

FREIE HANSESTADT



BREMEN

Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA Bremen)

Paul-Feller-Str. 1
28199 Bremen
0421 / 53708 0
☐ 0421 / 53708 10
mail@mpa-bremen.de
http://www.mpa-bremen.de



Das Alte Obere Tor der Burg Stargard

DBU-Projekt: Modellhafte Beseitigung von Umweltschäden auf der Burg Stargard (Mecklenburg-Vorpommern)

Baustoffkundliche Zustandsuntersuchungen der Ziegel und Putze am O-Giebel des Alten Oberen Tores an der Burg Stargard

(Dipl.-Krist Frank Schlütter)

Inhaltsverzeichnis:

	Seite
1. Aufgabenstellung	3
2. Probenmaterial / Probenbeschreibung	4
3. Untersuchungsmethoden	9
3.1. <u>Ziegel</u> - Technisch-physikalische Kennwerte	9
3.2. <u>Mörtel</u> - Technisch-physikalische Kennwerte	10
3.3. Chemische Mörtelanalysen	11
3.4. Quantitative chemische Salzanalysen	11
3.5. Mikroskopische Untersuchungen	11
4. Untersuchungsergebnisse	12
4.1. <u>Ziegel</u>	12
4.1.1. Technisch-physikalische Kennwerte	12
4.1.2. Röntgenographische Phasenanalyse ausgewählter Ziegelproben	16
4.1.3. Quantitative chemische Salzuntersuchungen	18
4.1.4. Mikroskopische Untersuchungen	18
4.2. <u>Putze und Mörtel</u>	24
4.2.1. Chemische Analysen / B-Z-Verhältnis / Chemisch-mineralogische Kennzeichnung	24
4.2.2. Sieblinien	26
4.2.3. Technisch-physikalische Kennwerte	27
4.2.4. Quantitative chemische Salzuntersuchungen	28
4.2.5. Mikroskopische Gefügeuntersuchungen (Schädigungen und Probekonservierungen)	29
5. Zusammenfassung / Zustandsbeschreibung	38
5.1. Ziegel	38
5.2. Putze und Mörtel	40
5.3. Quellenangaben	42
6. Anlagen	43
6.1. Mikroskopische Abbildungen (Ziegel und Mörtel) - Probenentnahmestellen - PolMi-Aufnahmen - REM-Aufnahmen - EDX-Spektren	
6.2. Ziegel: Technisch-physikalische Kennwerte (Grafiken)	
6.3. Mörtel: Technisch-physikalische Kennwerte (Grafiken)	

1. Aufgabenstellung

Eingangs wurden zwei Objektbesichtigungen, an denen Herr Holst und Herr Wagner, zeitweise Frau Schüler von der Stadt Burg Stargard sowie Frau Prync-Pommerenke vom Landesamt für Denkmalpflege Mecklenburg-Vorpommern teilnahmen, durchgeführt. Hierbei wurden die konservatorischen Probleme und darauf aufbauend das Anliegen des Forschungsvorhabens eingehend diskutiert und Lösungsansätze festgelegt.

Die Ziegel und Mörtel im Mauerwerksverband des O-Giebels unterliegen seit langer Zeit den objektspezifischen Witterungseinflüssen (Regen, Luftfeuchteschwankungen, Wind, Schadstoff- und Schadgasdeposition etc.). Es ist bekannt, daß die physikalisch-technischen Eigenschaften der Ziegel und Mörtel großen Einfluß auf ihre Verwitterungsverhalten bzw. ihre Verwitterungsresistenz haben.

Die Materialkennwerte mittelalterlicher Ziegel weisen oft eine erhebliche Bandbreite auf, deren Ursachen v.a. in den verwendeten Rohstoffen sowie den Brennbedingungen liegen. Weichen die Kennwerte zu stark von denen der umgebenden Mörtel und Putze ab, können bereits Probleme innerhalb des Ziegelmauerwerks auftreten (Rückwitterung ganzer Partien oder einzelner Steine bzw. Mörtelfugen). Derartige Rückwitterungsphänomene treten auch am Ostgiebel des Alten Oberen Tores an der Burg Stargard auf.

Auf diesem Untergrund eines heterogenen Ziegelmauerwerks verschiedener Bau- und Reparaturphasen befinden sich am O-Giebel die wertvollen, zum Teil bemalten mittelalterlichen Zierputze sowie spätere Überputzungen (Renaissance).

Die Hauptprobleme hinsichtlich einer Konservierung lassen sich folgendermaßen beschreiben (vgl. Abb. 1-11 im Anhang 6.1.):

- I. Großflächige Ablösung des mittelalterlichen Putzes vom Ziegelmauerwerk
 - schalenförmige Ablösung des gesamten Putzpaketes (einschließlich Renaissance-Überputzung)
- II. Unterschiedliche Erhaltungszustände der mittelalterlichen Putzoberflächen:
 - bereichsweise fest, (versintert mit „metallischem“ Klang)
 - stellenweise sandend
 - kraterförmige Abplatzungen kleiner Oberflächenpartien
- III. Erhebliche Rückwitterung einzelner Ziegel hinter dem relativ intakten mittelalterlichen Putz, wobei die Ziegel vielfältige Schadensformen zeigen (Alveolarverwitterung, Randzonenverlust, konkave Rückwitterung, Absanden, Ablösung kleiner Partikel)
- IV. Durch mechanische Einwirkungen verursachte Zerstörungen der Putze
- V. Ablösung des Renaissanceputzes vom Untergrund (mittelalterlicher Putz bzw. Ziegel)
 - überwiegend sehr schlechter Erhaltungszustand des Renaissanceputzes (mürbe, Schalenbildung)

Für die dringend erforderliche Konservierung der noch erhaltenen Putze und Malereien des Mittelalters ist es von großer Bedeutung, die Ursachen und Abläufe der Prozesse zu kennen, die zu den vorliegenden Schäden geführt haben.

Die baustoffkundliche Anamnese am O-Giebel, d.h. die Zustandserfassung der Ziegel und Mörtel ist eine wesentliche Voraussetzung für ein begründetes Sanierungskonzept und die Auswahl geeigneter Materialien. Hierzu wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

I. Ermittlung der Bandbreite der Kennwerte der mittelalterlichen Ziegel

- Druckfestigkeit
- Rohdichte
- Wasseraufnahme
- Offene Porosität
- Kapillare Wasseraufnahme (w-Wert)
- Trocknungsverhalten
- Sorptions- und Desorptionsverhalten
- Quantitative chem. Salzanalyse
- Röntgenographische Phasenanalyse
- SteMi- und Polmi-Untersuchungen der Verwitterungszonen
- REM/EDX-Untersuchungen der Verwitterungszonen

II. Ermittlung der Bandbreite der Kennwerte der Mauer- und Putzmörtel (Mittelalter, Renaissance), einschließlich ausgewählter Reparaturmörtel (Mörtelplomben)

- Druckfestigkeit
- Rohdichte
- Wasseraufnahme
- Offene Porosität
- Kapillare Wasseraufnahme (w-Wert)
- Trocknungsverhalten
- Sorptions- und Desorptionsverhalten
- Bindemittel / Zuschlag - Verhältnis (B/Z)
- Chemische Zusammensetzung des BM
- Mikroskopische Zuschlaganalyse
- Sieblinie
- Quantitative chem. Salzanalyse
- SteMi- und Polmi-Untersuchungen der Verwitterungs- bzw. Ablösungszonen
- REM/EDX-Untersuchungen der Verwitterungs- bzw. Ablösungszonen

III. 2. Probenmaterial / Probenbeschreibung

Die erste Probenentnahme wurde am 24.4.97 gemeinsam mit Herrn Holst und Herrn Wagner durchgeführt. Die nachstehenden Tabellen geben eine Übersicht über die entnommenen Ziegelproben (Tabelle 1) bzw. Mörtelproben (Tabelle 2), deren Kurzbeschreibung sowie die zugehörigen Fragestellungen.

Die Abkürzungen in den Probenbezeichnungen beinhalten:

- BST:** Burg Stargard
- Z:** Ziegelprobe
- M:** Mörtelprobe
- 1-...** laufende Nummer

Tabelle 1: Beschreibung der Ziegelproben (Entnahme: 24.4.97)

Bezeichnung	Beschreibung	Schadensbild	Entnahmestelle [Koordinaten]	Fragestellungen [Bemerkungen]
BST Z-1	Braun-ockerfarbenes Ziegelfragment; vermutl. ehemalige Bruchfläche, 3-seitig SW-exponiert	Rückwitterung mit leicht vorstehenden Außenschalen, partiell abschelbernd	Bauphase Ib; Altes oberes Tor, äußere SW-Ecke, Mauerkerne [ca. 1,8 m unter dem Traufgesims]	Kennwertbestimmung
BST Z-2	Ziegel- bis karminrotes Ziegelfragment, überwitterte, ältere Bruchfl., 5-seitig exponiert	keine Schädigung	Bauphase Ib; Altes oberes Tor, Mauerkerne [ca. 1,7 m unter dem Traufgesims, ca. 1,2 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-3	Ziegel-bis karminrotes Ziegelfragment, frische Bruchfläche (im Verband zerbrochen), 5-seitig exponiert	keine Schädigung	Bauphase Ib; Altes oberes Tor, Mauerkerne [ca. 1m unter dem Traufgesims, ca. 2,6 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-4	Ziegel-bis karminrotes Ziegelfragment, alte Bruchfläche (mit Orig.-Schalenmörtel), 5-seitig exponiert	keine Schädigung	Bauphase Ib; Altes oberes Tor, Mauerkerne [ca. 2,8 m unter dem Traufgesims, ca. 0,9 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-5	Ockerrotes Ziegelfragment, alte Bruchfläche, 3-seitig exponiert	keine Schädigung	Bauphase Ia; Altes oberes Tor, Mauerkerne [ca. 6 m unter dem Traufgesims, ca. 4,4 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-6	Karminrotes Ziegelfragment, ältere Bruchfläche	höckerförmige Rückwitterung auf älterer Bruchfläche	unmittelbar unter Z-5,	Kennwertbestimmung
BST Z-7	Braun-ockerfarbenes Ziegelfragment, zwieseitig exponiert (SO, SW)	Starke konkave Rückwitterung (Absanden), vorstehende Randzone, leichte Kernbildung (olivefarben)	Bauphase Ia; Altes oberes Tor, Mauerkerne [ca. 6,1 m unter dem Traufgesims, ca. 4,8 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-8	Ockerrotes, stellenw. dunkel verfärbtes Ziegelfragment, enthält Kiesel bis 2 cm, 2-seitig exponiert (S bis W)	Oberfläche verkarstet mit Alveolenansätzen, stellenweise sandend	Bauphase Ia; Altes oberes Tor, Mauerkerne, Mauer-schale im Randbereich zum Riß (schlagregengeschützt) [ca. 6,2 m unter dem Traufgesims, ca. 6,5 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung

Fortsetzung **Tabelle 1:** Beschreibung der Ziegelproben (Entnahme: 24.4.97)

BST Z-9	Braun-ockerfarbenedes Ziegelfragment, 3-seitig exponiert (SO-SW)	überwiegend Karstbildung	Bauphase Ia; Altes oberes Tor, Mauerkern [ca. 5,5 m unter dem Traufgesims, ca. 5,9 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-10	Braun-ockerfarbenedes Ziegelfragment, Läuferseite im Riß,	zum Riß exponierte Läuferseite starke Rückwitterung mit vorstehenden Randzonen (sandend)	Bauphase Ia; Altes oberes Tor, Mauerkern, aus breitem Mauerriß [ca. 5,3 m unter dem Traufgesims, ca. 6,1 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-11	Dunkelbraunschwätzliches Ziegelfragment, frischer und alte Bruchflächen (zusätzl. Brandrisse)	ältere Ausbrüche entlang der Brandrisse, sonst keine Schädigung	Bauphase Ia od. Ib; Streufund vor der S-Wand bzw. Ringmauer	Kennwertbestimmung
BST Z-12	Dunkelbraunes, lokal schwätzliches Ziegelfragment, alte Bruchfläche, 4-seitig exponiert (SO-W)	keine Schädigung	Bauphase Ia; Altes oberes Tor, Mauerkern, aus breitem Mauerriß [ca. 5,4 m unter dem Traufgesims, ca. 4,6 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-13	Ziegelrotes bis bräunliches Ziegelfragment, alte Bruchfläche, Läuferseite zum Riß, einseitig exponiert (S)	keine Schädigung	unmittelbar unter Z-10, aus dem Riß [ca. 5,4 m unter dem Traufgesims, ca. 6,1 m östl. der SW-Ecke]	Kennwertbestimmung
BST Z-14	Ausblühung auf ziegelrotem Ziegel (hinter jüngst abgefallener ma. Putzschale)	Hohl liegen des mittelalterl. Putzes u. Schalenablösung (Ziegel intakt)	O-Giebel, N-Blende, Innere Nn-Laibungskante [21,34 / 20,56]	Salzbestimmung
BST Z-15	Gelblich-weißliche Pusteln auf rückgewittertem, ockerrotem Ziegel	überwiegend Schelbern u. Sanden, stellenweise Schalenbildung, Orig.-Oberfl. nicht mehr vorhanden	O-Giebel, N-Blende, Ns-Laibung, Fond [20,29 / 21,24]	Salzbestimmung
BST Z-16	Ockerbraunroter Ziegel, „Schalenpaket“ mit Orig.-Oberfläche	sehr weich („mürbe“), zahlreiche dünne Schalen	unterhalb Z-14, O-Giebel, N-Blende, Innere Nn-Laibungskante [21,34 / 20,46]	Gefügebeschreibung, Salze
BST Z-17	Ockerbraunroter Ziegel, „Schalenpaket“ mit Orig.-Oberfläche	sehr weich („mürbe“), zahlreiche dünne Schalen (analog Z-16)	O-Giebel [21,51 / 20,12]	Gefügebeschreibung, Salze

Fortsetzung **Tabelle 1**: Beschreibung der Ziegelproben (Entnahme: 24.4.97)

BST Z-18	Glasierter Formstein: Dünne, meist durchscheinende, stellenw. schwätzliche Glasur	starke Rückwitterung, Glasurablösung mit Ziegelschalen, dahinter Schelbern	O-Giebel [18,66 / 20,56]	Glasurbestimmung
-----------------	---	--	--------------------------	------------------

	(hellerroter Ziegel)			
BST Z-19	Ockerrotbrauner Ziegel mit Resten des Renaissance-Putzes	extreme Schalenbildung	O-Giebel, S-Blende [12,78 / 20,26]	Gefügebeschreibung, Salze
BST Z-20	Salzausblüfung auf karminrotem Ziegel	intakter Ziegel	O-Giebel, unterhalb der S-Blende [14,21 / 19,61]	Salzbestimmung
BST Z-21	Ockerroter Ziegel, Schale mit Original-Oberfläche	Schalenbildung, dahinter überwiegend absandend, stellenw. Schelbern; rel. geringe Rückwitt.	O-Giebel [20,40 / 18,72]	Gefügebeschreibung, Salze
BST Z-22	Ockerroter Ziegel: Vollständig hohl liegende, dünne Schale aus dem rückgewitterten Bereich	im rechten Teil bis max. 5 cm Tiefe rückgewittert, Oberfl. sandend, großflächige, dünne Schale auf rückgewitt. Oberfl.	O-Giebel [20,63 / 18,61]	Gefügebeschreibung, Salze
BST Z-23	Ockerbrauner Ziegel	stark abschelbernd, Rückwitterung rel. gering, Besprühen mit Wasserdampf führt zu starken Bewegungen der lockeren Partikel	O-Giebel, unterhalb S-Blende [12,75 / 18,21]	Gefügebeschreibung, Salze [vorgefestigt mit Sekundenkleber]
BST Z-24	Ziegelroter Ziegel: mit Orig.-Oberfläche	starker Materialverlust (Mörtelplombe), zahlr. dünne Schalen (ähnl. Z-22)	O-Giebel, unterhalb N-Blende [20,74 / 17,58]	Gefügebeschreibung, Salze
BST Z-25	Ziegelroter Ziegel mit Orig.-Oberfläche (zus. (Renaissancemörtelreste)	v.a. im linken Teil bis 4 cm Tiefe rückgewittert (sandend), beginnende Schalenbildung	O-Giebel, unterhalb N-Blende [21,30 / 18,11]	Gefügebeschreibung, Salze
BST Z-26	Ziegelroter Ziegel: Rückgewitterte Oberfläche mit „Sekundärschalen“	über gesamte Breite rückgewittert, „Sekundärschale“ auf rückgewitterter Oberfl.	O-Giebel, unterhalb N-Blende [20,35 / 17,06]	Gefügebeschreibung, Salze

Tabelle 2: Beschreibung der Mörtelproben (Entnahme: 24.4.97)

Bezeichnung	Beschreibung	Schadensbild	Entnahmestelle [Koordinaten]	Fragestellungen [Bemerkungen]
BST M-1	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter, 13. Jhdt.); vom Untergrund gelöste Putzschollen, vereinz. mit Barockputzresten (25 Streufunde)	häufig hohl liegender Putz bzw. schalenförmige Ablösung vom Ziegel	Bauphase Ic; Fensterbank der N-Blende	s. Tabelle Kennwertbestimmung Mörtel; Farbfassungsreste auf mittelalterl. Putz beachten !! rot, evtl. schwarz
BST M-2	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter, 13. Jhdt.); vom Untergrund gelöste Putzschollen, häufig mit Barockputzresten (20 Streufunde)	häufig hohl liegender Putz bzw. schalenförmige Ablösung vom Ziegel	Bauphase Ic; Fensterbank der S-Blende	s. Tabelle Kennwertbestimmung Mörtel; Farbfassungsreste auf mittelalterl. Putz beachten: gelbocker
BST M-3	Mauermörtel (Mittelalter)	-	Bauphase Ib;	s. Tabelle Kennwertbestimmung Mörtel; kein Verfugmörtel !
BST M-4	Renaissanceüberputzung auf Ic	starke Aufschüsselung (Schalenbildung)	Bauphase IV; Nähe S-Blende	s. Tabelle Kennwertbestimmung Mörtel; geringe Putzstärke
BST M-5	Renaissanceüberputzung auf Ic	starke Aufschüsselung (Schalenbildung)	Bauphase IV; nördl. der N-Blende	s. Tabelle Kennwertbestimmung Mörtel; geringe Putzstärke
BST M-6	Mauermörtel (Renaissance)	-	Bauphase IV	s. Tabelle Kennwertbestimmung Mörtel; Zusammensetzung der grauen Bestandteile (Lehm ?)
BST M-7	Renaissanceputz	starke Aufschüsselung (Schalenbildung)	Bauphase IV; Wandfläche unterhalb des oberen Bogenfrieses unter S-Blende	s. Tabelle Kennwertbestimmung Mörtel
BST M-8	Schalermörtel (Spätmittelalter)	-	S-Wand, Randbereich Rißausmauerung; ca. 2 m von SO-Ecke, ca. 5,5 m unter Traufgesims	[identisch mit den gut erhaltenen mittelalterl. Mörtelplomben]
Probe 1	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	Kruste, oberflächliche Verdichtung, teilw. aufgebrochene Oberfl.	unteres Fries , unterer Rand des Putzfeldes	Mikroskopische Untersuchung (PolMi, REM)
Probe 2	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	Kruste, oberflächliche Verdichtung, teilw. aufgebrochene Oberfl.	oberes Fries, oberes Drittel des Putzfeldes	Mikroskopische Untersuchung (PolMi, REM)
BST M2/1	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	Ablösung vom Untergrund, vergraute Oberfl.	unterer Rand der südlichen Fensterblende	Mikroskopische Untersuchung (PolMi, REM)
BST M2/2	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	Ablösung vom Untergrund	südliche Fensterblende, Innenkante des Gewändes	Mikroskopische Untersuchung (PolMi, REM)
BST M2/3	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter) mit Kalktüncheresten	gut erhalten	oberh. der Bögen des oberen Bogenfrieses, 1,2 m von nördl. Ecke	Mikroskopische Untersuchung (PolMi, REM)

Fortsetzung **Tabelle 2:** Beschreibung der Mörtelproben (Entnahme: 24.4.97 und 16.9.98)

BST M2/4	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter, 13. Jhdt.)	Ablösung vom Untergrund	unterer Rand des nördlichsten Bogenfeldes im oberen Fries	Mikroskopische Untersuchung (PolMi, REM)
BST M2/5	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter, 13. Jhdt.)	Ablösung vom Untergrund (große „Blase“ auf rückgew. Ziegel)	linker oberer Rand desselben Bogenfeldes wie 2/4	Mikroskopische Untersuchung (PolMi, REM)

3. Untersuchungsmethoden

Die nachstehenden Tabellen geben einen Überblick über die an den einzelnen Proben durchgeführten Untersuchungen. Bezüglich der physikalisch-technischen Kennwertbestimmungen wurde, wenn möglich, den Richtlinien der DIN gefolgt. Sofern Probengröße bzw. -geometrie das nicht zuließen, wurde in Anlehnung an DIN-Normen oder nach in der Denkmalpflege üblichen Meßverfahren gearbeitet.

3.1. Ziegel – Technisch physikalische Kennwerte

Tabelle 3: Übersicht über die an den Ziegeln durchgeführten Laboruntersuchungen

Proben-Bez.	RD / WA / oP	DF	KWa (w-Wert)	TrV	Spt / Despt	SteMi	PolMi	REM / EDX	RöD	wIS		
BST Z-1	x	x	x	x	x	x						
BST Z-2	x	x	x	x	x	x						
BST Z-3	x	x	x	x	x	x	x		x			
BST Z-4	x	x	x	x	x	x						
BST Z-5	x	x	x	x	x	x						
BST Z-6	x	x	x	x	x	x	x		x			
BST Z-7	x	x	x	x	x	x	x		x			
BST Z-8	x			x	x	x						
BST Z-9	x			x	x	x						
BST Z-10	x	x	x	x	x	x						
BST Z-11	x	x	x	x	x	x	x					
BST Z-12	x	x	x	x	x	x			x			
BST Z-13	x	x	x	x	x	x						
BST Z-14						x		x				
BST Z-15						x		x				
BST Z-16						x	x			x		
BST Z-17						x	x					
BST Z-18						x		x				
BST Z-19						x	x					
BST Z-20						x		x				
BST Z-21						x	x			x		
BST Z-22						x	x	x		x		
BST Z-23						x	x			x		
BST Z-24						x	x					
BST Z-25						x	x			x		
BST Z-26						x				x		

Legende:

- RD /WA / oP** Rohdichte, Wasseraufnahme, offene Porosität nach DIN 51056
- DF** Druckfestigkeit
- KWa (w-Wert)** Kapillares Wasseraufnahmevermögen nach DIN 52617
- TrV** Trocknungsverhalten
- Spt / Despt** Sorptions- und Desorptionsverhalten
- SteMi** Stereomikroskopie
- PolMi** Polarisationsmikroskopie
- REM / EDX** Rasterelektronenmikroskopie / Energiedispersive Röntgenmikroanalyse
- RöD** Röntgendiffraktometrie
- wIS** Gehalt an wasserlöslichen Salzen (quant. chem. Bestimmung)

3.2. Mörtel – Technisch physikalische Kennwerte

Tabelle 4: Übersicht über die an den Mörteln durchgeführten Laboruntersuchungen

Proben-Bez.	RD / WA / oP	DF	KWa (w-Wert)	TrV	Spt / Despt	VA	SL	SteMi	PolMi	REM	WIS
BST M-1	x	x	x	x	x	x	x		x		x
BST M-2	x	x	x	x	x	x			x		x
BST M-3	x	x	x	x	x	x	x		x		x
BST M-4											
BST M-5	x	x	x	x	x				x		x
BST M-6	x	x	x	x	x	x	x		x		
BST M-7	x	x	x	x	x	x	x		x		x
BST M-8	x	x	x	x	x	x	x		x		
Probe 1								x	x		
Probe 2								x	x		
BST M 2/1								x	x	x	
BST M 2/2								x	x	x	
BST M 2/3								x	x	x	
BST M 2/4								x	x	x	
BST M 2/5								x	x	x	
BST M 1/1								x	x		
BST M 1/1								x	x		

Legende:

- RD /WA / oP** Rohdichte, Wasseraufnahme, offene Porosität nach DIN 51056
- DF** Druckfestigkeit
- KWa (w-Wert)** Kapillares Wasseraufnahmevermögen nach DIN 52617
- TrV** Trocknungsverhalten
- Spt / Despt** Sorptions- und Desorptionsverhalten
- VA** Chem. Vollanalyse (Bindemittel/Zuschlag- Verhältnis, Chem. Zusammensetzung des BM)
- SL** Sieblinie (Kornaufbau)
- SteMi** Stereomikroskopie
- PolMi** Polarisationsmikroskopie
- REM / EDX** Rasterelektronenmikroskopie / Energiedispersive Röntgenmikroanalyse
- wIS** Gehalt an wasserlöslichen Salzen (quant. chem. Bestimmung)

3.3. Chemische Mörtelanalysen

Die chemische Analyse der Mörtel (Bindemittel-Zuschlagverhältnis sowie die Zusammensetzung des Bindemittels) wurden in Anlehnung an die DIN 52170 nach einem in der Denkmalpflege üblichen Verfahren durchgeführt /Knöfel, 1993/¹⁾.

Außerdem wurden die Mörtel mikroskopisch (am Dünnschliff) auf salzsäurelösliche Bestandteile im Zuschlag untersucht, um gegebenenfalls das B/Z-Verhältnis korrigieren zu können.

¹⁾ Knöfel, Schubert (Hrsg.): Handbuch der Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege,

Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993

3.4. Salzbestimmungen

Die Bestimmung der Anionen erfolgte aus den filtrierten Eluaten mittels Ionenchromatographie (IC), die der Kationen mittels Atomemissionsspektrometrie mit Anregung im induktiv gekoppelten Plasma (IC-OES). Sofern erforderlich wurden Natrium und Kalium aufgrund der günstigeren Anregungsbedingungen und der somit niedrigeren Bestimmungsgrenzen mit der Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) bestimmt.

3.5. Mikroskopische Untersuchungen

Zunächst erfolgte eine orientierende Inspektion im Stereomikroskop. Nach Auswahl geeigneter Probenteile wurden unter dem SteMi Oberflächenpartien bzw. Bruchflächen für Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop (REM) vorbereitet.

Von ausgewählten Proben wurden nach orientierter Einbettung in Kunstharz Dünnschliffe hergestellt.

Raster-Elektronenmikroskopie

Durch den Elektronenbeschuss werden aus der Oberfläche des Probenmaterials verschiedene Signale freigesetzt (Sekundär- (SE-) und Rückstreuelektronen (RE-), elementspezifische Röntgenstrahlen), die durch geeignete Detektorsysteme erfaßt und zu einem sichtbaren Bild auf dem Bildschirm zusammengesetzt werden. Die Sekundärelektronenabbildung enthält im wesentlichen morphologische und topographische Aussagen der untersuchten Probenbereiche, während die Rückstreuelektronenabbildung aufgrund der Abhängigkeit des Rückstreuvermögens von der Ordnungszahl Informationen über die Materialzusammensetzung liefert und damit die Unterscheidung einzelner Phasen ermöglicht.

Mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenmikroanalyse (EDX) kann die Elementzusammensetzung (der einzelnen Bestandteile oder Phasen) bis in mikrometerfeine Bereiche halbquantitativ ermittelt werden.

Polarisationsmikroskopie

Durch eine Vielzahl der Beleuchtungsverfahren und spezielle lichteoptische Zusätze (Polarisatoren, Filter, Prismen etc.) sind im Lichtmikroskop in Abhängigkeit von der Fragestellung vielfältige Untersuchungen möglich. Neben stratigraphischen Untersuchungen und Mineralidentifizierung sind v.a. Gefügebeschreibungen und Aussagen zu Veränderungen und deren Ursachen von Bedeutung. Auf diese Weise können auch Salzanreicherungsprofile bzw. -gradienten ermittelt werden.

4. Untersuchungsergebnisse

4.1. Ziegel

4.1.1. Festigkeitskennwerte und technisch-physikalische Kennwerte

Die Einzelmeßwerte sowie die grafischen Darstellungen der Wasseraufnahme, Wasserabgabe, die Sorptionsisothermen und Trocknungskurven sind der Anlage 6.2 zu entnehmen.

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind ausgewählte Kennwerte der Ziegelproben wiedergegeben, wobei nach steigender Rohdichten in Gruppen eingeteilt wurde

Tabelle 5: Ausgewählte technisch-physikalische Kennwerte der Ziegelproben:

Gruppe	Ziegel	RD	OP	Freie WA	w-Wert ¹⁾	S.F. ¹⁾	DF ²⁾
Schwach gefeuert (RD < 1,8)	Z-9	1,67	31,5	18,9			
	Z-10	1,73	25,8	14,9	10	8,5 - 8,6	(8,5)
	Z-3	1,74	26,0	15,0	13-18		(8,9)
	Z-4	1,74	26,0	14,9	7		(9,8)
	Z-7 (Rand)	1,8	21,6	12,0	2	8,1 - 11,3	(9,4)
	Z-7 (Kern)	1,76	23,6	13,4	1		
	Z-13	1,78	24,6	13,8	19		(11,1)
„Normal“ gefeuert (RD 1,8–1,9)	Z-2	1,81	24,4	13,5	8	0,5	(8,7)
	Z-5	1,81	26,1	14,4	8	1,3	(12,6)
	Z-8	1,83	24,9	13,6			
	Z-12	1,85	19,4	10,5	13		
	Z-11	1,88	15,2	8,1	12		(24)
Hoch gefeuert (RD > 1,9)	Z--6	1,92	20,0	10,0	2	0, 2	(7,6)
	Z-1	1,93	20,4	10,5	0,6	2,6	(14,9)

Abkürzungen und Erklärungen in Tabelle 5:

¹⁾ gerundete Werte

²⁾ die Werte sind nur als Richtwerte zu betrachten. Es konnte jeweils nur ein Ziegelstück geprüft werden, wovon die meisten sehr inhomogen waren und z.T. größere interne Störungszonen aufwiesen, so daß eine verlässliche Bestimmung der Druckfestigkeiten sehr erschwert war.

RD Rohdichte [g/cm³]

OP Offene Porosität [V%]

Freie WA Freie Wasseraufnahme [M%]

w-Wert Flächenbezogene, kapillare Wasseraufnahme im zeitl. Verlauf [kg/(m²h^{0,5})]

Tr. Verh. Zeitl. Verlauf der Wasserabgabe des kapillar gesättigten Prüfkörpers im eindimensionalen Feuchtestrom

S.F. Sorptionsfeuchte (Ausgleichsfeuchte) bei 20°C, 97% rel Luftfeuchte [Gew.%]

DF Druckfestigkeit [N/mm²]

Die fehlenden Angaben in einigen Spalten sind auf Auswertprobleme der betreffenden Messung zurückzuführen, die überwiegend auf ungünstige Probenbeschaffenheiten, teilweise aber auch auf Meßfehler im Labor zurückzuführen sind.

Bewertung der technisch-physikalischen Kennwerte der Ziegelproben:

Aus den Angaben in Tabelle 5 und den graphischen Darstellungen im Anhang 6.2. können folgende Schlußfolgerungen gezogen werden:

Es liegt eine hohe Schwankungsbreite in dem als mittelalterlich eingestuften Ziegelmaterial vor:

Rohdichte	1,67 - 1,93	[g/cm ³]
Offene Porosität	15,2 - 31,5	[V%]
Freie Wasseraufnahme	8,1 - 18,9	[M%]
Flächenbezogene Wasseraufnahme im zeitlichen Verlauf (w-Wert)	0,6 - 18	[kg/(m ² h ^{0,5})]
Sorptionsfeuchte (bei 20°C / 97% F.)	0,2 - 11,3	[Gew.%]
Druckfestigkeit	8,5 - 24	[N/mm ²]

In Tabelle 5 sind, von einzelnen Ausreißern abgesehen, charakteristische Tendenzen bzw. Zusammenhänge zu erkennen, wie sie von /Freyburg, 1996/ beschrieben wurden: Mit steigender Rohdichte steigt auch die Druckfestigkeit, die offene Porosität und die Freie Wasseraufnahme hingegen sinken.

Eine direkte Korrelation zwischen diesen grundlegenden Materialkenngrößen und den zusätzlich bestimmten hygrischen Kennwerten (w-Wert, Sorptionsfeuchten, Trocknungsverhalten) ist nach /Freyburg, 1996/ nicht möglich. Ursache hierfür ist die Tatsache, daß diese sogenannten hygrischen Kennwerte in erster Linie durch die Porenradienverteilung bestimmt werden.

Hohe w-Werte sind Ausdruck einer hohen kapillaren Förderleistung, d.h. der Ziegel nimmt kapillar große Mengen Wasser auf. Hierfür sind die größeren Porenradien maßgeblich, etwa im Bereich 1-100 µm ist ein ausreichender „Kapillarzug“ noch gegeben. Weist der Ziegel hingegen einen hohen Anteil von Poren < 1 µm auf, fällt der w-Wert entsprechend geringer aus, der Ziegel suagt langsamer. Gleichzeitig steigt aber die sogenannte „Saugspannung“. Diese Feuchtespeichergröße charakterisiert das potentielle Vermögen, Wasser über längere Zeiträume im Porenraum festzuhalten. Die Offene Porosität und somit die Freie Wasseraufnahme kann in beiden Fällen gleich sein.

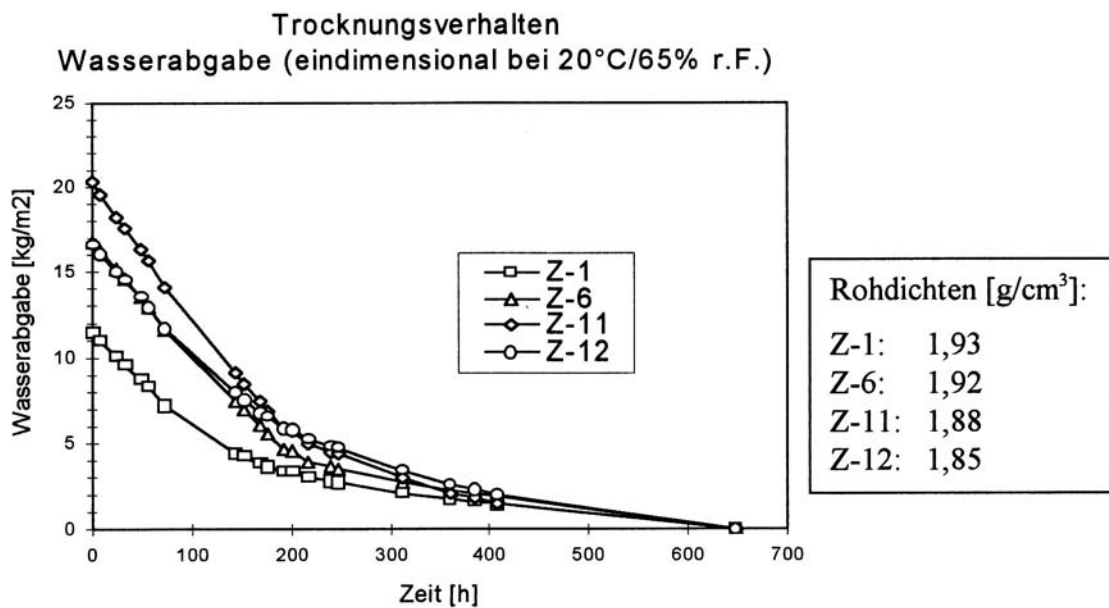
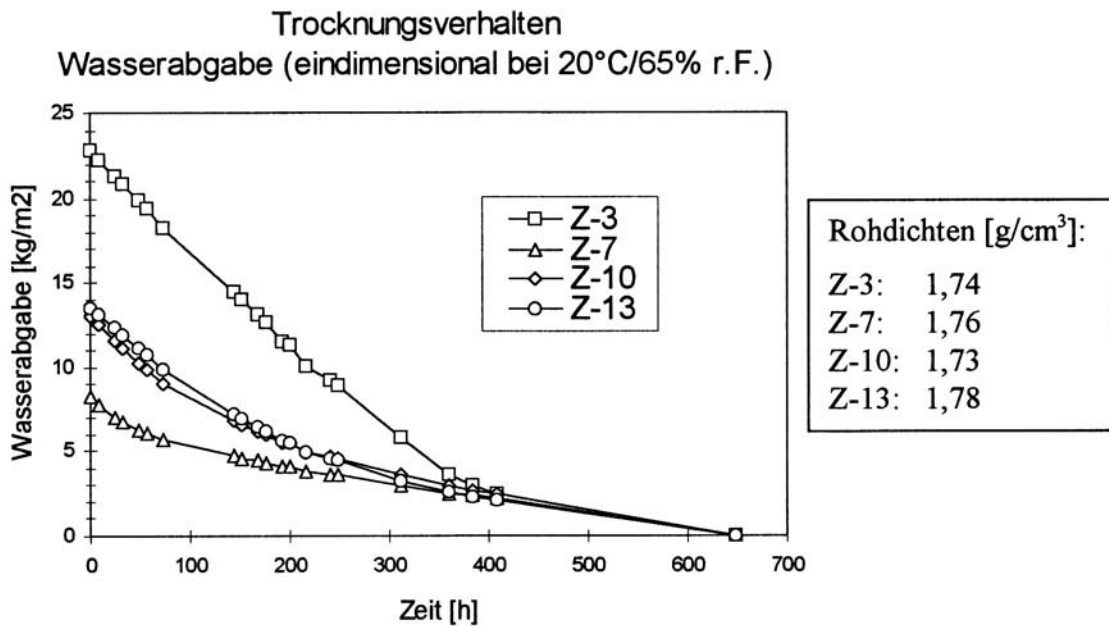
Betrachtet man in Tabelle 5 die als „schwach gefeuert“ eingestuften Ziegel Z-3 und Z-4, so wird dieser Zusammenhang deutlich. Die Unterschiede im w-Wert bei gleicher RD, OP und Freier WA sind hierüber zu erklären.

Eine Korrelation zwischen w-Werten und den zugehörigen Offenen Porositäten kann aus den Werten in Tabelle 5 nicht abgeleitet werden.

Die Sorptionsfeuchte beschreibt das Feuchtespeichervermögen im Luftfeuchtebereich, d.h. die adsorptive Anlagerung (kein Kapillarprozeß) dünner Wasserfilme (Schichten aus wenigen Moleküllagen) auf den Porenwänden. Poren größer 1 µm spielen hierfür praktisch keine Rolle. Je höher der Anteil im Radienbereich < 1 µm, desto höher ist die „Innere Oberfläche“ eines Porensystems. Entsprechend steigt auch die Sorptionsfeuchte.

Für die untersuchten Proben zeigt sich der Trend, daß mit sinkender Rohdichte die Sorptionsfeuchten (bei 20°C/95% r.F.) steigen. Für die Ziegel mit einer Rohdichte > 1,8 g/cm³ liegen die zugehörigen Sorptionsfeuchten meist unter 3 Gew.% (Z-1, Z-2, Z-5, Z-6). Anderenfalls, also für Dichten < 1,8 g/cm³ werden Sorptionsfeuchten von 8-10 Gew.% erreicht (Z-7, Z-10). Ursache hierfür sind wahrscheinlich Unterschiede im Sintergrad der Ziegelmatrix. Höhere Temperaturen im Brennprozeß der Ziegel führen zu einer stärkeren Versinterung der Tonminerale und damit zu höheren Rohdichten.

In den folgenden Diagrammen sind die Trocknungskurven von Ziegeln mit niedriger Rohdichte (=verwitterungsanfällig) und von Ziegeln hoher Rohdichte (=verwitterungsbeständig) dargestellt.



Der Vergleich der Diagramme zeigt, daß eine Korrelation zwischen Rohdichte und Trocknungsverhalten nicht vorliegt. Auch unter Berücksichtigung der Sorptionsfeuchten und der w-Werte können keine eindeutigen Zusammenhänge nachgewiesen werden.

Ursache hierfür ist wahrscheinlich der Einfluß der Saugspannung, deren aufwendige Bestimmung aber im Rahmen des Forschungsprojektes nicht möglich war.

Die Abgabe des aufgenommenen Wassers aus dem Porenraum des Ziegels wird maßgeblich von der Porenradienverteilung bestimmt. Da auch diese Größe nicht ermittelt wurde, können hier nur grundlegende Zusammenhänge zur Erklärung herangezogen werden.

Der Zusammenhang zwischen Porenradienverteilung, w-Wert und Saugspannung wurde bereits auf Seite 13 beschrieben. Analog der Behinderung der kapillaren Wasseraufnahme wird durch die Saugspannung auch die kapillare Wasserabgabe behindert.

Ein Knick in den Trocknungskurven kennzeichnet den Übergang vom kapillaren Feuchtetransport zum diffusionsgesteuerten, etwa um den Faktor 10 langsameren Teil eines Trocknungsvorganges.

Bei hohen w-Werten und einer geringen Saugspannung wird auch eine relativ rasche Trocknung mit großem Kapillaranteil in der Trocknungskurve erfolgen.

Über Wasserdampfdiffusion wird der Teil der Feuchtigkeit abgegeben, der sich in Poren $< 1\mu\text{m}$ befindet bzw. adsorptiv an Oberflächen gebunden ist.

Im Mauerwerksverband des Oberen Tores der Burg Stargard befinden sich also in unmittelbarer Nachbarschaft Ziegel mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften (gering bis hoch saugfähig, unterschiedliches Trocknungsverhalten etc.).

Nach den Untersuchungen von S. Freyburg am Kampischen Hof in Stralsund /Freyburg, 1997/ zeigen mittelalterliche Ziegel mit folgenden Kennwerten keine oder nur geringe Schäden:

Rohdichte	$\geq 1,85$	[g/cm ³]
Freie Wasseraufnahme	≤ 15	[M%]
Druckfestigkeit	$\geq 12 - 15$	[N/mm ²]

Diese Forderung erfüllen von den untersuchten Ziegeln des Oberen Tores der Burg Stargard die wenigsten: Z-11, Z-6 und Z-1, wobei Z-6 diese Anforderungen nur erfüllt, wenn die Druckfestigkeit nach oben korrigiert werden darf (s. Fußnote ²⁾ in Tabelle 5).

Das bedeutet andererseits, daß der überwiegende Teil der untersuchten Ziegel als nicht oder nur bedingt frostbeständig anzusehen ist.

4.1.2. Röntgenographische Phasenanalyse ausgewählter Ziegelproben

Mineralphasenentwicklung:

Schwachbrand: gekennzeichnet durch das Auftreten nicht gesinterter Priärmineralphasen

- Quarz
- Feldspäte
- Calcit / Dolomit
- Tonminerale
- u.a. (je nach verarbeitetem Rohstoff)

Scharfbrand: gekennzeichnet durch charakteristische Sekundärphasen, die durch die Umwandlung der Primärmineralphasen während des Brenn-/Sinterprozesses entstanden sind (abhängig vom Rohstoff, Brenntemperatur und Brandführung)

- Anorthit
- Hämatit
- Diopsid
- Gehlenit
- abnehmender Gehalt an Gesamtkarbonat durch vollständige Umwandlung in Sekundärphasen

Bewertung der röntgenographischen Phasenanalysen /Freyburg, 1998, mdl. Mitteilung/
(vergl. Tabelle 6: halbquantitativer Mineralphasenbestand und Diffraktogramme in Anhang 6.2)

In den Ziegeln wurden unterschiedliche Rohstoffe verarbeitet. Z-11 besitzt nach ermittelten Mineralphasen den besten Brenngrad (rohstoffgerecht gebrannt von Brenntemperatur und Brennkurve aus betrachtet; Ergebnis: relativ dichter Scherben) Z-7 ist schwach gebrannt (Glimmer und Calcit sind noch im Mineralbestand; Ergebnis: keine stabilen Sekundärphasen) Z-3 und Z-6 sind „weiche“ historische Ziegel und damit normal gebrannt. Im Mineralbestand sind kaum Unterschiede. Z-6 hat anteilig Calcit, vermutlich sekundär eingetragen.

Tabelle 6: Röntgenographische Phasenanalyse ausgewählter Ziegelproben- Halbquantitativer Mineralphasenbestand

Probe	Scherbenfarbe	Kennwerte			Mineralbestand								
		RD	OP	Fr. WA	Quarz	Microklin	Albit	Illit/Glimmer	Hämatit	Cristobalit	Calcit	Halit	Gips
BST Z-3	Ziegel bis karminrot	1,74	26,0	15,0	+++++	+ bis (++)	+	-	++	-	-	-	-
BST Z-6	Karminrot	1,92	20,0	10,4	+++++	++	+	-	+	-	+	-	+
BST Z-7	Braun-ockerfarben	1,8 ¹⁾	21,6 ¹⁾	12,0 ¹⁾	+++++	++	+	+	(+) ?	-	++	+	+
BST Z-11	Dunkelbraun-schwärzlich	1,88	15,2	8,1	+++++	+ bis (++)	+	-	+	++	-	-	-

Legende:

- +++++ höchste Intensität
- + geringe Intensität
- (+) Nachweis unsicher, am Rand der röntgenogr. Nachweisgrenze
- nicht nachweisbar

- RD: Rohdichte [g/cm³]
- OP Offene Porosität [V%]
- Fr. WA Freie kapillare Wasseraufnahme [M%]

1) Werte für den (dichteren) Rand des Ziegels (vgl. Tab. 5)

Mineralphasen: [Formeln nach /Rösler, 1979/]:

- Quarz SiO₂
- Feldspäte:
 - Microklin K[Al Si₃O₈]
 - Anorthit Ca[Al₂ Si₂O₈]
 - Albit Na[AlSi₃O₈]
- Illit / Glimmer:
 - Muskovit KAl₂[(OH,F)₂/AlSi₃O₁₀]
- Hämatit Fe₂O₃
- Calcit /Vaterit CaCO₃
- Mullit Al[AlSiO₅]
- Diopsid CaMg[Si₂O₆]
- Gehlenit Ca₂Al[(Si,Al)₂O₇]
- Cristobalit Hochtemperaturmodifikation des Quarz (SiO₂)
- Gips Ca[SO₄]·2H₂O
- Halit NaCl

4.1.3. Quantitative chemische Salzuntersuchungen an ausgewählten Ziegelproben

	Proben-Bez.	Dicke	Beschreibung
Ziegel	BST Z-16	5 mm	Schalnpaket aus rückgewittertem Bereich
	BST Z-21	6 mm	leicht rückgewitterte Original-Oberfläche
	BST Z-22	2 mm	Sekundärschale
	BST Z-23	4 mm	Schuppen + festes Ziegelmaterial
	BST Z-25	2 mm	Original-Oberfläche, rel. fest (Verdacht: Gipskruste)
	BST Z-26	2 mm	Sekundärschale, locker

Tabelle 7: Ergebnisse der quantitativen, chemischen Salzbestimmungen an ausgewählten Ziegelproben

Probe	Dicke	Kationen [mg/kg]				Anionen [mg/kg]			Gipsgehalt [Gew. %] (bezogen auf SO ₄ ²⁻)
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	
Z-16	5 mm	4.200	260	1.500	890	7.700	3.500	2.900	1,3
Z-21	6 mm	5.900	30	90	70	13.200	230	130	2,2
Z-22	2 mm	19.700	200	860	450	44.700	2.200	1.800	7,6
Z-23	4 mm	6.600	950	3.300	2.700	4.400	1.950	6.900	0,7
Z-25	2 mm	21.400	40	120	150	48.800	200	100	8,2
Z-26	2 mm	2.200	40	220	120	4.700	280	270	0,8

Bewertung der quantitativen, chemischen Salzanalysen:

Die errechneten Gipsgehalte in der letzten Spalte der Tabelle 7 beruhen auf der Annahme, daß die gesamte nachgewiesene Sulfatmenge im Gips gebunden ist. Es ergeben sich sehr unterschiedliche Gipsmengen für die einzelnen Proben, insbesondere die Proben Z-22 und Z-25 sind relativ stark belastet.

Leicht lösliche Salze sind nur in relativ geringen Mengen vorhanden. Ihr Auftreten ist nicht proportional der ermittelten Gipsmenge (Z-23 ↔ Z-25). Die Proben Z-16 und Z-23 enthalten geringe Mengen NaCl, in den Proben Z-16, Z-22 und Z-23 sind außerdem geringe Mengen Nitrat nachweisbar.

4.1.4. Mikroskopische Untersuchungen

BST Z-3	<u>Beschreibung:</u> Ziegel-bis karminrotes Ziegel-fragment, frische Bruchfläche (im Verband zerbrochen), 5-seitig exponiert	<u>Schäden:</u> keine Schädigung	RD [g/cm ³] 1,74	OP [V%] 26,0	Fr. WA [M%] 14,9
----------------	---	-------------------------------------	---	---------------------------	-------------------------------

→ Abb.16-19

- sehr porös
- einzelne Brennschwindrisse
- einzelne längere Risse ohne Vorzugsorientierung
- Inhomogenitäten (Schlieren: unterschiedlich dichte Gefügebereiche, Unterschiede im Mineralkorngehalt und in der Korngröße)
- keine Salze

BST Z-6	<u>Beschreibung:</u> Karminrotes Ziegelfragment, ältere Bruchfläche	<u>Schäden:</u> höckerförmige Rückwitterung auf älterer Bruchfläche	RD [g/cm ³] 1,92	OP [V%] 20,0	Fr. WA [M%] 10,4
----------------	--	--	---	-------------------------------	-----------------------------------

- sehr hoher Mineralkorngehalt → Abb.22-27
- sehr porös
- starke Gipsanreicherung auf den Wandungen im gesamten Porenraum
- größte Anreicherung in Oberflächennähe (Poren und Risse gefüllt)
- keine Gipskruste

BST Z-7	<u>Beschreibung:</u> Braun-ockerfarbenes Ziegelfragment, zweiseitig exponiert (SO, SW)	<u>Schäden:</u> Starke konkave Rückwitterung (Absanden), vorstehende Randzone, leichte Kernbildung (olivefarben)	RD [g/cm ³] 1,8	OP [V%] 21,6	Fr. WA [M%] 12,0
----------------	---	---	--	-------------------------------	-----------------------------------

- sehr hoher Mineralkorngehalt → Abb.28-33
- sehr porös
- äußerst inhomogenes Material (Schlieren: unterschiedlich dichte Gefügebereiche, Unterschiede im Mineralkorngehalt und in der Korngröße)
- Tonlunker mit starken Brennschwindungen (z.T. mehrere cm lang)
- Gips im oberfl.nahen Porenraum und im Brennschwindsaum eines hämatitreichen Tonlunkers

BST Z-11	<u>Beschreibung:</u> Dunkelbraun-schwärzliches Ziegelfragment, frische und alte Bruchflächen (zusätzlich Brandrisse)	<u>Schäden:</u> ältere Ausbrüche entlang der Brandrisse, sonst keine Schädigung	RD [g/cm ³] 1,88	OP [V%] 15,2	Fr. WA [M%] 8,1
-----------------	---	--	---	-------------------------------	----------------------------------

- sehr hoher Mineralkorngehalt → Abb.37-39
- typisches Gefüge eines hoch gefeuerten Ziegels: weitgehend intakt, scheinbar sehr porös (geschlossene Poren), zahlreiche größere Luftporen
- nur vereinzelt Inhomogenitäten
- kein Salz

BST Z-14	<u>Beschreibung:</u> Ausblüfung auf ziegelrotem Ziegel (hinter jüngst abgefallener ma. Putzschale)	<u>Schäden:</u> Hohlliegen des mittelalterlichen Putzes und Schalenablösung (Ziegel intakt)	<u>Entnahmestelle:</u> O-Giebel, N-Blende, Innere Nn-Laibungskante [21,34 / 20,56]	<u>Fragestellung:</u> Salzbestimmung
-----------------	---	--	---	---

→ Abb.44-47

- Gips (Aggregate aus körnigen Kristalle (Kristallite 1-2 µm), teilw. tafelige Gipskristalle)

BST Z-15	<u>Beschreibung:</u> Gelb-weißliche Pusteln auf rückgewittertem, ockerrotem Ziegel	<u>Schäden:</u> überwiegend Schelbern u. Sanden, stellenweise Schalenbildung, Orig.-Oberfl. nicht mehr vorhanden	<u>Entnahmestelle:</u> O-Giebel, N-Blende, Ns-Laibung, Fond [20,29 / 21,24]	<u>Fragestellung:</u> Salzbestimmung
-----------------	---	---	--	---

- Gips (andere Morphologie als Z-14) → Abb.43

BST Z-16	<u>Beschreibung:</u> Ockerbraunroter Ziegel, „Schalenpaket“ mit Orig.- Oberfläche	<u>Schäden:</u> sehr weich („mürbe“), zahlreiche dünne Schalen	<u>Bemerkungen:</u> Kennwerte nicht bestimmt	<u>Gipsgehalt:</u> 1,3 Gew.%
-----------------	--	---	--	---------------------------------

→ Abb.44; 48-50

- hoher Mineralkorngehalt
- weniger porös als bisherige Proben, häufig Porentextur // Oberfläche (begünstigt das Schadensbild)
- starke oberflächenparallele Schalenbildung (Schalenpaket erstreckt sich über gesamte präp. Breite, d.h. mind. 1,5 cm)
- Oberflächenparallele Porentextur
- stellenweise Gips an der Oberfläche, stellenweise Gips zwischen den Schalen („Nester“)
- ⇒ Gips nicht primäre Schadensursache

BST Z-17	<u>Beschreibung:</u> Ockerbraunroter Ziegel, „Schalenpaket“ mit Orig.- Oberfläche	<u>Schäden:</u> sehr weich („mürbe“), zahlreiche dünne Schalen (analog Z-16)	<u>Bemerkungen:</u> Kennwerte nicht bestimmt	<u>Gipsgehalt:</u> nicht bestimmt
-----------------	--	---	--	--------------------------------------

→ Abb.51-55

- hoher Mineralkorngehalt
- sehr starke Gefügezerstörungen (mehrere, breite, oberflächenparallele Risse, weitere Risse mit anderen Orientierungen)
- ein Riß über gesamte präparierte Breite (Schalenbildung): hinter dieser in sich relativ intakten 60-120 µm dünnen Schale starke „subkrustale“ Lockerungen (s.o.)
- kaum Porentexturen
- Gipskruste an Oberfläche
- In den Rissen nur stellenweise und nur randlich Gips (keine Gipsfüllung)
- ⇒ Gips nicht primäre Schadensursache

BST Z-18	<u>Beschreibung:</u> Glasierter Formstein: Dünne, meist durch- scheinende, stellenw. schwärzliche Glasur (hellockerroter Ziegel)	<u>Schäden:</u> starke Rückwitterung, Glasurablösung mit Ziegelschalen, dahinter Schelbern	<u>Entnahmestelle:</u> O-Giebel [18,66 / 20,56]	<u>Fragestellung:</u> Glasurbestimmung
-----------------	---	--	---	---

→ Abb.56-62

- Pb-Fe-Glasur (Zugabe von Eisenoxiden zur Pigmentierung)
- bzgl. der lokalen Zusammenstzung inhomogen
- zahlreiche Risse in der Glasur (Krakelé)
- aus den Rissen sind an zahlreichen Stellen Wülste herausgequollen, deren Morphologie und EDX-Zusammensetzung dem Ziegelmaterial entspricht
- ⇒ wahrscheinl. beim Brennprozeß entstanden

BST Z-19	<u>Beschreibung:</u> Ockerrotbrauner Ziegel mit Resten des Renaissance-Putzes	<u>Schäden:</u> extreme Schalenbildung	<u>Bemerkungen:</u> Kennwerte nicht bestimmt	<u>Gipsgehalt:</u> nicht bestimmt
-----------------	--	---	---	--------------------------------------

→ Abb.63-64

- sehr inhomogen (Schlieren: unterschiedlich dichte Gefügebereiche, Unterschiede im Mineralkorngehalt und in der Korngröße)
- starke Gefügelockerungen (Mehrfachschalenbildung innerhalb und entlang der Schlieren, aber auch im benachbarten Ziegel)
- Renaissanceputzrest auf der Ziegeloberfläche (gut haftend)
- Putzoberfläche stark vergipst („schwebende Gipsruste“)
- kein Gips in den Rissen
- ⇒ Gips nicht primäre Schadensursache

BST Z-21	<u>Beschreibung:</u> Ockerroter Ziegel, Schale mit Original-Oberfläche	<u>Schäden:</u> Schalenbildung, dahinter überwiegend absandend, stellenw. Schelbern; rel. geringe Rückwitt.	<u>Bemerkungen:</u> Kennwerte nicht bestimmt	<u>Gipsgehalt:</u> 2,2 Gew.%
-----------------	---	--	---	---------------------------------

→ Abb.66

- Lage der Oberfläche auf dem Schliff nicht eindeutig
- Zahlreiche Gefügelockerungen an der angenommenen Schalenrückseite
- leichte Reliefbildung an der angenommenen Oberfläche
- häufig oberflächenparallele Porentextur
- keine Salze (chem. nachgewiesene Gipsmenge fein verteilt)
- ⇒ Gips nicht primäre Schadensursache

BST Z-22	<u>Beschreibung:</u> Ockerroter Ziegel: vollständig hohl liegende, dünne Schale aus dem rückgewitterten Bereich	<u>Schäden:</u> im rechten Teil bis max. 5 cm Tiefe rückgewittert, Oberfl. sandend, großflächige, dünne Schale auf rückgewitt. Oberfl.	<u>Bemerkungen:</u> Kennwerte nicht bestimmt	<u>Gipsgehalt:</u> 7,6 Gew.%
-----------------	--	---	---	---------------------------------

→ Abb.67

- Schalendicke 0,6 bis 1,6 mm
- starke Vergipsung innerhalb der dünnen Schale mit deutlichem Gradienten innerhalb der Schale (Konzentration des Gipses in ¼ bis ½ der Schalenbreite)
- unter der Annahme, daß sich der ermittelte Gipsgehalt im ersten Drittel der Schale befindet, beträgt der Gipsgehalt dort etwa 20 Gew.% (!)
- Oberfläche: Kruste, teilweise eingewachsen (Verdichtung der Oberfläche)
- Rückseite der Schale: „Subkrustale“ Lockerungen

BST Z-23	<u>Beschreibung:</u> Ockerbrauner Ziegel	<u>Schäden:</u> stark abschelbernd, Rückwitterung rel. gering, Besprühen mit Wasserdampf führt zu starken Bewegungen der lockeren Partikel	<u>Bemerkungen:</u> Kennwerte nicht bestimmt	<u>Gipsgehalt:</u> 0,7Gew.%
-----------------	---	---	---	--------------------------------

→ Abb.68-70

- völlig anderes Gefüge als bisherige Ziegel: sehr hoher Matrixanteil, wenig Mineralkörner, sehr hoher Anteil kleiner Körner (Ziegelrohstoff nicht gemagert)
- sehr inhomogen (Schlieren: unterschiedlich dichte Gefügebereiche, unterschiedliche Färbung)
- Bildung eines dünnen Schalenpaketes an der Oberfläche (zahlr. meist parallele Risse)
- Keine Salze ⇒ Gips nicht primäre Schadensursache

BST Z-24	<u>Beschreibung:</u> Ziegelroter Ziegel mit Orig.-Oberfläche	<u>Schäden:</u> starker Materialverlust zahlreiche dünne Schalen (ähnlich Z-22)	<u>Bemerkungen:</u> Kennwerte nicht bestimmt	<u>Gipsgehalt:</u> nicht bestimmt
-----------------	---	--	---	--------------------------------------

- hoher Mineralkorngehalt
- zahlreiche oberflächenparallele Risse, z.T. durchlaufende Risse (Mehrfachschalenbildung bis in 8 mm Tiefe)
- Gips im oberflächennahen Porenraum und im Porenraum an der Schalenrückseite
- Risse sind gipsfrei
- Oberflächenparallele Porentextur
- ⇒ Gips nicht primäre Schadensursache

→ Abb. 71-75

BST Z-25	<u>Beschreibung:</u> Ziegelroter Ziegel mit Orig.-Oberfläche (zusätzl. Renaissance-mörtelreste)	<u>Schäden:</u> v.a. im linken Teil bis 4 cm Tiefe rückgewittert (sandend), beginnende Schalenbildung	<u>Bemerkungen:</u> Kennwerte nicht bestimmt	<u>Gipsgehalt:</u> 8,2 Gew.%
-----------------	--	--	---	---------------------------------

- hoher Mineralkorngehalt
- oberflächenparallele Risse
- oberflächenparallele Porentextur
- z.T. durchlaufende Risse (Schalenbildung in 2,4 bis 4 mm Tiefe)
- Gipskruste auf Mörtelresten und Ziegeloberfläche
- stellenweise auch Gips im oberflächennahen Porenraum des Ziegels (bis 0,6 mm Tiefe)
- durchlaufende Risse gipsfrei
- ⇒ Gips nicht primäre Schadensursache

→ Abb.76-80

Bewertung der mikroskopischen Untersuchungen

① Korrelationen Gefüge ⇔ Physikalisch-technische Kennwerte (Ziegel Z-3, Z-6, Z-7, Z-11)

Es ließen sich keine Korrelationen zwischen Gefügebildern und den gemessenen Rohdichten der jeweiligen Proben nachweisen. Der Ziegel Z-3 weist bei einer Rohdichte von 1,74 g/cm³ im mikroskopischen Bild ein relativ dichtes Gefüge auf, während der Ziegel Z-11 trotz höherer Rohdichte (1,88 g/cm³) mikroskopisch deutlich poröser ist.

