



## Untersuchungsbericht 05-10620-21

Paul-Feller-Str. 1  
28199 Bremen  
☎ 0421 / 53708 0  
📠 0421 / 53708 10  
[www.mpa-bremen.de](http://www.mpa-bremen.de)  
Bearbeiter: Schlütter  
☎ 0421 / 53708 43  
[schluetter@mpa-bremen.de](mailto:schluetter@mpa-bremen.de)

**Auftraggeber** Freie und Hansestadt Hamburg  
Landesbetrieb Immobilienmanagement und  
Grundvermögen  
Millerntorplatz  
20359 Hamburg

**Zeichen des  
Auftraggebers**

**Prüfgegenstand** Ziegelmauerwerk

**Objekt** Leuchtturm Insel Neuwerk

**Inhalt des  
Auftrags** Feuchtebestimmung  
Salzanalysen  
Materialkennwerte  
Mörtelcharakterisierung

**Probennahme** KBT Lübeck, MPA Bremen

**Aufbewahrung** Das Probenmaterial wurde teilweise zerstört.  
Restmaterialien werden nach Berichterstellung  
6 Wochen aufbewahrt

Berichtsdatum: 16.11.2022  
Anzahl der Seiten: 60  
Anlagen: keine  
Auftrag vom: 01.11.2021  
Probeneingang: 03.11.2021  
Prüfbeginn: 03.11.2021

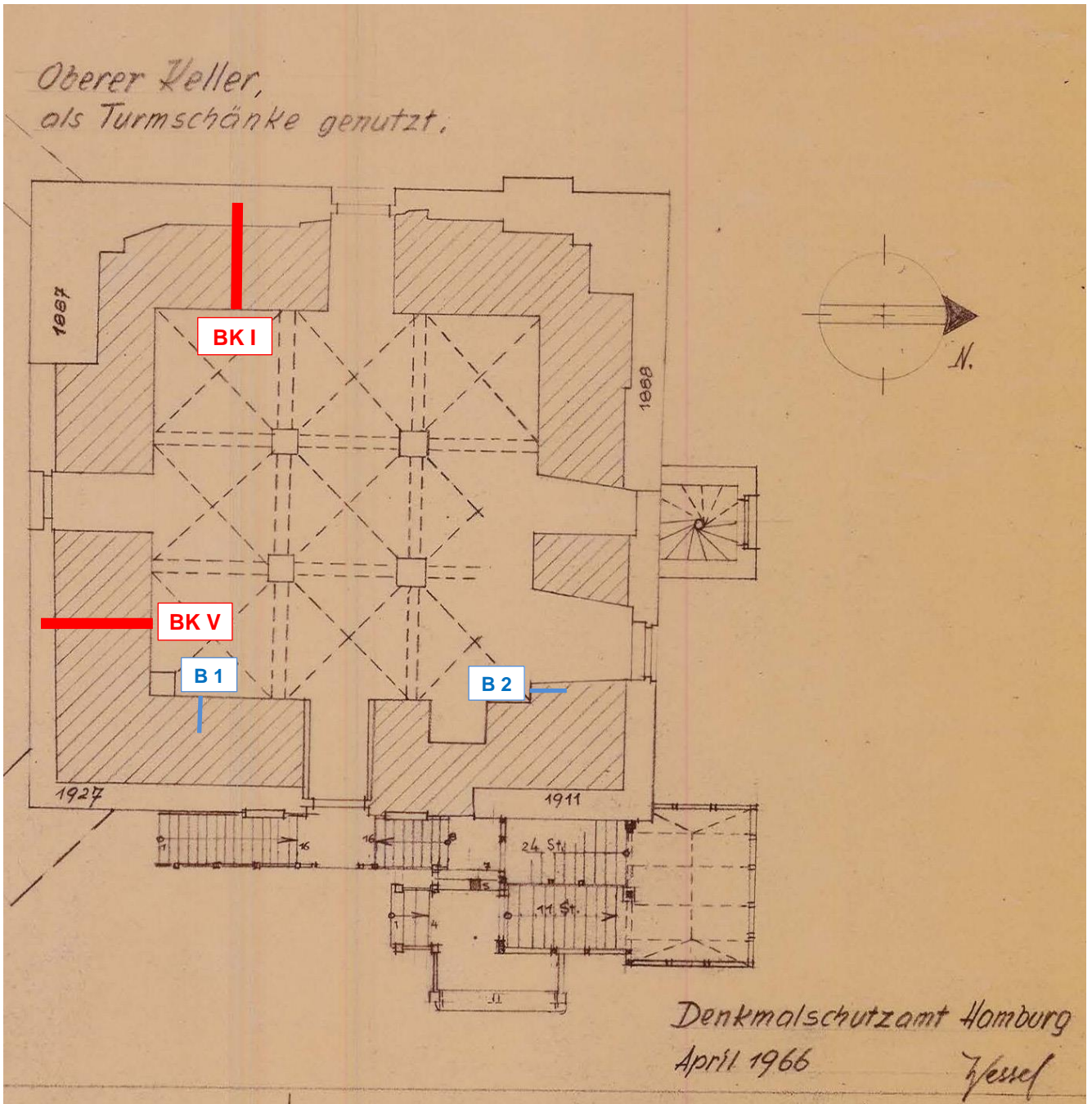
# 1 Aufgabenstellung

Tabelle 1: Probenmaterial, Fragestellung und Untersuchungsmethoden

Proben-bez.	Beschreibung	Fragestellung	Untersuchungs-methoden	
<b>Bohrkerne</b>				
<b>BK I</b>	Ebene 1, Westseite, Höhe 2,92 m OKF Wandstärke: 2,60 m, Bohrtiefe: 2,40 m	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Feuchtegehalt im Wandquerschnitt</li> <li>- Materialkennwerte Ziegel</li> <li>- Charakterisierung der Mörtel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gravimetrische Trocknung</li> <li>- Baustofflabor</li> </ul>	
<b>BK II</b>	Ebene 3, Westseite, Höhe 2,20 m OKF Wandstärke: 2,50 m, Bohrtiefe: 2,30 m			
<b>BK III</b>	Ebene 5, Westseite, Höhe 1,42 m OKF Wandstärke: 1,50 m, Bohrtiefe: 1,25 m			
<b>BK IV</b>	Ebene 3, Nordseite, Höhe 1,25 m OKF Wandstärke: 2,00 m, Bohrtiefe: 1,80 m			
<b>BK V</b>	Ebene 1, Südseite, Höhe 2,75 m OKF Wandstärke: 2,55 m, Bohrtiefe: 2,35 m			
<b>Bohrmehlproben</b>				
<b>B1</b>	Ebene 1, Ostseite, Höhe 2,55 m OKF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Feuchtegehalt (Tiefenprofil bis 50 cm)</li> <li>- Quant. Chemische Salzanalysen am Segment 0-5 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gravimetrische Trocknung (40°C)</li> <li>- IC / ICP-OES</li> </ul>	
<b>B2</b>	Ebene 1, Nordseite, Höhe 1,48 m OKF			
<b>B3</b>	Ebene 3, Ostseite, Höhe 1,44 m OKF			
<b>B4</b>	Ebene 3, Südseite, Höhe 1,39 m OKF			
<b>B5</b>	Ebene 3, Südseite, Höhe 1,31 m OKF			
<b>B6</b>	Ebene 5, Südseite, Höhe 1,50 m OKF			
<b>B7</b>	Ebene 5, Ostseite, Höhe 1,54 m OKF			
<b>B8</b>	Ebene 5, Nordseite, Höhe 1,55 m OKF			
<b>Materialkennwerte Ziegel</b>				
<b>I/6</b>	<b>I/9</b>	Materialkennwerte (Rohdichte, Wasseraufnahme, Porosität)	Baustofflabor	
<b>III/3</b>	<b>III/4</b>			Bauzeitliche Ziegel
<b>V/5</b>				
<b>II/7</b>	<b>IV/7</b>			Reparaturziegel (Außenschale)
<b>Mörtelcharakterisierung</b>				
<b>I/4</b>	Grauer bauzeitlicher Mauermörtel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergleichende mikroskopische Charakterisierung</li> </ul>	PolMi am Dünnschliff	
<b>III/3</b>	Weißbeiger bauzeitlicher Mauermörtel			
<b>IV/3</b>	Grauer Mauermörtel neben weißem Mm.			
<b>V/2</b>	Grauer Mauermörtel			
<b>II/7</b>	Kontaktbereich Zementmörtel (Schale) / bauzeitlicher Mörtel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Treibmineralbildung?</li> </ul>		

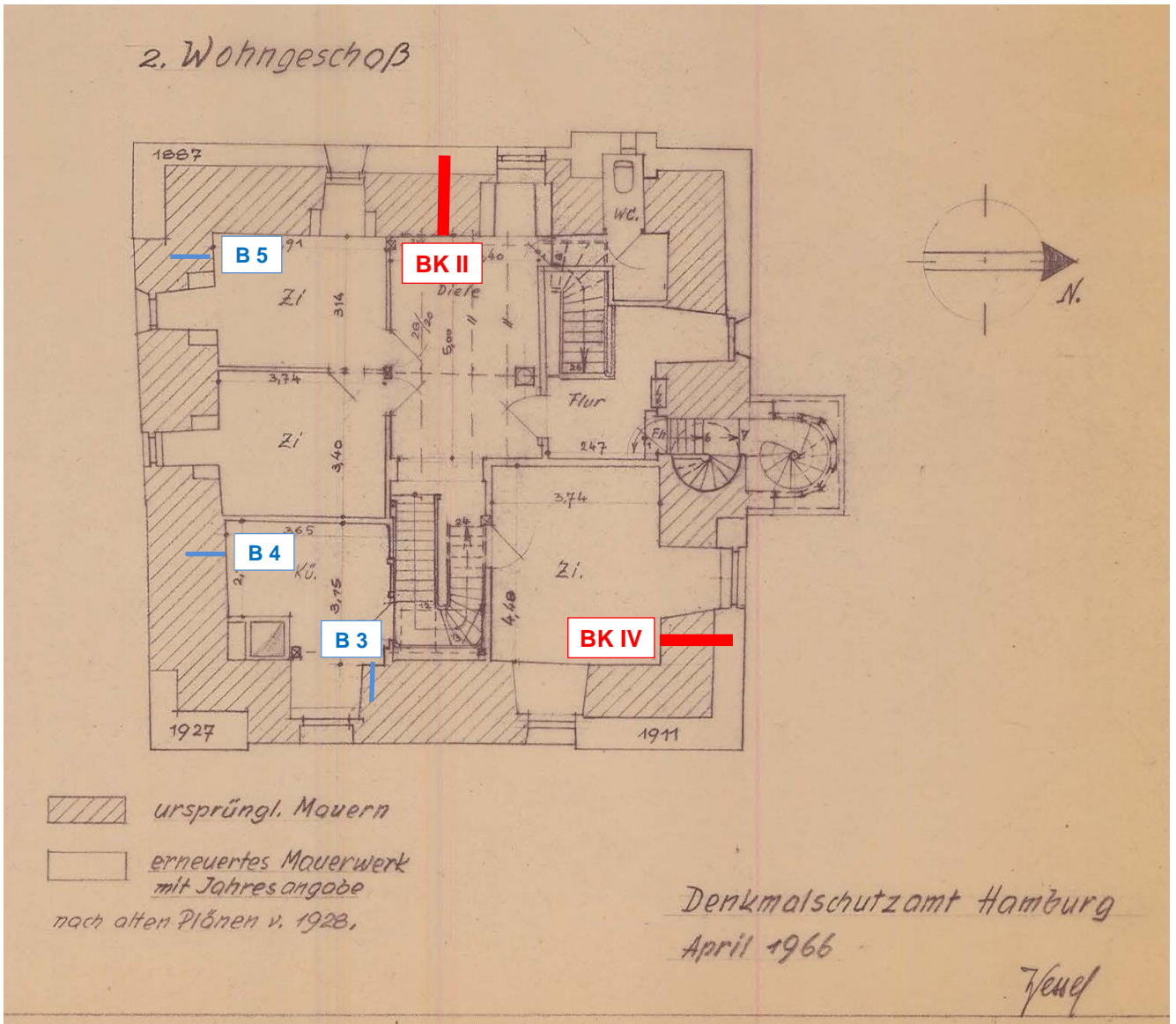
# Ebene 1

Lage der Entnahmestellen der Bohrkern (BK) und Bohrmehlproben (B)



# Ebene 3

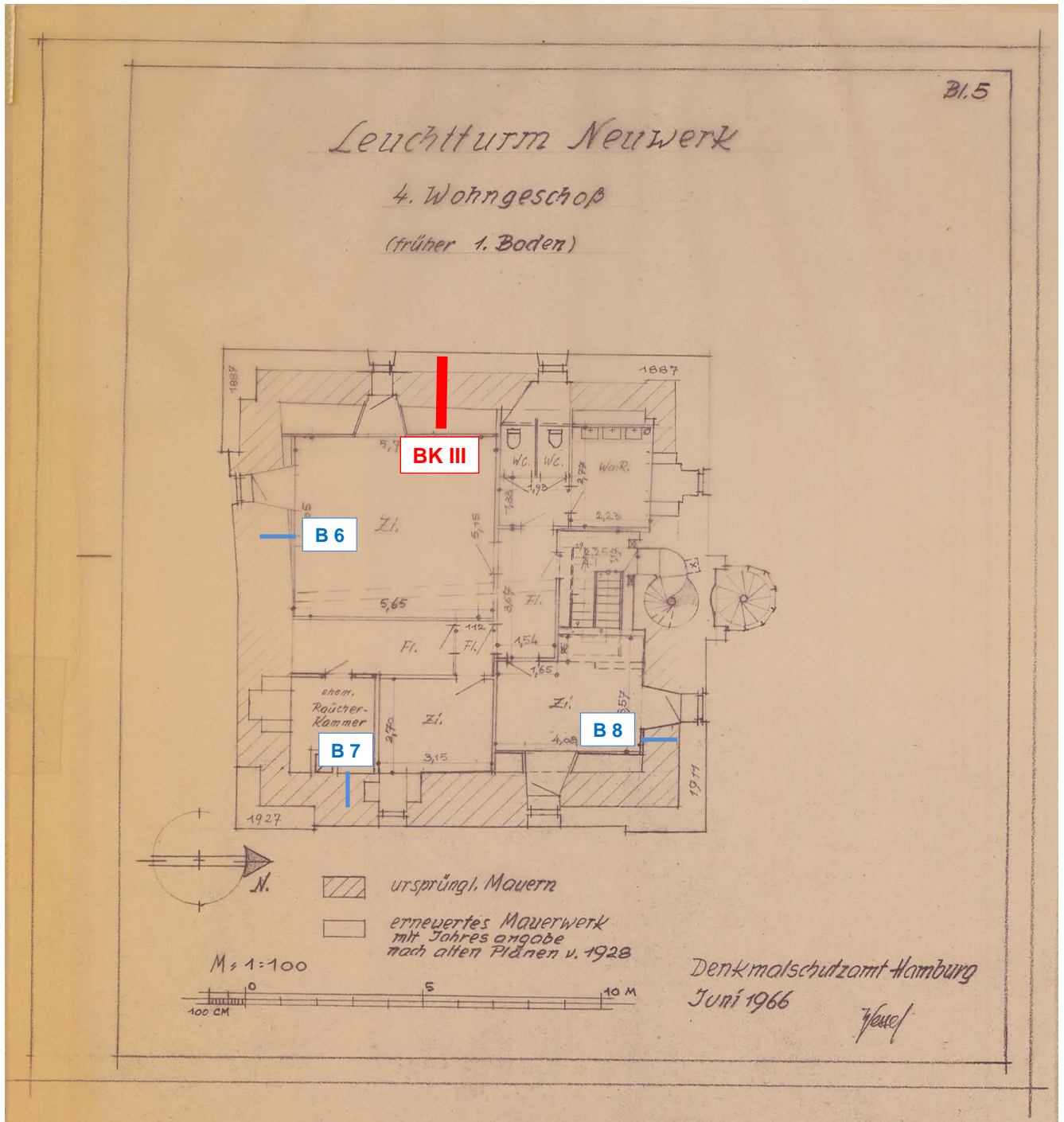
Lage der Entnahmestellen der Bohrkerne (BK) und Bohrmehlproben (B)





# Ebene 5

Lage der Entnahmestellen der Bohrkern (BK) und Bohrmehlproben (B)



## 2 Untersuchungen und Ergebnisse

### 2.1 Feuchtebestimmungen

#### a) Feuchtebestimmung an Bohrkernen

In drei verschiedenen Höhen (Ebene 2, 3 und 5) wurden aus dem Mauerwerk Bohrkernabschnitte entnommen. Die Bohrungen erfolgten von Innen in Trockenbohrtechnik. An den einzelnen Bohrkernabschnitten (Segmente) wurde der Feuchtegehalt durch gravimetrische Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei Raumtemperatur (ca. 22°C) ermittelt. Die Ergebnisse enthält Tabelle 2.

#### Feuchtebestimmung an Bohrmehl

In den gleichen Ebenen wurde zusätzlich zu den Bohrkernen durch Spiralbohrungen abschnittsweise Bohrmehl bis in 50 cm Mauerwerkstiefe gewonnen (andere Exposition als die BK). Die Feuchtebestimmung erfolgte durch gravimetrische Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bei 40°C. Die Ergebnisse enthält Tabelle 3.



**Abb. 1:** Bohrkern BK I bis V im Entnahmestadium. Die Bohrkernstückchen sind stark mit Bohrmehl bedeckt. Erst nach dem Waschen sind die Bestandteile ausreichend gut erkennbar (vgl. Abb. 2 bis 4)





**Abb. 2:** Bohrkern **BK I bis V** nach dem Waschen. Die Bestandteile (Ziegel- und Mörtelstücke) sind für die weitere Bearbeitung (Kennwertbestimmung, Mikroskopie) ausreichend gut erkennbar (vgl. Details in Abb. 3 und 4 4)








**Abb. 3:** Detail aus Abb. 1. Bohrkern **BK II und III** im Entnahmestadium. Die Bohrkernstückchen sind stark mit Bohrmehl bedeckt. Erst nach dem Waschen sind die Bestandteile ausreichend gut erkennbar (vgl. Abb. 4)







**Abb. 4:** Detail aus Abb. 2 Bohrkern **BK II und III** nach dem Waschen. Die Bestandteile (Ziegel- und Mörtelstücke) sind für die weitere Bearbeitung (Kennwertbestimmung, Mikroskopie) ausreichend gut erkennbar.

