Außen



Münster Ulm Galerien Seitenschiff, Nordseite Feld 11 Ansicht von Innen



- █ Rivetpressung
- █ Figurenabschrägung
- █ Festigung KSE
- █ Aufbautungen, Skulpturen
- █ Kantenbearbeitung
- █ Verfüllung Blei-Schluck
- █ Abräume von Abhängungen

Münster Ulm DBU - Projekt Galerien Seitenschiff, Nordseite Feld 11

Mitnahmekartierung Egon Kaiser Restaurierungswerkstätte

Bauherr: Rat Chemnitz Wilsenweg 3, 51483 Chausseefeld

Datum: 04.12.2003 Telefon: 09167/419 Telefax: 09167/1200

9 Zusätzliche Untersuchungen zum Ulmer Münster

9.1 Mörteluntersuchungen

Im Rahmen der Objektuntersuchung und Probenahme Vorort wurden am Ulmer Münster eine Reihe von Mörtelproben vom Chor und südlichem Chorturm entnommen, um die Bandbreite der unterschiedlichen Mörteln feststellen zu können. Hierbei wurden folgende Bereiche beprobt:

Tabelle 23: Probenahmebereiche der Mörtel

Entnahmebereich	Bezeichnung
Ulmer Münster; Chor ca.1870 Chorpfeiler 18 – „Horizontalfuge“	Kalkzementmörtel
Ulmer Münster; Chor ca.1870 Chorpfeiler 18 – „Vertikalfuge	Kalkzementmörtel, der aufgrund seines überproportional hohen Bindemittelanteils vermutlich als Vergussmörtel eingesetzt wurde
Ulmer Münster; Südlicher Chorturm ca. 1872 Vierungsgalerie Ostseite Gesims 2 / rechte Fuge; „Vertikalfuge“	Kalkmörtel, der aufgrund seines überproportional hohen Bindemittelanteils vermutlich als Vergussmörtel eingesetzt wurde
Ulmer Münster südlicher Chorturm, Turmhelm Feld 1, Südseite „Horizontalfuge“ zwischen Masswerk (Savonnières Kalk) und Riegel (Schlaitdorfer Sandstein)	Kalkmörtel, der aufgrund seines überproportional hohen Bindemittelanteils vermutlich als Vergussmörtel eingesetzt wurde
Ulmer Münster südlicher Chorturm, Turmhelm Feld 3, Strebe 2; „Horizontalfuge“ außen	Kalkzementmörtel, der aufgrund seines überproportional hohen Bindemittelanteils vermutlich als Vergussmörtel eingesetzt wurde
Ulmer Münster südlicher Chorturm, Turmhelm Feld 5, Strebe 7; „Horizontalfuge“ innen	Kalkzementmörtel, der aufgrund seines überproportional hohen Bindemittelanteils vermutlich als Vergussmörtel eingesetzt wurde
Ulmer Münster südlicher Chorturm, Turmhelm Feld 5, Strebe 7; „Horizontalfuge“ Fugenmörtel außen	Kalkzementmörtel, der aufgrund seines überproportional hohen Bindemittelanteils vermutlich als Vergussmörtel eingesetzt wurde
Ulmer Münster südlicher Chorturm, Viereckgalerie Nordseite zwischen Abdecker und Brüstung; „Horizontalfuge“	Kalkzementmörtel, der aufgrund seines überproportional hohen Bindemittelanteils vermutlich als Vergussmörtel eingesetzt wurde
Ulmer Münster südlicher Chorturm, Viereckgalerie Nordseite, Fuge zwischen Abdecker und Maßwerksbrüstung „Horizontalfuge“	Kalkzementmörtel, der aufgrund seines überproportional hohen Bindemittelanteils vermutlich als Vergussmörtel eingesetzt wurde

Die ausführlichen Untersuchungsergebnisse sind in den nachfolgenden Datenblättern aufgeführt. Die entsprechenden Bilder stellen Übersichtsaufnahmen der Dünnschliffe dar. Die Aufnahmen wurden mit normal polarisiertem Licht aufgenommen, der Porenraum blau angefärbt. Die Porositäten konnten aufgrund der geringen Probenmengen nur mikroskopisch ermittelt werden.

Ulmer Münster; Chor ca.1870 Chorpfeiler 18 – „Horizontalfuge“

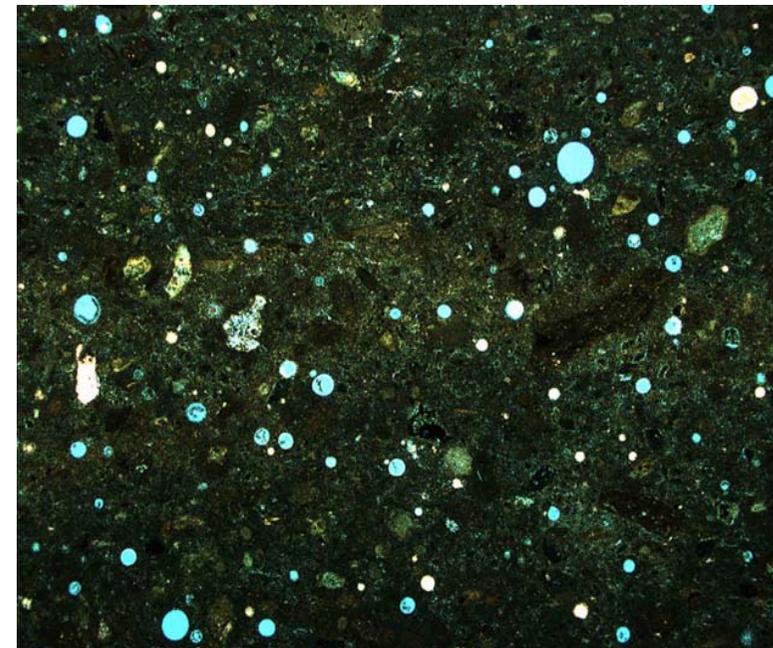
Bindemittel:	kalkig (Calcit und Dolomit) mit Zement
Zuschläge:	Sand (Quarz, Feldspäte, Gesteinsbruchstücke, Hellglimmer)
B / Z-Verhältnis	1:1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	40 %
125 – 250µm	32 %
250 – 630 µm	26 %
630 – 1250µm	2 %
Porosität:	Ø 2,7 Vol.-%