Die Unterschiede in den w-Werten können tendenziell mit den Gefügaufnahmen korreliert werden. Die niedrigeren w-Werte der Ziegel Z-6 und Z-7 (max. $2,5 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{0,5}$) gegenüber den deutlich höheren w-Werten der Proben Z-3 und Z-11 ($9 - 17 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{0,5}$) sind in den Gefügaufnahmen nachvollziehbar. Je poröser das Gefüge im mikroskopischen Bild, desto höher ist der w-Wert.

Die Unterschiede in den Sorptionsfeuchten sind nicht mit den mikroskopischen Gefügaufnahmen in Beziehung zu bringen.

② Mikroskopische Untersuchungen an geschädigten Ziegeln

Die Homogenität der untersuchten mittelalterlichen Ziegel ist auch im mikroskopischen Bereich unterschiedlich. Typisch hierfür ist das Auftreten von tonreichen, mineralkornarmen Schlieren, die gegenüber dem „normalen“ Gefüge deutlich dichter sind (Z-7 und Z-19). Infolge stärkerer Brennschwindung sind in der Regel innerhalb dieser „Tonschlieren“ und im Grenzbereich zum „normalen“ Ziegel Risse entstanden. Ein vollständig aus zu tonreichem Rohstoff gebrannter Ziegel mit entsprechend starken Schäden ist Z-23, der aber als Ausnahme zu betrachten ist.

Die mikroskopische Untersuchung der z.T. stark rückgewitterten Ziegel hat gezeigt, daß die Bildung mehrerer, parallel zur Ziegeloberfläche orientierter Schalen die häufigste Schadensform darstellt (Z-16, Z-17, Z-19, Z-24 und Z-25). Das hat Entfestigungen bis in größere Tiefen zur Folge (Z-24: 0, 8 cm; Z-16: mindestens 1,5 cm). Oberflächenparallele Porentexturen treten an einigen Proben auf (Z-16 und Z-24) und begünstigen wahrscheinlich die Schalenbildung.

Von den bauschädlichen Salzen spielt nur Gips eine Rolle im Schadensprozeß. Er tritt als Ausblühung auf Ziegeloberflächen hinter Putzschalen auf, die (seit unbestimmter Zeit) keine Haftung zum Ziegelmauerwerk mehr aufweisen. Einige Ziegel weisen an den Oberflächen dünne Gipskrusten (Z-17, Z-22, Z-25). Teilweise sind Gipsanreicherungen im Porenraum bis in etwa 1 mm Tiefe nachweisbar (Z-7, Z-22, Z-24, Z-25). Es ist wahrscheinlich, daß sowohl die Gipskrusten als auch der Gips im oberflächennahen Porenraum aufgrund des hygri-schen und thermischen Verhaltens den Schadensprozeß begünstigen.

Die entstandenen Risse oder Schalenzwischenräume sind allerdings weitgehend gipsfrei, so daß Salzsprengung als Hauptschadensursache an den Ziegeln nicht in Betracht kommt. Die auftretenden Schäden sind primär auf Frostsprengung zurückzuführen, die Gipsbildung ist der sekundäre Prozeß.

③ Glasuren / Glasurschäden

Bei den schwarzen Glasuren auf den Formsteinen (Z-18) handelt es sich um eine Pb-Glasur, die durch Zugabe von Eisenoxiden pigmentiert wurde. Bereichsweise treten kristalline Pb/Fe-Ausscheidungen an der Oberfläche auf.

Die Glasuroberfläche zeigt außerdem zahlreiche Schwindrisse, d.h. die thermischen Ausdehnungs-koeffizienten des Ziegels und der Glasur sind unterschiedlich. Auf den Rissen sind stellenweise „Wülste“ vorhanden, die nach Form und Elementzusammensetzung (EDX) dem Ziegel entsprechen. Das bedeutet, daß die Glasur auf den Ziegelrohling aufgebracht wurde und beide in einem Arbeitsschritt gebrannt wurde. Nach der Entstehung von Rissen konnte plastische Ziegelmasse herausquellen.

Die Rolle des Gipses bei der Entstehung der starken Glasurschäden ist noch ungeklärt. Auf der im REM untersuchten Oberfläche tritt Gips nur sehr vereinzelt auf. Dünnschliffuntersuchungen hierzu wurden bisher nicht durchgeführt.

4.2. Putze und Mörtel

4.2.1. Chemische Analysen / B-Z-Verhältnis / Chemisch-mineralogische. Kennzeichnung

Probenmaterial: **BST M-1** → Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter, 13. Jhdt.)
BST M-2 → Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter, 13. Jhdt.)
BST M-3 → Mauermörtel (Mittelalter)
BST M-6 → Mauermörtel (Renaissance)
BST M-7 → Renaissance-Putzmörtel (über dem mittelalterlichen Putz)
BST M-8 → Schalenmörtel (Spätmittelalter); identisch mit dem Mörtel

der

gut erhaltenen mittelalterlichen Mörtelplomben

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung der Putze und Mörtel, bezogen auf die Gesamteinwaage

Proben-Nr.	Chem. Zusammensetzung, bezogen auf Gesamteinwaage [Masse %]								Chem. Salzanal. (3)
	Glühverlust	HCL-unlöslich	SiO ₂	CaO	HCl-löslich			SO ₃ /Gips (2)	
MgO					R ₂ O ₃ (1)	Rest (n.b.)	Gips		
BST M-1	15,86	61,73	0,94	19,51	0,20	0,65	0,09	1,02 / 1,73	0,4
BST M-2	14,35	64,29	1,37	17,22	0,14	0,98	0,54	1,11 / 1,90	2,3
BST M-3	11,37	71,46	1,72	13,46	0,20	1,05	0,50	0,24 / 0,41	4,0
BST M-6	16,65	59,31	1,56	20,00	0,16	1,39	0,81	0,12 / 0,20	-
BST M-7	15,11	58,64	3,86	18,41	0,27	0,82	0,26	2,63 / 4,47	4,2
BST M-8	22,53	42,61	4,09	26,44	0,42	1,96	1,17	0,78 / 1,33	-

(1) R₂O₃: Summe von Al₂O₃, Fe₂O₃, Mn₃O₄, TiO₂

(2) der gesamte ermittelte SO₃-Gehalt wurde in Gips umgerechnet

(3) im Ergebnis der quantitativen, chem. Salzanalysen (vgl. Gliederungspunkt 4.2.4)

Tabelle 9: Chemische Zusammensetzung des Bindemittels

Proben-Nr.	Chem. Zusammensetzung des Bindemittels [Masse %]					
	SiO ₂	CaO	MgO	R ₂ O ₃ (1)	SO ₃ /Gips (2)	Rest (nicht bestimmt)
BST M-1	4,2	87,0	0,9	2,9	4,6 / 7,8	0,4
BST M-2	6,4	80,6	0,7	4,6	5,2 / 8,8	2,5
BST M-3	10,0	78,4	1,2	6,1	1,4 / 2,4	2,9
BST M-6	6,5	83,1	0,7	5,8	0,5 / 0,9	3,4
BST M-7	14,7	70,2	1,0	3,1	10,0 / 17,0	1,0
BST M-8	11,7	75,9	1,2	5,6	2,2 / 3,7	3,4

(1) R₂O₃: Summe von Al₂O₃, Fe₂O₃, Mn₃O₄, TiO₂

(2) der gesamte ermittelte SO₃-Gehalt wurde in Gips umgerechnet

Bewertung der chemischen Analysen

Aus der chemischen Zusammensetzung der Bindemittel (Tabellen 8 und 9) kann geschlossen werden, daß es sich bei fast allen untersuchten Mörteln um Kalkmörtel handelt.

Die Gehalte an löslicher Kieselsäure, bezogen auf die Gesamteinwaage (Tabelle 8), liegen mit Werten zwischen 0,9 und 4,09 M% in einer Größenordnung, die nach Angaben von R. Wens für die mittelalterlichen Mörtel des nördlichen Brandenburg typisch ist /Wens, 1998/.

Mögliche Quellen der löslichen Kieselsäure sind: - geringe mergelige Anteile im Bindemittel
- Nebenbestandteile des Zuschlags (z.B.

Lehm)

In diesem Zusammenhang wurde bei den mikroskopischen Untersuchungen in den Mörtelgefügen Aggregate in Zuschlaggröße festgestellt, die aus überwiegend stark geschädigten Quarzkörnern in einer Matrix aus amorpher Kieselsäure bestehen. Teilweise treten auch Calciumsilikatkristalle auf. Diese Zusammensetzung und die stark konkaven Formen sind zuschlaguntypisch. In ihrer vorliegenden Form hätten diese Körner einen Transport innerhalb der glazialen Sande wahrscheinlich nicht überstanden. Wir gehen folglich davon aus, daß die Aggregate nicht eigentlicher Bestandteil des Zuschlags sind, sondern als ursprünglicher Bestandteil der Wiesenkalke über das Bindemittel in den Mörtel gelangen konnten.

Diese Teilchen sind im ersten Schritt der chemischen Mörtelanalyse (Aufschluß in verdünnter Salzsäure) wahrscheinlich nur gering löslich und verbleiben vorerst im Rückstand, werden aber bei der anschließenden alkalischen Behandlung des Rückstands gelöst und somit dem Bindemittel zugeführt.

Das bedeutet, die Gehalte an löslicher Kieselsäure in den Bindemitteln der untersuchten Mörtel sind nicht zwingend auf hydraulische Bestandteile der Kalke zurückzuführen, sondern stammen, zumindest teilweise, aus den oben beschriebenen Aggregaten.

Eine Festigkeitssteigerung ist jedoch nur zu erwarten, wenn sich fein verteilte hydraulische Phasen im Bindemittel der Mörtel gebildet haben.

Die mikroskopischen Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, daß alle untersuchten Mörtel salzsäurelösliche Zuschläge (Kalksteinbruchstücke) enthalten. Nach den Abschätzungen im Lichtmikroskop liegen die Gehalte meist unter 5 %. Diese Anteile werden bei der chemischen Analyse zwangsläufig zum Bindemittel gerechnet. Aus diesem Grund wird in Tabelle 10 neben den Bindemittel-Zuschlag-Verhältnis, basierend auf den Ergebnissen der chemischen Analysen, ein weiterer, korrigierter B/Z-Wert unter der Annahme von 5 % Kalkstein im Zuschlag, angegeben.

Tabelle 10: Chemisch-analytisch bestimmtes und mikroskopisch korrigiertes Bindemittel / Zuschlag-Verhältnis (B/Z)

	Bindemittel / Zuschlag (basierend auf den chem. Analysen)	Bindemittel / Zuschlag (Annahme: 5 % Kalkstein im Zuschlag)
BST M-1	1 : 1,6	1 : 1,9
BST M-2	1 : 1,8	1 : 2,1
BST M-3	1 : 2,5	1 : 3,0
BST M-6	1 : 1,5	1 : 1,7
BST M-7	1 : 1,4	1 : 1,6
BST M-8	1 : 0,7	1 : 0,8

In den chemischen Analysen (Tabelle 8) wurde in den Putzmörteln Gips nachgewiesen. Für die mittelalterlichen Putze wurden 1,7 M% (M-1) bzw. 1,9 M.% (M-2) ermittelt, die Renaissanceputze weisen Gipsgehalte bis 4,4 M% (M-5) auf.

Die mikroskopischen Untersuchungen belegen, daß es sich hierbei nicht um etwaige Gipsbestandteile der Bindemittel sondern um Verwitterungsprodukte handelt.

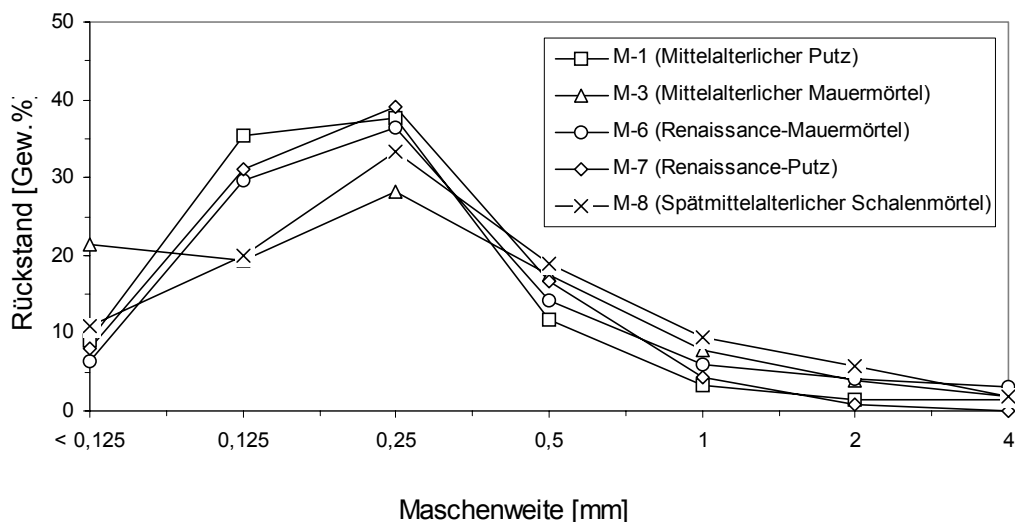
In zwei Fällen (mittelalterliche Mörtel M-1 und M-3, vgl. Tabelle 8) sind erhebliche Abweichungen zwischen den Gipsgehalten, die über die Bindemittelanalyse ermittelt wurden, und den über IC bzw. IC-OES bestimmten Gipsgehalten aufgetreten.

Wahrscheinliche Ursachen sind für den mittelalterlichen Putz M-1 die Schwankungen der Gipsgehalte in den kleinen Probestückchen, die auch durch die mikroskopischen Untersuchungen belegt wurden (s. Gliederungspunkt 4.2.5.).

Für den mittelalterlichen Mauermörtel M-3 können die Ursachen nur vermutet werden. Denkbar sind Gipsanreicherungen an der Oberfläche bzw. an Mörtelflanken im Fugenbereich. Für die Salzbestimmung über IC bzw. IC-OES wurde wahrscheinlich ein Stück mit vergipster Oberfläche ausgewählt.

4.2.2. Sieblinien

Sieblinien (Rückstandskurven)



Bewertung der Sieblinien

Die Sieblinien der Mörtel sind in der Anlage 6.3 (2) sowohl als Rückstandskurven als auch als Summenkurven dargestellt.

Die Mörtel sind durchweg als fein zu bezeichnen (Zuschlagkorngrößen 0-2 mm), die Gehalte an größeren Körnern (2-4 mm) sind sehr gering.

Während Renaissance-Mauermörtel (M-6) und Renaissance-Putz (M-7) in den Sieblinien weitgehend übereinstimmen, zeigen der mittelalterliche Putz (M-1) und der mittelalterliche Mauermörtel (M-3) deutliche Unterschiede im Kornaufbau. Der mittelalterliche Putz ist in der Sieblinie den Renaissancemörteln sehr ähnlich, sein Kornmaximum ist aber etwas in den feineren Bereich verschoben und liegt zwischen 0,125 bis 0,25 mm, während die Renaissancemörtel ein Maximum bei 0,25 mm aufweisen. Der mittelalterliche Mauermörtel enthält mehr gröbere Zuschläge (Bereich 0,5 bis 2 mm) und zusätzlich einen sehr hohen Feinanteil (Bereich <0,125).

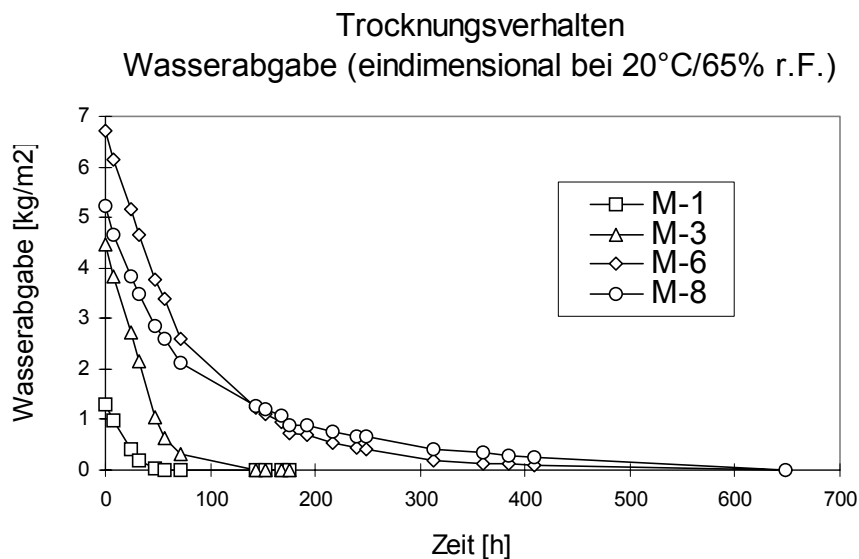
Der spätmittelalterliche Schalenmörtel (M-8) weist die ausgewogenste Kornverteilung auf und unterscheidet sich deutlich von den anderen Mörteln.

4.2.3. Technisch-physikalische Kennwerte

Tabelle 11: Ausgewählte technisch-physikalische Kennwerte der Mörtel

Proben-Bez.	Rohdichte [g/cm ³]	Freie kapillare Wasseraufnahme [M%]	Offene Porosität [Vol.%]	w-Wert [kg/(m ² ·h ^{0,5})]	Sorptionsfeuchte (bei 20°/95%) [Gew.%]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
BST M-1	1,91	12,40	23,68	-	0,63	1,5
BST M-2	1,96	11,05	21,68	28,4	-	0,9
BST M-3	1,79	15,07	26,98	16,6	-	0,6
BST M-5	1,62	17,30	28,11	3,6	-	1,5
BST M-6	1,77	13,23	23,32	12,5	-	0,9
BST M-7	1,62	19,77	31,96	-	-	0,3
BST M-8	1,73	15,52	26,88	10,3	8,4 – 12,2	6,9

Trocknungsverhalten



Bewertung der technisch-physikalischen Kennwerte

Die untersuchten Mörtel zeigen eine hohe Schwankungsbreite in ihren Kennwerten (vgl. Tab. 11):

Rohdichte	1,62 - 1,96	[g/cm ³]
Offene Porosität	21,7 - 28,1	[V%]
Freie Wasseraufnahme	11,1 - 19,8	[M%]
Flächenbezogene Wasseraufnahme im zeitlichen Verlauf (w-Wert)	3,6 - 28,4	[kg/(m ² h ^{0,5})]
Sorptionsfeuchte (bei 20°C / 97% F.)	0,6 - 12,2	[Gew.%]
Druckfestigkeit	0,3 – 6,9	[N/mm ²]

Die größte Festigkeit weist der spätmittelalterliche Schalenmörtel M-8 auf (6,9 N/mm²). Dieser Wert ist für einen Luftkalkmörtel als hoch zu bewerten.

Die an den mittelalterlichen und Renaissance Mörteln ermittelten Druckfestigkeiten sind durchweg niedrig (0,3 bis 1,5 N/mm²). Einschränkend muß aber festgestellt werden, daß aufgrund der ungünstigen Probengeometrien eine sichere Bestimmung erschwert war (vgl. Anlage 6.3 (1)).

Zur Interpretation und Bewertung der einzelner Kennwerte müssen die Ergebnisse der mikroskopischen Gefügeuntersuchungen hinzugezogen werden (Details s. Gliederungspunkt 4.2.5.):

Durch den großen Einfluß des Zuschlaggehalts auf die Rohdichte ist deren Bewertung nur mit großen Einschränkungen und bei Kenntnis des B/Z-Verhältnisses sinnvoll. Die mikroskopischen Untersuchungen zeigen, daß sich die Gefüge bei gleicher Rohdichte hinsichtlich Zuschlaggehalt, Korngrößenverteilung und Porosität deutlich unterscheiden können (M-3 ↔ M-8).

Nach Einschätzung von /Knöfel, 1989/ kann die Rohdichte nicht in unmittelbaren Bezug zur Dauerhaftigkeit gebracht werden.

Über die mikroskopischen Untersuchungen der Bauwerksproben können aus den jeweiligen Gefügebildungen tendenziell auch die Unterschiede in den w-Werten abgeleitet werden. Die Porenradialverteilung des dichten Mörtels M-8 ist für den kapillaren Transport offenbar weniger günstig (w-Wert=10,3) als beispielsweise beim poröseren Mörtel M-3 (w-Wert=16,6). Die freien kapillaren Wasseraufnahmen bei Unterwasserlagerung hingegen sind bei beiden Proben annähernd gleich (27 M%).

Aus dem Vergleich der Trocknungskurven der Mörtel (s. Seite 27) kann ein Einfluß der unterschiedlichen Bindemittelgehalte auf den zeitlichen Verlauf der Trocknung abgeleitet werden.

Die bindemittelreichen Proben M-6 und M-8 enthalten einen relativ großen Anteil wahrscheinlich adsorptiv gebundenen Wassers im Mikroporenbereich, das über Dampfdiffusion nur sehr langsam abgegeben wird. Der bindemittelreiche Mörtel M-8 weist entsprechend hohe Sorptionsfeuchten zwischen 8 und 12 Gew.% (bei 20°C/95% r.F.) auf. Demgegenüber liegt dieser Wert beim vergleichsweise bindemittelarmen Mörtel M-1 bei 0,6 Gew.%.

4.2.4. Quantitative chemische Salzuntersuchungen

Probe	Dicke	Kationen [mg/kg]				Anionen [mg/kg]			Gips [M%] (bez.auf SO ₄ ²⁻)
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	
M-1	5-7-mm	1.200	10	30	80	2.200	60	20	0,4
M-2	5 mm	5.900	20	30	160	13.600	50	20	2,3
M-3	-	9.700	150	150	430	23.900	630	150	4,0
M-5	4 mm	5.800	120	600	370	12.700	1.500	1.100	2,1
M-7	3-5 mm	10.700	50	200	440	25.000	620	250	4,2

Bewertung der quantitativen, chemischen Salzanalysen

Die Ergebnisse der quantitativen, chemischen Salzanalysen wurden bereits auf Seite 26 im Zusammenhang mit den chemischen Mörtelanalysen diskutiert und bewertet.

4.2.5. Mikroskopische Gefügeuntersuchungen (Schädigungen und Probekonservierungen)

1. Schädigungen

BST M-1	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter, 13. Jhdt.); vom Untergrund gelöste Putzschollen, vereinz. mit Barockputzresten (25 Streufunde, „Leseprüben“)	häufig hohl liegender Putz bzw. schalenförmige Ablösung vom Ziegel	RD [g/cm ³] 1,9	OP [V%] 23,7	Fr. WA [M%] 12,4
----------------	--	--	--	-------------------------------	-----------------------------------

→ Abb. 81 bis 87

- Zuschläge: Quarz., Feldspäte (Plagioklas, Mikroklin, Orthoklas), Silikatische Gesteinsbruchstücke, Kalksteinsbruchstücke
- Akzessorien: Glaukonit, Flint, Kalkspatzen
- Zuschläge überwiegend gut gerundet
- Gehalt an salzsäurelöslichen Zuschlägen < 5%
- Silikatische Gesteinsbruchstücke stellen die größten Zuschlagkörner (bis 2mm)
- Besonderheiten: Körner bis 2 mm, bestehend aus stark gebrochenen Quarzkristallen in variantenreicher Grundmasse (amorph, feinkristallin-körnig, stengelig); teilw. stark doppelbrechende Kristallite in der Grundmasse (Calciumsilikate)
- relativ guter Erhaltungszustand (guter Korn-Matrix-Kontakt, nur vereinzelt Saumporen)
- nur in Oberflächennähe vereinzelt Gefügelockerungen (kurze Risse)
- im oberflächennahen Porenraum stellenweise dichteres Gefüge durch Calcitrekristallisation
- Kalkspatzen häufig mit Rekristallisationen
- kein Gips
- stellenweise BM-Rekristallisationen in Zuschlagsäumen

BST M-2	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter, 13. Jhdt.); vom Untergrund gelöste Putzschollen, häufig mit Barockputzresten (20 Streufunde, „Leseprüben“)	häufig hohl liegender Putz bzw. schalenförmige Ablösung vom Ziegel	RD [g/cm ³] 2,0	OP [V%] 21,7	Fr. WA [M%] 11,1
----------------	--	--	--	-------------------------------	-----------------------------------

→ Abb. 88 bis 92

- vergleichbar M-1
- stellenweise Renaissanceputzreste auf mittelalterlichem Putz
- stellenweise dünne Gipskruste an der Oberfläche, teilweise eingewachsen, teilweise auflagernd (bis 0,2 mm)
- Gipsgehalt bezogen auf 5 mm: 2,3 M% / bezogen auf den ersten mm: ca. 11 M% !!
- Renaissanceputz unterhalb der Gipskruste mit Gefügeschäden (poröse BM-Matrix mit Rissen)
- vereinzelt in unmittelbarer Oberflächennähe dichteres Gefüge durch Calcitrekristallisation
- Kalkspatzen häufig mit Rekristallisationen
- gute Haftung des mittelalterlichen Putzes am Ziegel
- dünner Rekristallisationsaum auch in der Kontaktzone zum Ziegel

BST M-3	Mauermörtel (Mittelalter)	aus dem Mauer Kern	RD [g/cm ³] 1,8	OP [V%] 27,0	Fr. WA [M%] 15,1
----------------	---------------------------	--------------------	--	---------------------------	-------------------------------

→ Abb. 93 bis 95

- Zuschläge: Qz., Fsp. (Plag., Mkl., Okl.), Silikatische Gesteinsbruchstücke, Kalksteinsbruchstücke
- Akzessorien: Glaukonit, Flint, Kalkspatzen
- andere Sieblinie als M-1 und M-2 (höherer Feinanteil und insgesamt höherer Zuschlaggehalt)
- schlechterer Rundungsgrad als M-1 und M-2
- poröseres Gefüge
- Kalkspatzen häufig mit Rekristallisationen
- Gips (bezogen auf Sulfatgehalt: 4%) nicht lokalisierbar

BST M-5	Renaissance-Putzmörtel (über mittelalterlichem Putz bzw. Ziegel)	starke Aufschüsselung (Schalenbildung)	RD [g/cm ³] 1,6	OP [V%] 28,1	Fr. WA [M%] 17,3
----------------	---	---	--	---------------------------	-------------------------------

→ Abb. 96 bis 102

- Zuschläge: Qz., Fsp. (Plag., Mkl., Okl.), Silikatische Gesteinsbruchstücke, Kalksteinsbruchstücke
- Akzessorien: Glaukonit, Flint, Kalkspatzen
- Besonderheiten: Körner, bestehend aus stark gebrochenen Quarzkristallen in variantenreicher Grundmasse (amorph, feinkristallin-körnig, stengelig); teilw. stark doppelbrechende Kristallite in der Grundmasse (Calciumsilkate)
- einige Quarzkörner mit amorphen Säumen bzw. nadeligen Kristallen umgeben
- andere Sieblinie als M-1 und M-2 sowie M-3
- starke Gefügeschädigungen und in der Ablösungszone: feine Risse; teilw. große Luftporen; Risse // Ablösungsfront; Saumporen um die Zuschläge
- Kalkspatzen häufig mit Rekristallisationen
- Gipskruste, teilw. eingewachsen; Dicke: überw. 0,1 bis 0,2 mm, stellenw. bis 0,3 mm
- Gipsgehalt bezogen auf 4 mm: 2,1 M% / bezogen auf den ersten mm etwa 8 %

BST M-6	Renaissance-Mauermörtel	aus dem Mauer Kern	RD [g/cm ³] 1,8	OP [V%] 23,3	Fr. WA [M%] 13,2
----------------	-------------------------	--------------------	--	---------------------------	-------------------------------

→ Abb. 103 bis 105; 112

- Zuschläge: Qz., Fsp. (Plag., Mkl., Okl.), Silikatische Gesteinsbruchstücke, Kalksteinsbruchstücke
- Akzessorien: Glaukonit, Flint, Kalkspatzen
- überw. gut gerundete Zuschläge
- rel porös
- Kalkspatzen häufig mit Rekristallisationen

BST M-7	Renaissance-Putzmörtel (über dem mittelalterlichen Putz oder direkt auf Ziegel)	starke Aufschüsselung (Schalenbildung)	RD [g/cm ³] 1,6	OP [V%] 32,0	Fr. WA [M%] 19,8
----------------	---	---	--	---------------------------	-------------------------------

→ Abb. 106 bis 108

- bezügl. Zuschläge und „Exoten“ vergleichbar M-5
- vorliegende Probe weist jedoch stärkere Gefügeschäden und stärkere Vergipsung als M-5 auf
- Gipskruste, teilw. eingewachsen; Dicke: überw. 0,1 bis 0,2 mm, stellenw. bis 0,7 mm
- die zahlreichen Risse und Luftporne im Inneren der Probe sind gipsfrei
- Gipsgehalt bezogen auf 3-5 mm: 4,2 M% / bezogen auf den ersten mm etwa 16%
- über weite Bereiche oberflächenparallele Schalenbildung (Dicke 0,1 bis 1 mm)

BST M-8	Schalenmörtel (Spätmittelalter)	aus dem Mauer Kern	RD [g/cm ³] 1,7	OP [V%] 26,9	Fr. WA [M%] 15,5
----------------	------------------------------------	--------------------	--	---------------------------	-------------------------------

→ Abb. 109 bis 111; 113

- Zuschläge: Qz., Fsp. (Plag., Mkl., Okl.), Silikatische Gesteinsbruchstücke, Kalksteinsbruchstücke
- Akzessorien: Glaukonit, Flint, Kalkspatzen
- überw. gut gerundete Zuschläge
- sehr bindemittelreich
- rel. dicht bzw. mikroporös
- sehr guter Korn-Matrixkontakt
- zahlreiche Rekristallisationen im BM-Bereich

Da es sich bei den oben beschriebenen mittelalterlichen Putzmörtelproben (M-1 und M-2) um Streufunde von der Fensterbank handelt, bei denen der Verdacht besteht, daß sie die Erhaltungs-zustände und Schäden der Putze der Wandflächen nicht ausreichend repräsentieren, wurden von den mittelalterlichen Putzmörteln am 24.1.98 vom Restaurator H. H. Bär zwei weitere Proben entnommen.

Probe 1	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	<u>Beschreibung / Schäden:</u> Kruste, oberflächliche Verdichtung, teilw. aufgebrochen, Abhebung der verdichteten Oberfläche; innerhalb der offenen Stellen ist verringerte Stabilität bis hin zum Absanden zu verzeichnen	unteres Fries , unterer Rand des Putzfeldes
----------------	---	---	---

→ Abb. 114 bis 116

- Fragestellungen:
- Ist die oberflächliche Verdichtung eine Calcit- oder Gipsschicht?
 - Verteilung der verdichteten Zone ?
 - Gefügelockerungen im Inneren ?
 - Ursachen der Phänomene

Ergebnis:

- dünne, fest auflagernde Gipskruste an der Oberfläche; Dicke überw. 50-100 µm, stellenw. bis 200 µm
- Gipskruste durch Umwandlung des calcitischen Bindemittels entstanden
- sehr vereinzelt beginnende Ablösung der Gipschicht
- innerhalb des Putzes überwiegend intaktes Gefüge: guter Korn-Matrix-Kontakt, keine Risse
- einzelne Risse senkrecht zur Oberfläche
- ungewöhnlich dichte Bindemittelmatrix

Probe 2	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	<u>Beschreibung / Schäden:</u> Kruste, oberflächliche Verdichtung, teilw. aufgebrochen, Abhebung der verdichteten Oberfläche; innerhalb der offenen Stellen ist verringerte Stabilität bis hin zum Absanden zu verzeichnen	unteres Fries , unterer Rand des Putzfeldes
----------------	---	---	---

→ Abb. 117 bis 119

Fragestellungen: - Ist die oberflächliche Verdichtung eine Calcit- oder Gipsschicht ?

- Verteilung der verdichteten Zone ?
- Gefügelockerungen im Inneren ?
- Ursachen der Phänomene

Ergebnis:

- Unterschiede zu Probe 1:
 - insgesamt deutlich schlechterer Erhaltungszustand
 - dickere Gipskruste: überw. 50-100 µm, stellenw. bis 200 µm
 - Lockerungszone hinter der Gipskruste bis 0,8 mm Tiefe (Aufhebung des Korn-Matrixkontaktes, oberflächenparallele Risse)
 - stellenweise auch Risse innerhalb des Putzes (meist senkr. zur Oberfl.)

Aus den Kartierungen der Schadensphänomene (H. H. Bär) ergaben sich spezielle Fragestellungen zu den Oberflächenschädigungen an den mittelalterlichen Putzen. Hierzu wurde am 16./17.9.98 ein Laborwageneinsatz auf der Burg Stargard durchgeführt. Hierbei wurden die nachfolgend beschriebenen Proben entnommen.

BST M2/1	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	<u>Beschreibung / Schäden:</u> Ablösung vom Untergrund, leicht vergraute Oberfläche, vermutlich bis vor wenigen Jahren von Renaissanceputz überdeckt; intakter Ziegel hinter der Putzschale zeigt Gipsputzeln auf der Oberfläche	unterer Rand der südlichen Fensterblende
-----------------	---	---	--

→ Abb. 120 bis 124

Fragestellungen: - Beschreibung des Oberflächenzustandes (Krusten, Sinterungen)

- Gefügelockerungen im Inneren ?
- Ursachen der Phänomene
- Kann man mit dieser Probe das Gefüge vor der Renaissance-Überputzung beschreiben ?

Ergebnis:

- poröse, teilweise hohl liegende Gipskruste (Dicke etwa 50 µm)
- „Zuschläge“ in der Gipsschicht belegen die Umwandlung des calcitischen Bindemittels in Gips (→ eingewachsene Gipskruste)
- Krustengefüge hinter der Gips-Sinterschicht sehr porös, nur punktuelle Kornbindung, keine Bindemittelmatrix (Breite dieses Bereiches: bis 200 µm)
- REM-Untersuchung der Oberfläche: Gips-Sinterschicht
- Schalenrückseite mit dünner Calcitsinterschicht, d. h. bereits längere Zeit hohl liegend; stellen-weise Lockerungen
- Putzgefüge hinter der Gipskruste über den Putzquerschnitt intakt: guter Korn-Matrix-Kontakt, sehr dichte Bindemittelmatrix (rekristallisiert)

BST M2/2	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	<u>Beschreibung / Schäden:</u> Ablösung vom Untergrund; vermutlich schon vor längerer Zeit abgelöst und freiliegende Oberfläche	südliche Fensterblende, Innenkante des Gewändes
-----------------	---	--	---

→ Abb. 125 bis 128

Fragestellungen: - Beschreibung des Oberflächenzustandes (Krusten, Sinterungen)
 - Gefügelockerungen im Inneren ?
 - Ursachen der Phänomene

Ergebnis:

- REM-Untersuchung der Oberfläche: Gips-Sinterkruste
- keine Aussagen zu Gefügelockerungen im Querschnitt möglich, da Probenmenge für Polmi-Präparat nicht ausreichend

BST M2/3	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter) mit Kalktünche	<u>Beschreibung / Schäden:</u> gut erhaltene Kalktünche; Untergrund des Putzes ist kein Ziegel sondern Mauermörtel oder Fugenmörtel	oberh. der Bögen des oberen Bogenfrieses, 1,2 m von nördl. Ecke
-----------------	--	--	---

→ Abb. 129 bis 133

Fragestellungen: - Beschreibung des Oberflächenzustandes, insbesondere der Kalkung (Krusten, Sinterungen)
 - Gefügelockerungen im Inneren ?
 - Ist ein Untergrundeinfluß (Putz auf Mörtel) erkennbar ?
 - Ist eine Ursache der guten Erhaltung der Kalkung erkennbar ?

Ergebnis:

- bereichsweise fest anhaftende Gipskruste ohne Lockerungen des anschließenden Putzgefüges
- überwiegend poröse, teilweise hohl liegende Gipskruste (Dicke 50-100 µm)
- „Zuschläge“ in der Gipsschicht belegen die Umwandlung des calcitischen Bindemittels in Gips (→ eingewachsene Gipskruste)
- Krustengefüge hinter der Gips-Sinterschicht sehr porös, nur punktuelle Kornbindung, keine Bindemittelmatrix (Breite dieses Bereiches: bis 300 µm)

- REM-Untersuchung der Oberfläche: Gips-Sinterkruste
- Putzgefüge hinter der Gipskruste über den Putzquerschnitt intakt: guter Korn-Matrix-Kontakt, sehr dichte Bindemittelmatrix (rekristallisiert)
- Kalktünche auf dem mittelalterlichen Putz
 - Dicke meist 200 µm
 - keine Zuschläge, Füllstoffe
 - Oberfläche vergipst (Gipsschicht bis 50 µm, fest anhaftend, vereinzelt eingewachsen)

BST M2/4	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	<u>Beschreibung / Schäden:</u> Ablösung vom Untergrund im Bereich einer größeren Blase; intakter Ziegel hinter der Putzschale zeigt Gipspusteln auf der Oberfläche	unterer Rand des nördlichsten Bogenfeldes im oberen Fries
-----------------	---	---	---

→ Abb. 134 bis 137

Fragestellungen: - Beschreibung des Oberflächenzustandes (Krusten, Sinterungen)
 - Gefügelockerungen im Inneren ?
 - Ursachen der Phänomene

Ergebnis:

- überwiegend fest anhaftende Gipskruste ohne Lockerungen des anschließenden Putzgefüges (Dicke 50-100 µm, stellenweise bis 200 µm)
- REM-Untersuchung der Oberfläche: Gips-Sinterschicht
- Putzgefüge hinter der Gipskruste über den Putzquerschnitt intakt: guter Korn-Matrix-Kontakt, sehr dichte Bindemittelmatrix (rekristallisiert)
- Schalenrückseite leicht vergipst (dünner Gipssaum)

BST M2/5	Ursprünglicher Putzmörtel (Mittelalter)	<u>Beschreibung / Schäden:</u> Ablösung vom Untergrund in geschützter Lage (große „Blase“ über stark rückgewittertem Ziegel), deutliche verschmutzte Oberfläche	linker oberer Rand desselben Bogenfeldes wie 2/4
-----------------	---	--	--

→ Abb. 138 bis 143

Fragestellungen: - Beschreibung des Oberflächenzustandes (Krusten, Sinterungen)
 - Gefügelockerungen im Inneren ?
 - Ursachen der Phänomene

Ergebnis:

- Gipskruste an der Putzaußenseite: teilweise fest anhaftend, teilweise porös mit dahinter befindlichen Umwandlungen und Lockerungen des Putzgefüges (Dicke Kruste und Lockerungszone: 200-400 µm)
- zahlreiche Staub- und Schmutzpartikel in porösen Krustenbereichen
- Putzgefüge hinter der Gipskruste über den Putzquerschnitt intakt: guter Korn-Matrix-Kontakt, sehr dichte Bindemittelmatrix (rekristallisiert)
- Schalenrückseite ebenfalls vergipst (Dicke der Gipsschicht 20-50 µm)
- stellenweise Rißsystem an der Rückseite der Schale

Bewertung der mikroskopischen Gefügeuntersuchungen (Schädigungen):Mittelalterliche Putzmörtel (M-1, M-2, Probe 1, Probe 2, M 2/1 bis 2/5):

Die Putzstärke schwankt im Bereich 1,5 bis etwa 3,5 cm.

Gemeinsames Merkmal der mittelalterlichen Putze, die am Ostgiebel entnommen wurden, ist eine Gipsbildung an der Oberfläche. Die Zuschlagkörner des Putzes sind auch in der Gipskruste vorhanden sind. Folglich hat eine Umwandlung des calcitischen Bindemittels in Gips stattgefunden. Man bezeichnet solche Krusten auch als eingewachsene Gipskrusten.

An den Oberflächen der Krusten haben sich dünne, überwiegend dichte Gips-Sinterschichten gebildet. Häufig liegen diese Sinterschichten hohl; es schließt sich ein poröser Krustenabschnitt an, in dem praktisch keine Gips-Bindemittelmatrix sondern nur punktuelle Kornbindung vorliegt.

Die oberflächlichen Gips-Sinterschichten sind häufig sehr spröde und neigen zum Abplatzen. Die Folge ist das Freilegen der nur schwach gebundenen Zuschläge, die bei geringster Beanspruchung absanden.

Die beschriebenen Gefügeveränderungen beschränken sich auf einen schmalen Horizont an der Oberfläche bzw. im oberflächennahen Porenraum. Die Breite des Schädigungshorizontes ist kleiner als 1 mm.

Stärker geschädigte Putzoberflächen weisen Gips-Sinterschichten mit anschließenden Lockerzonen auf (M-2, Probe 2, M 2/1). Hier besteht die Gefahr von Abplatzungen im Krustenbereich und Absanden. Geringere Schädigungen sind durch dünnere, aber fest anhaftende bzw. eingewachsene Gipskrusten gekennzeichnet (Probe 1, M 2/4). Die Gefahr von Abplatzungen besteht hier nicht. Beide Phänomene können benachbart an einer Probe auftreten (M 2/3, 2/5).

Mit Ausnahme der Veränderungen im Oberflächenbereich ist das Gefüge im übrigen Putzvolumen weitgehend intakt. Der Korn-Matrixkontakt ist gut, Risse treten nur vereinzelt auf.

Auffällig ist an zahlreichen Proben die sehr dichte Bindemittelmatrix (Probe 1, Probe 2, M 2/1,

M 2/3, M 2/4, M 2/5). Im Vergleich mit den Gefügen der Mauermörtel (M-3, M-6) kann hieraus geschlossen werden, daß die mittelalterlichen Putzmörtel durch Rekrystallisationen im Bindemittel sehr stark verändert wurden.

An den Rückseiten der Putzschalen treten in einigen Fällen dünne Calcitsinterschichten, teilweise auch dünne Gipskrusten auf. Weiterhin sind bereichsweise Risse bzw. Rißsysteme parallel zur Außen-seite vorhanden.

Eine Höhenabhängigkeit im Schadensbild (Krustendicke, -zusammensetzung, -morphologie etc.) konnte nicht nachgewiesen werden (Vergleich der Proben 1 und 2 vom unteren Fries mit den Proben M 2/1 bis 2/5 vom oberen Fries bzw. südliche Fensterblende).

Das durch die restauratorischen Zustandsuntersuchungen belegte unterschiedliche Verhalten der mittelalterlichen Putze gegenüber Wassertropfen steht aber in direktem Zusammenhang mit der Morphologie der Gips-Sinterkrusten (Größe der Gipskristalle, Grad der Verwachsung etc.). Je kompakter die Krusten im mikroskopischen Bild erscheinen und je fester sie anhaften, desto geringer ist ihre Wasseraufnahme.

Spätmittelalterlicher Schalenmörtel (M-8)

Dieser Mörtel weist einen sehr hohen Bindemittelgehalt und einen sehr guten Korn-Matrix-Kontakt ohne Schwindrisse auf.

Nach den Erkenntnissen von /Schäfer und Hilsdorf, 1993/ wird die Mörtelfestigkeit bei gleicher Zuschlagart durch die Bindemittelmatrix bestimmt. I

Im Vergleich haben die mittelalterlichen Putze aber ein dichteres Gefüge als der spätmittelalterliche Schalenmörtel. Dessen deutlich höhere Festigkeit und die Ergebnisse der chemischen Mörtelanalyse legt die Vermutung nahe, daß dieser Mörtel festigkeitssteigernde, hydraulische Anteile im Bindemittel enthält. Darauf deuten auch bestimmte Formen in der Bindemittelmatrix.

Renaissanceputze

Die Stärke der Renaissanceputze ist mit 0,3 bis 0,5 mm deutlich geringer als die der mittelalterlichen Putze.

Die Putzoberflächen und der oberflächennahe Porenraum sind durch die Entstehung einer Gipskruste verändert. Bezüglich Krustenaufbau, -dicke und -entstehung besteht prinzipiell Übereinstimmung mit den Vorgängen an den mittelalterlichen Putzen.

Der grundlegende Unterschied besteht jedoch darin, daß die Renaissanceputze ein Rißsystem über die gesamte Putzstärke aufweisen. Sie sind dadurch deutlich stärker geschädigt als die mittelalterlichen Putze.

Die Risse sind gipsfrei und weisen keine Vorzugsorientierung auf.

2. Probekonservierungen / Testflächen

Proben-Bezeichnung	Beschreibung der konservatorischen Behandlung	Entnahmestelle [Koordinaten]	Fragestellungen
BST-T 1/1	① Auftrag einer Feinschlämme, bestehend aus Kalkmilch und feinkörniger Abschlämmung eines ungewaschenen Sandes	O-Giebel, unterhalb der S-Blende	Auswirkung der Behandlung auf das Gefüge: - Eindringtiefe - Verteilung - Stabilisierung
BST-T 1/2	① 3-facher Auftrag einer Kalkmilch, naß in naß (6-jährig gesumpfter Kalk) ② Mörtelantrag (Sumpfkalk, Romankalk, gewaschener Sand und Kies; Verhältnisse etwa: Bindemittel : Zuschlag 1:3,5, Romankalk : Sumpfkalk 1:8	O-Giebel, unterhalb der S-Blende	Auswirkung der Behandlung auf das Gefüge: - Eindringtiefe - Verteilung - Stabilisierung

BST-T 1/1

→ Abb. 147 bis 149

- ◆ Gipskruste an der Putzoberfläche
- ◆ Probe zeigt die für die Renaissanceputze typischen Gefügeschäden (Rißsystem ohne Vorzugsorientierung, Risse gipsfrei)
- ◆ zahlreiche Calcitrekristallisationen im BM des Renaissanceputzes
- ◆ Feinschlämme auf der Gipskruste
 - Schichtdicke < 50 µm
 - sehr feinkristallin
- ◆ reine Oberflächenkonsolidierung, Risse hinter der Gipsschicht werden nicht erreicht

BST-T 1/2

→ Abb. 144 bis 146

- ◆ Gipskruste an der Putzoberfläche
- ◆ Probe zeigt die für die Renaissanceputze typischen Gefügeschäden (Rißsystem ohne Vorzugsorientierung, Risse gipsfrei)
- ◆ zahlreiche Calcitrekristallisationen im BM des Renaissanceputzes
- ◆ Feinputzschicht auf der Gipskruste
 - Schichtdicke meist bis 0,3 mm, vereinzelt bis 0,5 mm
 - zahlreiche Schwindrisse selbst bei niedrigen Schichtdicken
- ◆ reine Oberflächenkonsolidierung, nur stellenweise in die Gipsschicht eingedrungen
- ◆ Risse hinter der Gipsschicht werden nicht erreicht

Bewertung der mikroskopischen Untersuchungen (Probekonservierungen / Testflächen)

Trotz mehrfachen Auftrags einer Kalkmilch (M 1/2) sind keine Calcitneubildungen im Rißsystem des Renaissanceputzes (Tiefenwirkung) nachweisbar.

Sowohl durch den Auftrag einer Feinschlämme (M 1/1) als auch die Behandlung mit Kalkmilch / Feinputz (M 1/2) wird nur eine Oberflächenkonsolidierung erreicht. Schlämme und Putz liegen sich auf den Gipskrusten. In beiden Fällen ist keine Tiefenwirkung bzw. strukturelle Festigung nachzuweisen.

Im Feinputz treten außerdem Schwindrisse auf.

5. Zusammenfassung / Zustandsbeschreibung

5.1. Ziegel

Die Kennwertermittlungen erfolgten an Ziegeln, die aus denkmalpflegerischen Erwägungen an der S-Wand des Alten Oberen Tores der Burg Stargard ausgebaut wurden. Die Ziegelvarietäten und die auftretenden Schäden sind denen des O-Giebels vergleichbar. Zusätzlich wurden für mikroskopische Untersuchungen einige Proben direkt am O-Giebel entnommen.

Einzelne Ziegel im Mauerwerksverband zeigen sehr starke Schädigungen. Die Verwitterungsformen sind vielfältig: konkave Rückwitterungen, Absanden, Schalen- und Schuppenbildung, Reliefbildung bis hin zu extremer Alveolarverwitterung.

Die stark geschädigten Ziegel an der Burg Stargard sind gekennzeichnet durch :

- niedrige Rohdichten: $< 1,8 \text{ g/cm}^3$
- hohe Freie Wasseraufnahme: 12-19 M%
- geringe Druckfestigkeiten: $< 10 \text{ N/mm}^2$
- hohe Sorptionsfeuchten: 8-11 Gew.%

Die Bewertung der Ziegel der Burg Stargard nach den von /S. Freyburg, 1997/ für dauerhafte mittelalterliche Ziegel angegebenen Kriterien:

- Rohdichte: $> 1,85 \text{ g/cm}^3$
- Freie Wasseraufnahme: $< 15 \text{ M}\%$
- Druckfestigkeiten: $> 12-15 \text{ N/mm}^2$

zeigt, daß die Mehrzahl der untersuchten mittelalterlichen Ziegel von der Burg Stargard als nicht oder nur bedingt frostbeständig anzusehen ist.

Dagegen haben die aufwendigen Bestimmungen der hygrischen Kennwerte (w-Wert, Sorptionsisothermen, Trocknungsverhalten) keine zusätzlichen Erkenntnisse erbracht.

Eine Korrelation zwischen w-Werten, Sorptionsfeuchte, Trocknungsverhalten und auftretenden Schäden konnte nicht belegt werden. Das bestätigt die Erfahrungen von /S. Freyburg, 1996/.

Eine Bestimmung der hygrischen Kennwerte zur Bewertung der Dauerhaftigkeit ist i.a. nicht erforderlich.

Begünstigt werden die auftretenden Schäden durch makroskopisch bzw. mikroskopisch erkennbaren Inhomogenitäten im Ziegel: Falt- bzw. Knetstrukturen und grobe Einschlüsse im makroskopischen Bereich sowie Brennschwindsäume entlang von Toneinschlüssen und oberflächenparallele Ausrichtung linsenförmiger Poren und Risse im mikroskopischen Bereich. Damit entsprechen die Ziegel der Burg Stargard dem von anderen norddeutschen Ziegelbauten bekannten Erscheinungsbild mittelalterlicher Ziegel.

Nach Ansicht von /Franke, 1991/ tritt Materialversagen im Ziegel bevorzugt entlang fertigungsbedingter Schwachstellen bzw. Störzonen auf.

Einfluß auf die Schäden haben auch die dünnen Gipskrusten bzw. Gipsanreicherungen im oberflächennahen Porenraum. Typisch hierbei ist die Entstehung dünner, (vergipster) Schalen. Hinter diesen Schalen sind häufig Lockerzonen bzw. mehrere weitere dünne Schalen vorhanden. Der Gips konzentriert sich im ersten mm des Ziegels, tiefer liegende Schalenzwischenräume oder Risse sind fast immer gipsfrei. Aus den mikroskopischen Untersuchungen kann geschlossen werden, daß Gipsbildung als ein sekundärer Prozeß bei der Schadensentstehung anzusehen ist. Primäre Schadensursache ist mit hoher Wahrscheinlichkeit Frostsprengung.

Die mikroskopisch nachweisbare Schädigungstiefe (Risse und Schalen) beträgt meist nur wenige mm, an einer Probe jedoch 1,5 cm.

Nach Erkenntnissen von /Franke und Bentrup, 1993/ unterliegen Ziegel bei natürlicher Frostbelastung einer Ermüdung infolge Schadensakkumulation. Das bedeutet mit Blick auf die Eigenschaften (Kennwerte) der mittelalterlichen Ziegel der Burg Stargard, daß mit Vorschädigungen auch an visuell intakten Ziegeln gerechnet werden muß.

Der Einfluß der Ziegel auf die großflächige Ablösung der mittelalterlichen Putze vom Mauerwerk ist noch nicht ausreichend geklärt. Hygrische Dehnungen im Ziegel spielen wahrscheinlich keine entscheidende Rolle.

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluß der Saugfähigkeit des Untergrundes (w-Werte, Saugspannung der Ziegel) und der handwerklichen Aspekte des Putzantrages (Vornässen, Frischmörteleigenschaften etc.) sind hierzu erforderlich.

5.2. Putze und Mörtel

Untersucht wurden der mittelalterliche Putz der Wappenfrieze, der mittelalterliche Mauermörtel, der spätmittelalterliche Schalenmörtel sowie der Mauermörtel und die Überputzungen der Renaissance.

Es handelt sich in fast allen Fällen um Luftkalkmörtel, wobei Bindemittel und Zuschlag sehr wahrscheinlich aus lokalen Vorkommen stammen (Wiesenkalk bzw. ungewaschene, glaziale Sande).

Die Putze und Mauermörtel weisen Zuschlagkörnungen im Bereich 0-2 mm mit einem geringen Überkorn bis 4 mm auf. Bereits über die Sieblinien können Gruppen unterschieden werden. Der Kornaufbau des Renaissance-Mauermörtels und -Putzes ist etwa gleich und gegen die mittelalterlichen Mörtel klar abgrenzbar. Die Sieblinien der mittelalterlichen Putze, des mittelalterlichen Mauermörtels und des spätmittelalterlichen Schalenmörtels unterscheiden sich voneinander.

