

# Abschlussbericht

Hildesheim/Göttingen Mai 2018

**Projekt:** **Entwicklung und modellhafte Anwendung nachhaltiger Konservierungsstrategien für anthropogen geschädigte, historische Außenfassaden sowie deren Überprüfung mittels THz Strahlung am Beispiel der Konstantinbasilika in Trier“- BLiKS**

**gefördert unter Az.:** **32353-45 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

**Projektbeginn:** 16. Oktober 2014

**Laufzeit:** 3 Jahre 4 Monate

**Projektleitung:**

## HAWK

Prof. Dr. Nicole Riedl  
Hochschule HAWK  
Hildesheim/Holzminden/Göttingen  
**Fakultät Bauen und Erhalten**  
Bismarckplatz 10/11  
31135 Hildesheim

Prof. apl. Prof. Dr. Wolfgang Viöl  
Hochschule HAWK  
Hildesheim/Holzminden/Göttingen  
**Fakultät Naturwissenschaft und Technik**  
Von-Ossietzky-Str.99  
37085 Göttingen  
Tel: 05121/881-265  
Email: [wolfgang.vioel@hawk.de](mailto:wolfgang.vioel@hawk.de)



**Verfasser:** Prof. apl. Prof. Dr. Wolfgang Viöl  
Dipl. Rest. Kirsti Krügener

**Bearbeiter:** Dipl. Rest. Kirsti Krügener, Roksana Jachim M.A., Stefanie Endrulat M.A., Julia Marie Kühne B.A., Anna Gillmann B.A.

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	4
Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis .....	5
Diagrammverzeichnis .....	6
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Zusammenfassung der Untersuchungspakete der Projektphasen</b> .....	<b>9</b>
<b>3. Materialauswahl</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1 Bindemittelrohstoffe</b> .....	<b>11</b>
<b>3.2 Mörtelmischungen vom Werk</b> .....	<b>11</b>
<b>3.3 Zuschläge/Sande</b> .....	<b>12</b>
<b>3.3.1 Siebanalyse roter Sand Konz-Köen</b> .....	<b>12</b>
<b>4. Entwicklung der Schutzmörtel</b> .....	<b>15</b>
<b>4.1 Untersuchungskataloge physikalische Kennwertermittlung/1. Prüfkörperreihe</b> .....	<b>18</b>
<b>4.2 Untersuchungskataloge physikalische Kennwertermittlung/2. Prüfkörperreihe</b> .....	<b>19</b>
<b>4.3 Untersuchungskataloge THz-Analysen</b> .....	<b>20</b>
<b>5. Prüfkörper</b> .....	<b>21</b>
<b>5.1 Herstellung</b> .....	<b>21</b>
<b>5.2 Lagerung der Prüfkörper</b> .....	<b>21</b>
<b>6. Anforderung und Untersuchungen zur Beurteilung der Schutzmörtel</b> .....	<b>22</b>
<b>6.1 Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen</b> .....	<b>22</b>
6.1.1 Frischmörtelanalyse-Bestimmung des Ausbreitmaß .....	22
6.1.2 Ultraschall im Tiefenprofil .....	23
6.1.3 Kapillare Wasseraufnahme .....	23
6.1.4 Massebezogener Wasseraufnahmegrad unter Atmosphärendruck .....	24
6.1.5 Offene Porosität und Rohdichte .....	24
6.1.6 Wasserabgabe .....	25
6.1.7 Kapillare Wasseraufnahme nach Mirowski .....	26
6.1.8 Wasserdampfdiffusion .....	27
6.1.9 Dynamisches E-Modul .....	28
6.1.10 Hygrische Dehnung .....	29
6.1.11 Thermische Dehnung .....	29
6.1.12 Biegezug- und Druckfestigkeit .....	30
6.1.13 Frost-Tau Wechsel .....	31
6.1.14 UV-Beständigkeit .....	32
6.1.15 Freibewitterung .....	33
<b>7. Untersuchungsergebnisse physikalische Kennwertermittlung (PKR 1 und PKR 2)</b> .....	<b>33</b>
<b>7.1 Bindemittelverteilung</b> .....	<b>34</b>
7.1.1 Visuelle Beurteilung .....	34
7.1.2 Bestimmung des Ausbreitmaß (PKR 1) .....	34
7.1.3 Ultraschallgeschwindigkeit im Tiefe (PKR 1) .....	35
7.1.4 Bewertung der Bindemittelverteilung .....	36
<b>7.2 Hygrische und porenraumbezogene Eigenschaften</b> .....	<b>36</b>
7.2.1 Kapillare Wasseraufnahme (PKR 1/PKR 2) .....	36
7.2.2 Kapillare Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (PKR 1) .....	38
7.2.3 Offene Porosität und Rohdichte (PKR 1/PKR 2) .....	39

7.2.4 Wasserabgabe (PKR 1/PKR 2).....	40
7.2.5 Wasserdampfdiffusion (PKR 1/PKR 2).....	42
7.2.6 Kapillare Wasseraufnahme nach Mirowski (PKR 2) .....	44
<b>7.3 Verformungs- und Festigkeitseigenschaften</b> .....	44
7.3.1 Hygrische Dehnung (PKR 1).....	44
7.3.2 Thermische Dehnung (PKR 1).....	46
7.3.3 Biegezug- und Druckfestigkeit (PKR 1 und PKR 2).....	48
7.3.4 Dynamisches E-Modul (PKR 1 und PKR 2) .....	51
<b>7.4 Verwitterungseigenschaften</b> .....	52
7.4.1 Frost-Tau Wechsel (PKR1) .....	52
7.4.1.1 Prüfreihe RCP Romazement Mörtel .....	53
7.4.1.2 Prüfreihe RCP Romazement Mörtel .....	59
7.4.2 Oberflächenanalyse Frost-Tau Wechsel/ 3D Laserscanning-Mikroskop.....	63
7.4.3 UV-Beständigkeit (PKR 1 und PKR 2).....	65
7.4.3.1 Auswertung UV-Beständigkeit (PKR 2).....	66
7.4.4 Langzeitbewitterung/Freibewitterung (PKR 1 und PKR 2) .....	70
7.4.4.1 Klimadaten (PKR 1 und PKR 2).....	71
7.4.5 Auswertung Langzeitbewitterung/Freibewitterung (PKR 1 und PKR 2).....	72
7.4.6 Dünnschliffe (PKR 2).....	89
7.4.6.1 Dünnschliffe Referenzprobe Mörtel PF3.2a unbewittert.....	89
7.4.6.2 Dünnschliffe Probe Mörtel PF3.10b bewittert .....	92
7.4.6.3 Dünnschliffe Referenzprobe Mörtel PF3.2b mit Schutzlasur.....	93
7.4.6.4 Dünnschliffe Referenzprobe Mörtel PF3.6b mit Schutzlasur.....	95
7.4.7 Zusammenfassung der Auswertung Dünnschliffe.....	96
<b>8. Konstantinbasilika Trier</b> .....	97
<b>8.1 Testfläche</b> .....	96
<b>8.2 Evaluation der Pilotfläche Konstantinbasilika/W1.8 N-W1.8 S (Sep. 2017)</b> .....	97
<b>9. Identifikation relevanter Kenndaten für die THz-Analyse</b> .....	99
<b>9.1 Bindemittelrohstoffe</b> .....	100
9.1.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz.....	100
<b>9.2 Mörtelmischung vom Werk</b> .....	100
9.2.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz.....	100
<b>9.3 Zuschläge</b> .....	101
9.3.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz.....	101
<b>9.4 Mowilith LDM 6880 (Firma Ha-Be Betonchemie)</b> .....	101
9.4.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz.....	101
<b>9.5 Cyclododecan</b> .....	102
9.5.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz.....	102
<b>9.6 Mörtel PF3a</b> .....	102
9.6.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz.....	102
<b>9.7 Zusammenfassung der Materialdatenbank</b> .....	103
<b>10. Ermittlung des Abbindeverhalten / Materialfeuchte für die Messbarkeit mit THz- Strahlung bei Reflexionsmessungen</b> .....	103
<b>10.1 Auswertung der THz-Langzeitmessung zur Mörteltrocknung</b> .....	105
<b>10.2 Auswertung der THz Langzeitmessungen</b> .....	107
10.2.1 Darstellung der Messergebnisse/Mörtelmischung PF2a .....	108
10.2.2 Auswertung der THz-Langzeitmessungen/Materialfeuchte .....	108
<b>11. Darstellung und Bewertung einer THz-Imagemessung an orig. Schutzputzfragment im Labor</b> .....	109

<b>12. THz-Messung an der Konstantinbasilika Trier</b> .....	111
<b>12.1 Genutzter THz-Messaufbau</b> .....	112
<b>12.2 Messflächen</b> .....	113
<b>12.3 THz-Messergebnisse Analyse/Pilotfläche 2016</b> .....	113
<b>12.4 Messergebnisse der Pilotfläche</b> .....	114
12.4.1 THz-Images .....	114
<b>12.5 Zusammenfassung der THz-Messergebnisse Pilotfläche Konstantinbasilika Trier</b> ..	117
<b>13. THz-Messungen zur Überwachung des Sublimierungsverhaltens der Trennschicht im Labor</b> .	118
<b>13.1 Aufbau des Messmodells</b> .....	118
<b>13.2 Messplan Labormessungen</b> .....	119
<b>13.3 Resultate des THz-Monitoring</b> .....	120
13.3.1 Analysebeschreibung (Time of flight).....	120
13.3.2 Analysebeschreibung der gesamten Monitoring- Proben (Peak-to-Peak) .....	122
13.3.3 Zusammenfassung der THz-Ergebnisse der Monitoring-Proben .....	123
<b>14. Fazit</b> .....	124
Literaturverzeichnis .....	126
Unveröffentlichte Quellen.....	126

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Anmachw.	Anmachwasser
BM	Bindemittel
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Diagr.	Diagramm
Fa.	Firma
gem.	gemäß
HAWK	Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
HFuLT	TRANSMIT-Geschäftsbereich für Hochfrequenz- und Lasertechnik, Marburg
Kap.	Kapitel
M %	Masse
max.	Maximum
Nr.	Nummer
ps	Picosekunde
r.F.	relative Luftfeuchte
RT	Raumteil
s. o.	Siehe oben
Tab.	Tabelle
THz	Terahertz
THz-TDS	Terahertz Time-Domain-Spectroscopy / Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie
Vol. %	Volumen %
W/Z-Wert	Wasser/Zement-Wert

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1</b> Reste von römischer Außenmalerei in den Fensterlaibungen der Westfassade der Konstantinbasilika in Trier vor Erstellung der Pilotfläche. (2014) .....	8
<b>Abb. 2</b> (links) Versuchsreihe R1.-R8. Mörtelkonzeption mit Romanzement Roman Kalk TL8 NHL5 ....	15
<b>Abb.3</b> (rechts) Versuchsreihe T1.-T4. Mörtelkonzeption mit Trass Kalk NHL5.....	15
<b>Abb. 4</b> Schematischer Trocknungsverlauf (nach BRANDES, 1995, S. 35).....	25
<b>Abb. 5</b> Prüfkörper wet-cup-Verfahren zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit .....	27
<b>Abb. 6</b> Dilatometer (Typ C) mit analoger Messuhr (nach DIN 52450, Ausgabe 08/1985, S.5). .....	30
<b>Abb.7</b> Vakuumverpackte Prüfkörper der Prüfreihe FTW.....	31

<b>Abb. 8</b> Expositionsgestell mit Prüfkörpern; Ausrichtung Richtung Süden .....	33
<b>Abb. 9</b> Probenreihe FT RK1.2.1 in der Farblaseraufnahme, vor der Frost-Tau Wechsel Beprobung ...	63
<b>Abb. 10</b> Probenreihe FT RK1.2.1 in der Farblaseraufnahme, nach der Frost-Tau Wechsel Beprobung	63
<b>Abb. 11</b> Probenreihe RK1.2.1 Vorzustand /Profilanalyse 3D Laserscanning-Mikroskop .....	64
<b>Abb. 12</b> Probenreihe RK1.2.1 Nachzustand /Profilanalyse 3D Laserscanning-Mikroskop.....	64
<b>Abb. 13</b> Probenreihe KWA TK1.1 Probereihe nach der Bewitterung mit Anlagerung von Algen .....	65
<b>Abb. 14</b> Probe PF4b Algenablagerung an der Rückseite.....	88
<b>Abb. 15</b> Referenzprobe PF3.2a .....	89
<b>Abb. 16</b> Referenzprobe PF3.2a .....	89
<b>Abb. 17</b> Referenzprobe PF3.2a .....	90
<b>Abb. 18</b> Referenzprobe PF3.2a .....	90
<b>Abb. 19</b> Referenzprobe PF3.2a .....	90
<b>Abb. 20</b> Referenzprobe PF3.2a .....	91
<b>Abb. 21</b> Referenzprobe PF3.2a .....	91
<b>Abb. 22</b> Referenzprobe PF3.2a .....	91
<b>Abb. 23</b> Probe PF3.10a .....	92
<b>Abb. 24</b> Probe PF3.10a .....	92
<b>Abb. 25</b> Probe PF3.10a .....	92
<b>Abb. 26</b> Probe PF3.10a .....	93
<b>Abb. 27</b> Probe PF3.10a .....	93
<b>Abb. 28</b> Referenzprobe PF3.2b .....	93
<b>Abb. 29</b> Referenzprobe PF3.2b .....	94
<b>Abb. 30</b> Referenzprobe PF3.2b .....	94
<b>Abb. 31</b> Referenzprobe PF3.2b .....	94
<b>Abb. 32</b> Probe PF3.6b .....	95
<b>Abb. 33</b> Probe PF3.6b .....	95
<b>Abb. 34</b> Probe PF3.6b Detail aus <i>Abb.32</i> Leicht körniges Bindemittel (Kalkkörperchen) .....	95
<b>Abb. 35</b> Probe PF3.6b Gefüge des Mörtels im Inneren der Probe. ärmer als unter der Lasur .....	96
<b>Abb. 36</b> Einrüstung der Probeachse Fensterlaibung W8 (2017) .....	97
<b>Abb. 37</b> Links: Probenhalter mit Metallfolie an der Rückseite .....	103
<b>Abb. 38</b> Veränderter THz-Reflexionsmessaufbau mit Waage und Klimalogger .....	104
<b>Abb. 39</b> Putzschichten mit Armierung der entnommenen Schutzputztestfläche Konstantinbasilika	109
<b>Abb. 40</b> Abgeklebte definierte Prüfkörperfläche für die Messung des THz-Image. ....	110
<b>Abb. 41</b> THz-Image (peak to peak Amplitude, blau-schwach zu rot-stark) .....	110
<b>Abb. 42</b> Übersichtsplan Fassadenabfolge W1-N15 Konstantinbasilika Trier .....	111
<b>Abb. 43</b> THz-Messkopf platziert vor der Messfläche .....	112
<b>Abb. 44</b> 1:1 Kartierung der THz-Messfläche. Ausgewählte Testflächen A und B und C. ....	113
<b>Abb. 45</b> Gekennzeichnete Testflächen A und B und C. mit sichtbarer Oberflächenrauigkeit .....	114
<b>Abb. 46</b> Messmodell ohne Cyclodo. und Schutzputz (PF3b) Messm. nach Auftrag der Putzschicht..	118
<b>Abb. 47</b> Probe II/Schnitt durch die Mitte der Probe. 50-fache Vergrößerung .....	124

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1</b> Bindemittelrohstoffe .....	11
<b>Tab. 2</b> Bindemittelrohstoffe Werk .....	11
<b>Tab. 3</b> Zuschläge/Sande .....	12
<b>Tab. 4</b> Sieblinie und Korngrößenverteilung roter Sand Konz-Köen .....	12
<b>Tab. 5</b> Fotografische Dokumentation der Kornfraktionen Sand Konz-Köen.....	14
<b>Tab. 6</b> Mörtelmischungen der Probenreihen RK 1.1-1.6 mit RCP Romanzement .....	16
<b>Tab. 7</b> Mörtelmischungen der Probenreihen TK 1.1-1.4 mit Tubag Trasskalk.....	16
<b>Tab. 8</b> Mörtelmischung der Probereihen mit Prompt Fix Zement® .....	16
<b>Tab. 9</b> Untersuchungskatalog mit Kurzbezeichnungen.....	17

<b>Tab. 10</b>	Untersuchungskatalog für die physikalische Kennwertermittlung der PKR-RCP und TK.....	18
<b>Tab. 11</b>	Untersuchungskatalog für die physikalische Kennwertermittlung der PKR-PK 2 .....	19
<b>Tab. 12</b>	Untersuchungskataloge der Prüfkörper für die THz-Analysen.....	20
<b>Tab. 13</b>	Ausbreitmaß Mörtel RK und TK.....	34
<b>Tab. 14</b>	Rohdichte Mörtel RK und TK .....	39
<b>Tab. 15</b>	Rohdichte Mörtel PF.....	39
<b>Tab. 16</b>	Auswertung der Bewitterungsprüfkörper PKR 1 und PKR 2 kWA .....	70
<b>Tab. 17</b>	Zustandsbewertung der Bewitterungsprüfkörper FBW PKR 1 und PKR 2 .....	88
<b>Tab. 18</b>	Dokumentation der Testflächen Konstantinbasilika Trier 2017.....	98
<b>Tab. 19</b>	Brechungsindex der untersuchten Materialien bei einer Frequenz von 0,75 THz.....	103
<b>Tab. 20</b>	Bemaßung der Testflächen 2016 .....	113
<b>Tab. 21</b>	Bemaßung der Testflächen 2017 .....	113
<b>Tab. 22</b>	Auswertung der THz-Messung Pilotfläche, Messfeld A .....	115
<b>Tab. 23</b>	Auswertung der THz-Messung Pilotfläche, Messfeld B.....	116
<b>Tab. 24</b>	Auswertung der THz-Messung Pilotfläche, Messfeld C.....	117
<b>Tab. 25</b>	Messliste THz-Monitoring .....	119

## Diagrammverzeichnis

<b>Diagr. 1</b>	Korngrößenverteilung des roten Sand Konz-Könen .....	13
<b>Diagr. 2</b>	Sieblinie des roten Sand Konz-Könen .....	13
<b>Diagr. 3</b>	Ultraschallprofil der Mörtelreihe RK .....	35
<b>Diagr. 4</b>	Ultraschallprofil der Mörtelreihe TK.....	35
<b>Diagr. 5</b>	Flächenbezogene Wasseraufnahme der Mörtelreihen RK.....	36
<b>Diagr. 6</b>	Flächenbezogene Wasseraufnahme der Mörtelreihen TK.....	37
<b>Diagr. 7</b>	Flächenbezogene Wasseraufnahme mit Mörtelreihen PK ohne Beschichtung .....	37
<b>Diagr. 8</b>	Wasseraufnahmegrad Mörtelreihen RK nach 7 Tagen Wasserlagerung.....	38
<b>Diagr. 9</b>	Wasseraufnahmegrad Mörtelreihen TK nach 7 Tagen Wasserlagerung.....	38
<b>Diagr. 10</b>	Offene Porosität der Mörtelreihen TK und RK .....	39
<b>Diagr. 11</b>	Offene Porosität der Mörtelreihen PF ohne Beschichtung .....	40
<b>Diagr. 12</b>	Wasserabgabe Mörtelreihen TK und RK.....	40
<b>Diagr. 13</b>	Wasserabgabe Mörtelreihen PF .....	41
<b>Diagr. 14</b>	Wasserdampfdiffusionswiderstand Mörtelreihen RK .....	42
<b>Diagr. 15</b>	Wasserdampfdiffusionswiderstand Mörtelreihen TK .....	43
<b>Diagr. 16</b>	Wasserdampfdiffusionswiderstand Mörtelreihen PF mit (a) und ohne (b) Beschichtung..	43
<b>Diagr. 17</b>	Mittelwert kapillare Wasseraufnahme nach Mirowski PF1 bis PF3 .....	44
<b>Diagr. 18</b>	Hygrische Dehnung der Mörtelreihen RK.....	44
<b>Diagr. 19</b>	Hygrische Dehnung und Wasseraufnahmegrad nach 24 h der Mörtelreihen RK .....	45
<b>Diagr. 20</b>	Hygrische Dehnung der Mörtelreihen TK .....	46
<b>Diagr. 21</b>	Hygrische Dehnung mit Wasseraufnahmegrad nach 24h der Mörtelreihen TK .....	46
<b>Diagr. 22</b>	Thermische Dehnung der Mörtelreihen RK.....	47
<b>Diagr. 23</b>	Thermische Dehnung der Mörtelreihen TK.....	47
<b>Diagr. 24</b>	Biegezugfestigkeit der Mörtelreihen RK.....	48
<b>Diagr. 25</b>	Biegezugfestigkeit der Mörtelreihen TK.....	48
<b>Diagr. 26</b>	Biegezugfestigkeit der Mörtelreihen PF .....	49
<b>Diagr. 27</b>	Druckfestigkeit der Mörtelreihen RK.....	50
<b>Diagr. 28</b>	Druckfestigkeit der Mörtelreihen TK .....	50
<b>Diagr. 29</b>	Druckfestigkeit der Mörtelreihen PF .....	51
<b>Diagr. 30</b>	Dynamisches Elastizitätsmodul Mörtelreihen RK.....	51
<b>Diagr. 31</b>	Dynamisches Elastizitätsmodul Mörtelreihen TK .....	52
<b>Diagr. 32</b>	Dynamisches Elastizitätsmodul Mörtelreihen PF .....	52
<b>Diagr. 33</b>	Monatsmittelwerte: Sonnenscheindauer [h] und Niederschlagshöhe [mm].....	71
<b>Diagr. 34</b>	Monatsmittelwerte: Windgeschwindigkeit [Bft] und Niederschlagshöhe [°C] .....	71

<b>Diagr. 35</b> Brechungsindex (oben) und Absorptionsk.t(unten) der Bindemittelrohstoffe aus <i>Tab.1</i> ..	100
<b>Diagr. 36</b> Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) der Mörtel aus <i>Tab.2</i> .....	100
<b>Diagr. 37</b> Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) der Zuschläge aus <i>Tab.3</i> .....	101
<b>Diagr. 38</b> Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) von Mowilith® LDM 6880 .....	101
<b>Diagr. 39</b> Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) von Cyclododecan.....	102
<b>Diagr. 40</b> Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) des Mörtels PF3a .....	102
<b>Diagr. 41</b> THz-Langzeitmessung Mörtel RK1.1 .....	105
<b>Diagr. 42</b> THz-Langzeitmessung Mörtel RK1.2 .....	106
<b>Diagr. 43</b> THz-Langzeitmessung Mörtel PF3a .....	106
<b>Diagr. 44</b> Time of Flight Messung an der abbildenden Mörtelprobe PF2a.....	108
<b>Diagr. 45</b> THz-Images Langzeitmessung 1,9,12.....	120
<b>Diagr. 46</b> Time of Flight Auswertung an zwei X-Werten (links 45 mm, rechts 135 mm) und 9 y-.....	121

## 1. Einleitung

Das Forschungsprojekt untersuchte den Wirkungsgrad verschiedener mineralischer Mörtel, mit und ohne Armierungsmaterial, als Schutzüberzüge (Opferputze) bewitterter Architekturoberflächen und Wandmalereien. Die Überprüfung der korrekten Anbindung der Schutzüberdeckungen und die systematische Nachkontrolle von Maßnahmen sind aus Sicht der Denkmalpflege zwingend erforderlich, da Umwelteinflüsse wie Erschütterungen, die z. B. durch Straßenverkehr verursacht werden auftreten können. Darüber hinaus können extreme Klimaschwankungen durch Sonneneinstrahlung, Kälteeinbrüche oder Frost zu thermisch beeinflussten Ausdehnungen führen. In deren Folge kommt es zur Bewegung und Ablösungen innerhalb von einfachen oder mehrlagigen Putzsystemen. Der Anwendungsbezug lag in diesem Projekt auf der Entwicklung und Überprüfung von Schutzüberzügen sowie der Beurteilung ihre Einsetzbarkeit und Effizienz, exemplarisch an einer Pilotfläche der Westfassade an den römischen Fassadenmalereien des Weltkulturerbes Konstantinbasilika Trier.

Ziel des Forschungsprojektes war es, mineralische Schutzputzsysteme zu konzipieren und diese auf ihre Anbindung und Wirkungsgrad hin mittels der sogenannten Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie (THz-TDS<sup>1</sup>) zu untersuchen. Die THz-TDS kann als neuartige, zerstörungsfreie und berührungslose Messtechnik zur tiefenaufgelösten Diagnostik denkmalgeschützter Kulturgüter genutzt werden. Hiermit können auch kleinste Ablösungen zwischen Mörtelsystemen und originalen Oberflächen methodisch exakt detektiert werden. Der Erfolg der angestrebten Schutzmaßnahmen kann somit langfristig überprüft und dokumentiert werden.

Zudem wurden die konzipierten Mörtel durch physikalische Untersuchungen (Feuchtegehalt und Rohdichte, Wasseraufnahme und -abgabe, Wasserdampfdiffusionswiderstand, dynamischer E-Modul, Feuchte- und Wärmedehnung, Haftzugfestigkeit, Alterung etc.) auf ihre Qualität und Dauerhaftigkeit hin überprüft.