Tabelle 2: Ergebnisse der Feuchtebestimmungen (Bohrkerne)

Bezeichnung Entnahmestelle		Segment	Material	Einwaage [g]	Feuchtegehalt [M.%]
<b>BK I</b> <b>Ebene 1, Westseite</b> Höhe: 2,92 m OKF Wandstärke: 2,60 m Bohrtiefe: 2,40 m	<b>Innen</b> 	I/1	Ziegel + Mörtel	1640,4	5,3
		I/2	Ziegel + Mörtel	1542,6	11,3
		I/3	Ziegel + Mörtel	2136,3	10,2
		I/4	Ziegel + Mörtel	2348,5	9,7
		I/5	Ziegel + Mörtel	3076,6	8,8
		I/6	Ziegel + Mörtel	3246,1	5,7
		I/7	Ziegel + Mörtel	3408,6	11,0
		I/8	Ziegel + Mörtel	1423,0	13,3
		I/9	Ziegel + Mörtel	1545,2	8,6
		I/10	Ziegel + Mörtel	1940,0	9,0
		I/11 (Rp.)	Ziegel + Mörtel	2130,7	9,3
		I/12 (Rp.)	Ziegel + Mörtel	2329,6	11,4
		<b>Außen</b>	I/13 (Rp.)	Ziegel + Mörtel	3649,1
<b>BK II</b> <b>Ebene 3, Westseite</b> Höhe: 2,20 m OKF Wandstärke: 2,50 m Bohrtiefe: 2,30 m	<b>Innen</b> 	II/1	Ziegel + Mörtel	2145,3	8,2
		II/2	Ziegel + Mörtel	2225,6	10,5
		II/3	Ziegel + Mörtel	2048,3	7,4
		II/4	Ziegel + Mörtel	3201,6	7,4
		II/5	Ziegel + Mörtel	2194,0	6,2
		II/6	Ziegel + Mörtel	2092,0	8,7
		<b>Außen</b>	II/7 (Rp.)	Ziegel + Mörtel	4391,2
<b>BK III</b> <b>Ebene 5, Westseite</b> Höhe: 1,42 m OKF Wandstärke: 1,50 m Bohrtiefe: 1,25 m	<b>Innen</b> 	III/1	Ziegel + Mörtel	1923,7	16,2
		III/2	Ziegel + Mörtel	2002,8	14,4
		III/3	Ziegel + Mörtel	1747,2	15,0
		III/4	Ziegel + Mörtel	3000,2	15,3
		III/5	Ziegel + Mörtel	2182,0	17,1
		III/6 (Rp.)	Ziegel + Mörtel	3042,6	14,2
			<b>Außen</b>	III/7 (Rp.)	Ziegel + Mörtel



Fortsetzung Tabelle 2: Ergebnisse der Feuchtebestimmungen (Bohrkerne)

Bezeichnung Entnahmestelle		Segment	Material	Einwaage [g]	Feuchtegehalt [M.%]
<b>BK IV</b>  <b>Ebene 3, Nordseite</b> Höhe: 1,25 m OKF Wandstärke: 2,00 m, Bohrtiefe: 1,80 m	<b>Innen</b>  <b>Außen</b>	IV/1	Ziegel + Mörtel	1733,3	<b>0,4</b>
		IV/2	Ziegel + Mörtel	1983,1	<b>0,3</b>
		IV/3	Ziegel + Mörtel	3294,2	<b>0,9</b>
		IV/4	Ziegel + Mörtel	3011,5	<b>1,8</b>
		IV/5	Ziegel + Mörtel	2200,1	<b>2,1</b>
		IV/6 (Rp.)	Ziegel + Mörtel	3120,6	<b>4,7</b>
		IV/7 (Rp.)	Ziegel + Mörtel	4215,0	<b>3,5</b>
<b>BK V</b>  <b>Ebene 1, Südseite</b> Höhe 2,75 m OKF Wandstärke: 2,55 m, Bohrtiefe: 2,35 m	<b>Innen</b>  <b>Außen</b>	V/1	Ziegel + Mörtel	2554,4	<b>2,0</b>
		V/2	Ziegel + Mörtel	3408,1	<b>2,7</b>
		V/3	Ziegel + Mörtel	2194,1	<b>4,7</b>
		V/4	Ziegel + Mörtel	1982,5	<b>4,6</b>
		V/5	Ziegel + Mörtel	2810,5	<b>4,9</b>
		V/6	Ziegel + Mörtel	2322,0	<b>5,9</b>
		V/7	Ziegel + Mörtel	2944,7	<b>4,7</b>
		V/8	Ziegel + Mörtel	2308,5	<b>2,9</b>
		V/9	Ziegel + Mörtel	2258,5	<b>3,7</b>
		V/10	Ziegel + Mörtel	2826,6	<b>1,2</b>
		V/11 (Rp.)	Kalks.st. + Mörtel	3945,2	<b>5,2</b>

**Bewertung der Feuchtebestimmungen an den Bohrkernen:**

Aus den Werten in Tabelle 2 ist ersichtlich, dass sämtliche Bohrkern aus der **W-Seite des Turmes** in fast allen Segmenten hohe bis sehr hohe Feuchtegehalte aufweisen:

**BK I** Ebene 1 5-13 M-%  
**BK II** Ebene 3 6-12 M-%  
**BK III** Ebene 5 14-17 M-%

Die Kerne aus anderen Expositionsrichtungen auf den jeweiligen Ebenen sind deutlich trockener. Am Bohrkern IV (Ebene 3, Nordseite) nimmt der Feuchtegehalt erst ab dem vierten Segment (etwa ab 0,8 m Tiefe) in Richtung Turmaußenseite zu. Der Höchstwert liegt bei etwa 5 M-%. In dieser Größenordnung liegen auch die Feuchtegehalte im Bohrkern V (Ebene 1, S-Seite): 1-6 M-%.

Tabelle 3: Ergebnisse der Feuchtebestimmungen (Bohrmehlproben)

Bohrung	Segment (ca. Bohrtiefe)	Material	Einwaage (g)	Feuchte (M-%)	Bemerkungen
<b>B 1</b> Ebene 1, Ostseite, Höhe 2,55 m OKF	0-5 cm	Ziegel + Mörtel	10,1	5,6	
	5-10 cm	Ziegel + Mörtel	13,5	7,3	
	10-20 cm	Ziegel	21,3	10,2	
	20-30 cm	Ziegel	13,2	10,1	
	30-40 cm	Ziegel	12,6	12,0	
	40-50 cm	Ziegel + M	8,4	10,5	
<b>B 2</b> Ebene 1, Nordseite, Höhe 1,48 m OKF	0-5 cm	Fliesen + Mörtel		n.b.	Fliesen
	5-10 cm	Ziegel + Mörtel	9,0	5,5	
	10-20 cm	Ziegel + Mörtel	19,8	6,5	
	20-30 cm	Ziegel + Mörtel	15,1	5,0	
	30-40 cm	Ziegel + Mörtel	22,3	3,2	
	40-50 cm	Ziegel	20,6	1,7	
<b>B 3</b> Ebene 3, Ostseite, Höhe 1,44 m OKF	0-5 cm	Ziegel	8,8	1,4	
	5-10 cm	Ziegel	14,1	4,7	
	10-20 cm	Ziegel	20,7	2,5	
	20-30 cm	Ziegel + Mörtel	17,6	2,6	
	30-40 cm	Ziegel	22,3	4,8	
	40-50 cm	Ziegel	15,4	5,6	
<b>B 4</b> Ebene 3, Südseite, Höhe 1,39 m OKF	0-5 cm	Ziegel + Mörtel	9,5	2,5	
	5-10 cm	Ziegel + Mörtel	10,4	1,3	
	10-20 cm	Ziegel + Mörtel	8,7	1,5	
	20-30 cm	Ziegel + Mörtel	1,2	3,0	
	30-40 cm	Ziegel + Mörtel	2,7	2,9	
	40-50 cm	Ziegel	5,1	5,0	
<b>B 5</b> Ebene 3, Südseite, Höhe 1,31 m OKF	0-5 cm	Mörtel	7,9	2,2	
	5-10 cm	Mörtel +Ziegel	7,1	2,2	
	10-20 cm	Mörtel +Ziegel	4,4	2,8	
	20-30 cm	Ziegel +Mörtel	9,7	11,5	
	30-40 cm	Ziegel +Mörtel	4,1	6,3	
	40-50 cm	Ziegel	1,7	6,0	
<b>B 6</b> Ebene 5, Südseite, Höhe 1,50 m OKF	0-5 cm	Ziegel	9,2	10,0	
	5-10 cm	Ziegel	11,3	-2,0	
	10-20 cm	Ziegel +Mörtel	14,2	10,6	
	20-30 cm	Ziegel	14,4	21,4	
	30-40 cm	Ziegel	5,9	14,4	
	40-50 cm	Ziegel +Mörtel	2,7	12,3	



Fortsetzung Tabelle 3: Ergebnisse der Feuchtebestimmungen (Bohrmehlproben)

Bohrung	Segment (ca. Bohrtiefe)	Material	Einwaage (g)	Feuchte (M-%)	Bemerkungen
<b>B 7</b> Ebene 5, Ostseite, Höhe 1,54 m OKF	0-5 cm	Ziegel	10,9	<b>0,8</b>	
	5-10 cm	Ziegel	13,1	<b>1,8</b>	
	10-20 cm	Ziegel +Mörtel	13,9	<b>1,6</b>	
	20-30 cm	Ziegel +Mörtel	19,6	<b>1,4</b>	
	30-40 cm	Ziegel	16,2	<b>1,1</b>	
	40-50 cm	Ziegel	22,2	<b>1,1</b>	
<b>B 8</b> Ebene 5, Nordseite, Höhe 1,55 m OKF	0-5 cm	Ziegel + Mörtel	14,1	<b>0,6</b>	
	5-10 cm	Ziegel	10,4	<b>0,4</b>	
	10-20 cm	Ziegel	13,8	<b>2,4</b>	
	20-30 cm	Ziegel	17,2	<b>3,0</b>	
	30-40 cm	Ziegel	19,9	<b>1,7</b>	
	40-50 cm	Ziegel	15,7	<b>1,4</b>	

**Bewertung der Feuchtebestimmungen an den Bohrmehlproben:**

Das Mauerwerk auf der **Ebene 1** ist auch an der O-Seite (Bohrung **B1**) stark durchfeuchtet (Feuchtegehalte 5-12 M-%). Auf der Nordseite dieser Ebene 1 (Bohrung **B2**) ist die Feuchte in der Wand ebenfalls deutlich erhöht, die Feuchtegehalte sind mit Werten bis 7 M-% allerdings etwas geringer als auf der N-Seite.

Auch auf der Ebene 3 ist das Mauerwerk feucht. Die ermittelten Werte liegen in der gleichen Größenordnung wie auf Ebene 1:

Ebene 3, O-Seite (Bohrung **B3**): 1-6 M-%

Ebene 3, S-Seite (Bohrung **B4**): 1-5 M-%

Ebene 3, S-Seite (Bohrung **B5**): 2-6 M-% (Einzelwert 12 M-%)

Auf der Ebene 5 sind die ermittelten Feuchtegehalte sehr stark expositionsabhängig. An der S-Seite (Bohrung **B6**) ist das Mauerwerk sehr stark durchfeuchtet (10-21 M-%). Demgegenüber ist auf der O-Seite (Bohrung **B7**) und auf der N-Seite (Bohrung **B8**) mit Werten zwischen 1 und 3 M-% nur geringfügig erhöht.

## 2.2 Quantitative chemische Salzanalysen

Die Feuchtebestimmung hat keinen Einfluss auf den Salzgehalt, so dass an den jeweils vordersten Segmenten der Bohrmehlproben (0-5 cm) im Anschluss an die Feuchteermittlung eine Salzanalyse vorgenommen werden konnte.

Die quantitativen Analysen der Salzkonzentrationen wurden am Institut für Anorganische und Angewandte Chemie der Universität Hamburg, Arbeitsgruppe Dr. Steiger, durchgeführt.

Das Probenmaterial wird getrocknet, gemahlen und homogenisiert. 500 mg der Probe werden in 25 ml bidestilliertem Wasser eluiert. Im filtrierten Eluat werden die Anionenkonzentrationen (Chlorid, Sulfat, Nitrat) mittels Ionenchromatographie (IC), die Kationenkonzentrationen mittels optischer Emissionsspektrometrie mit Anregung im induktiv gekoppelten Plasma (ICP-OES) ermittelt. Sofern erforderlich werden Natrium und Kalium aufgrund der günstigeren Anregungsbedingungen und der somit niedrigeren Bestimmungsgrenzen mit der Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) bestimmt.

Die Salzgehalte werden sowohl als Masseanteil (M-%) als auch unter Berücksichtigung der Atom- und Molekularmassen und der Ladungszahlen als molare Equivalentkonzentrationen (meq/kg) angegeben. Die Verhältnisse der Anionen zu den Kationen können so direkt verglichen und ggf. bestimmten Salzen zugeordnet werden. Außerdem ist über die Anionen-/Kationenbilanz die Vollständigkeit der Analyse hinsichtlich der ermittelten Ionen überprüfbar.

Tabelle 3: Ergebnisse der quantitativen, chemischen Salzanalysen [Salzgehalte in M-%]

Bohrung			Anionen [M-%]			Kationen [M-%]				pH
Ebene - Exp.		Segm.	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	
E1 - O	B 1	0-5 cm	2,87	0,56	5,43	3,33	0,20	0,12	1,26	7,2
E1 - N	B 2	0-5 cm	7,26	0,01	0,01	0,03	0,04	0,00	3,31	7,6
E3 - O	B 3	0-5 cm	0,02	0,09	0,35	0,14	0,04	0,01	0,10	7,8
E3 - S	B 4	0-5 cm	7,38	0,14	0,40	0,21	0,08	0,02	3,44	7,1
E3 - S	B 5	0-5 cm	7,22	0,12	0,29	0,19	0,06	0,02	3,31	7,0
E5 - S	B 6	0-5 cm	5,63	0,04	0,11	0,09	0,05	0,02	2,69	7,4
E5 - O	B 7	0-5 cm	2,03	0,10	0,15	0,11	0,03	0,02	0,87	7,3
E5 - N	B 8	0-5 cm	3,62	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	1,67	7,0

Tabelle 4: Ergebnisse der quantitativen, chemischen Salzanalysen [Salzgehalte in milliequivalent (meq/kg) und Ionenbilanzen]

Bohrung			Anionen [meq/kg]			Kationen [meq/kg]				Summen	
Ebene - Exp.		Segm.	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	A	K
E1 - O	B 1	0-5 cm	597,0	90,6	1530,0	1450,0	51,9	98,7	630,0	2218	2231
E1 - N	B 2	0-5 cm	1510,0	1,5	3,4	13,3	9,1	3,5	1650,0	1515	1676
E3 - O	B 3	0-5 cm	3,8	14,4	97,9	62,6	10,2	6,3	49,7	116	129
E3 - S	B 4	0-5 cm	1540,0	22,9	112,0	93,2	20,8	19,2	1720,0	1675	1853
E3 - S	B 5	0-5 cm	1500,0	19,4	82,0	83,8	15,0	19,3	1650,0	1601	1768
E5 - S	B 6	0-5 cm	1170,0	6,7	30,9	40,8	13,7	20,5	1340,0	1208	1415
E5 - O	B 7	0-5 cm	422,0	16,1	43,0	45,8	8,7	16,1	436,0	481	507
E5 - N	B 8	0-5 cm	754,0	2,5	4,1	8,1	4,0	6,4	833,0	761	852

## Bewertung der Salzanalysen:

**Leicht lösliche Salze:** Aus den Werten in der Tabelle 3 ist ersichtlich, dass in den Ebenen 1 und 3 deutlich erhöhte Chlorid- und Natriumkonzentrationen vorliegen. Auf Ebene 1 betrifft das nur die Bohrung B1 O-Seite), an der mit über 5 M-% der höchste Chloridwert ermittelt wurde. An dieser Stelle ist zusätzlich der Nitratgehalt stark erhöht (0,56 M-%). Auf Ebene 3 liegen an der O- und S-Wand (B2 bis B5) erhöhte Chloridgehalte vor (0,3 bis 0,4 M-%). Mit zunehmender Höhe nehmen die Salzgehalte im gemessenen, vorderen Segment weiter ab. Auf Ebene 5 liegen die Chloridwerte auf der S- und O-Seite zwischen 0,1 und 0,2 M-%. Diese Größenordnung kann als geringe Belastung eingestuft werden.

**Gips:** In fast allen Proben ist der Sulfatgehalt deutlich erhöht (Tabelle 3). Die Höchstwerte liegen um 7 M-%. Aus den Ionenbilanzen in Tabelle 4 ist ersichtlich, dass den Sulfatwerten etwa gleich hohe Ca-Werte zugeordnet werden können. Das bedeutet aufgrund der geringen Löslichkeit des Gipses, dass das gesamte Sulfat als Gips gebunden ist.

## 2.3. Bestimmung technisch-physikalischer Eigenschaften (Ziegelkennwerte)

### Ermittlung der Rohdichte, Offenen Porosität und der Freien Wasseraufnahme

Zur Bestimmung der Rohdichte (Scherbenrohddichte) der Ziegel wurde das Volumen entsprechend dem Prüfverfahren in der Norm DIN EN 772-3:1998-10 mittels hydrostatischer Wägung (Unterwasserwägung) ermittelt. Die Bestimmung der Wasseraufnahme erfolgte unter Berücksichtigung der Norm DIN EN 772-21:2011-07. Die offene Porosität wurde aus den Ergebnissen der Wasseraufnahme und dem bei der Unterwasserwägung ermittelten Volumen errechnet.