Ähnliche Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede treten auch in den Bindemittel-Zuschlag-Verhältnissen auf:

Mittelalterliche Putze:	1 : 2
Mittelalterlicher Mauermörtel:	1 : 3
Renaissance-Putze:	1 : 1,6
Renaissance-Mauermörtel:	1 : 1,7
Spätmittelalterlicher Schalenmörtel:	1 : 0,8

Die in den chemischen Analysen nachgewiesenen geringen Gehalte an löslicher Kieselsäure liegen in Größenordnungen, die für das nördliche Brandenburg als charakteristisch angesehen werden /Wens, 1998/. Sie stammen in den meisten Fällen aus bestimmten Bestandteilen des Bindemittels und möglicherweise auch aus Verunreinigungen des Zuschlags.

Die ermittelten Druckfestigkeiten der Putze sind überwiegend gering (0,3 bis 1,5 N/mm²). Eine Ausnahme bildet der spätmittelalterliche Schalenmörtel mit deutlich höheren Werten (6,9 N/mm²). Entgegen bisherigen Auffassungen /Schlütter, 1998/ sind hierfür wahrscheinlich auch hydraulische Bindemittelanteile verantwortlich.

Tendenziell wurden die niedrigsten Druckfestigkeiten an den stark geschädigten Renaissance-Putzen ermittelt, was über ihren schlechten Erhaltungszustand erklärt werden kann (s.u.).

Die ermittelten Kennwerte (Rohdichte, Offene Porosität, Frei Wasseraufnahme, w-Werte, Sorptionsfeuchten, Trocknungsverhalten) konnten praktisch nicht für die Erklärung der unterschiedlichen Erhaltungszustände der mittelalterlichen Putze und der Renaissance-Putze herangezogen werden. Das liegt vor allem daran, daß nur sehr kleine Proben zur Verfügung standen, die teilweise in einem sehr schlechten Erhaltungszustand waren (Krusten, Risse etc.). Weiterhin haben die mikroskopischen Untersuchungen gezeigt, daß Fundstücke (Streufunde) nur bedingt repräsentativ sind. Das hat anfänglich zu einer Fehleinschätzung der Gipsbelastung geführt.

Hinsichtlich der Zustandsbeschreibung und der Ableitung konservatorischer Ansätze waren an den Putzen und Mörteln die mikroskopischen Untersuchungen von großem Nutzen:

Die Renaissance-Putze sind sehr dünn (5 bis 10 mm) und durch ein verzweigtes Rißsystem über die gesamte Putzstärke gekennzeichnet. Die Risse sind gipsfrei. Demgegenüber ist an den Putzoberflächen das calcitische Bindemittel in Gips umgewandelt, es haben sich Gipskrusten gebildet.

Falls die stark geschädigten Renaissanceputze erhalten werden sollen, ist eine strukturelle Festigung des Gefüges erforderlich. Die bisherigen konservatorischen Ansätze (Feinschlämme bzw. Kalkmilch/Feinputz) haben nur zu einer Oberflächenkonsolidierung ohne erkennbare Tiefenwirkung geführt.

Die mittelalterlichen Putze als Träger der Wappenfriese und der Farbornamente zeigen ein deutlich anderes Schadensbild. Es sind zwei große Problemfelder zu unterscheiden:

- I. Die großflächige Ablösung vom Ziegelmauerwerk. Die Rückseiten der Putzschalen zeigen calcitische Versinterungen oder dünne Gipskrusten. Bereichsweise treten Risse parallel zur Ablösungsfläche auf.
- II. Von größerer Bedeutung hinsichtlich einer Konservierung sind die Oberflächenveränderungen. An den Oberflächen des mittelalterlichen Putzmörtels sind durch Umlagerungsprozesse und chemische Umwandlung des calcitischen Bindemittels Gips-Sinterkrusten entstanden. Häufig liegen diese dünnen Schichten hohl. Es schließt sich ein poröser Krustenabschnitt an, in dem praktisch keine Gips-Bindemittelmatrix sondern nur punktuelle Kornbindung vorliegt. Die Gips-Sinterschichten sind wahrscheinlich sehr spröde und neigen zum Abplatzen. Die Folge ist das Freilegen der nur schwach gebundenen Zuschläge, die bei geringster Beanspruchung absanden. Die beschriebenen Veränderungen beschränken sich auf einen schmalen Horizont an der Oberfläche bzw. im oberflächennahen Porenraum der Putze, wobei stärker geschädigte Putzoberflächen dickere Gipskrusten aufweisen. In allen Fällen ist die Breite des Schädigungshorizontes kleiner als 1 mm, umfaßt aber die kunsthistorisch wertvollen Malschichten, Kalkungen und Ritzungen.

Das übrige Putzvolumen ist weitgehend intakt. Der Korn-Matrixkontakt ist gut, Risse treten nur vereinzelt auf. Auffällig ist an zahlreichen Proben die sehr dichte Bindemittelmatrix. Das zeigt, daß die mittelalterlichen Putzmörtel durch Rekristallisationen im Bindemittel sehr stark verändert wurden.

Der Schadensmechanismus an den Putzen ist als ein kombinierter Prozeß zu betrachten, wobei folgende Vorgänge einen Beitrag leisten:

- 1) Lösungs- und Umlagerungsprozesse des calcitischen Bindemittels sowie dessen chemische Umwandlung in Gips
- 2) Thermisch-hygrisches Ausdehnungsverhalten der Gipskrusten

Die ermittelten Gipsgehalte liegen zwischen 0,4 und 4,2 M%. Bei diesen integralen Werten über ein Putzschalenstück von einigen Millimetern Dicke ist zu beachten, daß sich der Gips in einer relativ scharf begrenzten Zone an der Oberfläche konzentriert. Dort treten entsprechend höhere Konzentrationen auf.

Eine konservatorische Behandlung der mittelalterlichen Putze muß einerseits eine Anbindung an das Ziegelmauerwerk zum Ziel haben. Andererseits wäre es erstrebenswert, die Spannungen in den Oberflächenzonen abzubauen.

Die konservatorischen Ansätze sollten an Testflächen erprobt und der Erfolg der Maßnahmen naturwissenschaftlich überprüft bzw. nachgewiesen werden.

Quellen:

- Freyburg, Sabine:** Backsteine und Ziegel – Was man aus Kennwerten ableiten kann. Ziegelindustrie International, 12 (1996)
- Freyburg, Sabine:** Qualitätsmerkmale historischer Ziegel. Ziegelindustrie International, 7 (1997)
- Franke, L.; Bentrup, H.; Schumann, I.:** Ursachen der Steinschädigung an historischen Backsteinbauten in Norddeutschland. Vorabdruck einer Publikation, 1991
- Franke, L.; Bentrup, H.:** Beurteilung der Frostwiderstandsfähigkeit von Ziegeln im Hinblick auf lange Lebensdauer. Ziegelindustrie International, Teil 1: 7-8 (1993); Teil 2: 9 (1993)
- Knöfel, D.:** Alte und neue Mörtel. Materialkundliche Untersuchungen und Empfehlungen für Instandsetzungsmörtel. Internationale Tagung des SFB 315 an der Universität Karlsruhe, 18.-21.10.1989
- Schäfer, J.; Hilsdorf, H. K.:** Historische Kalkmörtel und ihr Ersatz – Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Zusammensetzung, Struktur und Eigenschaften. In: Tagungsbericht des 3. Internationalen Kolloquiums zum Thema Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Esslingen, 1993
- Schlütter, F.; Juling, H.; Blaschke, R.:** Zerstörungsarme Untersuchungen an Kalkmörteln vor Ort- Erfahrungen mit dem Labormobil. In: Publikationen des EUROLIME-Treffens, Mainz, 1./2. 5. 1998 (Hrsg.: Inst. f. Steinkonservierung e.V., Mainz)
- Wens, Rolf:** Naturwissenschaftliche Untersuchungen an historischen Mörteln und Putzen (Analytik und Porosität). Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege, Nr. 9 (1998)

Anlagen

6.1 Abbildungen (Ziegel und Mörtel)

- Probenentnahmestellen
- PolMi-Aufnahmen
- REM-Aufnahmen
- EDX-Spektren



Abb. 1: Wandpartie des Alten Oberen Tores der Burg Stargard. Unter den glasierten Bögen befinden sich mittelalterliche Putze mit Ritzungen, die sogen. Wappenfrieze. Obwohl die glasierten Bögen teilweise abgeschlagen wurden, ist der Putz in einem Fall noch vergleichsweise gut erhalten (s. Abb. 2).



Abb. 2: Detail aus Abb. 1. Mittelalterlicher Putz mit Ritzungen (Wappenschild). Der Putz zeigt zahlreiche Abplatzungen.



Abb. 3: Detail aus Abb. 1. Mittelalterlicher Putz unter einem glasierten Bogen mit Fassungsresten (rot) und Ritzungen. Es sind zahlreiche Abplatzungen vorhanden.



Abb. 4:
Typische Putz- und Ziegelschäden an der N-Blende des Großen Fensters rechts des Alten Oberen Tores



Abb. 5:
Detail aus Abb. 4. Mittelalterlicher Putz mit Fassungs-resten und Ritzungen. Die Ornamente waren von einem dünnen Renaissance-putz überdeckt, dessen Reste im rechten unteren und rechten oberen Bildteil noch zu erkennen sind.



Abb. 6:

Mittelalterlicher Putz mit Renaissanceüberputzung. Die Stärke des Renaissanceputzes ist gering (< 5mm). Die oberflächliche Vergrauung wird durch Gipskrusten hervorgerufen. Die hellen Stellen in der Bildmitte sind frische Abplatzungen des Renaissanceputzes.



Abb. 7:

Kombination von Putz- und Ziegelschäden.

Außerdem treten großflächige Glasur-Abplatzungen auf



Abb. 8:

Detail aus Abb. 4. Der sogenannte Rand-zonenverlust stellt eine der typischen Schadensformen an den Ziegeln des Alten Oberen Tores dar.



Abb. 9:

Ziegelschäden am Alten Oberen Tor der Burg Stargard: Rückwitterung durch Ablösung zahlreicher dünner Schalen bzw. Schalenpakete



Abb. 10:

Ziegelschäden am Alten Oberen Tor der Burg Stargard: Stark geschädigte Ziegel (Alveolarverwitterung) neben intakten Ziegeln.



Abb. 11:

Ziegelschäden am Alten Oberen Tor der Burg Stargard: Inhomogene Ziegel. Reliefartige, geringe Rückwitterung (oben) und Ablösung von Schalen (unten).



Abb. 12:

Entnahmestelle der Ziegelprobe BST Z-1



Abb. 13:

Ziegelprobe BST Z-1



Abb. 14:

Entnahmestelle der Ziegelprobe BST Z-2



Abb. 15:

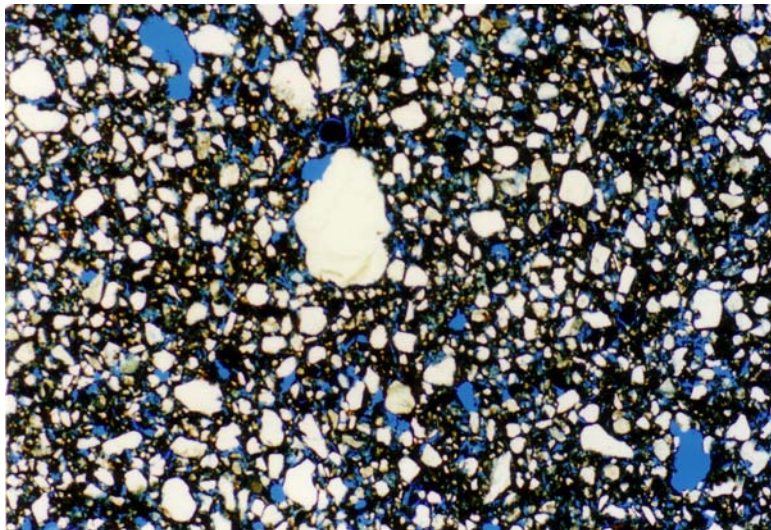
Ziegelprobe BST Z-2



Abb. 16: Entnahmestelle der Ziegelprobe BST Z-3



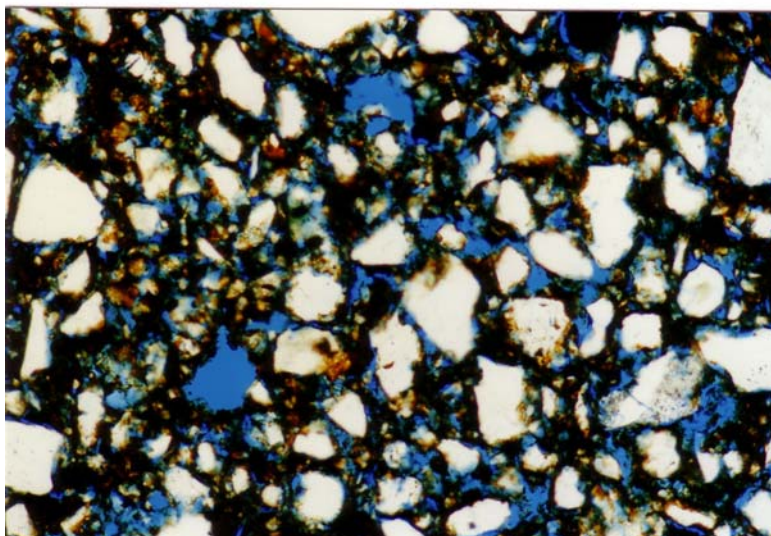
Abb. 17: Ziegelprobe BST Z-3



Probe Z-3

Abb. 18:
Charakteristisches Gefüge in einem homogenen Bereich

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm



Probe Z-3

Abb. 19:
Gefüge bei höherer Vergrößerung.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm



Abb. 20:

Entnahmestelle der Ziegelprobe
BST Z-4



Abb. 21:

Ziegelprobe BST Z-4



Abb. 22:

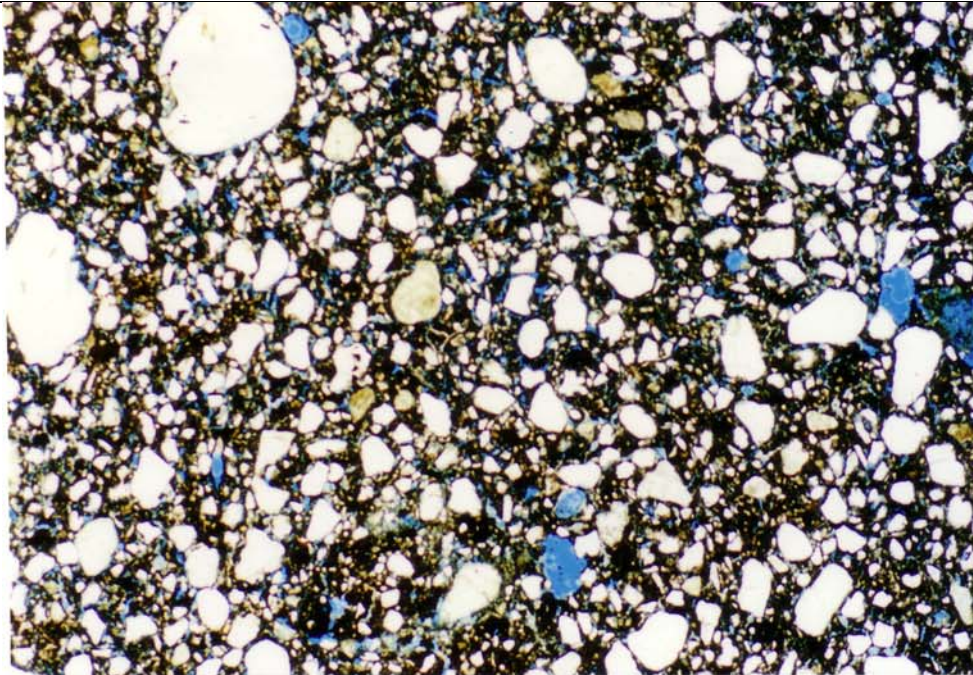
Entnahmestellen der
Ziegelproben
BST Z-5 und Z-6.



Abb. 23: Ziegelprobe BST Z-5



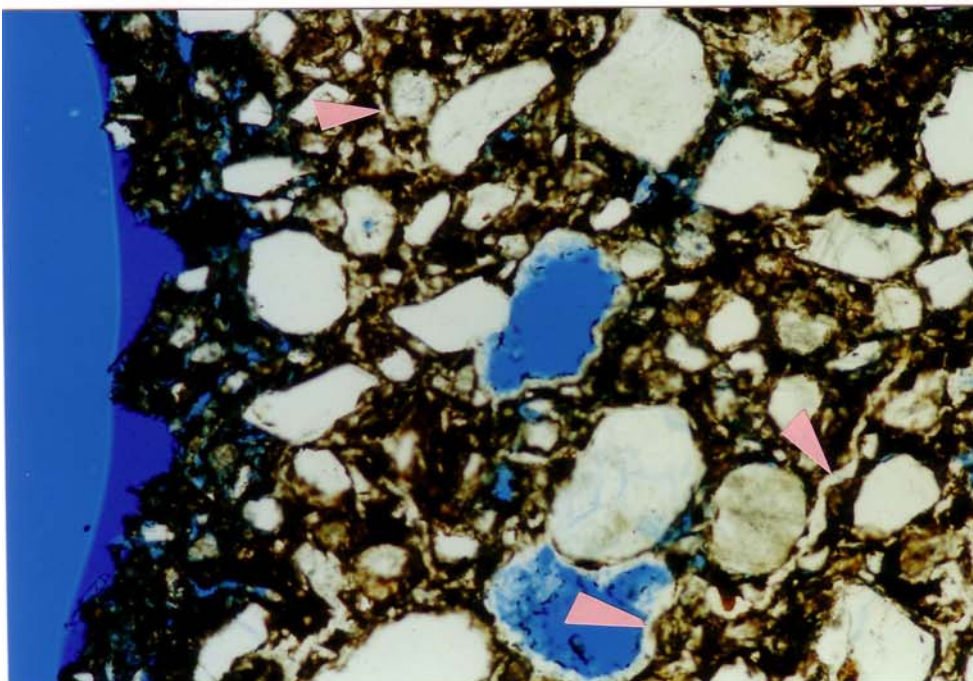
Abb. 24: Ziegelprobe BST Z-6



Probe Z-6

Abb. 25:
Charakteristisches
Gefüge.

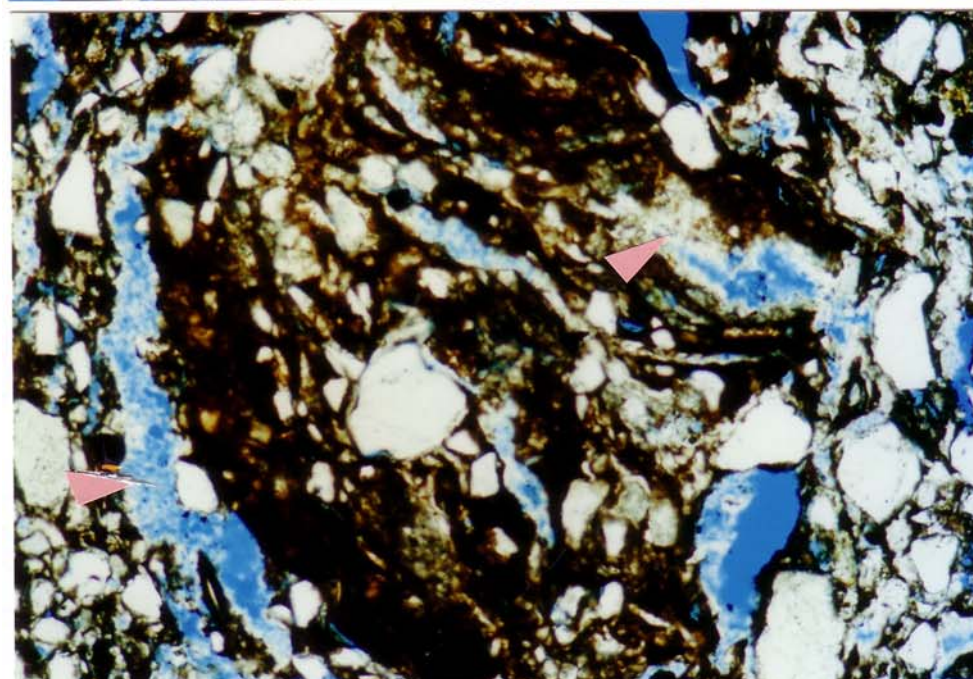
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-6

Abb. 26:
Gips (Pfeile) unter-
halb der Oberfläche
im oberflächennahen
Porenraum.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-6

Abb. 27:
Gips (Pfeile) in den
Brennschwindsäumen
eines Toneinschlusses

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



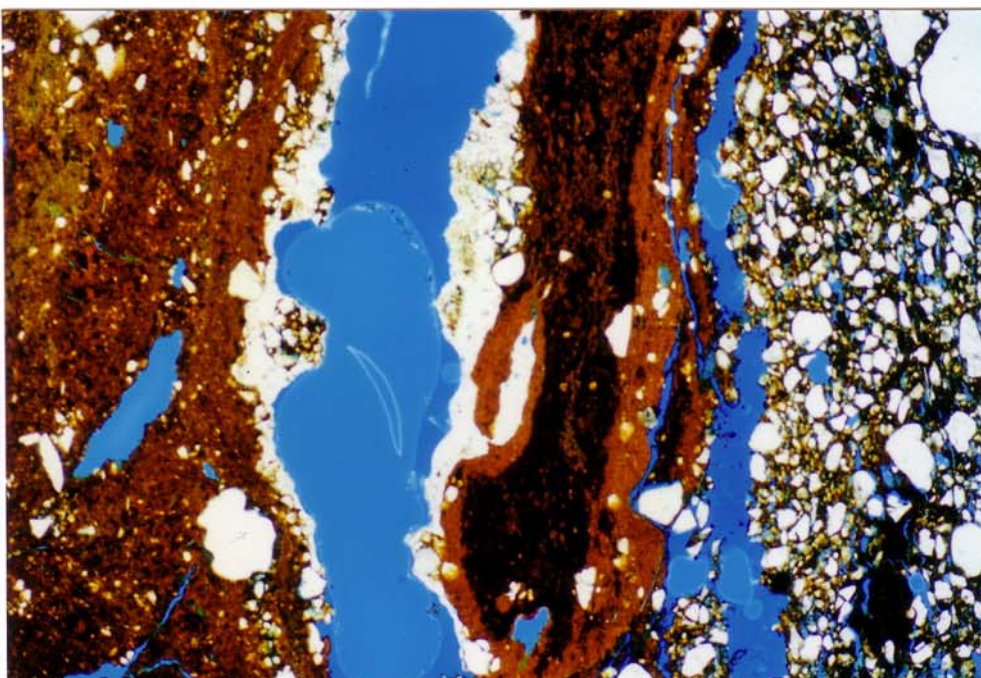
Probe Z-7

Abb. 28:
Entnahmestelle der
Ziegelprobe BST Z-7



Probe Z-7

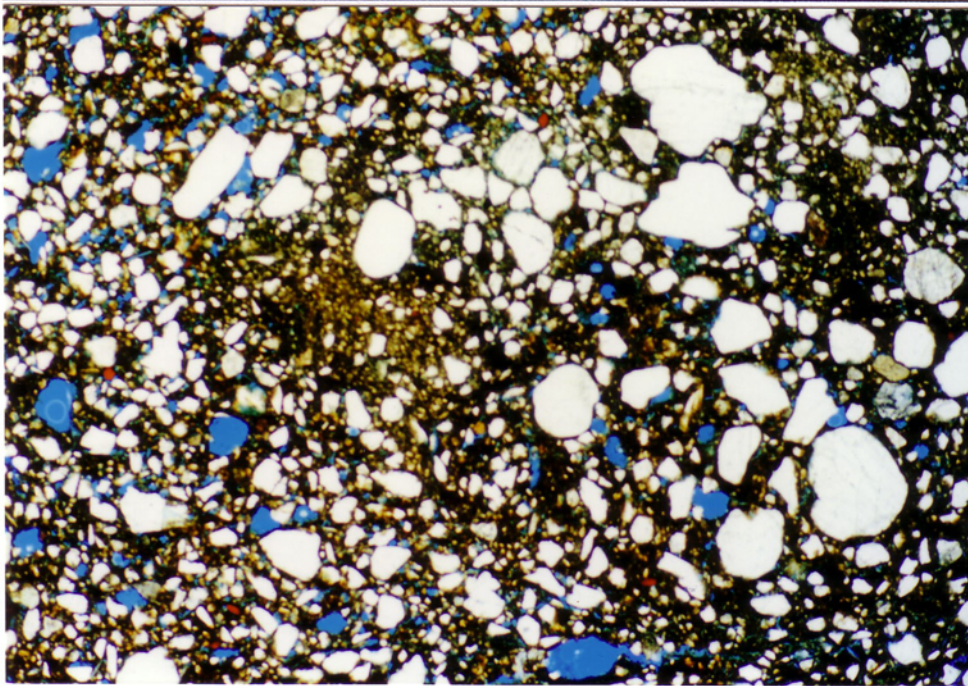
Abb. 29:
Ziegelprobe BST Z-7



Probe Z-7

Abb. 30:
Tonlunker (Bänder)
mit Brennschwind-
säumen.
An den Flanken der
Hohlräume befindet
sich kein Salz bei der
weißen Schicht han-
delt es sich um Sekun-
denkleber (Fixierung
der Lockerzone vor
der Entnahme)

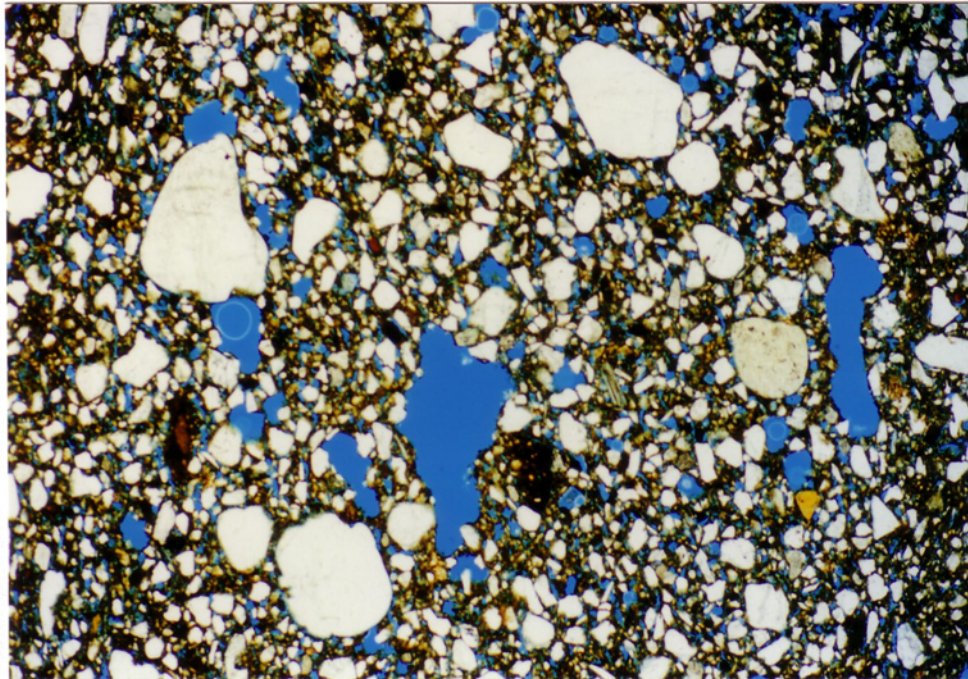
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm



Probe Z-7

Abb. 31:
Charakteristisches
Gefüge.

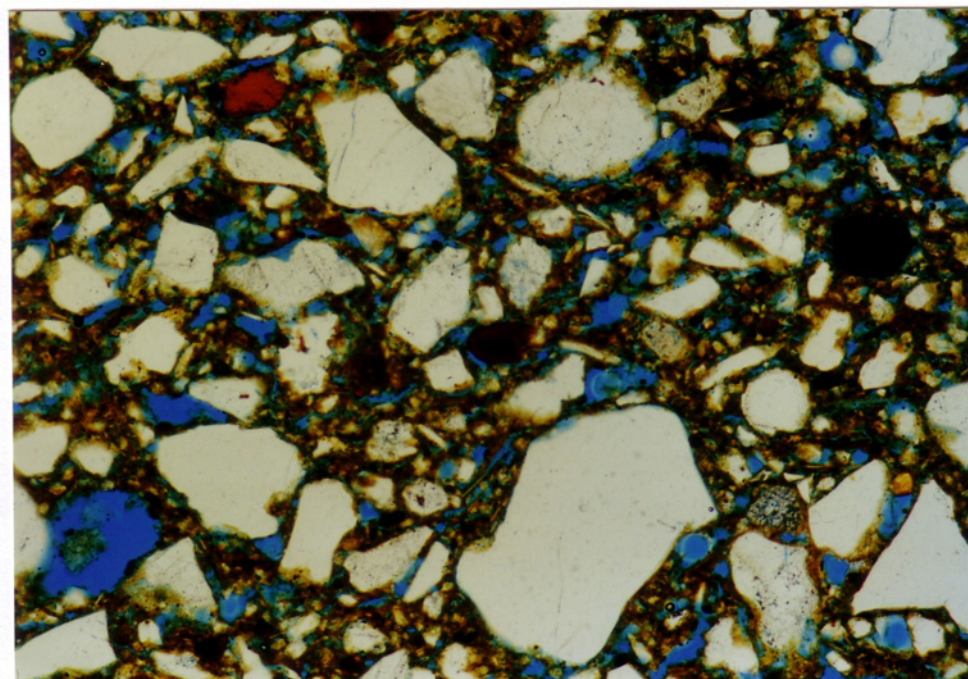
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm



Probe Z-7

Abb. 32:
Charakteristisches
Gefüge mit größeren
Luftporen.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-7

Abb. 33:
Charakteristisches
Gefüge bei höherer
Vergrößerung.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Proben Z-8 und Z-9

Abb. 34:
Entnahmestellen der
Ziegelproben BST Z-8 und Z-9.



Proben Z-8 und Z-9

Abb. 35:
Ziegelproben BST Z-8 und Z-9.



Probe Z-10

Abb. 36:
Entnahmestellen
der Ziegelprobe
BST Z-10



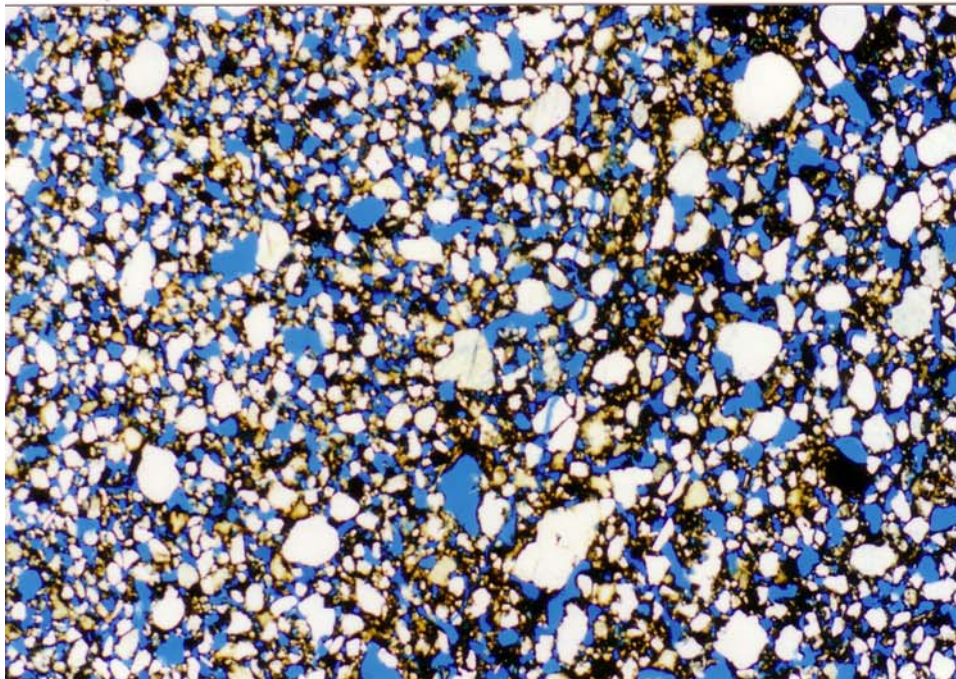
Probe Z-10

Abb. 36:
Ziegelprobe BST Z-10



Probe Z-11

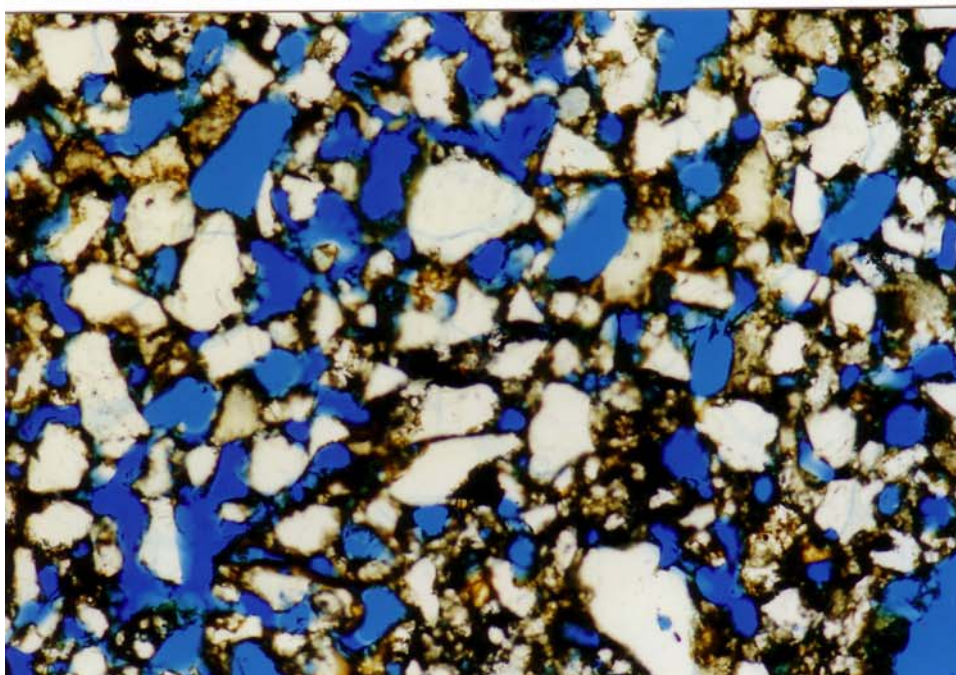
Abb. 37:
Entnahmestelle der
Ziegelprobe BST Z-11



Probe Z-11

Abb. 38:
Charakteristisches, sehr
poröses Gefüge.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-11

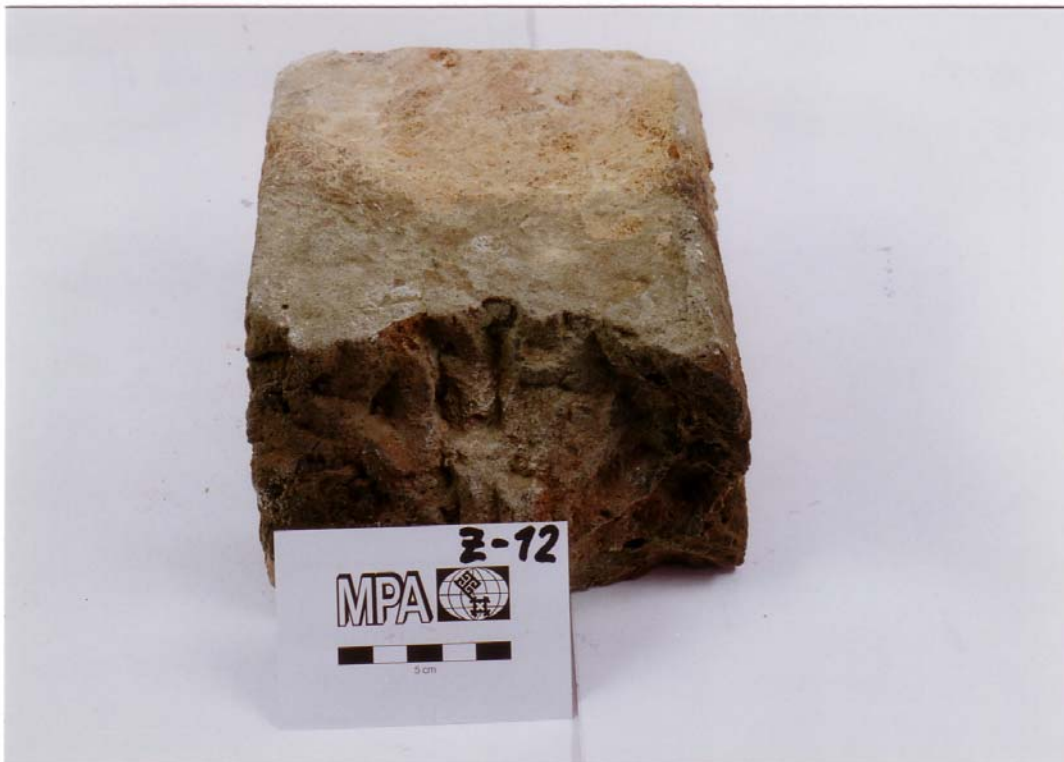
Abb. 39:
Charakteristisches
Gefüge bei höherer
Vergrößerung.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-12

Abb. 40:
Entnahmestellen
der Ziegelprobe
BST Z-12



Probe Z-12

Abb. 41:
Ziegelprobe BST
Z-12



Probe Z-13

Abb. 42:
Ziegelprobe BST
Z-10

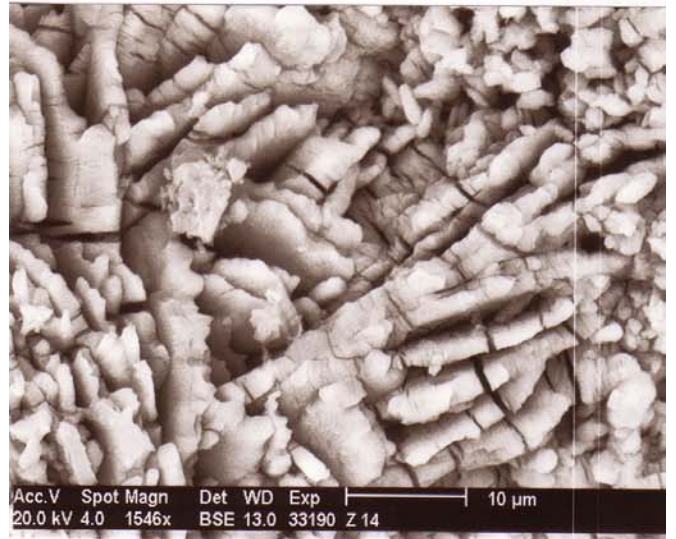
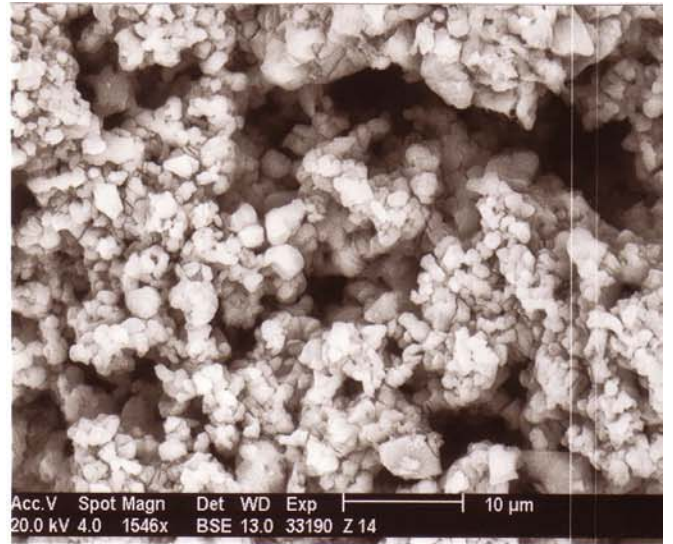


Probe Z-15

Abb. 43:
Entnahmestelle der
Probe BST Z-15:
Gipsusteln



Abb. 44:
Entnahmestellen der Probe Z-14
(weißer Belag auf der
Ziegeloberfläche) und Z-16 (Ziegel-
schale).



26-JAN-99 17:16:00 EDAX READY
RATE= 0CPS TIME= 15LSEC
FS= 326CNT PRST= OFF
S-Z-14: Gips

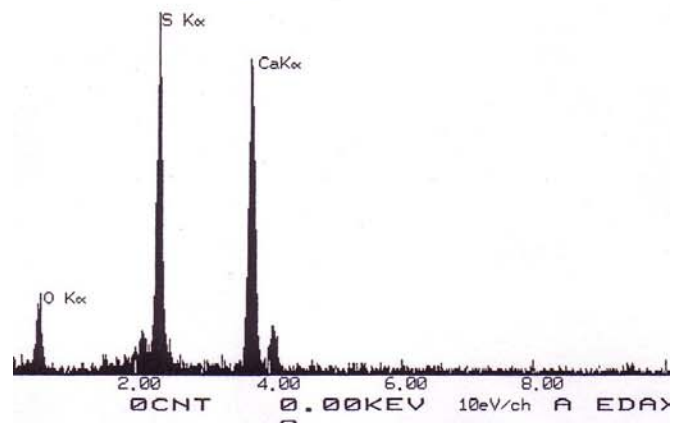
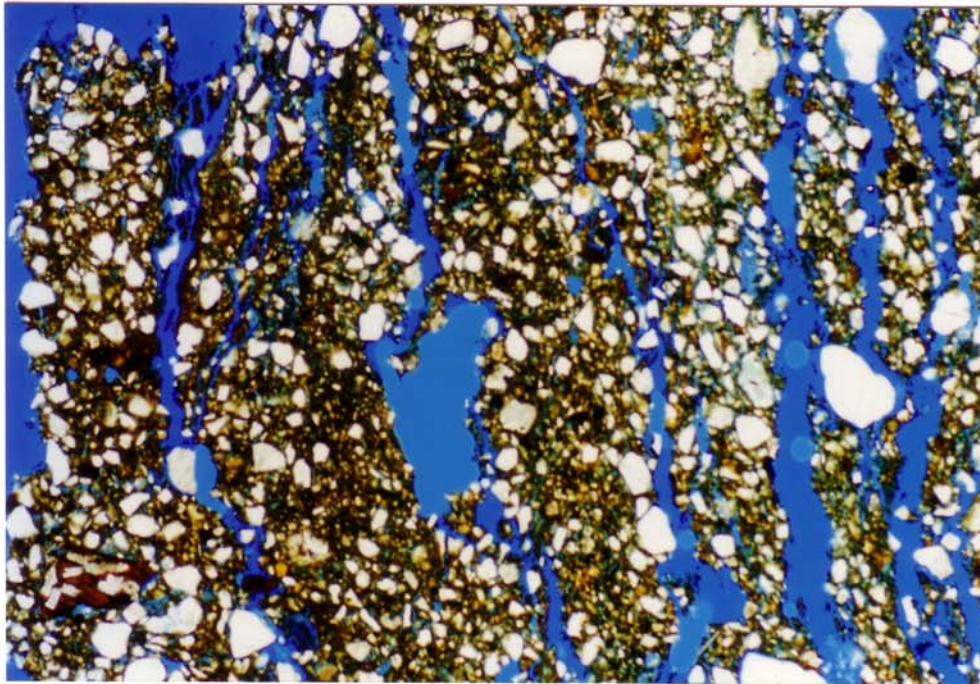


Abb. 45-47:

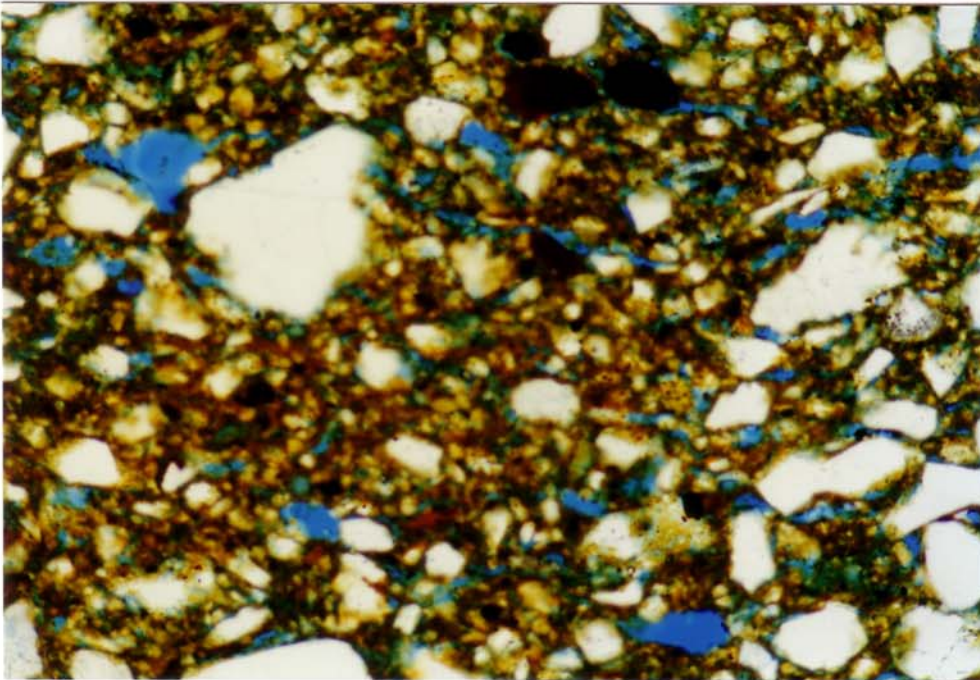
Probe Z-14.
REM-RE-Aufnahmen der
Gipskristalle unterschiedlicher
Morphologien von der Ziegel-
oberfläche und zugehöriges
EDX-Spektrum.



Probe Z-16

Abb. 48:
Schalenbildung (Oberfläche ganz links). Die Schalenzwischenräume sind gipsfrei.

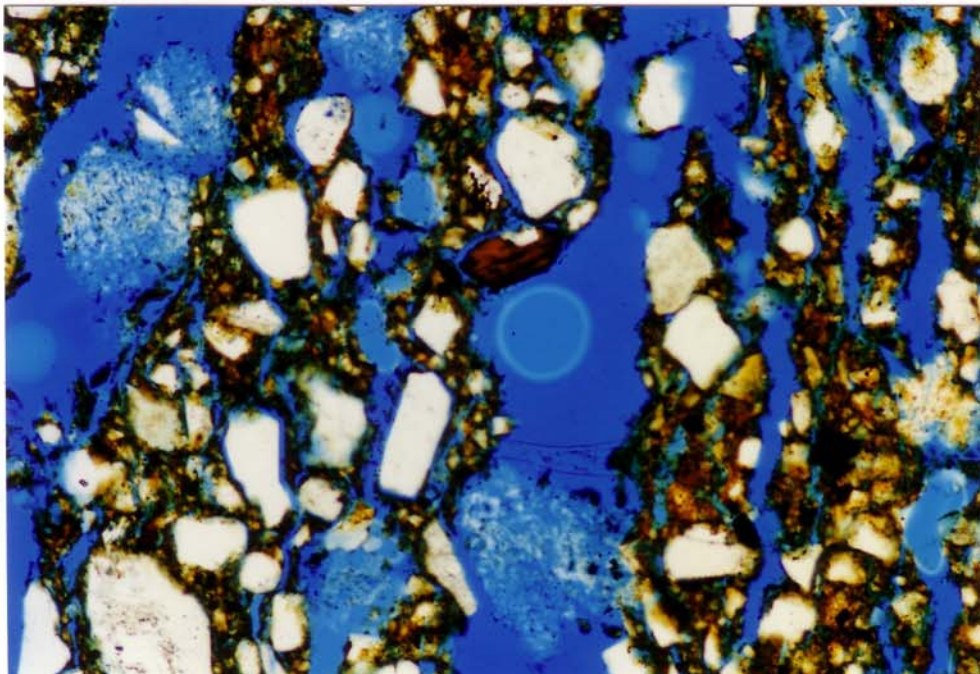
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-16

Abb. 49:
Die oberflächenparallele Orientierung länglicher Poren begünstigt die Schalenbildung.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-16

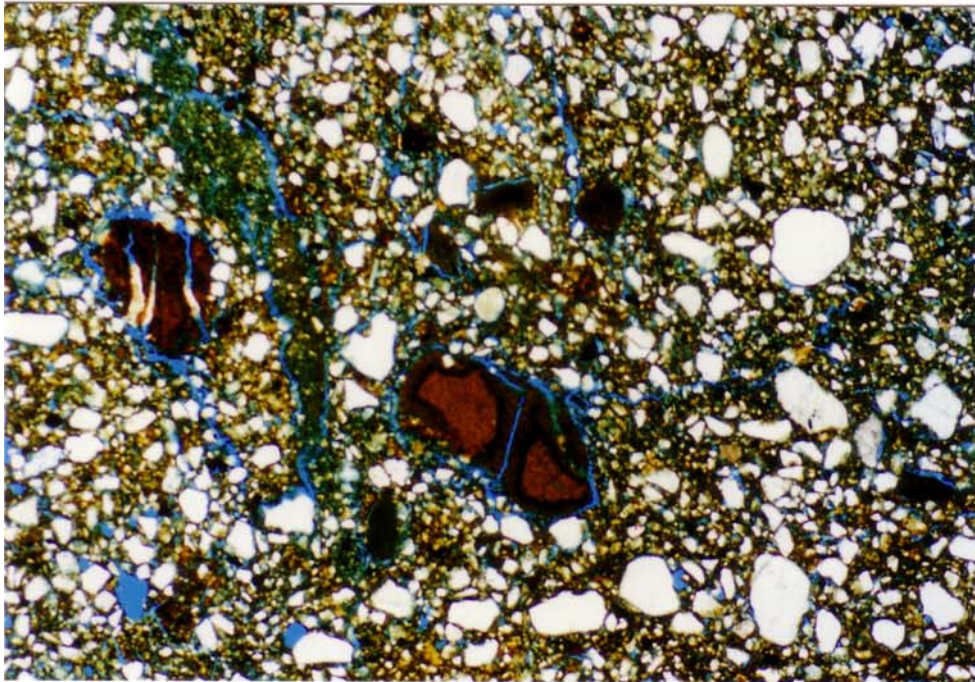
Abb. 50:
Nur vereinzelt ist zwischen den Schalen Gips vorhanden (weiße Wolken).

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-17

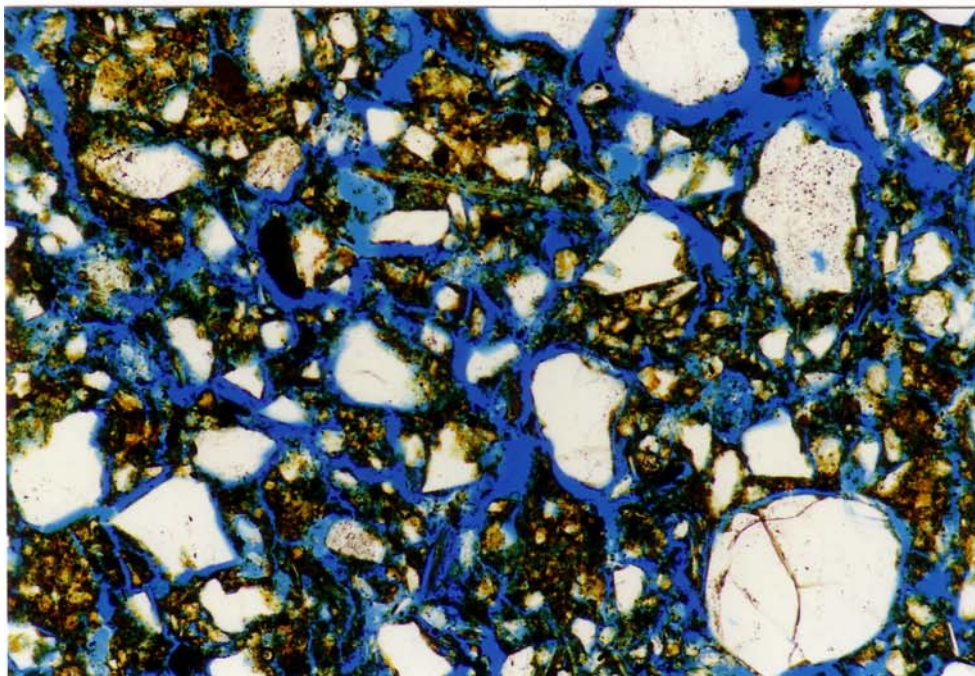
Abb. 51:
Entnahmestelle der
Ziegelprobe BST Z-17



Probe Z-17

Abb. 52:
Charakteristisches,
inhomogenes Gefüge mit
Toneinschlüssen (relativ
intakt) .

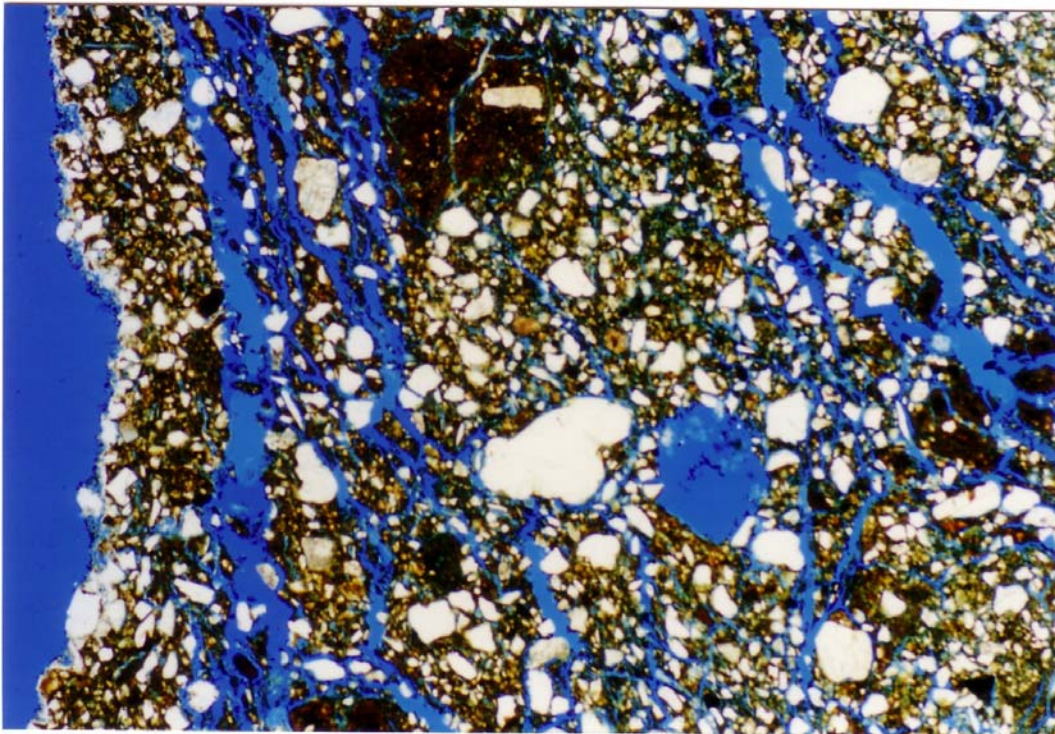
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-17

Abb. 53:
Stark geschädigtes
Gefüge (vollständig
geloockert).

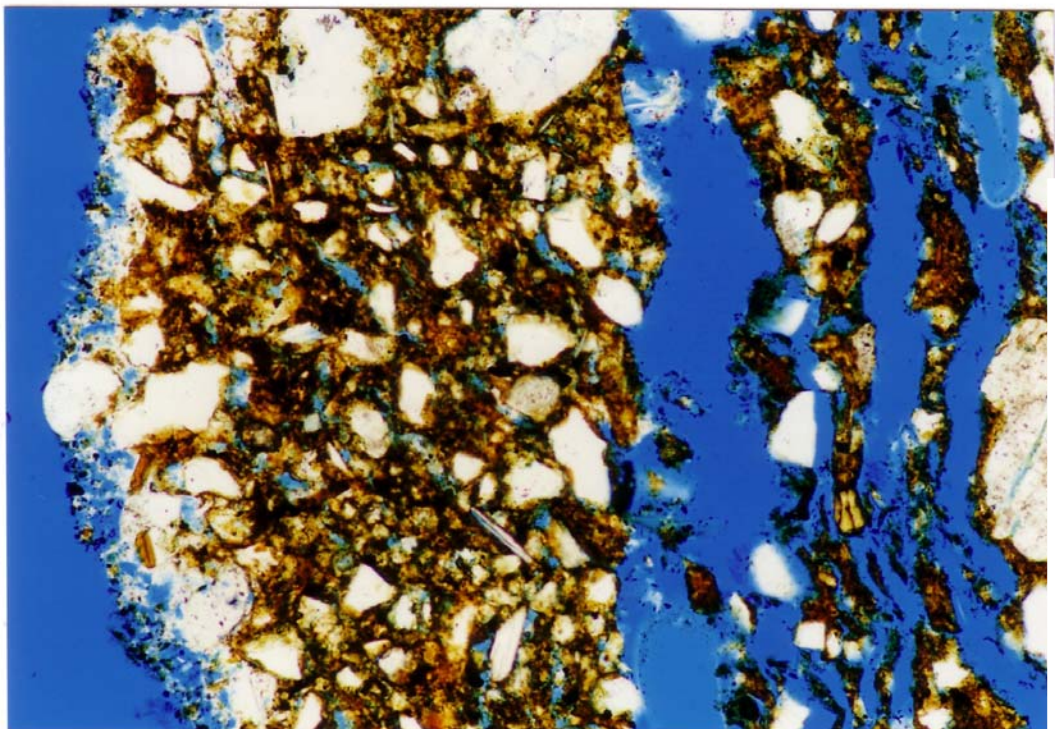
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-17

Abb. 54:
Schalenbildung.
Hinter der Schale ist eine
Lockerungszone
entstanden (Detail s.
Abb. 55)

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2



Probe Z-17

Abb. 55:
Detail aus Abb. 54. An
der Oberfläche (links
im Bild ist eine
Gipskruste vorhanden.
Die Lockerzone hinter
der Schale ist gipsfrei.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm



Probe Z-18

Abb. 56:
Entnahmestelle der
Ziegelprobe BST Z-18:
Schwarze Glasur.