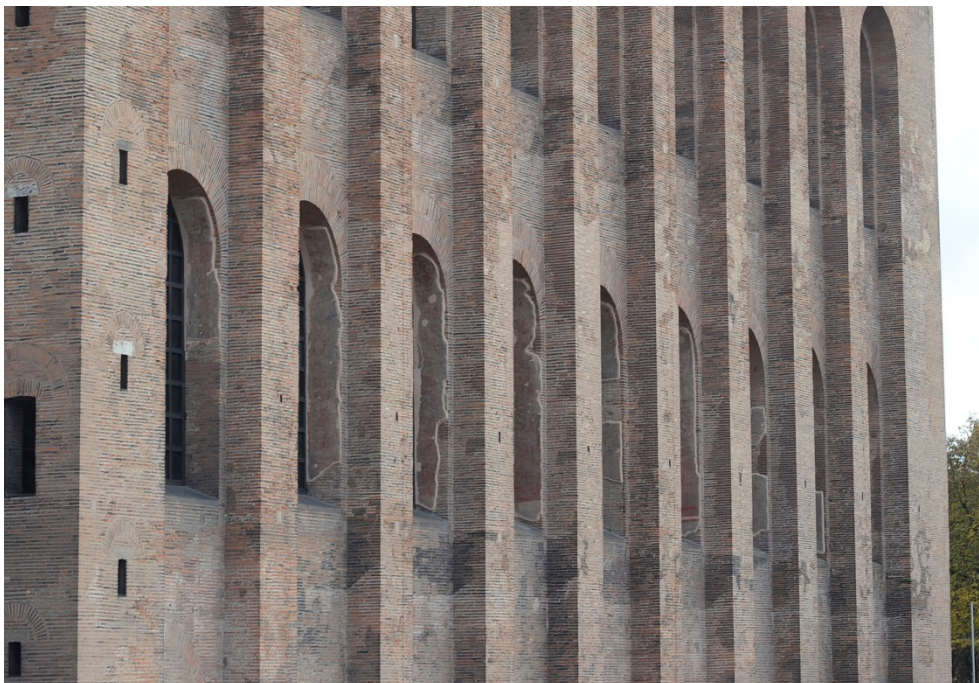


Abb. 1

Reste von römischer Außenmalerei in den Fensterlaibungen der Westfassade der Konstantinbasilika in Trier vor Erstellung der Pilotfläche. (2014)

---

<sup>1</sup> TDS steht für die englische Abkürzung „Time-Domain-Spectroscopy“



## 2. Zusammenfassung der Untersuchungspakete der Projektphasen

- **Material und Objektauswahl**

Zu Beginn des Projektes wurden zunächst die Art und der Umfang der zu untersuchenden Mörtel auch objektbezogen auf die Konstantinbasilika Trier ausgewählt, so wie eine praxisorientierte Auswahl an Romanzement und Trasskalk-Mörtel, Armierungsmaterial und Trennmittel getroffen. Erweiternd zu den in Voruntersuchungen genutzten Zuschlägen wurde ein weiterer Zuschlag (roter Sand/Konz-Köen), in die Mörtelkonzeption aufgenommen, um eine farbliche Anpassung an die Optik der Fassade der Konstantinbasilika zu erreichen. Nach der ersten physikalischen Untersuchungsreihe an Mörtelmischungen mit zwei unterschiedlichen Bindemitteln (Romanzement, Trasskalk) wurde eine zweite Untersuchungsreihe mit einem weiteren Bindemittel auf Romanzementbasis durchgeführt. Ein Mörtel dieser Testreihe fand als Schutzputz Anwendung an der Pilotfläche der Konstantinbasilika.

- **Ermittlung von Materialeigenschaften der Mörtel/Armierungen**

Zur Ermittlung der Materialeigenschaften der entwickelten Mörtel und der verschiedenen Mörtel /Armierungssysteme wurden zahlreiche Untersuchungen vorgenommen. Die ausgewählten Mörtelmischungen wurden mit Prüfungsmethoden zur Konsistenz, Ausbreitmaß, Feuchtegehalt und Rohdichte, Wasseraufnahme und -abgabe, Wasserdampfdiffusionswiderstand, dynamischer E-Modul, Feuchte- und Wärmedehnung, Druck- und Biegezugfestigkeit, UV-Beständigkeit, sowie Alterungsverhalten durch Freibewitterung hin untersucht. Durch Untersuchungen mittels mikroskopischer Analyse (VHX-Digital-Mikroskop) konnten die in den THz-Messungen erzielten Ergebnisse zur Ablösung von Materialschichtung überprüft werden. Zur Überprüfung der Abbaurate des Bindemittels an der Oberfläche erfolgte die Erstellung und Auswertung von Dünnschliffen bewitterter und unbewitterter Mörtelproben im Vergleich.

- **Identifikation relevanter Kenndaten für die THz-Analyse und Auswertung**

Es wurde die Charakterisierung ausgewählter Materialien im THz-Frequenzbereich (Materialdatenbank) und die Identifizierung dielektrischer Parameter vorgenommen. Aufgenommen in diese Untersuchungsreihe wurden auch die Komponenten des bereits für Testflächen an der Konstantinbasilika Trier verwendeten Romanzements sowie Zuschläge und Armierungen. Dies geschah, um Kennwerte für spätere mögliche THz Analysen an den bereits vorhandenen Testflächen zu generieren und damit die Ergebnisse der geplanten Messungen am Objekt optimal auswerten zu können.

- **THz-Analyse zur Putzanbindung - Pilotfläche Konstantinbasilika Trier und Labor**

Im Jahr 2016 fand die Erstellung der Pilotfläche an der Westfassade /Fensterlaibung mit einer im Projekt konzipierten Mörtelmischung statt. Die THz-Analyse wurde an drei ausgewählten und markierten Testfeldern zwei Wochen nach Fertigstellung der Pilotfläche und ein Jahr später an derselben Stelle durchgeführt. Parallel erfolgte die Messung an Testflächen im Labor. Diese Langzeit-Terahertz-Messung zur Bestimmung der Sublimation von Cyclododecan wurde der Verarbeitungssituation an der Konstantinbasilika nachempfunden. Ziel des Vorhabens war es, die Messergebnisse aus Trier optimal interpretieren zu können. Um die vermessenen Hohlräume zu überprüfen wurden die vermessenen Laborproben nach einem Jahr fixiert, gesägt und die Hohlräume digital vermessen (VHX-Digital-Mikroskop).

### 3. Materialauswahl

In der Planung für das Forschungsprojekt stand die Nutzung von mineralischen Putzsystemen für die Entwicklung von Schutzputzen. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Mörtel und mineralische Bindemittel in Absprache mit den Projektpartnern Fa. Tubag Trass Vertrieb GmbH und Fa. RCP RoCemPlast Baustoff GmbH ausgewählt und in die erste Untersuchungsreihe aufgenommen. Ausschlaggebend für die Materialauswahl, war die vorgegebene Mörteldicke von 0,7 cm. Diese engte auch die Auswahl der enthaltenen Korngrößen der Zuschläge ein. Da es bezüglich der Entwicklung von Schutzputzen schon Voruntersuchungen mit Romazement (Prompt Fix-Zement®), vor allem auch in Bezug auf die Außenmalereien der Konstantinbasilika gegeben hat,<sup>2</sup> wurden die hier gewonnenen Kenntnisse in die Materialauswahl einbezogen.

Somit wurden für die erste Projektphase Mörtel und Bindemittelrohstoffe auf Bindemittelbasis von Kalkhydrat, natürlichem hydraulischen Kalk und Romazement<sup>3</sup> ausgewählt. Um vergleichend mit den Mörteln der Voruntersuchungen arbeiten zu können, wurde der Romazement der Firma sbv sakowsky GmbH (Prompt Fix-Zement®) ebenfalls in die Untersuchungen der ersten Projektphase aufgenommen. Hierbei beschränkte man sich aber auf die Prüfkörperherstellung für die THz-Analysen.

In der zweiten Projektphase erfolgte die Erstellung von weiteren Mörtelrezepturen, basierende auf dem Bindemittel mit Prompt Fix-Zement®. Zudem fand eine Testung von den auf diesen entwickelten Mörtelsystemen aufgetragenen Schutzüberzügen (KEIM Purkristalat) statt. Zum einen, um eine bessere farbliche Anpassung an die Oberfläche der Konstantinbasilika zu erzielen, zum anderen, um einen höheren Schutz vor einem zu schnellen Abbau des Bindemittels des Schutzputzes zu erreichen.

Die schnelle Frühhochfestigkeit (5 min) des Prompt Fix-Zements® stellte bereits bei der Verarbeitung am Objekt 2011 eine große Herausforderung dar. Ausgehend von der notwendigen Voraussetzung, der präzisen Einbindung von Armierung und der zügigen Verarbeitung an einer Fläche, wurden zunächst Vorteile in der Konzeption mit dem von der Firma RCP vertriebenen Romazement gesehen. Dieser zeigt nach Herstellerangaben im Vergleich eine Frühhochfestigkeit von 8 min und eine Maschinentauglichkeit von 10 statt 8 Minuten. Je nach Mischungsverhältnis beträgt die offene Zeit 40-60 min.<sup>4</sup>

Dennoch wurde aufgrund der Erfahrungswerte der ausführenden Firma der restauratorischen Arbeiten (Fa. Hangleiter, Otzberg) bei der Umsetzung der Probefläche in Trier 2016 auf eine Mörtelmischung mit Prompt Fix-Zement® zurückgegriffen.

Eine Übersicht der ausgewählten Bindemittelrohstoffe, Mörtelmischungen und Zuschläge geben die Tabellen 1, 2 und 3. Die hier verwendeten Kürzel wurden fortlaufend für die Mörtelkonzeption und die Prüfkörperbezeichnungen im gesamten Projekt genutzt.

Ausgehend von den verwendeten Rezepturen der Probeachse von 2014, an der Konstantinbasilika wurden der Zuschlag (Millisil® W3), Zugabe (Mowilith® LDM 6880 im Anmachwasser) und Armierungsfasern (Para-Aramidfasern, ®KEVLAR) für die Voruntersuchungen ebenso für die ausgewählt. Zur farblichen Einstellung der Mörtel, angepasst an das Erscheinungsbild der Basilika, wurde ein regionaler roter Sand (Konz-Könen) als Zuschlag in die Mörtelkonzeption mit aufgenommen. Dieser kam bereits für andere Mörtel am Objekt zum Einsatz. (siehe Tab.3)

<sup>2</sup> N. Riedl; Trier Konstantinbasilika, Voruntersuchung zur Projektkartierung: Bestandsaufnahme römischer Putzflächen; Untersuchung 2013 mineralische Schutzüberzüge; unveröffentlichter Untersuchungsbericht Hildesheim (2013)

<sup>3</sup> Klassifizierung erfolgte nach: IFS-Mitteilung Nr.7 (5/2001), S.2

<sup>4</sup> Freundliche Auskunft von Hr. Butz RCP, (2/2015)

### 3.1 Bindemittelrohstoffe

Tab. 1 Bindemittelrohstoffe

Kürzel	Handelsbezeichnung Produktinformation	Herstellerfirma/Vertrieb	Charge
TK	Trasskalk Hydraulischer Kalk HL 5 nach EN 459-1	Tubag Trass Vertrieb GmbH	4.Quartal 2014
RK	Romanzement TL8 NHL 5 reiner Belite (Romanzement)	RCP RoCemPlast Baustoff GmbH	4.Quartal 2014
PF	Romanzement Prompt Fix-Zement® gem. Norm NF-P 15-314.	sbv sakowsky GmbH Romanzent aus Grenoble	1.Quartal 2014

### 3.2 Mörtelmischungen vom Werk

Tab. 2 Bindemittelrohstoffe Werk

Kürzel	Handelsbezeichnung Produktinformation	Herstellerfirma/Vertrieb	Charge
<b>HKP</b>	Historischer Kalkputz CL 90 Kalk	Tubag Trass Vertrieb GmbH	4.Quartal 2014
<b>NHL-FP</b>	Feinputz mit natürlichem hydraulischen Kalk NHL 2 CR CS gem. DIN EN 998-1	Tubag Trass Vertrieb GmbH	4.Quartal 2014
<b>NHL-P</b>	Kalkputz mit natürlichem hydraulischen Kalk NHL 2 CPCS gem. DIN EN 998-1	Tubag Trass Vertrieb GmbH	4.Quartal 2014
<b>TKP</b>	Trass-Kalk Grund und Restaurierungsputz CPCS gem. DIN EN 998-1	Tubag Trass Vertrieb GmbH	4.Quartal 2014
<b>TKP-L</b>	Trass-Kalk Grund und Restaurierungsmörtel LWCS II gem. DIN EV 18550	Tubag Trass Vertrieb GmbH	4.Quartal 2014
<b>RP</b>	Roman Puzzolan Feinputz Mischung aus Romanzement, Hochwertigen, Puzzolanen und Kalk	RCP RoCemPlast Baustoff GmbH	4.Quartal 2014

### 3.3 Zuschläge/Sande

Tab. 3 Zuschläge/Sande

Kürzel	Handelsbezeichnung Produktinformation	Herstellerfirma/Vertrieb	Charge
M	Millisil® W3	Firma Quarzwerke	2.Quartal 2014
RS	roter Sand aus Konz-Könen	Konz er Sand Jho. Wacht GmbH &Co von Restauratoren aus der Sandgrube entnommen, getrocknet und gesiebt	4.Quartal 2014

Alle Bindemittel wurden durch die Projektpartner Fa. Tubag Trass Vertrieb GmbH und Fa. RCP RoCemPlast Baustoff GmbH zur Verfügung gestellt. Das Bindemittel Prompt Fix-Zement®, und Sande wurden käuflich erworben.

#### 3.3.1 Siebanalyse roter Sand Konz-Könen

Bei dem verwendeten Zuschlag, roter Sand Konz-Könen, handelt es sich nicht um ein durch ein Werk oder einen Steinbruch vertriebenen Sand. Er wurde für die Restaurierungsmaßnahmen an der Konstantinbasilika von Restauratoren aus einer Grube bei Konz-Könen beschafft, getrocknet und gesiebt. Im Gegensatz zum Zuschlag Millisil® W3 muss die Korngrößenverteilung bei jeder Charge ermittelt werden.

Um einen repräsentativen Querschnitt der Korngrößenverteilung zu erhalten wurde aus drei Ebenen des abgefüllten Gebindes 100 g entnommen und analysiert. Die Siebmaschine wurde auf 10 Minuten eingestellt.

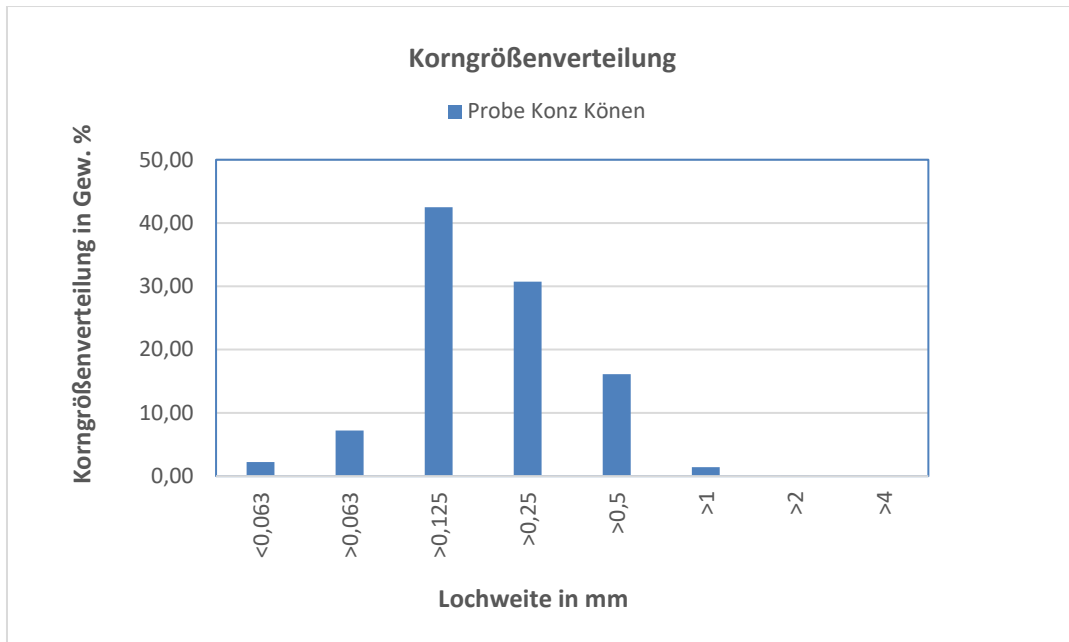
Nach jeder Siebung wurden die Massenrückstände der Probe auf den einzelnen Siebböden bestimmt. Dies erfolgte durch Wägung der einzelnen Siebe, die Auswaage wurde notiert. Die Masserückstände der einzelnen Fraktionen ergeben sich aus der Differenz des Leergewichts und des Bruttogewichts.

Die Ergebnisse der graphischen Darstellung der Sieblinie/Korngrößenverteilung (Tab.4) zeigen eine annähernd gleiche Zuteilung der einzelnen Fraktionen bei allen drei Proben.

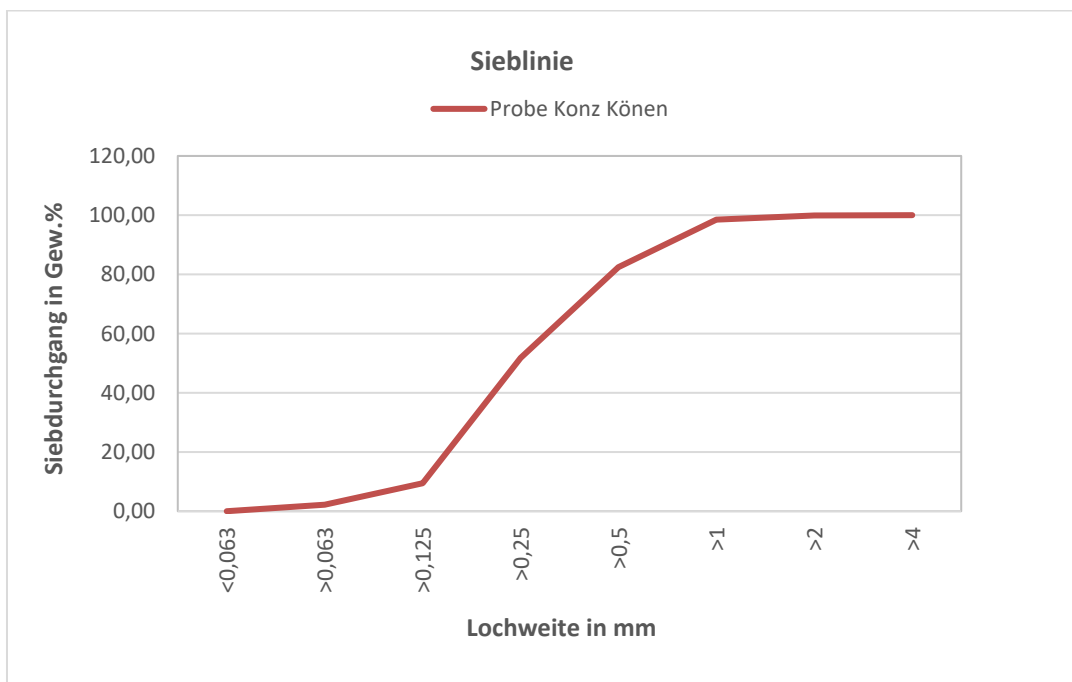
Die Korngrößenverteilung wurde ebenfalls fotografisch dokumentiert. (siehe Tab.5)

Tab. 4 Sieblinie und Korngrößenverteilung roter Sand Konz-Könen

Sieblinie und Korngrößenverteilung				
	Konz-Könen_1	Konz-Könen_2	Konz-Könen_3	Konz-Könen_4
	[g]	[g]	[g]	[g]
< 0,063	2,05	2,08	2,26	2,5
> 0,063	7,45	7,01	7,35	7,08
> 0,125	42,82	41,9	43,67	41,61
> 0,25	30,65	31,43	30,24	30,63
> 0,5	16,11	16,5	15,48	16,36
> 1	1,38	1,35	1,38	1,6
> 2	0,08	0,09	0,08	0,11







Diagr. 1 Korngrößenverteilung des roten Sand Konz-Köen



Diagr. 2 Sieblinie des roten Sand Konz-Köen

Tab. 5 Fotografische Dokumentation der Kornfraktionen Sand Konz-Köen

Fotografische Dokumentation der Korngrößenfraktionen Sand Konz-Köen		
		
< 0,063 mm	> 0,063 mm	> 0,125 mm
		
> 0,25 mm	> 0,5 mm	> 1 mm
		
> 2 mm		

#### 4. Entwicklung der Schutzmörtel

Nach Beprobung der in Tabelle 2. aufgeführten Mörtelmischungen wurde entschieden, eigenen Rezepturen mit den Bindemitteln Romazement und Trass-Kalk (**RK und TK**) für die erste Testreihe den Vorzug zu geben. Vor allem hinsichtlich einer farblichen Einstellung der Mörtel, angepasst an das äußere Erscheinungsbild der Basilika, wurde der rote Sand aus Konz-Könen als bereits an der Basilika verwendetes Material, in die Konzeption aufgenommen.

In Anlehnung an die Mörtelmischungen der Überputzsysteme von 2013 aus 1RT Prompt Fix-Zement®: 3 RT Millisil® W3: Anmachwasser W/Z-Wert 1,5 (mit und ohne 5 % Mowilith LDM 6880)<sup>5</sup> wurde das Mischungsverhältnis vor allem auf die Vergleichbarkeit zwischen Fix Prompt-Zement® und RCP Romazement beibehalten. Um Erfahrungswerte hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, Haftung und Farbigkeit der Mörtel in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen zu erlangen, fand zunächst die Erstellung von Testreihen mit beiden Bindemitteln in der Wandwerkstatt der HAWK an gefassten Flächen statt (*siehe Abb.2 und 3*).



Abb. 2 (links) Versuchsreihe R1.-R8. Mörtelkonzeption mit Romazement Roman Kalk TL8 NHL5 (rechts) Versuchsreihe T1.-T4. Mörtelkonzeption mit Trass Kalk NHL5

Um die Intensität des Rottones zu beeinflussen, wurden beide Zuschläge (Millisil® W3 und roter Sand) sowohl als alleiniger Zuschlag, als auch in unterschiedlichen Verhältnissen mit den Bindemitteln gemischt. Zuzüglich zu dem vorgenannten Mischungsverhältnis BM/Zuschlag RT 1:3 entstand eine weitere Mischung im Verhältnis RT 1:2 und wurde in die Untersuchungsreihe mit aufgenommen. Zudem wurde, wie auch in den vorangegangenen Untersuchungsreihen die Einstellung des Anmachwassers variiert. Es erfolgte die Einstellung mit 2,5 % Mowilith® LDM 6880 im Anmachwasser, da bei einer höheren Konzentration eine größere Erhärtungsgeschwindigkeit beobachtet wurde. Zudem zeigte sich, dass bei Vorhandensein von rotem Sand in einer Mischung die Wassermenge geringer einzustellen war, da der Mörtel sonst zu flüssig für die Verarbeitung ist. Für die mit Trass-Kalk gebundenen Mörtel wurde auf die Zugabe von Mowilith® LDM 6880 im Anmachwasser herstellerbedingt verzichtet.

In einer ersten optischen Bewertung zeigte sich, dass alle Trass-Kalk gebundenen Mischungen in ihrer Farbigkeit kühler wirkten.

<sup>5</sup> N. Riedl; Trier Konstantinbasilika, Voruntersuchung zur Projektkartierung: Bestandsaufnahme römischer Putzflächen; Untersuchung 2013 mineralische Schutzüberzüge; unveröffentlichter Untersuchungsbericht, Hildesheim (2013), S.8

Aufnahme in Prüfreihe 2 fand das Bindemittel Prompt Fix-Zement® (PF), sowie farblich an die Fassade der Konstantinbasilika angepasste Schutzlasuren (KEIM Purkristalat®, jeweils 3 Farbtöne 9162, 9164, 9166). Daraus resultierte die Neukonzeption von drei Mörtelmischungen, mit und ohne Schutzlasuren in Anlehnung an die bereits bestehenden Probeachsen an der Konstantinbasilika Trier. Die mit **b** versehenen Testreihen bezeichnen die mit Schutzüberzügen konzipierten Prüfkörper. Insgesamt wurden folgende Rezepturen untersucht:

Tab. 6 Mörtelmischungen der Probenreihen RK 1.1-1.6 mit RCP Romanzement

Probenreihe	Bindemittel RCP Romanzement TL8 NHL 5	Millisil® W3	roter Sand	2,5 % <sup>6</sup> Mowilith LDM 6880 im Anmachwasser
RK 1.1	1 RT	3 RT	-	<sup>6</sup> W/Z-Wert: 1,6
RK 1.2	1 RT	-	3 RT	W/Z-Wert: 1,44
RK 1.3	1 RT	1 RT	2 RT	W/Z-Wert: 1,44
RK 1.4	2 RT	1 RT	2 RT	W/Z-Wert: 0,72
				<b>Anmachwasser</b>
RK 1.5	1 RT	3 RT		W/Z-Wert: 1,6
RK 1.6	1 RT		3 RT	W/Z-Wert: 1,44

Tab. 7 Mörtelmischungen der Probenreihen TK 1.1-1.4 mit Tubag Trasskalk

Probenreihe	Bindemittel TK HL 5 Trasskalk	Millisil® W3	roter Sand	Anmachwasser
TK 1.1	1 RT	3 RT	-	W/Z-Wert: 1,6
TK 1.2	1 RT	-	3 RT	W/Z-Wert: 1,44
TK 1.3	1 RT	1 RT	2 RT	W/Z-Wert: 0,72
TK 1.4	2 RT	1 RT	2 RT	W/Z-Wert: 0,72

Tab. 8 Mörtelmischung der Probereihen mit Prompt Fix Zement®

Probenreihe	Bindemittel Prompt Fix-Zement®	Millisil® W3	roter Sand Konz-Köen	Anmachwasser
PF1	1 RT	3 RT	-	1,4 W/Z-Wert
PF2	1 RT	2 RT	1 RT	1,4 W/Z-Wert
PF3	1 RT	1,5 RT	1,5 RT	1,4 W/Z-Wert

Parallel zur anwendungsorientierten Angabe in RT, wurden alle Mischungen bei ihrer Erstellung eingewogen.