**Abb. 5:** Bohrkernsegment I/6 für Kennwertermittlung (bauzeitlicher Ziegel)

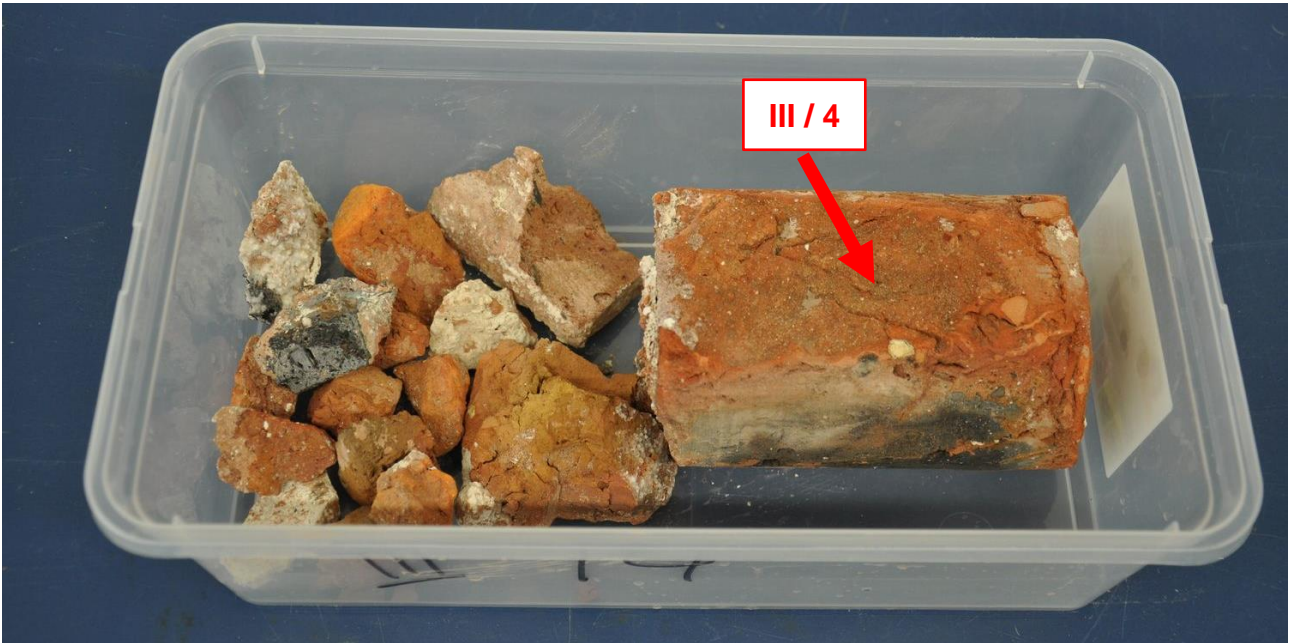


**Abb. 6:** Bohrkernsegment I/9 für Kennwertermittlung (bauzeitlicher Ziegel)

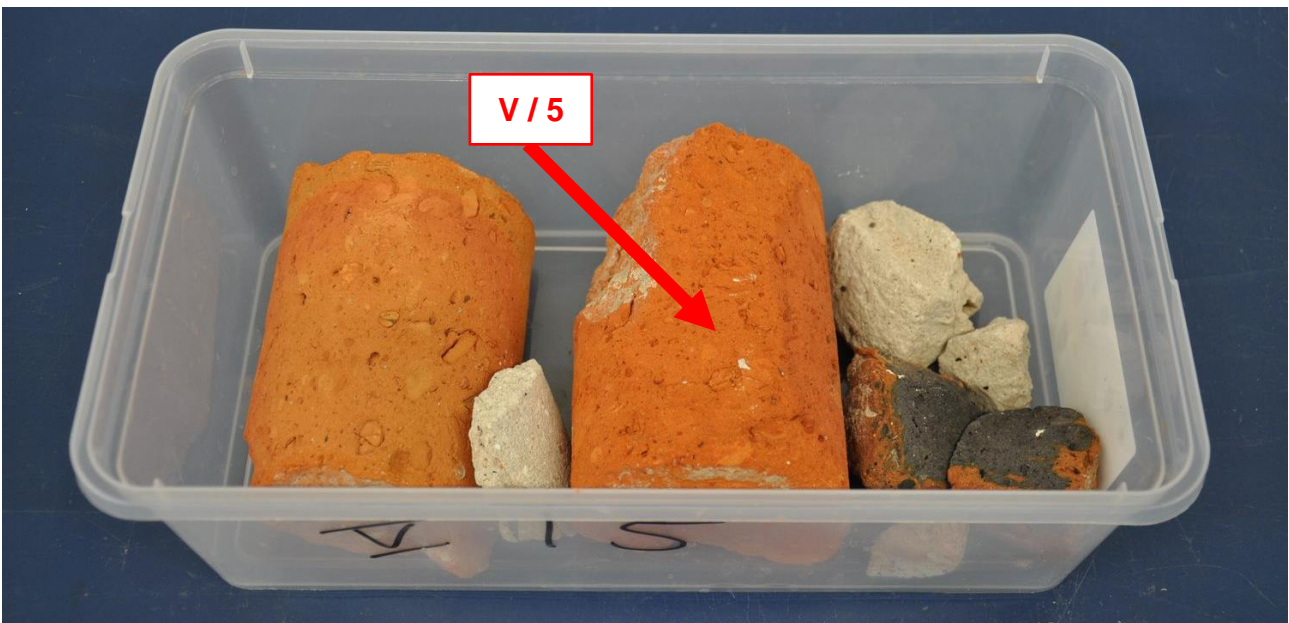


**Abb. 7:** Bohrkernsegment III/3 für Kennwertermittlung (bauzeitlicher Ziegel)

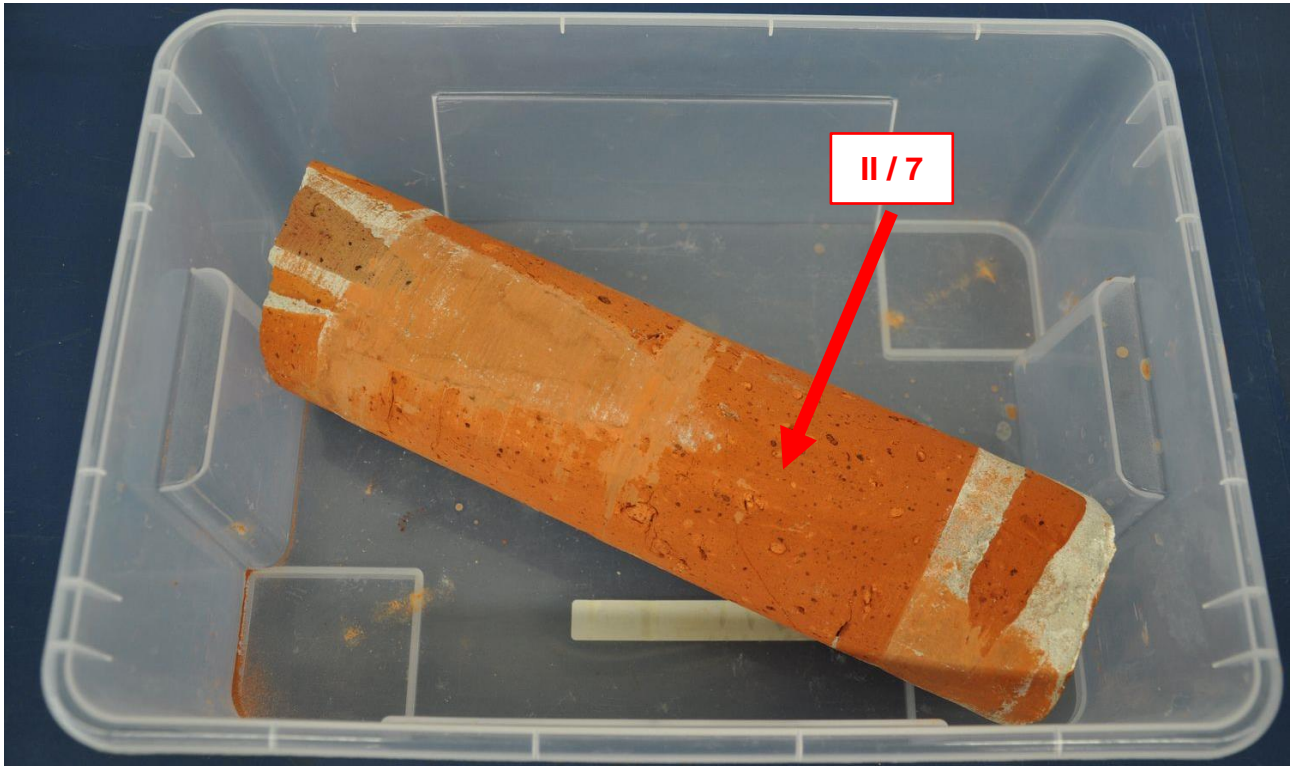




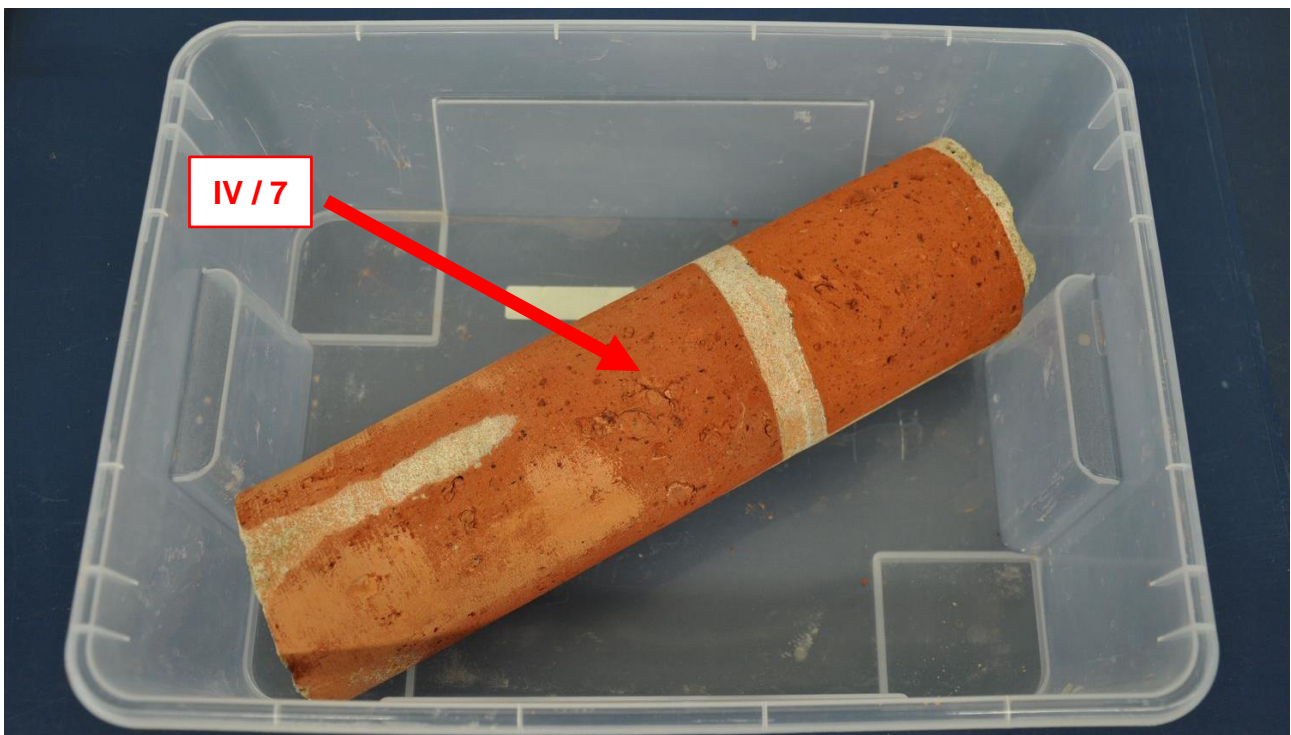
**Abb. 8:** Bohrkernsegment III/4 für Kennwertermittlung (bauzeitlicher Ziegel)



**Abb. 9:** Bohrkernsegment V/5 für Kennwertermittlung (bauzeitlicher Ziegel)



**Abb. 10:** Bohrkernsegment II/7 für Kennwertermittlung (Reparaturziegel)



**Abb. 11:** Bohrkernsegment IV/7 für Kennwertermittlung (Reparaturziegel)

Tabelle 5: Materialkennwerte

Proben-Bezeichnung		Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Freie kapillare Wasseraufnahme [M%]	Offene Porosität [Vol-%]	Druck- festigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Bauzeitliche Ziegel	I/6	1,56	22,4	35,0	8,2
	I/9	1,69	14,1	23,7	7,9
	III/3	1,40	16,2	22,7	13,4
	III/4	1,47	15,4	22,7	7,8
	V/5	1,72	14,1	24,2	5,4
Reparatur- ziegel	II/7	1,67	17,0	28,5	8,1
	IV/7	1,62	16,2	26,3	10,4

**Bewertung:**

Nach Freyburg<sup>1</sup> haben sich Ziegel mit folgenden Kennwerten unter Bauwerksbedingungen als überwiegend dauerhaft erwiesen:

Rohdichte (RD)            ≥1,85 g/cm<sup>3</sup>  
Wasseraufnahme (WA)   ≤16 M-%  
Druckfestigkeit (DF)     ≥10 N/mm<sup>2</sup>

Sowohl die bauzeitlichen Ziegel des Kernmauerwerks als auch die Ziegel der jüngeren Vorsatzschale erfüllen die o.g. Forderungen nicht, von Einzelwerten abgesehen.

**Die vorhandenen Ziegel sind weich, hoch porös und vermutlich stark saugend. Es ist folglich anzunehmen, dass bei Regen und Wind nicht nur über die defekten Fugen sondern auch über die Ziegel erheblich Wassermengen ins Turmmauerwerk transportiert werden.** Die w-Werte über die Ziegeloberflächen (Wasseraufnahmekoeffizienten) wurden nicht bestimmt, weil entsprechende Proben nicht zur Verfügung stehen.

<sup>1</sup> Freyburg, S. (1997): Qualitätsmerkmale historischer Ziegel. In. Ziegelindustrie International 7/97, S. 411-426

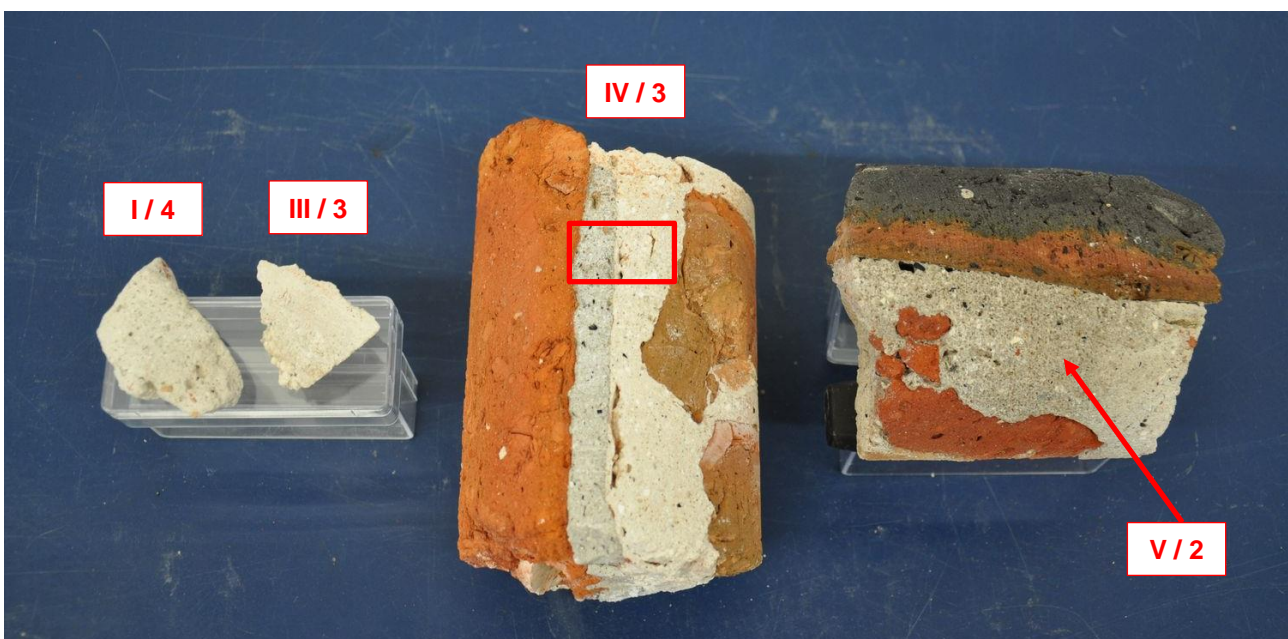


## 2.4. Mörtelcharakterisierung (Mikroskopische Untersuchungen)

### *Polarisationsmikroskopie (PolMi)*

Die Probenstücke wurden unter Vakuum mit blauem Kunstharz getränkt. Die Verwendung von blauem Harz verbessert die Erkennbarkeit von Poren, Hohlräumen und Rissen. Nach Aushärtung des Harzes erfolgte die Herstellung orientierter Dünnschliffe, an denen die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen durchgeführt wurden.

Im Polarisationsmikroskop können mineralische Bestandteile aufgrund ihres spezifischen lichtoptischen Verhaltens identifiziert und von anderen Materialien unterschieden werden. Damit sind Untersuchungen mineralischer Systeme hinsichtlich zahlreicher Kriterien möglich, z.B. an Mörteln: Art und Verteilung von Bindemitteln, Identifizierung von Zuschlägen und Nebenbestandteilen, Korngrößen und Kornformen, Homogenität. Weiterhin können Materialveränderungen nachgewiesen werden: Entfestigungen, Mineralumwandlungen bzw. -neubildungen, Krusten, Verdichtungen, Salze etc.



**Abb. 12:** Mörtelproben für die mikroskopische Untersuchung (Mö I/4, III/3, IV/3 und V/2)



**Abb. 13:**

Mörtelprobe II/7 für die mikroskopische Untersuchung



Tabelle 6: Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen

Proben-bez.	Beschreibung	Mikroskopische Charakterisierung	Abb.
Mö I/4	Grauer bauzeitlicher Mauermörtel BK I	<b>Gipsmörtel (Hochbrandgips)</b> <u>Bestandteile:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dihydratmatrix (Bindemittel)</li> <li>• Brenngutkörner (teilweise mit Hochtemperaturanhydrit)</li> <li>• primäre Bestandteile aus der Gipslagerstätte <ul style="list-style-type: none"> <li>- silikatische Mineralkörner, Größtkorn: 0,6 mm</li> <li>- vereinzelt Kalksteinpartikel</li> </ul> </li> <li>• hoher Gehalt an Mineralkörnern (gezielte Zugabe?)</li> <li>• vereinzelt Ziegelpartikel</li> <li>• vereinzelt mikrosparitische Kalkaggregate (kein BM)</li> <li>• vereinzelt Holzkohlepartikel (farbgebend)</li> </ul>	50 - 61
Mö III/3	Weißbeiger bauzeitlicher Mauermörtel BK III	<b>Gipsmörtel ohne Zuschlag (Hochbrandgips)</b> <u>Bestandteile:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dihydratmatrix (Bindemittel)</li> <li>• Brenngutkörner (teilweise mit Hochtemperaturanhydrit)</li> <li>• primäre Bestandteile aus der Gipslagerstätte <ul style="list-style-type: none"> <li>- silikatische Mineralkörner, Größtkorn: 0,6 mm</li> <li>- vereinzelt Kalksteinpartikel</li> <li>- sehr vereinzelt Anhydritpartikel</li> </ul> </li> <li>• sehr vereinzelt Ziegelpartikel</li> <li>• vereinzelt mikrosparitische Kalkaggregate (kein BM)</li> </ul> ⇒ <b>ähnlich Mö I/4, aber weniger Mineralkörner und weniger Holzkohle</b>	62 - 70
Mö IV/3	Kontaktbereich Grauer Mauermörtel / heller Mauermörtel BK IV	<b>Gipsmörtel (Hochbrandgips)</b> <u>Bestandteile:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Grauer Mauermörtel</b> vergleichbar Mö I/4</li> <li>• <b>Heller Mauermörtel</b> vergleichbar Mö III/3</li> <li>• Grauer Mörtel relativ dicht</li> <li>• Heller Mörtel hoch porös</li> </ul>	71 - 81
Mö V/2	Grauer Mauermörtel BK V	<b>Gipsmörtel mit Zuschlag</b> (vermutlich kein Hochbrandgips) <u>Bestandteile:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dihydrat (Bindemittel)</li> <li>• ungewöhnlich grobkristalline BM-Kristalle</li> <li>• auffällig bräunliche Färbung des Bindemittels</li> <li>• zahlreiche nicht identifizierte dunkle Partikel in den BM-Kristallen</li> <li>• keine Brenngutkörner</li> <li>• zahlreiche silikatische Mineralkörner (Größe: meist 0,4 mm) → vermutlich Zuschlag</li> <li>• Kalksteinpartikel (vermutlich primär)</li> <li>• Holzkohlepartikel (farbgebend)</li> <li>• vereinzelt Ziegelpartikel</li> </ul> ⇒ <b>verschieden von Mö I/4 und Mö III/3</b>	82 - 91
Mö III/7	Kontaktbereich Zementmörtel (Schale) / bauzeitlicher Mörtel BK II	<b>Feinkörniger Zementmörtel mit Zuschlag</b> <u>Bestandteile:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Portlandzement (Bindemittel)</li> <li>• Silikatischer Sand (Größtkorn: 0,5 mm)</li> </ul> ⇒ <b>Treibmineralbildung im Kontaktbereich zum bauzeitlichen Gipsmörtel</b>	92 - 103

### 3 Zusammenfassung und Bewertung

#### Probenmaterial und Untersuchungen:

##### 1. Bohrkern und Bohrmehlproben

**BK:** 100 mm - Bohrkern, Trockenbohrung von Innen bis ins neue Mauerwerk (nicht durchgebohrt)  
Anzahl: 5

⇒ Feuchtebestimmung

**B** Bohrmehlproben (6 Segmente bis 50 cm Tiefe), 14 mm - Spiralbohrung, von innen gebohrt  
Anzahl: 8

⇒ Feuchtebestimmung

⇒ Gehalt an bauschädlichen Salzen im vorderen Segment (0-5 cm)

#### Feuchte- und Salzgehalte im Mauerwerk

Ebene 5	Feuchte	W-Seite	BK 3	14 - 17	M-%		
		S-Seite	B6	10 - 21	M-%		
		O-Seite	B7	1 - 2	M-%		
		N-Seite	B8	<1 - 3	M-%		
	Salze	S-Seite	B6	0,11	M-% Chlorid	+	Gips
		O-Seite	B7	0,15	M-% Chlorid	+	Gips
		N-Seite	B8	0,01	M-% Chlorid	+	Gips
Ebene 3	Feuchte	W-Seite	BK 2	6 - 12	M-%		
		N-Seite	BK 4	2 - 5	M-% (ab ca. 0,8 m Tiefe)		
		O-Seite	B3	1 - 6	M-%		
		S-Seite	B4	1 - 5	M-%		
		S-Seite	B5	2 - 6	M-%		
	Salze	O-Seite	B3	0,35	M-% Chlorid		
		S-Seite	B4	0,40	M-% Chlorid	+	Gips
		S-Seite	B5	0,29	M-% Chlorid	+	Gips
Ebene 1	Feuchte	W-Seite	BK 1	5 - 13	M-%		
		S-Seite	BK 5	1-6	M-%		
		O-Seite	B1	5-12	M-%		
		N-Seite	B2	2-7	M-%		
	Salze	O-Seite	B1	5,43	M-% Chlorid, 0,56 M-% Nitrat	+	Gips
		N-Seite	B2	0,01	M-% Chlorid	+	Gips

##### 2. Bauzeitliche Ziegel und Mörtel sowie Reparaturmaterialien der jüngeren Vormauerschale

5 bauzeitliche (mittelalterliche Ziegel)

4 bauzeitliche Mauermörtel

1 Mauermörtel aus der jüngeren Vormauerschale einschließlich Kontraktbereich zum historischen Mauermörtel

**Fazit:****1. Feuchte- und Salzanalysen an Bohrkernen und Bohrmehlproben aus den Ebenen 1, 3 und 5**

**100 mm – Bohrkern**, Trockenbohrung von Innen bis ins neue Mauerwerk (nicht durchgebohrt)  
Trocknung bei Raumtemperatur (trockene „Büroluft“) bis zur Gewichtskonstanz

**Bohrmehlproben** (6 Segmente bis 50 cm Tiefe), 14 mm - Spiralbohrung, von innen gebohrt  
Trocknung bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz

**Salzanalysen** an den vorderen Segmenten (0-5 cm), Anionen und Kationen, IC / ICP-OES

**Feuchtegehalt / Feuchteverteilung**

- **Feuchte im Mauerwerk in allen Expositionsrichtungen grundsätzlich erhöht**  
(aber: sehr große Unterschiede)
- **W-Seite** (Bohrkerne): in allen Ebenen hohe bis sehr hohe Durchfeuchtung über den gesamten Wandquerschnitt (**5 - 17 M-%**)
- **N-Seite** (1 BK, 2x Bohrmehl): <1- 7 M-%
- **O-Seite** (3x Bohrmehl): **Ebene 1: 5-12 M-%**; Ebenen 3 und 5: 1-6 M-%
- **S-Seite** (1x BK, 2x Bohrmehl): Ebene 1 und 3: 1-6 M-%; **Ebene 5: 10-21 M-%**
- **Erhöhte Feuchtegehalte auch im Reparaturabschnitt**  
→ Feuchtetransport durch die „Schale“

**Gehalt an bauschädlichen Salzen**

- **Erhöhte Gipsgehalte in allen Proben**  
→ Ursache: **Gipsmörtel** als bauzeitlicher Mauermörtel (s.u.)
- **Im EG (O-Seite) stark erhöhte Chlorid- und Nitratgehalte**  
(**5,43 M-% Chlorid, 0,56 M-% Nitrat**)
- **In Ebene 3 erhöhte Chloridgehalte (0,3-0,4 M-%)**

**2. Bestimmung der Materialkennwerte der bauzeitlichen Ziegel und der Ziegel der jüngeren Vormauerschale (Rohdichte, Wasseraufnahme, Porosität, Druckfestigkeit)****Bauzeitliche (mittelalterliche) Ziegel / Reparaturziegel (jüngere Schale)**