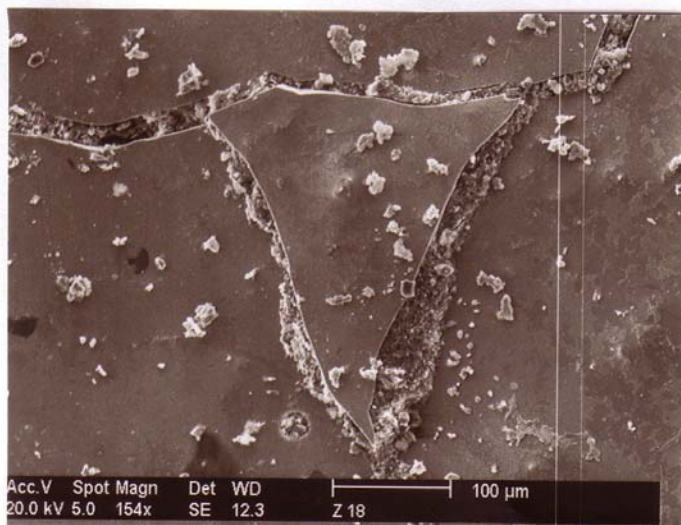


Abb. 57: Glasuroberfläche mit Rissen und auflagernden Partikeln. Das dreieckige Glasurstück ist aus seiner ursprünglichen Lage herausgedrückt.
[REM-SE-Aufnahme]

26-JAN-99 17:19:02 EDAX READY
RATE= 1CPS TIME= 52LSEC
FS= 413CNT PRST= OFF
A -Z-18: Pb-Glasur

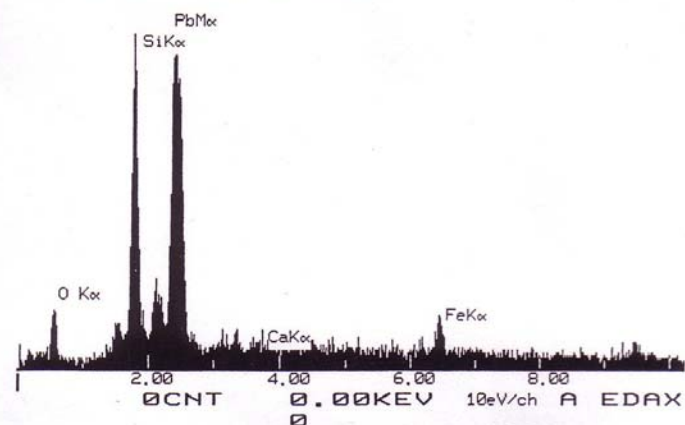


Abb. 58: EDX-
Spektrum der Pb-Fe-Glasur.

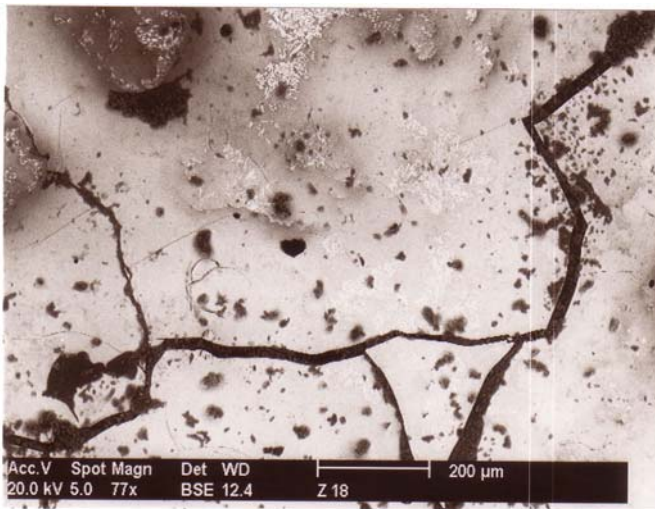


Abb. 59: Glasoberfläche mit Rissen hellen kristallinen Ausscheidungen (obere Bildkante, Mitte).
[REM-RE-Aufnahme]

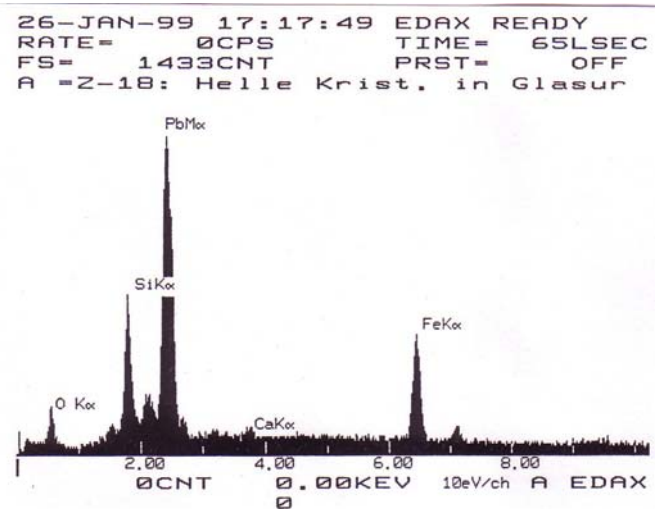


Abb. 60: EDX-Spektrum der hellen Kristalle in Abb. 57: Pb-Fe-Verbindung, vermutlich aus der Glasur stammende Ausscheidung.

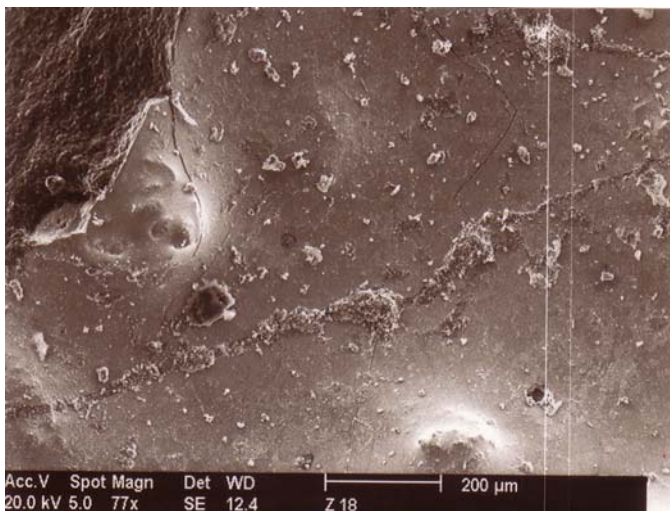


Abb. 61: Glasoberfläche mit auflagernden „Wülsten“.
[REM-SE-Aufnahme]

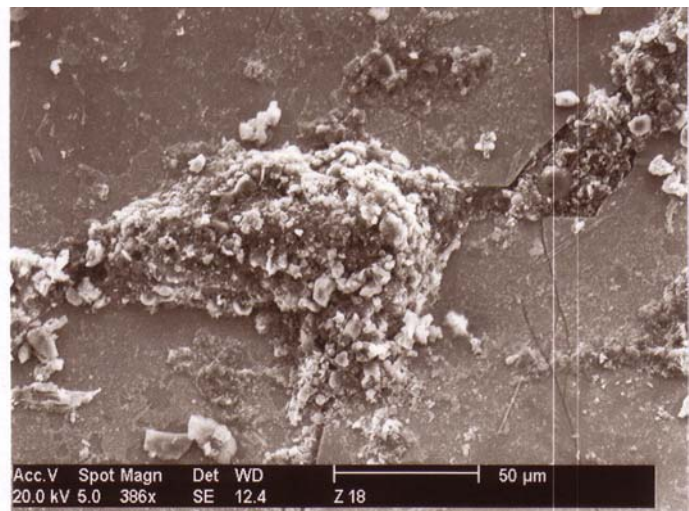


Abb. 62: Detail aus Abb. 61. In ihrer Morphologie und dem EDX-Spektrum handelt es sich hierbei um Ziegelmaterial.
[REM-SE-Aufnahme]



Abb. 63:
Entnahmestellen der Probe Z-19:
Ziegel mit Putzrest

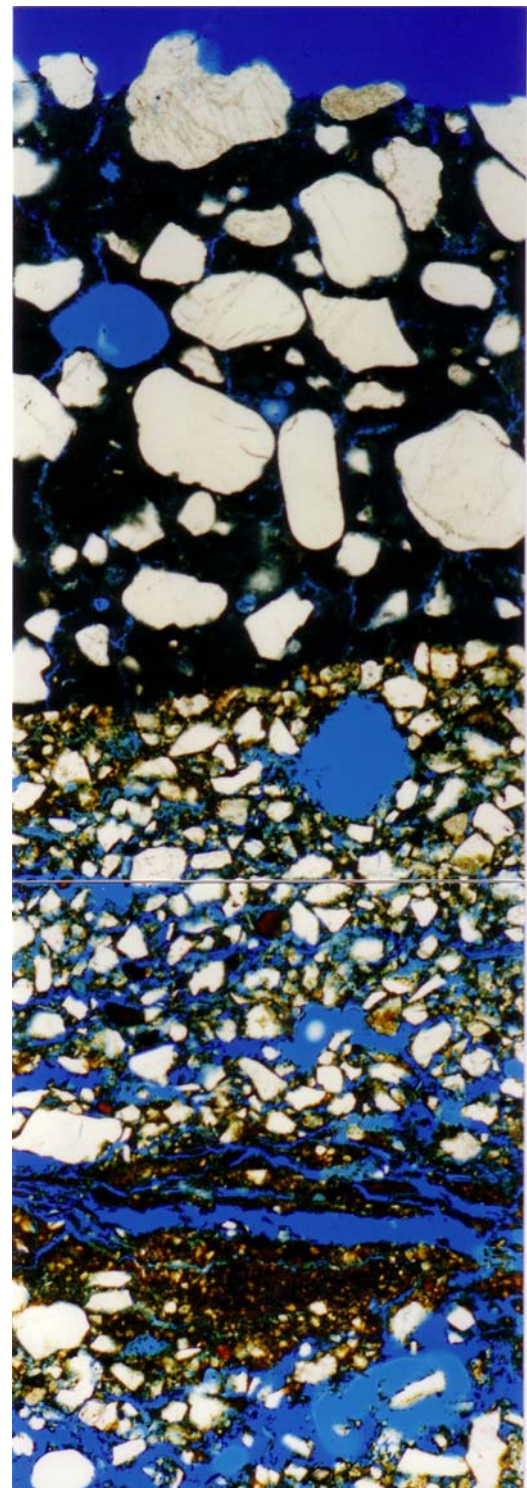
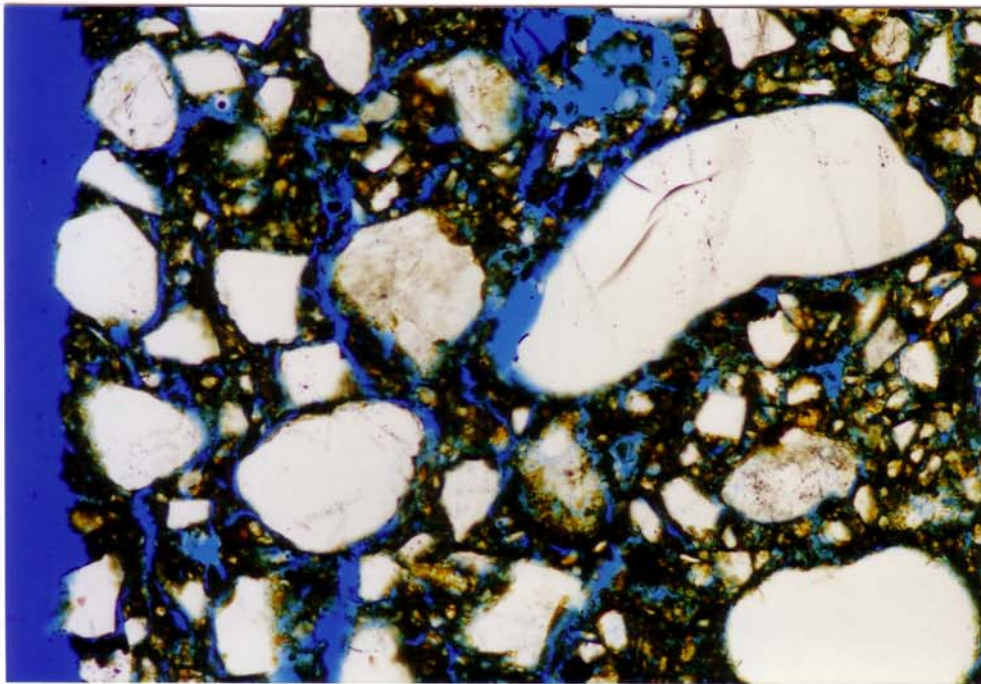


Abb. 64:
Probe Z-19.
Querschnitt über das Probenvolumen.
Die Renaissance-Mörtelschicht weist
zahlreiche feine Risse auf. Der Ziegel
ist unter dem gut haftenden Mörtel
stark geschädigt (Schalenbildung).



Probe Z-20

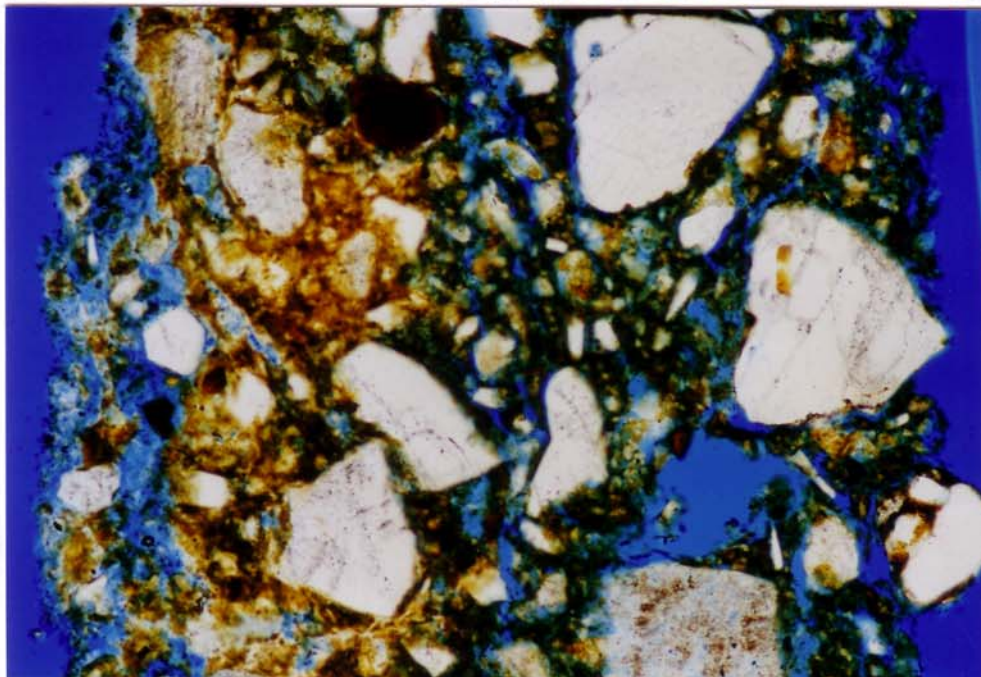
Abb. 65:
Entnahmestelle der
Ziegelprobe BST Z-20:
Gips.



Probe Z-21

Abb. 66:
Starke Gefügeschä-
digung (Lockerung)
ohne Salz (Oberfläche
oder Schalenrückseite)

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm



Probe Z-22

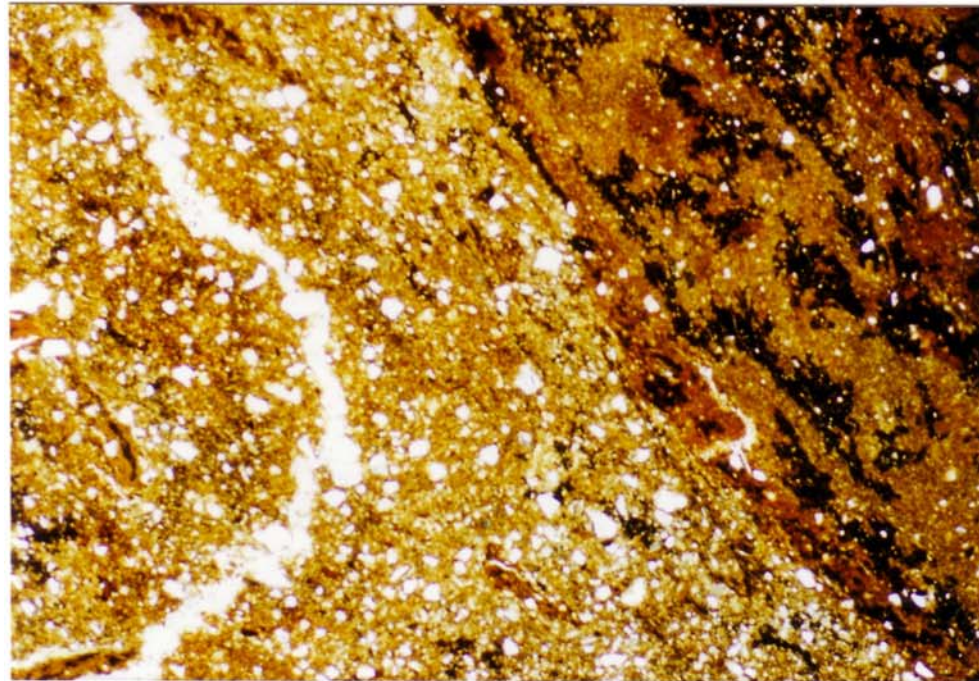
Abb. 67:
Starke Vergipsung des
oberflächennahen
Porenraumes einer
sehr dünnen Schale.

[
/ [PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-23

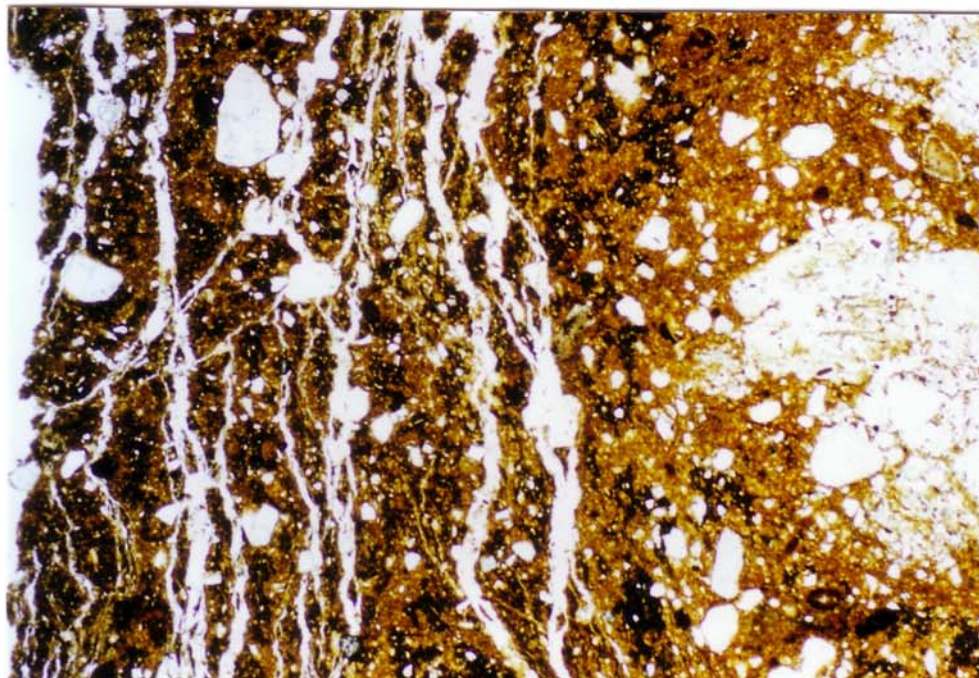
Abb. 68:
Entnahmestelle der
Ziegelprobe BST Z-
23.



Probe Z-23

Abb. 69:
Charakteristisches
Gefüge: tonreicher und
andere Färbung
(unterfeuert)

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-23

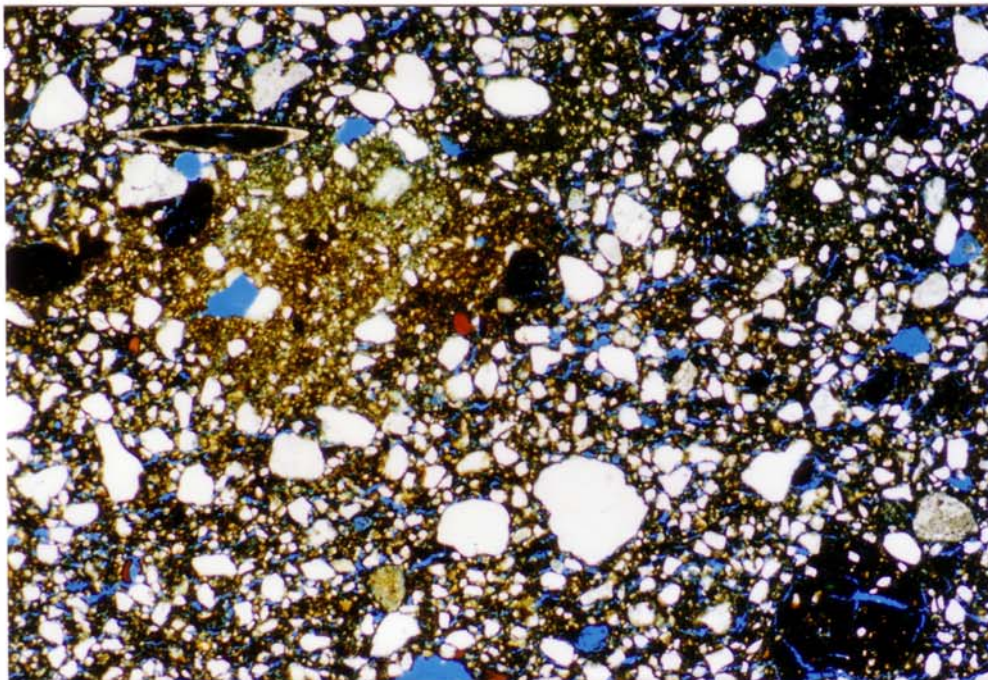
Abb. 70:
Starke Schalenbildung
an der Oberfläche
(kein Gips zwischen
den Schalen).

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-24

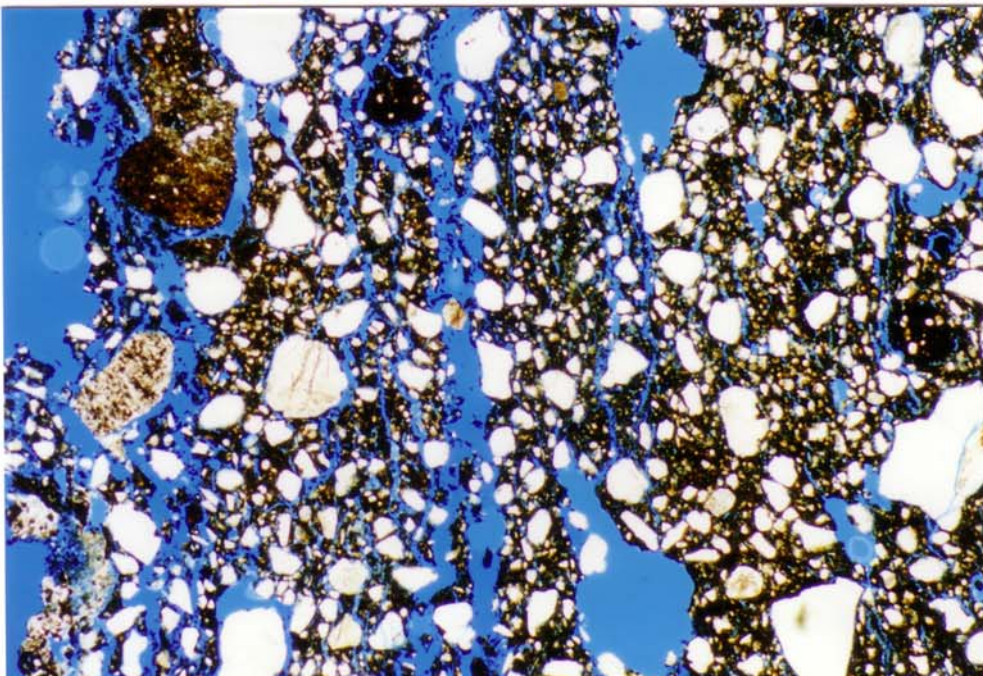
Abb. 71:
Entnahmestelle der
Ziegelprobe BST Z-24



Probe Z-24

Abb. 72:
Charakteristisches,
inhomogenes Gefüge in
einem intakten Bereich.

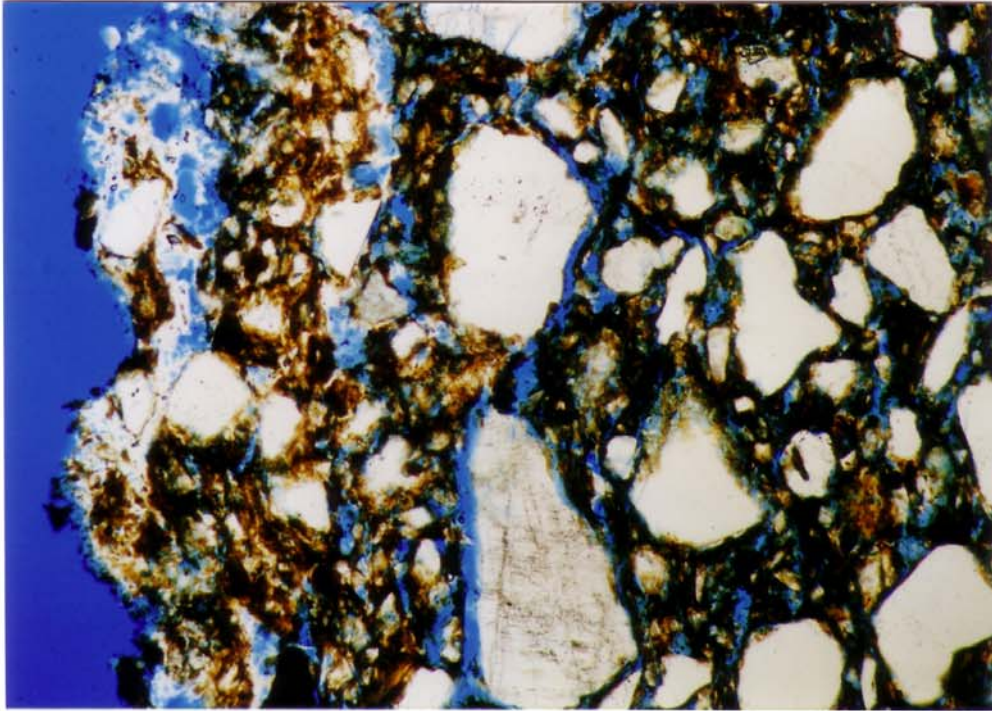
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-24

Abb. 73:
Schalenbildung an der
Oberfläche (kein Gips
zw. den Schalen).

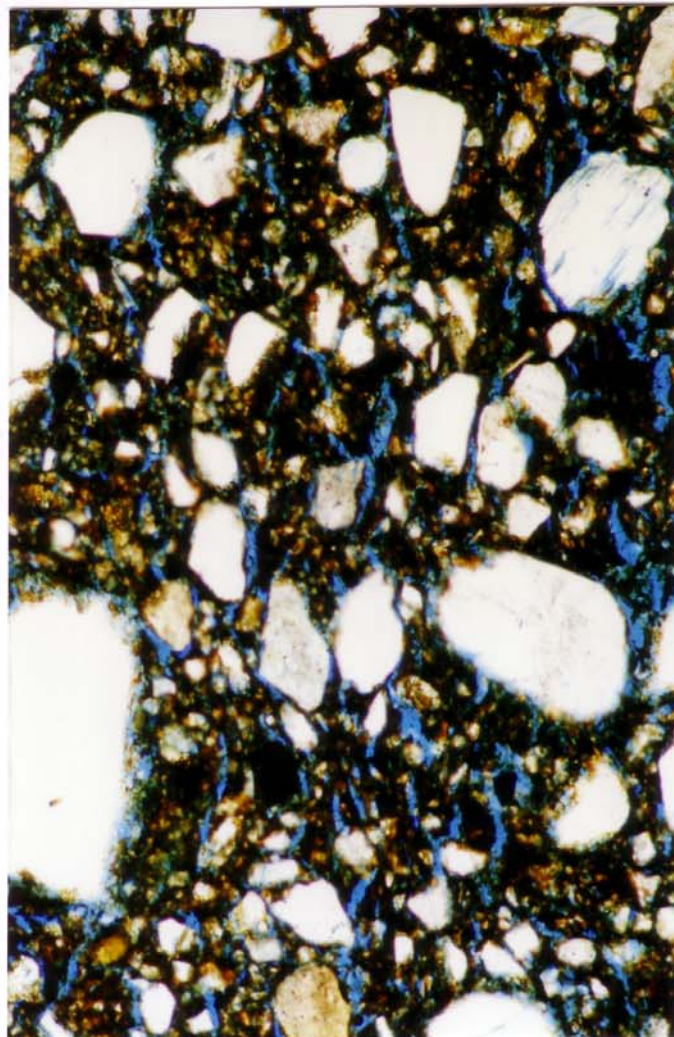
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-24

Abb. 74:
Gips im oberflächen-nahen
Porenraum (linke Bildhälfte,
etwas hellere Matrix)
linke Oberfläche

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-24

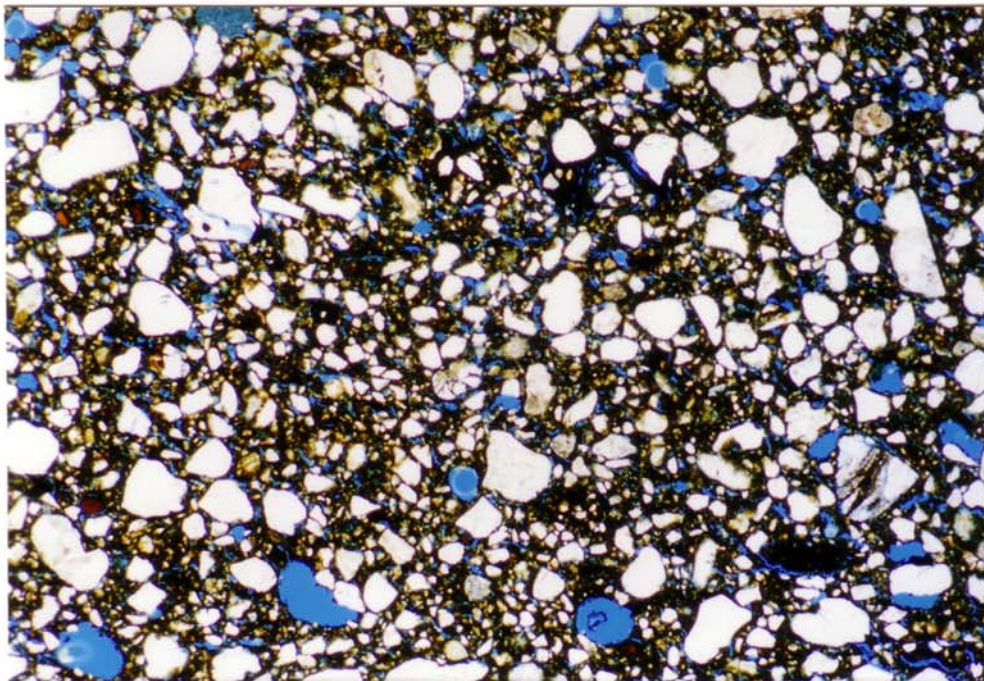
Abb. 75:
Oberflächenparallele
Ausrichtung läng-
licher Poren (gleiche
Orientierung wie in
Abb. 74).

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-25

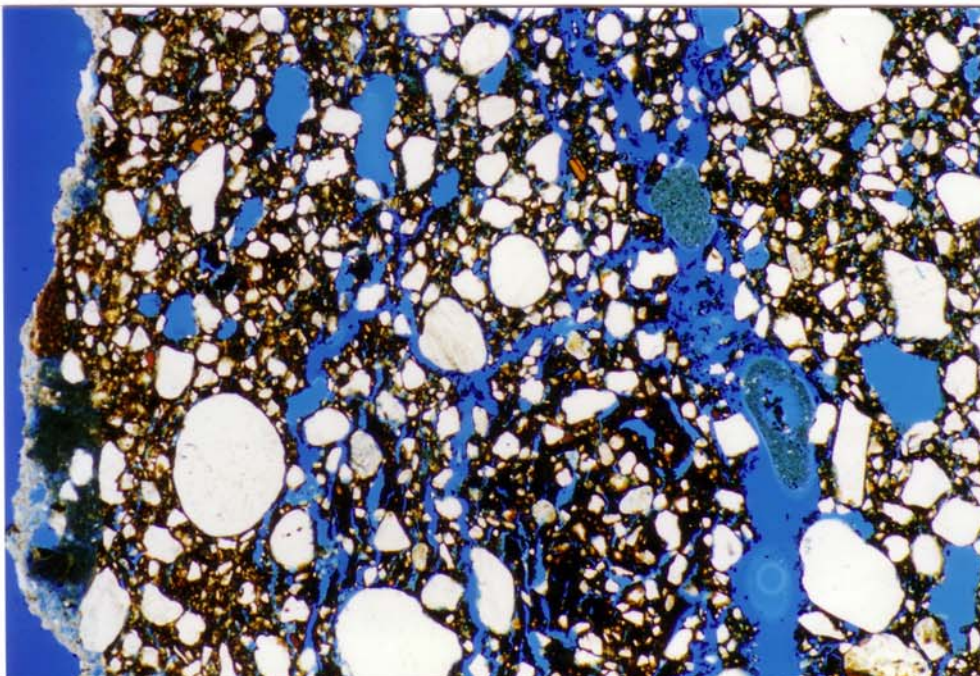
Abb. 76:
Entnahmestelle der
Ziegelprobe BST Z-25



Probe Z-25

Abb. 77:
Charakteristisches,
Gefüge in einem
intakten Bereich.

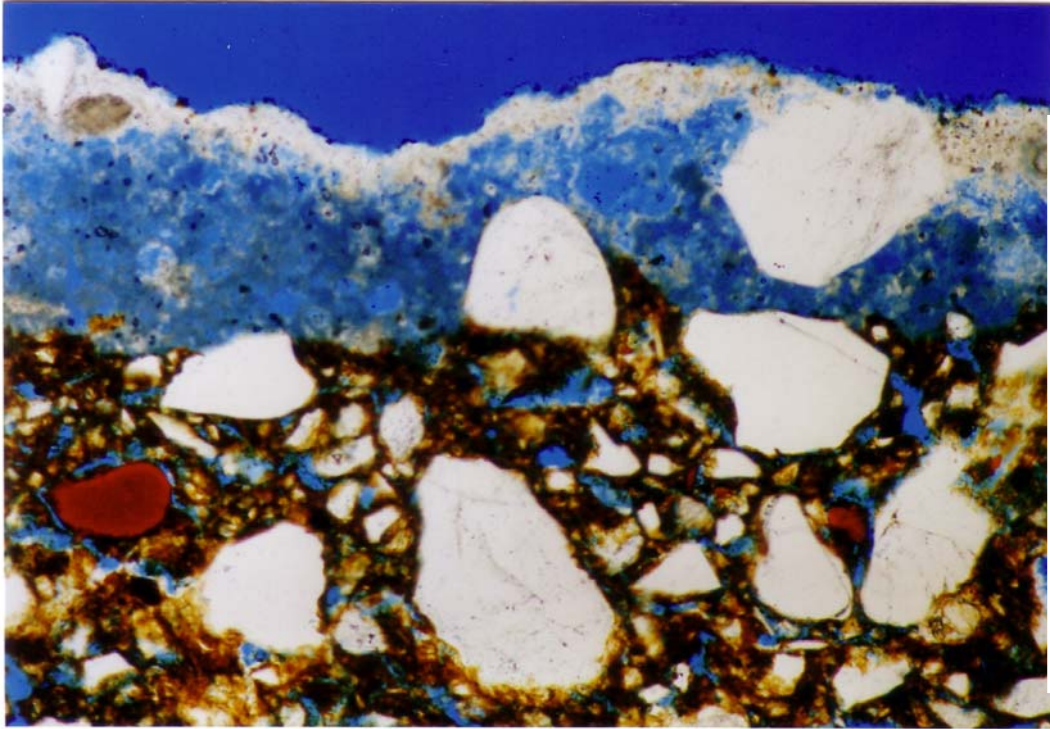
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-25

Abb. 78:
Schalenbildung an der
Oberfläche (kein Gips
zw. den Schalen).
Vergipster Mörtelrest
an der Oberfläche.

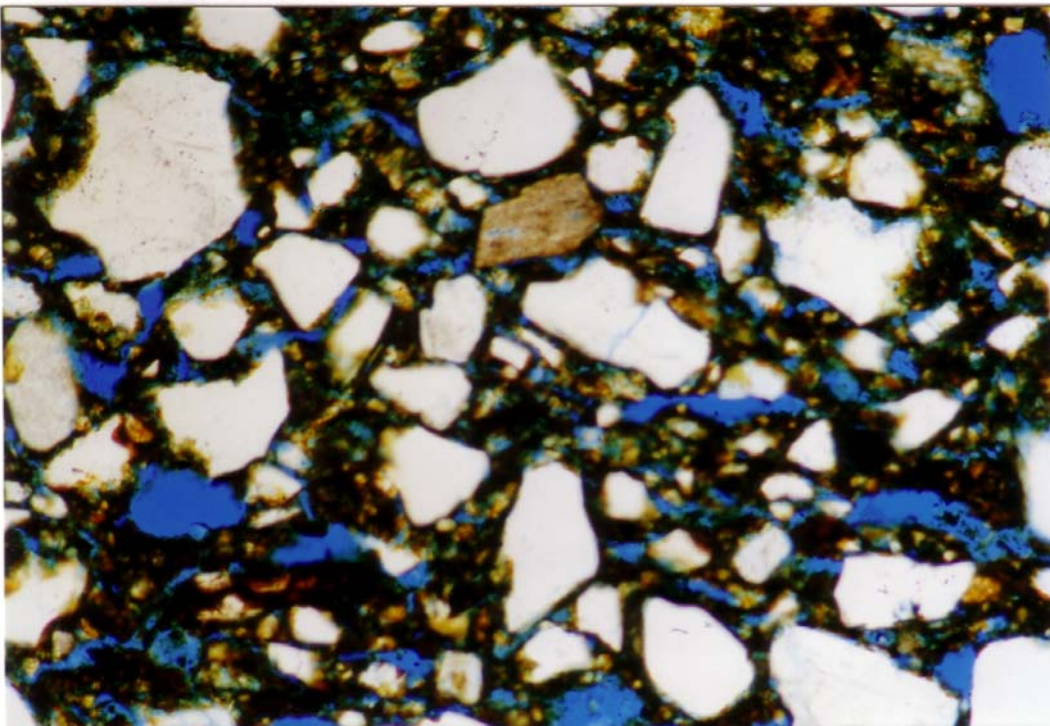
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe Z-25

Abb. 79:
Dünne Mörtelschicht an der Oberfläche. Die Außenseite ist vergipst (weiße, dichte Schicht).

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe Z-25

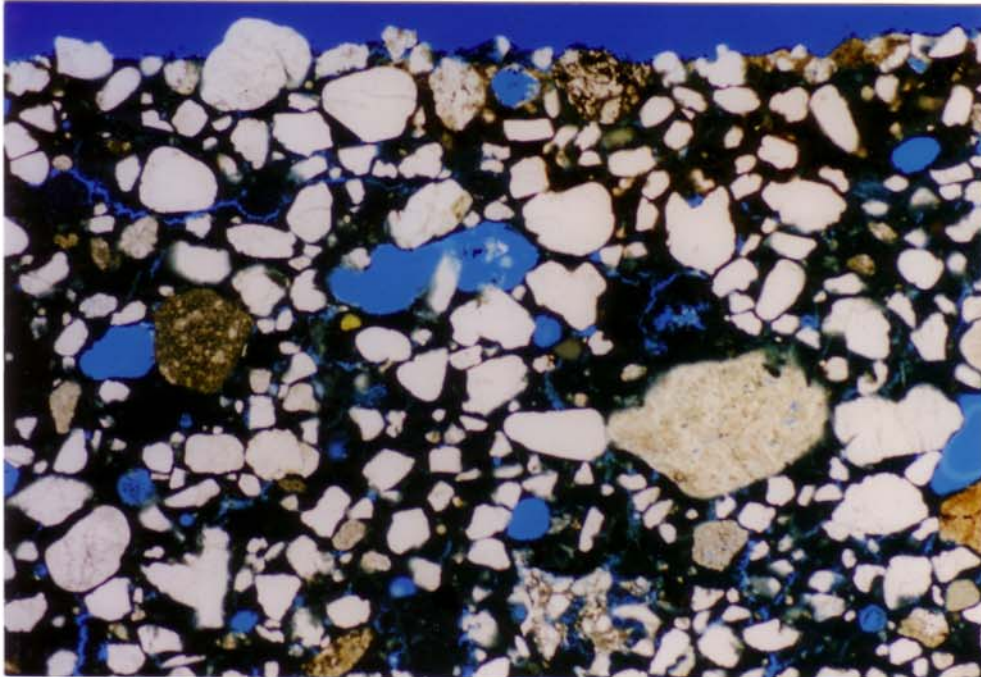
Abb. 80:
Oberflächenparallele Ausrichtung länglicher Poren (gleiche Orientierung wie in Abb. 79).

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M-1

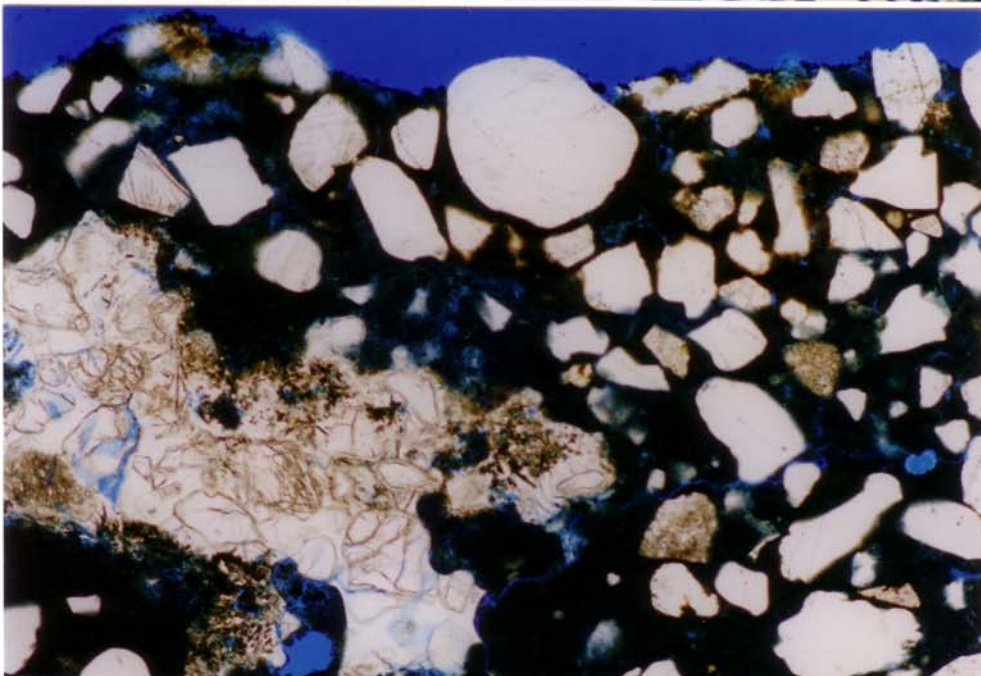
Abb. 81:
Probenstücke, an denen die Kennwert-ermittlungen sowie die chemischen und mikroskopischen Untersuchungen durchgeführt wurden.



Probe M-1

Abb. 82:
Dichtes Gefüge mit Oberfläche. Stellenweise sind Risse im Gefüge vorhanden.

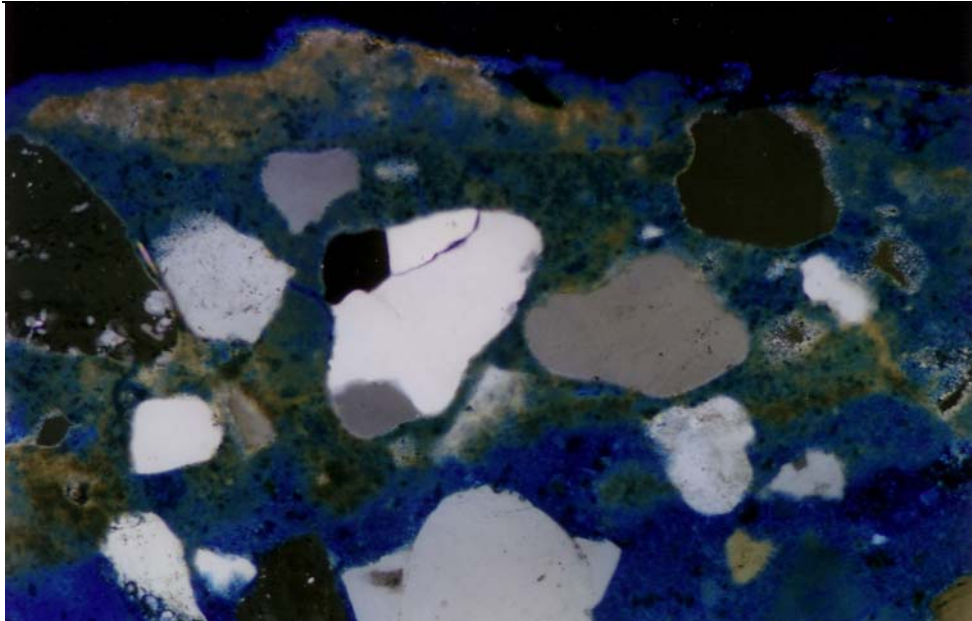
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe M-1

Abb. 83:
Dichtes Gefüge in Oberflächennähe. Im linken Bildteil ist ein Korn zu erkennen, daß aus Quarzkörnern in einer Matrix aus amorphem SiO₂ besteht.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 2,6 mm]



Probe M-1

Abb. 84:
Verdichtung der Oberfläche durch eingewachsene Calcit-sinterschicht.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm

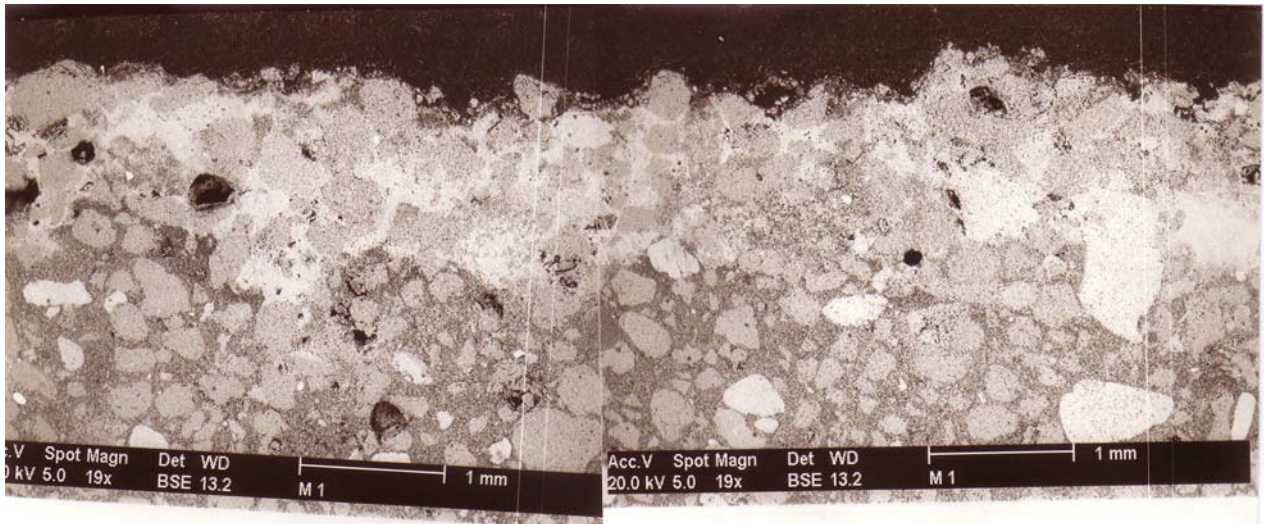


Abb. 85: Probe M-1: Verdichtung der Oberfläche durch Calcitkristallisation im oberflächennahen Porenraum (helles Band) [REM-RE-Aufnahme]

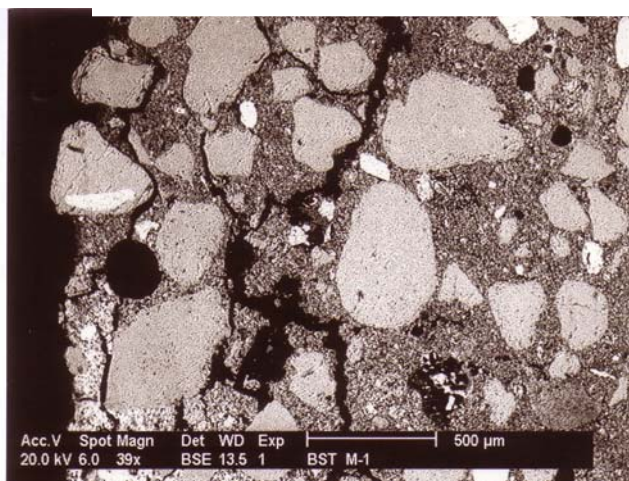


Abb. 86: Probe M-1: Gefügeschäden (Risse) an der Oberfläche. Die Risse sind gipsfrei. [REM-RE-Aufnahme]

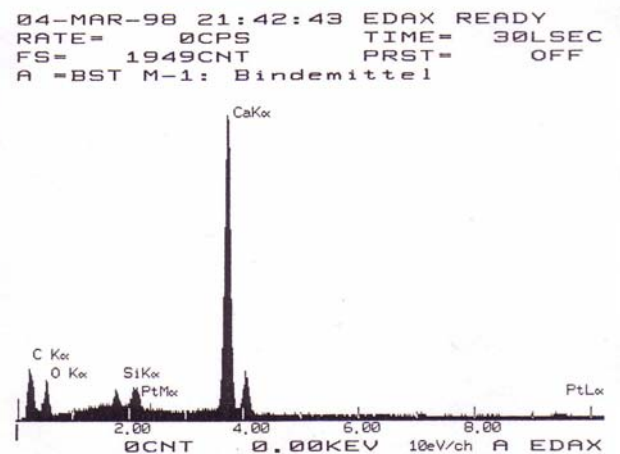
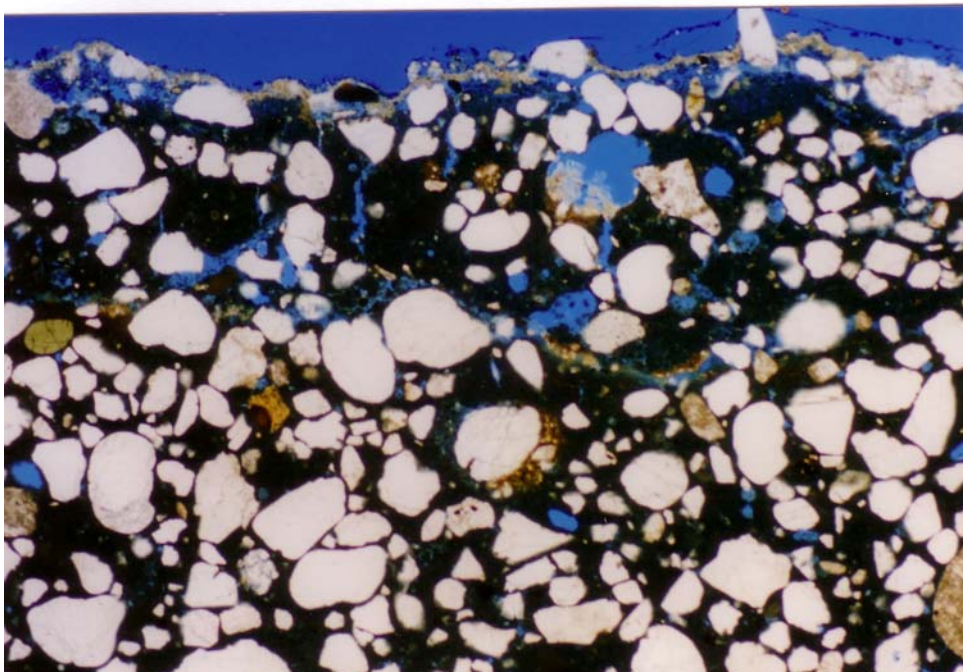


Abb. 87: EDX-Spektrum des Bindemittels: überwiegend Ca, geringe Si-Anteile.



Probe M-2

Abb. 88:
 Probenstücke, an denen die Kennwert-
 ermittlungen sowie die
 chemischen und
 mikroskopischen
 Untersuchungen
 durchgeführt wurden.



Probe M-2

Abb. 89:
 Renaissanceputz (obere
 Bildhälfte) auf
 mittelalterlichem Putz
 (untere Bildhälfte). Im
 Renaissanceputz sind
 zahlreiche Risse sowie eine
 dünne Gipskruste an der
 Oberfläche (helles Band) zu
 erkennen. Weiterhin sind
 Unterschiede im
 Zuschlaggehalt und in den
 Korngrößen zu erkennen.