<sup>6</sup> W/Z-Wert = Wasser-/ Zement-Wert; Dieser Wert gibt das Verhältnis von Wasser zu Zement im Mörtel an.



An den entwickelten Mörtelrezepturen wurden Untersuchungsreihen, wie in *Tab. 9, 10 und 11* aufgeführt, vorgenommen. Nach DIN-Normen (siehe Anhang) erfolgte die Herstellung, für die mit Prüfungsmethoden zur Konsistenz, Ausbreitmaß, Feuchtegehalt und Rohdichte, Wasseraufnahme und -abgabe, Wasserdampfdiffusionswiderstand, dynamischer E-Modul, Ultraschalllaufzeit im Tiefenprofil, Feuchte- und Wärmedehnung, Druck- und Biegezugfestigkeit, UV-Beständigkeit, sowie Alterungsverhalten durch Freibewitterung genutzten Prüfkörper.

Für die zweite Prüfkörperreihe mit BM Prompt Fix-Zement® wurde der Umfang der Untersuchungen aufgrund des geringeren Zeitrahmens für eine zweite Untersuchungsreihe, reduziert. Auf die Ermittlung zur Feuchte- und Wärmedehnung, Frost-Tau-Wechsel und Ultraschallgeschwindigkeit im Tiefenprofil, kapillare Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck, so wie die Ermittlung des Ausbreitmaßes wurde verzichtet.

Die Auswahl der Prüfkörpergeometrie für die THz-Analysen erfolgte anwendungsorientiert an die durchschnittliche für die Schutzputze in Trier vorgegebene Putzdicke von 0,7 cm.

Tab. 9 Untersuchungskatalog mit Kurzbezeichnungen

Untersuchungen mit Kurzbezeichnung	
<b>kWA</b>	kapillare Wasseraufnahme
<b>WA</b>	Wasserabgabe
<b>WD</b>	Wasserdampfdiffusionsfähigkeit
<b>WAA</b>	Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck
<b>RD</b>	offene Porosität, Rohdichte
<b>AB</b>	Ausbreitmaß
<b>KA</b>	künstliche Alterung
<b>BW</b>	Freibewitterung
<b>UV</b>	UV Beständigkeit
<b>BZ/DF</b>	Biegezug-Druckfestigkeit
<b>FTW</b>	Frost-Tau-Wechsel
<b>HD</b>	Hygrische Dehnung
<b>TD</b>	Thermische Dehnung
<b>EM</b>	E-Modul
<b>U</b>	Ultraschall im Tiefenprofil

#### 4.1 Untersuchungskataloge physikalische Kennwertermittlung/1. Prüfkörperreihe

Tab. 10 Untersuchungskatalog für die physikalische Kennwertermittlung der PKR-RCP und TK

Bezeichnung der Prüfkörperreihen	Prüfkörpergeometrie	Anzahl der Prüfkörper	Untersuchungen mit Kurzbezeichnung
<b>RCP Roman Kalk</b> <b>TL8 NHL 5</b> <b>RK1.1</b> Bindemittel: Millisil® W3: 2,5 % Mowilith LDM 6680 im Anmachwasser  <b>RK1.2</b> Bindemittel: roter Sand: 2,5 % Mowilith LDM 6680 im Anmachwasser  <b>RK1.3</b> Bindemittel: Millisil® W3: roter Sand: 2,5 % Mowilith LDM 6680 im Anmachwasser  <b>RK1.4</b> Bindemittel: Millisil® W3: roter Sand: 2,5 % Mowilith LDM 6680 im Anmachwasser  <b>RK1.5</b> Bindemittel: Millisil® W3 <b>RK1.6</b> Bindemittel: roter Sand	Prismen (16x4x4 cm)	/ 1-5 5 Prüfkörper pro Mörtel =50 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wasseraufnahmekoeffizient</li> <li>▪ Wasseraufnahmegrad unter Atmosphärendruck</li> <li>▪ Offene Porosität, Rohdichte</li> <li>▪ Wasserabgabe</li> <li>▪ Hygrische Dehnung</li> <li>▪ Thermische Dehnung</li> <li>▪ Dynamisches E-Modul</li> <li>▪ Biegezugfestigkeit</li> <li>▪ Druckfestigkeit</li> </ul>
	Scheiben (5x5x1 cm)	/1-5 5 Prüfkörper pro Mörtel =50 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wasserdampfdiffusion</li> </ul>
<b>Tubag Trasskalk</b> <b>TK HL 5</b> <b>TK1.1</b> Bindemittel: roter Sand:  <b>TK1.2</b> Bindemittel: Millisil® W3  <b>TK1.3</b> Bindemittel: Millisil® W3: roter Sand:  <b>TK1.4</b> Bindemittel: Millisil® W3: roter Sand:	Scheiben (7,5x15x1 cm)	/1-5 5 Prüfkörper pro Mörtel =50 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewitterungssimulation/ UV Beständigkeit</li> </ul>
	Würfel (4x4x4 cm)	/1-5 5 Prüfkörper pro Mörtel =50 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ultraschalllaufzeit im Tiefenprofil</li> </ul>

## 4.2 Untersuchungskataloge physikalische Kennwertermittlung/2. Prüfkörperreihe

Tab. 11 Untersuchungskatalog für die physikalische Kennwertermittlung der PKR-PK 2

Bezeichnung der Prüfkörperreihen	Prüfkörpergeometrie	Anzahl der Prüfkörper	Untersuchung
<p>Prompt Fix-Zement®</p> <p><b>PF1a</b> Bindemittel: Millisil® W3 <b>1:3</b></p> <p><b>PF2a</b> Bindemittel: Millisil® W3 roter Sand: <b>1:2:1</b></p>	Prismen (16x4x4 cm)	/ 1-5 5 Prüfkörper pro Mörtel =15 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kapillare Wasseraufnahme</li> <li>▪ Wasseraufnahmegrad unter Atmosphärendruck</li> <li>▪ Offene Porosität, Rohdichte</li> <li>▪ Dynamisches E-Modul</li> <li>▪ Biegezugfestigkeit</li> <li>▪ Druckfestigkeit</li> </ul>
<p><b>PF3a</b> Bindemittel: Millisil® W3 roter Sand :<b>1: 1,5:1,5</b></p>	Scheiben (5x5x1 cm)	/1-5 5 Prüfkörper pro Mörtel =15 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wasserabgabe</li> <li>▪ Wasserdampfdiffusion</li> </ul>
	Scheiben (7,5x15x1 cm)	/1-5 10 Prüfkörper pro Mörtel =30 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewitterungssimulation</li> <li>▪ Kapillare Wasseraufnahme nach Mirowski</li> </ul>
<p>Prompt Fix-Zement® mit KEIM Purkristalat</p> <p><b>PF1b</b> Bindemittel: Millisil® W3 <b>1:3</b></p>	Scheiben (7,5x 5x1 cm)	/1-5 10 Prüfkörper pro Mörtel =30 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bewitterungssimulation</li> <li>▪ Kapillare Wasseraufnahme nach Mirowski</li> </ul>
<p><b>PF2b</b> Bindemittel: Millisil® W3 roter Sand: <b>1:2:1</b></p> <p><b>PF3b</b> Bindemittel: Millisil® W3 roter Sand :<b>1: 1,5: 1,5</b></p>	Scheiben (5x5x1 cm)	/1-5 5 Prüfkörper pro Mörtel =15 Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wasserabgabe</li> <li>▪ Wasserdampfdiffusion</li> </ul>

### 4.3 Untersuchungskataloge THz-Analysen

Tab. 12 Untersuchungskataloge der Prüfkörper für die THz-Analysen

Bezeichnung der Prüfkörperreihen	Prüfkörpergeometrie	Anzahl der Prüfkörper	Untersuchung
<p><b>RCP Roman Kalk</b>  <b>TL8 NHL 5</b>  <b>RK 1.1</b>  <b>RK 1.2</b>  <b>RK 1.3</b>  <b>RK 1.4</b>  <b>RK 1.5</b>  <b>RK 1.6</b></p> <p><b>Tubag Trasskalk</b>  <b>TK HL 5</b>  <b>TK 1.1</b>  <b>TK 1.2</b>  <b>TK 1.3</b>  <b>TK 1.4</b></p> <p><b>HKP</b>  <b>NHL-FP</b>  <b>NHL-P</b>  <b>TKP</b>  <b>TKP-L</b>  <b>TK</b>  <b>RK</b>  <b>PF</b></p> <p><b>Zuschläge</b>            Millisil® W3            Roter Sand Konz-Könen            ®Mowilith LDM 6880            Cyclododecan</p> <p><b>Prompt Fix-Zement®</b>  <b>PF1b</b>  <b>PF2b</b></p>	<p>Presslinge bzw.            Scheiben            (4x4x0,5 cm)</p>	<p>/ 1-3            3 Prüfkörper pro Mörtel            = 75 Prüfkörper</p>	<p>Kennwertermittlung des            Absorptionskoeffizienten und            Brechungsindex in THz-Strahlung</p>
<p><b>PF3a</b></p>	<p>Scheiben            (7,5x1x1 cm)</p>	<p>/ 1-3            6 Prüfkörper des in Trier            verwendeten Mörtels</p>	<p>Proben für die Simulation des            Schutzputzes der Pilotfläche im            zweischichten Aufbau mit und            ohne Armierung nach            Aufbringung einer Trennschicht            (Cyclododecan)</p>

## 5. Prüfkörper

### 5.2 Herstellung der Prüfkörper

Durch die kurze Abbindezeit der Mörtel, vor allem des Romanzementes (max. 8 min), konnten nur geringe Mörtelmengen gemischt werden, welche umgehend verarbeitet werden mussten. Somit war es nicht möglich, alle Prüfkörper einer Mörtelmischung gleichzeitig herzustellen. Um dennoch bei jedem Mischvorgang einen vergleichbaren Mörtel anzufertigen, wurde mit dem HOBART-Rührer, angelehnt an DIN EN 196-1, gearbeitet. Alle einzelnen Komponenten wurden in RT abgewogen und trocken gemischt. Auf kleinster Stufe wurde zunächst das ermittelte Anmachwasser eingefüllt und 30 Sek. gerührt bis zur Einsteuerung der Feststoffmischung.

Anschließend wurden weitere 60 Sek. gerührt (Gesamtrühdauer 90 Sek.) Anschließend erfolgte die Einfüllung der Mörtelmassen in die jeweiligen Formen für die erforderliche Prüfkörpergeometrie. Zusätzlich erfolgte die Verdichtung, durch Stampfen und Schlagen der Formen auf die Arbeitsfläche, um Lufteinschlüsse zu verdrängen.

Es zeigte sich, dass vor allem die Mörtelmischungen mit dem Zuschlag RS (roter Sand) lange bearbeitbar blieben. Das Abziehen der Mörtel erfolgte nach Festigkeit und wurde zu unterschiedlichen Zeiten vorgenommen. Zunächst wurden alle Formen unter einer Folie bei  $20\pm 2^\circ\text{C}$  und  $80 \pm 5\%$  rLF in der Werkstatt gelagert. Die Ausschalung erfolgte je nach Mörtel nach 2-7 Tagen.

Die Fertigung der Prüfreihe zur Detektion von Trennschichten (Cyclododecan) zwischen Mörtelsystemen, durch den Einsatz von THz-Strahlung, erfolgte im Labor der Philipps Universität Marburg. Dies geschah, um das mehrschichtiger Mörtelsysteme mit und ohne Armierung in Anlehnung an die Pilotfläche in Trier zu simulieren und um Rückschlüsse auf das Trocknungsverhalten und den Einfluss der Feuchte auf die THz-Strahlung zu erhalten.

Zuzüglich zu den benötigten Prüfkörperreihen pro Untersuchung, wurden von jeder Mischung in jeder Prüfkörpergeometrie zwei Rückstellproben hergestellt.

### 5.1 Lagerung der Prüfkörper

Aus den Erfahrungen der Voruntersuchungen zeigte sich, dass die ideale Lagerung der Prüfkörper bei einer rLF von  $> 90\%$  einzurichten ist. Für diese Lagerung wurde eine dreiteilige mit Folie abgedichtete Klimakammer im relativ temperaturstabilen Keller der HAWK aufgebaut. Jeder der Kammern konnte separat durch eine zweite Folienabtrennung geöffnet und geschlossen werden. Arbeiten, die während der Lagerung der Probekörper im Inneren der Klimakammer stattfinden mussten, konnten so innerhalb dieses Klimapuffers durchgeführt werden, ohne das Klima maßgebend zu verändern. Die Prüfkörper wurden auf stapelbaren rostfreien Metallgittern gelagert. In jede der Kammern wurde ein Ventilator eingebaut der durch die Umwälzung der Luft für eine ausreichende Luftzirkulation sorgte.

Am Boden jeder Kammer befanden sich Behälter mit gesättigter Kaliumnitratlösung ( $\text{KNO}_3$ ), um eine Klimaeinstellung über Salze zu ermöglichen. Wird ein abgeschlossener Raum mit einer bestimmten gesättigten Salzlösung gefüllt, so entsteht nach kurzer Zeit in dem Luftraum über der Salzlösung eine bestimmte relative Luftfeuchtigkeit, die allerdings temperaturabhängig ist.

Kaliumnitrat erwies sich mit einer rLF von  $93\%$  bei  $20^\circ\text{C}$  und  $92\%$  bei  $25^\circ\text{C}$  als geeignet.

Um die Verwirbelung von Salzkristallen zu verhindern, wurden die Behälter mit Tyvek® Material abgedeckt. Zusätzlich war es durch eine Konstruktion möglich, bei Unterschreitung der rLF von > 90 %, feuchte Tücher in den Kammern aufzuhängen. Die Klimakontrolle dieser Einstellung erfolgte über die gesamte Lagerungsdauer (91 Tage) mittels Thermohygrometer. Die Messgeräte mit externem Fühler, konnten außerhalb der Kammern platziert werden, so war eine einfache Kontrolle möglich.

## 6. Anforderung und Untersuchungen zur Beurteilung der Schutzmörtel

Zur Beurteilung von Schutzmörtel, hinsichtlich ihrer Verträglichkeit mit dem Mörteluntergrund und seiner Anbringungsweise, wurden für die hygrischen und mechanischen Eigenschaften eindeutige Qualitätskriterien in Voruntersuchungen festgelegt, in deren Rahmen sich diese bewegen durften.<sup>7</sup>

Insgesamt wurden ca. 1880 Prüfkörper hergestellt und untersucht. Um die Zuordnung der Prüfkörper zum jeweiligen Bindemittel zu erleichtern, werden in den Diagrammen und Abbildungen zur Beurteilung der Untersuchungsergebnisse die Bezeichnungen **RK** (Romanzement Kalk), **TK** (Trasskalk) und **PF** (Prompt Fix-Zement®) mit fortlaufenden Nummerierung der Mischungen (z.B. RK1.4 vgl. *Tab. 6, 7 und 8*) verwendet.

### 6.1 Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen

Nachfolgend werden die Untersuchungsmethoden und Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung von hygrischen und mechanischen Kennwerten erläutert und dargestellt.

Die Gewichtsbestimmungen der Prüfkörper erfolgten generell mit der Waage SARTORIUS Extend, deren Messbereich bei einer Auflösung von 0,01 g zwischen 0,5 – 3200 g liegt. Messtrecken wurden mittels Messschieber Mitutoyo 250 mm oder Mikrometerschraube Mitutoyo Mikrometer 102-217, ±0,002 mm, Auflösung 0,01 mm, eingemessen.

#### 6.1.1 Frischmörtelanalyse-Bestimmung des Ausbreitmaß

Das Bestimmen des Ausbreitmaßes erfolgte nach DIN Bestimmung Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittische) EN 1015-3:1999+A1:2004. A2:2006. Hierdurch wurde erwartet eine Kenngröße zur Konsistenz der untersuchten Mörtelmischungen zu erhalten und somit auch Rückschlüsse auf ihre Verarbeitbarkeit ziehen zu können.

#### Versuchsdurchführung

Die Ermittlung des Ausbreitmaßes erfolgte mit dem aus Projektmitteln angeschafften Ausbreittisch. Vor jedem Versuch wurde die Scheibe des Ausbreittisches, so wie die Kanten des Setztrichters mit einem feuchten Tuch gereinigt. Die trockenen Mörtelkomponenten wurden vermischt und in das im Hobart-Rührer befindliche Anmachwasser in einer Mischzeit von 30 Sek. auf kleinster Stufe gegeben. Anschließend wurde die gesamte Masse weitere 60 Sek. gerührt und in den mitten auf dem Ausbreittisch platzierten Setztrichter in zwei Schichten eingefüllt. Dabei wurde jede Schicht mit 10 kurzen Stößen mittels Stampfer verdichtet. Überstehender Mörtel und Wasser am Rand des Trichters wurden entfernt. Nach Abnahme des Trichters wurde der Tisch 15-mal mit einer konstanten Frequenz von einem Hub je Sekunde angehoben und fallen gelassen.

Die Ermittlung des Durchmessers des ausgebreiteten Mörtels fand durch Nutzung eines Messschiebers in zwei rechtwinkelig zueinander liegenden Richtungen statt.

Pro Mörtelmischung wurden zwei Versuche durchgeführt.

---

<sup>7</sup> N. Riedl; Trier Konstantinbasilika, Voruntersuchung zur Projektkartierung: Bestandsaufnahme römischer Putzflächen; Untersuchung 2013 mineralische Schutzüberzüge; unveröffentlichter Untersuchungsbericht Hildesheim (2013)

### 6.1.2 Ultraschall im Tiefenprofil

#### Definition

Die Ultraschall-Messtechnik basiert auf der Ausbreitung mechanischer Wellen in einem festen Medium. Die Wellen breiten sich in verschiedenen Bewegungsformen im Mörtel aus und werden dementsprechend auch unterschiedlich gedämpft, was wiederum unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten zur Folge hat.

Für die vorliegenden Untersuchungen sind die Longitudinalwellen von besonderem Interesse. Mittels Durchschallungs- bzw. Transmissionsmessung (bei ca. 20-100 kHz) kann die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwellen bestimmt werden.

Die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit im Tiefenprofil soll hier nähernd Aufschluss über die Verteilung des Bindemittels in den Mörtelprüfkörpern geben, besonders im Hinblick auf die mögliche ungleiche Bindemittelverteilung und Schichtbildung.

#### Versuchsdurchführung

Die Ermittlung der Ultraschallgeschwindigkeit erfolgte an Prüfkörpern<sup>8</sup> der Maße 4 x 4 x 4 cm<sup>3</sup> nach mehrwöchiger Lagerung bei 22±2°C und 60 ±5 % rLF. Die Messungen wurden in einer Prüfvorrichtung der Firma GEOTRON-ELEKTRONIK durchgeführt. Für die Auswertung wurde die Software „LightHouse UMPC“ desselben Herstellers verwendet. Die Messpunkte wurden, beginnend von der herstellungsbedingten Prüfkörperoberseite, in folgenden Tiefenabschnitten gewählt: 3, 6, 11, 16, 21, 26, 31, 36 mm.

Die Ankoppelung der Prüfköpfe (Geber und Empfänger) erfolgte ohne Koppelmittel an den Sägeflächen der Prüfkörper.<sup>9</sup> Die Geberfrequenz betrug 80 kHz.

### 6.1.3 Kapillare Wasseraufnahme

#### Definition

Die kapillare Wasseraufnahme charakterisiert die durch kapillare oder absorptive Kräfte bedingte flächenbezogene Wasseraufnahme von Baustoffen bei Oberflächenbenetzung, wie es in der Praxis z.B. bei Schlagregen oder aufsteigender Feuchte der Fall ist. Das kapillare Saugverhalten poröser Stoffe wird im Allgemeinen durch den Wasseraufnahmekoeffizienten beschrieben. Er gibt die Wassermenge an, die ein Baustoff abhängig von der Saugfläche und der Zeit kapillar aufnimmt, so dass sich nach DIN EN 15148:2002 folgende Beziehung ergibt:

$$w = \frac{W}{\sqrt{t}}$$

W = flächenbezogene Wasseraufnahme [kg/m<sup>2</sup>]

t = Zeit [h]

w = Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m<sup>2</sup>√h]

(1)

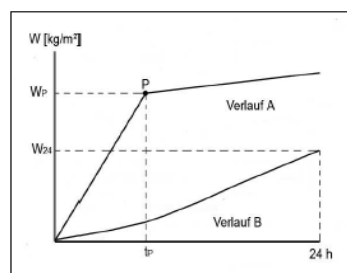


Abb. 3 Schematische Darstellung zur Bestimmung des w-Werts (nach BRANDES, 1995, S. 34)

<sup>8</sup> Die Prüfkörper der Maße 4 x 4 x 4 cm wurden durch Zersägen der Prismen hergestellt, pro Prisma konnten 3 Würfel gewonnen werden.

<sup>9</sup> Es ist davon auszugehen, dass sich das Bindemittel an den Oberflächen der Mörtelprismen mehr oder weniger stark angesammelt hat. Um ein Durchlaufen des Ultraschallsignals nur durch diese Schicht und damit verfälschte Messwerte zu verhindern, erfolgte die Ankoppelung der Prüfköpfe an den Sägeflächen der Prüfkörper.

### Versuchsdurchführung

Die Bestimmung der flächenbezogenen Wasseraufnahme erfolgte in Anlehnung an DIN 52 617. Es wurden Prüfkörper der Maße  $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$  verwendet, die nach mehrwöchiger Lagerung bei  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  und  $60 \pm 5 \%$  rLF kapillar mit Leitungswasser getränkt wurden. Bei den Mörtelprismen diente die herstellungsbedingte Prüfkörperoberseite als Saugfläche ( $16 \times 4 \text{ cm}^2$ ). Die Seitenflächen wurden abweichend von der Norm nicht abgedichtet, um weitere Untersuchungen an den Prüfkörpern durchführen zu können.

Die Prüfkörper wurden mit der Grundfläche auf Dreiecksleisten etwa 5 mm tief in Leitungswasser gestellt und zur Bestimmung der Massezunahme nach 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 22, 24, 26, 28,30, 32, 36, 42, 48, 54, und 60 min gewogen, wobei vor jeder Wägung anhaftendes Wasser mit einem Schwammtuch abgetupft wurde.

Die Messungen der verschiedenen Mörtel wurden zu unterschiedlichen Zeiten, abhängig von der optischen Volltränkung beendet. 60 min. wurden nur bei der Mörtelmischung RK1.4 erreicht.

Die Berechnung des w-Wertes bezieht sich auf die Masse der Prüfkörper bei Ausgleichsfeuchte (bei  $25^\circ\text{C}$  und  $58 \%$  -  $67 \%$  rLF).

#### 6.1.4 Massebezogener Wasseraufnahmegrad unter Atmosphärendruck

Der Wasseraufnahmegrad unter Atmosphärendruck gibt die maximale Wassermenge an, die ein Baustoff bezogen auf das Trockengewicht unter atmosphärischen Bedingungen aufnimmt und wird hier gemäß folgender Formel berechnet:

(2)

$$W_{m,a} = \frac{(m_n - m_t)}{m_t} * 100$$

$m_t$  = Trockengewicht [g]

$m_n$  = Naßgewicht [g]

$W_{m,a}$  = massebezogener Wasseraufnahmegrad [M-%]

### Versuchsdurchführung

Die Bestimmung des Wasseraufnahmegrades erfolgte in Anlehnung an DIN EN 13 755 (Ausgabe 03/2002) und wurde direkt im Anschluss an die Messung der flächenbezogenen Wasseraufnahme durchgeführt. Die Prüfkörper wurden bei 2 cm Überdeckung in Leitungswasser gelagert und bis zum Erreichen der Massekonstanz ( $\pm 0,1 \text{ M\%} / 24 \text{ h}$ ) täglich gewogen. Vor jeder Wägung wurde anhaftendes Wasser mit einem Schwammtuch in definierter Weise abgetupft. Der Versuch wurde nach 4 Tagen (RK) 5 Tagen (TK) beendet und die Prüfkörper abschließend gewogen. Das Trockengewicht wurde nachträglich bestimmt.

#### 6.1.5 Offene Porosität und Rohdichte

##### Definition

Die offene Porosität umfasst die von außen zugänglichen Poren und sonstigen Hohlräume eines Baustoffs und gibt den prozentualen Anteil (Vol %) der offenen Poren bezogen auf das Rohvolumen des Prüfkörpers an. Die Rohdichte bezeichnet das Verhältnis zwischen der Masse des trockenen Prüfkörpers und seinem Rohvolumen, einschließlich der Poren und Hohlräume.