- Bauzeitliche Ziegel und Reparaturziegel gut unterscheidbar (Gefüge, Homogenität, Farbe)
- Weder die bauzeitlichen Ziegel des Kernmauerwerks noch die Ziegel der jüngeren Vorsatzschale erfüllen bzgl. Rohdichte, Wasseraufnahme und Druckfestigkeit die Anforderungen für „dauerhafte“ Ziegel.
- **Die vorhandenen Ziegel sind weich, hoch porös und vermutlich stark saugend**
- **Es ist folglich anzunehmen, dass bei Regen und Wind nicht nur über die defekten Fugen sondern auch über die Ziegel erheblich Wassermengen ins Turmmauerwerk transportiert werden**

### 3. Charakterisierung der bauzeitlichen Mörtel und des Mörtels der jüngeren Schale

#### Bauzeitliche (mittelalterliche) Mörtel

- Es handelt sich bei allen Proben um Gipsmörtel ohne Kalkanteile im Bindemittel.
- Zwischen den Mörteln sind Unterschiede in der Farbe (verursacht durch Holzkohlebestandteile u.a.) und dem Gehalt an silikatischen Mineralkörnern vorhanden. Es lassen sich drei Gruppen bilden:
  - Mö I/3 Hochbrandgips, relativ viele silikatische Mineralkörner (evtl. Zuschlag)
  - Mö III/3 Hochbrandgips, kaum silikatische Mineralkörner
  - Mö V/2 vermutl. kein Hochbrandgips, sehr grobkristallines BM, bräunlich, hoher Gehalt an silikatischen Mineralkörnern (vermutl. Zuschlag)

#### Reparaturmörtel (jüngere Schale)

- Jüngere Reparaturen am Außenmauerwerk mit Zementmörtel
- **Treibmineralbildung in der Kontaktzone zum Gipsmörtel**

#### An den Bohrkernsegmenten keine Hinweise auf Injektionsmörtel

AMTLICHE MATERIALPRÜFUNGSANSTALT BREMEN

Dipl.-Ing. Frank Hlawatsch  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Abteilung Bauwesen

Dr. rer. nat. Frank Schlütter  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
AG Baustoffmikroskopie und Konservierungsforschung

Anlagen: Dokumentation der Probenentnahmestellen (Abb. 14 bis 49)  
Mikroskopische Aufnahmen (Abb. 50 bis 103) → separater Bildteil





**Abb. 14:**  
Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 1**  
(Ebene 1, W-Seite)



**Abb. 15:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 1** (Ebene 1, W-Seite)



**Abb. 16:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 1** (Ebene 1, W-Seite)

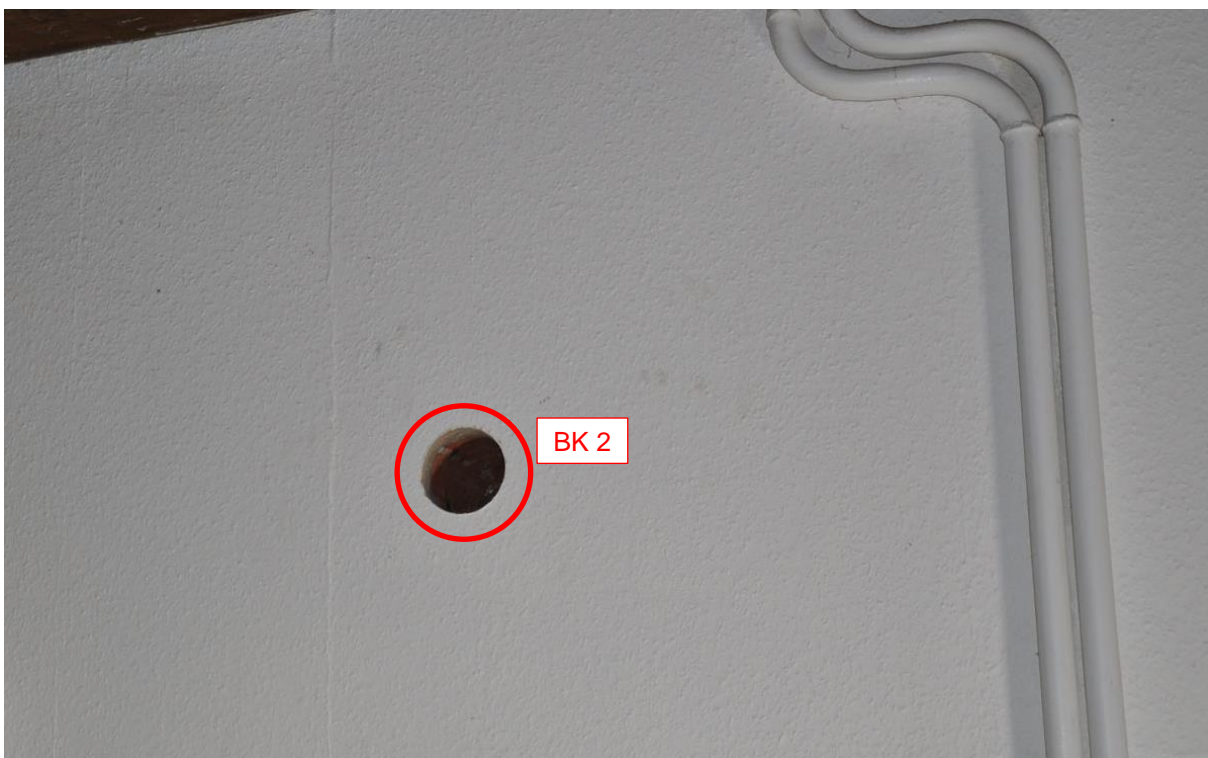


**Abb. 17:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 2** (Ebene 3, W-Seite)





**Abb. 18:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 2** (Ebene 3, W-Seite)



**Abb. 19:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 2** (Ebene 3, W-Seite)



**Abb. 20:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 3** (Ebene 3, W-Seite)



**Abb. 21:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 2** (Ebene 3, W-Seite)

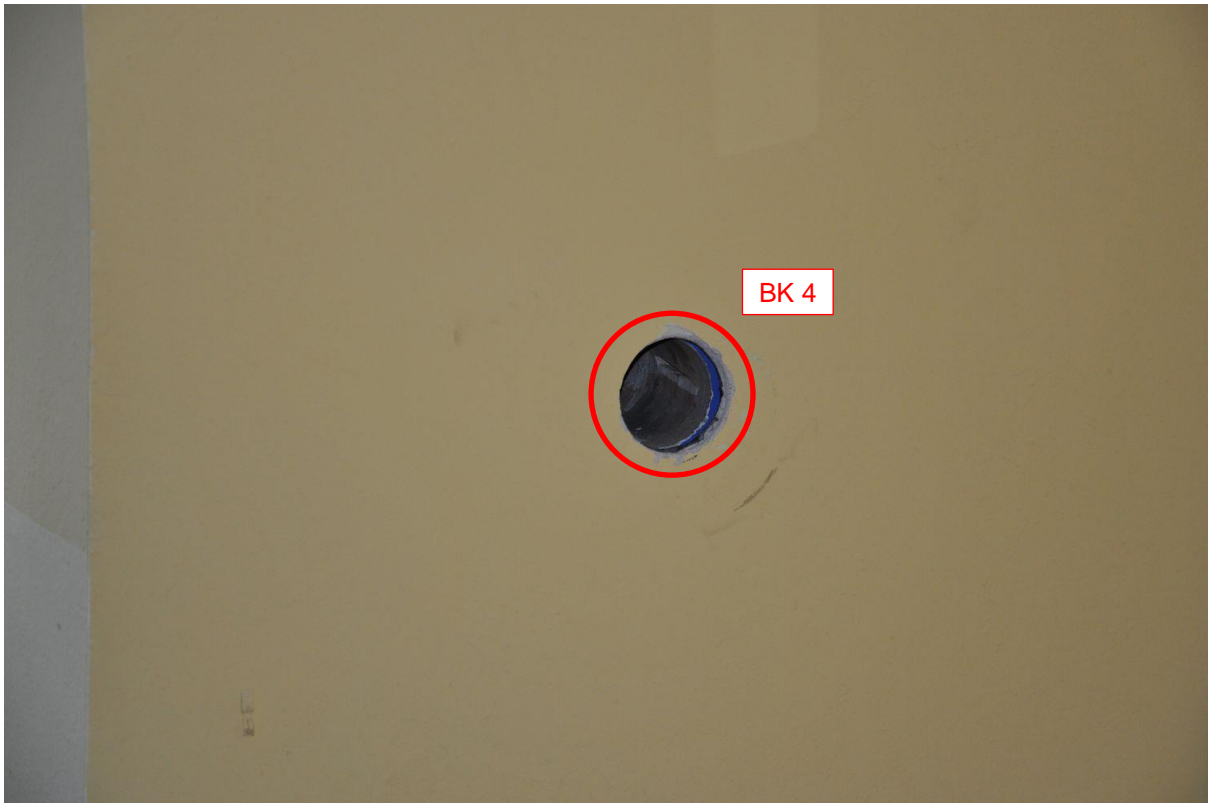




**Abb. 22:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 3** (Ebene 3, W-Seite)



**Abb. 23:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 4** (Ebene 3, N-Seite)



**Abb. 24:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 4** (Ebene 3, N-Seite)



**Abb. 25:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 4** (Ebene 3, N-Seite)



**Abb. 26:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 5** (Ebene 1, S-Seite) und der Bohrmehlprobe **B1** (Ebene 1, O-Seite)



**Abb. 27:** Entnahmestelle des Bohrkerns **BK 5** (Ebene 1, S-Seite)

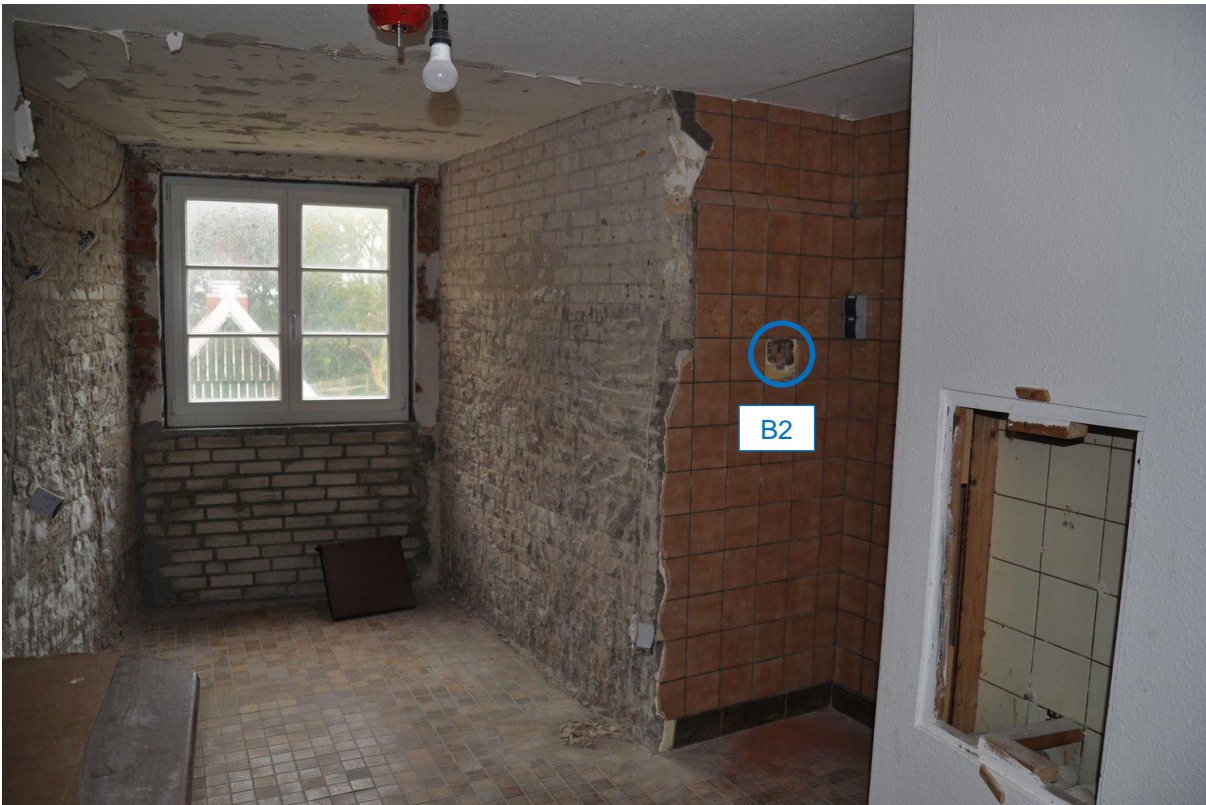




**Abb. 28:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B1** (Ebene 1, O-Seite)



**Abb. 29:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B1** (Ebene 1, O-Seite)



**Abb. 30:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B2** (Ebene 1, N-Seite)



**Abb. 31:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B2** (Ebene 1, N-Seite)





**Abb. 32:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B2** (Ebene 1, N-Seite)



**Abb. 33:**  
Wandaufbau im Bereich der Bohrmehlprobe **B2**





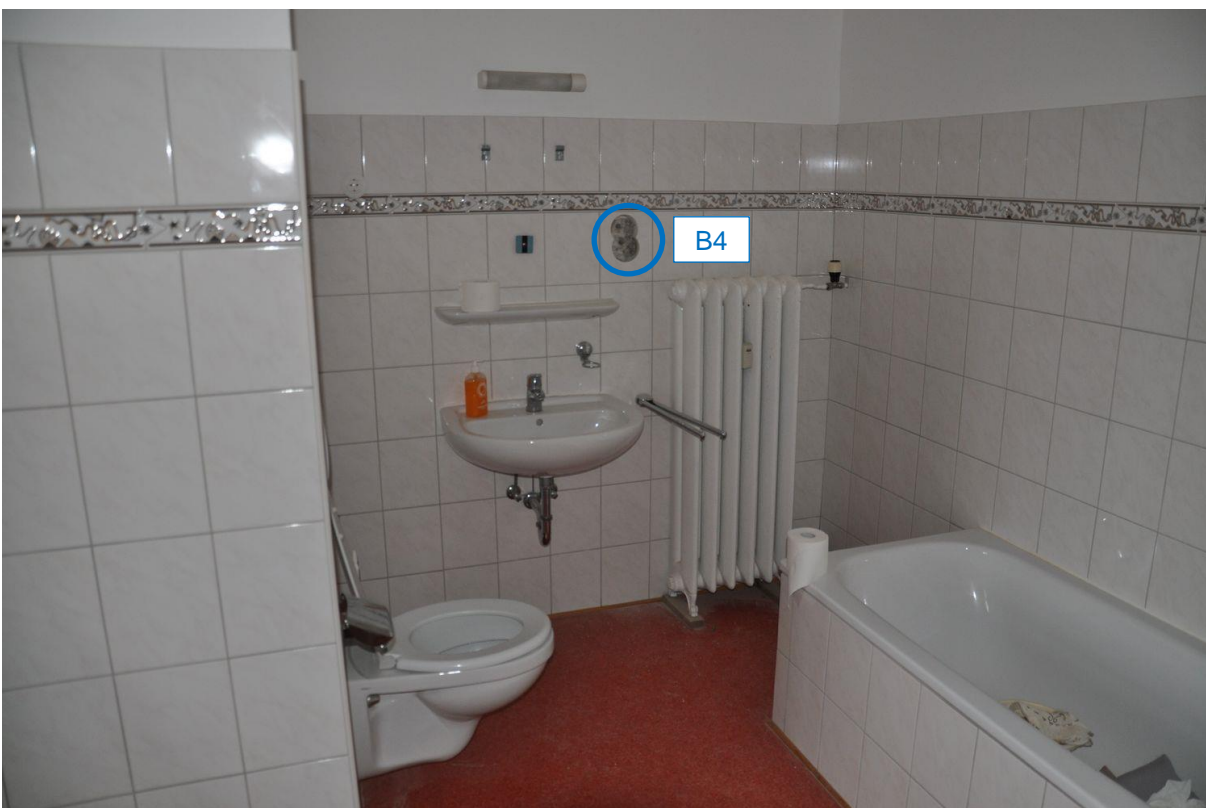
**Abb. 34:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B3** (Ebene 3, O-Seite)