[PolMi-Aufnahme,
 // Pol.,
 Bildbreite ca. 5,2 mm]

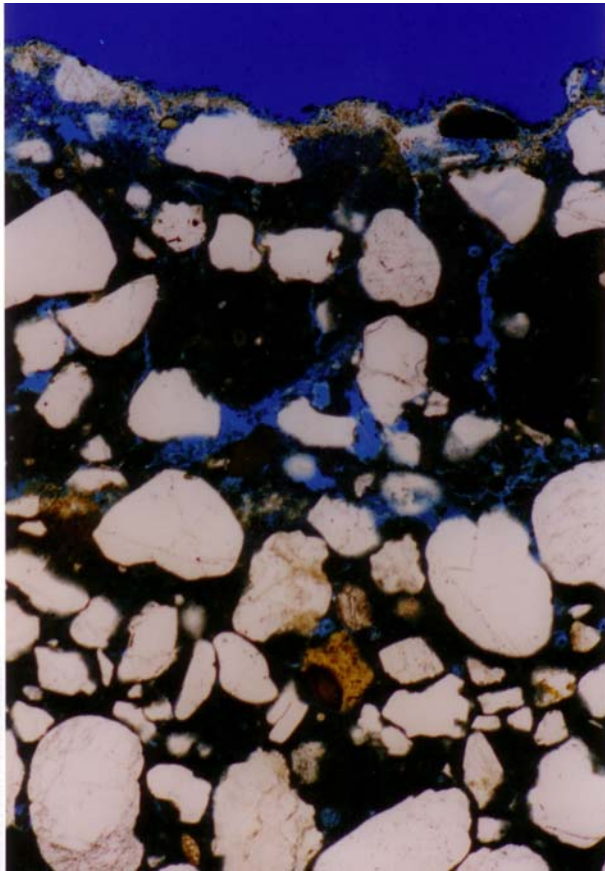


Abb. 90:
 Probe M-2: Detail aus Abb.89:
 Renaissanceputz mit Rissen und
 Gipskruste (obere Bildhälfte) auf
 mittelalterlichem Putz (rechte Bildhälfte)

[PolMi-Aufnahme, // Pol., Bildbreite ca. 2,6 mm]

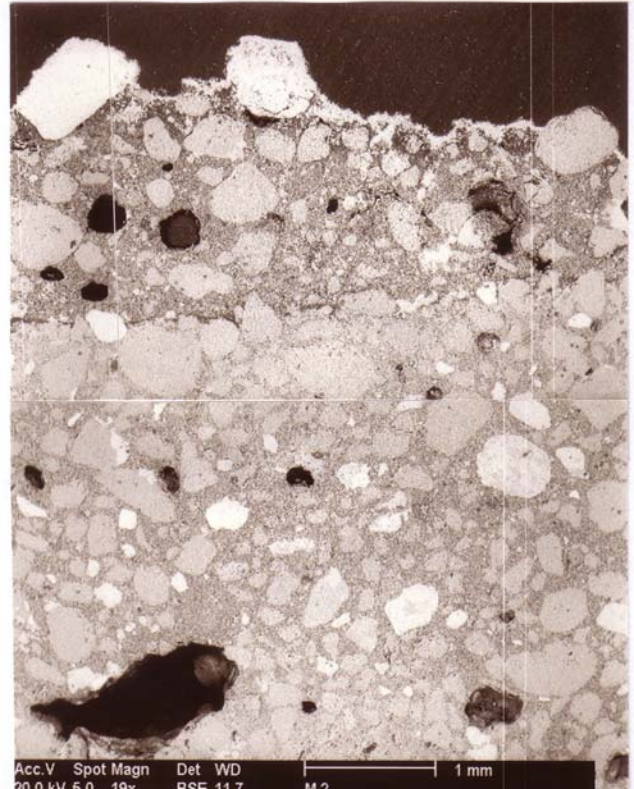


Abb. 91:
 Probe M-2: REM-Aufnahme eines
 vergleichbaren Probenbereiches wie in
 Abb. 90

[REM-RE-Abbildung]

Probe M-2

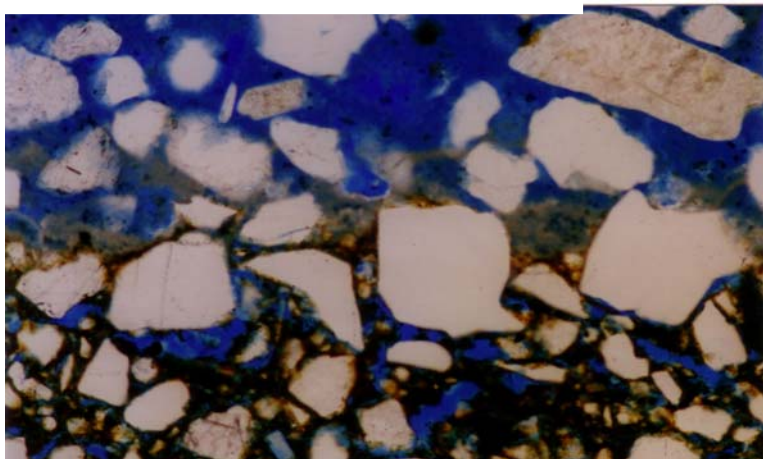


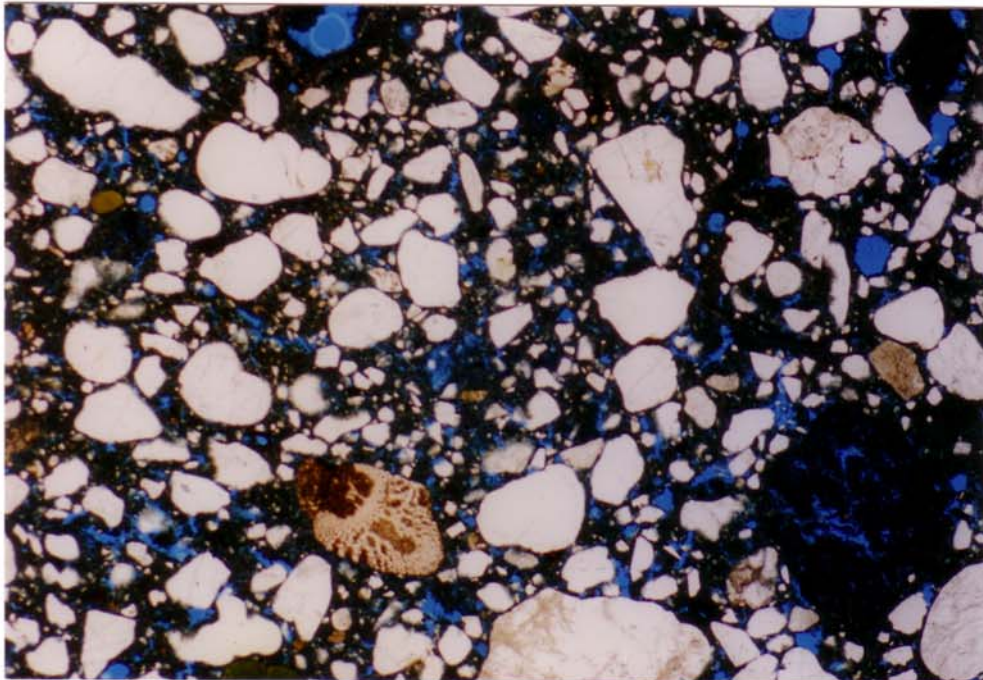
Abb. 92:
 Calcitsinterschicht in
 der Kontaktzone
 Ziegel / mittelalter-
 licher Putz.

[PolMi-Aufnahme,
 // Pol.,
 Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M-3

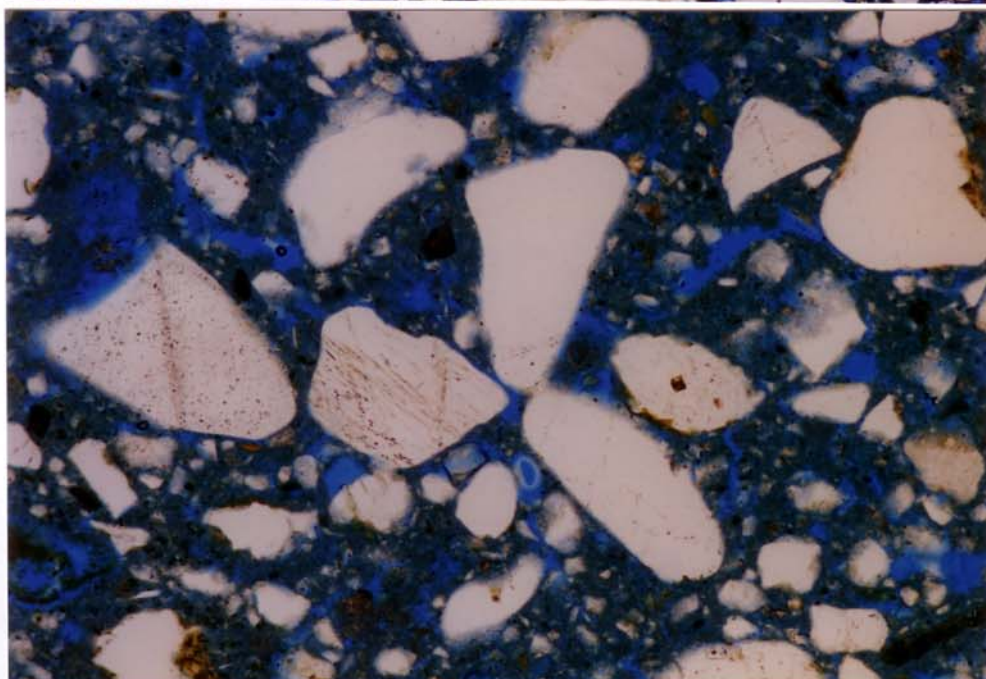
Abb. 93:
 Probenstücke, an denen die Kennwert-ermittlungen sowie die chemischen und mikroskopischen Untersuchungen durchgeführt wurden.



Probe M-3

Abb. 94:
 Charakteristisches Gefüge, deutlich poröser als M-1 und M-2 sowie andere Sieblinie.

[PolMi-Aufnahme,
 // Pol]



Probe M-3

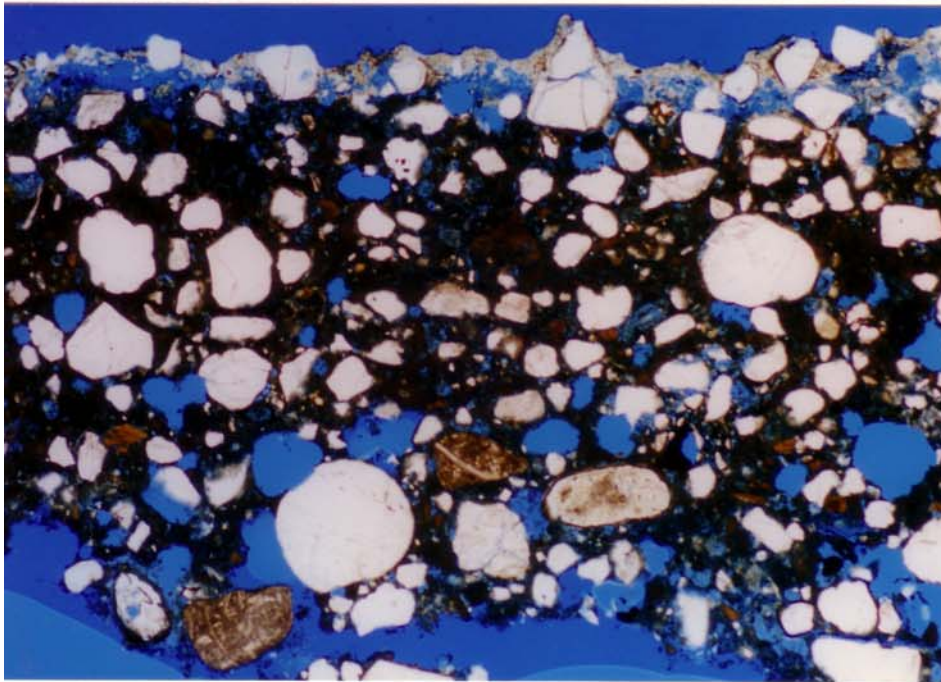
Abb. 95:
 Poröses Gefüge bei höherer Vergrößerung.

[PolMi-Aufnahme,
 // Pol.,
 Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M-5

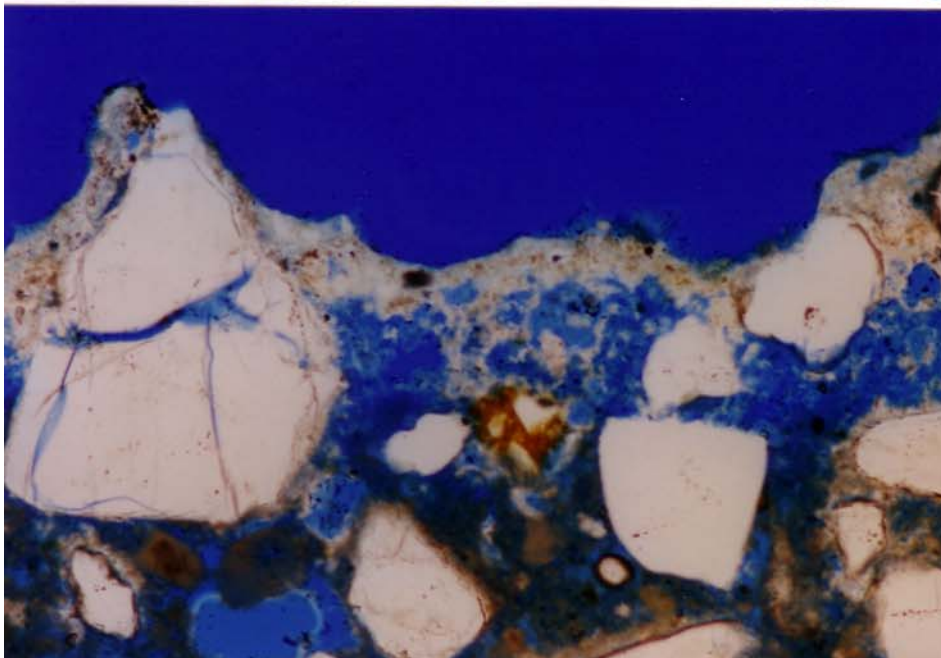
Abb. 96:
Probenentnahmestelle:
Renaissanceputzreste auf
Ziegelmauerwerk.



Probe M-5

Abb. 97:
Charakteristisches Gefüge
des Renaissanceputzes aus
einem Bereich mit gutem
Erhaltungszustand.

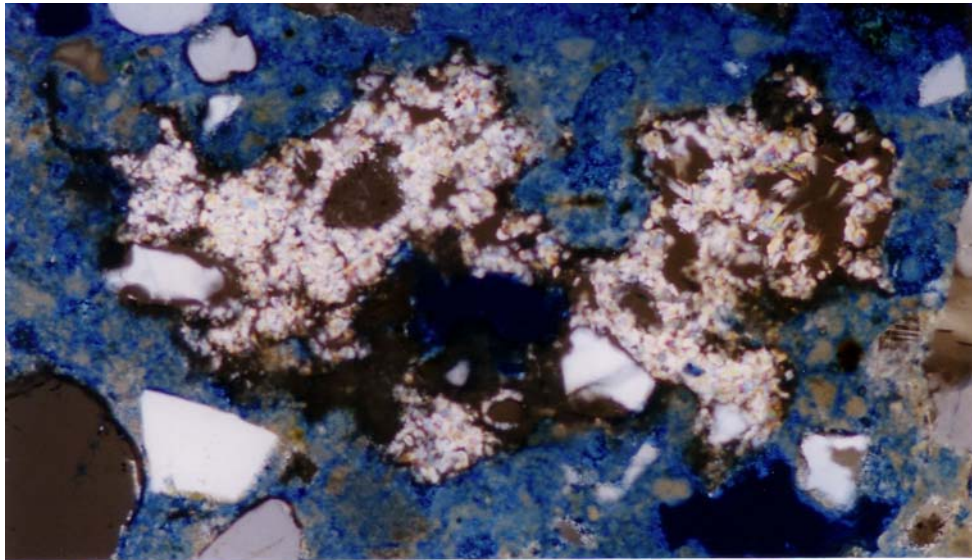
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe M-5

Abb. 98:
Detail aus Abb.97:
Gipskruste an der
Oberfläche

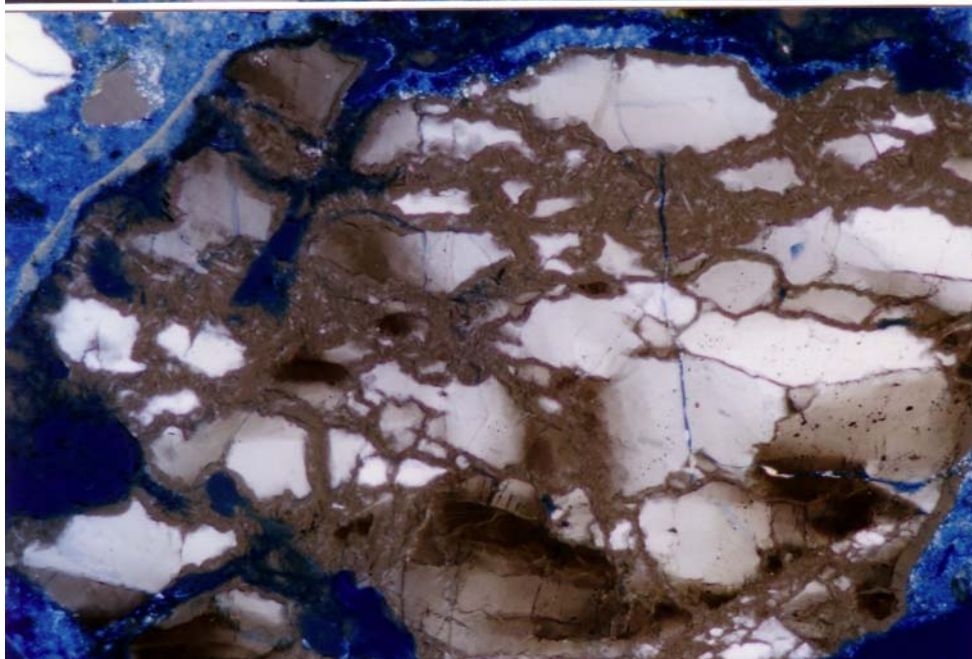
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M-5

Abb. 99:
Partikel im Mörtel-gefüge,
bestehend aus
Calciumsilikathydrat-
Kristallen („bunt“).

[PolMi-Aufnahme,
Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M-5

Abb. 100:
Partikel im Mörtel-gefüge,
bestehend aus
Quarzkristallen und
amorphem SiO₂.

[PolMi-Aufnahme,
Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]

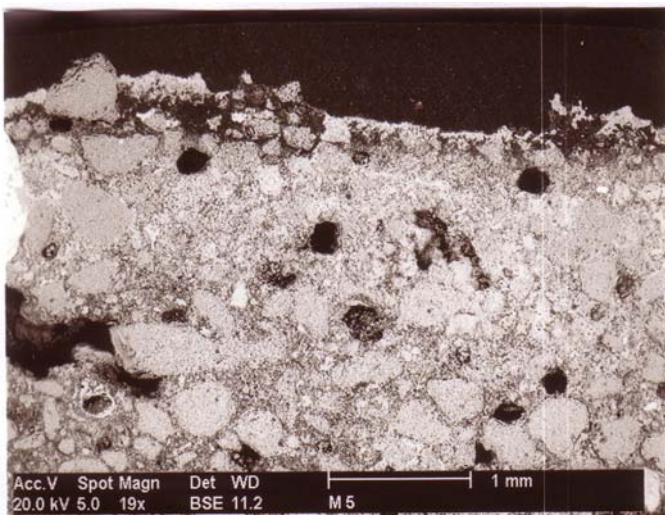


Abb.101:
Gefüge des Renaissanceputzes mit dünner
Gipskruste. [REM-RE-Aufnahme]

```
04-MAR-98 21:46:03 EDA>
RATE=      0CPS      TIME
FS=    2156CNT      PRS1
A =BST M-5: Bindemittel
```

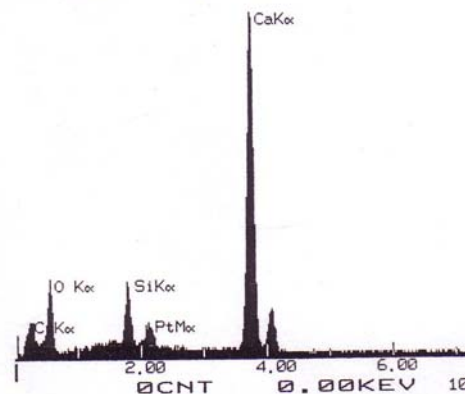
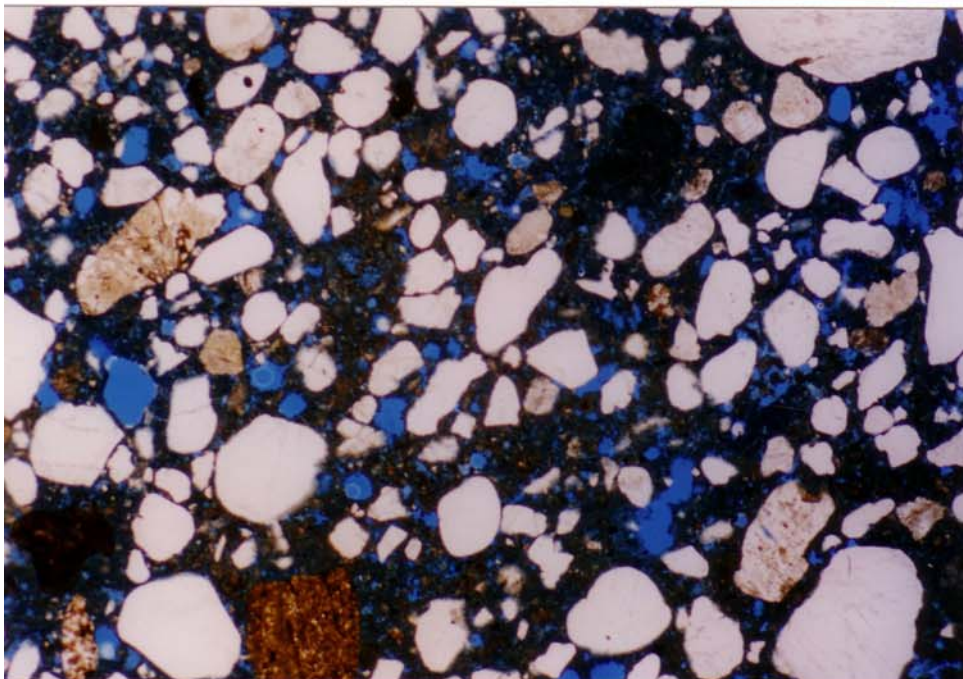


Abb.102:
EDX-Spektrum des Bindemittels. Der
Si-Gehalt ist höher als bei den
mittelalterlichen Mörteln.



Probe M-6

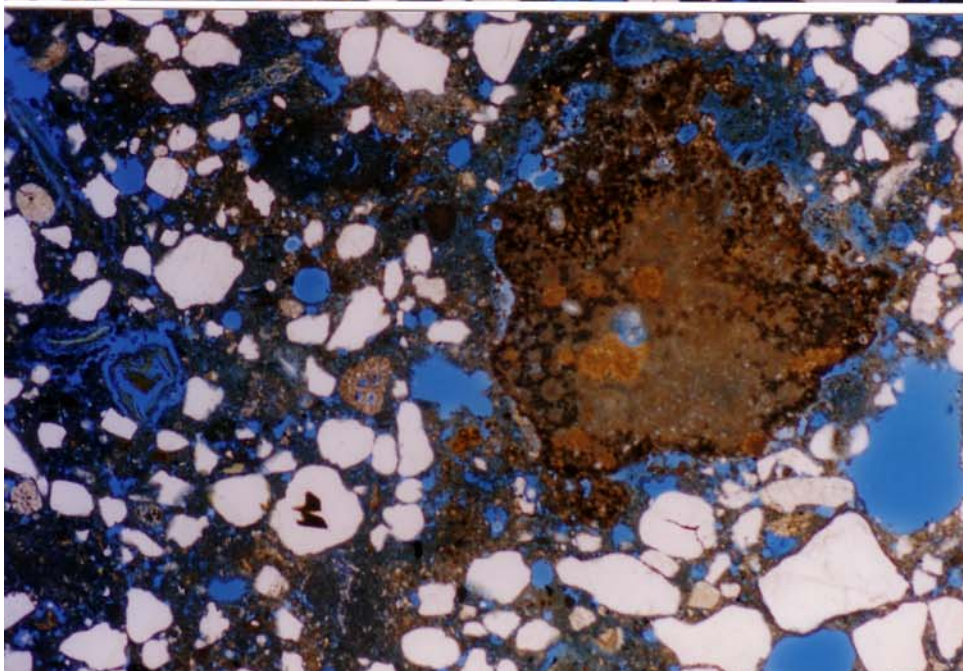
Abb. 103:
Probenentnahmestelle:
Renaissance-Mauer-
mörtel.



Probe M-6

Abb. 104:
Charakteristisches
Gefüge in einem
homogenen Bereich.

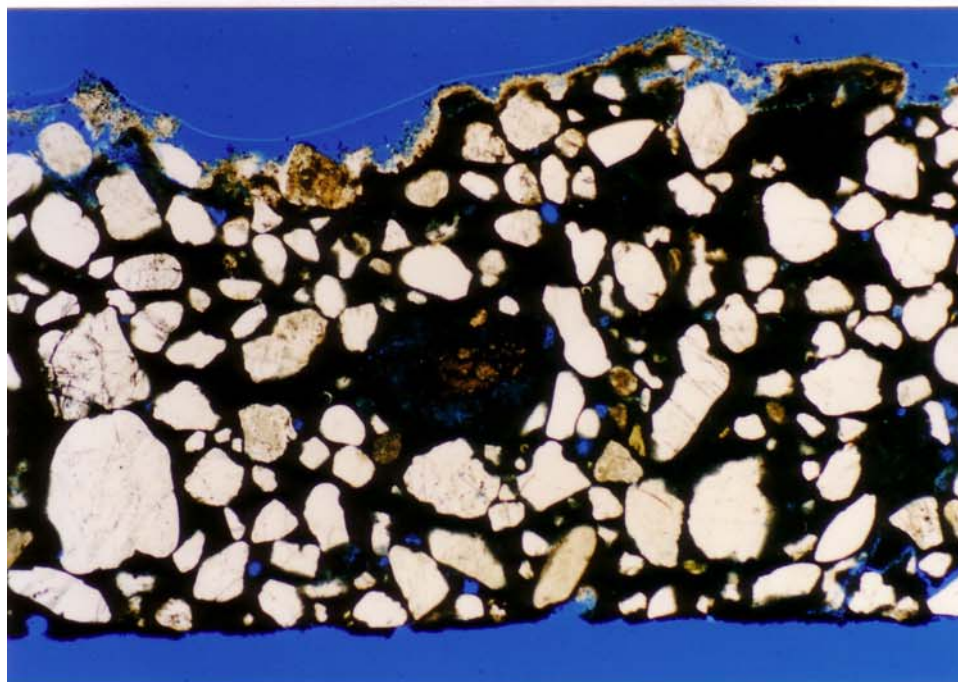
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe M-6

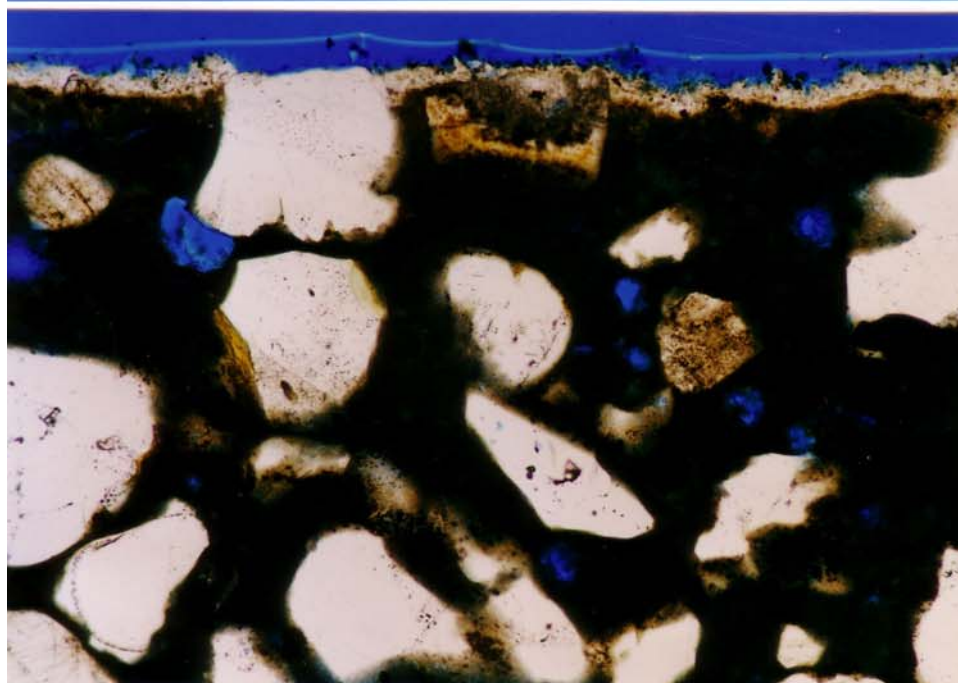
Abb. 105:
Gefüge in einem
inhomogenen Bereich
mit Kalkspatz.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe M-7

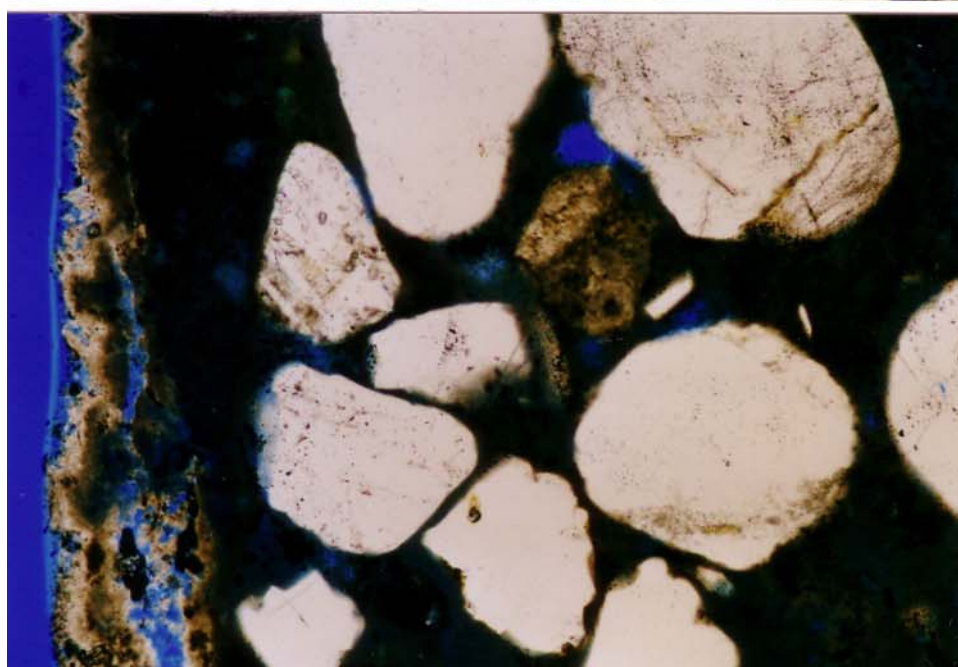
Abb. 106:
Stark geschädigter
Renaissanceputz
(zahlreiche Risse) mit
Gipskruste an der
Oberfläche (links im
Bild).



Probe M-7

Abb. 107:
Gefüge mit Rissen.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M-7

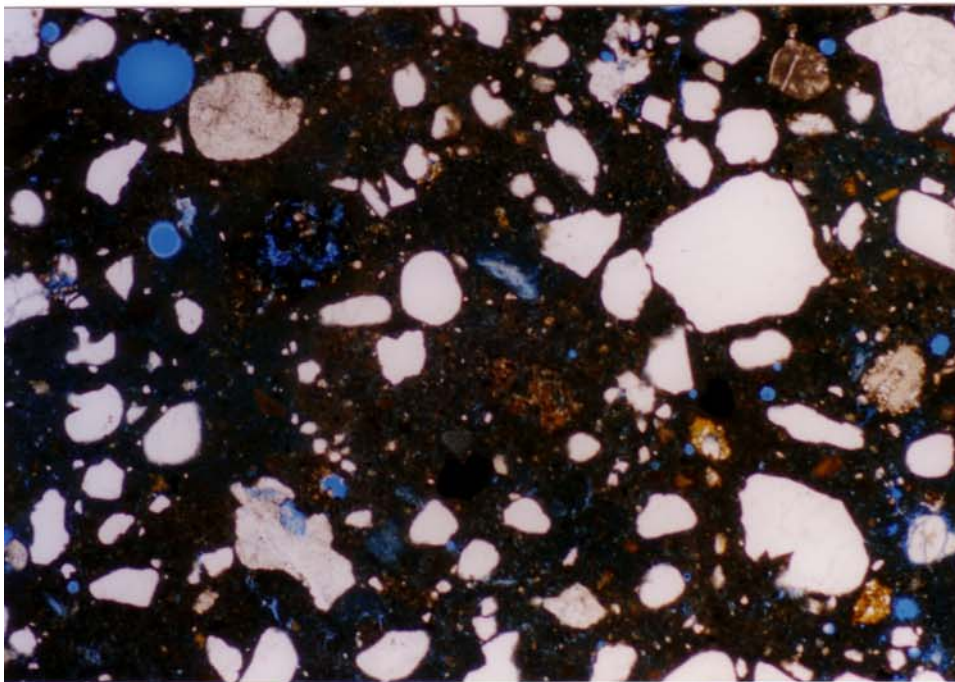
Abb. 108:
Gipskruste (weißes Band)
an der Oberfläche.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M-8

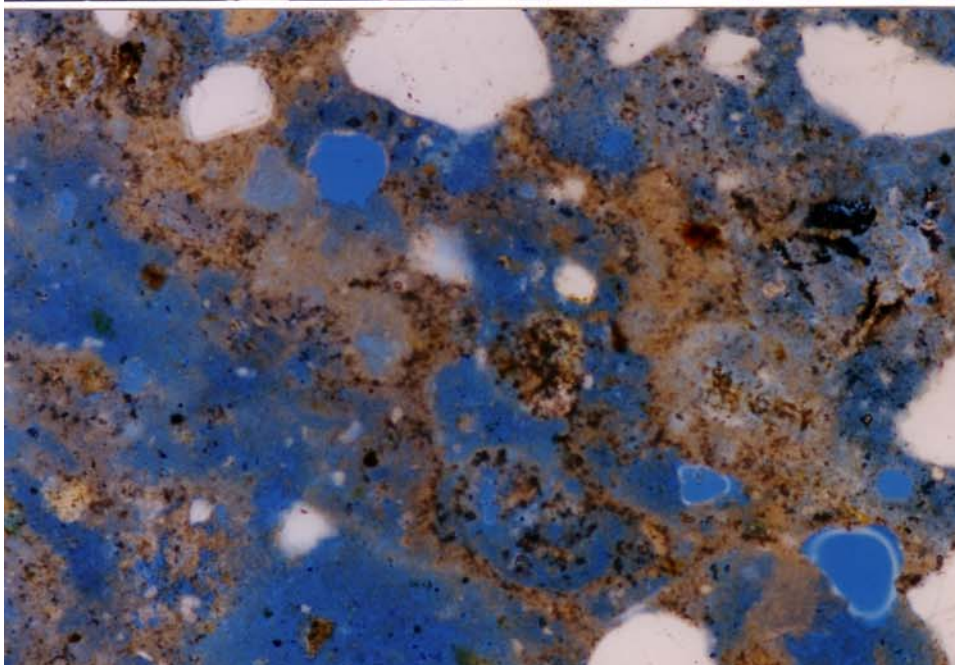
Abb. 109:
Entnahmestelle:
Mittelalterlicher
Schalenmörtel.



Probe M-8

Abb. 110:
Charakteristisches, dichtes
Gefüge.

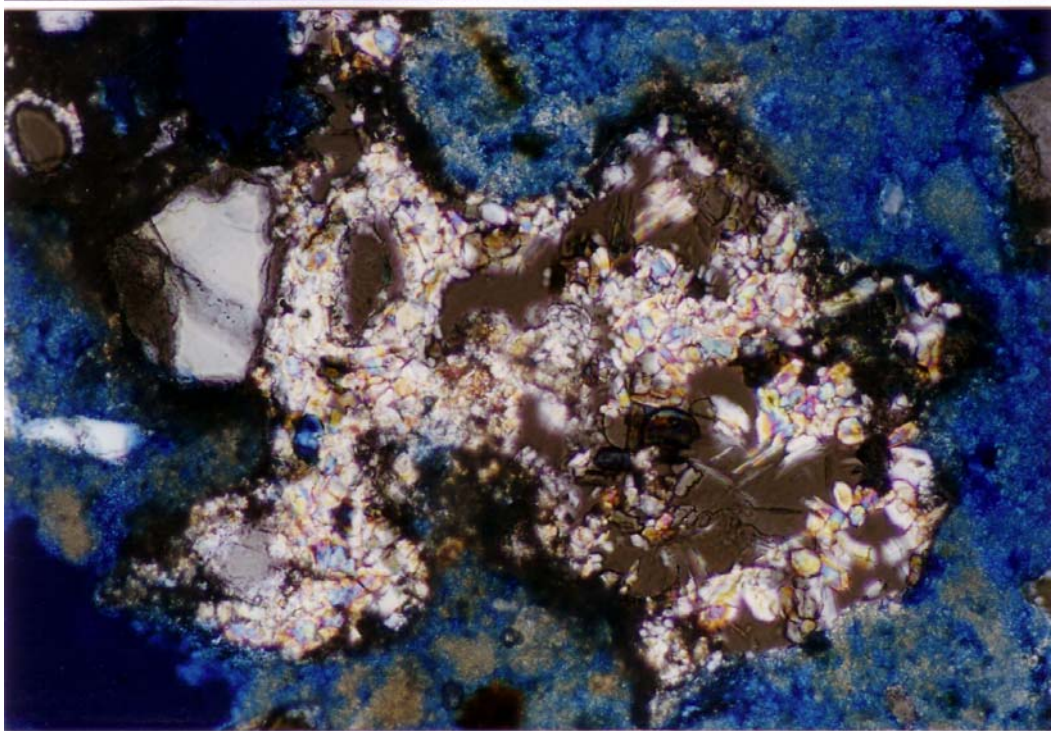
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M-8

Abb. 111:
Gefüge mit zahl-reichen
Rekristalli-sationen
(bräunliche Bereiche) bei
höherer Vergrößerung.

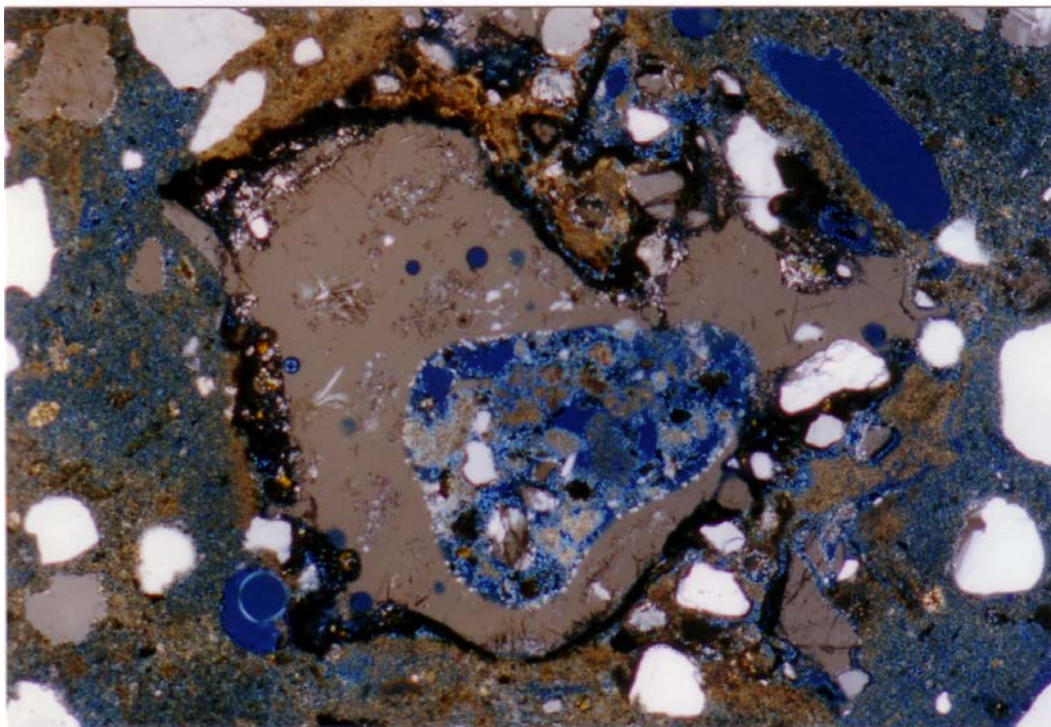
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 2,6 mm]



Probe M-6

Abb. 112:
Partikel im Mörtel-
gefüge, bestehend
aus Calciumsilikaten
(„bunt“) und
amorphem SiO_2
(graue Matrix).

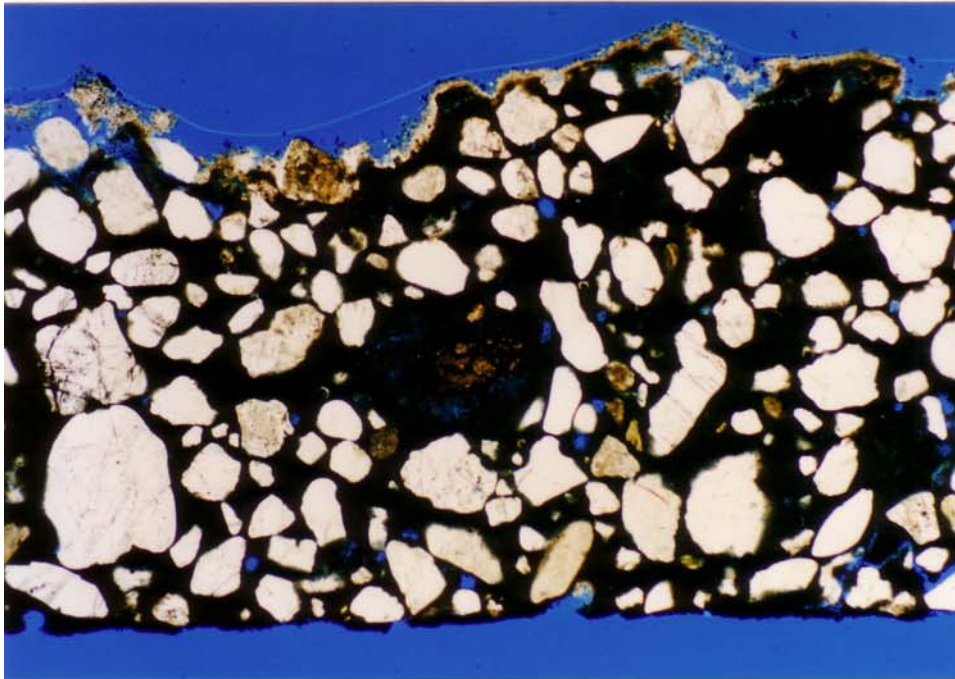
[PolMi-Aufnahme,
Pol.,
Bildbreite ca. 0,7
mm]



Probe M-8

Abb. 113:
Partikel im Mörtel-
gefüge, überwiegend
aus amorphem SiO_2
bestehend (grau).

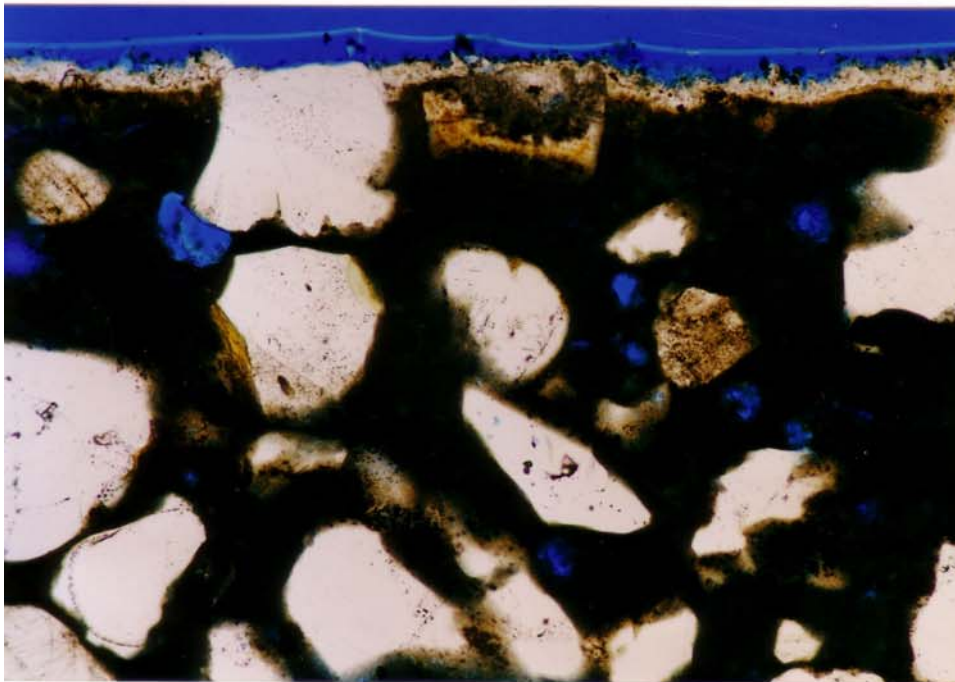
[PolMi-Aufnahme,
Pol.,
Bildbreite ca. 2,6
mm]



Probe 1

Abb. 114:
Mittelalterlicher Putz mit
intaktem, sehr dichtem
Gefüge und dünner
Gipskruste an der Oberfläche
(helles Band).

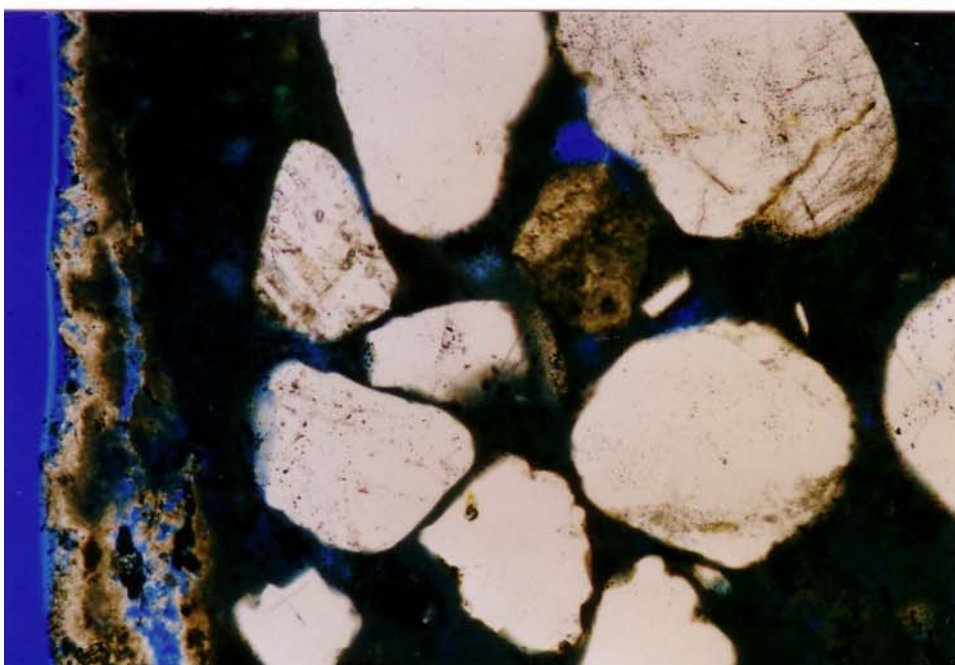
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



Probe 1

Abb. 115:
Fest anhaftende, dünne
Gipskruste an der
Mörteloberfläche.

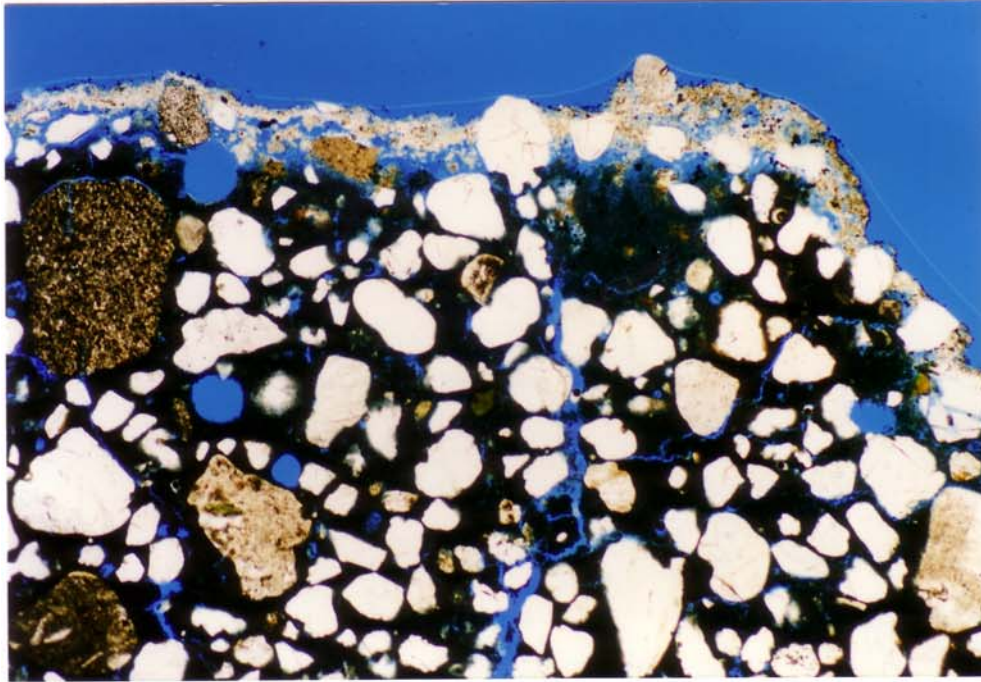
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe 1

Abb. 116:
Gipskruste an der
Mörteloberfläche.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



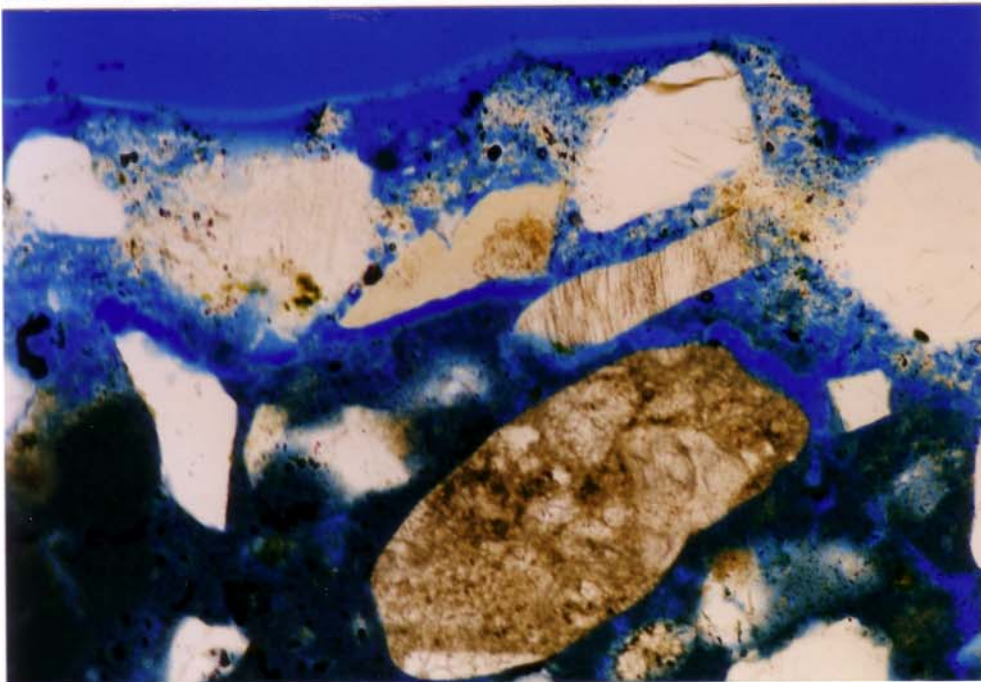
Probe 2

Abb. 117:

Vergleichsaufnahme zu
Abb.114:

- dickere Kruste, nur
punktuell haftend
- Risse

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm]



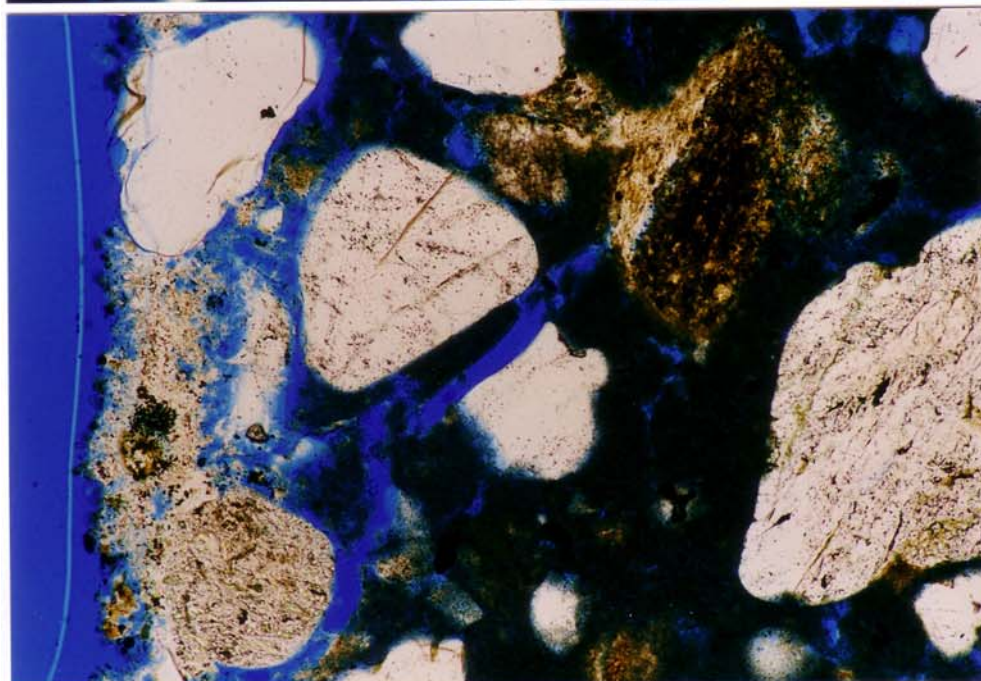
Probe 2

Abb. 118:

Vergleichsaufnahme zu
Abb.115:

- hohl liegende Kruste
mit anschließender
Lockerungszone

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe 2

Abb. 119:

Vergleichsaufnahme zu
Abb.116:

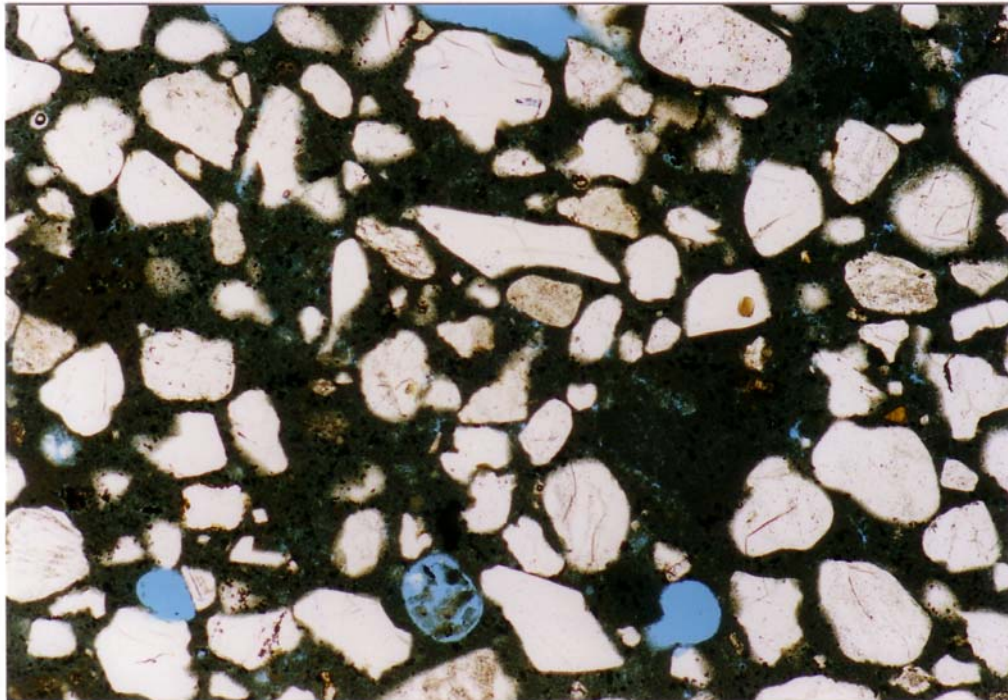
- hohl liegende Kruste
mit anschließender
Lockerungszone

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M 2/1

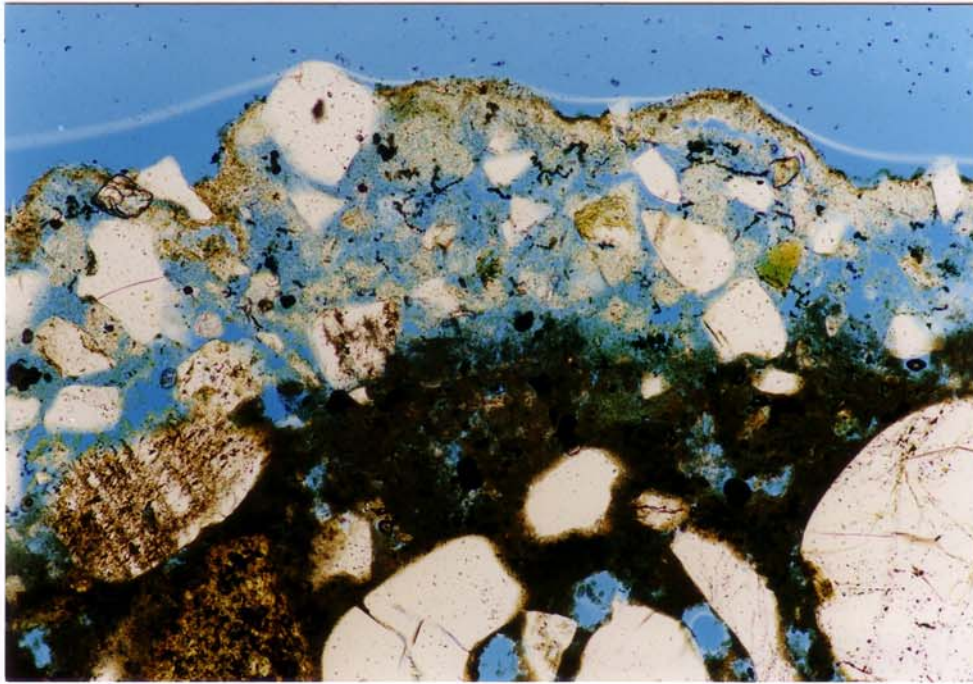
Abb. 120:
Entnahmestelle:
Mittelalterlicher Putz



Probe M 2/1

Abb. 121:
Charakteristisches,
intaktes Gefüge.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 2,6 mm]



Probe M 2/1

Abb. 122:
Eingewachsene, poröse Gipskruste. In der Gipskruste befinden sich „Zuschläge“, d.h. sie ist durch Umwandlung des calcitischen Bindemittels in Gips entstanden.