1 mm

Ulmer Münster; Chor ca.1870 Chorpfeiler 18 – „Vertikalfuge“

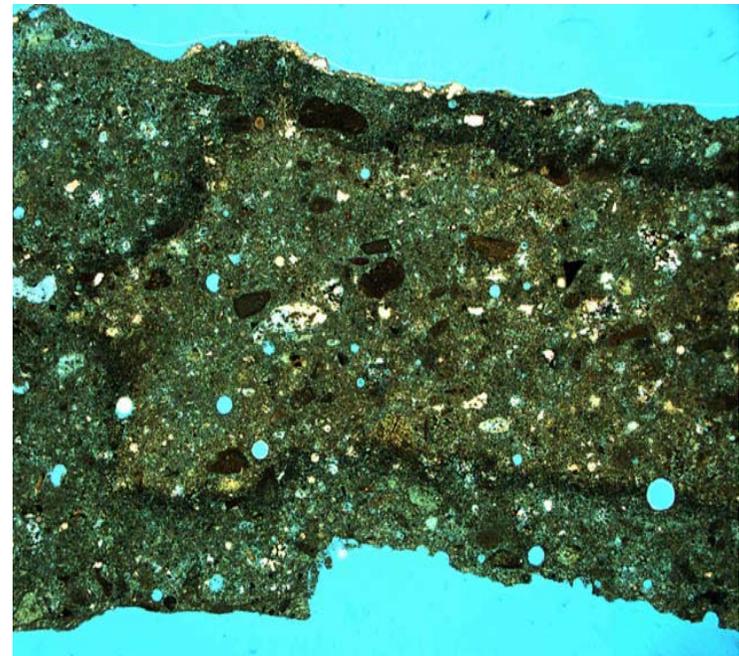
Bindemittel:	kalkig (Calcit und Vaterit) mit Zement
Zuschläge:	Quarz, (max. 5 Vol.-%)
B / Z Verhältnis	4 : 1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	30 %
125 – 250µm	35 %
250 – 630 µm	35 %
630 – 1250µm	---
Porosität:	Ø 2,7 Vol.-% „Luftporen“
Bemerkungen	Vergussmörtel



1 mm

**Ulmer Münster; Südlicher Chorturm ca. 1872 Vierungsgalerie
Ostseite Gesims 2 / rechte Fuge; „Vertikalfuge“**

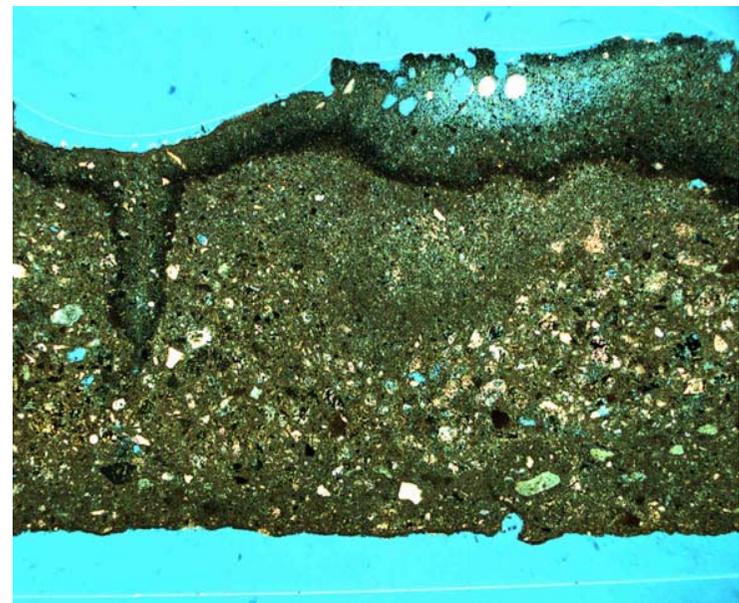
Bindemittel:	kalkig (Calcit und wenig Dolomit) Reste von ungelöschtem Kalk
Zuschläge:	Quarz, (max. 5 Vol.-%), Erzminerale (Pyrrhothin)
B / Z Verhältnis	5 : 1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	nicht messbar
125 – 250µm	messbar
250 – 630 µm	
Porosität:	Ø 1,6 Vol.-% „Luftporen“
Bemerkungen:	Zonarbau an der Probenaußenseite Vergussmörtel



1mm

**Ulmer Münster südlicher Chorturm, Turmhelm Feld 1, Südseite
„Horizontalfuge“ zwischen Masswerk (Savonnières Kalk) und Riegel
(Schlaitdorfer Sandstein)**

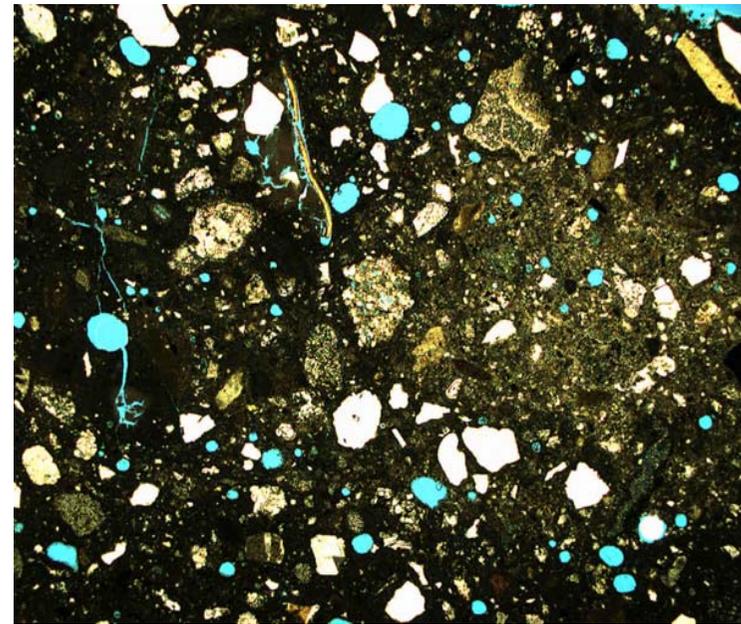
Bindemittel:	kalkig (Calcit)
Zuschläge:	Quarz, (max. 5 Vol.-%), wenig Erzminerale (Pyrrhothin)
B / Z Verhältnis	5 : 1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	nicht messbar
125 – 250µm	messbar
250 – 630 µm	
Porosität:	Ø 2,0 Vol.-%
Bemerkungen:	Zonarbau an der Probenaußenseite röntgenografisch wurde Gips identifiziert