**Abb. 35:**  
Wandaufbau im Bereich der  
Bohrmehlprobe **B2**



**Abb. 36:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B3** (Ebene 3, O-Seite)



**Abb. 37:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B4** (Ebene 3, S-Seite)





**Abb. 38:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B4** (Ebene 3, S-Seite)

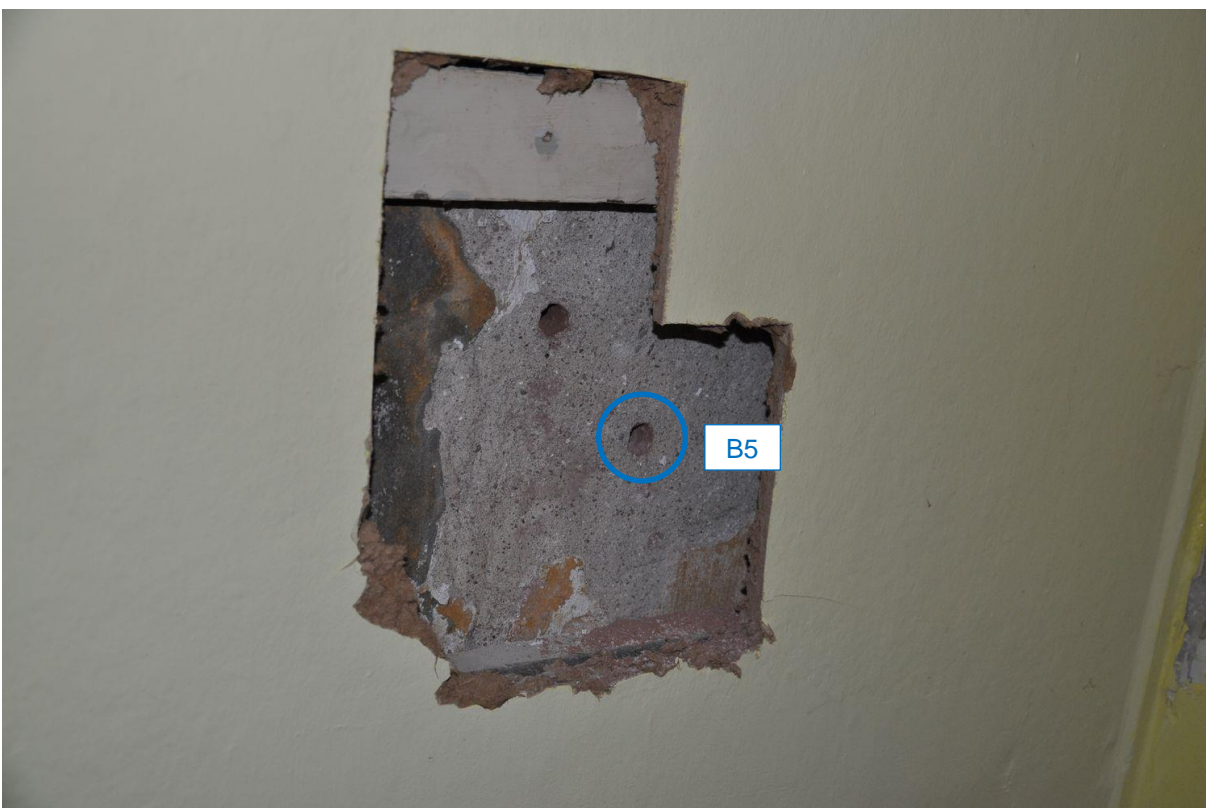


**Abb. 39:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B5** (Ebene 3, S-Seite)





**Abb. 40:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B5** (Ebene 3, S-Seite)



**Abb. 41:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B5** (Ebene 3, S-Seite)



**Abb. 42:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B6** (Ebene 5, S-Seite)



**Abb. 43:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B6** (Ebene 5, S-Seite)



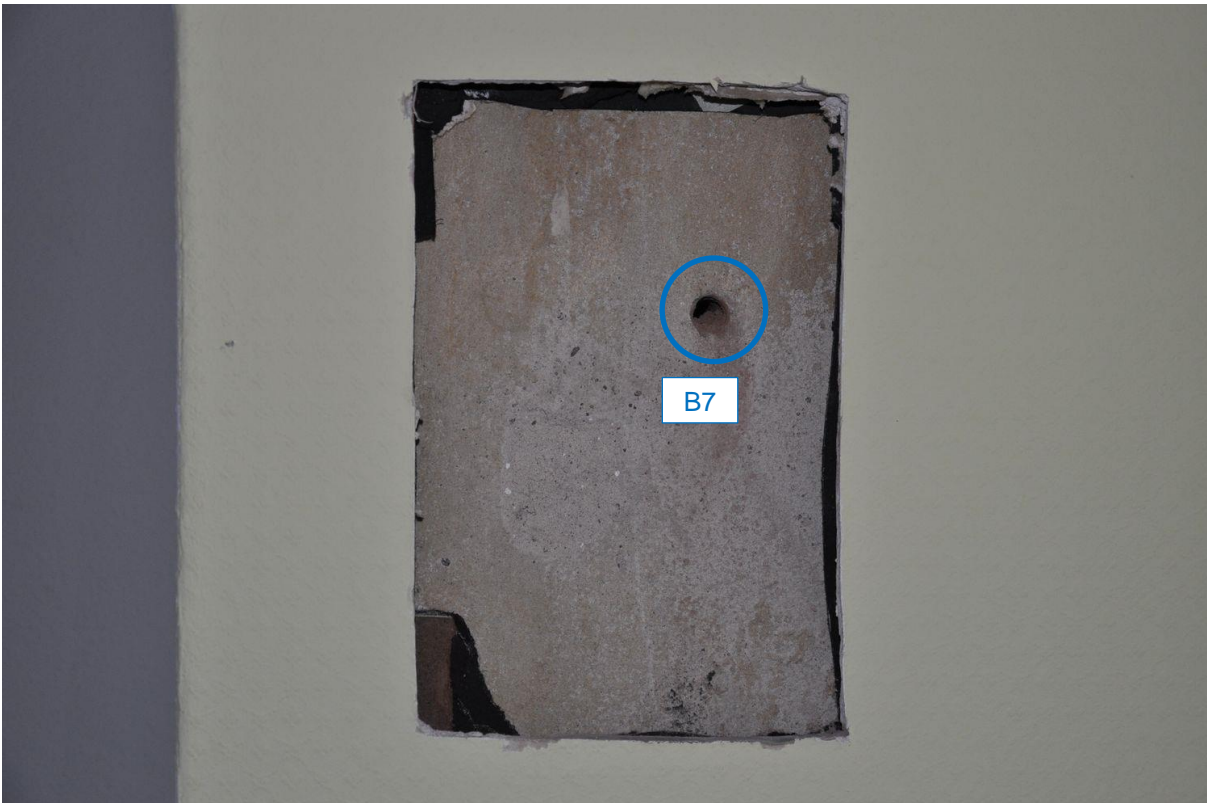


**Abb. 44:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B6** (Ebene 5, S-Seite)



**Abb. 45:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B7** (Ebene 5, O-Seite)





**Abb. 46:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B7** (Ebene 5, O-Seite)



**Abb. 47:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B8** (Ebene 5, N-Seite)



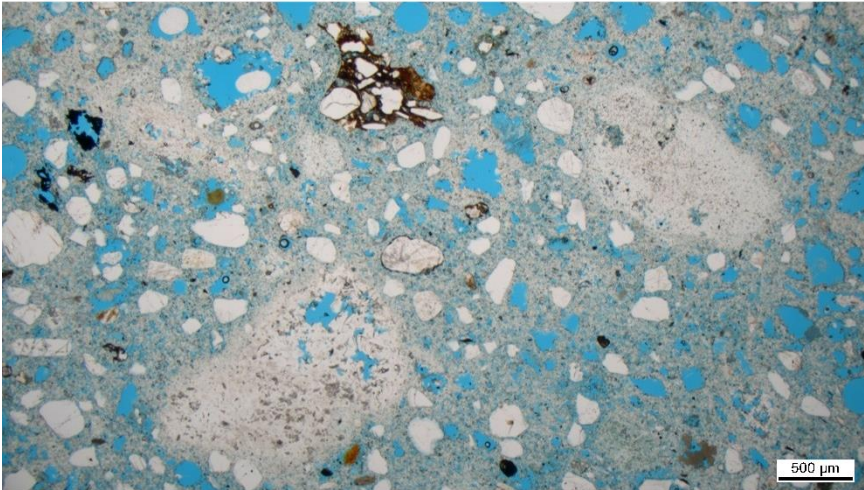
**Abb. 48:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B8** (Ebene 5, N-Seite)



**Abb. 49:** Entnahmestelle der Bohrmehlprobe **B8** (Ebene 5, N-Seite)



Probe **Mö I/4**



**Abb. 50:**

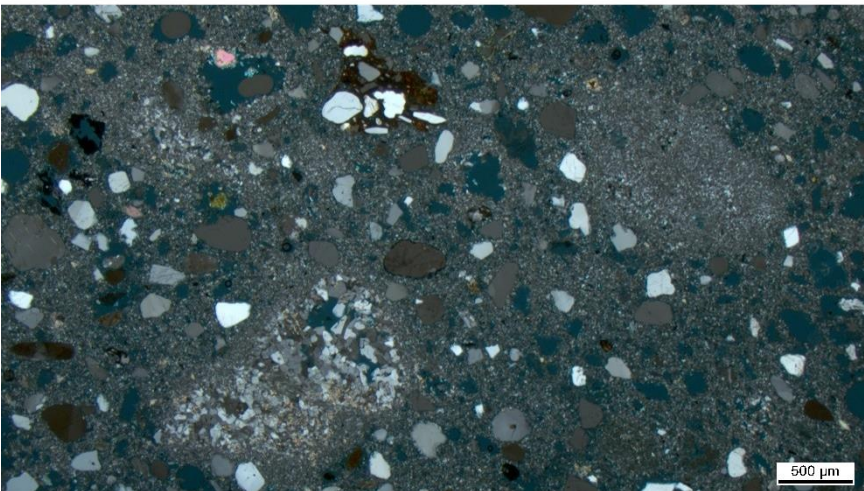
Hochbrandgipsmörtel. Dihydratmatrix mit Brenngutkörnern, silikatischen Mineralkörnern, Ziegelpartikel und Poren

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_001

Probe **Mö I/4**



**Abb. 51:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 50 unter gekreuzten Polarisatoren

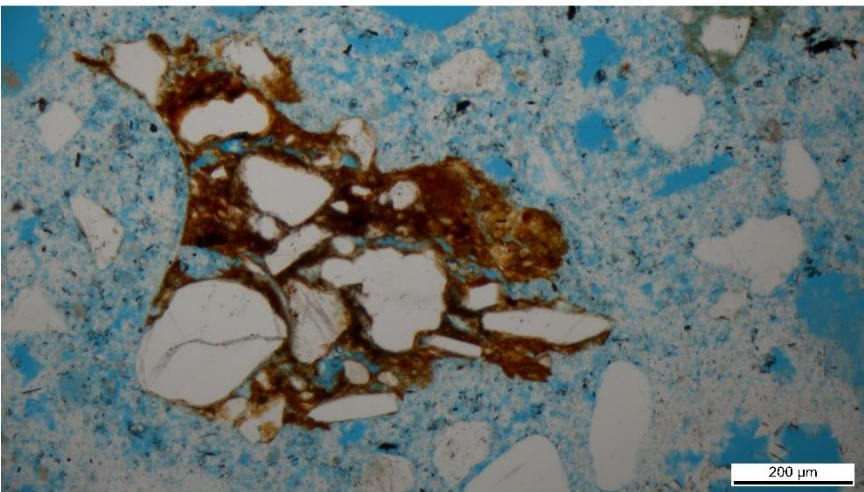
Hochbrandgipsmörtel. Dihydratmatrix mit Brenngutkörnern, silikatischen Mineralkörnern, Ziegelpartikel und Poren

**Beleuchtung:** Polarisation;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_002

Probe **Mö I/4**



**Abb. 52:**

Detail aus Abb. 50. Ziegelpartikel und silikatische Mineralkörner in Dihydratmatrix

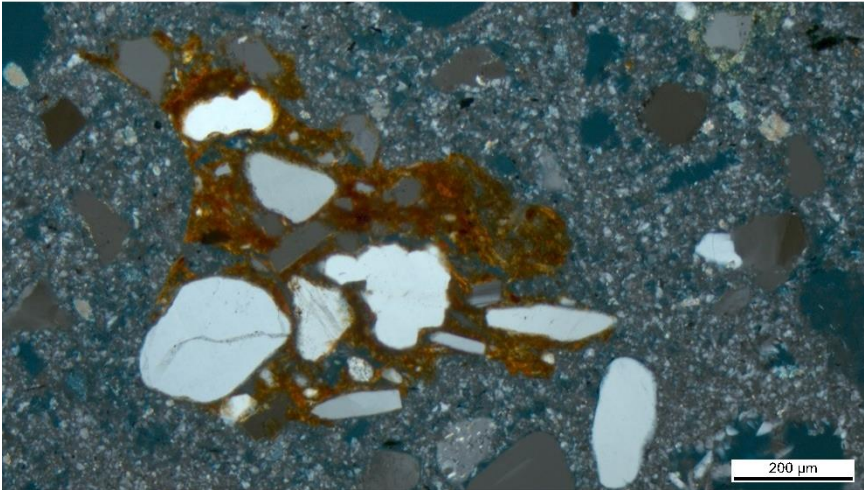
**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_003



Probe **Mö I/4**



**Abb. 53:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 52 unter gekreuzten Polarisatoren

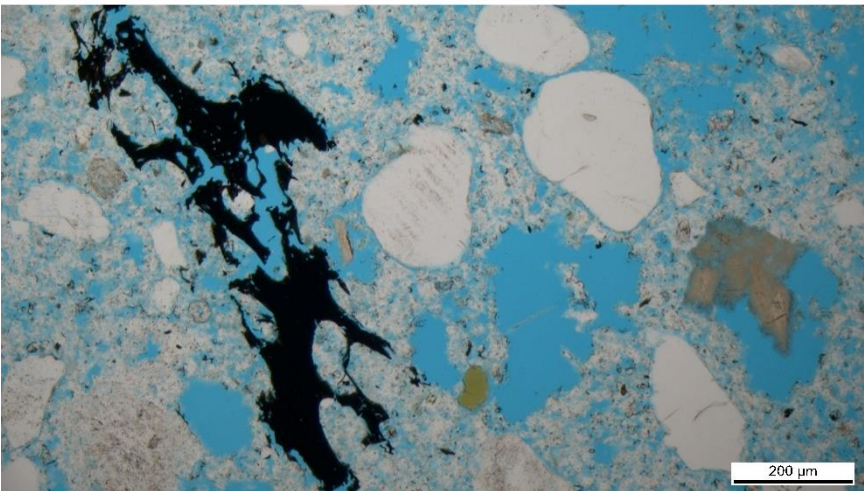
Ziegelpartikel und silikatische Mineralkörner in Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisierung; gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_004

Probe **Mö I/4**



**Abb. 54:**

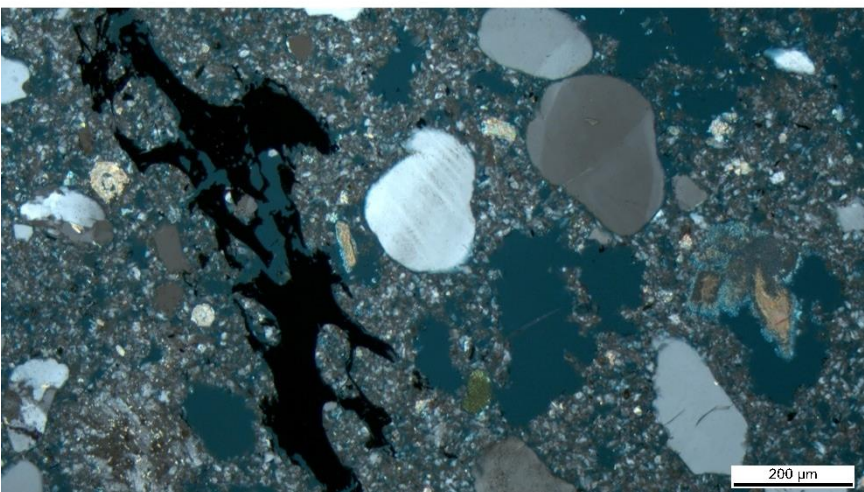
Holzkohle und silikatische Mineralkörner in Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisierung; parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_005

Probe **Mö I/4**



**Abb. 55:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 54 unter gekreuzten Polarisatoren

Holzkohle und silikatische Mineralkörner in Dihydratmatrix

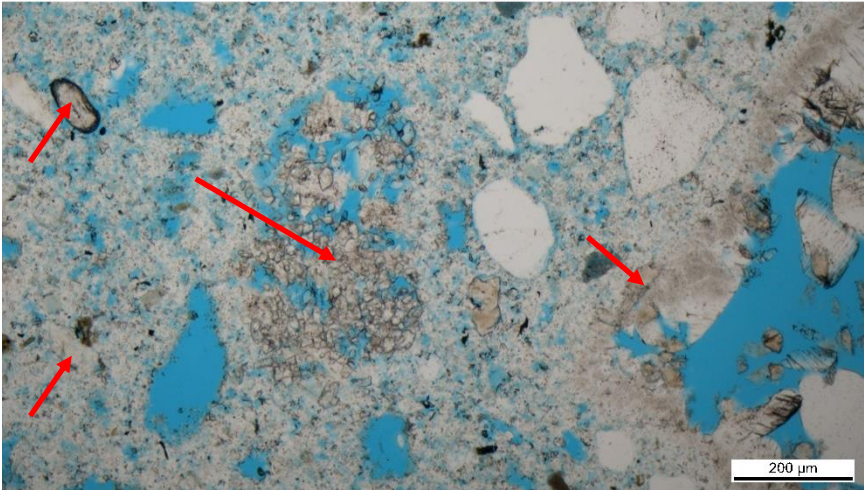
**Beleuchtung:** Polarisierung; gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_006



Probe **Mö I/4**



**Abb. 56:**

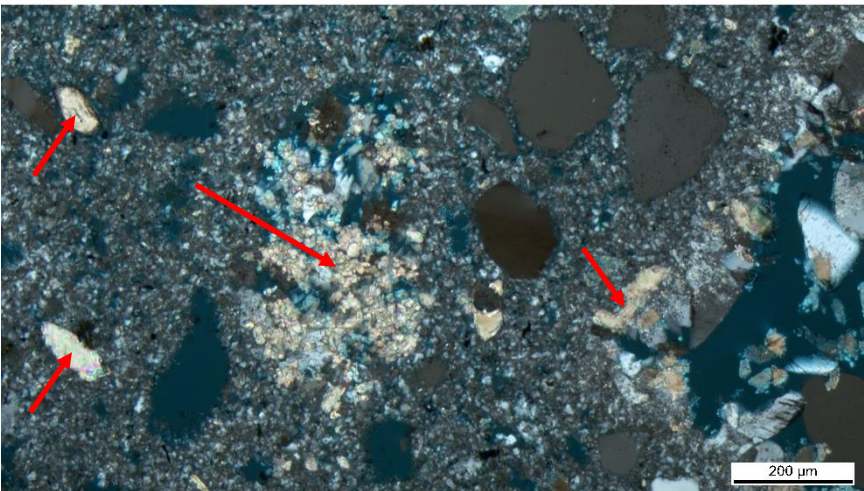
Primärer Kalk (Pfeile) und silikatische Mineralkörner in Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_007

Probe **Mö I/4**



**Abb. 57:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 56 unter gekreuzten Polarisatoren

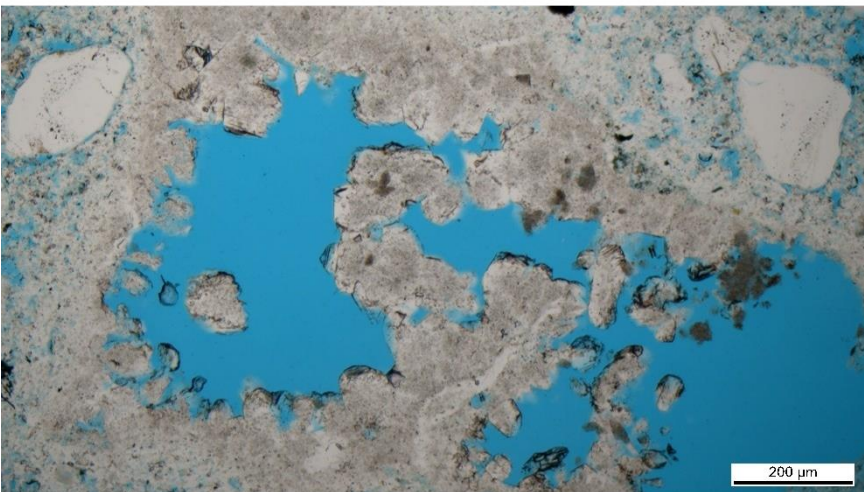
Primärer Kalk (Pfeile) und silikatische Mineralkörner in Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisierung;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_008

Probe **Mö I/4**



**Abb. 58:**

Brenngutkorn mit Hochtemperatur-anhydrit (bräunlich)

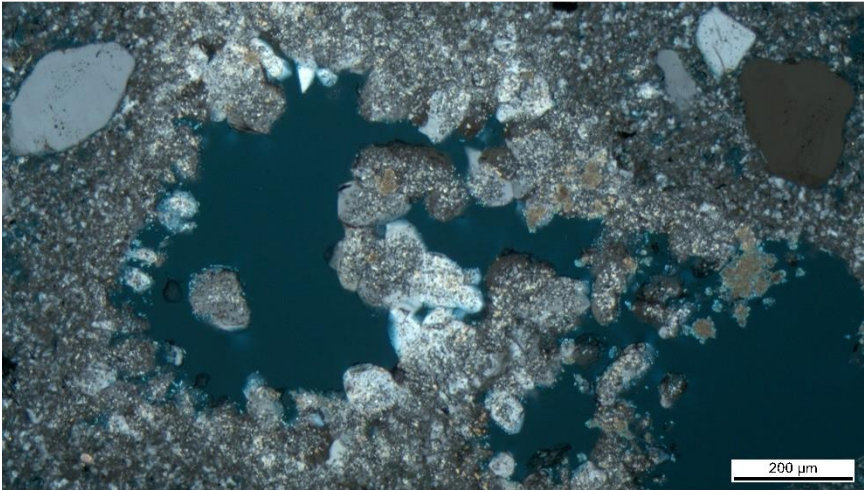
**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_009



Probe **Mö I/4**



**Abb. 59:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 58 unter gekreuzten Polarisatoren

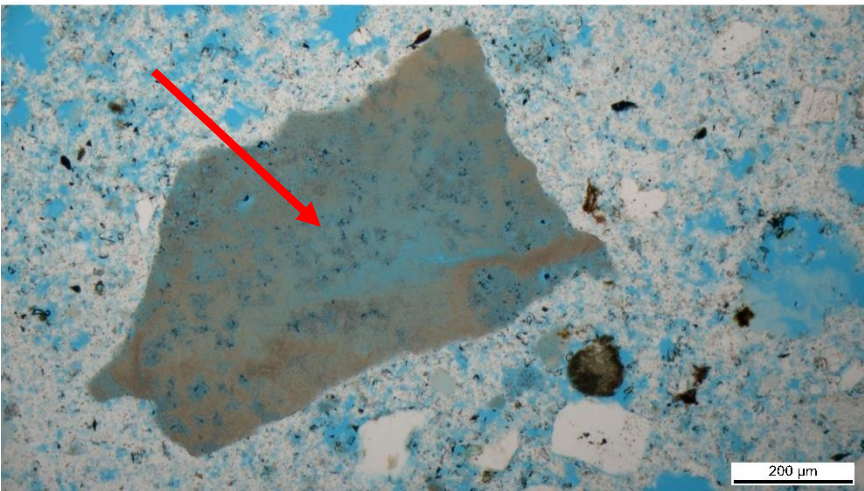
Brenngutkorn mit Hochtemperaturanhydrit (helle Flitter in den größeren Dihydratkristallen)

**Beleuchtung:** Polarisation; gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_010

Probe **Mö I/4**



**Abb. 60:**

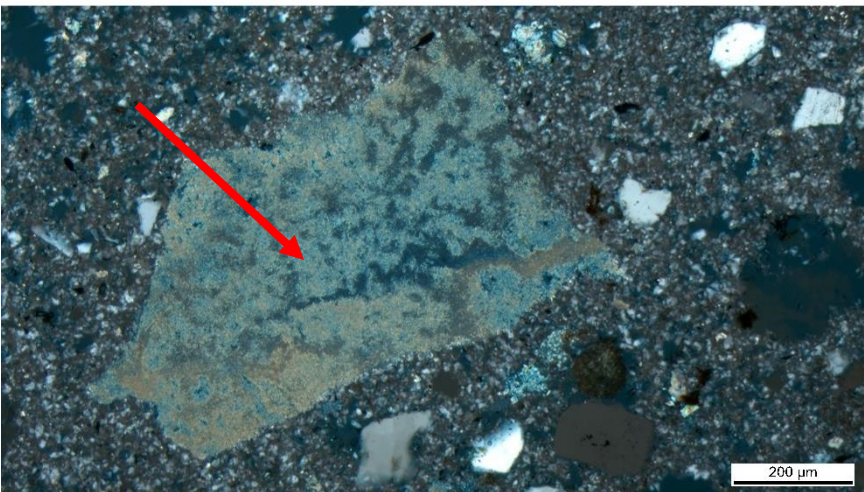
Mikrosparitischer Kalk in Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisation; parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_011