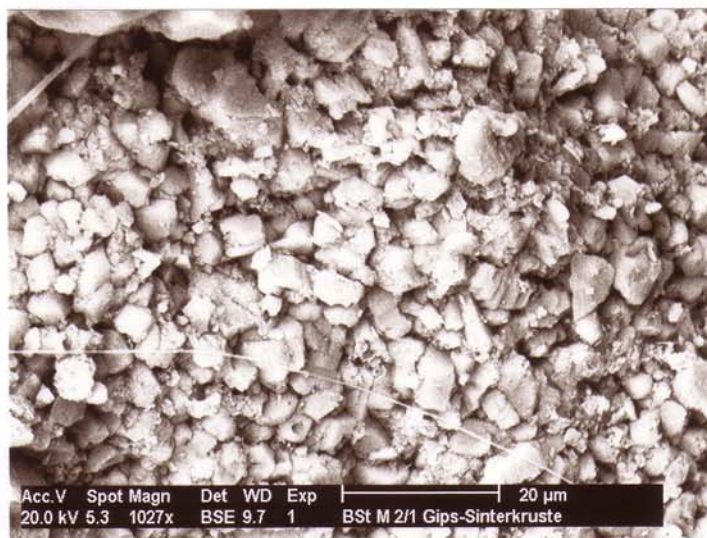
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,



Probe M 2/1

Abb. 123:
Bruchfläche. Rechts ist die Oberfläche, links davon die Zuschlagkörner zu erkennen.

[REM-RE-Aufnahme]



Probe M 2/1

Abb. 124:
Blick auf die Oberfläche des Putzes: Gips-Sinterkruste.

[REM-RE-Aufnahme]



Probe M 2/2

Abb. 125:
Entnahmestelle:
Mittelalterlicher
Putz



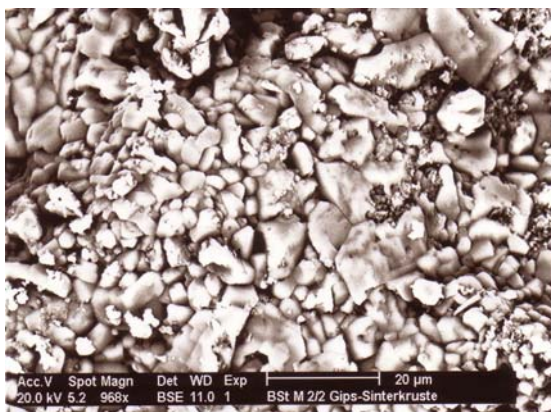
Abb. 126:

Probe M 2/2: Querbruch mit Zuschlagkörnern und Oberfläche (links im Bild) [REM-RE-Aufnahme]



Abb. 127:

Probe M 2/2: Detail aus Abb.126: Gips-Sinterkruste.



Probe M 2/2

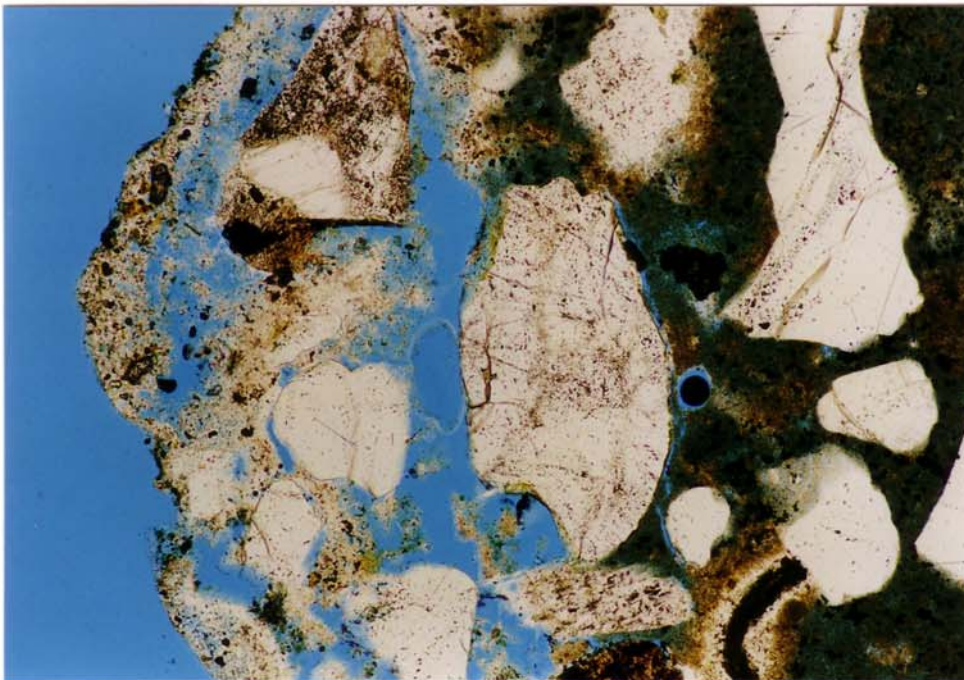
Abb. 128:

Blick auf die Oberfläche des Putzes:
Gips-Sinterkruste.



Probe M 2/3

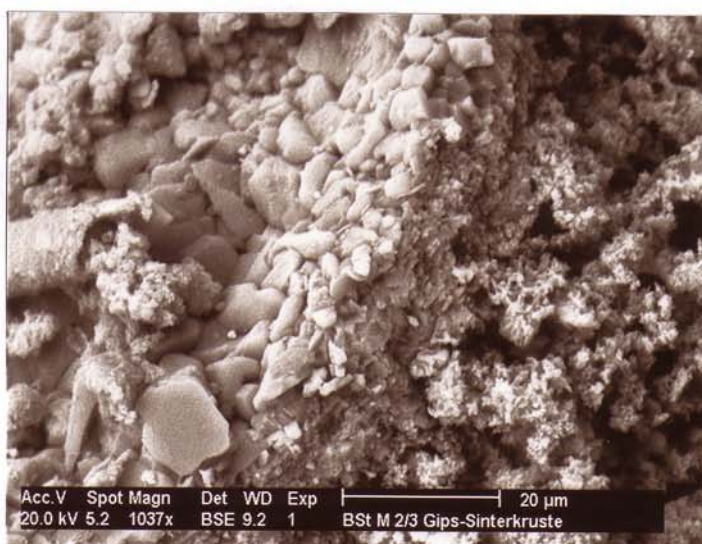
Abb. 129:
Entnahmestelle:
Mittelalterlicher
Putz



Probe M 2/3

Abb. 130:
Hohl liegende Gips-
kruste. Die Zuschlag-
körner in der Kruste
deuten auf eine Um-
wandlung des Binde-
mittels in Gips.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]

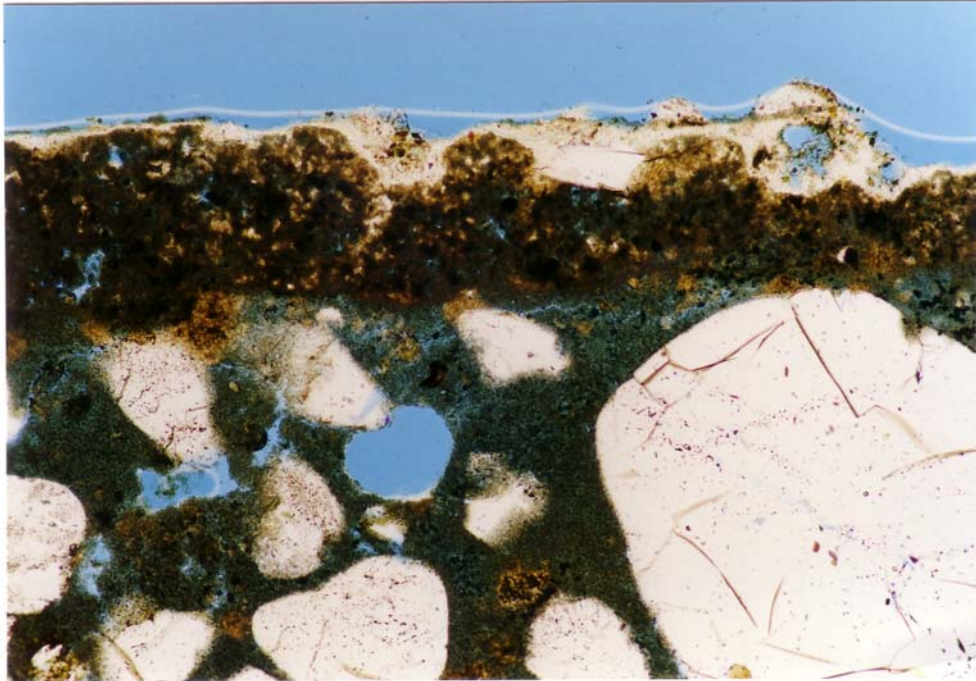


Probe M 2/3

Abb. 131:
Blick auf einen
Schrägbruch. Die Gips-
Sinterkruste ist deutlich
zu erkennen.

[REM-RE-Aufnahme]

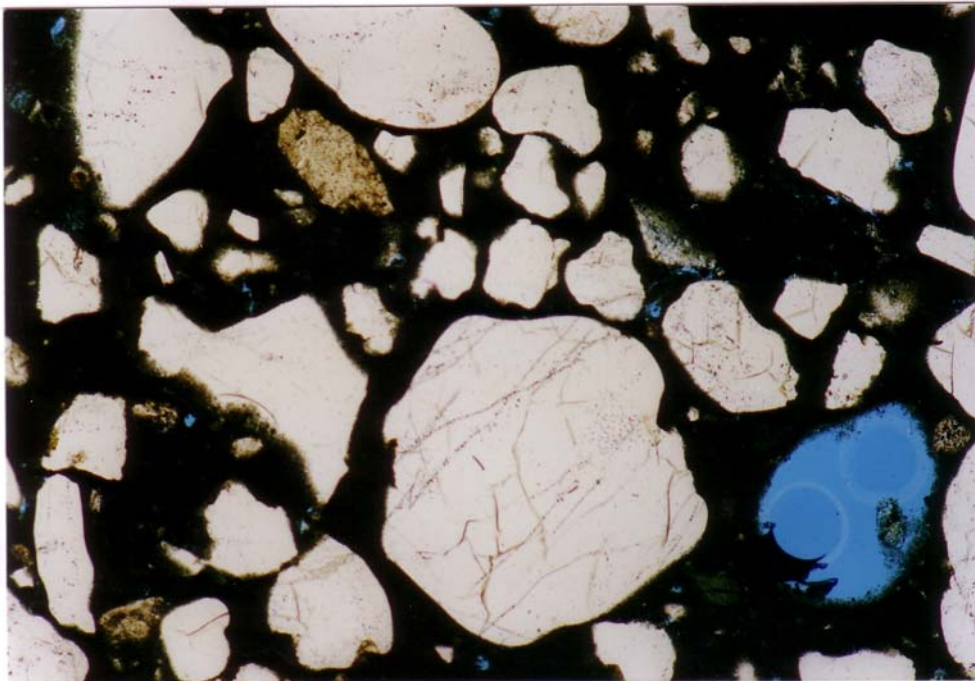
Acc.V Spot Magn Det WD Exp | 20 µm
20.0 kV 5.2 1037x BSE 9.2 1 | BSt M 2/3 Gips-Sinterkruste



Probe M 2/3

Abb. 132:
Mittelalterlicher Putz
mit Kalktünche. Die
Außenseite der Tünche
ist in Gips umgewandelt
(helles Band).

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M 2/3

Abb. 133:
Mittelalterlicher Putz.
Charakteristisches,
dichtes, intaktes Gefüge.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 2,6 mm]



Abb. 134:
 Probe M 2/4: Mittelalterlicher Putz.
 Entnahmestelle

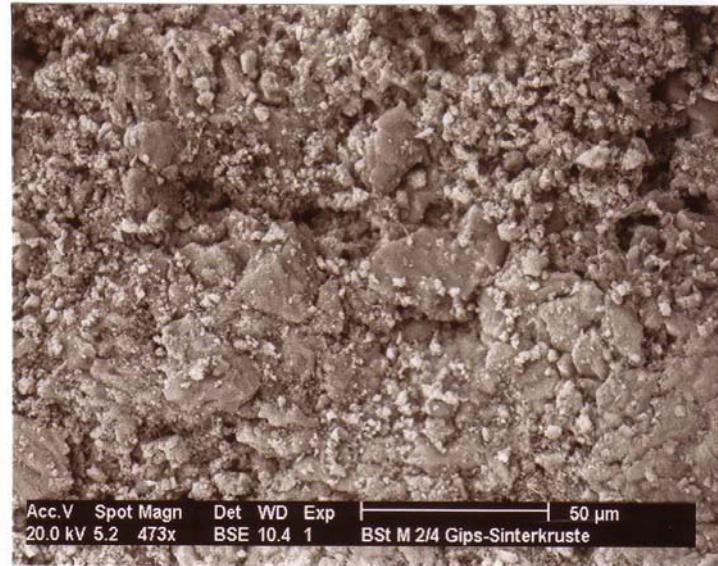


Abb. 135:
 Probe M 2/4: Oberfläche mit Gips-
 Sinterkruste.
 [REM-RE-Aufnahme]

Probe M 2/4

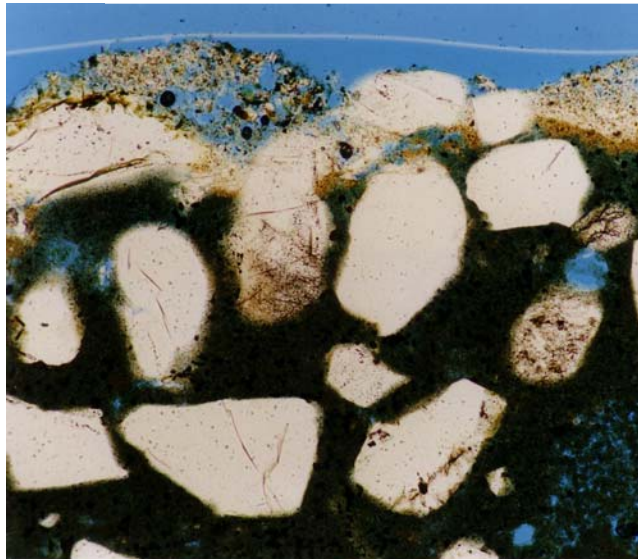
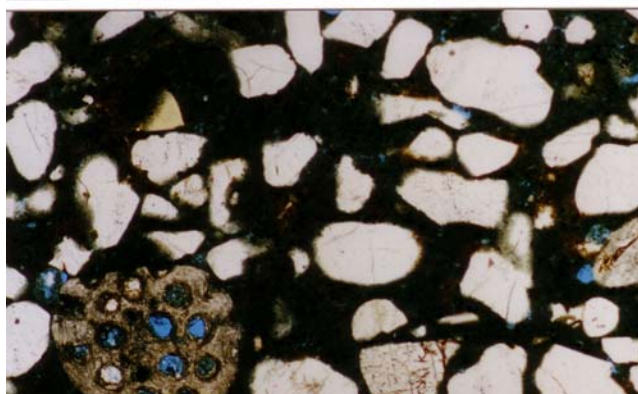


Abb. 136:
 Fest anhaftende Gipskruste.

[PolMi-Aufnahme,
 // Pol.,
 Bildbreite ca. 1,3 mm



Probe M 2/4

Abb. 137:
 Charakteristisches, dichtes,
 intaktes Gefüge

[PolMi-Aufnahme,
 // Pol.,
 Bildbreite ca. 2,6 mm]



Probe M 2/5

Abb. 138:
Entnahmestelle:
Mittelalterlicher Putz



Abb. 139:
Probe M 2/5: Querbruch. Rechts
ist die Gips-Sinter-
kruste zu erkennen. [REM-
RE-Aufnahme]

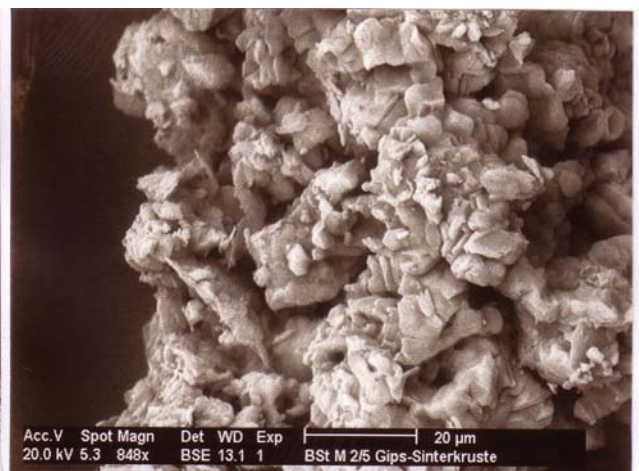
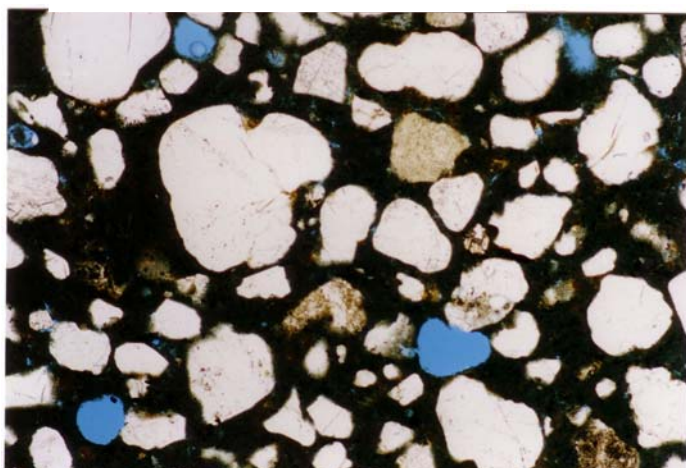


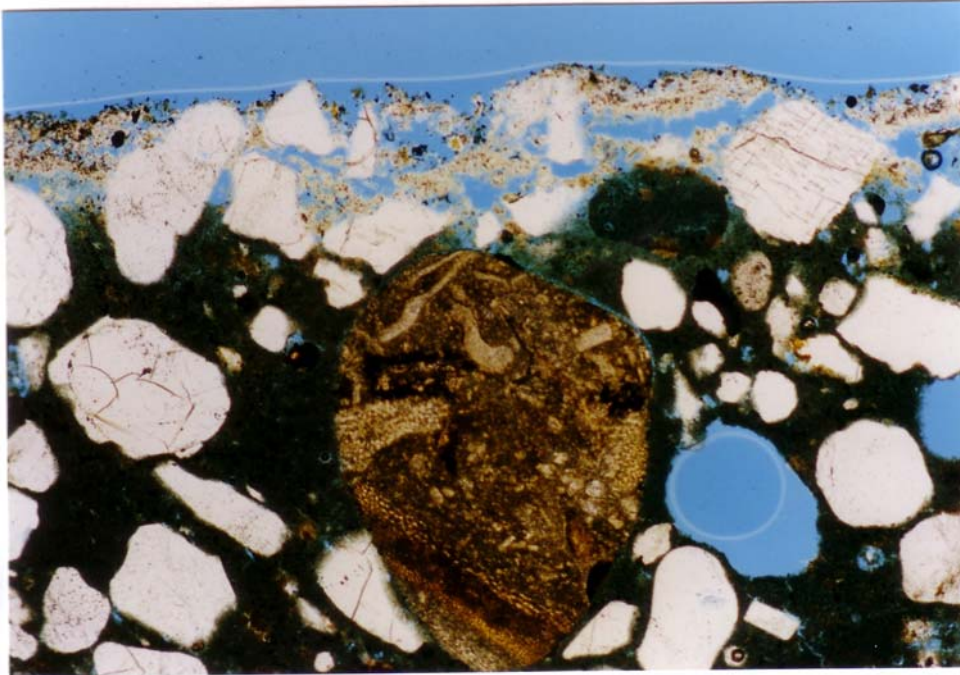
Abb. 140:
Probe M 2/5: Oberfläche mit
Gips-Sinterkruste.
[REM-RE-Aufnahme]



Probe M 2/5

Abb. 141:
Charakteristisches,
dichtes, intaktes
Gefüge

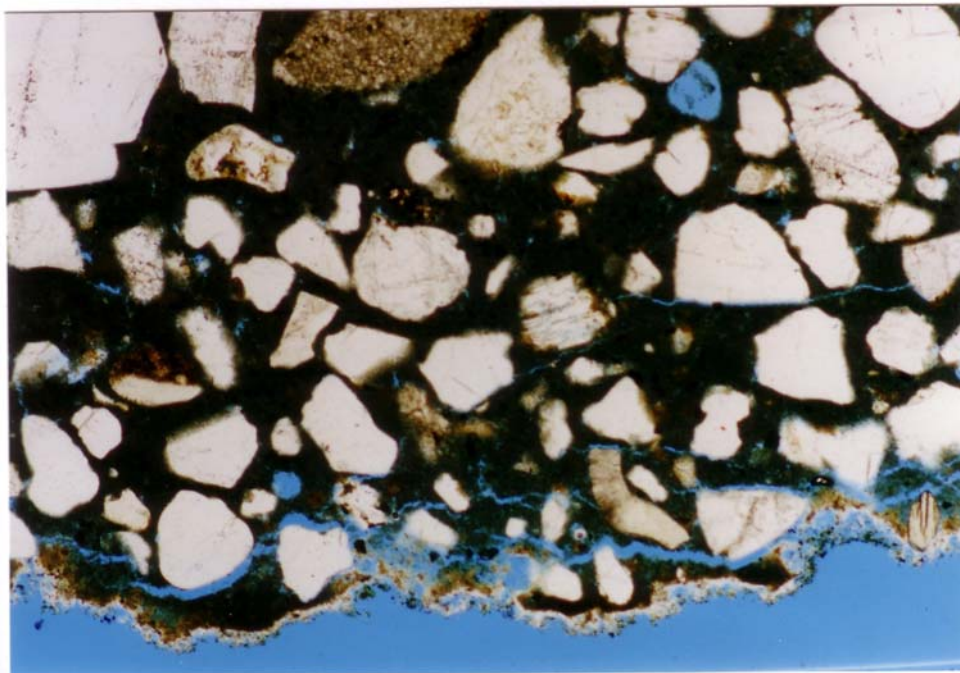
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 2,6 mm]



Probe M 2/5

Abb. 142:
Schalenoberseite mit hohl liegender Gipskruste. Die Zuschlagkörner in der Kruste deuten auf eine Umwandlung des Bindemittels in Gips.

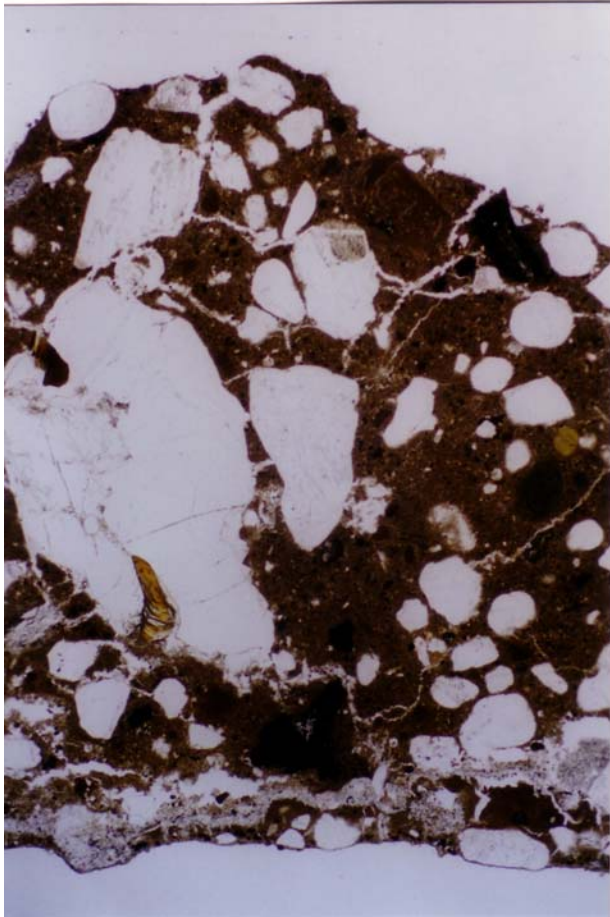
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 2,6 mm]



Probe M 2/5

Abb. 143:
Schalenrückseite mit Lockerungen (Risse) und dünner Gipskruste (helles Band).

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 2,6 mm]

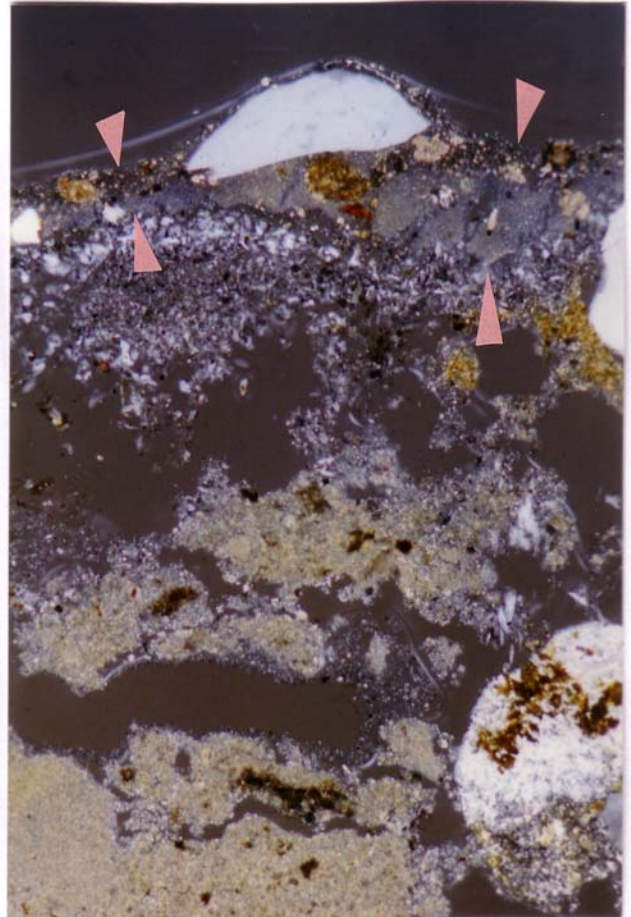


Probe M 1/2

Abb. 144:

Rißsystem im Renaissanceputz über die gesamte Putzschicht.

[PolMi-Aufnahme, // Pol., Bildbreite ca. 5,2 mm]

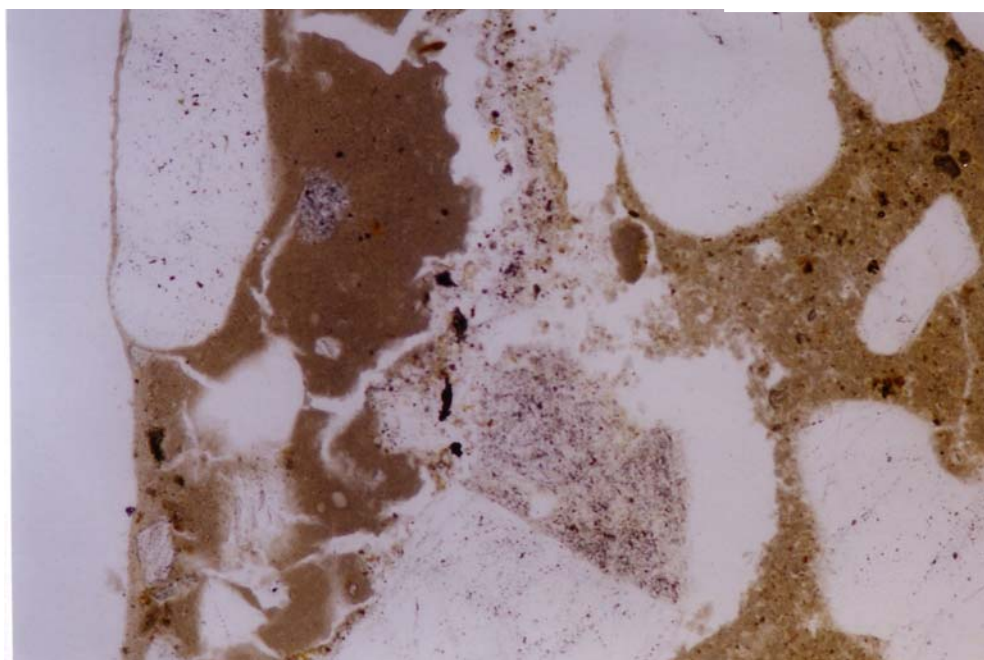


Probe M 1/2

Abb. 145:

Feinputzschicht (zwischen den Pfeilen) auf Gipskruste. Weder der Feinputz noch die Kalkmilch sind hinter die Gipschicht gelangt (→ reine Oberflächenkonsolidierung).

[PolMi-Aufnahme, # Pol., Bildbreite ca. 1,3 mm]

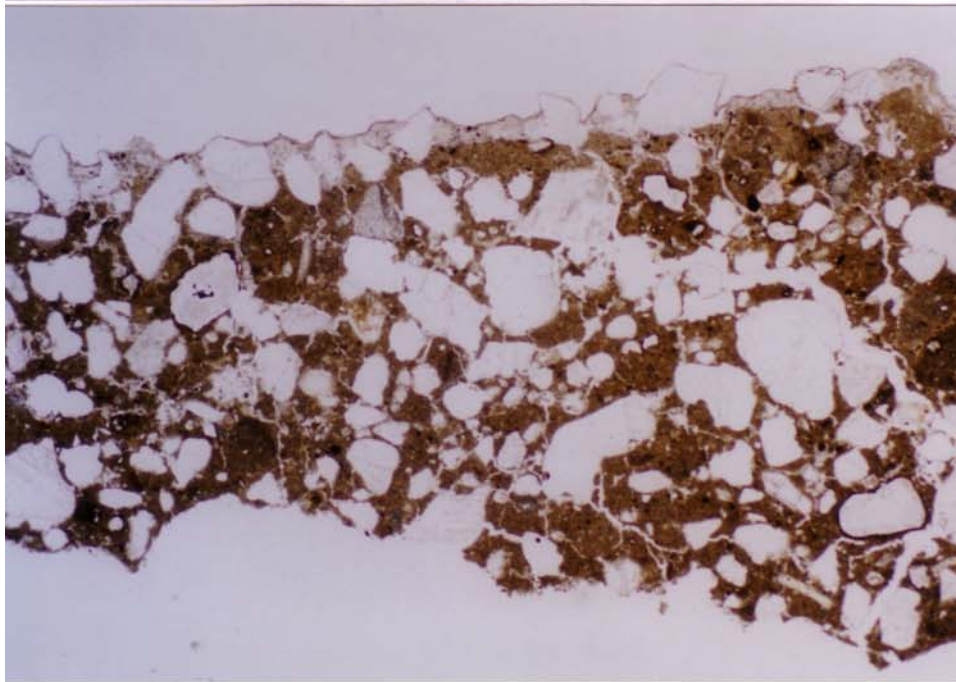


Probe M 1/2

Abb. 146:

In der Feinputzschicht treten Schwindrisse auf.

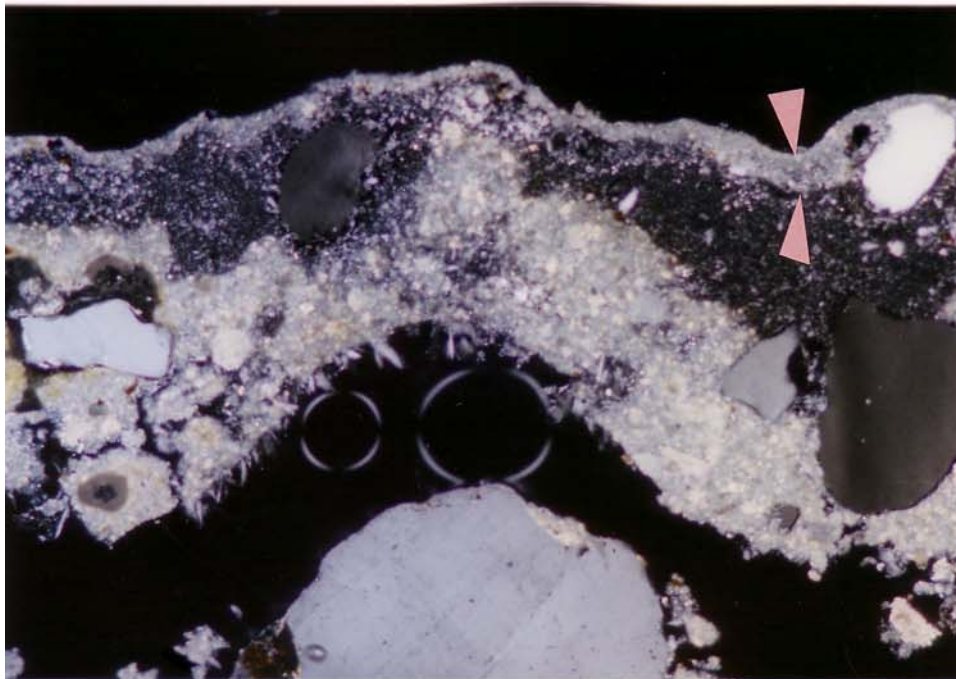
[PolMi-Aufnahme, // Pol., Bildbreite ca. 1,3 mm]



Probe M 1/1

Abb. 147:
Rißsystem im
Renaissanceputz über
die gesamte Putz-
schicht.

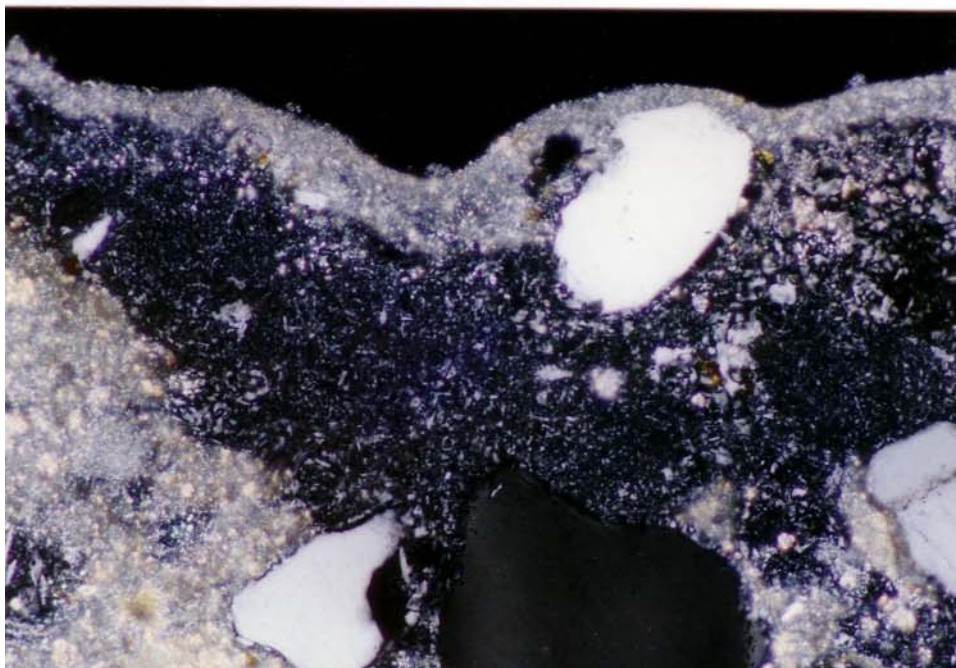
[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 5,2 mm



Probe M 1/1

Abb. 148:
Feinschlämme (zwischen
den Pfeilen) auf der
Gipsschicht. In den Riß
hinter der Gips-
kruste ist die Fein-
schlämme nicht
eingedrungen.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 1,3 mm



Probe M 1/1

Abb. 149:
Detail aus Abb. 148.
Feinschlämme auf
Gipskruste.

[PolMi-Aufnahme,
// Pol.,
Bildbreite ca. 0,7 mm]

Ziegel :Technisch-physikalische Kennwerte(Graphiken)

Druckfestigkeiten

Proben Nr	Abmessungen in mm Länge	Breite	Höhe	Bruchlast	Druckfestigkeit
Z-1	48	46	45	33000	14,9
Z-2	52	52	52	23500	8,7
Z-3	52	52	52	24000	8,9
Z-4	52	52	52	26500	9,8
Z-5	52	51	50	33500	12,6
Z-6	52	52	52	20500	7,6
Z-7	52	52	52	25500	9,4
Z-10	52	53	52	23500	8,5
Z-11	52	50	47	62500	24,0
Z-12	51	51	51	zerfallen	n.b.
Z-13	52	52	50	30000	11,1

Rohdichte / Porosität / Freie Wasseraufnahme

Proben Nr	Gewichte in g			Volumen	Rohdichte [g/cm ³]	Porosität [Vol.-%]	Fr. Wasseraufnahme [M%]
	trocken	feucht	u. Wasser				
Z-1	194,4	214,9	114,4	100,5	1,93	20,4	10,5
Z-2	653,7	741,7	381,5	360,2	1,81	24,4	13,5
Z-3	175,2	201,4	100,8	100,6	1,74	26,0	15,0
Z-4	178,1	204,7	102,5	102,2	1,74	26,0	14,9
Z-5	159,3	182,2	94,3	87,9	1,81	26,1	14,4
Z-6	172,1	190	100,3	89,7	1,92	20,0	10,4
Z-7 (Rand)	217,9	244,1	123	121,1	1,80	21,6	12,0
Z-7 (Kern)	214,6	243,4	121,3	122,1	1,76	23,6	13,4
Z-8	818,1	929,3	483,3	446	1,83	24,9	13,6
Z-9	420,2	499,6	247,9	251,7	1,67	31,5	18,9
Z-10	318,3	365,8	181,6	184,2	1,73	25,8	14,9
Z-11	217,2	234,8	119,1	115,7	1,88	15,2	8,1
Z-12	239,3	264,5	134,9	129,6	1,85	19,4	10,5
Z-13	247,1	281,3	142,4	138,9	1,78	24,6	13,8

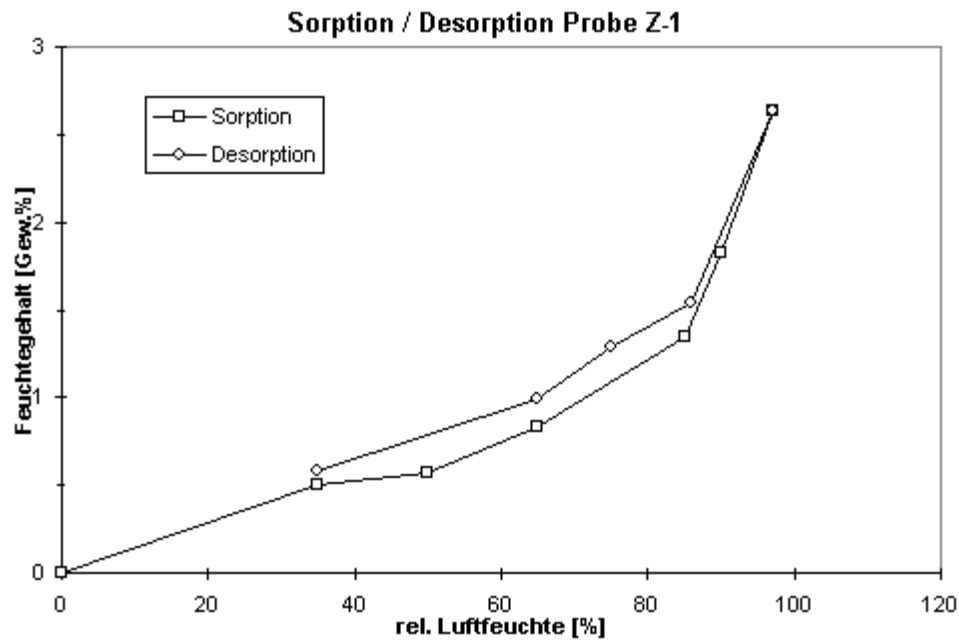
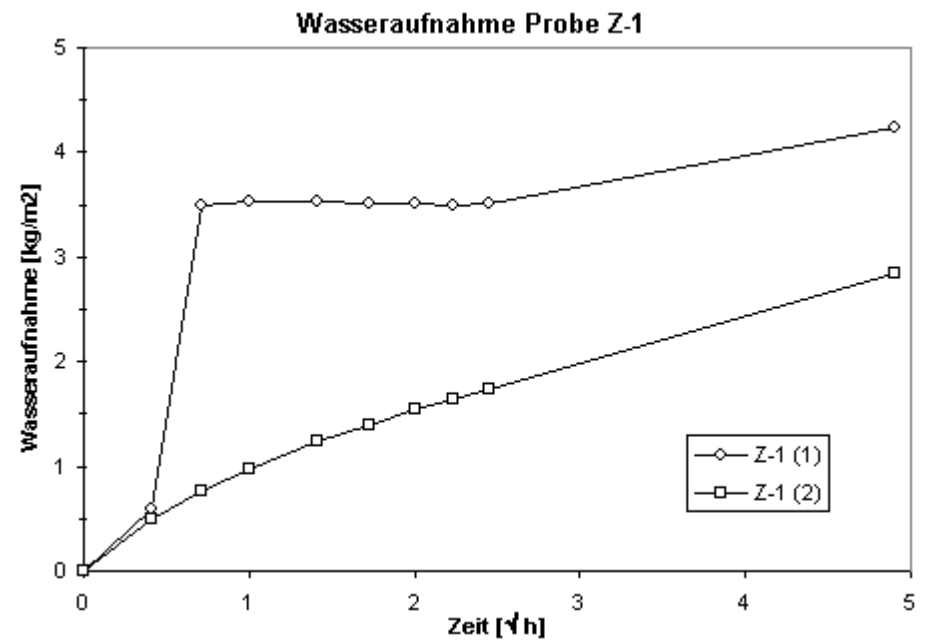
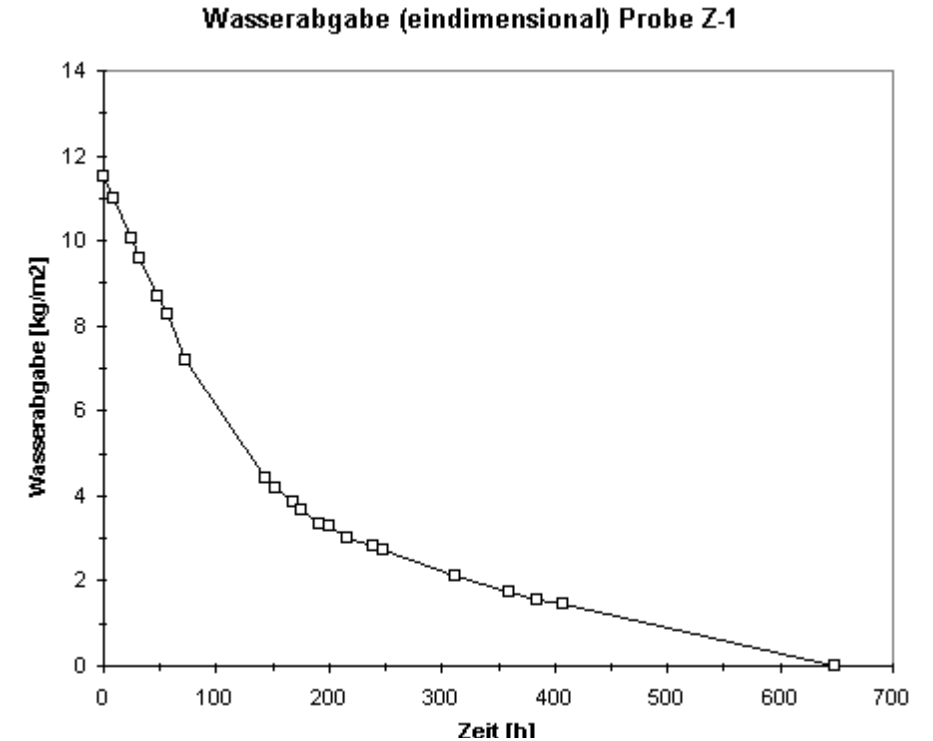
Objekt: **Burg Stargard** /

Ziegelproben

Ziegel Z-1

Rohdichte	[g/cm ³]	1,93
Offene Porosität	[Vol%]	20,4
Freie Wasseraufn.	[M%]	10,5
DF*	[N/mm ²]	14,9
w-Wert	Z-1 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	n.b.
w-Wert	Z-1 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	0,60 +/- 0,05

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

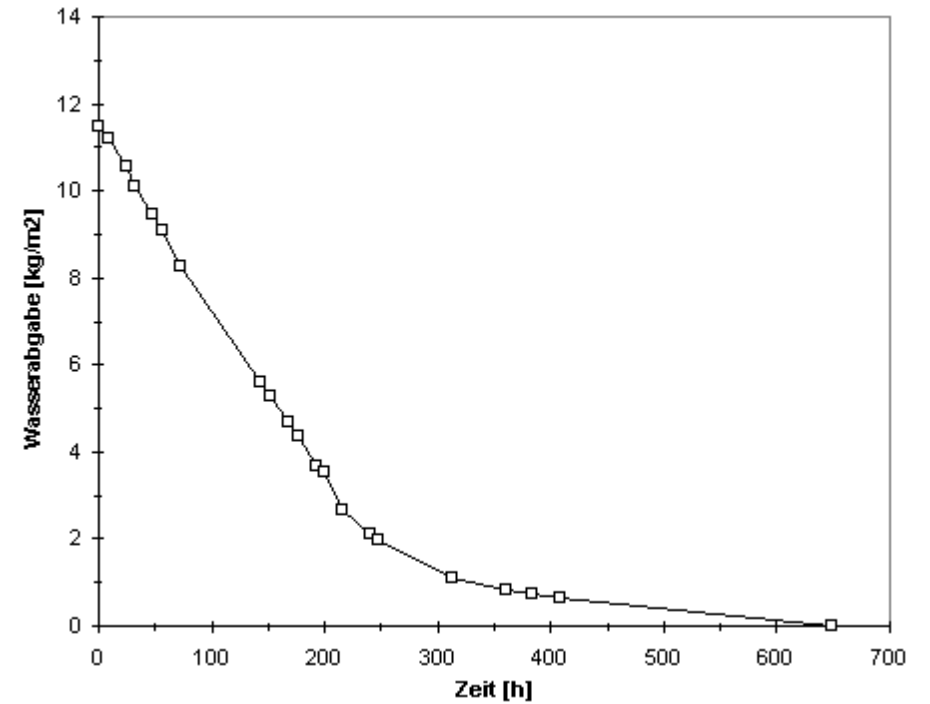


Ziegel Z-2

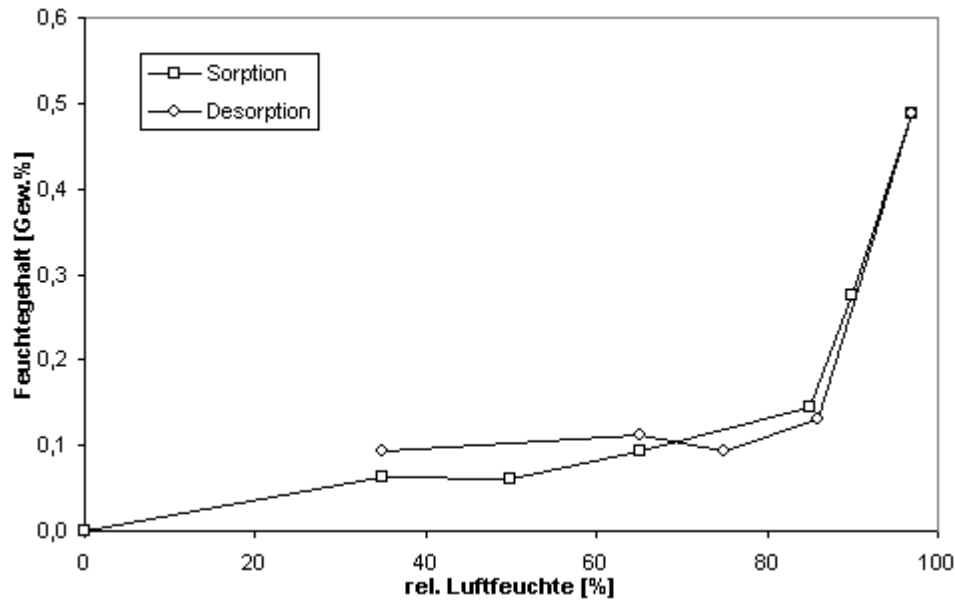
Rohdichte	[g/cm ³]	1,81
Offene Porosität	[Vol%]	24,4
Freie Wasseraufn.	[M%]	13,5
DF*	[N/mm ²]	8,7
w-Wert	Z-2 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	7,86
w-Wert	Z-2 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	7,56 +/- 0,15

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

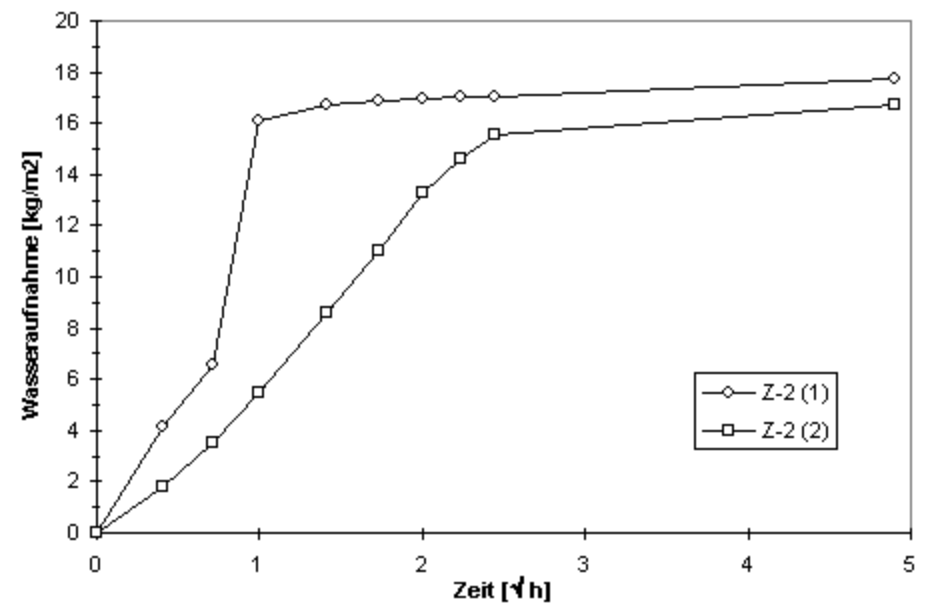
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-2



Sorption / Desorption Probe Z-2



Wasseraufnahme Probe Z-2

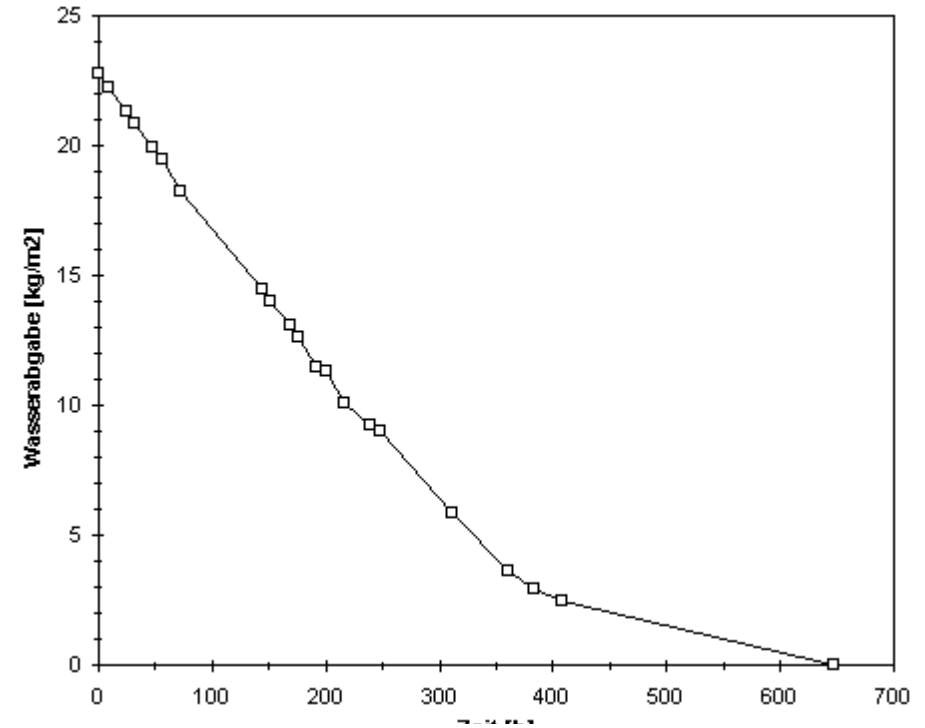


Ziegel Z-3

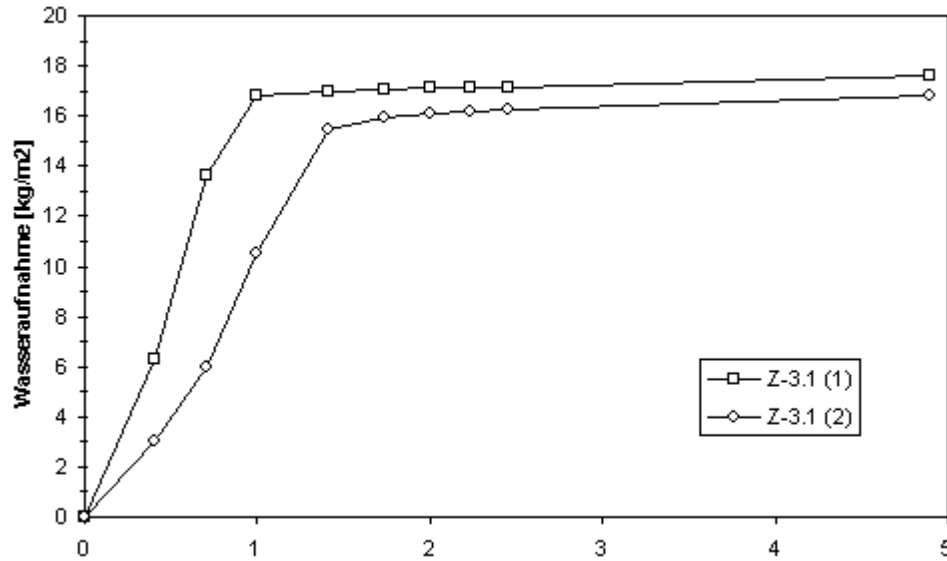
Rohdichte	[g/cm ³]	1,74
Offene Porosität	[Vol%]	26
Freie Wasseraufn.	[M%]	15
DF*	[N/mm ²]	8,9
w-Wert	Z-3.1 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	17,51 +/- 1,16
w-Wert	Z-3.1 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	12,64 +/- 0,50
w-Wert	Z-3.2 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	12,80 +/- 0,50

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

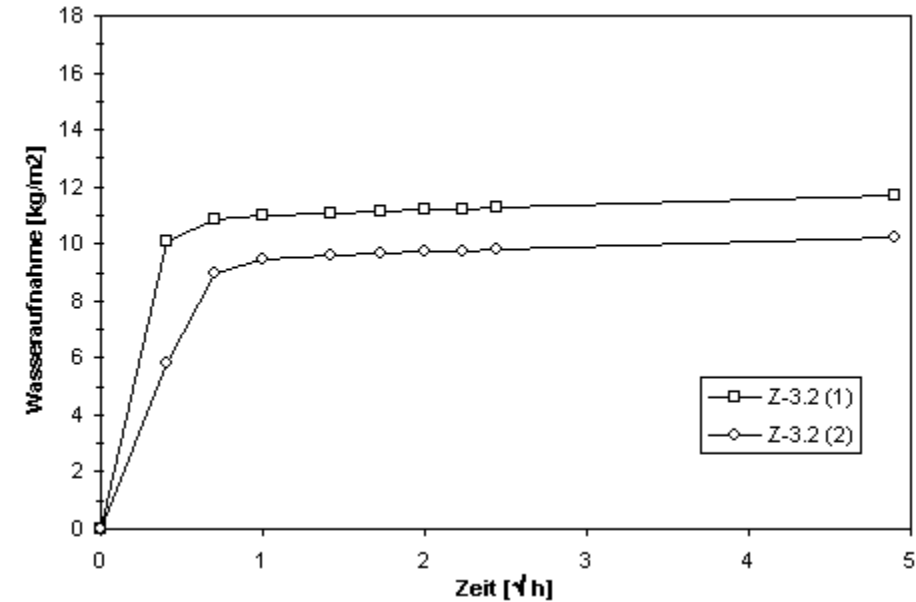
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-3