Offene Porosität und Rohdichte wurden entsprechend DIN EN 1936 (Ausgabe 07/1999) nach folgenden Formeln berechnet:



$$P_o = \frac{(m_n - m_{tr})}{m_n - m_{au}} * 100$$

$m_{tr}$  = Trockengewicht [g]  
 $m_n$  = Nassgewicht [g]  
 $m_{au}$  = Auftriebsgewicht [g]  
 $P_o$  = Offenen Porosität [Vol-%]

(3)

$$\rho_{roh} = \frac{m_{tr} \cdot \rho_{H_2O}}{m_n - m_{au}}$$

$m_{tr}$  = Trockengewicht [g]  
 $m_n$  = Nassgewicht [g]  
 $m_{au}$  = Auftriebsgewicht [g]  
 $\rho_{H_2O}$  = Dichte des Wassers [g/cm<sup>3</sup>]  
 $\rho_{roh}$  = Rohdichte [g/cm<sup>3</sup>]

(4)

### Versuchsdurchführung

Die offene Porosität und Rohdichte wurden in Anlehnung an DIN EN 1936 (Ausgabe 07/1999) mit Hilfe des Auftriebsverfahrens ermittelt. Abweichend von der Norm wurde darauf verzichtet die Prüfkörper unter Vakuum mit Wasser zu sättigen. Die Bestimmung des Nassgewichts an der Luft und des Auftriebsgewichts unter Wasser mittels hydrostatischer Waage erfolgte an den wasser-gesättigten Prüfkörpern aus der Messung des Wasseraufnahmegrades unter Atmosphärendruck (vgl. Kap. 6.1.4). Das Trockengewicht wurde nachträglich bestimmt.

Da durch die hier angewendete Verfahrensweise, d.h. die Wassersättigung der Proben unter normalem Luftdruck in der Regel nicht alle Poren mit Wasser gefüllt werden können, entspricht die offene Porosität in diesem Falle auch dem volumenbezogenem Wasseraufnahmegrad ( $W_{v,a}$ ).

### 6.1.6 Wasserabgabe

#### Definition

Die Trocknung von feuchten/porösen Baustoffen lässt sich in zwei Abschnitte einteilen. In der ersten Phase verdunstet das Wasser direkt an die Oberfläche des Baustoffs durch kapillaren Wassertransport bei ständigem Wassernachschub aus dem Inneren. In dieser Phase werden verhältnismäßig große Feuchtigkeitsmengen transportiert, die Trocknung erfolgt schnell.

In der zweiten Phase ist der Kapillarnachschub nicht mehr ausreichend und die Flüssigkeitsfront zieht sich ins Innere des Materials zurück (Knickpunkt). Das Wasser verdunstet im Inneren und diffundiert nach außen. Die Trocknung wird dann zunehmend durch Wasserdampfdiffusion gesteuert wobei sich die Trocknungsgeschwindigkeit verlangsamt.<sup>10</sup>

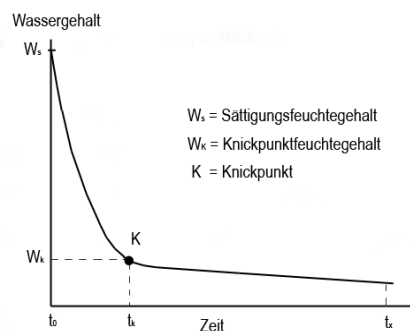


Abb. 4 Schematischer Trocknungsverlauf (nach BRANDES, 1995, S. 35)

<sup>10</sup> Vgl. POSCHLOD, 1990, S. 31; BRANDES, 1995, S. 15-16.

### Versuchsdurchführung

Die Ermittlung der Wasserabgabe schloss sich direkt an die Messung der Wasseraufnahme an. Nach 7-tägiger Lagerung bei Wasserüberdeckung wurden die Prüfkörper zum Abtrocknen bei  $24\pm 2^\circ\text{C}$  und  $60 \pm 5\%$  rLF gelagert, wobei der Abstand der Prüfkörper untereinander etwa 3 cm betrug. Die Prismen waren bis auf die herstellungsbedingte Oberseite mit Hilfe von Paketklebeband abgedichtet, so dass eine definierte einseitige Trocknung erfolgen konnte. Die Gewichtsbestimmung wurde während der ersten 6 Stunden stündlich, dann nach 24h und in den folgenden Tagen täglich vorgenommen. Nach insgesamt 19 Tagen wurden die Messungen beendet. Die Prüfkörper wurden nach Entfernen des Paketklebebandes bei  $35^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend zur Bestimmung der Trockenmasse gewogen.

### 6.1.7 Kapillare Wasseraufnahme nach Mirowski

#### Definition

Die Messung der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme nach Mirowski wurde zusätzlich zu den bereits vorgenommenen Analysemethoden in den Untersuchungskatalog aufgenommen. Bezogen auf die konzipierte Dicke der Schutzputze an der Konstantinbasilika Trier fanden die Messungen an den Prüfkörpern PF1 bis PF3 mit und ohne Beschichtung der Prüfkörperreihe (kWA)  $7,5 \times 15 \times 1,5$  cm statt.

#### Versuchsdurchführung

Die Kapillartränkungsprüfung nach Mirowski (Patent Nr. 125504) erfolgt mit einem einseitig geschlossenen Glasröhrchen. Das kalibrierte, mit  $\text{H}_2\text{O}$  gefüllte Messrohr wird so an der zu messenden Stelle am Prüfkörper befestigt, dass über ein Schwammventil ein Kontakt zwischen Messrohr und Material besteht. Der Flüssigkeitsverlust im Messrohr (ml), sowie der Durchmesser des an der Messstelle entstehenden Feuchtehofs (cm) werden in bestimmten Zeitabständen notiert. Als Ergebnis wird die kapillare Aufnahmegeschwindigkeit der Flüssigkeit in ml/h angegeben. Daneben kann der volumenbezogene Aufnahmegrad annäherungsweise berechnet werden. Es wird angenommen, dass sich die Flüssigkeit im Mörtel in Form einer Halbkugel verteilt.

Der volumenbezogene Aufnahmegrad (Vol-%) berechnet sich dann nach folgender Formel:

$$W = V_w / V_o * 100 \quad (5)$$

$V_w$  = aufgenommenes Flüssigkeitsvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

$V_o$  = durchtränktes Steinvolumen [ $\text{cm}^3$ ]

Die so ermittelten Messwerte sind nicht mit der nach DIN-Normen ermittelten Wasseraufnahme zu vergleichen. Die Kapillartränkungsprüfung nach Mirowski gibt lediglich Annäherungswerte an.

### 6.1.8 Wasserdampfdiffusion

Bei unterschiedlichem Wasserdampfpartialdruck, d.h. unterschiedlicher relativer Luftfeuchte auf beiden Seiten eines Baustoffs wandert der Wasserdampf infolge des Druckunterschiedes und zum Konzentrationsausgleich in Richtung des Dampfdruckgefälles.

Diesen Diffusionsvorgängen setzen Baustoffe einen gewissen Widerstand entgegen, der neben den klimatischen Randbedingungen insbesondere von der offenen Porosität bzw. dem Porensystem und der spezifischen Oberfläche des Stoffes abhängig ist.<sup>11</sup> Als spezifischer Kennwert für die Wasserdampfdiffusion dient u.a. die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Die dimensionslose Größe  $\mu$  gibt an wievielfach größer der Diffusionswiderstand eines Stoffes verglichen mit einer gleich dicken, ruhenden Luftschicht ( $\mu = 1$ ) bei gleicher Temperatur ist.

#### Versuchsdurchführung

Die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit erfolgte in Anlehnung an DIN 52615 (Ausgabe 11/1987) im „wet-cup“-Verfahren. (vgl. Abb.5) Dazu wurden Prüfkörper der Masse  $5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$  auf transparente Kunststoffbehälter ( $5 \times 5 \times 4 \text{ cm}^3$ ) gesetzt und seitlich so mit einer Dichtungsmasse<sup>12</sup> abgedichtet, dass der Gasaustausch nur über die Probenoberfläche ( $25 \text{ cm}^2$ ) erfolgen konnte. Die Kunststoffbehälter waren mit destilliertem Wasser gefüllt, wobei der Abstand zwischen Unterseite der Prüfkörper und der Wasseroberfläche 2 cm betrug.

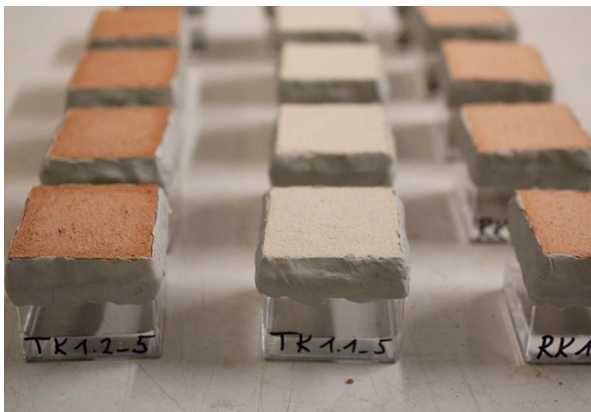


Abb. 5 Prüfkörper „wet-cup“-Verfahren zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit

Die so präparierten Prüfgefäße wurden in einem Raum mit weitgehend konstantem Klima bei durchschnittlich  $24 \pm 2^\circ\text{C}$  und  $60 \pm 5\%$  rLF gelagert. Temperatur und relative Luftfeuchte wurden während der gesamten Versuchsdauer mittels eines Thermohygrographen überprüft.

Zur Ermittlung der durch die Prüfkörper diffundierenden Wasserdampfmenge wurden die Prüfgefäße regelmäßig in Zeitabständen von 24h gewogen. Nachdem sich ein gleichmäßiger Diffusionsstrom eingestellt hatte, d.h. die Masseänderung bzw. Gewichtsabnahme pro Zeiteinheit konstant war, wurde der Versuch beendet. Die Messung erfolgte insgesamt über 10 Tage, die ersten 6 Tage wurden bei der Auswertung der Messwerte nicht berücksichtigt.

Aus der verdunsteten Wasserdampfmenge pro Zeiteinheit kann unter Berücksichtigung der klimatischen Randbedingungen während des Versuchsablaufs (Temperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck) die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  errechnet werden. In Anlehnung an POSCHLOD<sup>13</sup> und D’HAM<sup>14</sup> kam hier folgende Formel zum Einsatz:

<sup>11</sup> Vgl. WENDEHORST, 1998, S. 11.

<sup>12</sup> Terostat-IX der Firma Henkel KGaA Düsseldorf

<sup>13</sup> Vgl. POSCHLOD, 1990, S. 36.

<sup>14</sup> Vgl. D’HAM, 2003, S.31-34 (ausführliche Erklärung zur Berechnung Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl).

$$\mu = \frac{\delta_L \cdot p_s \cdot \Delta a \cdot A \cdot t - s_L}{s \cdot \Delta m} - \frac{s_L}{s}$$

(6)

$\delta_L$  = Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft (temperatur- und luftdruckabhängig) [kg/Pa·m·s]

$p_s$  = Partialdruck der gesättigten Luft (temperaturabhängig) [Pa]

$\Delta a$  = Differenz der relativen Luftfeuchte [-]

$A$  = Fläche der Probe [m<sup>2</sup>]

$t$  = Zeit [s]

$s$  = Schichtdicke der Probe [m]

$\Delta m$  = Gewichtsänderung [kg]

$s_L$  = mittlere Dicke der Luftschicht im Prüfgefäß unterhalb der Probe [m]

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgten keine Luftdruckmessungen, sodass für die Berechnung des Diffusionswiderstandes ein kontinuierlicher Luftdruck von 1013,25 hPa während des gesamten Messzeitraums angenommen wird. Dies kann bei den berechneten Werten zu Abweichungen von ±10 % zu führen.<sup>15</sup>

### 6.1.9 Dynamisches E-Modul

#### Definition

Der dynamische E-Modul wird mittels Dehnwellenresonanzmessung ermittelt. Durch Anregung mit Ultraschallsignalen werden im Material neben den bereits erwähnten Longitudinalwellen u.a. auch Dehnwellen (Resonanzschwingungen) erzeugt. Aus der Dehnwellengeschwindigkeit und der jeweiligen Dichte des Materials wird der dynamische E-Modul ermittelt:

(7)

$$E_{dyn} = v_D^2 \cdot \rho_{roh}$$

$v_D$  = Dehnwellengeschwindigkeit

$\rho_{roh}$  = Rohdichte des Gesteins

$E_{dyn}$  = Dynamischer E-Modul [kN/mm<sup>2</sup>]

#### Versuchsdurchführung

Die Ermittlung des dynamischen E-Moduls erfolgte mit der gleichen Prüfvorrichtung und Auswertungssoftware welche auch zur Messung der Ultraschallgeschwindigkeit im Tiefenprofil verwendet wurde (vgl. Kap.6.1.2). Es kamen Prüfkörper der Abmessung 16 x 4 x 4 cm<sup>3</sup> nach Lagerung bei 22±2°C und 60±5 % rLF zum Einsatz.

Die Messung erfolgte parallel zur herstellungsbedingten Schichtung, wobei die Ankopplung der Prüfköpfe an den Kopfflächen der Prismen (4 x 4 cm) ohne Kopplungsmittel mit einem Koppeldruck von 550 mbar vorgenommen wurde. Die Amplitudendarstellung betrug 10 und 20 mV, die Gerberfrequenz bei 46 kHz und die Abtastrate bei 10 MHz.

<sup>15</sup> Vgl. D'HAM, 2003, S. 33.

### 6.1.10 Hygrische Dehnung

Der Kontakt mit Wasser im hygrokopischen und überhygrokopischen Bereich kann bei porösen Baustoffen zu einer Dehnung bzw. Volumenvergrößerung führen, umgekehrt nimmt das Volumen bei der Austrocknung wieder ab (Quell- und Schwindprozesse). Die hygrische Dehnung kann als direktes Maß für die Längenänderung eines Baustoffs infolge wechselnder Feuchte bezeichnet werden.

#### Versuchsdurchführung

Die hygrische Längenänderung wurde in Anlehnung an DIN 52 450 (Ausgabe 08/1985) bestimmt. Es wurden Prüfkörper der Maße 16 x 4 x 4 cm verwendet auf deren Stirnseiten Messzapfen (Typ 2 / Form C) zentrisch mit Epoxidharz 69 aufgeklebt wurden. Die Messung erfolgte parallel zur herstellungsbedingten Schichtung der Mörtel in einem Dilatometer der Firma FORM+TEST PRÜFSYSTEME (Typ C) in dessen Messachse eine analoge Messuhr (KÄFER FM 1000/5, Auflösung 0,001 mm) befestigt war. Vor Beginn der Messung wurde die absolute Länge der Prismen mittels einer Schieblehre (Auflösung 0,05 mm) ermittelt.

Die Ausgangsmessung im Dilatometer erfolgte nach Lagerung der Prüfkörper bei  $20\pm 2^\circ\text{C}$  und  $55\pm 5\%$  rF. Im Anschluss wurden die Prüfkörper über einen Zeitraum von 6 Stunden kapillar mit Leitungswasser getränkt, wobei das Quellmaß stündlich bestimmt wurde. Danach wurden die Prüfkörper langsam mit Wasser aufgefüllt, bei etwa 2 cm Wasserüberdeckung für weitere 24h gelagert und anschließend gemessen. Dabei wurde zur Überprüfung der Einstellungen des Dilatometers nach jeweils 3 Messungen eine Kontrollmessung mit einem Normvergleichskörper durchgeführt. Das Quellmaß wurde bezogen auf die absolute Länge des Prüfkörpers in mm/m umgerechnet. Parallel zur Messung der Längenänderung wurde der Feuchtgehalt der Prüfkörper zum jeweiligen Messtermin mittels Wägung ermittelt.

### 6.1.11 Thermische Dehnung

#### Definition

Bei Temperaturerhöhung erfahren Baustoffe für gewöhnlich eine Ausdehnung, bei Abkühlung verläuft dieser Prozess in umgekehrter Richtung. Die thermische Dehnung bezeichnet demnach die Verformungseigenschaften von Baustoffen infolge von Temperaturänderungen.

#### Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der thermischen Längenänderung kam in Anlehnung an DIN 52450 die bereits in Kapitel 6.1.10 beschriebene Prüfvorrichtung (*Dilatometer, Fa. FORM+TEST PRÜFSYSTEME, vgl. Abb.6*) zum Einsatz. Dementsprechend wurden auch hier Prismen verwendet, die an den Kopfseiten mit Messzapfen versehen waren.<sup>16</sup>

Vor Beginn der Messung wurden die Prismen wiederum mittels einer Schieblehre vermessen. Die Ausgangsmessung im Dilatometer erfolgte an den zuvor bei durchschnittlich  $21^\circ\text{C}$  und  $50\%$  rLF gelagerten Prüfkörpern. Anschließend wurden die Prüfkörper stufenweise Temperaturen von  $-20^\circ\text{C}$  bis  $+60^\circ\text{C}$  ausgesetzt.<sup>17</sup> Der Versuchsablauf gliederte sich dabei in zwei Etappen: am ersten Tag wurde die Prüfkörper auf Temperaturen von  $-20^\circ\text{C}$  und  $0^\circ\text{C}$  abgekühlt und gemessen. Nach Lagerung der Prüfkörper über Nacht bei Raumtemperatur wurden diese am zweiten Tag auf  $40^\circ\text{C}$  und  $60^\circ\text{C}$  erwärmt und jeweils gemessen.

<sup>16</sup> Die Messung wurde an den gleichen Prüfkörpern, die auch zur Bestimmung der hygrischen Dilatation verwendet wurden durchgeführt, wobei die Ermittlung der hygrischen Dehnung im Anschluss an die der thermischen Dehnung erfolgte.

<sup>17</sup> Zur Kontrolle der Temperatur wurde Thermometer verwendet.

Die Prüfkörper wurden nach jeweils 90 min bei der jeweiligen Temperaturstufe einzeln aus dem Wärmeschrank bzw. der Gefriertruhe entnommen und auf ihre Längenänderung hin gemessen. Abschließend erfolgte noch eine Messung nach 24stündiger Lagerung der Prüfkörper bei durchschnittlich 21°C und 50 % rLF

Die Prüfkörper waren während des gesamten Versuchsablaufs einzeln luftdicht in Gefrierbeutel verpackt und wurden nur zur Messung der Längenänderung kurzzeitig entnommen. Auf diese Weise sollte der Einfluss von Dehnungen infolge von Feuchteänderungen minimiert werden. Zur Kontrolle des Feuchtegehaltes wurde parallel zur Messung der Längenänderung das Gewicht der Prüfkörper bestimmt. Die thermische Längenänderung gegenüber dem Ausgangswert wurde bezogen auf die absolute Länge des Prüfkörpers in mm/m umgerechnet.

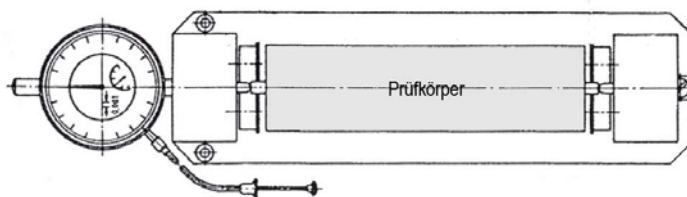


Abb. 6 Dilatometer (Typ C) mit analoger Messuhr (nach DIN 52450, Ausgabe 08/1985, S.5).

### 6.9.12 Biegezug- und Druckfestigkeit

#### Definition

Anhand der Biegezug- und Druckfestigkeit lassen sich die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Baustoffen charakterisieren. Unter der Festigkeit eines Baustoffes ist dabei die Spannung zu verstehen, die das Material bei einer mechanischen Beanspruchung, hier in Form von Druck und Zug, bis zum Bruch bzw. zur irreversiblen Verformung aufnehmen kann.

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit erfolgt durch Beanspruchung eines Probekörpers (Prisma, Balken) auf zwei Stützen (Auflager) durch eine mittig wirkende Einzellast. Bei der daraus resultierenden Durchbiegung entstehen im Material Zugspannungen, die letztendlich zum Bruch führen. Die Biegezugfestigkeit berechnet sich im Falle einer mittigen Einzellast nach folgender Formel:

$$\beta_{BZ} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (8)$$

$F_{max}$  = Bruchlast [N]                       $h$  = Probenhöhe [mm]  
 $l$  = Abstand der Auflager [mm]             $\beta_{BZ}$  = Biegezugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $b$  = Probenbreite [mm]

Die Druckfestigkeit ist der Wert für die maximale Druckbelastung eines Baustoffs. Im Prüfverfahren werden Prismen bis zum Bruch belastet. Die erreichte Höchstlast bezogen auf den Querschnitt ergibt die Druckfestigkeit. Die Berechnung der Druckfestigkeit erfolgt nach der Formel:

(9)

$$\beta_D = \frac{F_{\max}}{A}$$

$F_{\max}$  = Bruchlast [N]

$A$  = Querschnitt (Stempel) [mm<sup>2</sup>]

$\beta_{BZ}$  = Druckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

### Versuchsdurchführung

Die Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen wurden in Anlehnung an DIN EN 196-1:2005-05, Prüfverfahren für Zement-Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, im Baustofflabor des Fachbereichs Bauingenieurwesen der HAWK in Hildesheim vorgenommen. Die Ermittlung der Biegezugfestigkeit erfolgte an einer Prüfmaschine der Firma w+b walter + bai AG Typ: DB-600/20kN; F.No: 974; A. No.: K17395. Max. 20kN.

Es kamen prismatische Prüfkörper der Maße 16 x 4 x 4 cm (Lagerung bei 20±2°C / 55±5 % rF) zum Einsatz, die senkrecht zur herstellungsbedingten Schichtung durch eine mittig einwirkende Kraft eine Belastung bis zum Bruch erfuhren.

Die Druckfestigkeit wurde an den gebrochenen Prismen der Biegezugprüfung mit der gleichen Prüfmaschine vorgenommen. Die Prüfkörper wurden so in die Prüfmaschine zwischen zwei Stahlplatten (Querschnitt 1600 mm<sup>2</sup>) eingespannt, dass die Druckkraft parallel zur herstellungsbedingten Schichtung einwirkte.

### 6.1.13 Frost-Tau-Wechsel

#### Definition

Das Frost-Tau-Wechselverhalten gilt als Maß für die Frostbeständigkeit von porösen Baustoffen und dient zur Kennzeichnung ihrer Verwitterungsbeständigkeit. Die Beurteilung der Frostbeständigkeit erfolgt mittels Temperaturwechselprüfung an befeuchteten bzw. wassergesättigten Prüfkörpern. Die Methode beruht darauf, dass es durch Gefrier- und anschließenden Tauvorgängen zu einer Volumenausdehnung (ca. 9 Vol %) und Kontraktion des eingelagerten Wassers kommt. Die daraus resultierenden Spannungen führen mit der Zeit zu einer Schwächung des Materialgefüges.

Der Frost-Tau-Wechselwiderstand wird maßgeblich von der jeweiligen Wasseraufnahmefähigkeit und dem zur Verfügung stehenden Porenraum des Baustoffs, innerhalb dessen sich das Wasser beim Gefrieren ausdehnen kann, bestimmt.

#### Versuchsdurchführung

Der Frost-Tau-Wechsel-Versuch wurde in einem mit dem NLD Hannover abgesprochen Zyklus dort durchgeführt. Die Bewitterung fand in einem Klimaschrank „Typ C340/40“ der Fa. Weiss Umwelttechnik statt. Genutzt wurden die Prüfkörper der WD Prüfreihe mit den Maßen 5 x 5 x 1 cm<sup>3</sup>. Diese wurden bei 35°C bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend für 24h mit Leitungswasser getränkt (1h zur Hälfte in Wasser eingetaucht, 22h unter Wasserbedeckung von 2 cm). Danach wurden die Prüfkörper einzeln luft- und wasserdicht in Vakuumbbeutel verpackt (siehe Abb.7) und dem folgendem Zyklus 25-mal ausgesetzt:

- 1.) 2h von 20°C auf -20°C
- 2.) 1h bei -20°C
- 3.) 2h von -20°C auf 20°C
- 4.) 1h bei 20°C



Abb. 7 Vakuumverpackte Prüfkörper der Prüfreihe FTW.

Nach 25 Zyklen wurden die Prüfkörper ausgepackt, getrocknet und auf augenscheinliche Veränderungen (Risse, Ablösungen usw.) untersucht. Alle Prüfreiheiten wurden sowohl fotografisch, als auch punktuell mikroskopisch dokumentiert. Auf eine Überprüfung des Masseverlustes wurde verzichtet.

#### 6.1.14 UV-Beständigkeit

##### Definition

Durch Einwirkung energiereicher UV-Strahlung (ca. 6 % des Tageslichts) werden Oxidationsreaktionen ausgelöst. Es kann zu Verfärbungen bzw. Vergilbungen insbesondere bei den genutzten Bindemitteln und Zuschlägen (Mowilith LDM 6680) kommen. Anhand von Bewitterungsversuchen soll hier das Alterungsverhalten der verschiedenen Bindemittel bzw. Zuschläge insbesondere im Hinblick auf die UV-Beständigkeit verglichen und bewertet werden.

Die Bewitterung der Prüfkörper erfolgte unter künstlichen Bedingungen mit Hilfe eines Schnellbewitterungsgerätes, in welchem der natürliche Ablauf des Witterungsgeschehens quasi im Zeitraffer simuliert werden kann. Die in der natürlichen Umwelt ablaufenden komplexen chemischen und physikalischen Prozesse sind jedoch stets nur eingeschränkt nachvollziehbar, sodass sich die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf die Alterung unter natürlichen Bedingungen übertragen lassen.<sup>18</sup>

##### Versuchsdurchführung

Für die Bewitterungsversuche wurden je Mörtelmischung fünf Mörtelprüfkörper der Maße  $6 \times 7 \times 1 \text{ cm}^3$  verwendet die zuvor für mehrere Wochen bei  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  /  $55 \pm 5 \%$  rLF gelagert waren. Alle Prüfkörper wurden zuvor fotografisch dokumentiert.

Die Bewitterungssimulation erfolgte mit dem Schnellbewitterungsgerät Q-Panel, Typ QUV/SE im Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege, Hannover.