1 mm

**Ulmer Münster südlicher Chorturm, Turmhelm Feld 3,
Strebe 2; „Horizontalfuge“ außen**

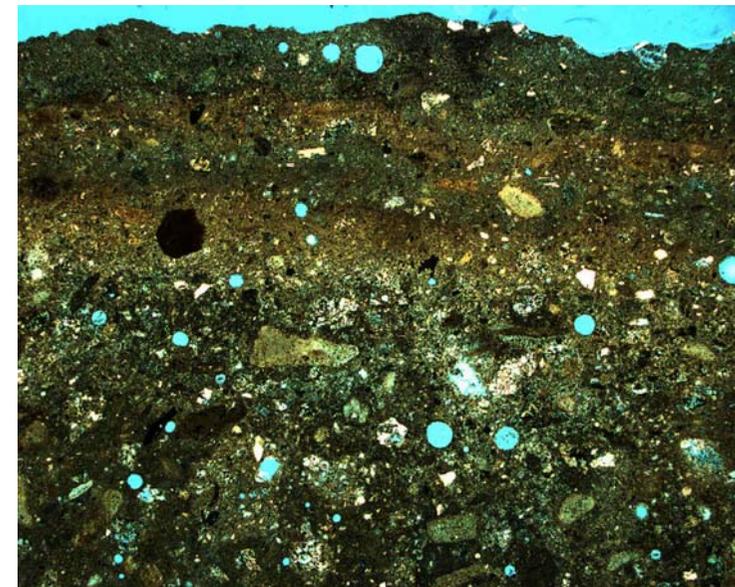
Bindemittel:	kalkig (Calcit) mit Zement und Reste von ungelöschtem Kalk
Zuschläge:	Quarz, (ca. 5 – 10 Vol.-%)
B / Z Verhältnis	6 : 1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	67 %
125 – 250µm	14 %
250 – 630 µm	19 %
630 – 1250µm	---
Porosität:	Ø 4,3 Vol.-%
Bemerkungen:	„Luftporen“



1mm

**Ulmer Münster südlicher Chorturm, Turmhelm Feld 5,
Strebe 7; „Horizontalfuge“ innen
Vergußmörtel**

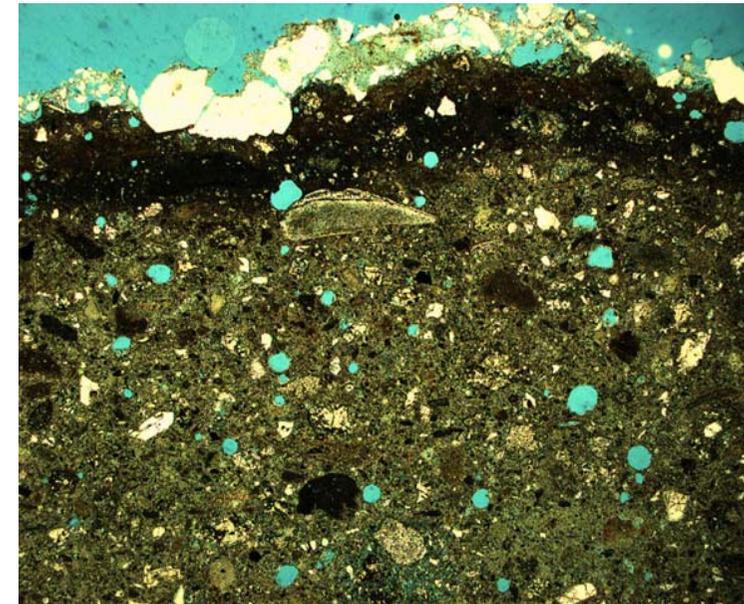
Bindemittel:	kalkig (Calcit und Vaterit) mit Zement
Zuschläge:	Kalkeinschlüsse, Quarz (<< 5 Vol.-%)
B / Z Verhältnis	7 : 1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	nicht messbar
125 – 250µm	messbar
250 – 630 µm	
630 – 1250µm	
Porosität:	Ø 2,3 Vol.-%
Bemerkungen:	Vergussmörtel mit „Luftporen“ röntgenografisch wurde Gips identifiziert



1mm

**Ulmer Münster südlicher Chorturm, Turmhelm Feld 5
Strebe 7; „Horizontalfuge“ Fugenmörtel außen**

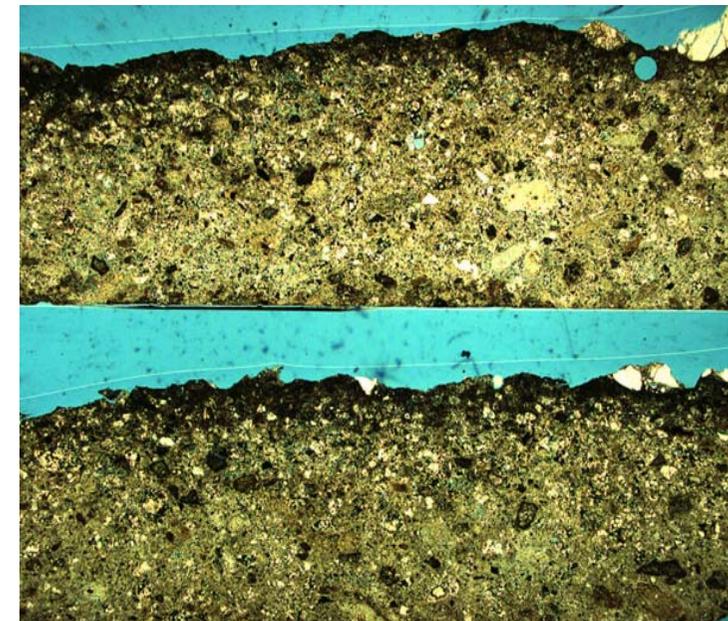
Bindemittel:	kalkig (Calcit) mit Zement
Zuschläge:	Kalkeinschlüsse, Quarz (<< 5 Vol.-%)
B / Z Verhältnis	4 : 1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	nicht messbar
125 – 250µm	
250 – 630 µm	
630 – 1250µm	
Porosität:	Ø 5,4 Vol.-% (1,94-19,5Vol.-%)
Bemerkungen:	„Luftporen“ röntgenografisch wurden Ettringit und Magnesit identifiziert