Wasseraufnahme Probe Z-3.1



Wasseraufnahme Probe Z-3.2

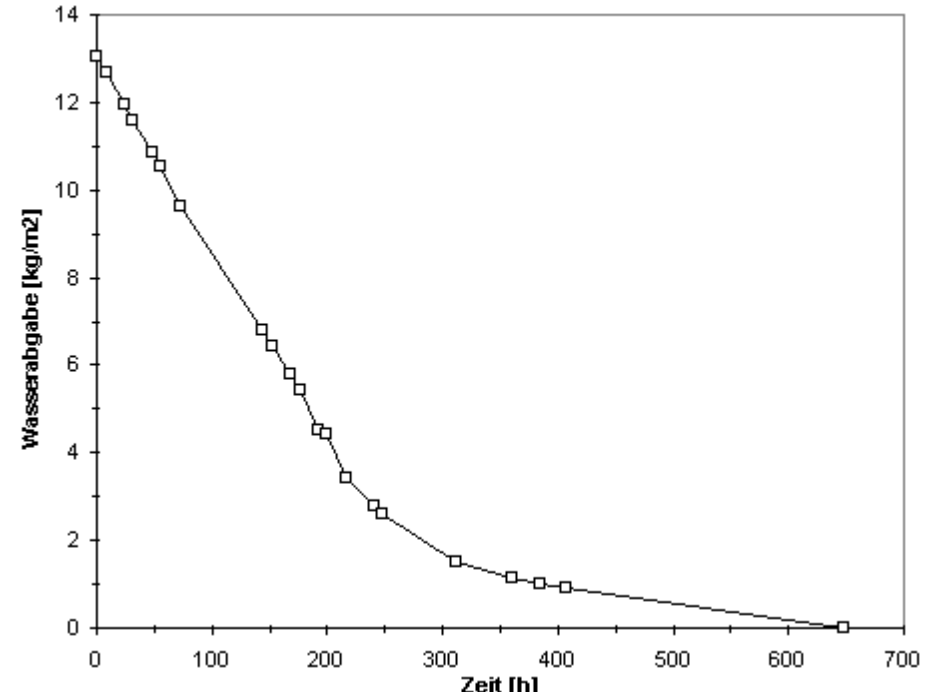


Ziegel Z-4

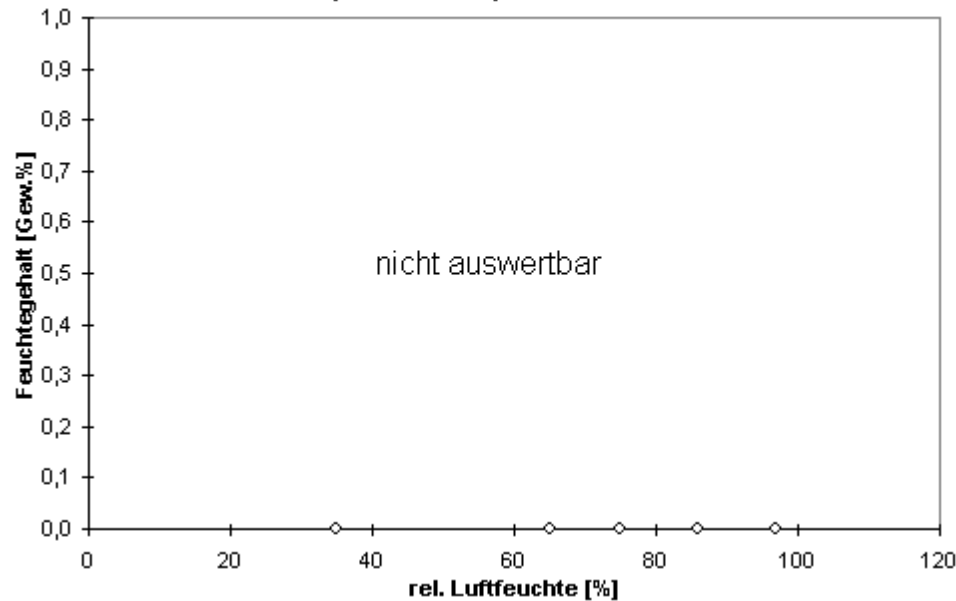
Rohdichte	[g/cm ³]	1,74
Offene Porosität	[Vol%]	26
Freie Wasseraufn.	[M%]	14,9
DF*	[N/mm ²]	9,8
w-Wert	Z-4 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	7,29 +/- 0,01
w-Wert	Z-4 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	3,18 +/- 0,20

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

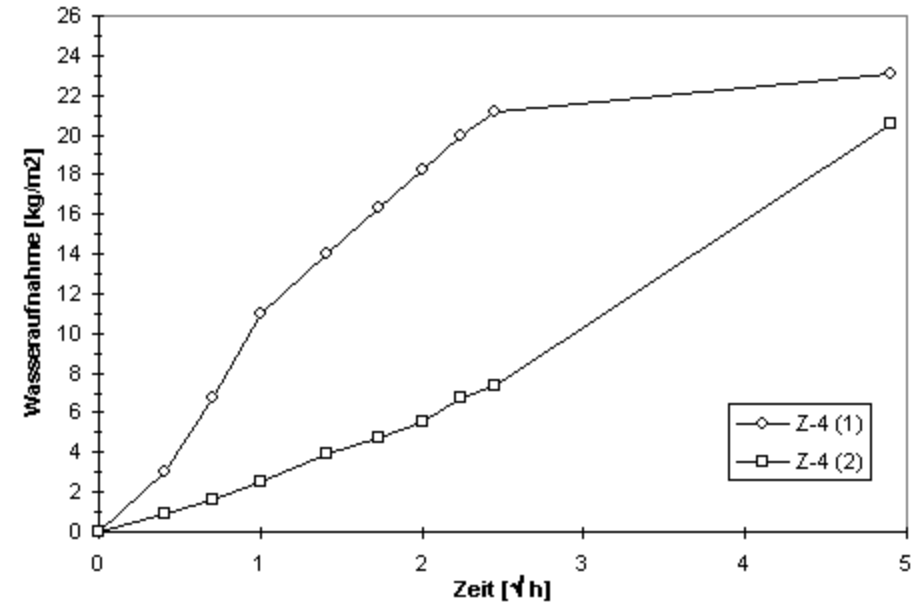
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-4



Sorption / Desorption Probe Z-4



Wasseraufnahme Probe Z-4

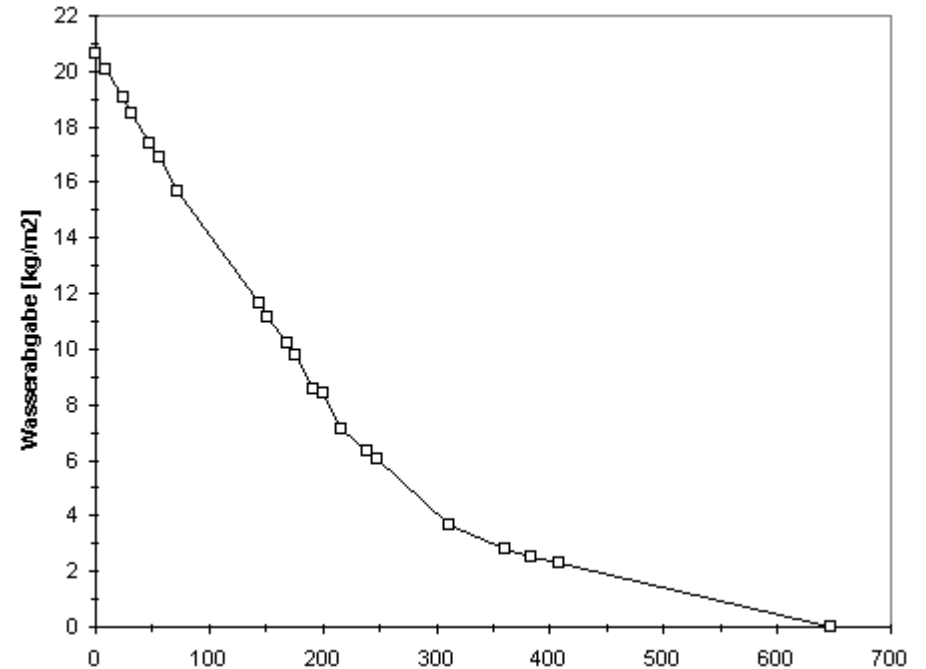


Ziegel Z-5

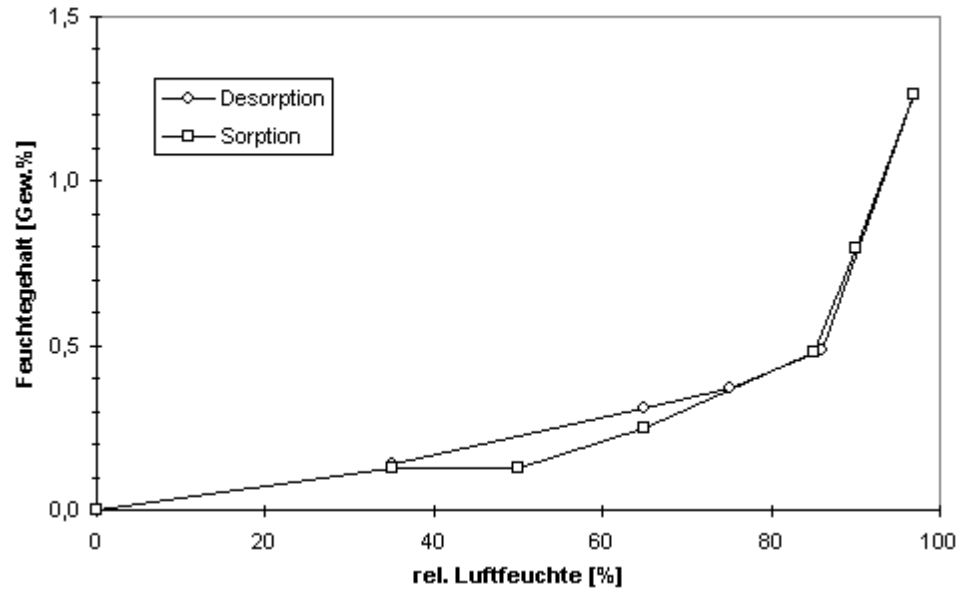
Rohdichte	[g/cm ³]	1,81	
Offene Porosität	[Vol%]	26,1	
Freie Wasseraufn.	[M%]	14,4	
DF*	[N/mm ²]	12,6	
w-Wert	Z-5 (1)	[kg/(m ² h ^{0,5})]	7,99 +/- 0,27
	Z-5 (2)	[kg/(m ² h ^{0,5})]	6,06 +/- 0,31

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

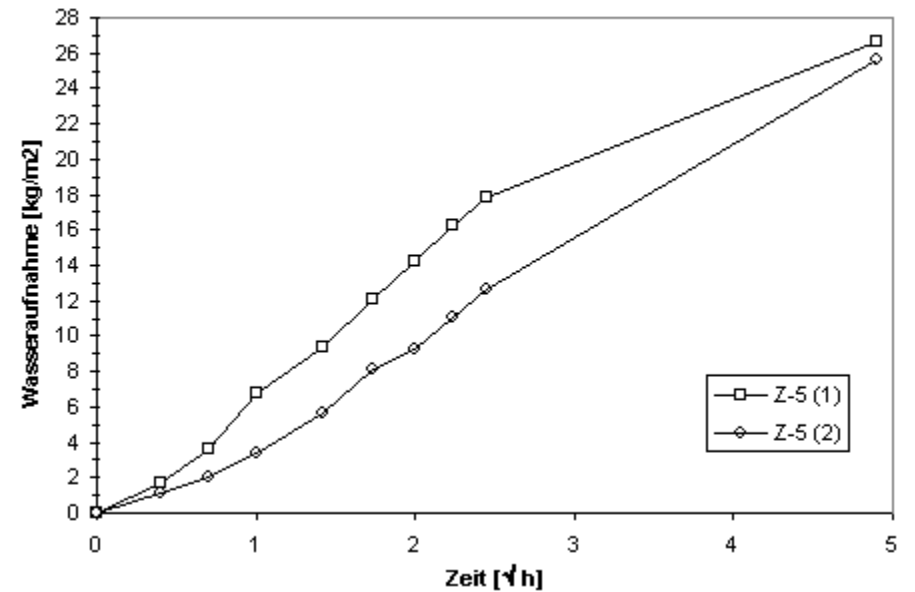
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-5



Sorption / Desorption Probe Z-5



Wasseraufnahme Probe Z-5

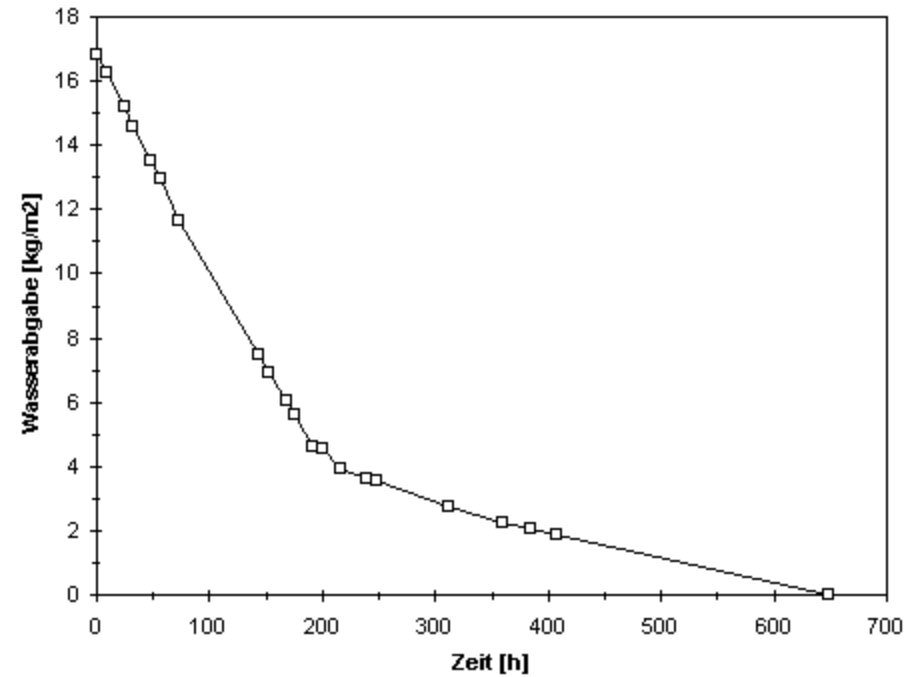


Ziegel Z-6

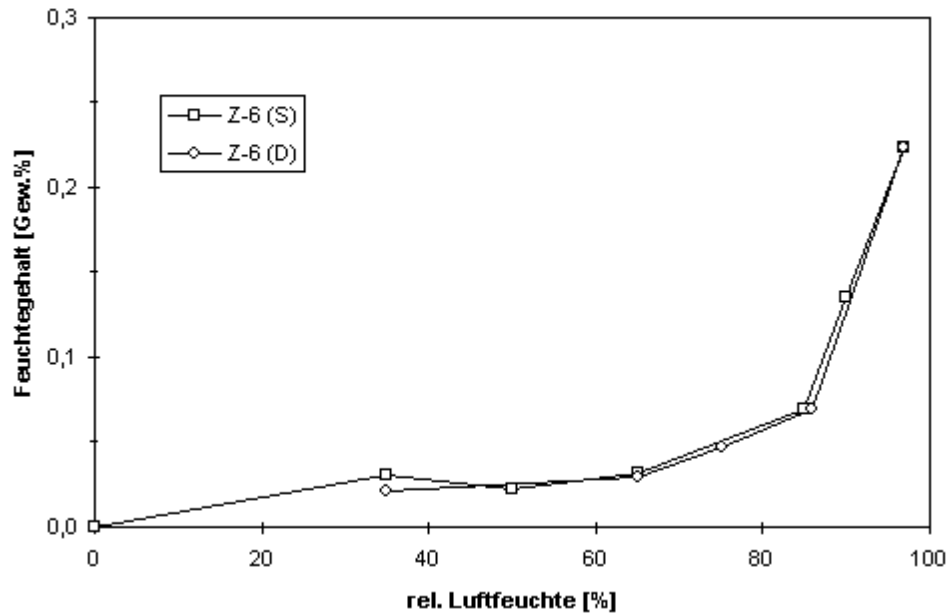
Rohdichte	[g/cm ³]	1,92
Offene Porosität	[Vol%]	20
Freie Wasseraufn.	[M%]	10,4
DF*	[N/mm ²]	7,6
w-Wert	Z-6 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	2,49 +/- 0,20
	Z-6 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	1,48 +/- 0,17

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

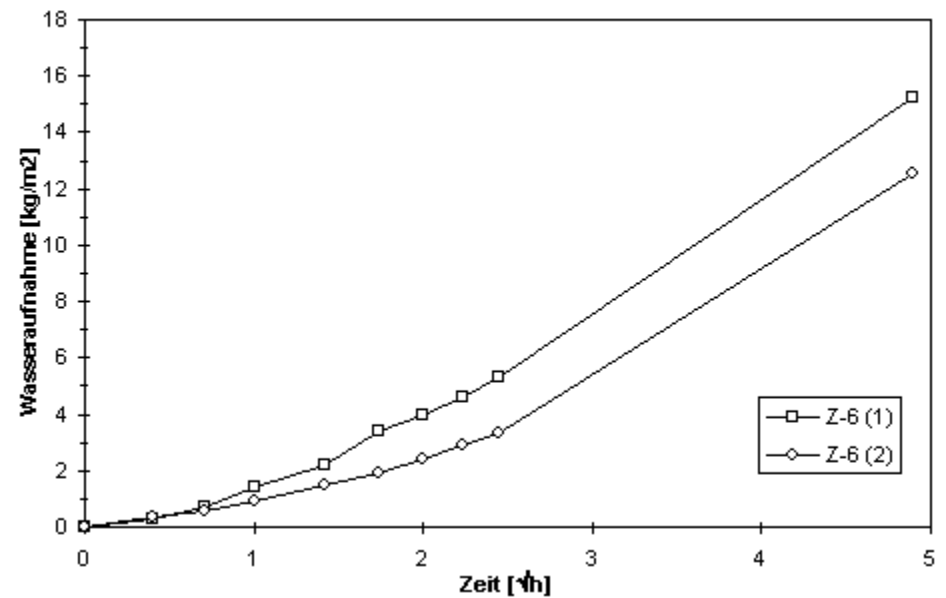
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-6



Sorption / Desorption Probe Z-6



Wasseraufnahme Probe Z-6

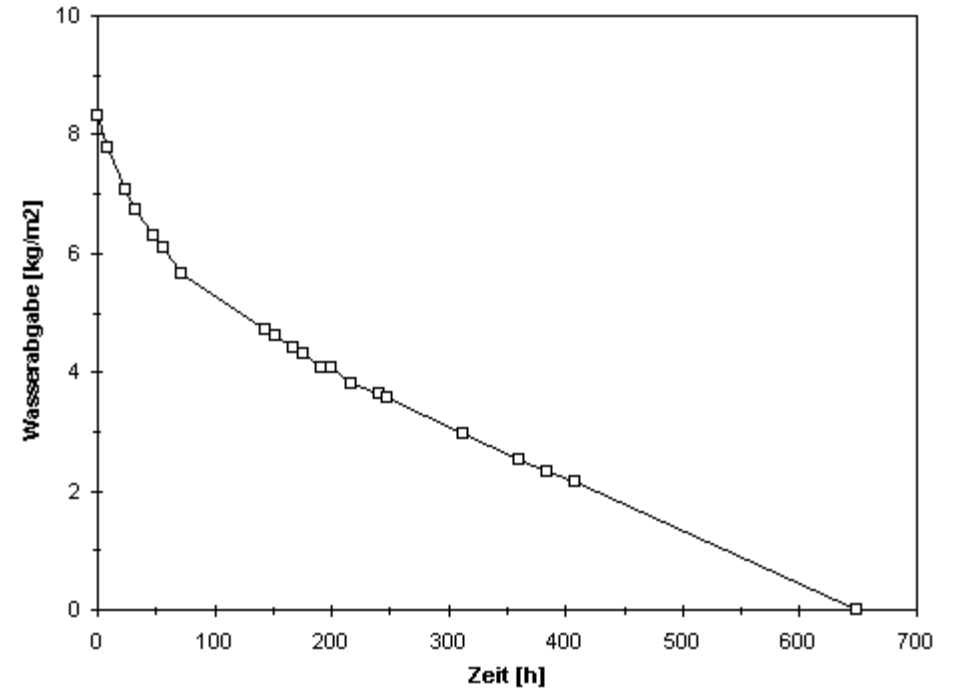


Ziegel Z-7

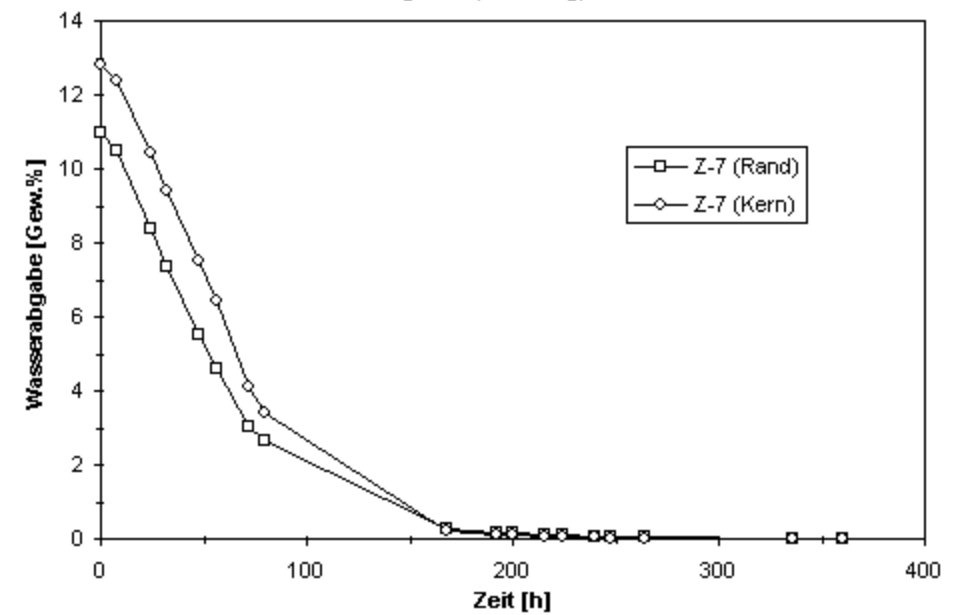
		Rand	Kern
Rohdichte	[g/cm ³]	1,8	1,76
Offene Porosität	[Vol%]	21,6	23,6
Freie Wasseraufn.	[M%]	12,0	13,4
DF*	[N/mm ²]	9,4	
w-Wert	Z-7 [kg/(m ² h ^{0,5})]	2,10 +/- 0,13	
	(Rand)		
	Z-7 [kg/(m ² h ^{0,5})]	0,90 +/- 0,11	
	(Kern)		

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

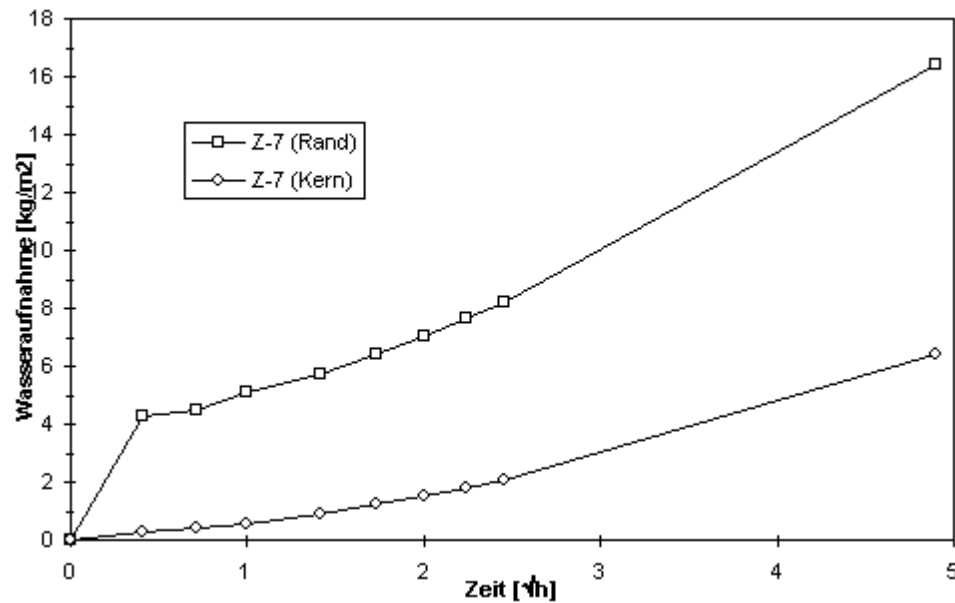
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-7



Wasserabgabe (allseitig) Probe Z-7

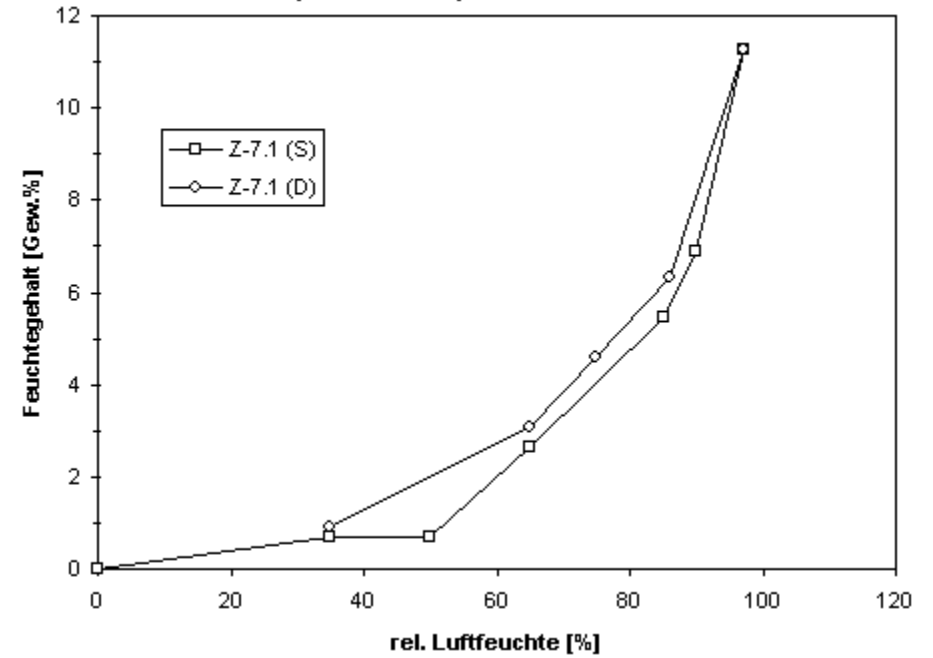


Wasseraufnahme Probe Z-7

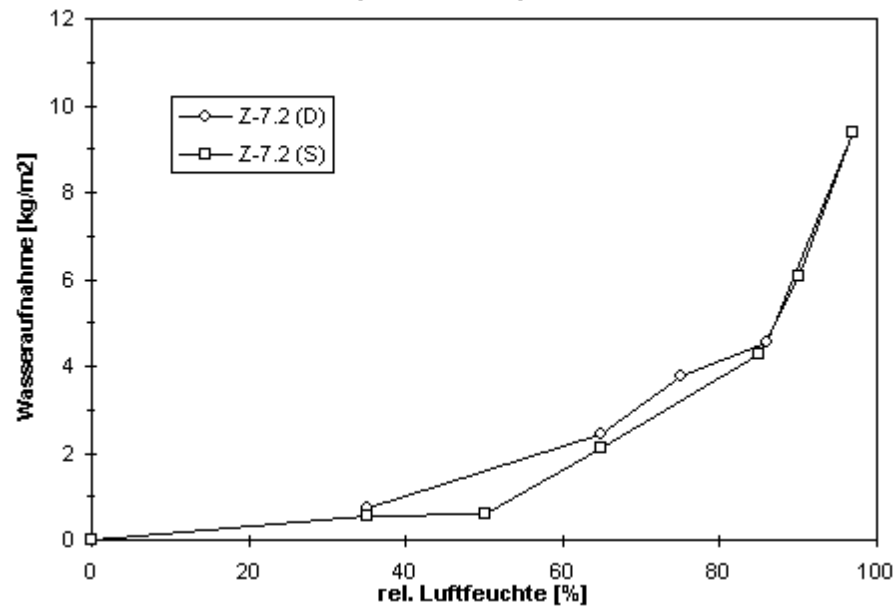


Ziegel Z-7

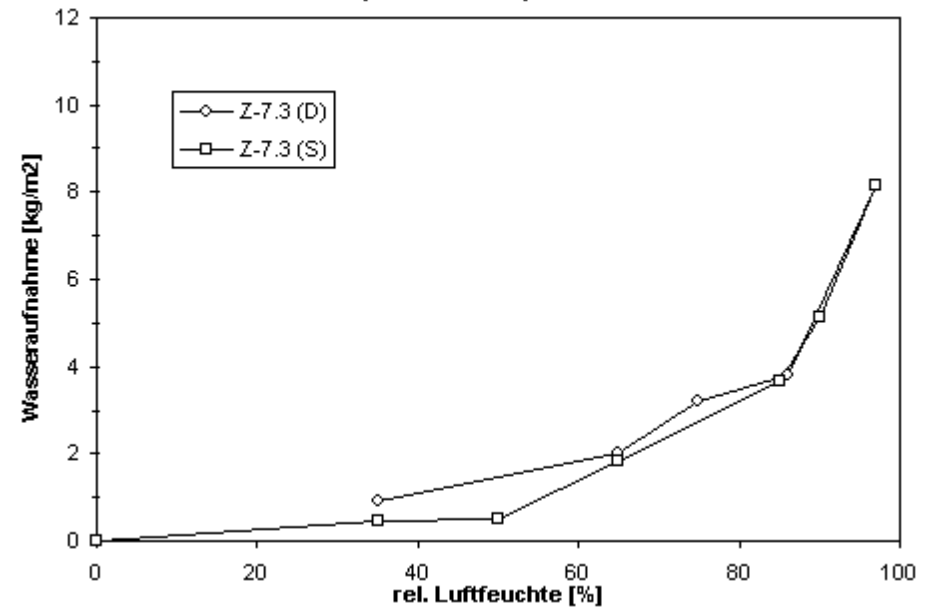
Sorption / Desorption Probe Z-7.1



Sorption / Desorption Z-7.2



Sorption / Desorption Z-7.3

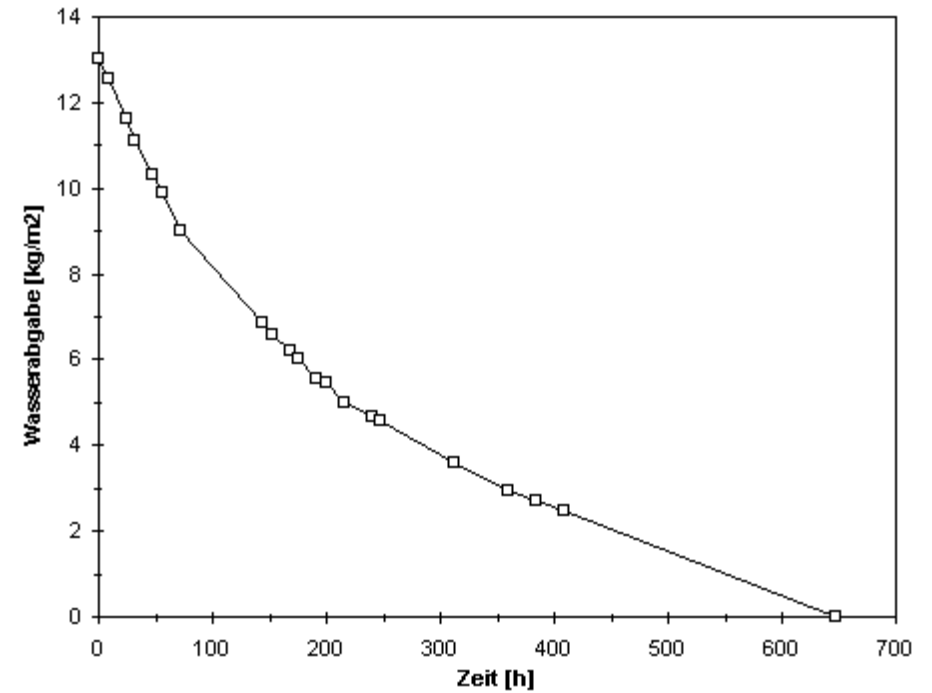


Ziegel Z-10

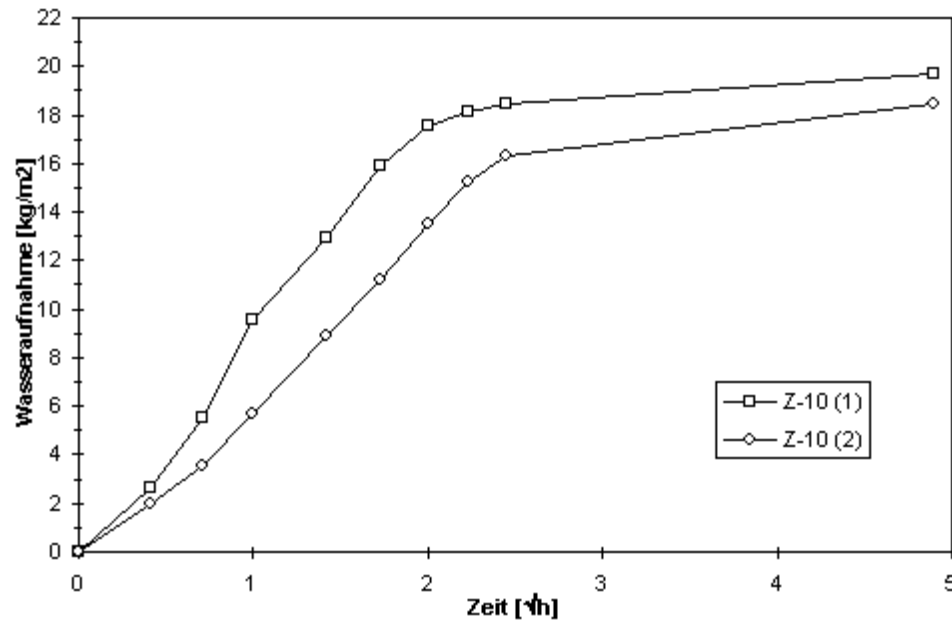
Rohdichte	[g/cm ³]	1,73
Offene Porosität	[Vol%]	25,8
Freie Wasseraufn.	[M%]	14,9
DF*	[N/mm ²]	8,5
w-Wert	Z-10 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	9,51 +/- 0,66
	Z-10 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	7,70 +/- 0,09

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

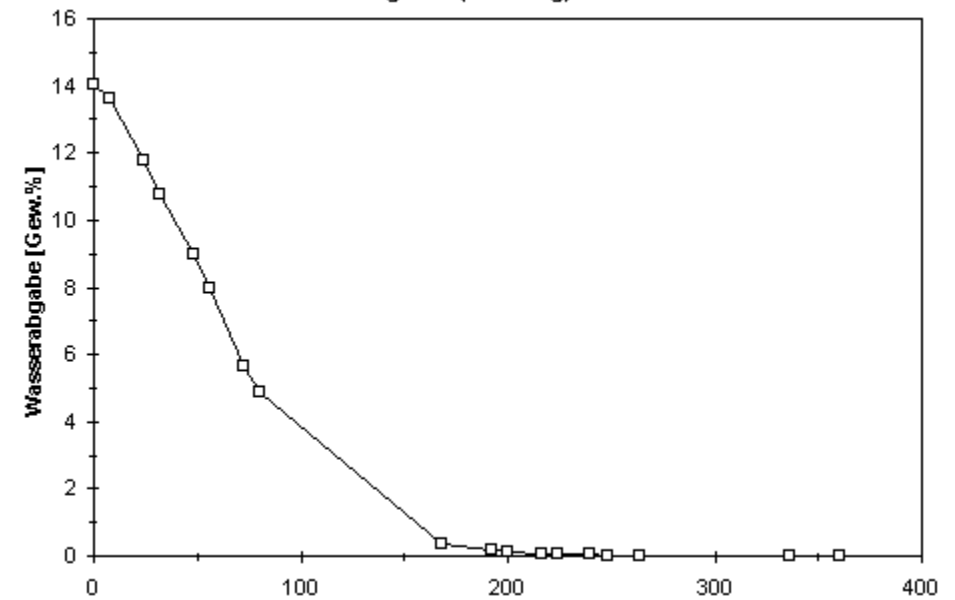
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-10



Wasseraufnahme Probe Z-10



Wasserabgabe (allseitig) Probe Z-10

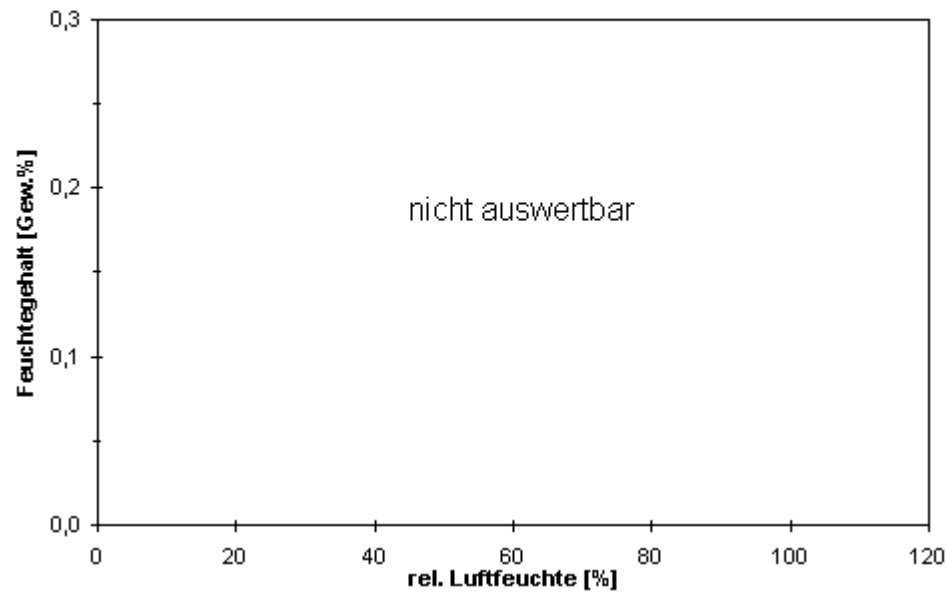


Ziegel Z-11

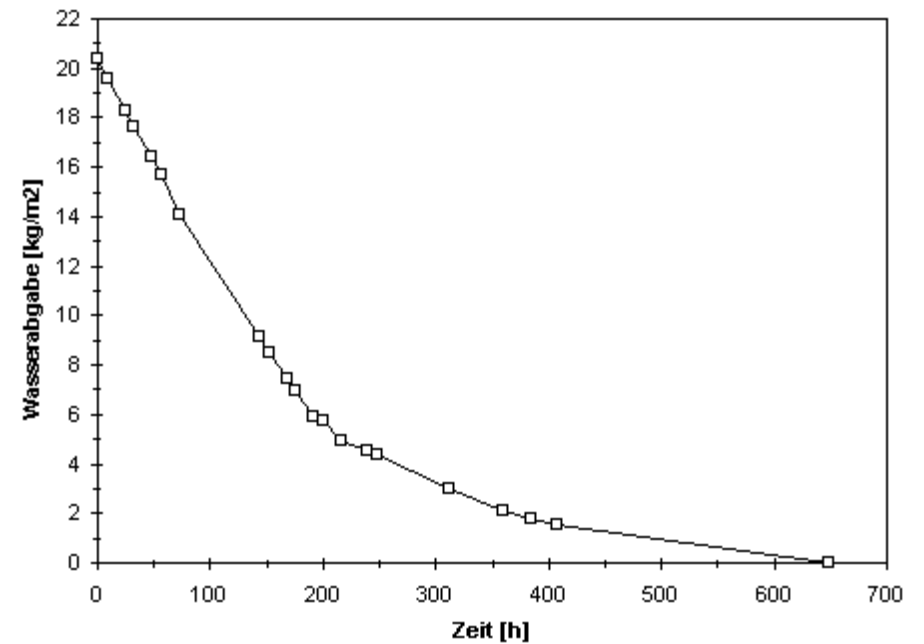
Rohdichte	[g/cm ³]	1,88
Offene Porosität	[Vol%]	15,2
Freie Wasseraufn.	[M%]	8,1
DF*	[N/mm ²]	24
w-Wert	Z-11 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	11,74 +/- 0,13
	Z-11 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	9,20 +/- 0,57

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

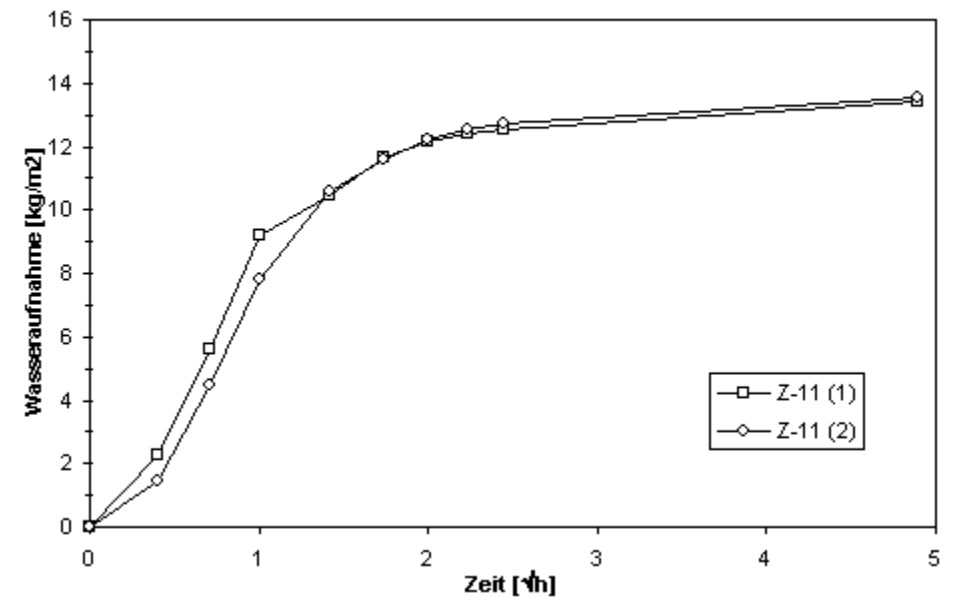
Sorption / Desorption Probe Z-11



Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-11



Wasseraufnahme Probe Z-11

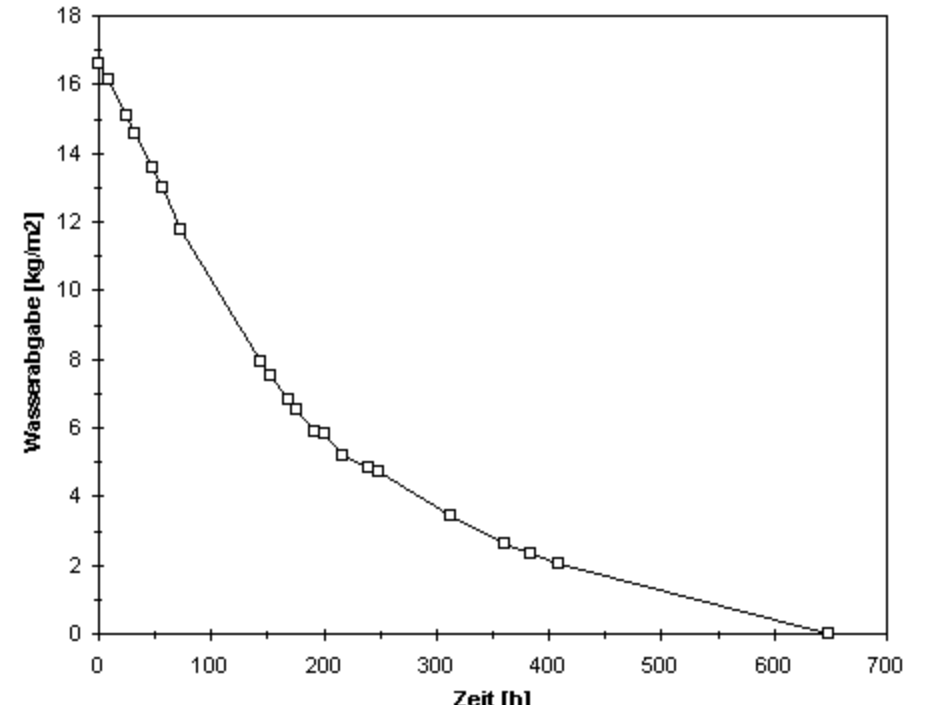


Ziegel Z-12

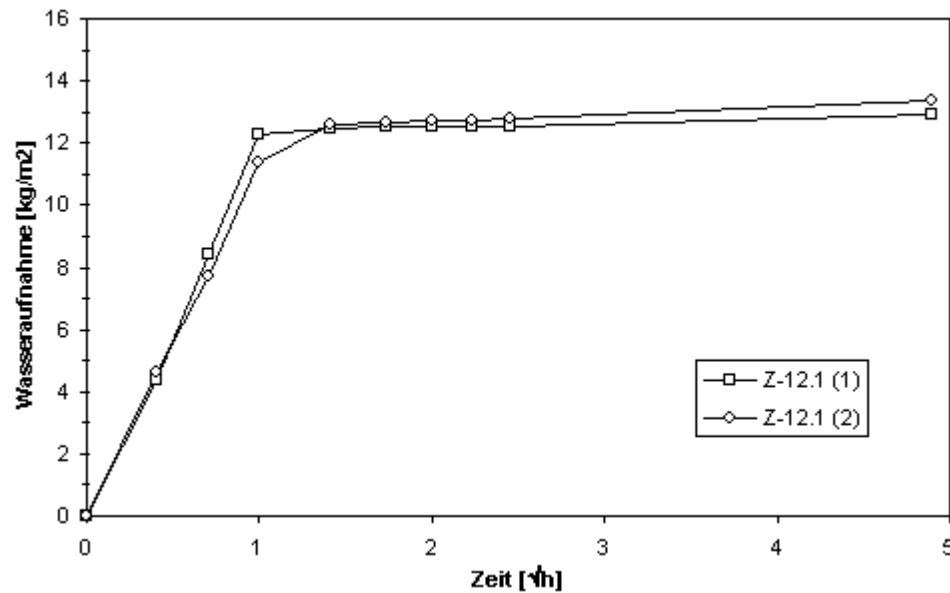
Rohdichte	[g/cm ³]	1,85
Offene Porosität	[Vol%]	19,4
Freie Wasseraufn.	[M%]	10,5
DF*	[N/mm ²]	zerfallen
w-Wert	Z-12.1 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	13,32 +/- 0,04
	Z-12.1 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	11,32 +/- 0,24

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

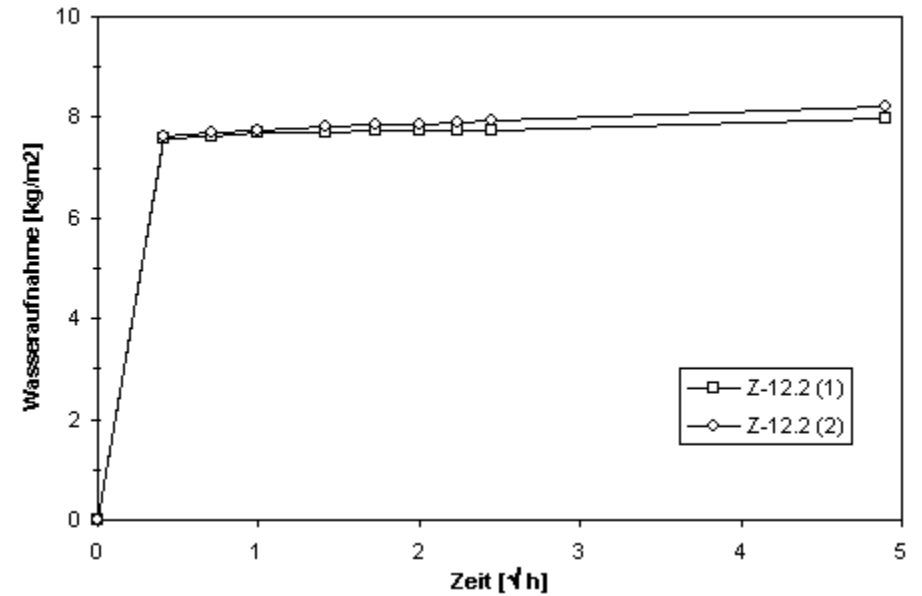
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-12



Wasseraufnahme Probe Z-12.1



Wasseraufnahme Probe Z-12.2

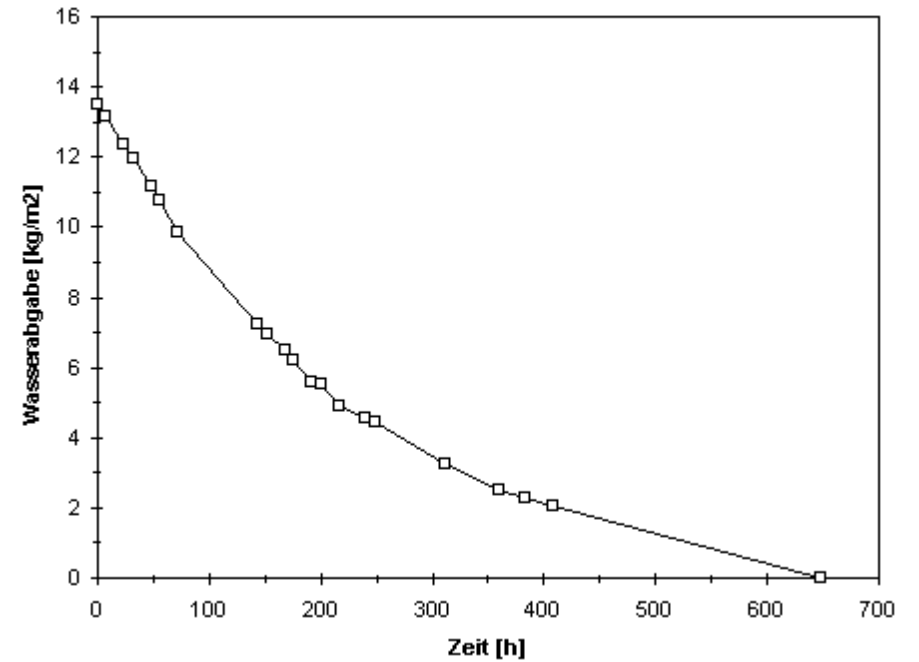


Ziegel Z-13

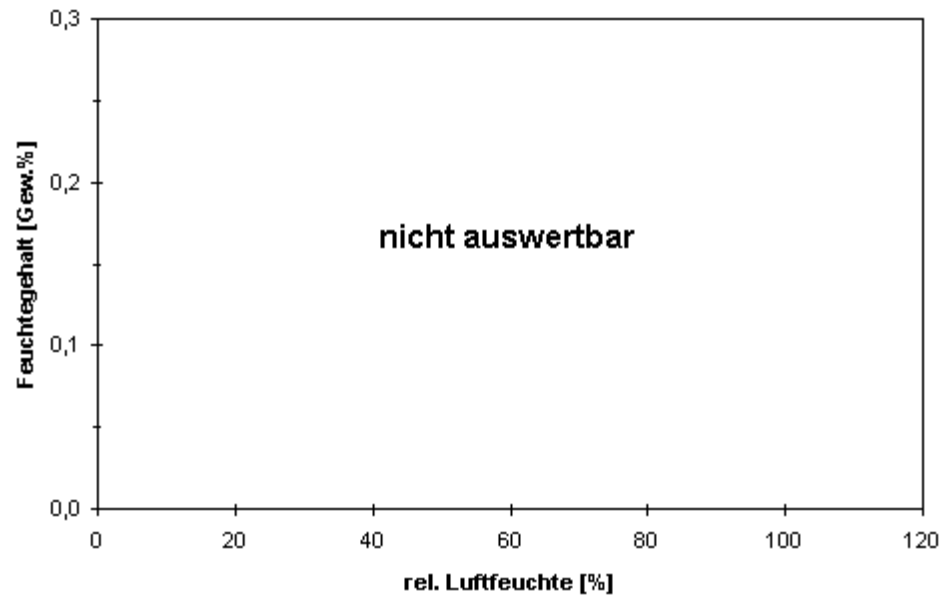
Rohdichte	[g/cm ³]	1,78
Offene Porosität	[Vol%]	24,6
Freie Wasseraufn.	[M%]	13,8
DF*	[N/mm ²]	11,1
w-Wert	Z-13 (1) [kg/(m ² h ^{0,5})]	19,41
	Z-13 (2) [kg/(m ² h ^{0,5})]	12,31 +/- 0,70

* nur ein Prüfkörper (halber Ziegel)

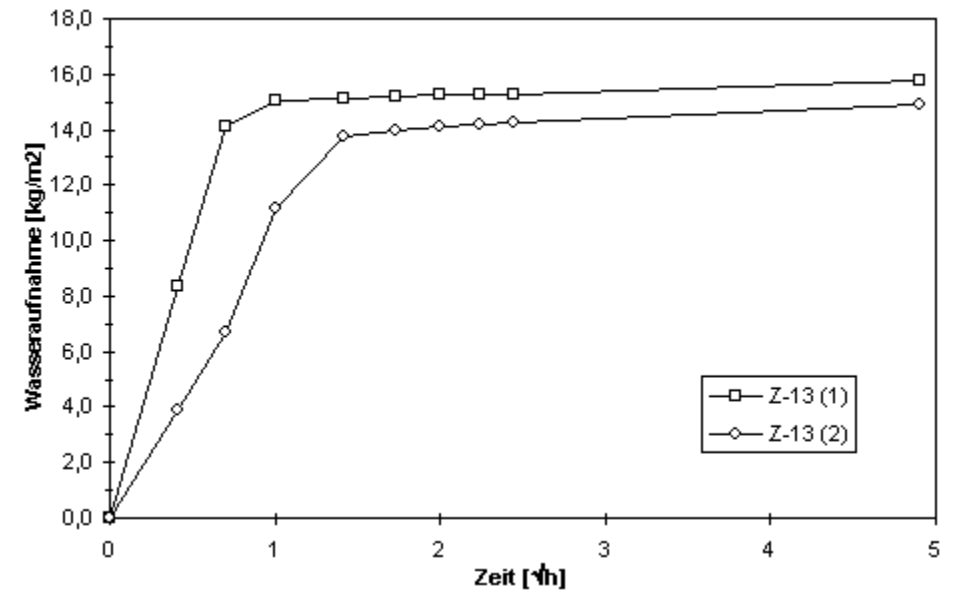
Wasserabgabe (eindimensional) Probe Z-13