Probe **Mö I/4**



**Abb. 61:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 60 unter gekreuzten Polarisatoren

Mikrosparitischer Kalk in Dihydratmatrix

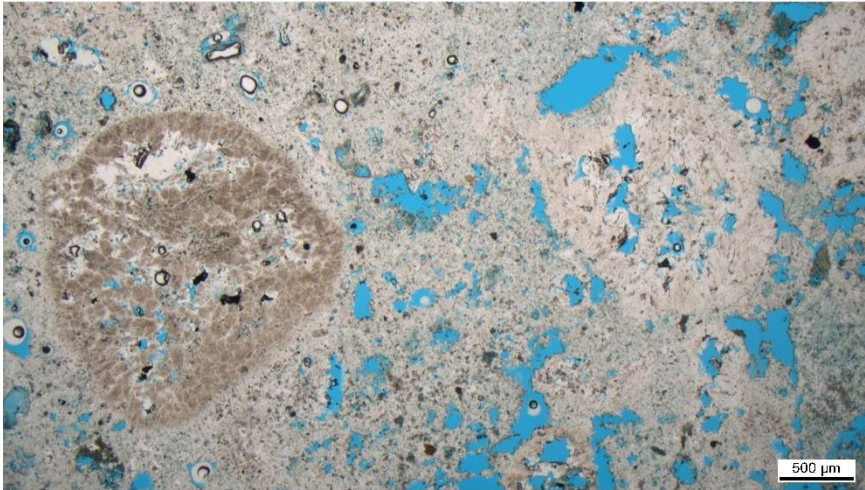
**Beleuchtung:** Polarisation; gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2479\_012



Probe **Mö III/3**



**Abb. 62:**

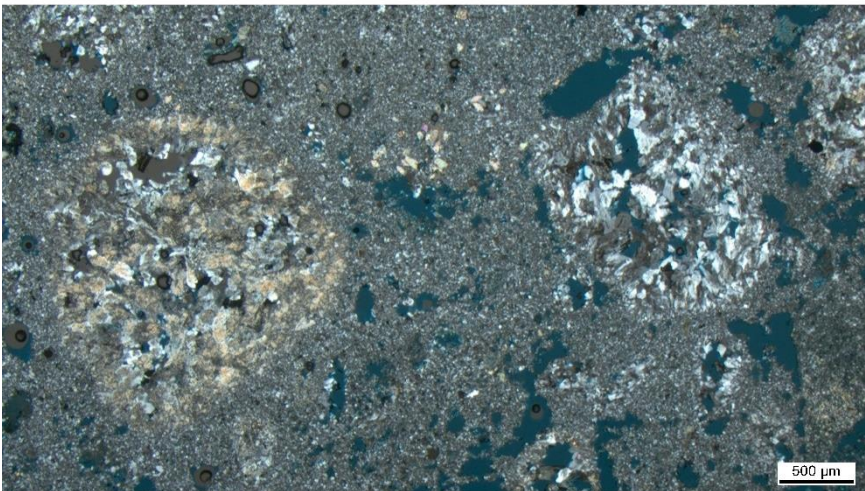
Hochbrandgipsmörtel.  
Dihydratmatrix mit  
Brenngutkörnern, primärem Kalk  
und Poren

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_001

Probe **Mö III/3**



**Abb. 63:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 62  
unter gekreuzten Polarisatoren

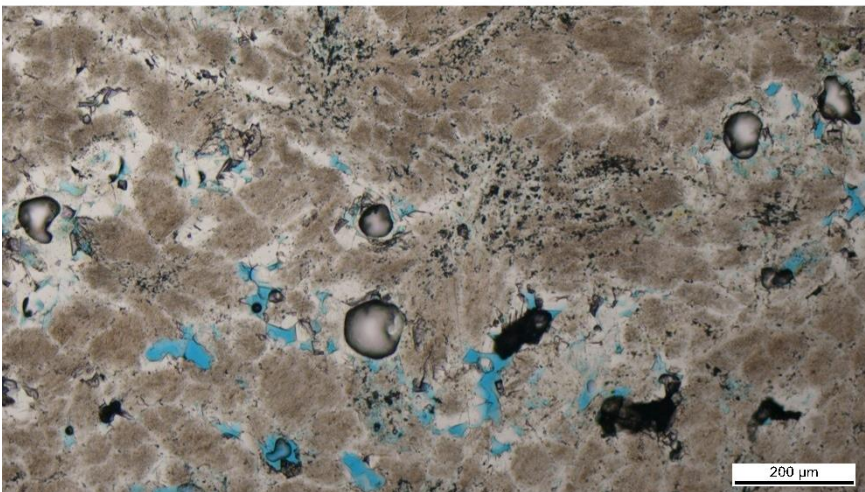
Hochbrandgipsmörtel.  
Dihydratmatrix mit  
Brenngutkörnern, primärem Kalk  
und Poren

**Beleuchtung:** Polarisation;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_002

Probe **Mö III/3**



**Abb. 64:**

1. Detail aus Abb. 62.  
Brenngutkorn mit Hochtemperatur-  
anhydrit (braun)

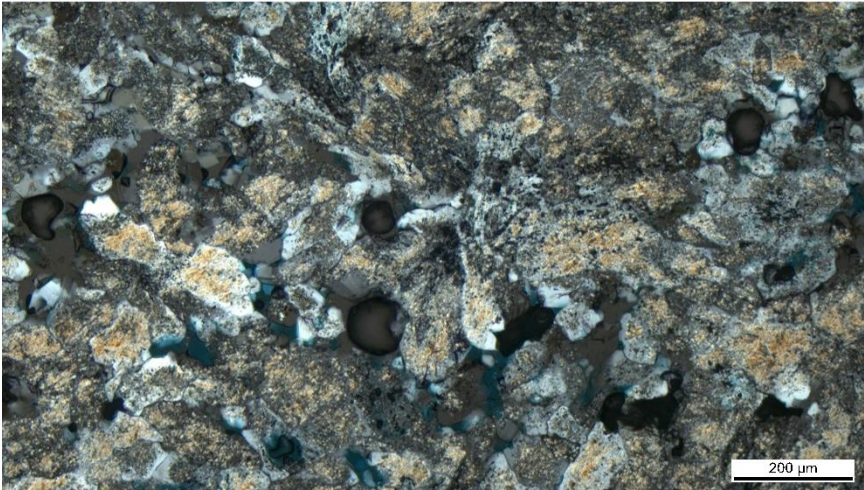
**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_003



Probe **Mö III/3**



**Abb. 65:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 64 unter gekreuzten Polarisatoren

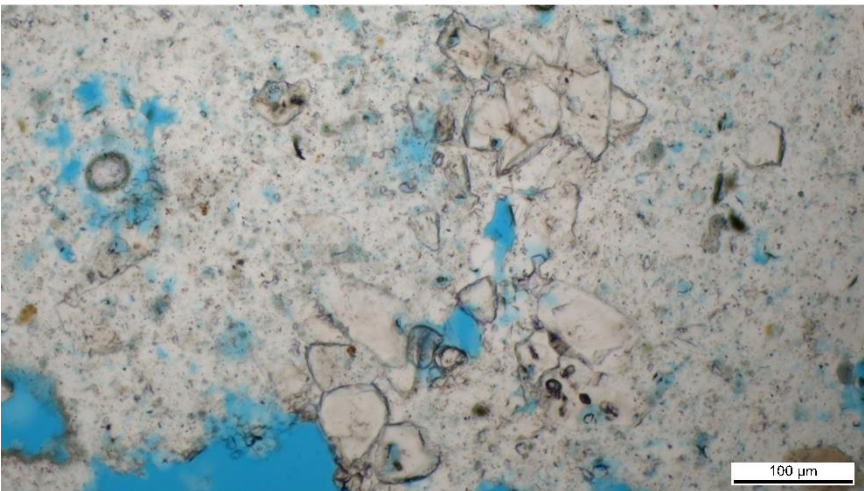
Brenngutkorn mit Hochtemperaturanhydrit (gelbe Flitter in den großen Dihydratkristallen)

**Beleuchtung:** Polarisations;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_004

Probe **Mö III/3**



**Abb. 66:**

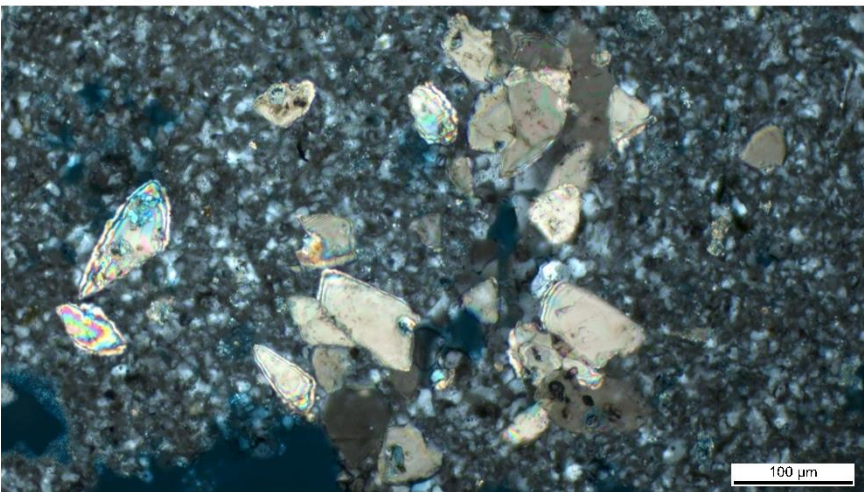
2. Detail aus Abb. 62. Primärer Kalk in Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisations;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_005

Probe **Mö III/3**



**Abb. 67:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 66 unter gekreuzten Polarisatoren

Primärer Kalk in Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisations;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_006



Probe **Mö III/3**



**Abb. 68:**

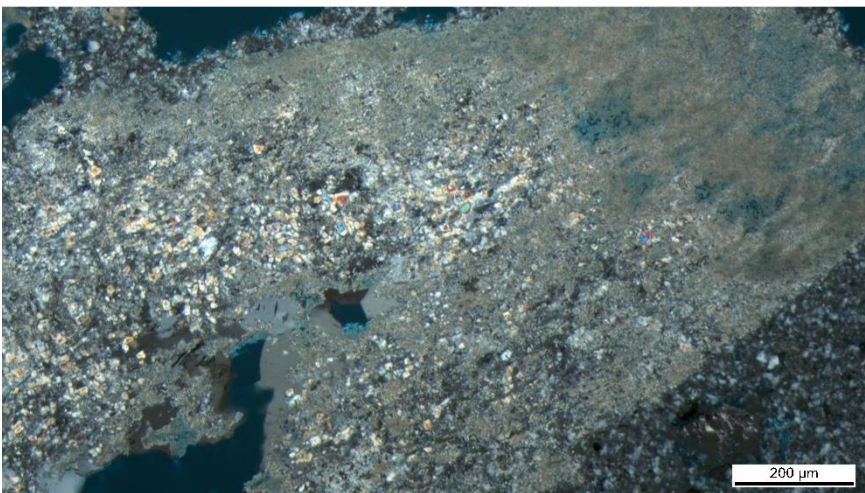
Mikrospartischer Kalk mit großen Dihydratkristallen (Umkristallisation) und primärem Anhydrit

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_007

Probe **Mö III/3**



**Abb. 69:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 68 unter gekreuzten Polarisatoren

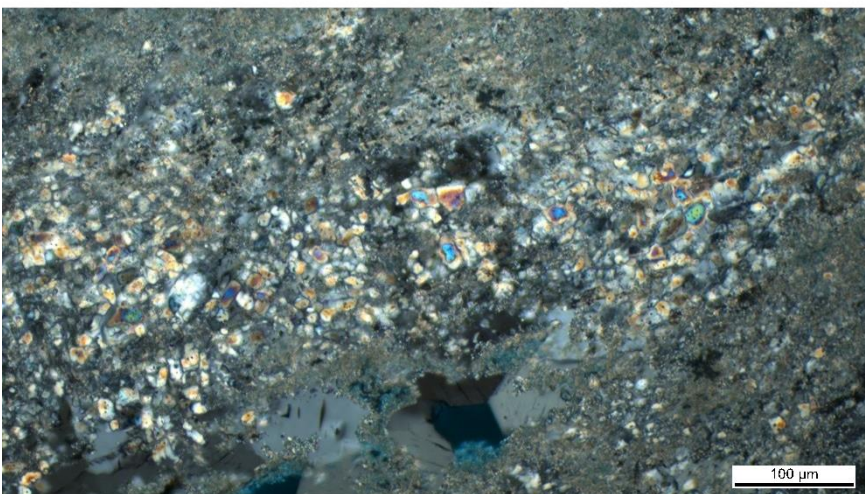
Mikrospartischer Kalk und primärer Anhydrit

**Beleuchtung:** Polarisation;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_008

Probe **Mö III/3**



**Abb. 70:**

Detail aus Abb. 69.  
Mikrospartischer Kalk und primärer Anhydrit

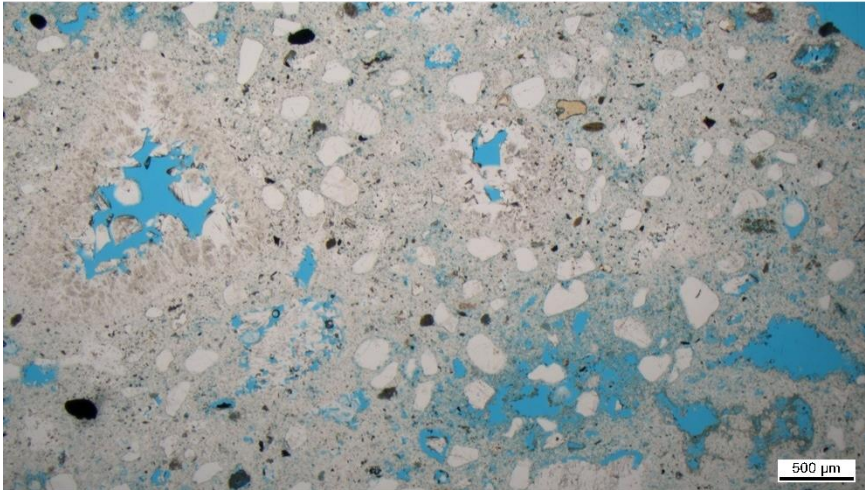
**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2481\_009



Probe **Mö IV/3**

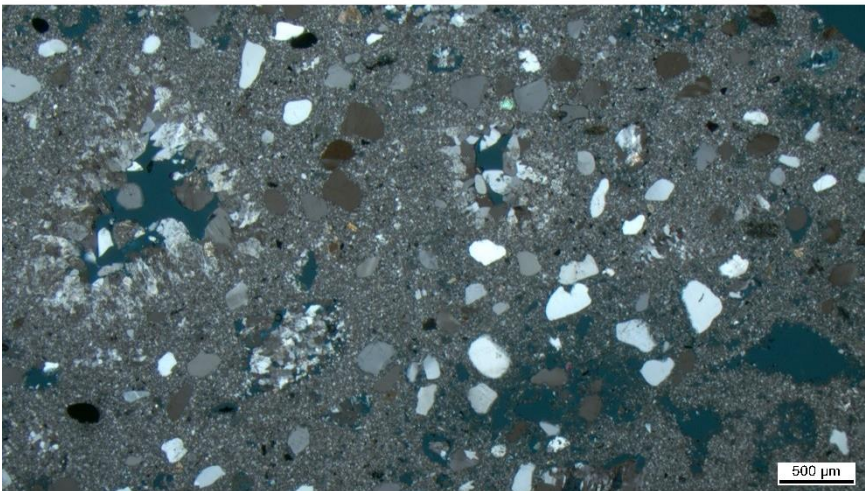


**Abb. 71:**

Grauer Mauermörtel (Gipsmörtel).  
Rel. dichte Dihydratmatrix mit Brenngutkörnern, silikatischen Mineralkörnern, Holzkohlepartikeln und Poren

**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel  
**Objektiv:**  
**Bildnummer:** 22M2482\_001

Probe **Mö IV/3**



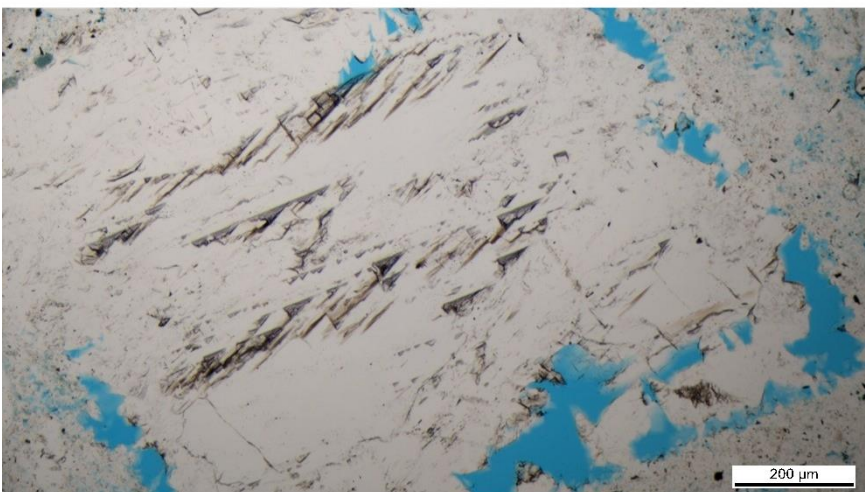
**Abb. 72:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 71 unter gekreuzten Polarisatoren

Grauer Mauermörtel (Gipsmörtel).  
Rel. dichte Dihydratmatrix mit Brenngutkörnern, silikatischen Mineralkörnern, Holzkohlepartikeln und Poren

**Beleuchtung:** Polarisierung;gekreuzt  
**Objektiv:**  
**Bildnummer:** 22M2482\_002

Probe **Mö IV/3**



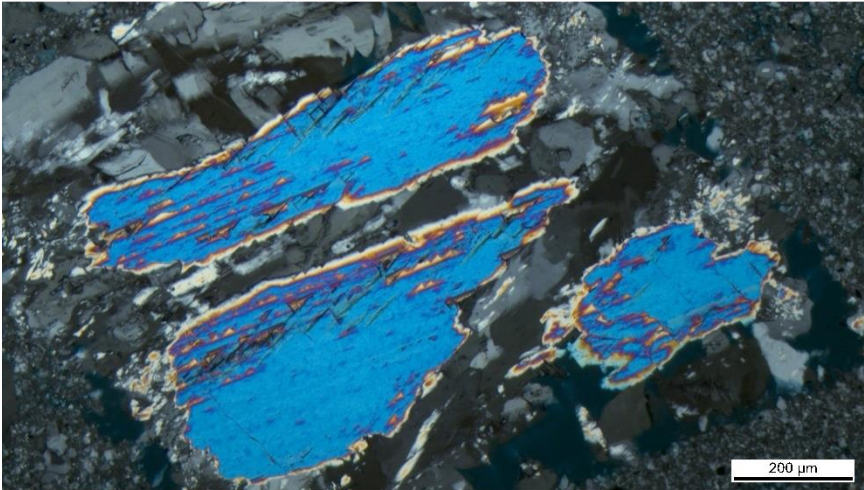
**Abb. 73:**

Grauer Mauermörtel (Gipsmörtel).  
Anhydritkorn mit Dihydrat-Umwandlungssaum

**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel  
**Objektiv:**  
**Bildnummer:** 22M2482\_003



Probe **Mö IV/3**



**Abb. 74:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 73 unter gekreuzten Polarisatoren

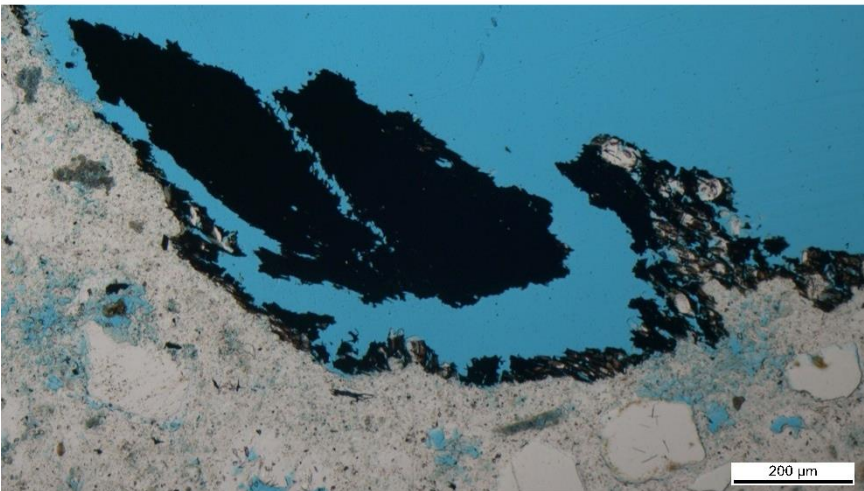
Grauer Mauermörtel (Gipsmörtel). Anhydritkorn mit Dihydrat-Umwandlungssaum