1mm

**Ulmer Münster südlicher Chorturm, Viereckgalerie Nordseite
Zwischen Abdecker und Brüstung; „Horizontalfuge“**

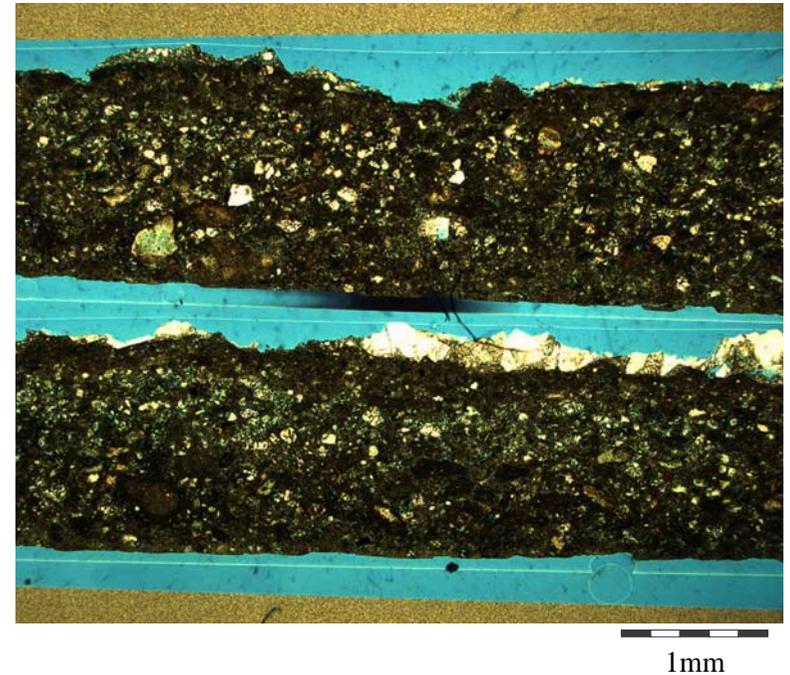
Bindemittel:	kalkig (Calcit und Dolomit) mit Zement und Portlandit
Zuschläge:	Kalkeinschlüsse, Quarz (ca. 3 Vol.-%)
B / Z Verhältnis	4 : 1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	nicht messbar
125 – 250µm	
250 – 630 µm	
630 – 1250µm	
Porosität:	mikroskopisch nicht erkennbar
Bemerkung	Vergussmörtel



1mm

**Ulmer Münster südlicher Chorturm, Viereckgalerie Nordseite
Fuge zwischen Abdecker und Maßwerksbrüstung „Horizontalfuge“**

Bindemittel:	kalkig (Calcit) mit Zement
Zuschläge:	Kalkeinschlüsse, Quarz (ca. 5 Vol.-%)
B / Z Verhältnis	4 : 1
Korngrößenverteilung:	
< 125µm	nicht messbar
125 – 250µm	messbar
250 – 630 µm	
630 – 1250µm	
Porosität:	mikroskopisch nicht erkennbar
Bemerkungen:	röntgenografisch wurden Gips und Chlorit identifiziert. Es konnten keine Trassanteile ermittelt werden



Wie die Untersuchungsergebnisse gezeigt haben, wurden in den beprobten Bereichen Kalkmörtel und Kalkzementmörtel verwendet, die alle sehr niedrige Porositäten aufweisen und meist „Luftporen“ zeigen.

Im Chorbereich wurde für die Horizontalfuge ein Kalkzementmörtel mit einem Bindemittel/Zuschlag Verhältnis von 1:1 eingesetzt. Während die Vertikalfuge einen Kalkzementmörtel besitzt, der aufgrund seines sehr hohen Bindemittelanteils als Vergussmörtel zu bezeichnen ist.

Sämtliche Mörtel des südlichen Chorturmes weisen überproportional hohe Bindemittelanteile auf und sind daher als Vergussmörtel zu bezeichnen. Mit Ausnahme von einer Probe konnten bei diesen Mörteln die Korngrößen der Zuschläge nicht gemessen werden, da diese als Gesteinsmehl vorlagen. Die Zuschlagsanteile wurden daher röntgenografisch ermittelt.

9.2 Immissionsraten und Temperaturmessungen

9.2.1 Immissionsraten

Zur Beurteilung der Einwirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien muss ein Zusammenhang zwischen den vorhandenen Immissionen und den daraus resultierenden Wirkungen auf das Material hergestellt werden. Daher ist die Immission- oder die Aufnahme rate bezogen auf die Flächeneinheit des Materials und die Zeit, in der die Schadstoffmenge aufgenommen wird, von Bedeutung.

Dies wird mit der Immissionsratenmessanlage (IRMA) gemessen.

Das Prinzip des Verfahrens beruht auf der Reaktion der zu bestimmenden Schadstoffe mit einer geeigneten Absorptionsflüssigkeit. Die Flüssigkeit wandert dabei in Form eines zusammenhängende Filmes – der eigentlichen Messfläche – an der Außenseite eines zylindrischen Tränkkörpers herunter, den sie auch noch zusätzlich durchtränkt. Die Gehalt der sich in der Absorptionslösung ansammelnden Reaktionsprodukte werden nach ihrer Bestimmung auf die Standardmessfläche bezogen. So errechnen sich dann die Immissions- oder Aufnahme rate in Masse pro Fläche und Zeit [$\text{mg} \times \text{m}^{-2} \times \text{d}^{-1}$] (VDI 3794).

Am Ulmer steht das Immissionsmessdatengerät seit August 1973 auf der ersten Aussichtsplattform des Ulmer Münsters an der Nordseite in 70m Höhe (Foto 1 - 3 und Abbildung 1 bis 4).

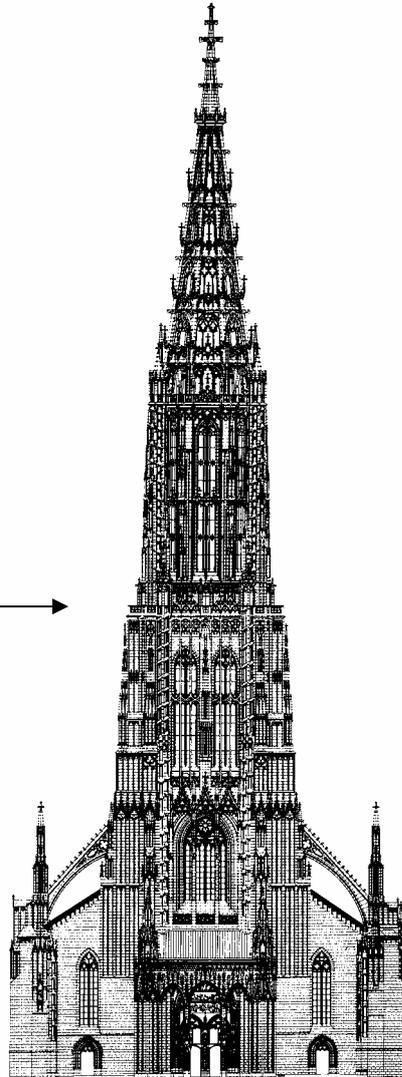
In den nachfolgenden Grafiken sind die Jahresmittelwerte der Immissionsraten von Schwefeldioxid (SO_x), Chlorid, Nitrat (NO_x) und Fluorid in den Zeiträumen von 1977 bis 2003 dargestellt.