Das Gerät ist mit einer regelbaren spektralen Bestrahlungsquelle ausgestattet, zusätzlich können Betauung/Kondensation und Beregnung eingestellt werden. Ein Bewitterungszyklus wurde hier auf 2 Stunden festgelegt und aufgeteilt in:

75 min Betauung/Kondensation (bei  $40^\circ\text{C}$ )

45 min UV-Strahlung (bei  $50^\circ\text{C}$ )

---

<sup>18</sup> Vgl. VENZMER, 2001, S. 80.



Die verhältnismäßig lange Betauungsphase im Vorfeld der eigentlichen Bestrahlungsphase diente dabei zur Durchfeuchtung der Prüfkörper.

Bestrahlungsstärke 0,5 W (m<sup>2</sup>·xnm) bei einer Wellenlänge von 340 nm. Diese Konstellation entspricht annähernd den natürlichen Gegebenheiten, die in Mitteleuropa in den Sommermonaten maximal zu erwarten sind.<sup>19</sup>

Die Mörtelprüfkörper wurden während des gesamten Bewitterungszeitraums keinem regelmäßigen Positionswechsel im Bewitterungsgerät unterzogen. Es ist somit denkbar, dass sich laut Auskunft des NLD die vor den Sprühdüsen befindlichen Proben ein anderes Bewitterungsverhalten zeigen.

Die Mörtelprüfkörper wurden für 714h bewittert, das entspricht 357 Bewitterungszyklen und folglich 268h UV-Bestrahlung.<sup>20</sup> Nach Abschluss der Bewitterungssimulation wurden die Veränderungen der Prüfkörper makroskopisch und mikroskopisch beurteilt.

### 6.1.15 Freibewitterung

#### Versuchsdurchführung

Um Anwendungsorientiert das Bewitterungsverhalten der Schutzputze und Schutzlasuren beurteilen zu können, wurden alle Prüfreihe auf einem Expositionsstand (siehe Abb.8 einer einjährige Bewitterung (ab Dezember 2015) unterzogen. Die Langzeitbewitterung fand auf dem Dach der HAWK/Bismarckplatz 10/11, mit Ausrichtung nach Süden statt.

Die hierfür genutzten Prüfkörper reduzierten sich auf drei Prüfkörper pro Reihe und wurden aus den Rückstellproben bezogen. Beurteilt wurden die Prüfkörper im Vor- und Nachzustand durch fotografische Dokumentation.



Abb. 8  
Expositionsgestell mit Prüfkörpern;  
Ausrichtung Richtung Süden

<sup>19</sup> Vgl. BRANDES, 1995, S. 85.

<sup>20</sup> Laut BRANDES können näherungsweise 300h Stunden UV-Bestrahlung als verwitterungsrelevante Jahresbelastung angenommen werden, wobei dieser Kalkulation nur der Zeitraum mitintensiver Sonneneinstrahlung (Mai - August / 11 - 15 Uhr) zugrunde gelegt wurde. Damit ergab sich für die Mörtelprüfkörper eine natürliche Bewitterungszeit von ca. 11 Monaten. als Näherungswert. Vgl. BRANDES, 1995, S. 86.

## 7. Untersuchungsergebnisse physikalische Kennwertermittlung (PKR 1 und PKR 2)

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Versuche aufgeführt und anhand von Diagrammen, Tabellen und Abbildungen erläutert. Dabei wird hier, wenn nicht anders angegeben, immer der Mittelwert (arithmetisches Mittel) zugrunde gelegt/dargestellt. Die jeweiligen Einzelmesswerte und die entsprechenden Standardabweichungen bzw. Variationskoeffizienten wurden ebenfalls ermittelt, werden aber ebenso wie der zusätzlich gebildete Median hier nicht angeführt.

Die Prüfkörperreihen 1 (RK und TK- Bindemittel) und 2 (PF-Bindemittel) werden im laufenden Bericht mit **PKR 1** und **PKR 2** abgekürzt.

### 7.1 Bindemittelverteilung

#### 7.1.1 Visuelle Beurteilung

Bereits nach dem Ausschalen der Mörtelprismen konnte festgestellt werden, dass optisch keine oberflächennahe Bindemittelanreicherung festzustellen war. Auch die roten Mörtelmischungen, bei denen durch die unterschiedlichen Korngrößen des Zuschlages roter Sand Anreicherungen und unterschiedliche Färbungen erwartet wurden, zeigten sich optisch homogen.

Es konnte jedoch festgestellt werden, dass bei unterschiedlichem Winkel des Mörtelabzugs oder bei Verdichtung der Oberfläche durch Kellen oder Glättung der roten Mörtelmischungen, ein anderer optischer Rotton zu beobachten ist. Dies ist bei der Verarbeitung des Mörtels zu beachten.

#### 7.1.2 Bestimmung des Ausbreitmaß (PKR 1)

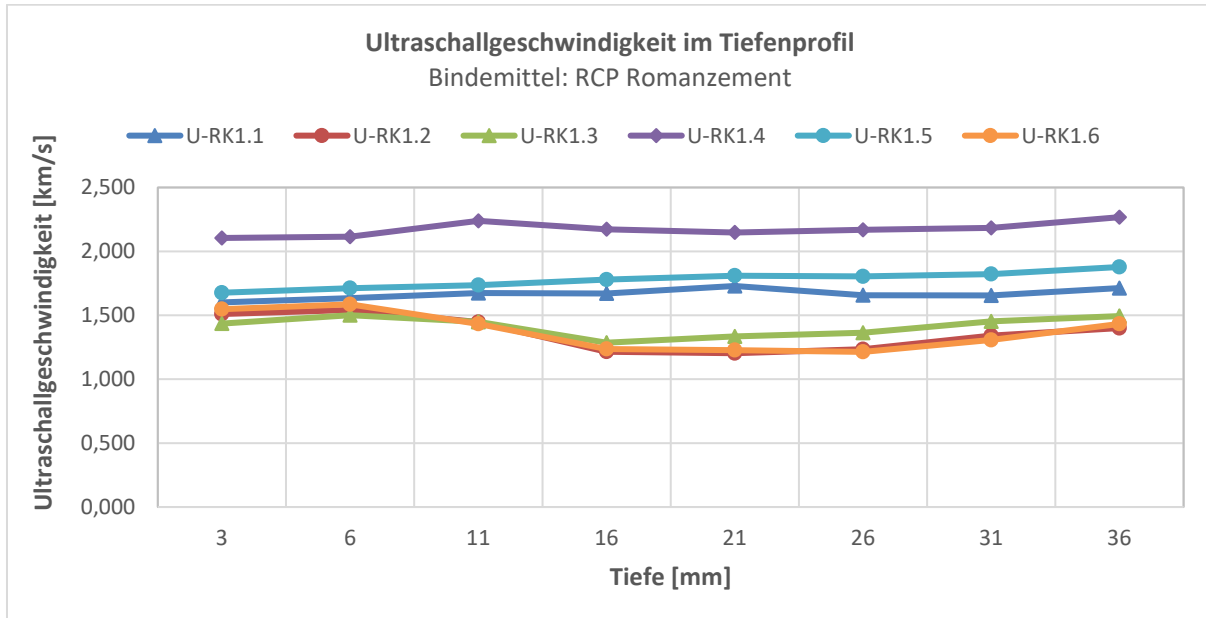
Tab. 13 Ausbreitmaß Mörtel RK und TK

Mörtelreihe	Maß 1 [cm]	Maß 2 [cm]	Mörtelreihe	Maß 1 [cm]	Maß 2[cm]
RK 1.1	17,2	16,7	TK 1.1	-	-
	16,9	16,9		-	-
Mittelwert RK1.1	17,05	16,8	Mittelwert TK1.1		
RK 1.2	14,2	14,1	TK 1.2	10,1	10,2
	14,2	14,3		10,2	10,1
Mittelwert RK1.2	14,2	14,2	Mittelwert TK1.2	10,2	10,1
RK 1.3	14,9	14,6	TK 1.3	12,7	12,8
	14,9	14,8		12,8	12,7
Mittelwert RK1.3	14,9	14,7	Mittelwert TK1.3	12,8	12,7
RK 1.4	11,1	11,1	TK 1.4	12,5	12,5
	11,2	11,3		12,2	12,5
Mittelwert RK1.4	11,15	11,2	Mittelwert TK1.4	12,2	12,5
RK 1.5	15,3	15,7			
	15,3	15,6			
Mittelwert RK1.5	15,3	15,6			
RK 1.6	13,2	13,4			
	13,1	13,1			
Mittelwert RK1.6	13,1	13,1			

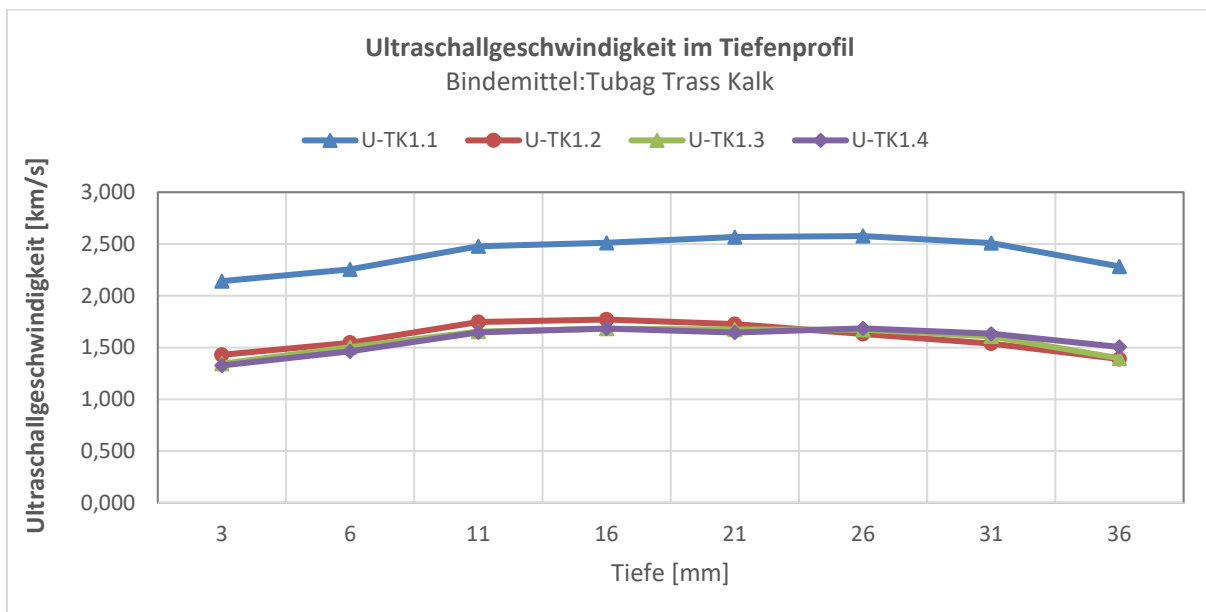
Für alle Mörtel konnte ein Ausbreitmaß aus zwei Messungen mit einem Mittelwert der um weniger als 10% von den Einzelwerten abweicht, gewonnen werden. Ausnahme war der Mörtel der Messreihe TK1.1 der keine Maßänderung zeigte, der Mörtelberg zerfiel bei Schlagen des Hubs (bröseln).

### 7.1.3 Ultraschallgeschwindigkeit im Tiefe (PKR 1)

Um nähere Aussagen zur Bindemittelverteilung bzw. zum Ausmaß der Bindemittelanreicherung im Oberflächenbereich treffen zu können, wurden Ultraschallmessungen im Tiefenprofil durchgeführt. Es ergaben sich folgende Profilverläufe:



Diagr.3 Ultraschallprofil der Mörtelreihe RK



Diagr.4 Ultraschallprofil der Mörtelreihe TK

Vor allem die Mörtelmischungen mit Bindemittel roter Sand 1:3 weisen Unterschiede in der Verteilung des Bindemittels zum Rand (RK, FP) bzw. zur Mitte (TK) auf. Die in Diagramm 3 dargestellten Ultraschallprofilverläufe zeigen bei allen Mörteln mit rotem Sand (RK1.2; RK1.3; RK1.6) im oberflächennahen Bereich, bis ca. 11 mm, höhere US-Geschwindigkeiten als in den tieferen Bereichen auf. Dies lässt auf eine Anreicherung des Bindemittels und/oder Mowilith® LDM 6880 in dieser Zone schließen.

Das Geschwindigkeitsmaximum wird dabei in einer Tiefe von etwa 6 mm erreicht, danach ist ein Abfall der Werte bis in eine Tiefe von 16 mm und ein anschließender stetiger Anstieg bis 36 mm zu verzeichnen.

Es ergibt sich also eine Art „Knick“ in der Mitte die Kurvenverläufe. Diese Profilverläufe deuten darauf hin, dass dieser auch an der „Unterseite“ bzw. an allen Mantelflächen stattgefunden hat. Die Mörtel mit ausschließlich Millisil® W3 als Zuschlag (RK1.1; RK1.5), sowie der Mörtel RK1.4 im Mischungsverhältnis 1:2 zeigen ein gleichmäßig verlaufendes Ultraschallprofil.

Bei den Mörteln mit Trasskalk als Bindemittel (*Diagr.4*) zeigen sich relativ gleichmäßige Ultraschallprofile, wobei im oberflächennahen Bereich bzw. in den Randzonen allgemein etwas geringere US-Geschwindigkeiten festzustellen sind, als in den mittleren Bereich bei einer Profiltiefe von etwa 16 bis 21 mm.

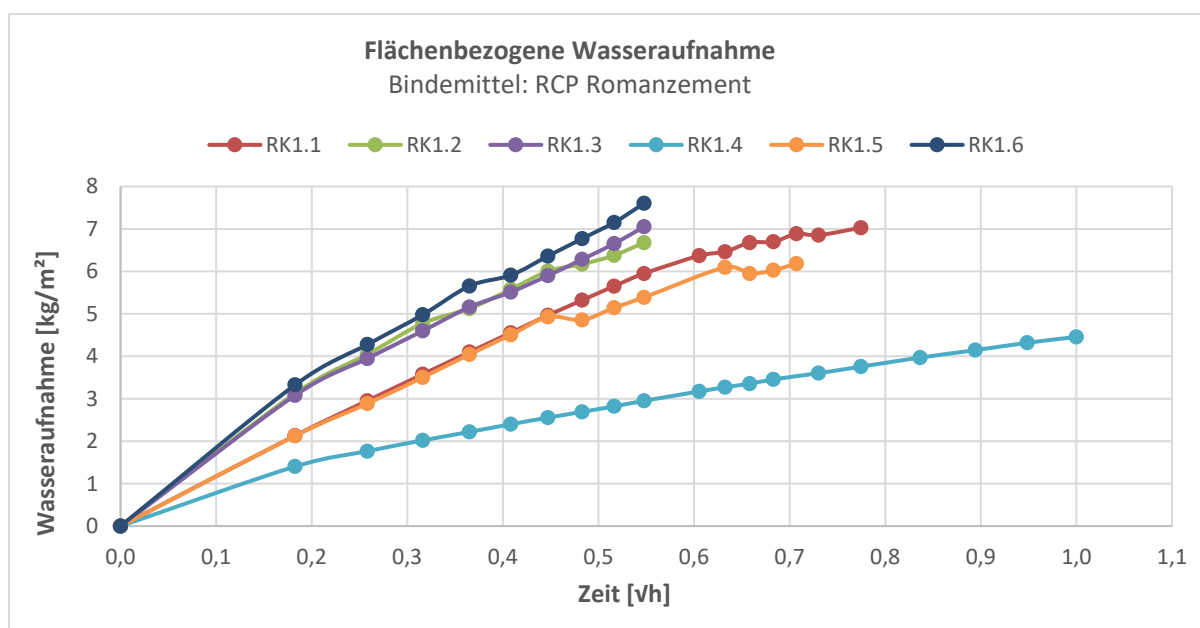
Grundsätzlich weisen alle untersuchten RK Mörtel (1:3) geringere Ultraschallgeschwindigkeiten als RK 1:2 auf. Dies deutet auf eine geringere Dichte bzw. höhere Porosität der 1:3 Mörtel hin. Bei den TK Mörteln zeigt der Mörtel ohne Zuschlag roter Sand (TK1.1) eine höhere Ultraschallgeschwindigkeit, als die restlichen, annähern gleich verlaufenden Ultraschallprofile der übrigen Mischungen.

### 7.1.4 Bewertung der Bindemittelverteilung

Aufgrund der augenscheinlichen Beobachtungen und der Ergebnisse der Ultraschallprofilmessung (ausschließlich bei **PKR 1**) kann davon ausgegangen werden, dass bei den Mörtelprismen aller Mörtelmischungen keine signifikante Bindemittelanreicherung im Oberflächenbereich vorliegt. Die Bindemittelschicht endet nicht abrupt, sondern läuft über die Tiefe gleichmäßig aus. Die später vorgenommenen Analysen an Dünnschliffen (*Kap.7.4.6*) an Prüfkörpern der Reihe FP bestätigten die gleichmäßige Bindemittelverteilung. Mit einer gravierenden Beeinträchtigung der hygrischen und mechanischen Eigenschaften der Mörtel durch die Schicht ist daher nicht zu rechnen.

## 7.2 Hygrische und porenraumbezogene Eigenschaften

### 7.2.1 Kapillare Wasseraufnahme (PKR 1/PKR 2)

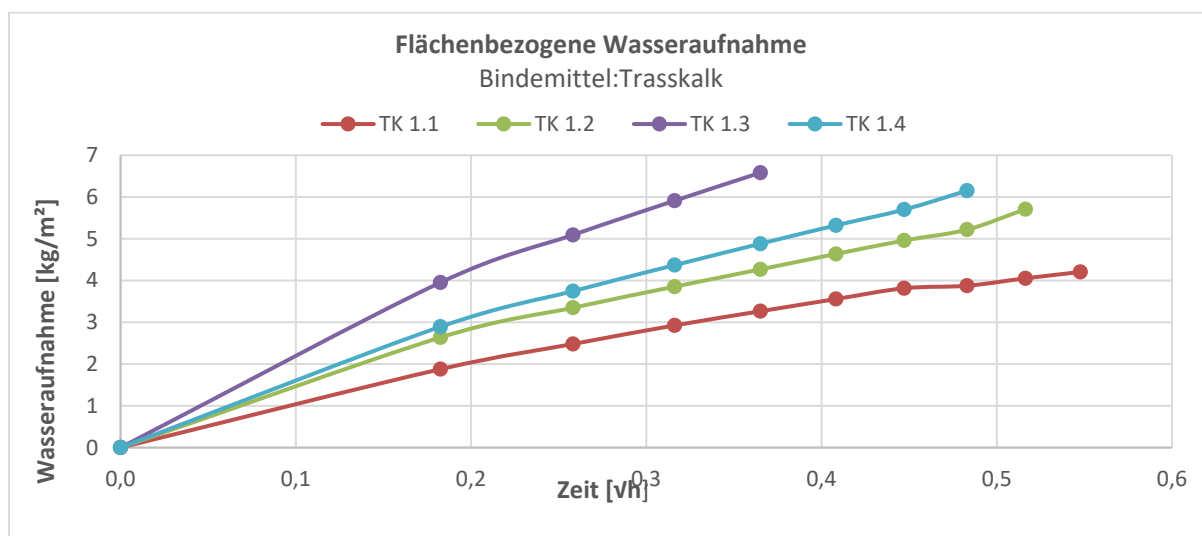


Diagr. 5 Flächenbezogene Wasseraufnahme der Mörtelreihen RK

Alle Romanzement-Mörtel (RK) weisen eine sehr schnelle und gleichmäßige kapillare Wasseraufnahme auf, erkennbar an dem nahezu linearen Kurvenverlauf.

Der 1:2 Mörtel RK1.4 zeigt dagegen bereits augenscheinlich einen langsameren Kapillaranstieg, was sich auch in der längsten Messzeit widerspiegelt. Bei allen Mörteln außer RK1.1 und RK1.4 sind bereits nach ca. 8 min erste Feuchtflecken an der Oberseite der Prüfkörper zu erkennen.

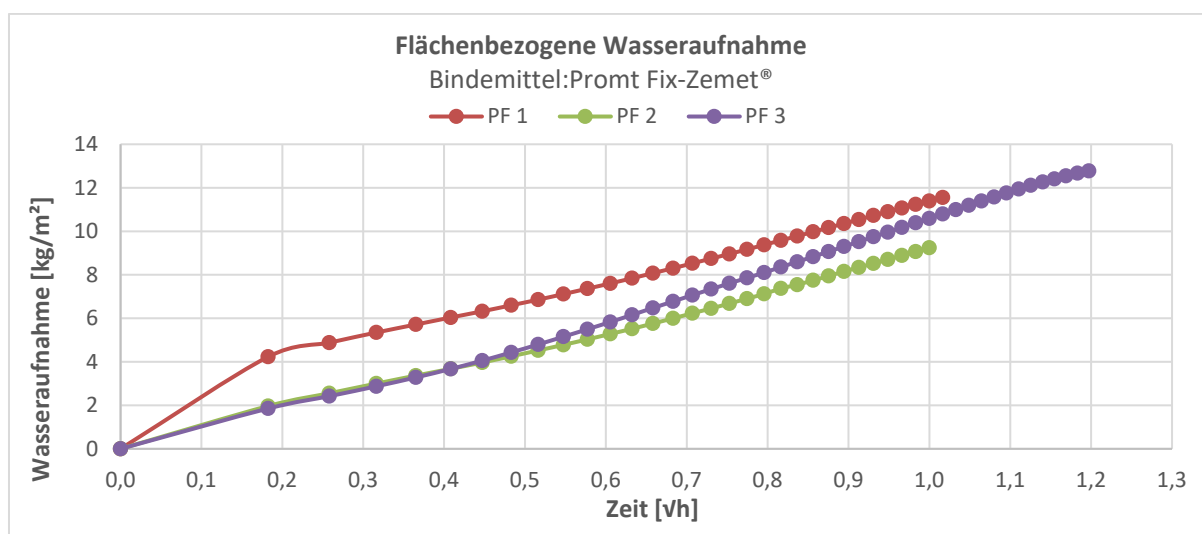
Bei RK1.4 erfolgt der Anstieg der Sauggeschwindigkeit in gemäßigterer Weise, Feuchtflecken tauchen auch nach 60 min noch nicht auf. Dementsprechend konnten während des gesamten Messzeitraums keine Feuchtflecken an der Prüfkörperoberseite festgestellt werden.



Diagr. 6 Flächenbezogene Wasseraufnahme der Mörtelreihen TK

Die Kurvenverläufe zur Wasseraufnahme an Mörteln auf Trasscalc-Basis zeigen ähnlich Tendenzen, wie die der Mörtel auf Basis von Romanzement. Dabei fällt die beschleunigte Wasseraufnahme bei Mörtel TK1.3 auf. Dieser zeigt schon nach 8 min bei allen 5 Prüfkörpern Feuchtflecken an der Oberfläche.

Die Tränkung konnte für alle restlichen Trasscalc-Mörteln nach spätestens 18 min eingestellt werden.

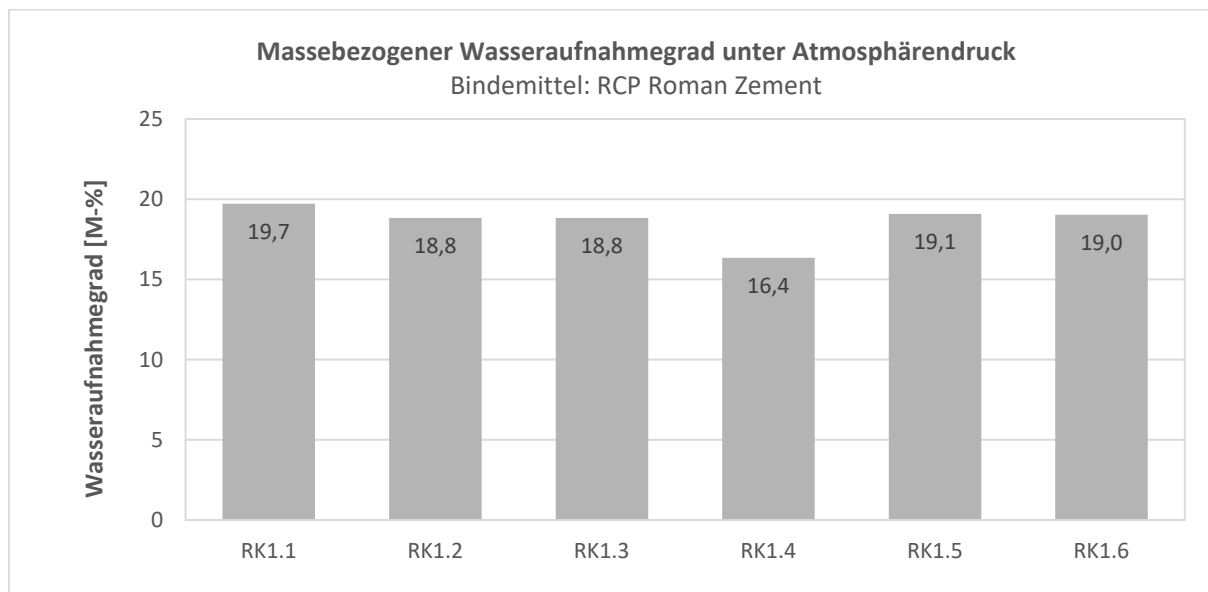


Diagr. 7 Flächenbezogene Wasseraufnahme mit Mörtelreihen PK ohne Beschichtung

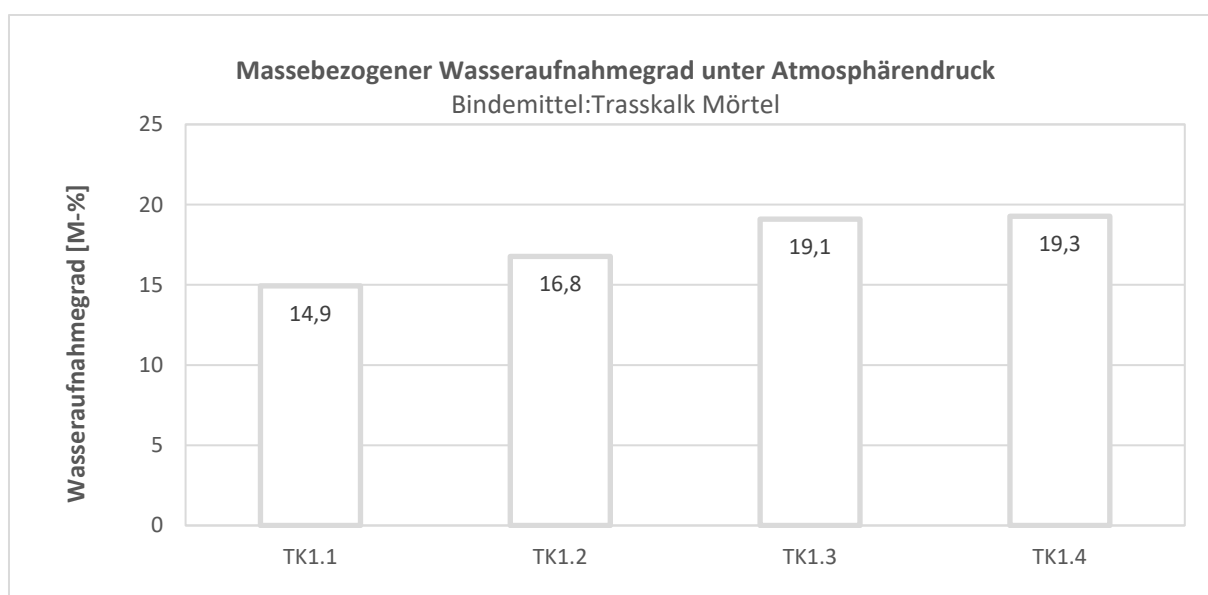
Alle Romazement-Mörtel (PF) weisen erkennbar einen nahezu linear ansteigenden Kurvenverlauf bis 4 min, danach eine sehr schnelle und gleichmäßige kapillare Wasseraufnahme auf.