**Beleuchtung:** Polarisierung; gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2482\_004

Probe **Mö IV/3**



**Abb. 75:**

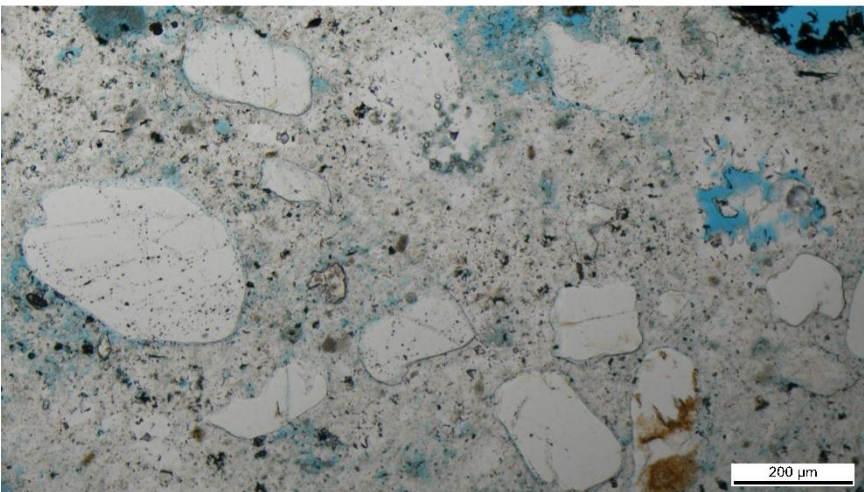
Grauer Mauermörtel (Gipsmörtel). Holzkohlepartikel und Dihydratmatrix mit Mineralkörnern

**Beleuchtung:** Polarisierung; parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2482\_005

Probe **Mö IV/3**



**Abb. 76:**

Grauer Mauermörtel (Gipsmörtel) bei höherer Vergrößerung. Dihydratmatrix mit silikatischen Mineralkörnern

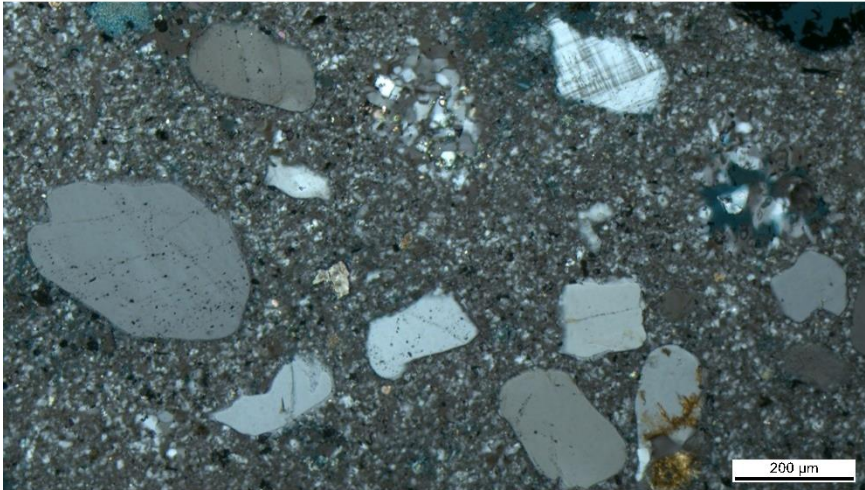
**Beleuchtung:** Polarisierung; parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2482\_006



Probe **Mö IV/3**



**Abb. 77:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 76 unter gekreuzten Polarisatoren

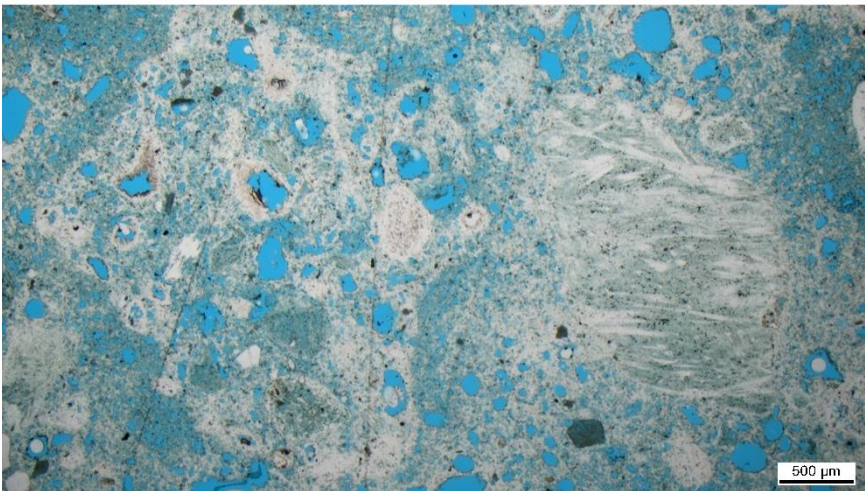
Grauer Mauer Mörtel (Gipsmörtel) bei höherer Vergrößerung. Dihydratmatrix mit silikatischen Mineralkörnern

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2482\_007

Probe **Mö IV/3**



**Abb. 78:**

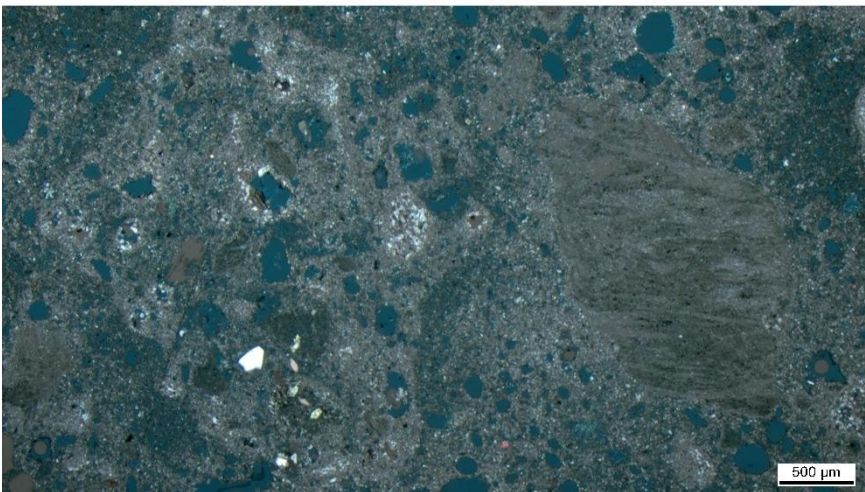
Heller Mauer Mörtel (Gipsmörtel). Rel. Poröse Dihydratmatrix mit Brenngutkörnern

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2482\_008

Probe **Mö IV/3**



**Abb. 79:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 78 unter gekreuzten Polarisatoren

Heller Mauer Mörtel (Gipsmörtel). Rel. Poröse Dihydratmatrix mit Brenngutkörnern

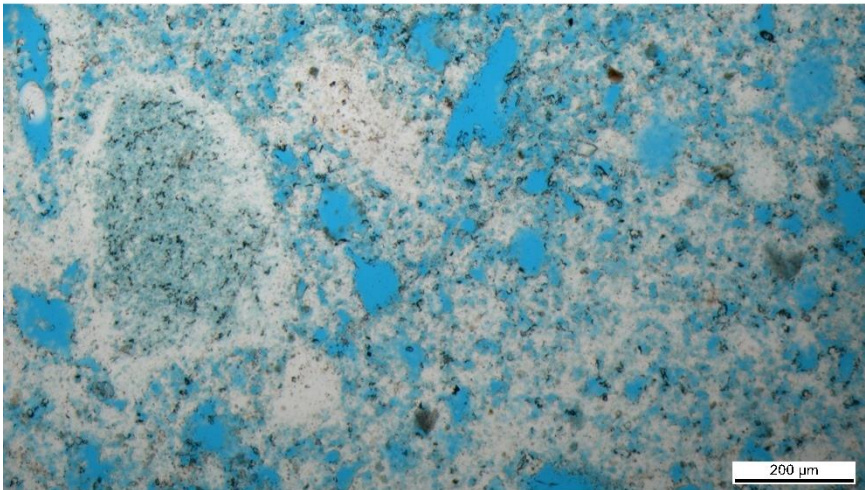
**Beleuchtung:** Polarisation;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2482\_009



Probe **Mö IV/3**



**Abb. 80:**

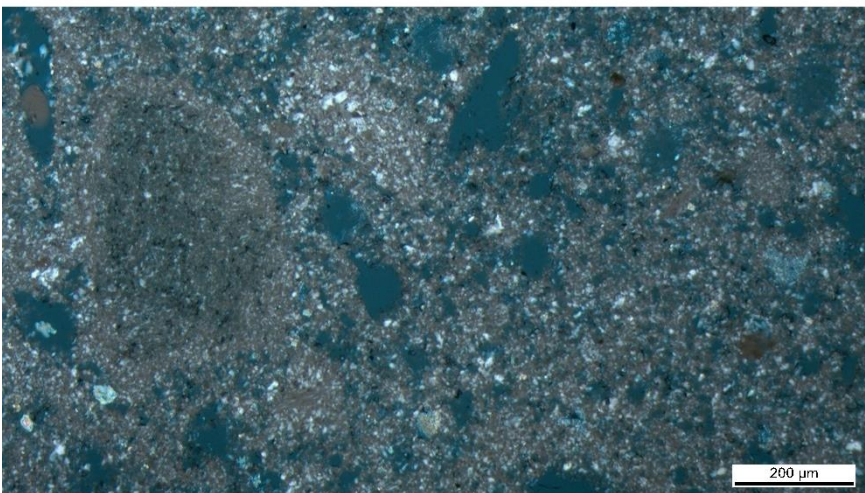
Heller Mauermörtel (Gipsmörtel).  
Poröse Dihydratmatrix bei  
höherer Vergrößerung

**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2482\_010

Probe **Mö IV/3**



**Abb. 81:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 80  
unter gekreuzten Polarisatoren

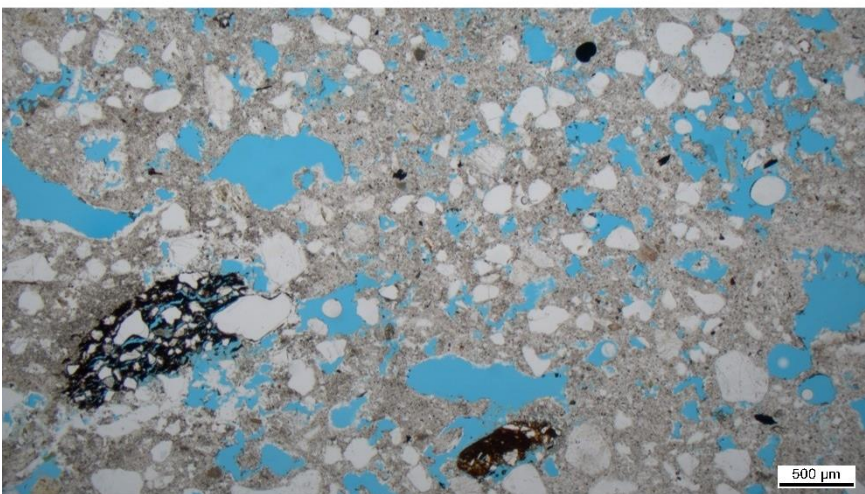
Heller Mauermörtel (Gipsmörtel).  
Poröse Dihydratmatrix bei  
höherer Vergrößerung

**Beleuchtung:** Polarisierung;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2482\_011

Probe **Mö V/2**



**Abb. 82:**

Gipsmörtel mit silikatischen  
Zuschlägen, Ziegelpartikeln und  
Poren. Auffällig bräunliche BM-  
Färbung

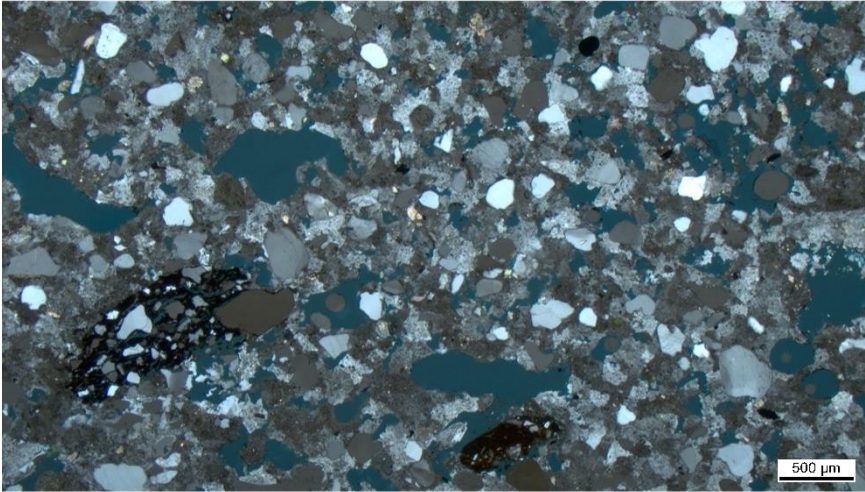
**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2483\_001



Probe **Mö V/2**



**Abb. 83:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 82 unter gekreuzten Polarisatoren

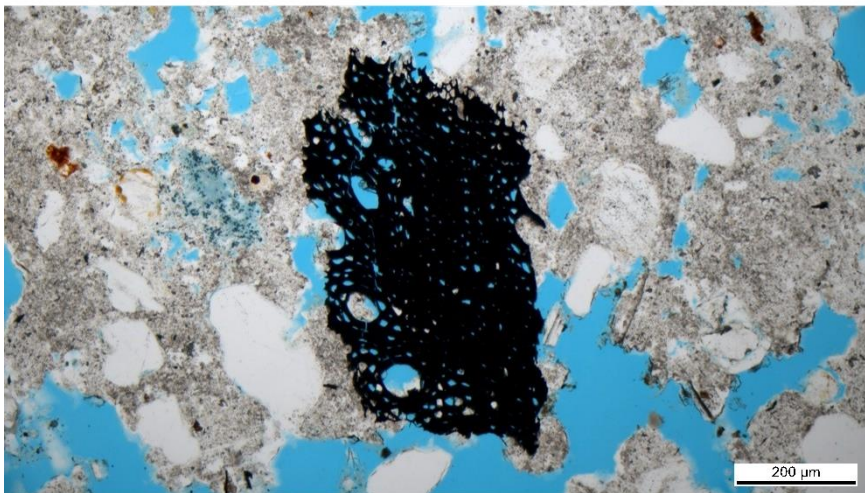
Gipsmörtel mit silikatischen Zuschlägen, Ziegelpartikeln und Poren. Auffällig bräunliche BM-Färbung

**Beleuchtung:** Polarisation; gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2483\_002

Probe **Mö V/2**



**Abb. 84:**

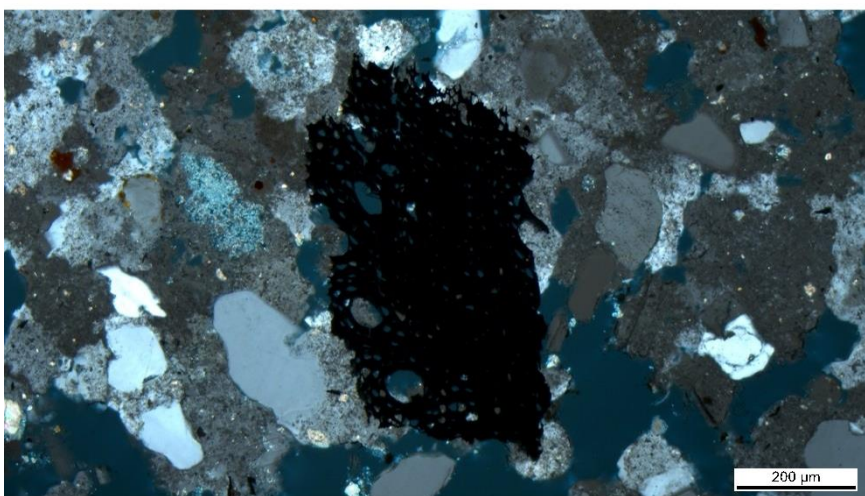
Holzkohlepartikel und mineralische Zuschläge in bräunlicher Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisation; parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2483\_003

Probe **Mö V/2**



**Abb. 85:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 84 unter gekreuzten Polarisatoren

Holzkohlepartikel und mineralische Zuschläge in bräunlicher Dihydratmatrix

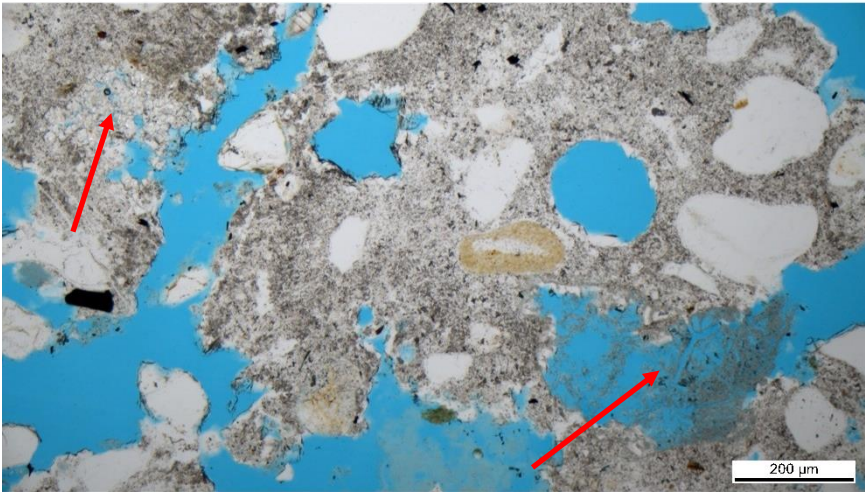
**Beleuchtung:** Polarisation; gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2483\_004



Probe **Mö V/2**

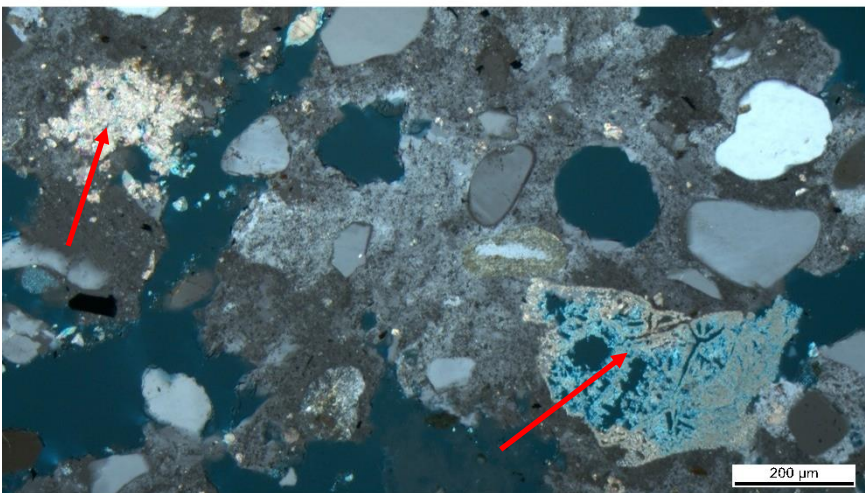


**Abb. 86:**

Primärer Kalk (Pfeile) und silikatische Mineralkörner in bräunlicher Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel  
**Objektiv:**  
**Bildnummer:** 22M2483\_005

Probe **Mö V/2**



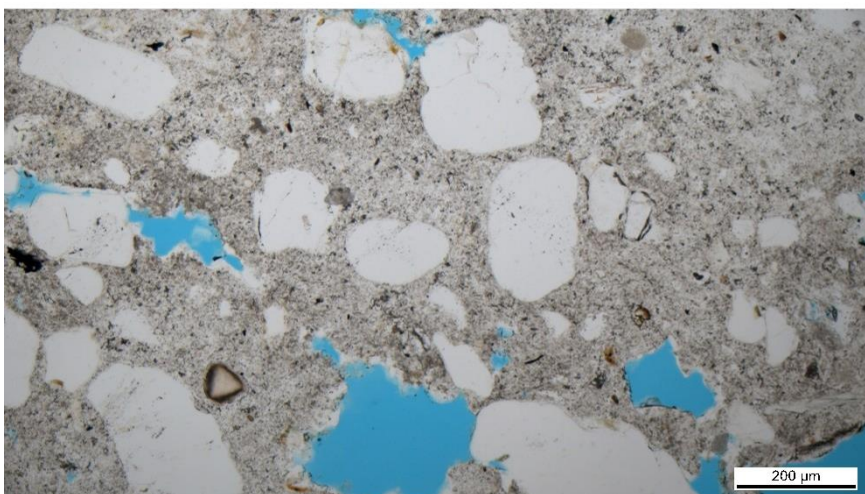
**Abb. 87:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 86 unter gekreuzten Polarisatoren

Primärer Kalk (Pfeile) und silikatische Mineralkörner in bräunlicher Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisation;gekreuzt  
**Objektiv:**  
**Bildnummer:** 22M2483\_006