Foto 1 und 2 : Irmamesstation

Foto 3:
Standort der IRMA
am Ulmer Münster

Hauptturm, Westseite,
70 Meter



Standort der
Wetterstation



Nord

Standort der IRMA

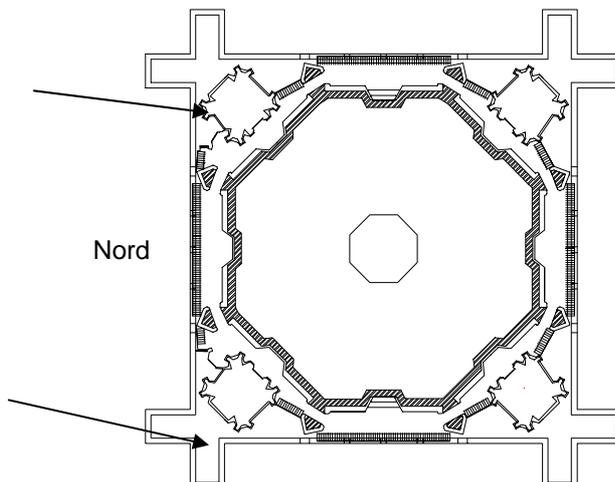


Abbildung 1:

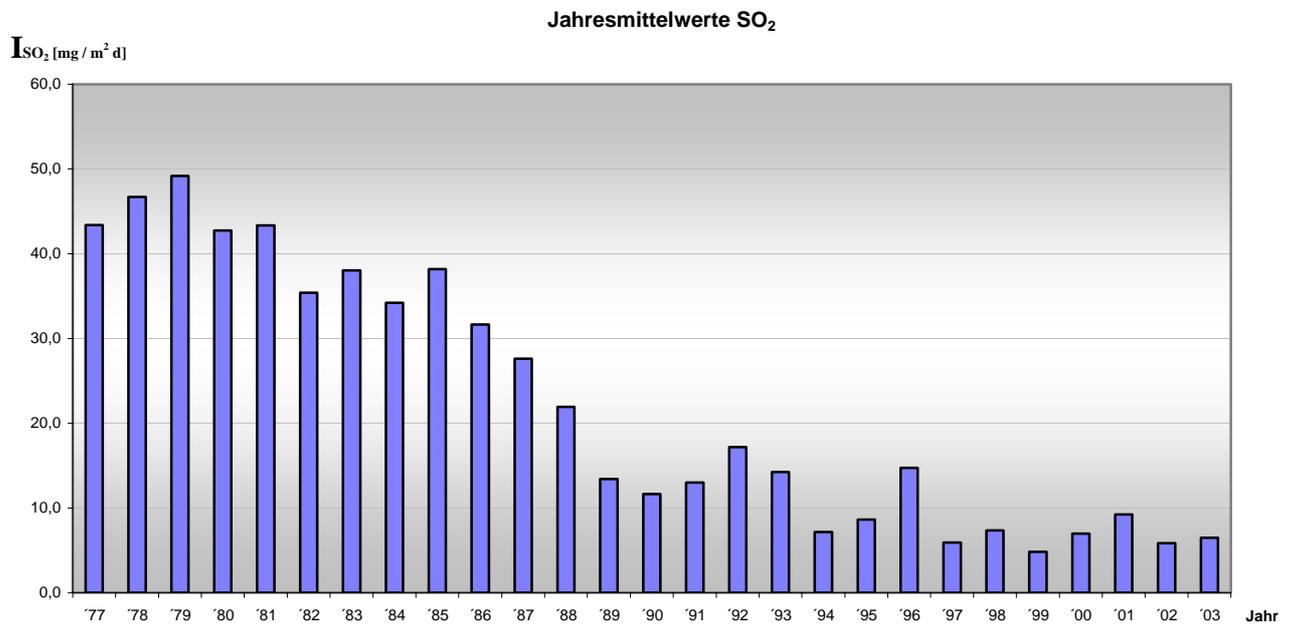


Abbildung 2:

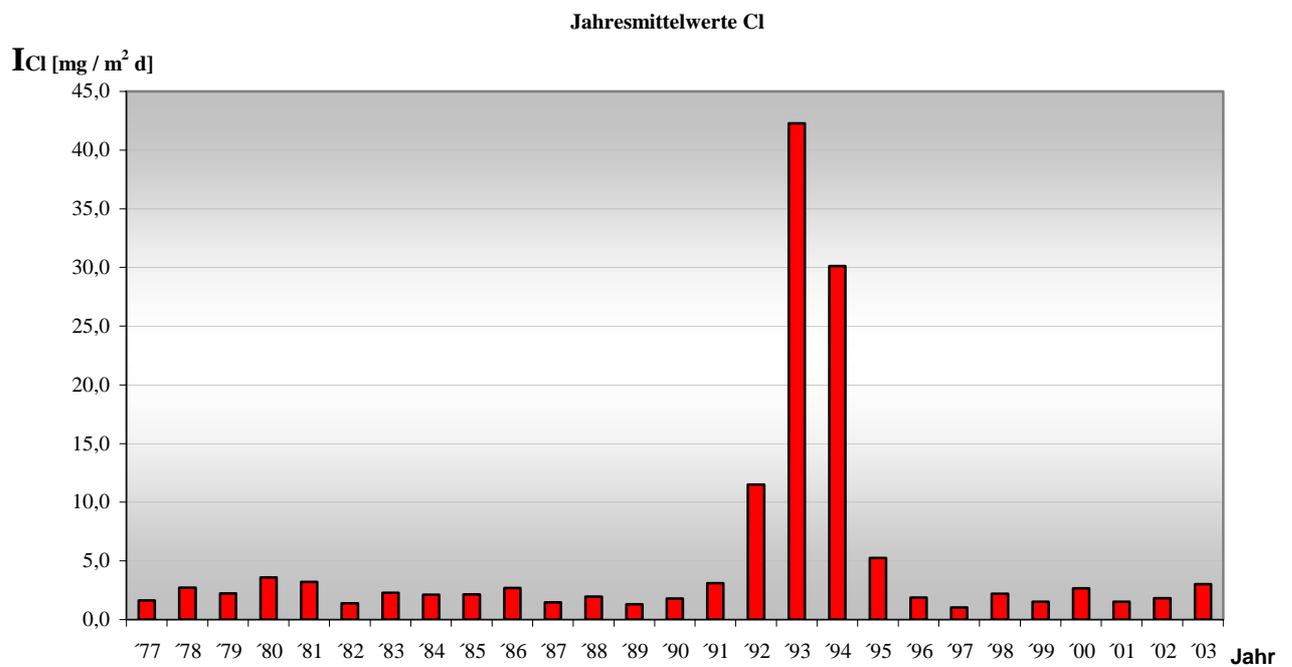


Abbildung 3:

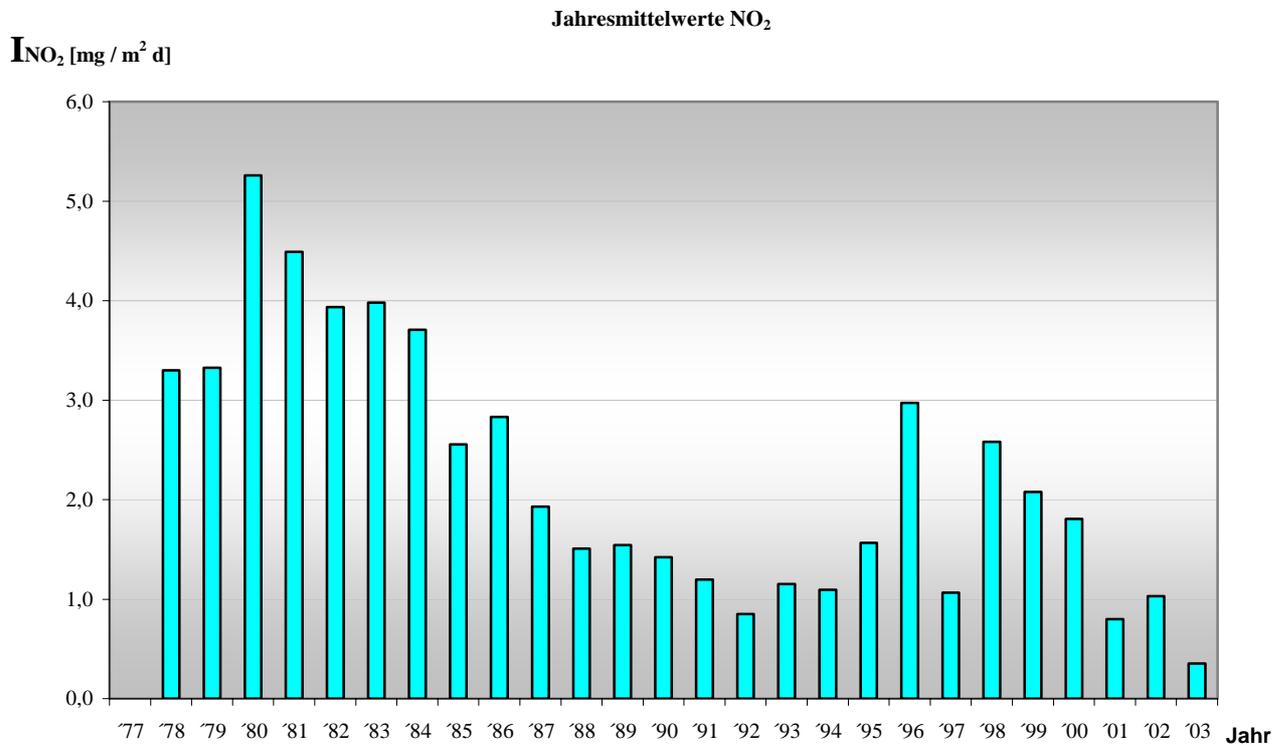
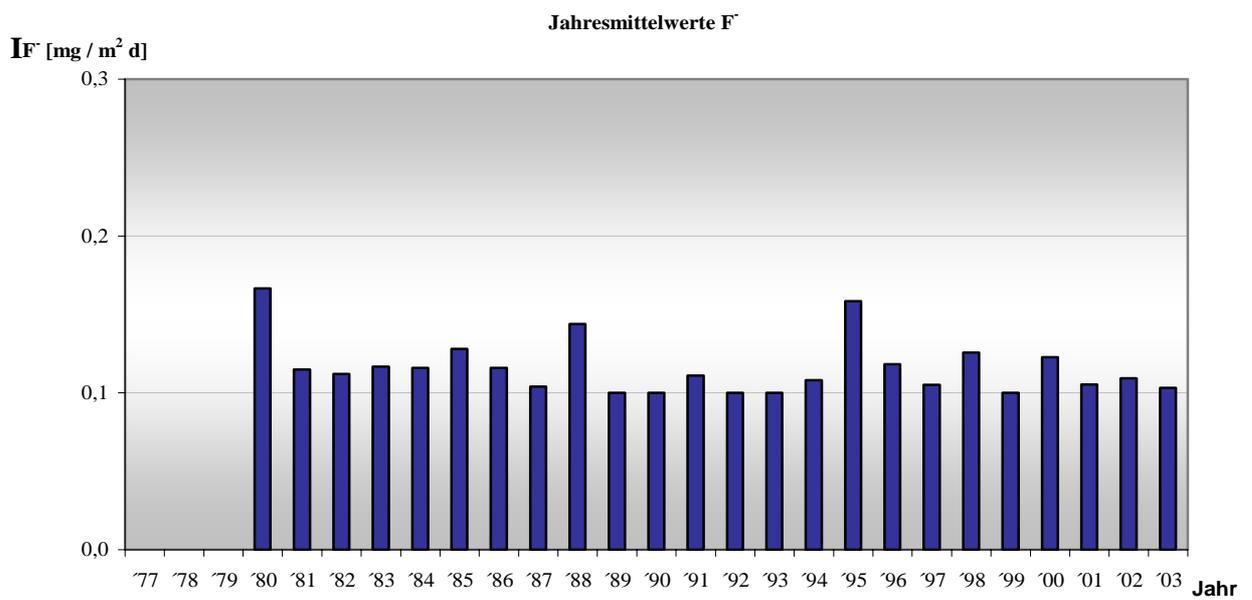


Abbildung 4:



Betrachtet man die Immissionsraten von Schwefeldioxid (SO_x), so ist ab 1994 eine deutliche Abnahme unter $10 \text{ mg/m}^2\text{d}$ festzustellen.

Im Zeitraum von 1977 bis 2003 gemessenen Chlorid-Immissionsraten liegen fast immer deutlich unterhalb $5 \text{ mg/m}^2\text{d}$. Nur im Zeitraum vom 1992 bis 1994 lassen sich Immissionsraten bis maximal $42 \text{ mg/m}^2\text{d}$ messen. Eine Erklärung hierzu konnte nicht gefunden werden.

Die Stickoxide-Immissionsraten sinken von 1977 bis 1994 deutlich ab, um dann von 1995 bis 1999 wieder leicht anzusteigen. In den Jahren 2001 bis 2003 lassen sich die niedrigsten Jahresmittelwerte messen.

Die Fluorid-Jahresmittelwerte liegen fast alle um $0,1 \text{ mg/m}^2\text{d}$.