### 7.2.2 Kapillare Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (PKR 1)

Die Mörtel der Reihen RK und TK zeigen bei nahezu identischen Werten ein sehr großes Wasseraufnahmevermögen (siehe Diagr.8 und 9). Herauszunehmen sind die Mörtel RK1.4, TK1.1 und TK1.2 bei denen eine geringere Wasseraufnahme zu verzeichnen ist. Der höhere Bindemittelanteil des Mörtels RK1.4 scheint eine entscheidende Rolle bezüglich des Wasseraufnahmevermögens zu spielen. Beim Vergleich der Wasseraufnahme nach 24h, mit den Werten nach 4 Tagen (RK) bzw. 5 Tagen (TK) konnte festgestellt werden, dass sowohl der Romazement als der Trasskalk-Mörtel bereits nach 24h ca. 90 – 95 % ihres Maximalwertes bis Endtränkung erreicht hatten.



Diagr. 8 Wasseraufnahmegrad Mörtelreihen RK nach 7 Tagen Wasserlagerung.



Diagr. 9 Wasseraufnahmegrad Mörtelreihen TK nach 7 Tagen Wasserlagerung.

### 7.2.3 Offene Porosität und Rohdichte (PKR 1/PKR 2)

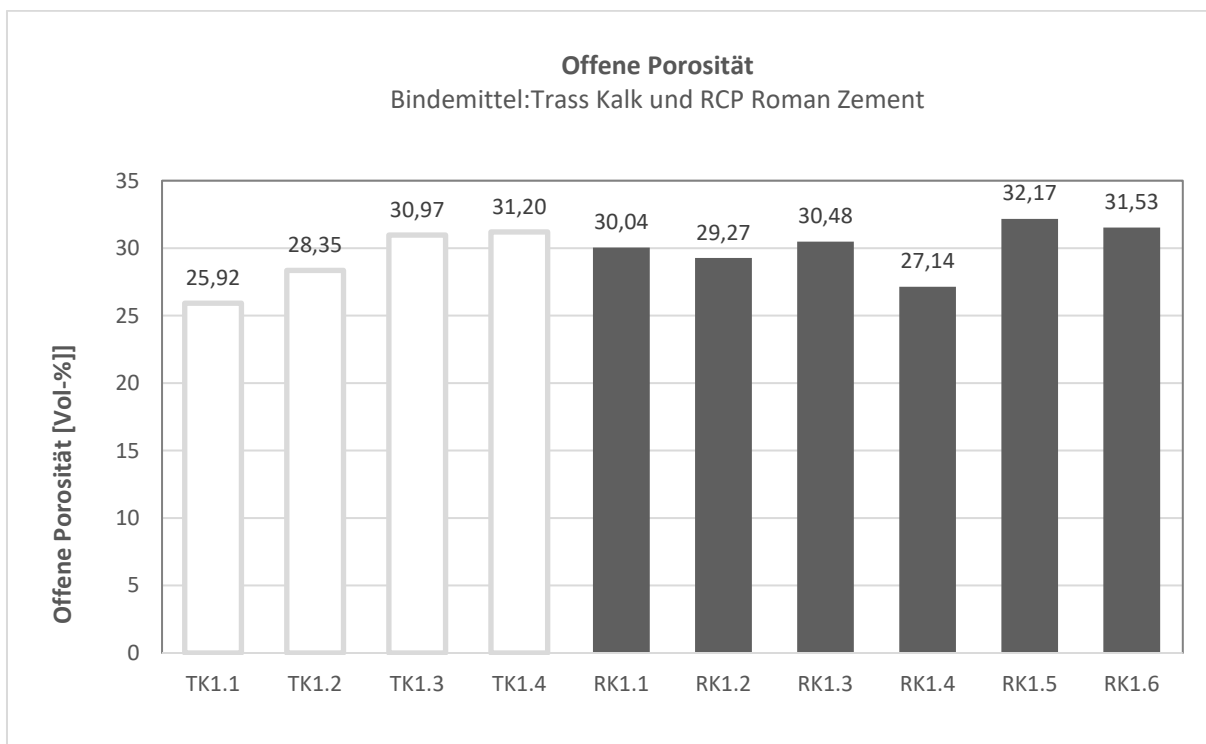
Die offene Porosität der Mörtel RK und TK (*Diagr.10*) kann mit durchschnittlich ca. 30 Vol % angegeben werden. Ausnahmen bildet der Mörtel RK1.4 mit 25 Vol %, dessen Zusammensetzung 1:2 auf einen erhöhten Bindemittelanteil im Porenraum schließen lässt. Die offene Porosität der Mörtel PF (*Diagr.11*) kann mit durchschnittlich ca. 40 Vol % angegeben werden. Die Rohdichte (*Tab.14 und Tab.15*) verhält sich naturgemäß umgekehrt proportional zur offenen Porosität.

Tab. 14 Rohdichte Mörtel RK und TK

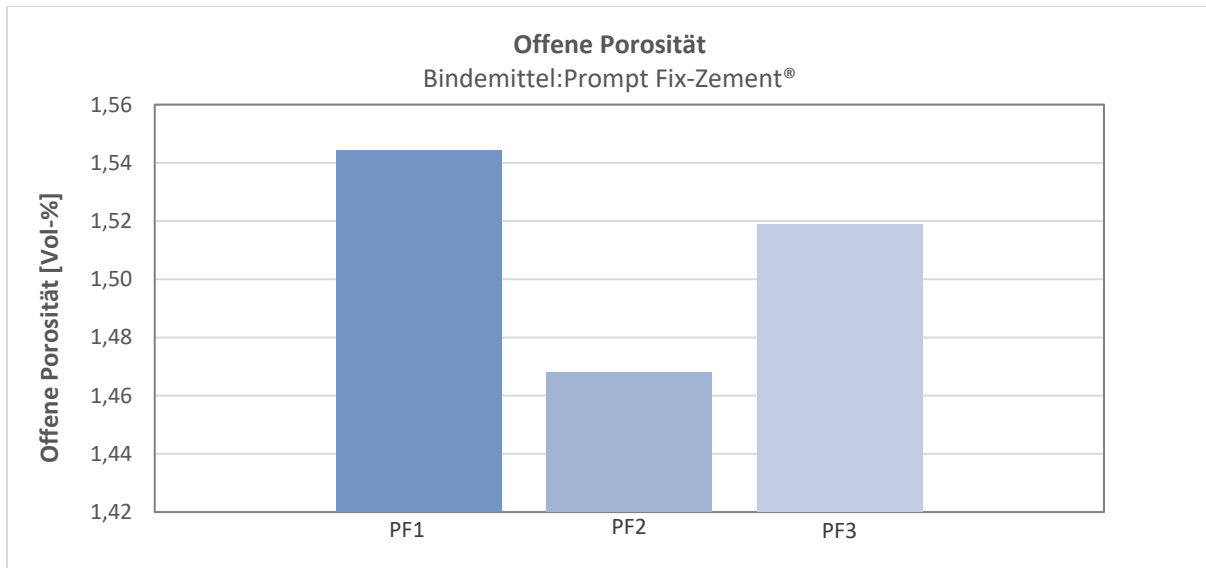
Prüfreihe	RK1.1	RK1.2	RK1.3	RK1.4	RK1.5	RK1.6	TK1.1	TK1.2	TK1.3	TK1.4
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,52	1,61	1,61	1,66	1,68	1,66	1,68	1,70	1,90	1,90

Tab. 15 Rohdichte Mörtel PF

Prüfreihe	PF1	PF3	PF3
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,54	1,47	1,52



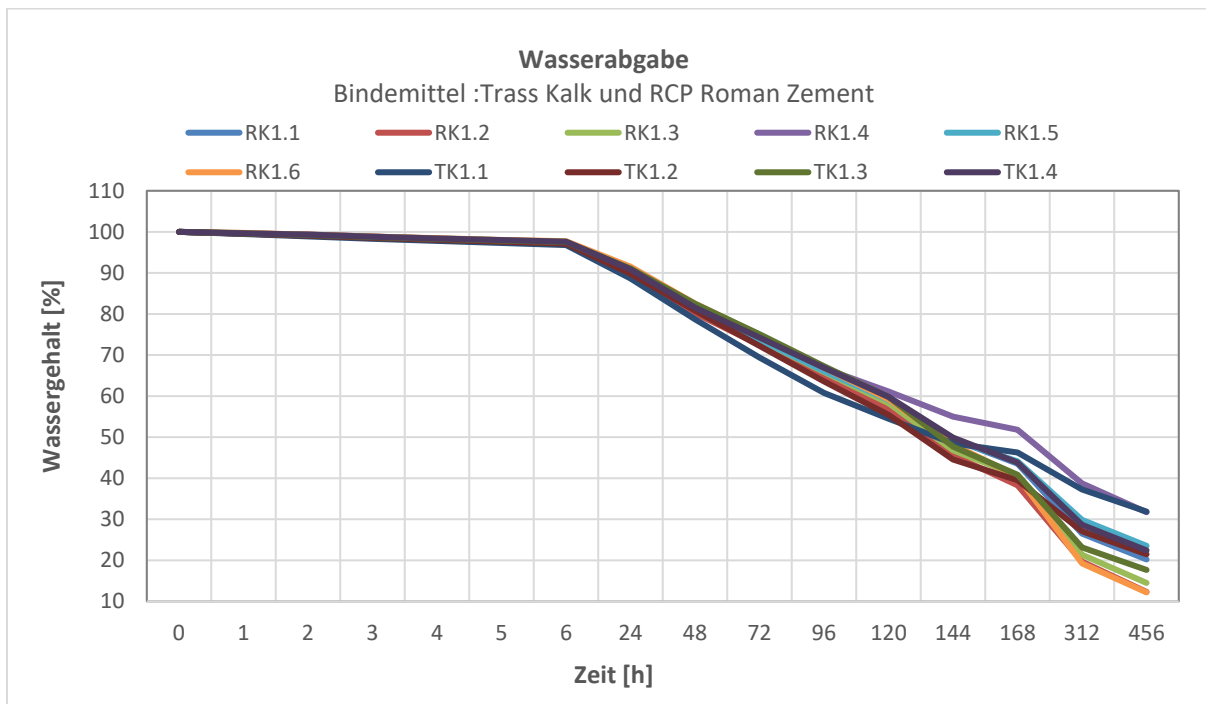
Diagr. 10 Offene Porosität der Mörtelreihen TK und RK



Diagr. 11 Offene Porosität der Mörtelreihen PF ohne Beschichtung

### 7.2.4 Wasserabgabe (PKR 1/PKR 2)

Anhand der Kurvenverläufe in Diagramm 12 ist zu erkennen, dass die Trocknung aller RK und TK Mörtel nicht nach dem in Kap. 6.1.6 beschriebenen Prinzip erfolgt. Demnach wird aufgenommenes Wasser in der ersten Phase relativ schnell durch Verdunstung an der Oberfläche abgegeben. Die Abgabe erfolgte jedoch bei allen Mörteln bis 6h mäßig und ab 24h kontinuierlich. Im zweiten Abschnitt erfolgt die Trocknung über Diffusionsprozesse, was eine Verringerung der Trocknungsgeschwindigkeit und einen flachen Kurvenverlauf zur Folge hat.



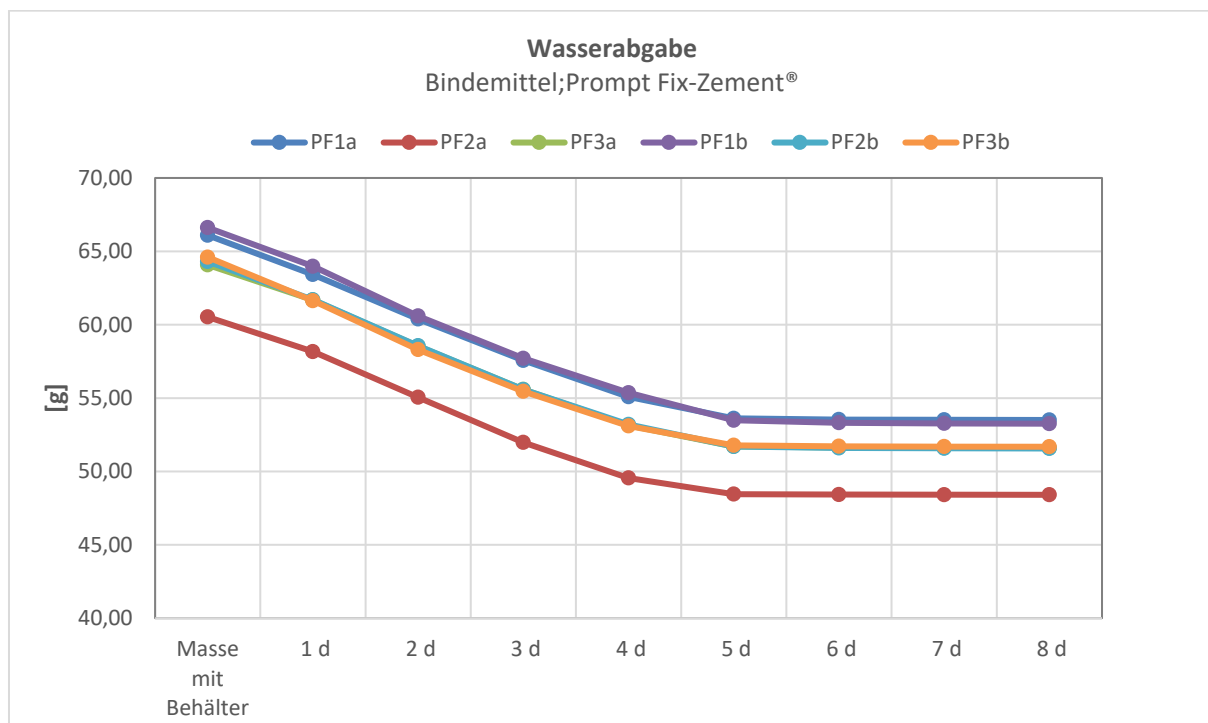
Diagr. 12 Wasserabgabe Mörtelreihen TK und RK



Nach Betrachtung des Kurvenverlaufs setzt diese Phase nach einem plötzlichen Knick nach 7 Tagen ein. Da der Versuch nach 19 Tagen beendet wurde, kann dazu abschließend keine Aussage getroffen werden. Ein Grund für die verlangsamte Wasserabgabe könnte auch die mit  $60\pm 5\%$  relativ hohe Luftfeuchte in der Werkstatt während der Sommermonate sein.

Unter Berücksichtigung der Lage der Prüfkörperreihen kann zusammenfassend festgehalten werden, dass alle Mörtel des Mischungsverhältnisses 1:2 eine relativ einheitliche langsame Wasserabgabe zeigen. Der Mörtel RK1.4 weist dagegen ein noch langsames Trocknungsverhalten auf.

Abweichend von der bisherigen Versuchsdurchführung zur Wasserabgabe (*Kap. 6.1.6*) erfolgten die Analysen zur Wasserabgabe für die Mörtel PF an den für die Wasserdampfdiffusion genutzten Prüfkörper im so genannten „Inversen Wet-Cup-Verfahren“.<sup>21</sup> Für diese Messung kamen die Prüfkörper des Messaufbaus zur Ermittlung der Wasserdampfdiffusion im Anschluss an dessen Bestimmung zum Einsatz. Diese Behälter, mit ca.1 cm Restwasserhöhe, wurden umgekehrt auf die Fläche der vorher oben befindlichen Mörtelproben auf Gitteroste gestellt. Nach im *Diagr.13* ersichtlichen Zeitabständen wurde das Gewicht der Prüfkörper ermittelt.



**Diagr. 13 Wasserabgabe Mörtelreihen PF**

Die Wasserabgabe verlief bei allen Mörteln mit und ohne Beschichtung bis zum 5. Tag konstant abfallend und ab dann bis zum Ende der Messreihe an Tag 8 nahezu konstant.

<sup>21</sup> C. Herm; Anstriche auf Naturstein-Untersuchungen zur Zusammensetzung historischer Fassungen, Kolloidchemie von Kalkfarben und Bauphysik, München (1997)

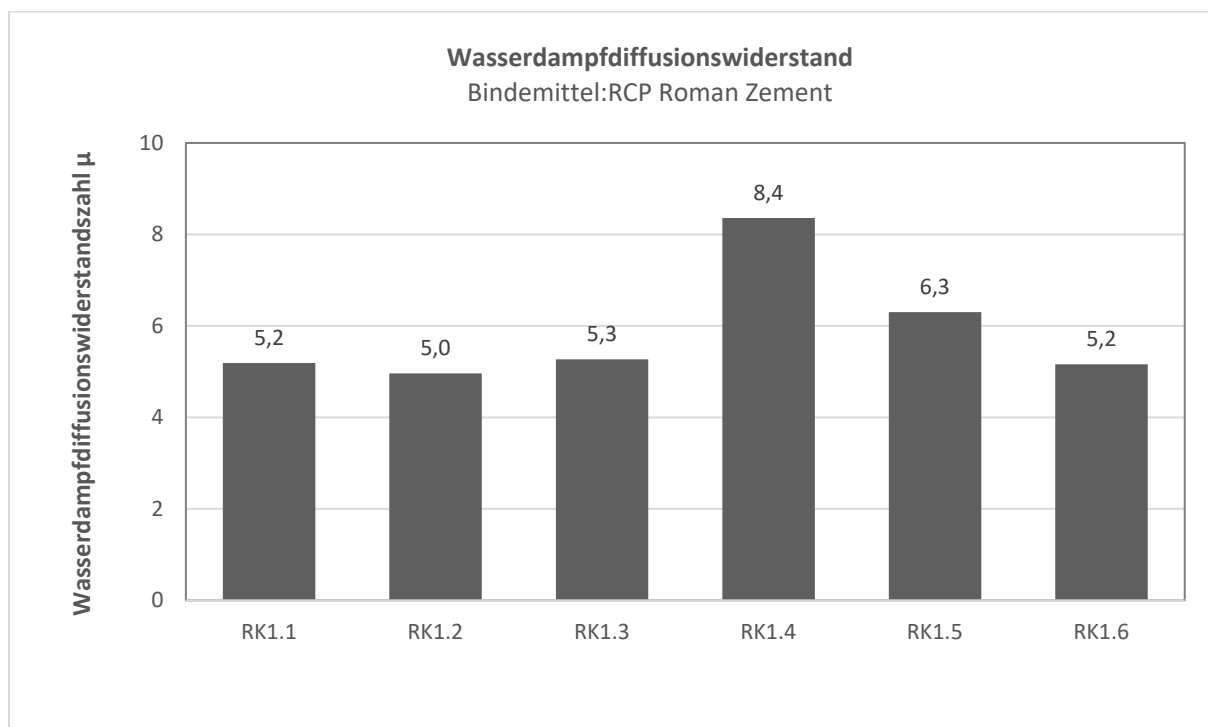
### 7.2.5 Wasserdampfdiffusion (PKR 1/PKR 2)

Die RK Mörtel weisen mit Werten zwischen durchschnittlich 5,0 und 6,3 einen sehr geringen Wasserdampfdiffusionswiderstand und demzufolge eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit auf. Dies war aufgrund des geringen Bindemittelanteils und der daraus resultierenden hohen offenen Porosität der Mörtel zu erwarten. Lediglich der Mörtel mit höherem Bindemittelgehalt RK1.4 weist mit einem Wert von 8,4 einen etwas niedrigeren Wasserdampfdurchlässigkeit auf, die jedoch immer noch als niedrig zu bezeichnen ist. (Diagr.14)

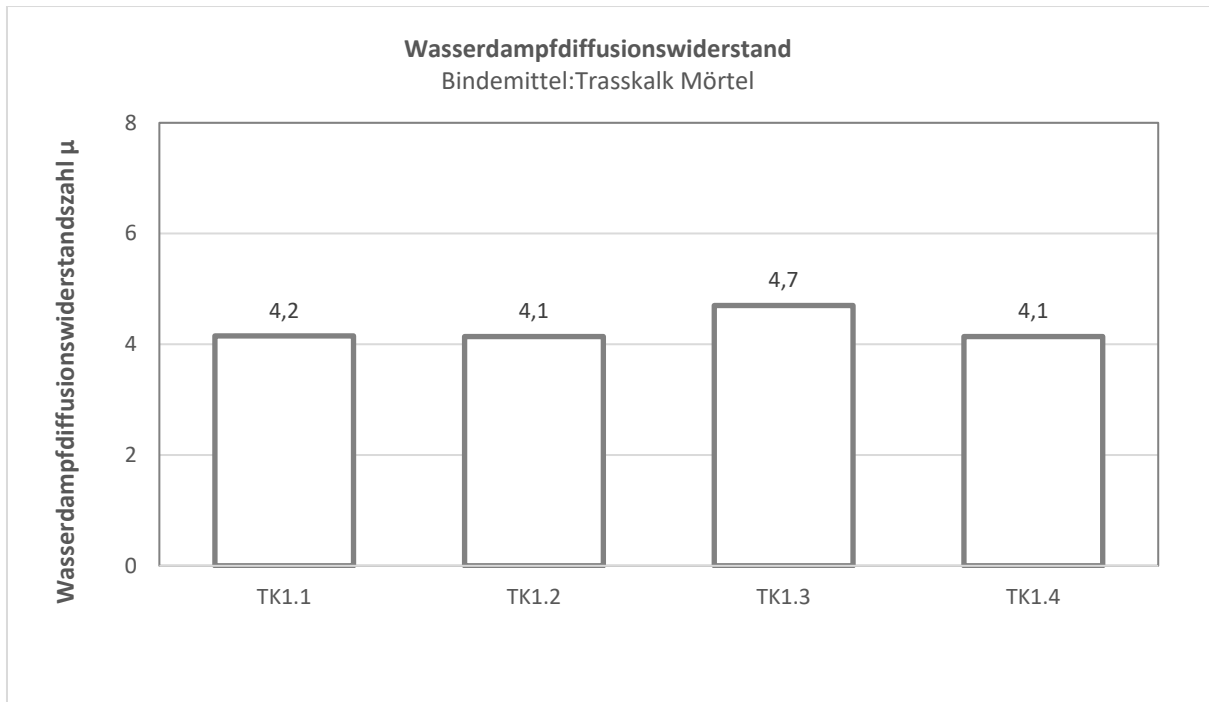
Der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Trasskalk-Mörtel (TK) liegt mit Werten von 4,1 bis 4,7 in einem annähernd einheitlichen Bereich. (Diagr.15)

Abweichend von allen Mörtelreihen 5 getesteten Prüfkörpern liegen dem der Reihe RK1.2, für den erhobenen Mittelwert auf Grund von zwei stark abweichenden Messwerten, lediglich drei Werte zu Grunde.