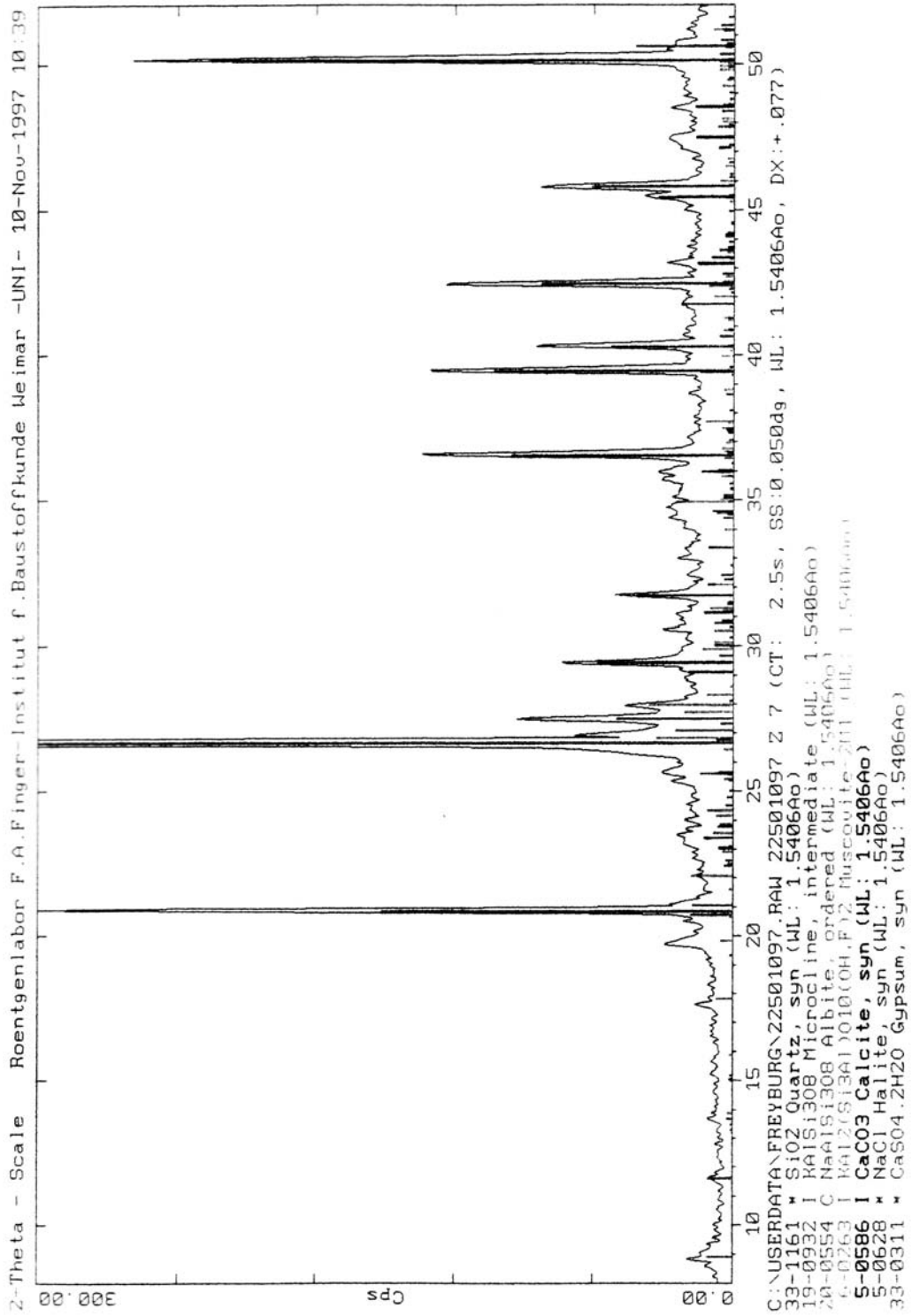


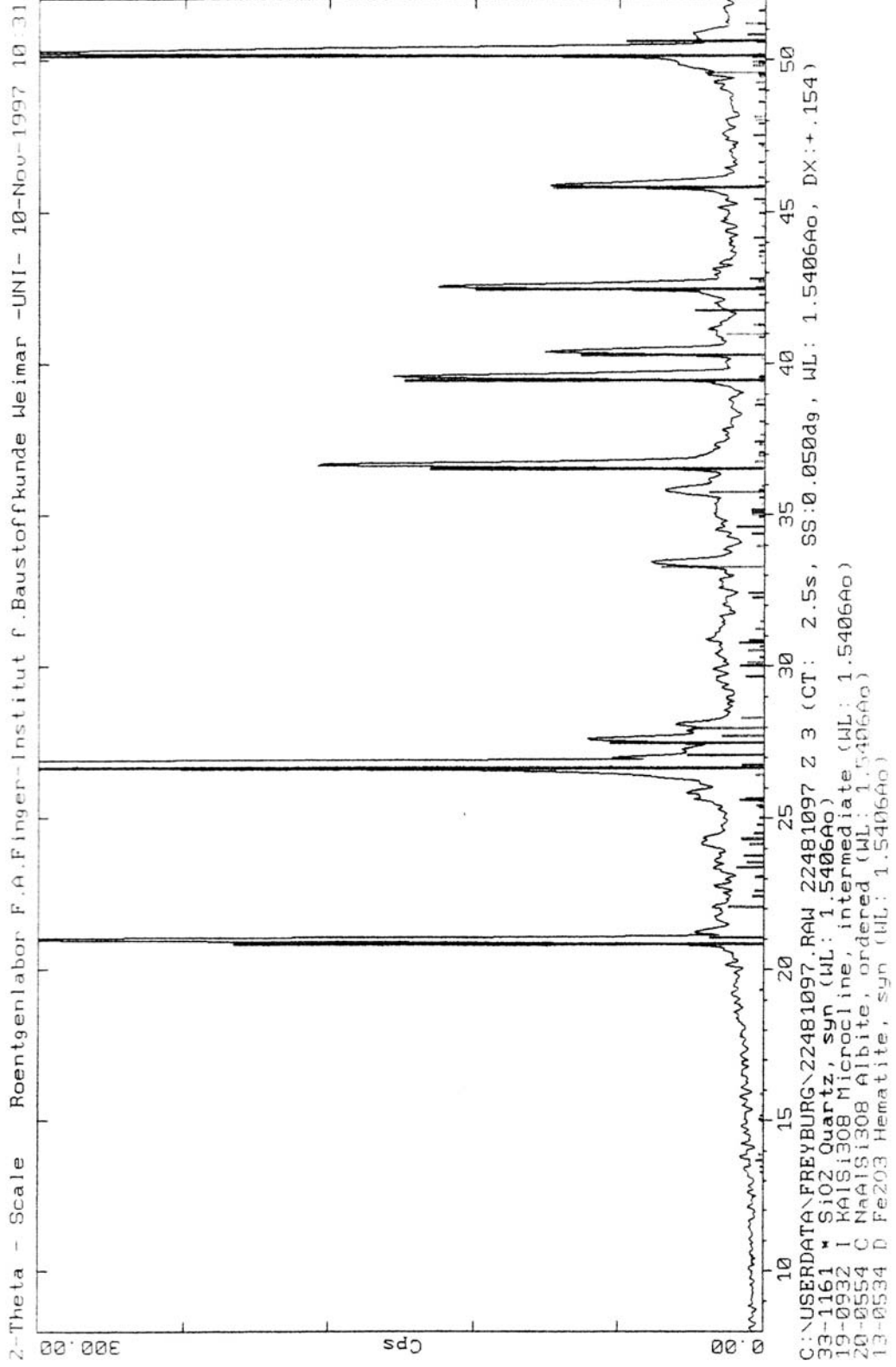
Sorption / Desorption Probe Z-13

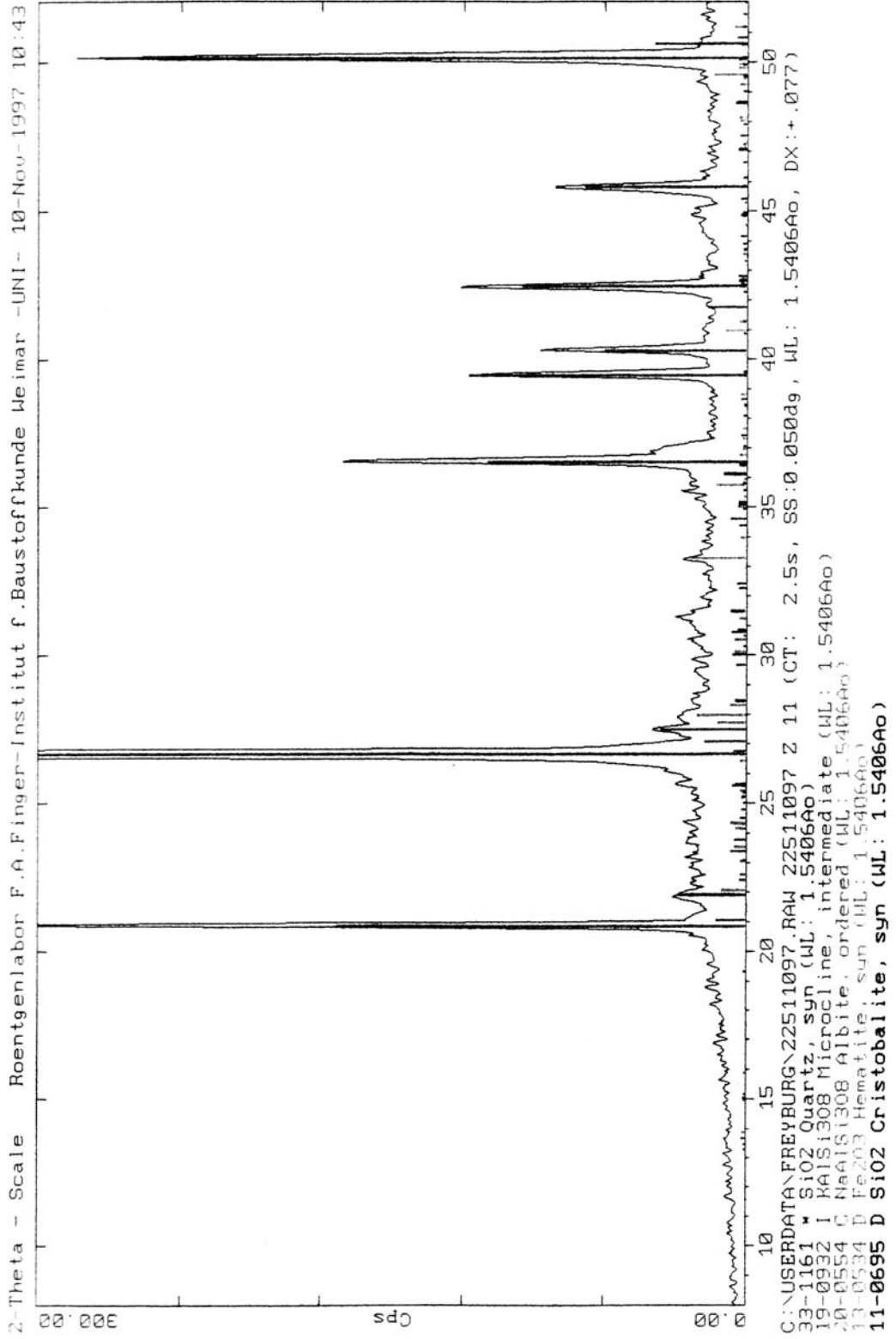


Wasseraufnahme Probe Z-13









Mörtel :Technisch-physikalisch Kennwerte(Graphiken)

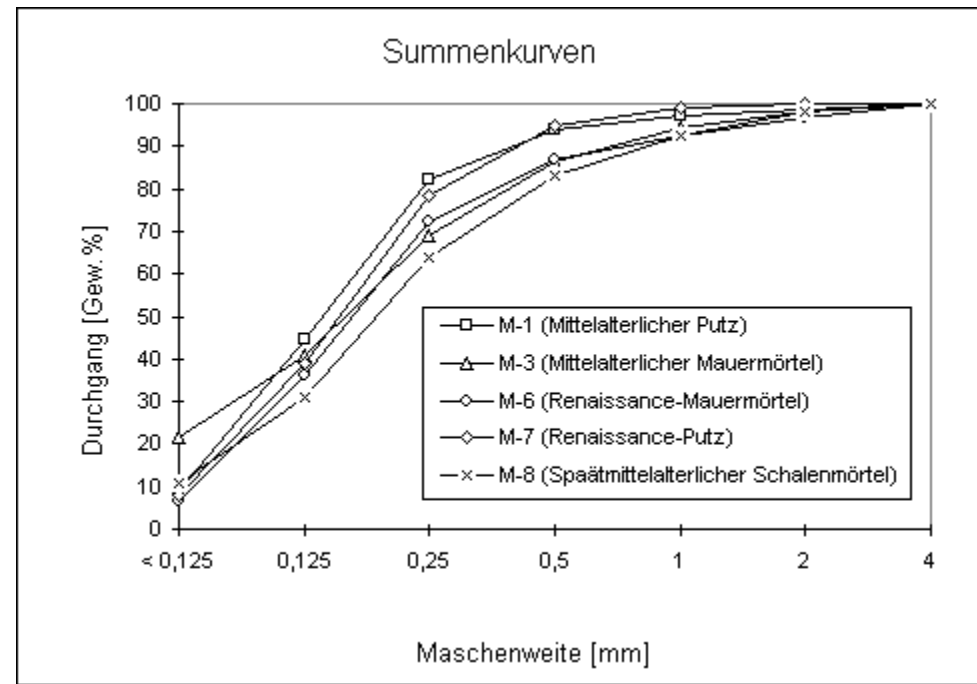
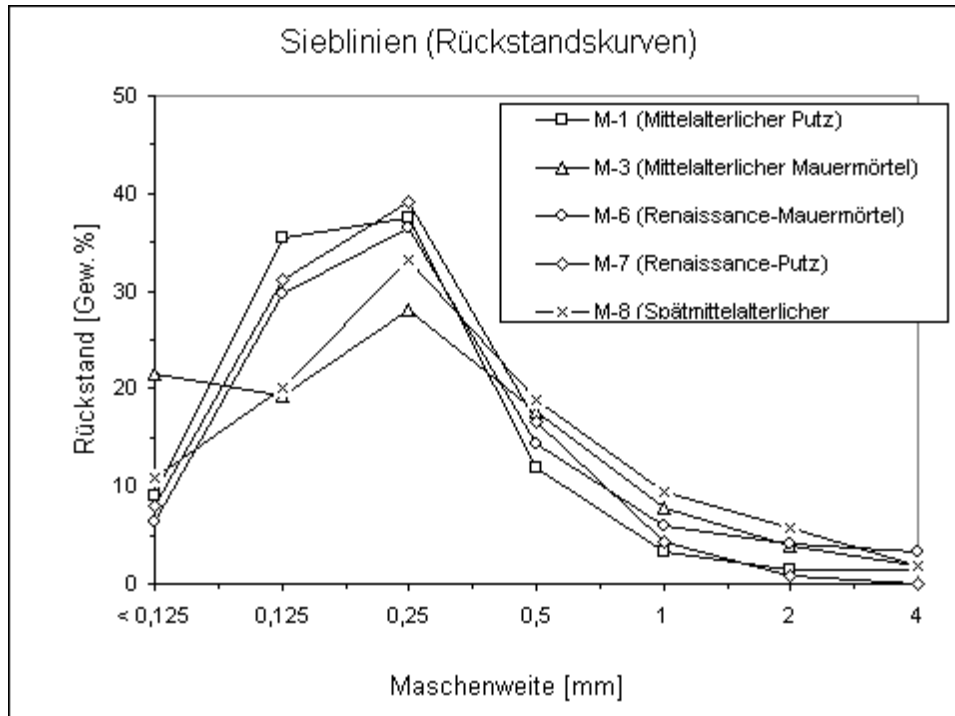
Proben Nr.	Abmessungen in mm			Bruchlast	Druckfestigkeit
	Länge	Breite	Höhe		
M-1	43	44	9	2838	1,5
M-2	48	34	7	1536	0,9
M-3	47	42	13	1173	0,6
M-5	49	46	6	3274	1,5
M-6	38	38	42	1300	0,9
M-7	65	41	7	726	0,3
M-8	38	40	39	10500	6,9

Objekt: **Burg Stargard / Mörtelproben**

Ew.: Einzelwert
 Mw.: Mittelwert
 StAw.: Standardabweichung

Proben Nr.		Gewichte in g			Volumen	Rohdichte [g/cm ³]			Offene Porosität [Vol.-%]			Fr. Wasseraufnahme [M%]		
		trocken	feucht	u. Wasser		Ew.	Mw.	StAw.	Ew.	Mw.	StAw.	Ew.	Mw.	StAw.
M-1	a	13	14,7	7,9	6,8	1,91	1,91	0,05	25,0	23,68	1,86	13,1	12,40	1,27
	b	22,6	25	13,6	11,4	1,98			21,1			10,6		
M-2	a	17,7	19,4	10,4	9	1,97	1,96	0,03	18,9	21,68	1,97	9,6	11,05	1,04
	b	10	11,2	6	5,2	1,92			23,1			12,0		
M-3	a	33,4	38,3	20	18,3	1,83	1,79	0,02	26,8	26,98	0,21	14,7	15,07	0,29
	b	34,2	39,5	20,1	19,4	1,76			27,3			15,5		
	c	11,3	13	6,7	6,3	1,79			27,0			15,0		
M-5	a	58,4	67,2	34,4	32,8	1,78	1,62	0,03	26,8	28,11	0,84	15,1	17,30	0,16
	b	18,6	19,1	9,6	9,5	1,66			28,9			17,5		
M-6	a	6,3	7,4	3,6	3,8	1,59	1,77	0,04	27,3	23,32	1,84	17,1	13,23	1,33
	b	3,5	4,1	1,9	2,2	1,73			21,5			11,9		
M-7	a	26,9	30,1	15,2	14,9	1,81	1,62	0,05	25,2	31,96	2,93	14,6	19,77	1,61
	b	79,7	91,3	45,2	46,1	1,73			36,0			22,5		
	c	4	4,9	2,4	2,5	1,60			33,3			20,5		
	d	4,4	5,3	2,6	2,7	1,63			28,6			18,2		
	e	2,2	2,6	1,2	1,4	1,57			33,3			19,5		
	f	4,1	4,9	2,5	2,4	1,71			28,6			18,2		

M-8	51	58,2	29,3	28,9	1,76	1,73	0,03	24,9	26,88	1,96	14,1	15,52	1,40
	a	236,5	276,5	137,8	138,7			1,71			28,8		

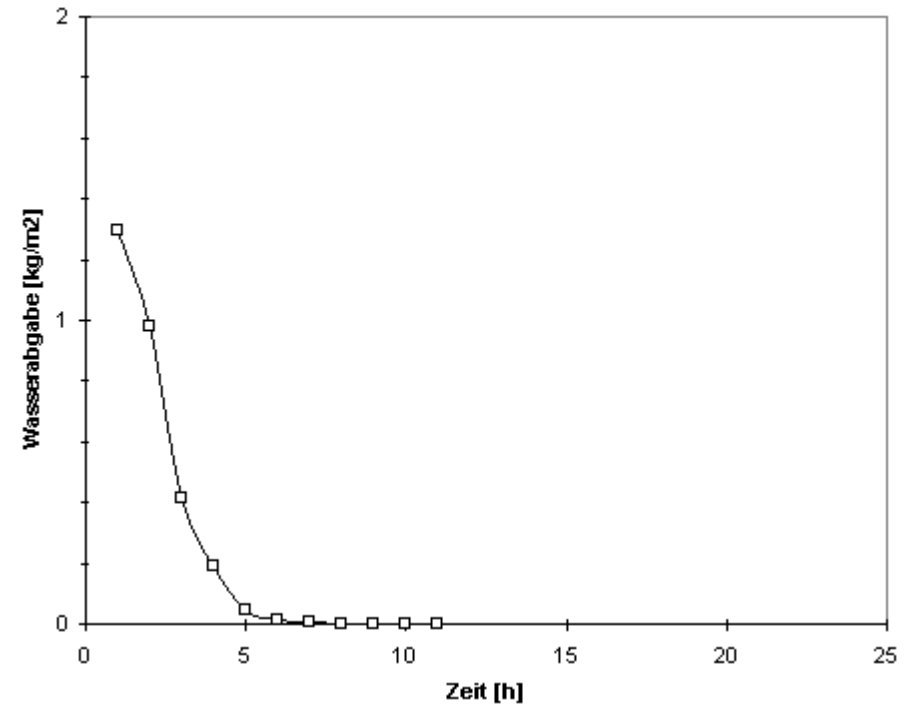


Mörtel M-1

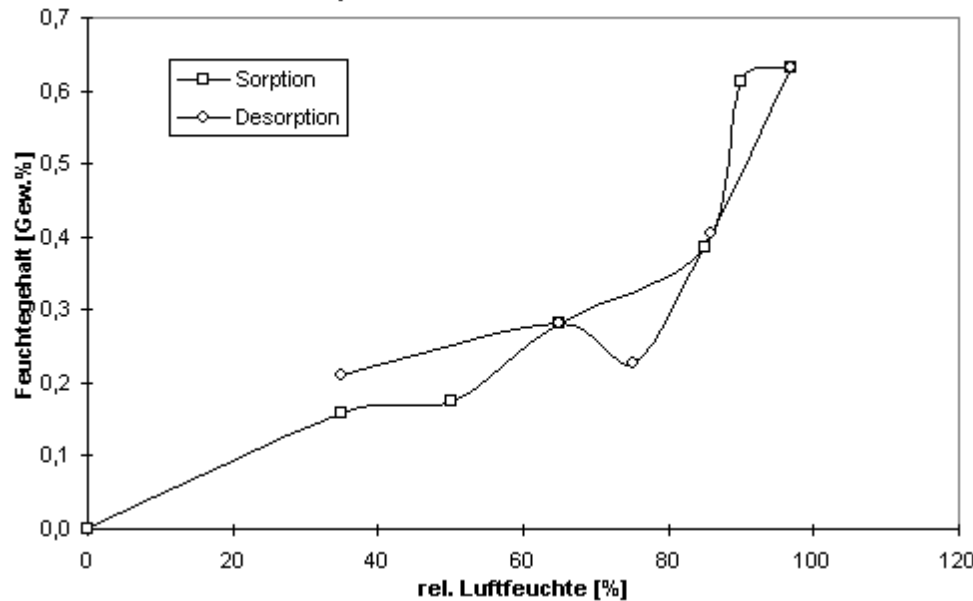
		Mittelwerte	St.Aw
Rohdichte	[g/cm ³]	1,91	0,05
Offene Porosität	[Vol%]	23,68	1,86
Freie Wasseraufn.	[M%]	12,4	1,27
DF *	[N/mm ²]	1,5	
w-Wert *	[kg/(m ² h ^{0,5})]	n.b.	

* aufgrund der Probengröße nicht sicher bestimmbar
 St.Aw.: Standardabweichung [vgl. Anlage 6.3 (1)]

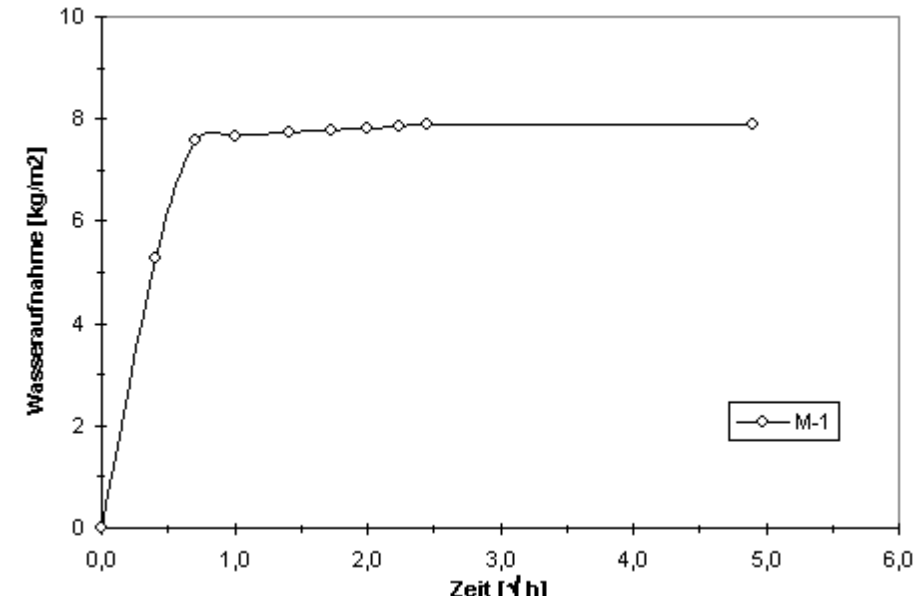
Wasserabgabe (eindimensional) Probe M-1



Sorption / Desorption Probe M-1



Wasseraufnahme Probe M-1

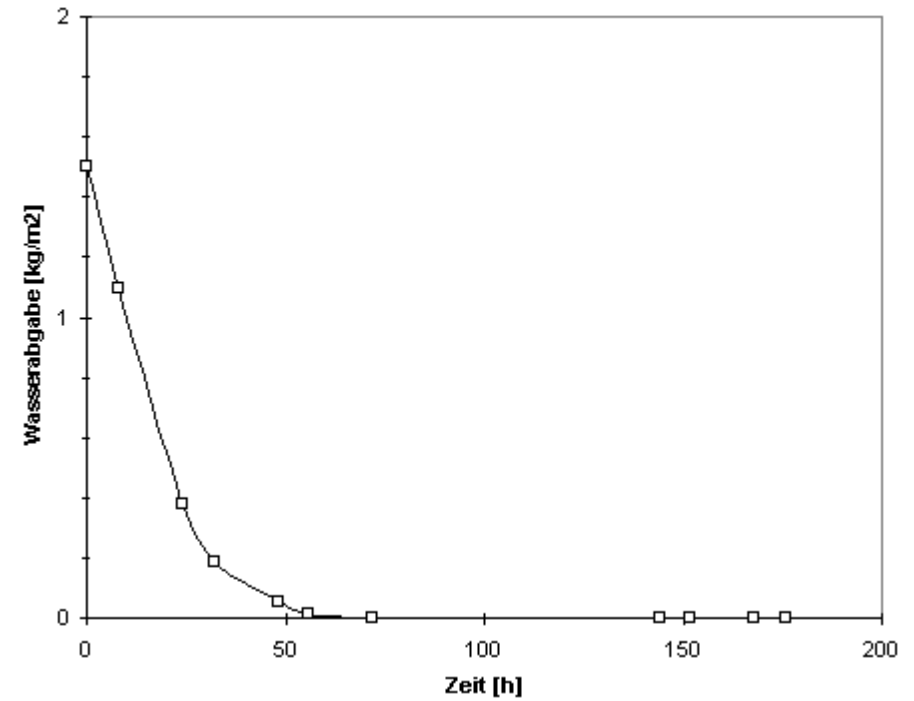


Mörtel M-2

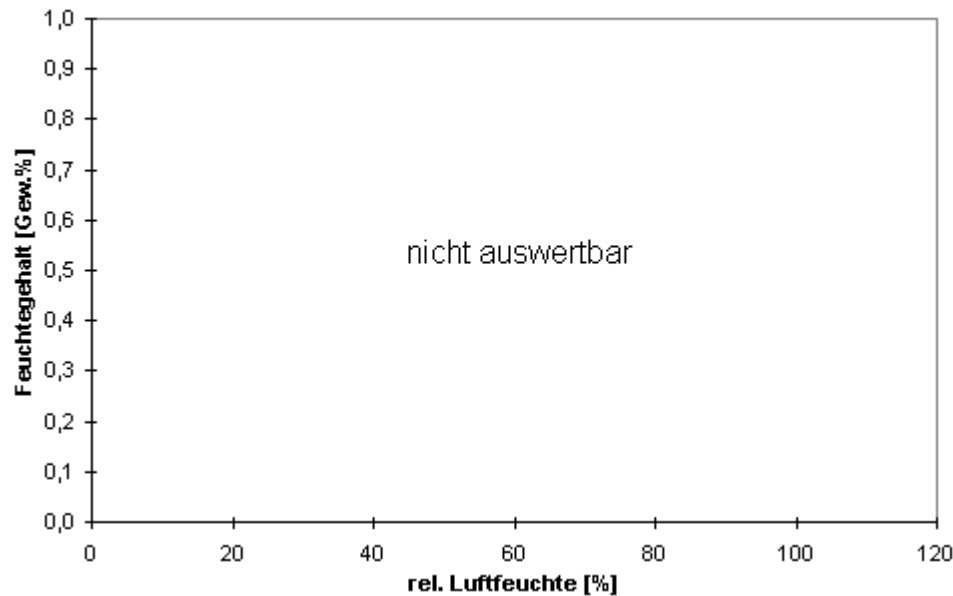
		Mittelwerte	St.Aw.
Rohdichte	[g/cm ³]	1,96	0,03
Offene Porosität	[Vol%]	21,68	1,97
Freie Wasseraufn.	[M%]	11,1	1,04
DF*	[N/mm ²]	0,9	
w-Wert	[kg/(m ² h ^{0,5})]	28,41	

* aufgrund der Probengröße nicht sicher bestimmbar
 St.Aw.: Standardabweichung [vgl. Anlage 6.3 (1)]

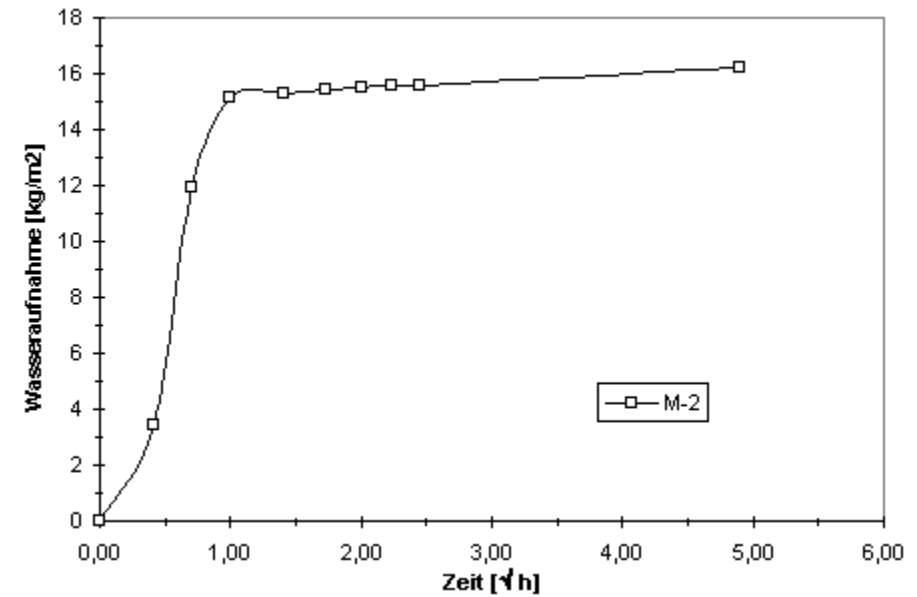
Wasserabgabe (eindimensional) Probe M-2



Sorption / Desorption Probe M-2



Wasseraufnahme Probe M-2

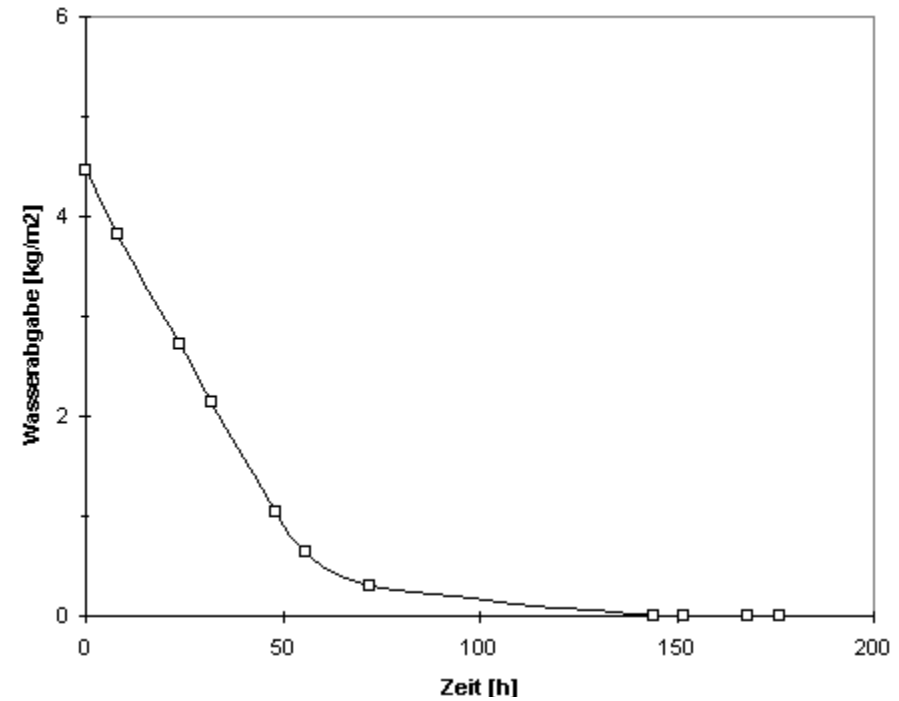


Mörtel M-3

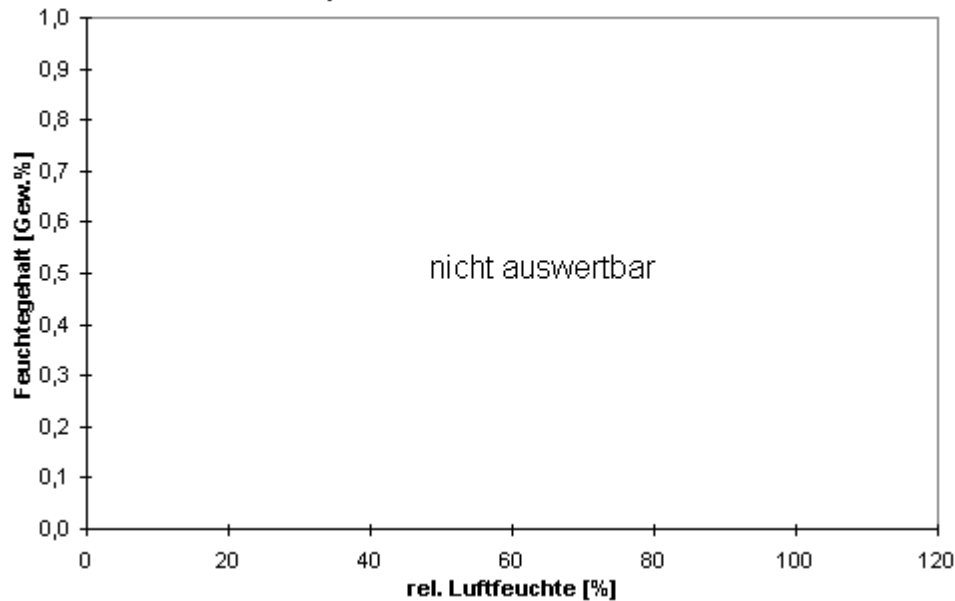
		Mittelwerte	St.A
Rohdichte	[g/cm ³]	1,79	0,0
Offene Porosität	[Vol%]	26,98	0,2
Freie Wasseraufn.	[M%]	15,1	0,2
DF*	[N/mm ²]	0,6	
w-Wert	[kg/(m ² h ^{0,5})]	16,58	+/- 0,9

* aufgrund der Probengröße nicht sicher bestimmbar
 St.Aw.: Standardabweichung [vgl. Anlage 6.3 (1)]

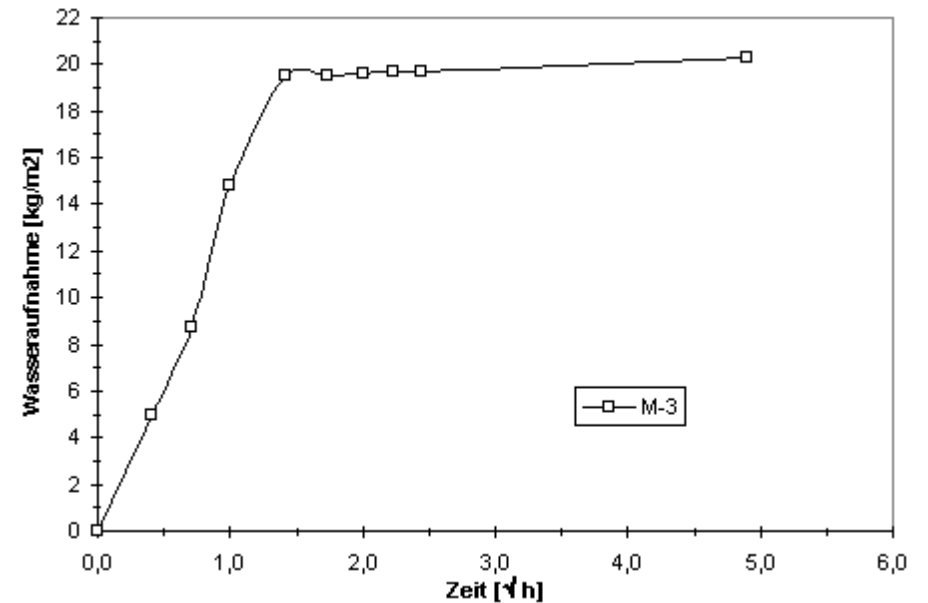
Wasserabgabe (eindimensional) Probe M-3



Sorption / Desorption Probe M-3



Wasseraufnahme Probe M-3

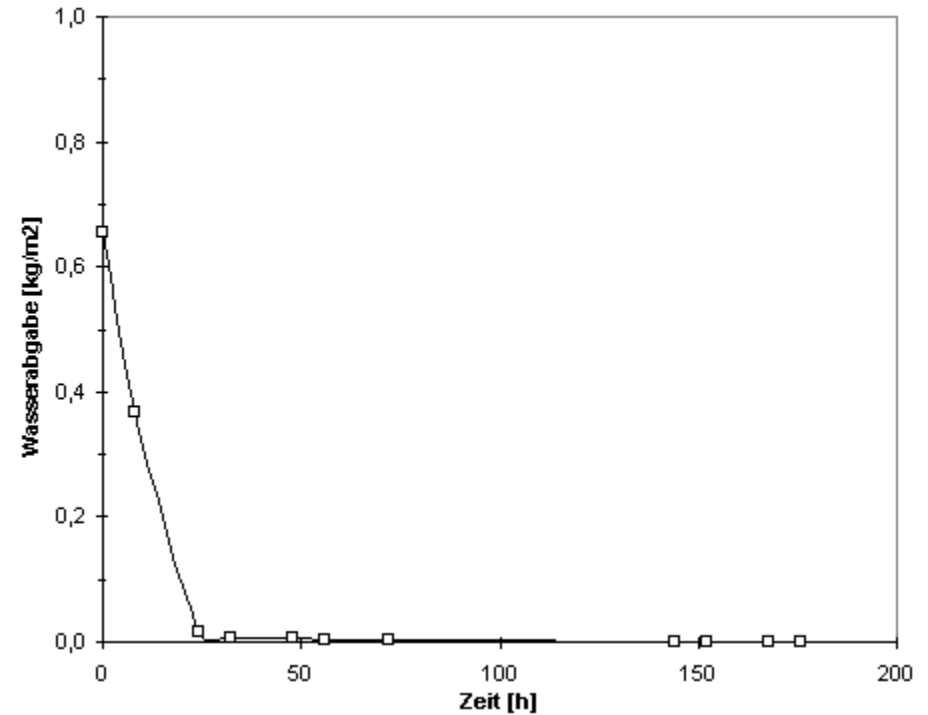


Mörtel M-5

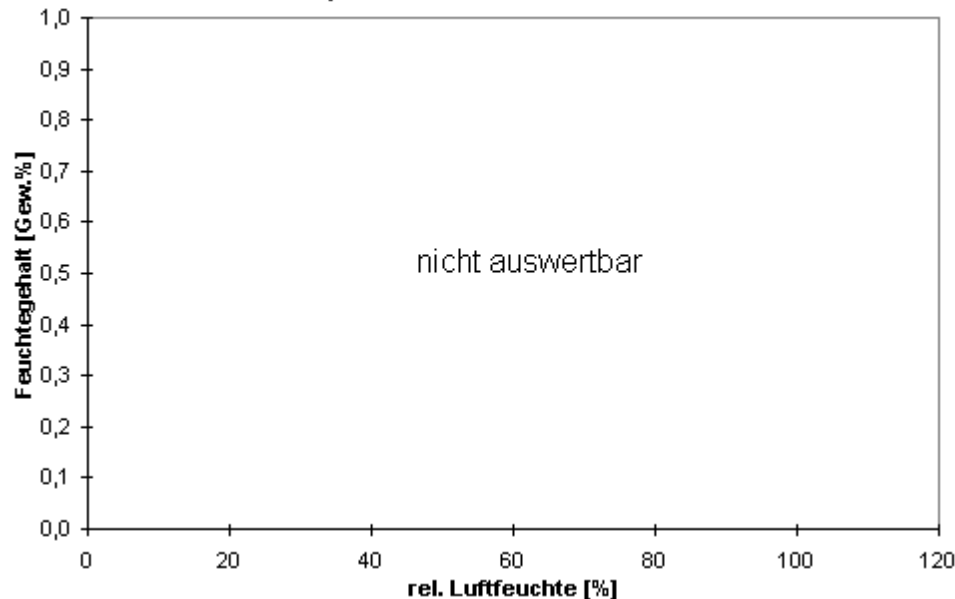
		Mittelwerte	St.Aw
Rohdichte	[g/cm ³]	1,62	0,03
Offene Porosität	[Vol%]	28,11	0,84
Freie Wasseraufn.	[M%]	17,3	0,16
DF*	[N/mm ²]	1,5	
w-Wert	[kg/(m ² h ^{0,5})]	3,60	+/- 0,20

* aufgrund der Probengröße nicht sicher bestimmbar
 St.Aw.: Standardabweichung [vgl. Anlage 6.3 (1)]

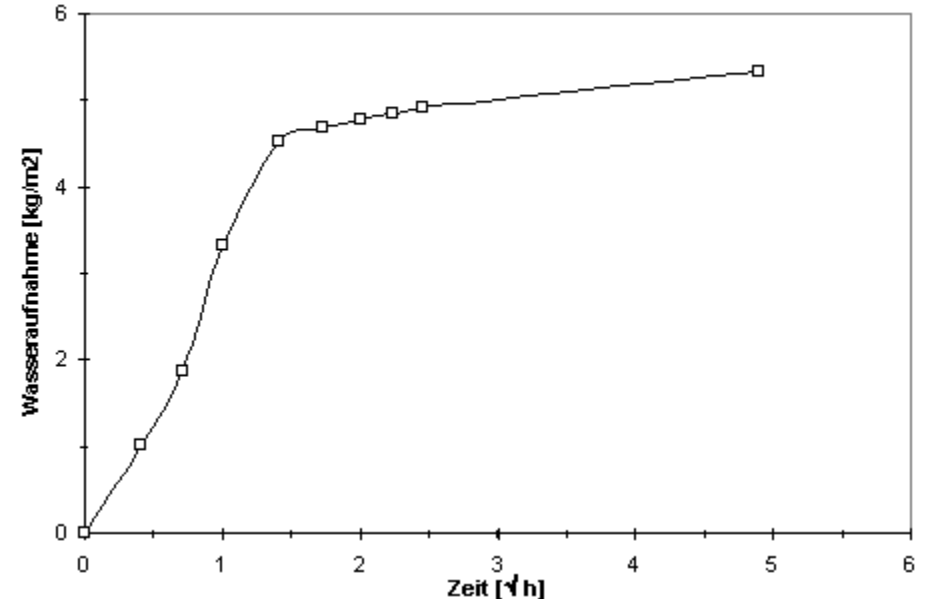
Wasserabgabe (eindimensional) Probe M-5



Sorption / Desorption Probe M-5



Wasseraufnahme Probe M-5

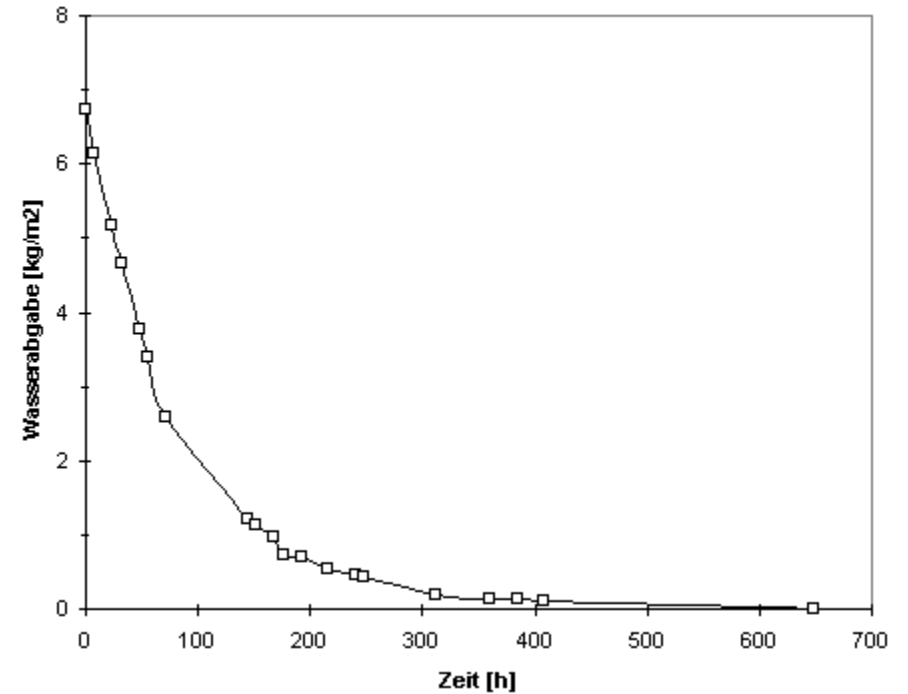


Mörtel M-6

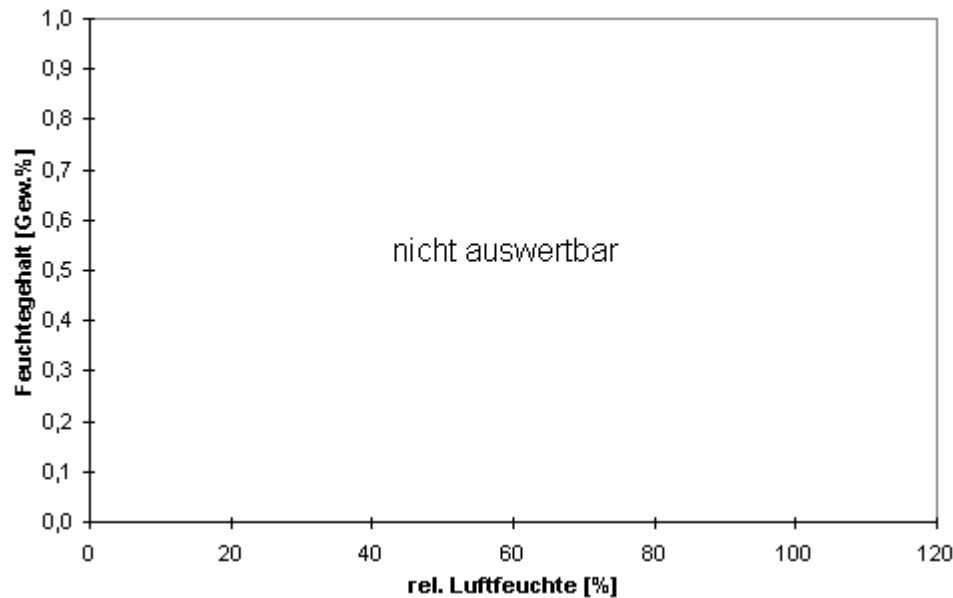
		Mittelwerte	St.Aw.
Rohdichte	[g/cm ³]	1,77	0,03
Offene Porosität	[Vol%]	23,32	0,84
Freie Wasseraufn.	[M%]	13,2	0,16
DF*	[N/mm ²]	0,9	
w-Wert	[kg/(m ² h ^{0,5})]	12,52	+/- 0,00

* aufgrund der Probengröße nicht sicher bestimmbar
 St.Aw.: Standardabweichung [vgl. Anlage 6.3 (1)]

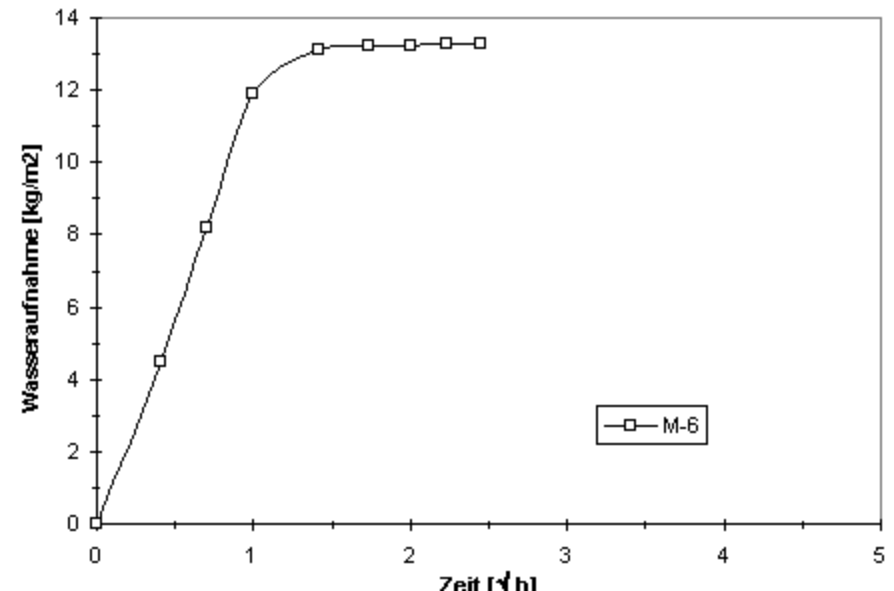
Wasserabgabe (eindimensional) Probe M-6



Sorption / Desorption Probe M-6



Wasseraufnahme Probe M-6

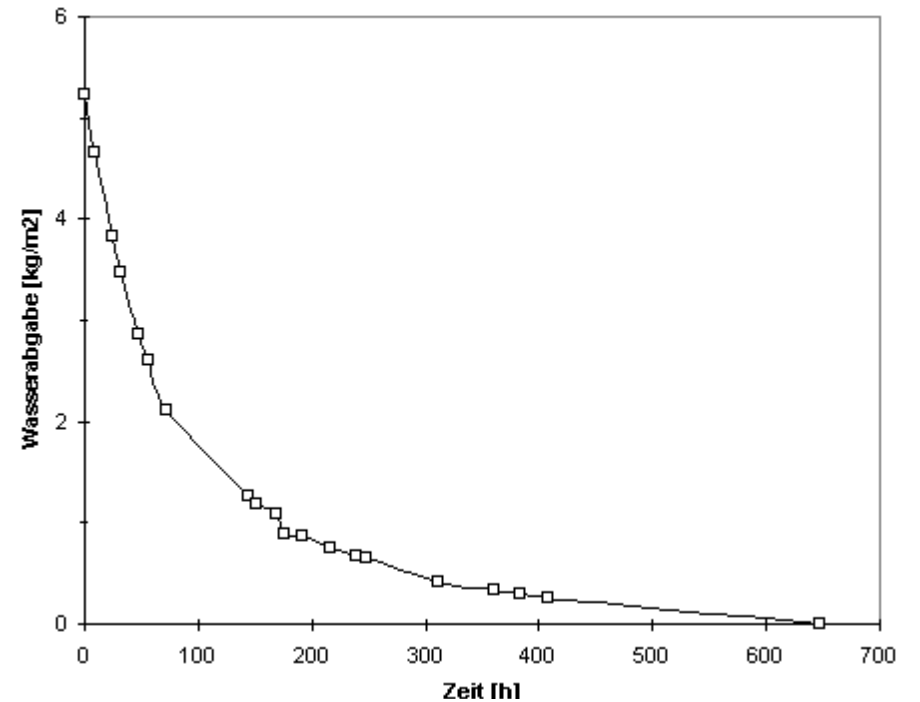


Mörtel M-8

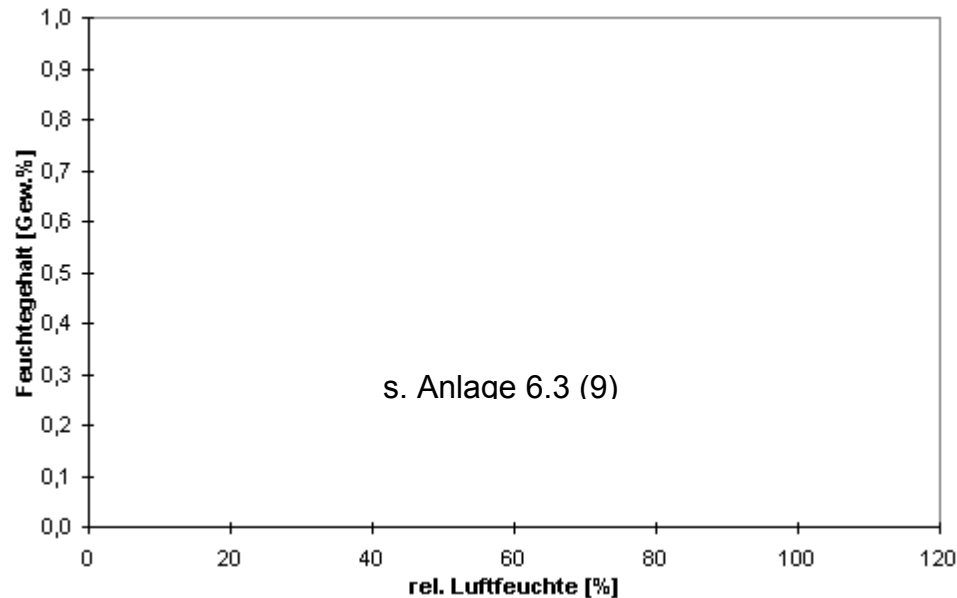
		Mittelwerte	St.Aw.
Rohdichte	[g/cm ³]	1,73	0,03
Offene Porosität	[Vol%]	26,88	0,84
Freie Wasseraufn.	[M%]	15,5	0,16
DF*	[N/mm ²]	6,9	
w-Wert	[kg/(m ² h ^{0,5})]	10,32	+/- 0,49

* aufgrund der Probengröße nicht sicher bestimmbar
 St.Aw.: Standardabweichung [vgl. Anlage 6.3 (1)]

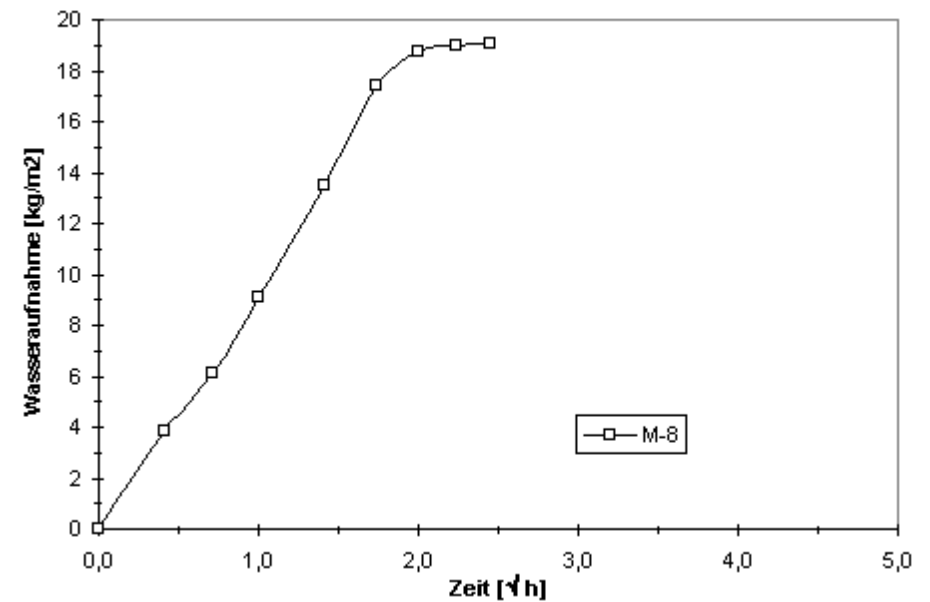
Wasserabgabe (eindimensional) Probe M-8



Sorption / Desorption Probe M-6

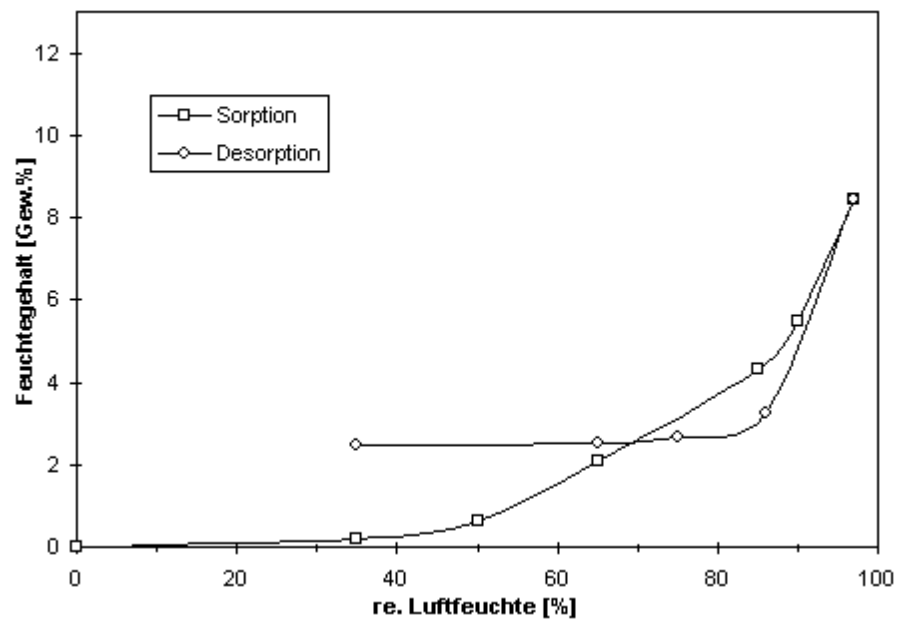


Wasseraufnahme Probe M-8

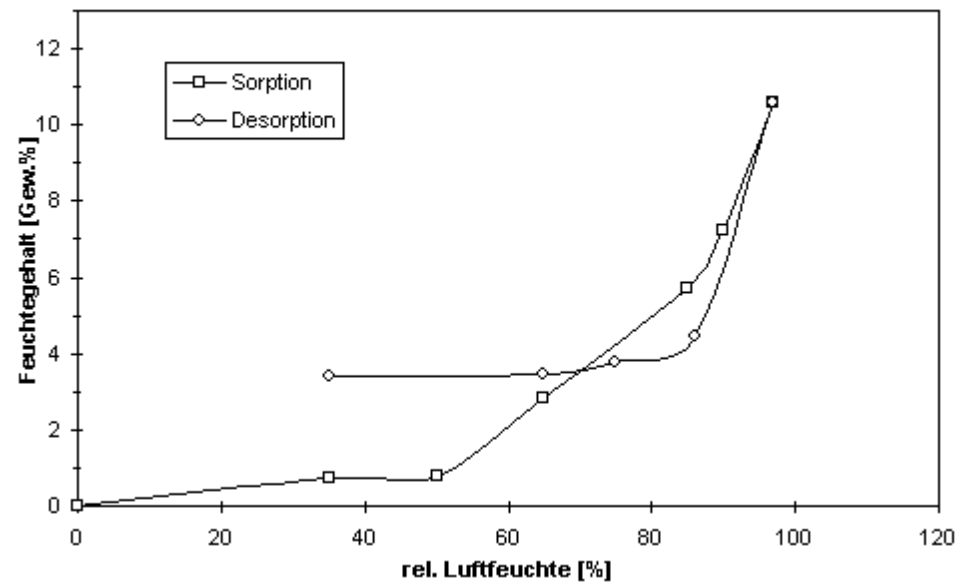


Mörtel M-8

Sorption / Desorption Probe M-8.2



Sorption / Desorption Probe M-8.1



Sorption / Desorption Probe M-8.3