Die Messwerte und die grafischen Darstellungen der einzelnen Jahre sind im Anhang der CD Immissionsraten- und Temperaturmessungen zu finden.

9.2.2 Temperaturmessungen

An der IRMA-Messstation wurden außerdem die Temperaturen mit einem Maxima-Minima-Thermometer, der Luftdruck mit einem Dosenbarometer und die relative Feuchte mit einem Hygrometer gemessen (Foto 4 und 5).

In unseren Bericht aufgenommen wurden nur die Temperaturmessungen als aussagefähigste Daten.

Bei der Temperaturmessung wurden einmal täglich morgens um 9 Uhr der innerhalb von 24 Stunden erreichte höchste und niedrigste Wert und der aktuelle Wert abgelesen. In unseren grafischen Darstellungen sind die Maxima- und Minima-Temperaturen jeweils eines Jahres dargestellt. Die Messwerte und die grafischen Darstellungen sind im Anhang der CD Immissionsraten- und Temperaturmessungen zu finden.

Foto 4 und 5: Klimamessstation



10 Fazit

Aufgrund der Schadensaufnahme und der Materialuntersuchungen wurden in Freiburg die Brüstungselemente der zweiten Kaiserkapelle (linke Seite) zur AVT ausgewählt. Vom Ulmer Münster wurden die Brüstungselemente der Galerien des nördlichen Seitenschiffes Feld 7 und 11 hierfür freigegeben.

Entsprechend der unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten in Freiburg (5mm) und Ulm (Fugendicke zwischen 3 und 5mm) konnte die hydraulische Wandkreissäge WS 400 E der Firma Cedima erfolgreich eingesetzt werden. Am Ulmer Münster wurde sie zum Aufsägen der mit Mörtel verfüllten horizontalen Standfuge zwischen Maßwerksbrüstung und Gesims benutzt.

Zusätzlich kam am Ulmer Münster ein Elektrofuchsschwanz der Firma Elu mit unterschiedlichen Sägeblättern (HM Multicut Firma Hilti und S1122 VF BIM der Firma Bosch) zum Aufsägen der mit Blei vergossenen Vertikalfugen (3 mm) und der Abdecker (inkl. der Eisendübel) zu Einsatz. Außerdem wurden mit dieser Säge die mit Mörtel vergossenen und verfugten Horizontalfugen zwischen der Maßwerkbrüstung und der Abdecker sowie die Vertikalfugen der Maßwerkbrüstung geöffnet.

Es wurde eine Flex zum Auftrennen der mit Mörtel verfüllten Vertikalfuge zwischen Maßwerkbrüstung und Galeriebelag eingesetzt.

Am Freiburger Münster kam eine Säbelsäge (WSR 1200 PE Pendelhub-Säbelsäge der Firma Hilti), mit grob gezahnten Holzägeblättern (W-CSRWF23 der Firma Hilti) zum Einsatz. Da diese Säge eine Schnitttiefe von 25 cm besitzt, konnten mit ihr sowohl die Mörtel- als auch Bleifugen aufgeschnitten werden.

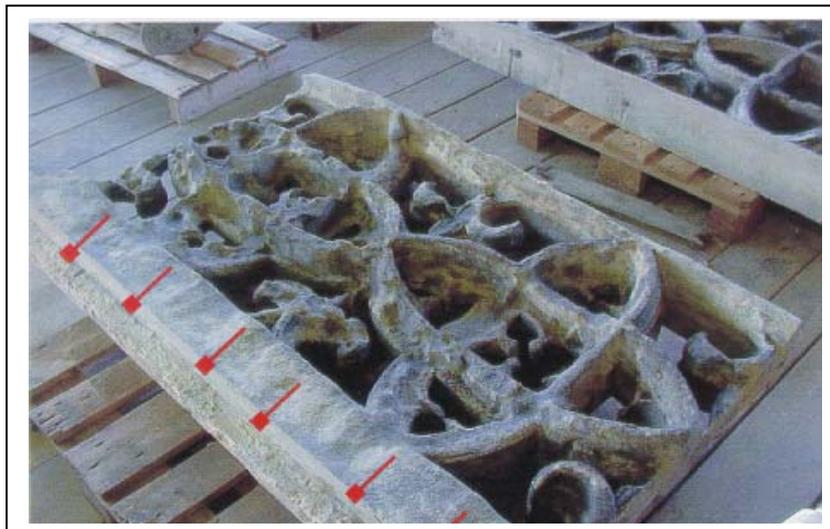
Dabei war bei beiden Objekten das Einrichten und Justieren der Wandkreissäge zum Erzeugen einwandfreier Schnitte ebenfalls ein wesentlicher Punkt der Testläufe.

Mit den beschriebenen Sägetechniken konnten die schwer zugängliche architektonische Bauteile zerstörungsfrei auszubauen werden. Diese Sägetechnik ist sowohl zum Ausbau der Brüstungselemente geeignet, die für die AVT vorgesehen sind und kann aber auch dann eingesetzt werden, wenn die Brüstungselemente für eine herkömmlicher Restaurierung in die Werkstatt gebracht werden müssen.

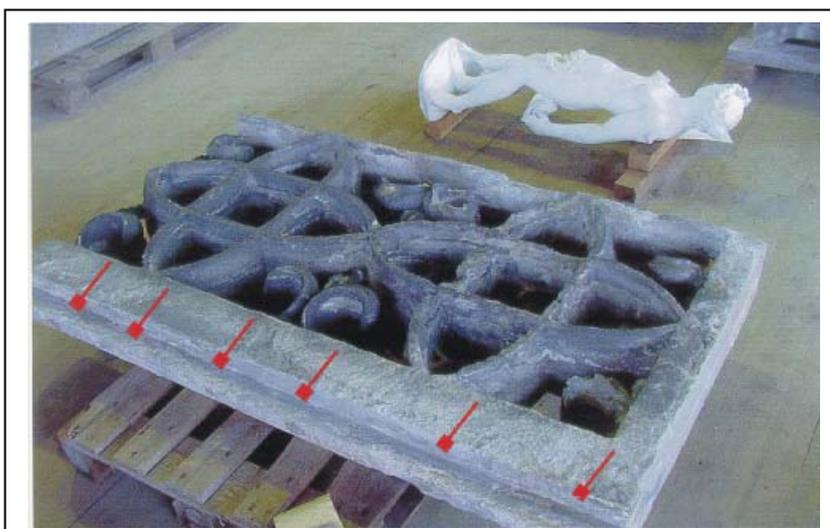
Die abschließenden Fotos zeigen beispielhaft die restaurierten und der AVT unterworfenen Brüstungselemente vom Ulm Münster.