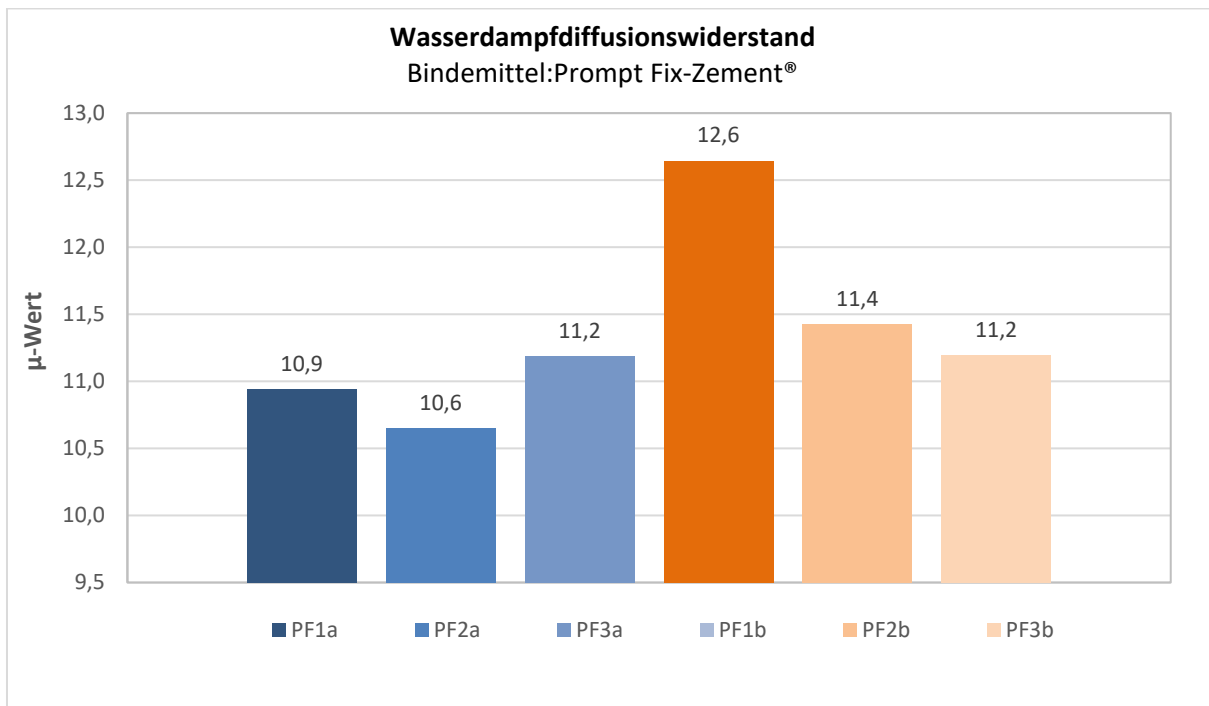
Die Mörtel der Reihe PF weisen mit Werten zwischen durchschnittlich 10,6 und 12,6 einen sehr geringen Wasserdampfdiffusionswiderstand und demzufolge eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit auf. Die beschichteten Mörtel zeigen erwartungsgemäß einen geringfügig höheren Wasserdampfdiffusionswiderstand gegenüber den Unbeschichteten.



Diagr. 14 Wasserdampfdiffusionswiderstand Mörtelreihen RK

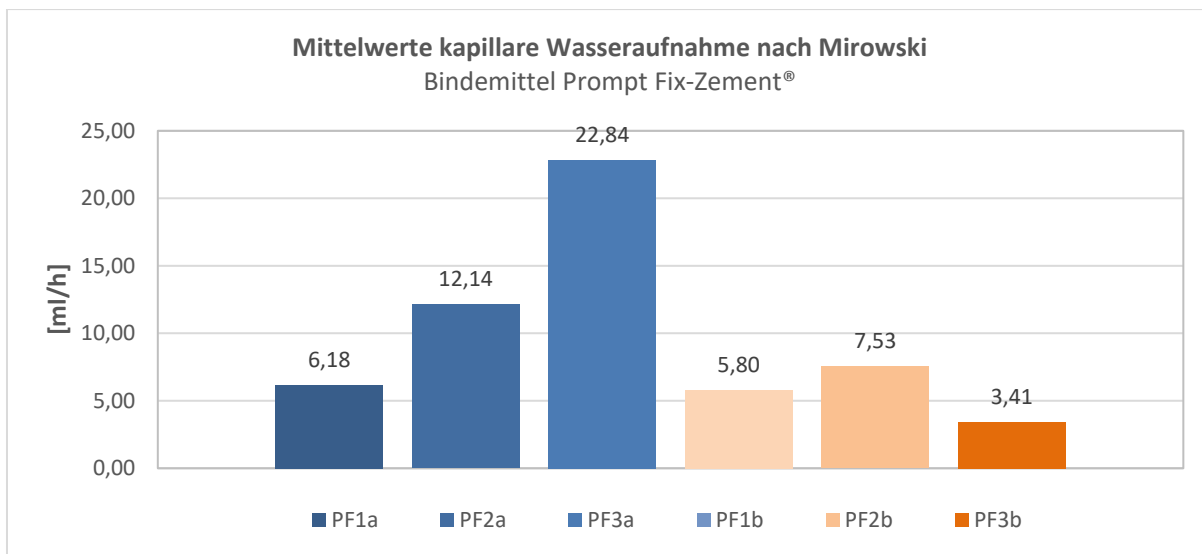


Diagr. 15 Wasserdampfdiffusionswiderstand Mörtelreihen TK



Diagr. 16 Wasserdampfdiffusionswiderstand Mörtelreihen PF mit (a) und ohne (b) Beschichtung

## 7.2.6 Kapillare Wasseraufnahme nach Mirowski (PKR 2)



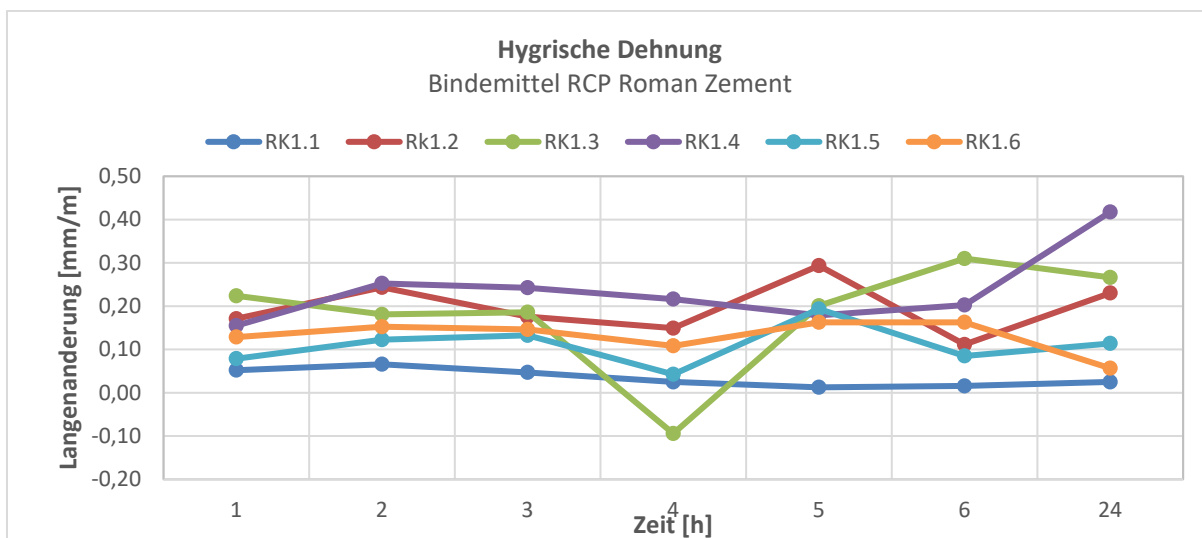
**Diagr. 17 Mittelwert kapillare Wasseraufnahme nach Mirowski PF1 bis PF3 mit (a) und ohne (b) Beschichtung**

Der Vergleich der Mörtel ohne Beschichtung untereinander zeigt, dass das Wasser der Mörtel mit steigendem Anteil des Zuschlags roter Sand Konz-Könen erwartungsgemäß schneller aufgenommen wird. Dies wird auf den erhöhten tonhaltigen Anteil des Sandes zurückgeführt. Hingegen weisen die beschichteten Mörtelproben mit Werten zwischen 3,41 (PF3b), 7,53 (PF2b), 5,80 (PF1b) eine über die Hälfte niedrigere Wasseraufnahmegeschwindigkeit auf.

## 7.3 Verformungs- und Festigkeitseigenschaften

### 7.3.1 Hygrische Dehnung (PKR 1)

Die Auswertung der hygrischen Dehnung konnte nicht konstant an fünf Prüfkörpern pro Mörtelreihe durchgeführt werden, da die Messzapfen sich von den Prüfkörpern ablösten. Vor allem die Mörtelreihen RK1.1, RK1.2 und TK1.2, TK1.3, TK1.4 waren hiervon betroffen. Die Werte wurden trotz abnehmender Prüfkörperzahl aus den Mittelwerten der verbliebenen Messungen jeder Messreihe bestimmt.

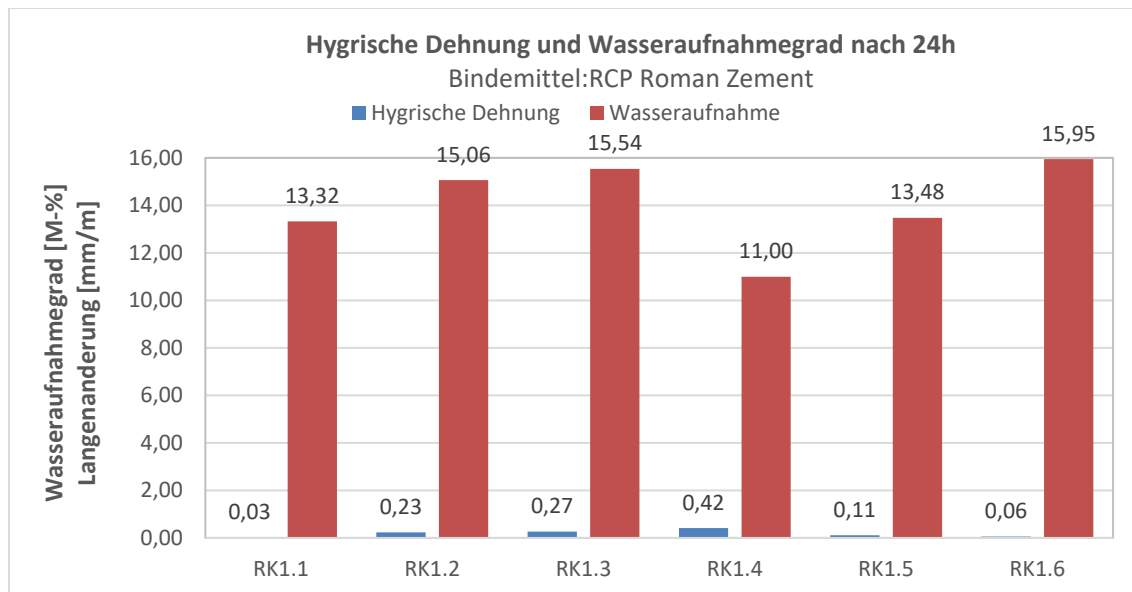


**Diagr. 18 Hygrische Dehnung der Mörtelreihen RK**

Die Kurvenverläufe in *Diagr.18* zeigen, dass bei allen Mörteln nur minimale Quellprozesse auftreten, die nach 24-stündiger Wasserlagerung in der Dehnung jedoch auseinanderdividieren.

Die Mörtel RK1.4 und RK1.2 zeigen hier eine Dehnung von 0,22 mm/m bzw. 0,12 mm/m. Wesentlich geringer fällt die Dehnung für die Mörtel RK1.1 und RK1.5 (Zuschlag Millisil®) mit 0,01 bzw. 0,02 mm/m aus. Es kann angenommen werden, dass die höheren Dehnungswerte auf den Zuschlag des roten Sandes mit quellfähigen Tonanteilen zurückzuführen sind.

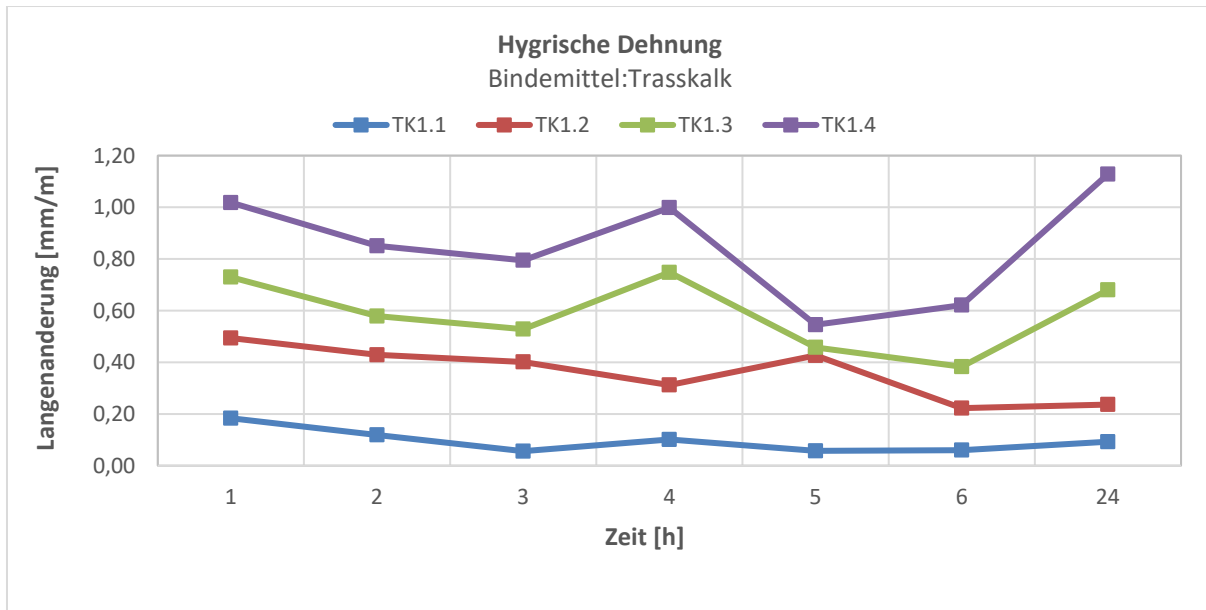
Negative Werte hingegen zeigen die Mörtel RK1.3 und RK1.6 mit -0,04 und -0,10 mm/m. Beide Mörtelmischungen wurden ebenfalls mit rotem Sand hergestellt.



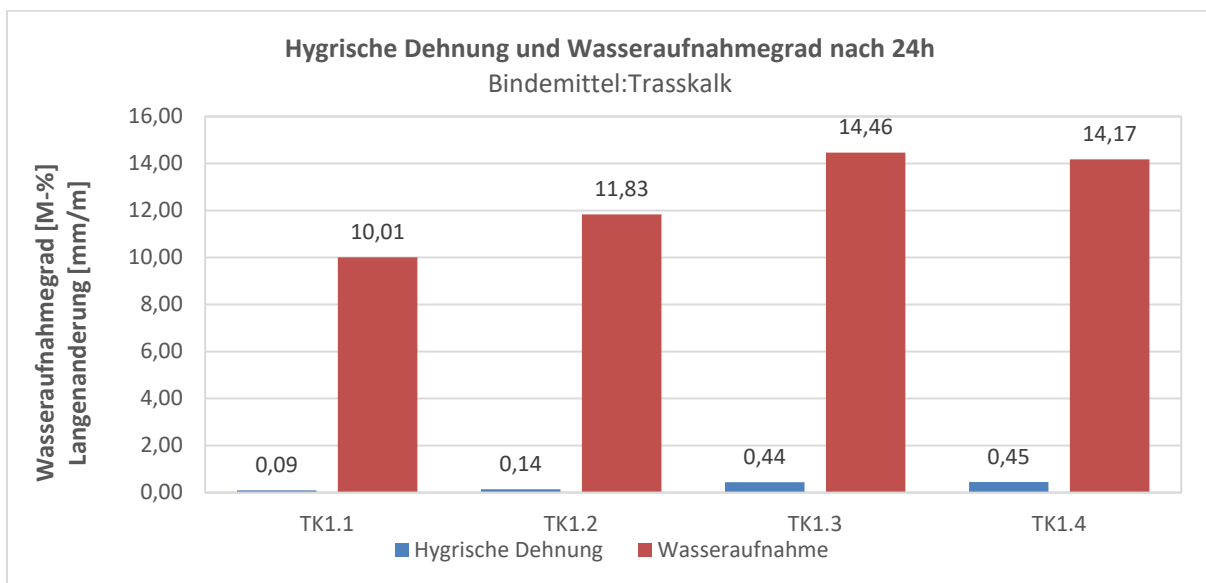
**Diagr. 19 Hygrische Dehnung und Wasseraufnahmegrad nach 24 h der Mörtelreihen RK**

Die Kurvenverläufe der mit Trasskalk gebundenen Mörtel in Diagramm 20 zeigen das erwartete Quellverhalten nach 24h. Auch hier legen die mit rotem Sand hergestellten Mörtel ein höheres Quellverhalten an den Tag, als der ausschließlich mit Millisil® hergestellte Mörtel TK1.1. Das höchste Quellverhalten mit 0,21 mm/m zeigt der in der Mischung 2:3 hergestellte Mörtel TK1.4.

Es kann angenommen werden, dass bei den Mörteln, eine Wasseraufnahmefähigkeit nicht mit einem hohen hygrischen Quellvermögen und eine geringe Wasseraufnahme mit verhältnismäßig niedrigem Quellwert korreliert, was zu erwarten wäre.



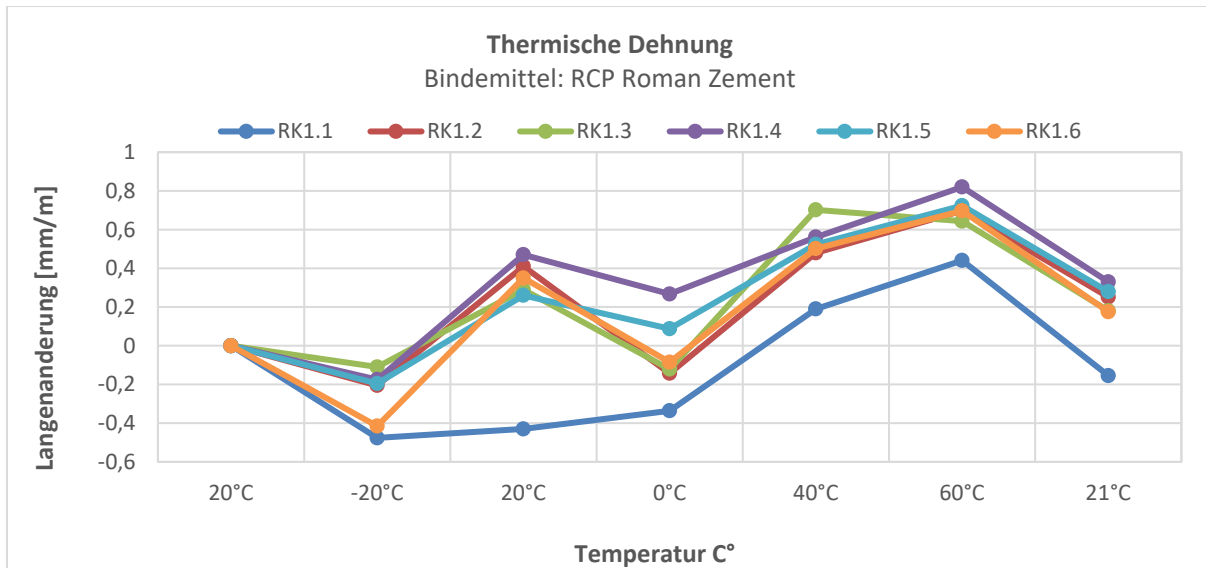
Diagr. 20 Hygrische Dehnung der Mörtelreihen TK



Diagr. 21 Hygrische Dehnung mit Wasseraufnahmegrad nach 24h der Mörtelreihen TK

### 7.3.2 Thermische Dehnung (PKR 1)

Der Einfluss von Längenänderungen infolge veränderter Luftfeuchte, kann hier nach den parallel zur thermische Dehnungen ermittelten Massen der Prüfkörper, als eher gering eingeschätzt werden. Bezüglich des Gewichts der Prüfkörper ergaben sich während der gesamten Versuchsdauer maximale Abweichungen von lediglich  $\pm 0,5$  M %. Anhand des Diagramms 22 kann für die RK Mörtel ein annähernd linearer Kurvenverlauf im Temperaturbereich zwischen  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $+60^{\circ}\text{C}$  festgestellt werden. Die Werte der Mörtel liegen insgesamt sehr dicht beieinander. Ausgenommen ist der Mörtel RK1.1.

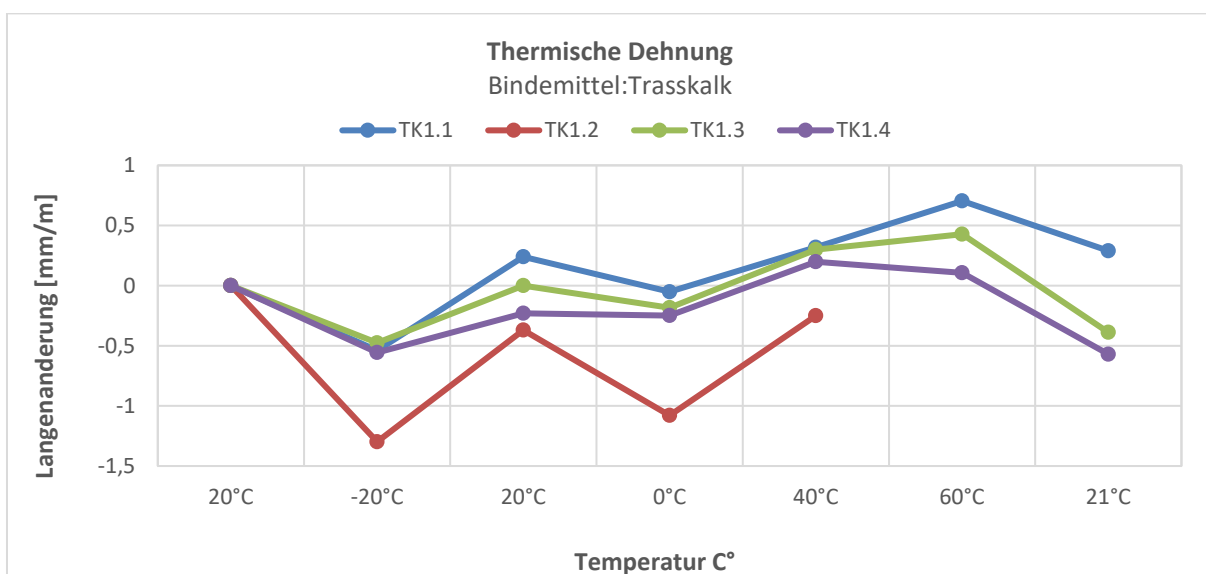


**Diagr. 22 Thermische Dehnung der Mörtelreihen RK**

Als Grund hierfür könnte wiederum der Zuschlag Millisil® und der 2,5 % Anteil Mowilith im Anmachwasser gesehen werden. Verglichen dazu, liegt der Mörtel gleicher Mischung (RK1.5) ohne Mowilith in der thermischen Dehnung in allem Temperaturbereichen höher. Im Vergleich jedoch zeigt sich ein annähernd gleicher Kurvenverlauf.

Des Weiteren fällt auf, dass die Mörtel bei der abschließenden Messung nach 24h Lagerung bei 21 °C, bis auf den Mörtel RK1.1, alle noch immer vergleichsweise deutlich über ihrem Ausgangsmaß liegen. Anhand des Diagramms 23 kann für die mit Trasskalk gebundenen Mörtel ebenfalls ein annähernd linearer Kurvenverlauf im Temperaturbereich zwischen -20°C und +60°C festgestellt werden. Die Versuchsreihe des Mörtels TK1.2 wird aus der Gesamtanalyse ausgenommen, da bei dieser Mörtelreihe wenige Prüfkörper zur Verfügung standen und ab der Messung bei 40°C sämtliche Messzapfen der Reihe abgefallen waren.

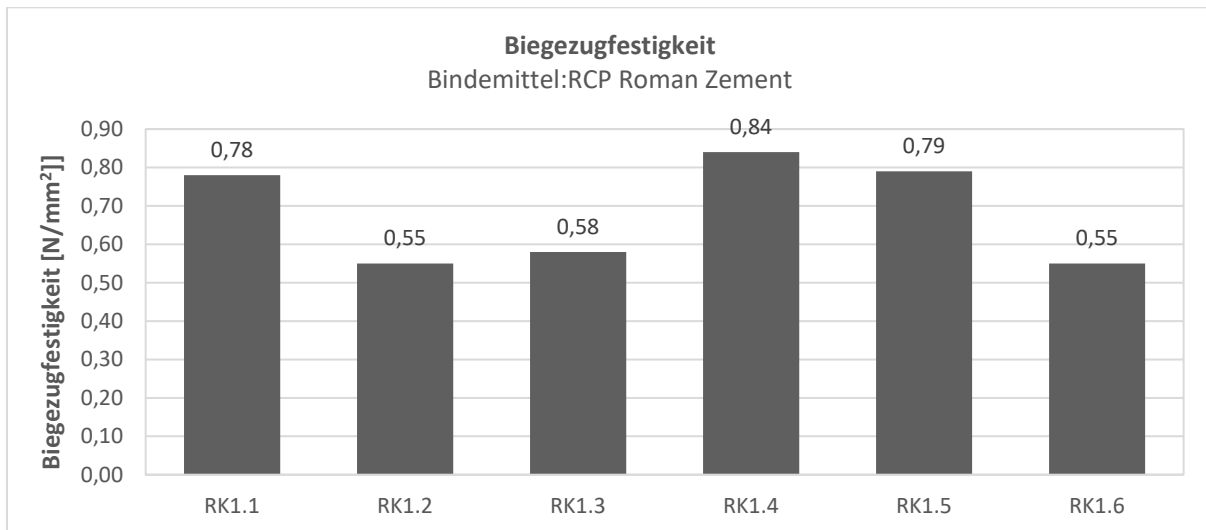
Die Mörtel zeigen bei der abschließenden Messung nach 24 h Lagerung bei 21 °C bis auf den Mörtel TK1.1 Werte die deutlich unter ihrem Ausgangsmaß liegen.