Probe **Mö V/2**



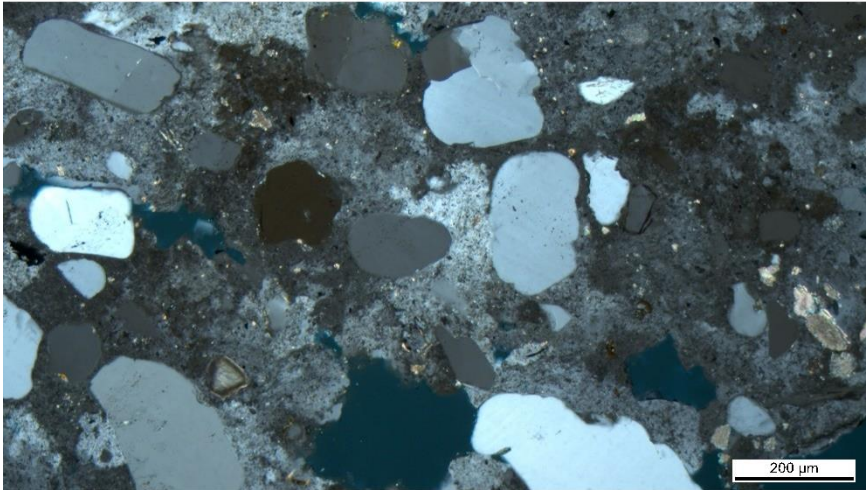
**Abb. 88:**

Gefüge bei höherer Vergrößerung. Silikatische Mineralkörner in bräunlicher Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel  
**Objektiv:**  
**Bildnummer:** 22M2483\_007



Probe **Mö V/2**



**Abb. 89:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 88 unter gekreuzten Polarisatoren

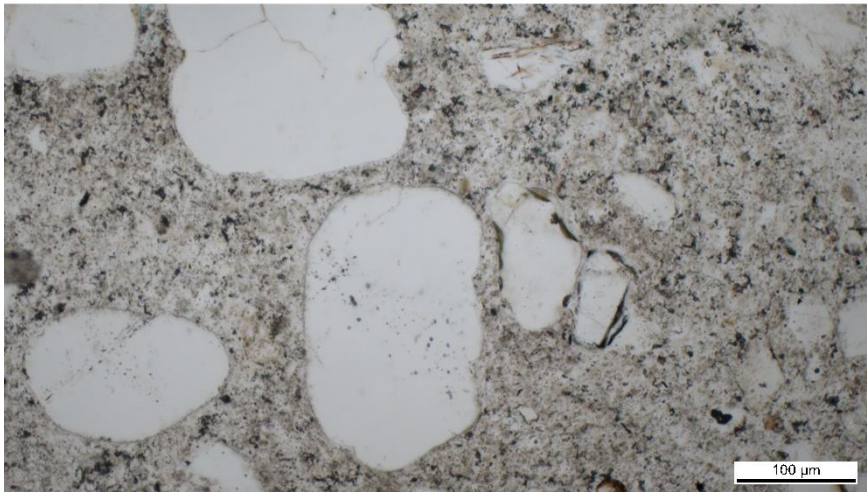
Gefüge bei höherer Vergrößerung. Silikatische Mineralkörner in stark rekristallisierter Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisation;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2483\_008

Probe **Mö V/2**



**Abb. 90:**

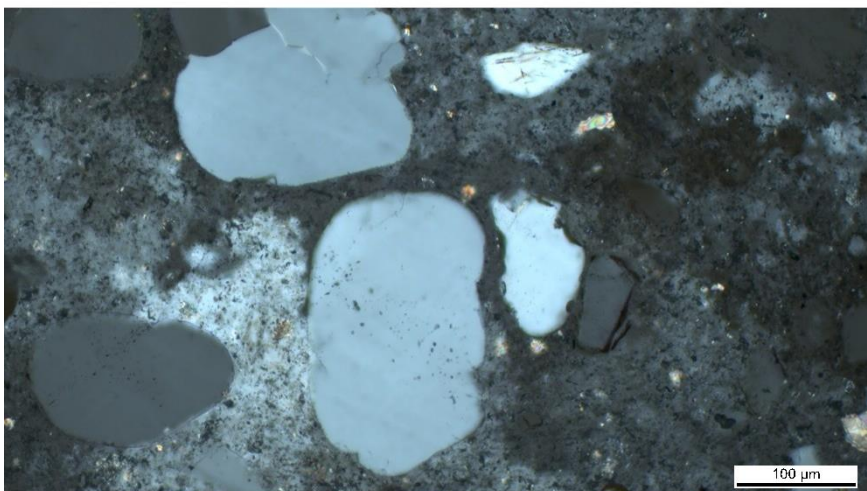
Detail aus Abb. 88. Silikatische Mineralkörner in bräunlicher Dihydratmatrix

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2483\_009

Probe **Mö V/2**



**Abb. 91:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 90 unter gekreuzten Polarisatoren

Silikatische Mineralkörner in stark rekristallisierter Dihydratmatrix

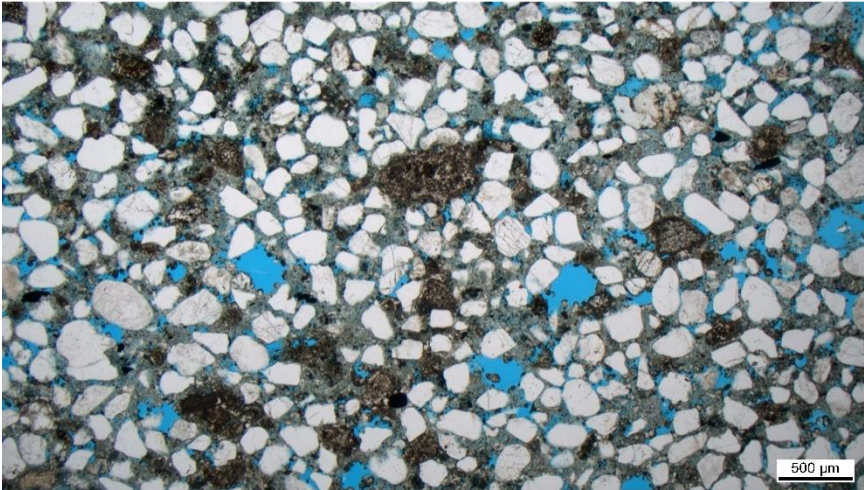
**Beleuchtung:** Polarisation;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2483\_010



Probe **Mö II/7**



**Abb. 92:**

Zementmörtel mit silikatischen Zuschlägen. Übersicht

**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_001

Probe **Mö II/7**



**Abb. 93:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 92 unter gekreuzten Polarisatoren

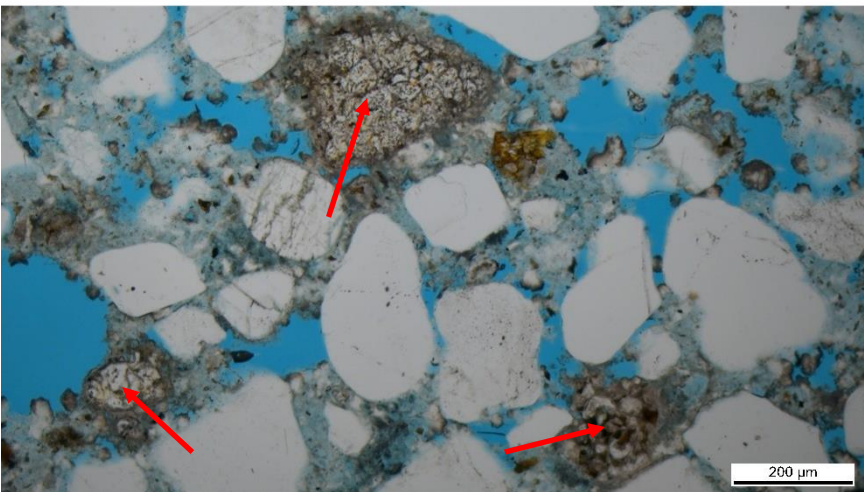
Zementmörtel mit silikatischen Zuschlägen. Übersicht

**Beleuchtung:** Polarisierung;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_002

Probe **Mö II/7**



**Abb. 94:**

1. Detail aus Abb. 92. Große PZ-Klinkerrelikte (Pfeile) in der BM-Matrix des Zementmörtels

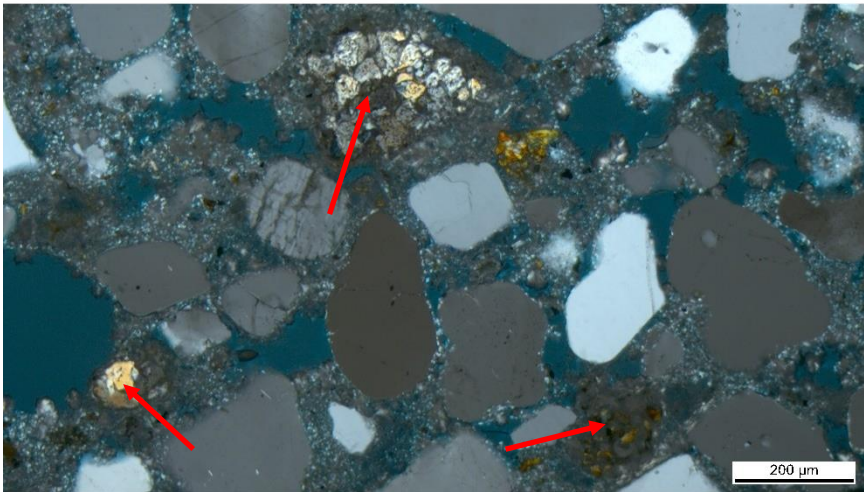
**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_003



Probe **Mö II/7**



**Abb. 95:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 94 unter gekreuzten Polarisatoren

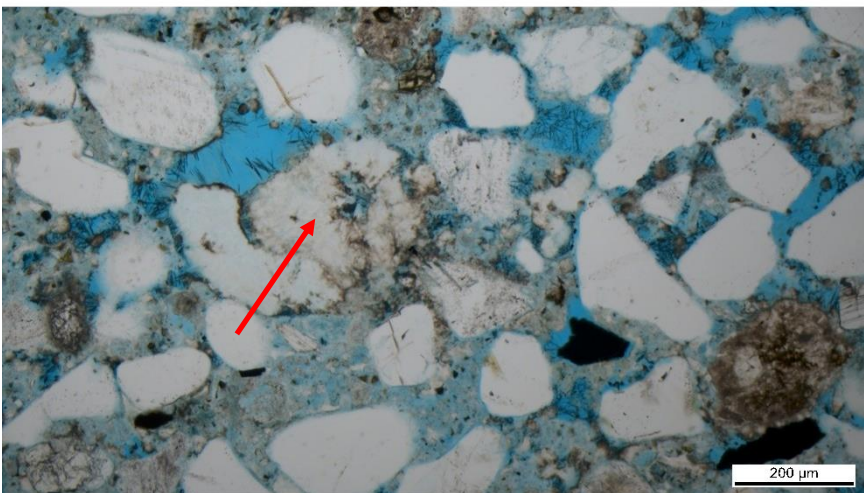
Große PZ-Klinkerrelikte (Pfeile) in der BM-Matrix des Zementmörtels

**Beleuchtung:** Polarisierung;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_004

Probe **Mö II/7**



**Abb. 96:**

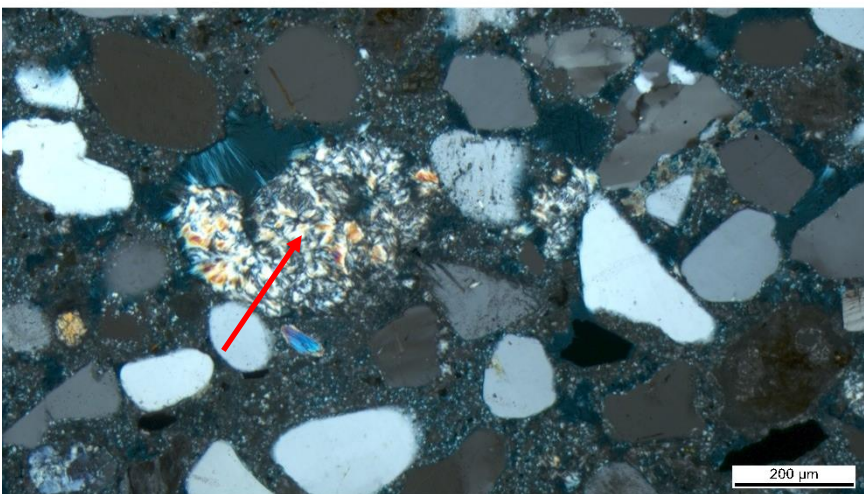
2. Detail aus Abb. 92.  
Treibminerale (vermutlich  
Thaumasit) in einer Luftpore des  
Zementmörtel

**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_005

Probe **Mö II/7**



**Abb. 97:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 96 unter gekreuzten Polarisatoren

Treibminerale (vermutlich  
Thaumasit) in einer Luftpore des  
Zementmörtel

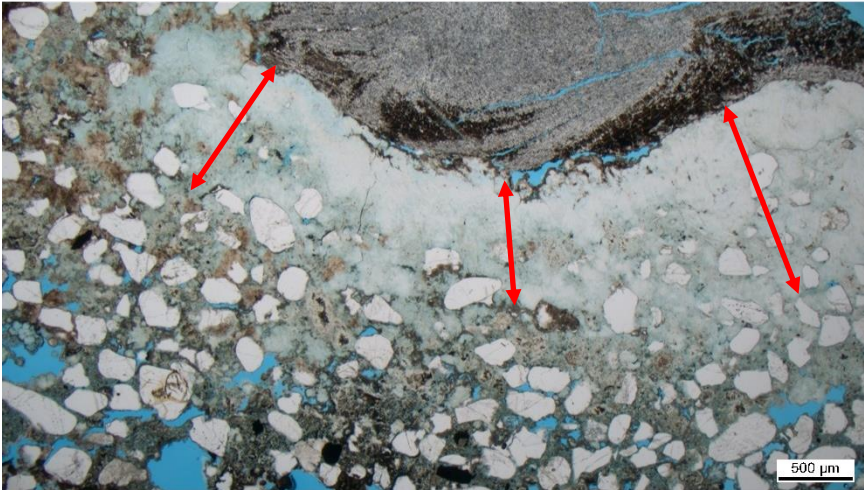
**Beleuchtung:** Polarisierung;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_006



Probe **Mö II/7**



**Abb. 98:**

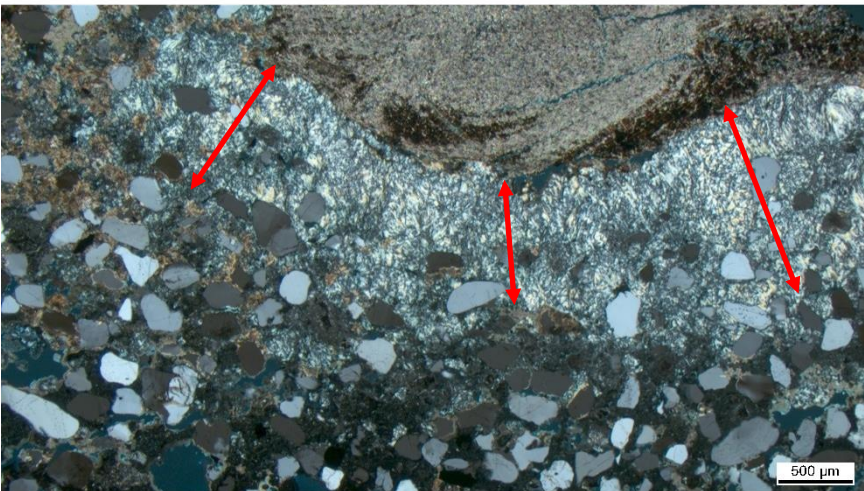
Treibmineralbildung (vermutlich Thaumasit) im Kontaktbereich des Injektionsmörtels (unten) zum Gips-Mauermörtel (außerhalb des Bildes)

**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_007

Probe **Mö II/7**



**Abb. 99:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 98 unter gekreuzten Polarisatoren

Treibmineralbildung (vermutlich Thaumasit) im Kontaktbereich des Injektionsmörtels (unten) zum Gips-Mauermörtel (außerhalb des Bildes)

**Beleuchtung:** Polarisierung;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_008

Probe **Mö II/7**



**Abb. 100:**

Detail aus Abb. 98.  
Treibmineral (vermutlich Thaumasit) im Kontaktbereich des Injektionsmörtels zum Gips-Mauermörtel

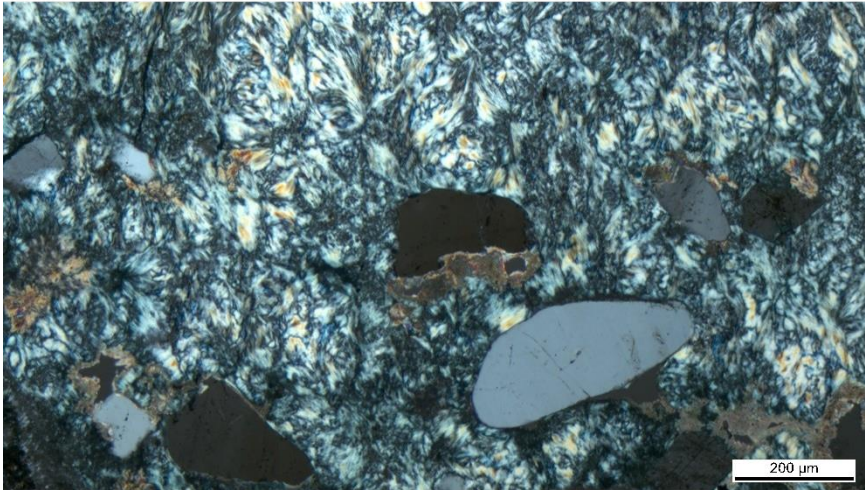
**Beleuchtung:** Polarisierung;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_009



Probe **Mö II/7**



**Abb. 101:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 100 unter gekreuzten Polarisatoren

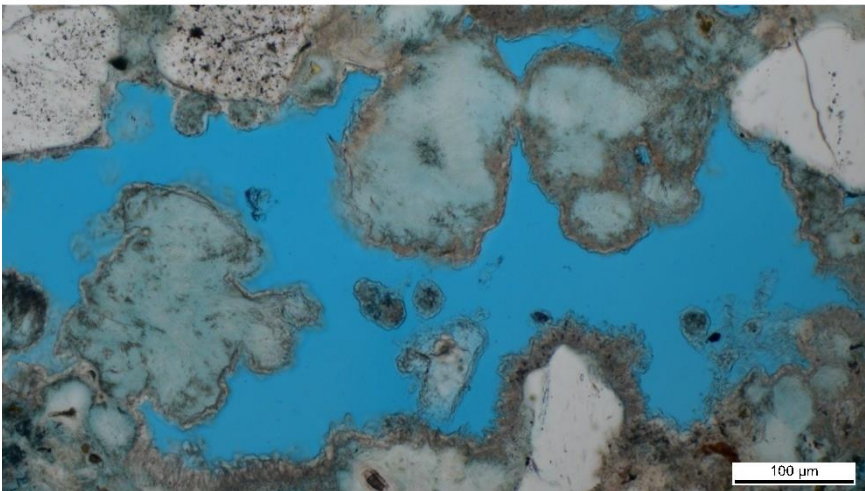
Treibmineral (vermutlich Thaumasyt) im Kontaktbereich des Injektionsmörtels zum Gips-Mauermörtel

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_010

Probe **Mö II/7**



**Abb. 102:**

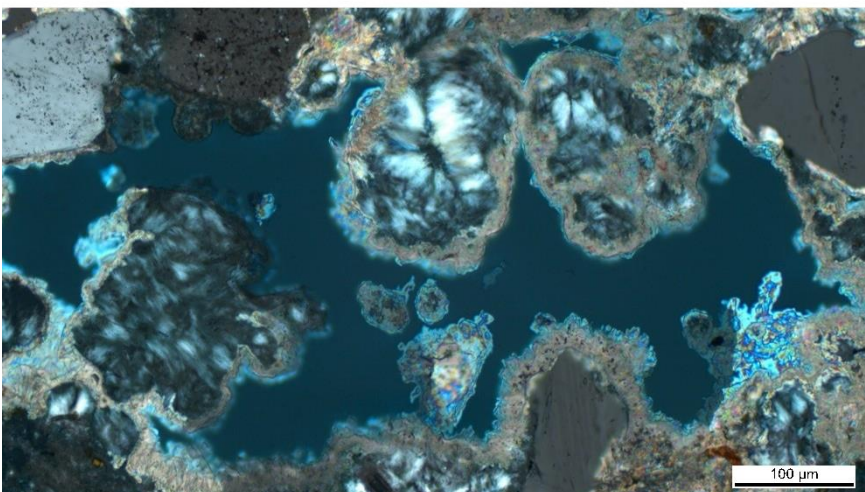
Kontaktbereich des Injektionsmörtels zum Gips-Mauermörtel. Treibmineral (vermutlich Thaumasyt) umhüllt von Kalk

**Beleuchtung:** Polarisation;parallel

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_011

Probe **Mö II/7**



**Abb. 103:**

Gleiche Probenstelle wie Abb. 102 unter gekreuzten Polarisatoren

Kontaktbereich des Injektionsmörtels zum Gips-Mauermörtel. Treibmineral (vermutlich Thaumasyt) umhüllt von Kalk

**Beleuchtung:** Polarisation;gekreuzt

**Objektiv:**

**Bildnummer:** 22M2480\_012