Maßwerksbrüstung Ulmer
Münster, Galerien
Seitenschiff Nord, Feld 7,
linker Brüstungsabschnitt
nach der Acrylharzvoll-
tränkung mit Dübelplan
(Foto der Restaurierungs-
werkstätte Egon Kaiser,
Oberscheidfeld).



Maßwerksbrüstung Ulmer
Münster, Galerien
Seitenschiff Nord, Feld 7,
mittlerer Brüstungsabschnitt
nach der Acrylharzvoll-
tränkung mit Dübelplan
(Foto der Restaurierungs-
werkstätte Egon Kaiser,
Oberscheidfeld).



Maßwerksbrüstung Ulmer
Münster, Galerien Seitenschiff
Nord, Feld 7, rechter
Brüstungsabschnitt nach der
Acrylharzvolltränkung mit
Dübelplan (Foto der
Restaurierungswerkstätte Egon
Kaiser, Oberscheidfeld).



Maßwerksbrüstung Ulmer Münster, Galerien Seitenschiff Nord, Feld 7; Detail des Brüstungsabschnitts nach dem Wiedereinbau August 2004 (Foto Münsterbauhütte Ulm).



Maßwerksbrüstung Ulmer Münster, Galerien Seitenschiff Nord, Feld 7; Detail des Brüstungsabschnitts nach dem Wiedereinbau August 2004 (Foto Münsterbauhütte Ulm).

11 LITERATUR

[1] <http://www.kirche-ulm.de/muenster/inmfo/geschichte.htm>

Allgemeiner Geschäftsbericht des Vorstandes des Freiburger Münsterbauvereins für das Jahr 1929
Münster.

Allgemeiner Geschäftsbericht des Vorstandes des Freiburger Münsterbauvereins für das Jahr 1937
Münster.

Allgemeiner Geschäftsbericht des Vorstandes des Freiburger Münsterbauvereins für das Jahr 1938
Münster.

Allgemeiner Geschäftsbericht des Vorstandes des Freiburger Münsterbauvereins für das Jahr 1939
Münster.

Allgemeiner Geschäftsbericht des Vorstandes des Freiburger Münsterbauvereins für das Jahr 1940
Münster.

DIN 4022: Bestimmung der Korngrößen (genauen Titel?)

DIN 52 617: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen (Mai 1987), Beuth
Verlag, Berlin.

Grassegger, G. und Nürnberger U. (1996): Untersuchungsbericht FMPA, Qualitätskontrolle mit
zerstörungsfreien bzw. -zerstörungsarmen Maßverfahren zur schnellen Ermittlung der Qualität von
Werksteinen aus dem Stubensandstein vom Bruch Pliezhausen (Steinbruchbetrieb Fauser)

Grassegger, G. und Nürnberger U. (1998): Untersuchungsbericht FMPA Ulmer Münster Bauabschnitt
Südturm
(Pfeiler 18)

Grimm, W.-D. et al. (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland.
Arbeitsheft 50, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.

Hellstern (2003): Restaurierungsbericht Freiburger Münster, Freiburg 2003

Kaiser, E. (2003): Restaurierungsbericht „Maßwerksbrüstungen“ Ulmer Münster nördliches
Seitenschiff

Kempf, F. und Schuster K. (1906): Das Freiburger Münster, Ein Führer für Einheimische und Fremde,
Freiburg.

Kempf, F. (1926): Das Freiburger Münster, Freiburg 1926.

Kessler, G. und Leiber J. (1980): Erläuterungen zu Blatt 7813 Emmendingen, 151S., 13Abb., 3 Taf,
2Beil.; Stuttgart.

Kraus, K. (1985): Experimente zur immissionsbedingten Verwitterung der Naturbausteine des Kölner
Doms im Vergleich zu deren Verhalten am Bauwerk. Inaugural-Dissertation, Köln.

Kürten, L. (2000): Die Maßwerksbrüstung am Münster in Freiburg. Versuche zur Festigung und
Hinterfüllung; Entwicklung eines Konservierungskonzeptes mit Umsetzung an einer Musterachse.

Dipl.-Arbeit der Fachhochschule Köln, Fachbereich Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut.

Müller-Sigmund, H. (2001): Kurzbericht über die bisherigen Untersuchungen an den derzeit verwendeten Sandstein-Werksteinen der Freiburger Münsterhütte. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Mineralogie, Petrologie und Geochemie.

N.N. (1983): Herkunft und Beschaffenheit der Bausteine des Freiburger Münsters. Hrsg. Mtlg. für Statistik und Einwohnerwesen der Stadt Freiburg im Breisgau.

Pache, T. (1998): Zum Verwitterungsverhalten des Württemberger Buntsandsteins. Vom bruchfrischen Zustand zur Verwitterungskruste und ihrer Entfernung. Diplomarbeit FG Mineralogie der Universität Bremen.

Pfleiderer, R. (1907): Münsterbuch, Ulm.

Rommel, I. (1999): Das Münster zu Ulm. Entnommen aus: 1. Antrag an die Bundesstiftung Deutsche Umwelt und das Landesdenkmalamt Baden-Württemberg zur Instandsetzung alter Brüstungselemente aus Sandstein Münster zu Freiburg und Münster zu Ulm, 1999.

Saß, M. (April 1999): Freiburger Münster – Schädigungen und Gefährdung des Bauwerkes. Entnommen aus: 1. Antrag an die Bundesstiftung Deutsche Umwelt und das Landesdenkmalamt Baden-Württemberg zur Instandsetzung alter Brüstungselemente aus Sandstein Münster zu Freiburg und Münster zu Ulm, 1999.

Saß, M. (Juni 1999): Das Münster Unser Lieben Frau in Freiburg. Entnommen aus: 1. Antrag an die Bundesstiftung Deutsche Umwelt und das Landesdenkmalamt Baden-Württemberg zur Instandsetzung alter Brüstungselemente aus Sandstein Münster zu Freiburg und Münster zu Ulm, 1999.

Snethlage R. (1997): Leitfaden der Steinkonservierung. Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.

VDI 3794: Bestimmung der Immissions-Rate mit Hilfe des IRMA-Verfahrens. Berlin 1982

Völkle (2003): Erprobung und Modifizierung der Sägetechniken.

Wisser, S. (1994): Baustofftechnologische Untersuchungen der bei der Restaurierungsarbeiten eingesetzten 5 Naturwerksteine sowie der Eigenschaften von Werkmörteln und Mörtel/Stein-Verbundkörpern. Prüfungsbericht ibas (Institut für Baustoffe und Sanierungsplanung), Freiburg.

Wortmann, R. (1972): Das Ulmer Münster, Ulm 1972.