**Diagr. 23 Thermische Dehnung der Mörtelreihen TK**

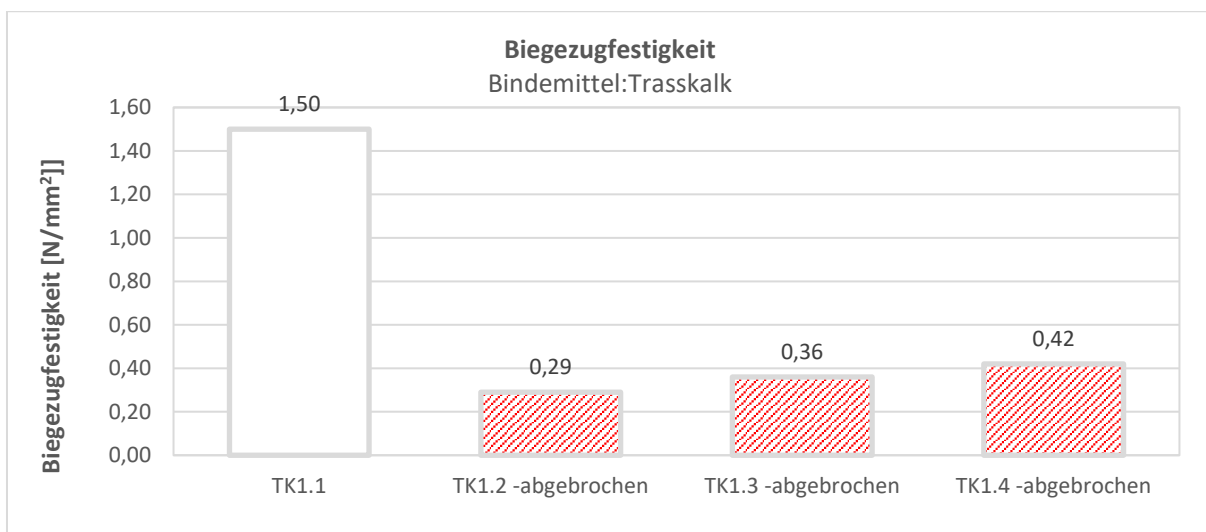
### 7.3.3 Biegezug- und Druckfestigkeit (PKR 1 und PKR 2)

Die Biegezugfestigkeit der RCP gebundenen Mörtel bewegt sich in einer Größenordnung von 0,55 – 0,85 N/mm<sup>2</sup>. Die für die mit rotem Sand als Zuschlag gefertigten Mörtel ermittelten Werte der Biegezugfestigkeit, liegen insgesamt recht eng beieinander (RK1.2, RK1.3, RK1.6). Die mit Millisil® hergestellten Mörtel zeigen Werte zwischen 0,78-0,79 N/mm<sup>2</sup>. Die Zugabe der Emulsionen, (2,5 % Mowilith LDM 6880 im Anmachwasser) bzw. der Acrylatanteil im Mörtel scheint hinsichtlich der Biegezugfestigkeit keine entscheidende Rolle zu spielen. Der mit 0,85 N/mm<sup>2</sup> höchste Biegezugwert für den Mörtel RK1.4, war durch das Mischungsverhältnis 2:1 so zu erwarten.



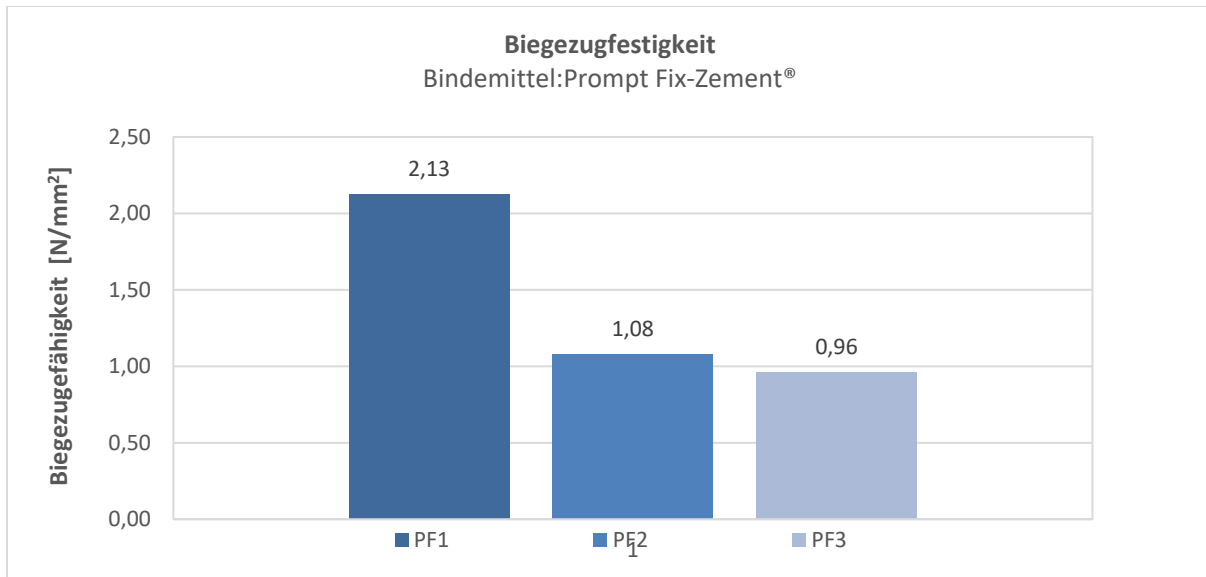
Diagr. 24 Biegezugfestigkeit der Mörtelreihen RK

Für die Messreihen der Trasskalk gebundenen Mörteln, konnten lediglich ein Wert für die Reihe TK1.1 ermittelt werden. Aufgrund der geringeren Festigkeit der mit rotem Sand gefertigten Mörtel (TK1.2-TK1.4) wurde der Zeitpunkt des Bruches von der Prüfmaschine nicht erkannt und somit keine verlässlichen Werte aufgezeichnet.



Diagr. 25  
Biegezugfestigkeit der Mörtelreihen TK





**Diagr. 26 Biegezugfestigkeit der Mörtelreihen PF**

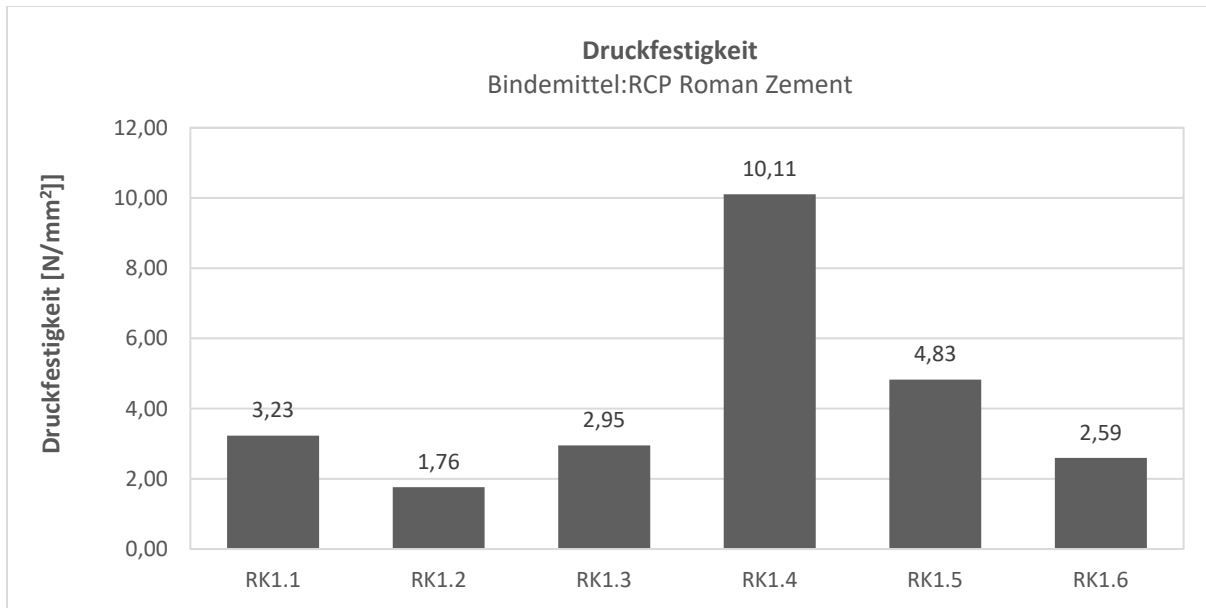
Die Biegezugfestigkeit der Prompt Fix-Zement® gebundenen Mörtel, bewegt sich in einer Größenordnung von 0,96– 2,13 N/mm<sup>2</sup>. Die, für die mit rotem Sand als Zuschlag gefertigten Mörtel ermittelten Werte, der Biegezugfestigkeit liegen insgesamt recht eng beieinander. Der mit Millisil® hergestellten Mörtel (PF1) zeigt erwartungsgemäß, mit 2,13 N/mm<sup>2</sup>, einen annähernd doppelt so hohen Wert.

Hinsichtlich der unterschiedlichen Mörtel der RK-Reihe (*siehe Diagr.27*), lassen sich bei den Werten der Druckfestigkeit ähnliche Tendenzen, wie bei der Biegezugfestigkeit erkennen. Demzufolge, weisen die mit rotem Sand gefertigten Mörtel (RK1.2, RK1.3, RK1.6) mit Ausnahme des 2:1 Gemisches (RK1.4), die geringsten Druckfestigkeiten auf.

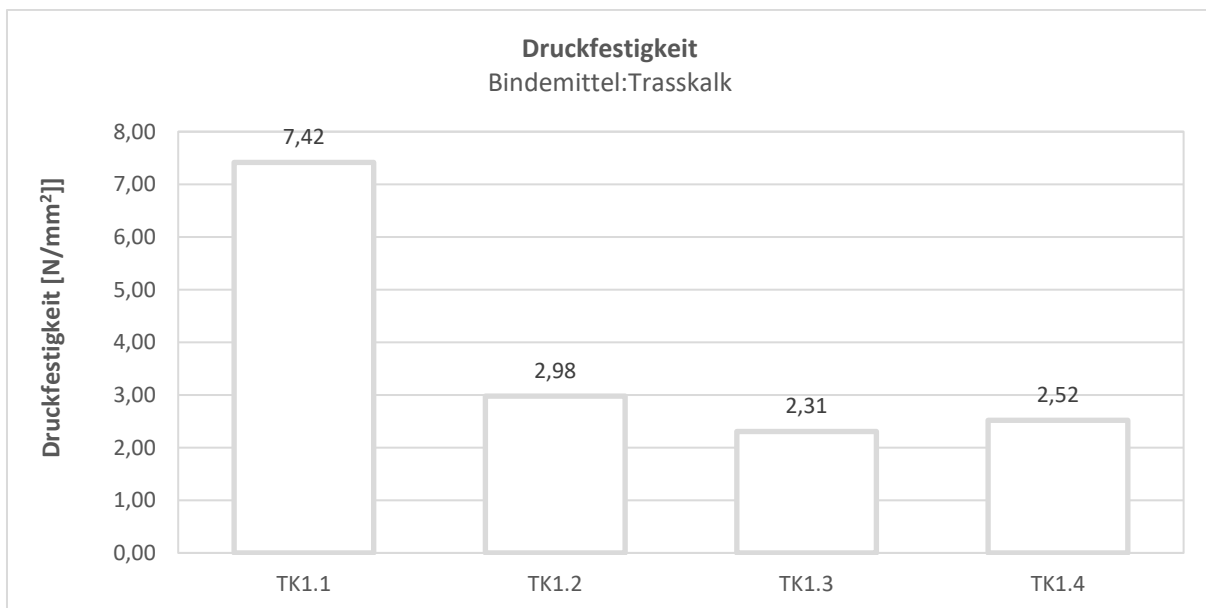
Zudem weisen die Mörtel ohne 2,5 % Mowilith LDM 6880 im Anmachwasser (RK1.5, RK1.6) eine erwartungsgemäß höhere Druckfestigkeit auf, als die Mörtel gleicher Mischung mit Acrylatanteil (RK1.1, RK1.2).

Bei den Mörteln mit Trasskalk als Bindemittel (*siehe Diagr.28.*) zeigen sich bis auf den ausschließlich mit Millisil® gefertigten Mörtel annähernd ähnliche Werte der Druckfestigkeit. Erwartet wurde, ein höherer Wert für die Mörtelmischung TK1.4 durch das veränderte Mischungsverhältnis von 2:3 Bindemittel: Zuschlag.

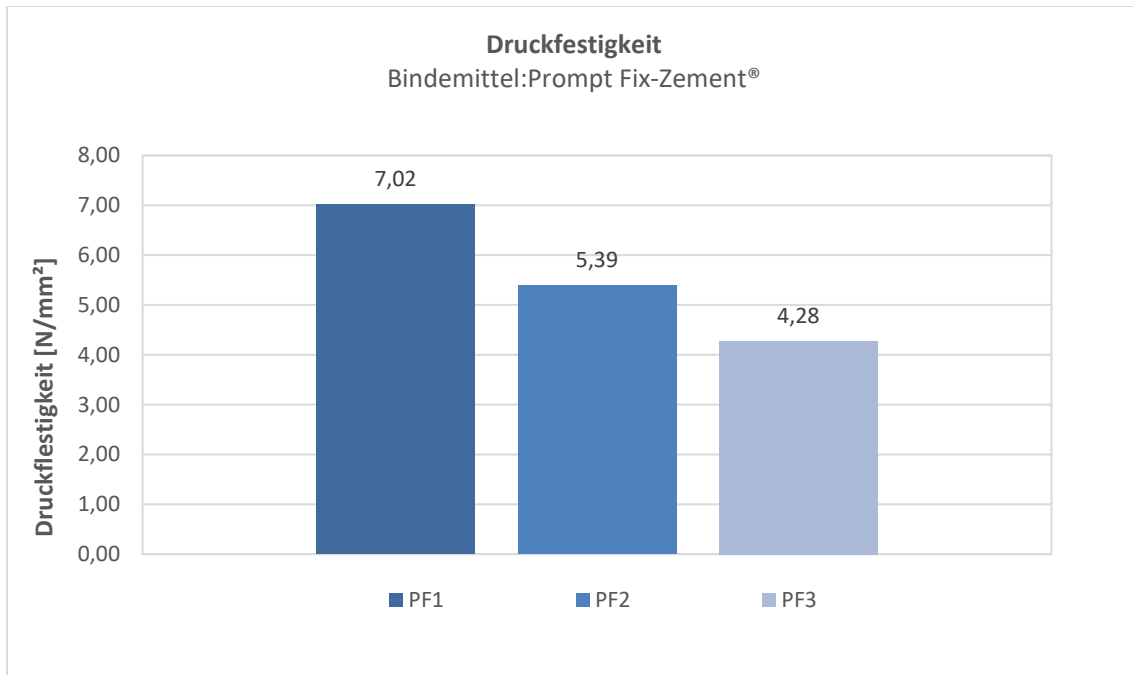
Hinsichtlich der unterschiedlichen Mörtel der Prompt Fix-Zement®- Reihe lassen sich bei den Werten der Druckfestigkeit ähnliche Tendenzen wie bei der Biegezugfestigkeit feststellen. (*siehe Diagr.29*)



Diagr. 27 Druckfestigkeit der Mörtelreihen RK



Diagr. 28 Druckfestigkeit der Mörtelreihen TK

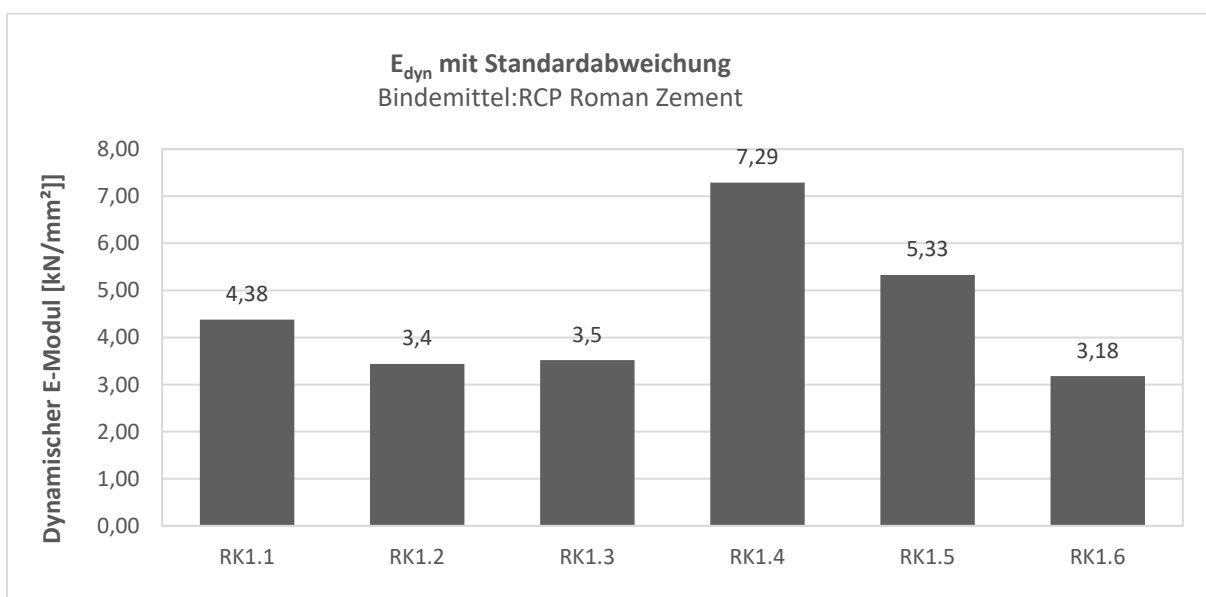


Diagr. 29 Druckfestigkeit der Mörtelreihen PF

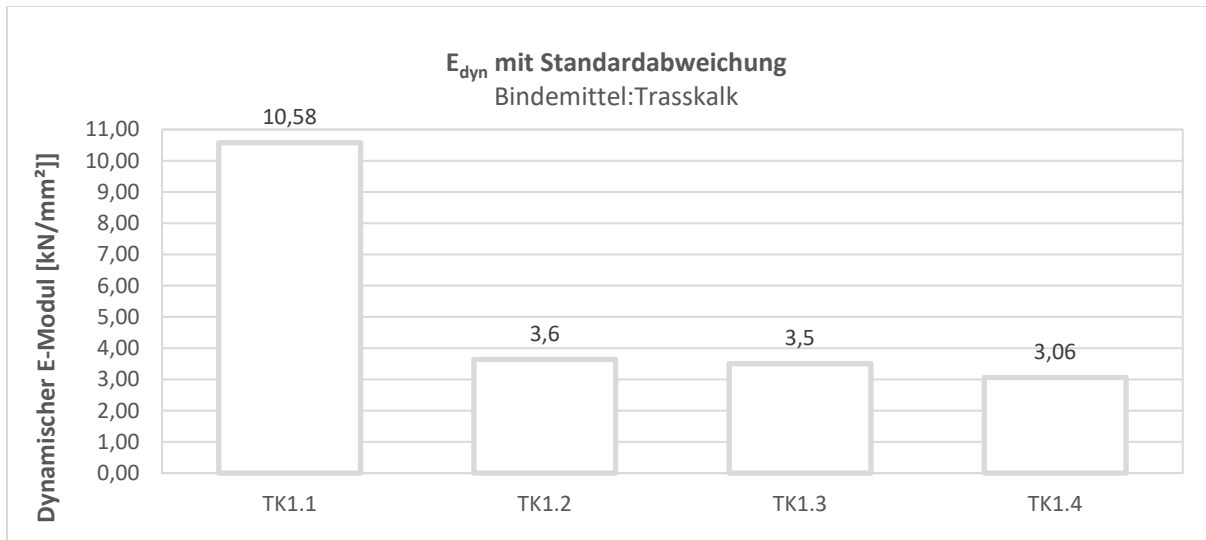
### 7.3.4 Dynamisches E-Modul (PKR 1 und PKR 2)

Anhand der Grafiken (siehe Diagr.30 und 31) wird deutlich, dass die mehrheitlichen untersuchten Mörtel einen geringen E-Modul aufweisen. Die Werte liegen bei den Mörteln der RK und TK-Reihe im Bereich von 3,06–3,5 kN/mm<sup>2</sup>. Ausgenommen sind die Mörtel sowohl der Reihe RK als auch TK, die ausschließlich mit Millisil® W3 als Zuschlag gefertigt wurden. Vor allem bei der Mörtelmischung TK1.1, zeigt sich ein fast 3-fach erhöhter E-Modul im Gegensatz zu den übrigen TK-Mischungen.

Des Weiteren fällt auf, dass der höhere Bindemittelanteil des Mörtels RK1.4, wie erwartet, einen höheren E-Modul zur Folge hat. Hier liegt der Wert im fast doppelt so hohen Bereich.

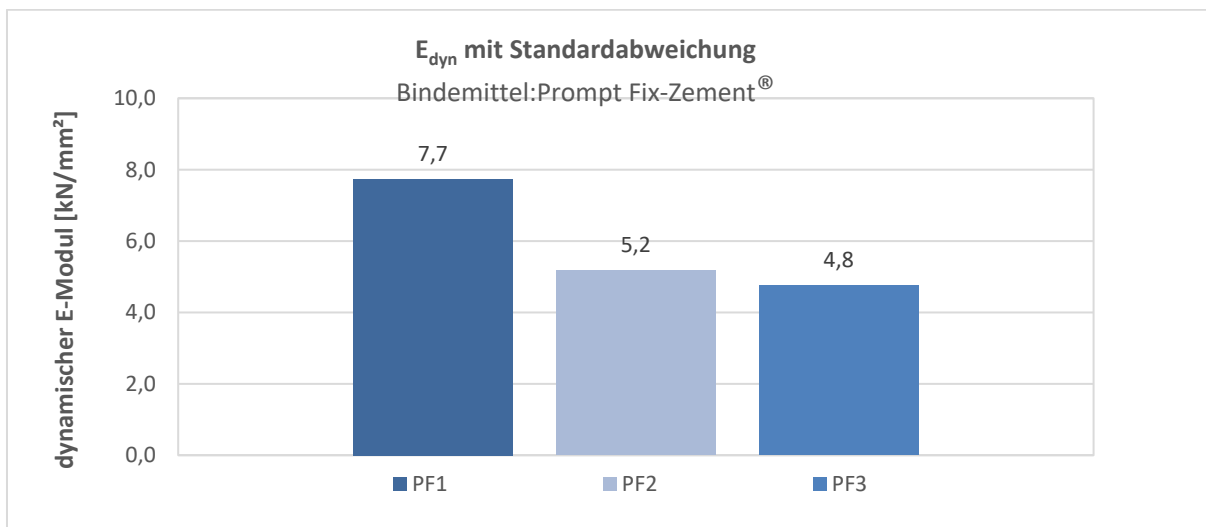


Diagr. 30 Dynamisches Elastizitätsmodul Mörtelreihen RK



Diagr. 31 Dynamisches Elastizitätsmodul Mörtelreihen TK

Wie zu erwarten, zeigt sich der Mörtel PF1 der ausschließlich mit Millisil® W3 gefertigt wurde, einen etwas höheren E-Modul gegenüber den beiden anderen Mörtelmischungen. Des Weiteren fällt auf, dass der höhere Anteil an rotem Sand des Mörtels PF2 einen höheren E-Modul gegenüber dem Mörtel PF3 mit gleicher Verteilung des Zuschlags zur Folge hat.




Diagr. 32 Dynamisches Elastizitätsmodul Mörtelreihen PF

## 7.4 Verwitterungseigenschaften

### 7.4.1 Frost-Tau Wechsel (PKR1)

Die Mörtel aller Mischungsverhältnisse hielten den Frost-Tau-Wechselbeanspruchungen im Wesentlichen gut stand. Sie wiesen nach den 25 Zyklen an allen Prüfkörpern leichte (FTW RK1.1, RK1.5, RK1.6, TK1.3, TK1.4) bis mittlere (RK1.2, RK1.3, RK1.4, TK1.1, TK1.2) Stufen der Absandungen auf. Rissbildungen oder Veränderungen in der Farbigkeit zeigten sich bei keinem der Proben. Alle fünf Proben einer Reihe wurden wie im Folgenden exemplarisch an der Mörtelreihe FTW RK1.2 dargestellt fotografisch im Vor- und Nachzustand dokumentiert. und ebenso punktuell am 3D Lasermikroskop vermessen und analysiert.

## 7.4.1.1 Prüfreihe RCP Romazement Mörtel

 Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	<b>Frost Tau Wechsel</b>		
<b>Datum:</b> Februar.2015	<b>Thema:</b>	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FTW RK1.1.1-1.1.5		
<b>Zusammensetzung:</b>	RK1.1 : RCP Roman Kalk : Millisil® W3/ 1RT : 3RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF.	<b>Zustand:</b>	25 Zyklen
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		

Vorzustand:



Nachzustand:



Beschreibung:

Leichte Absandung

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung</b> <b>Frost Tau Wechsel</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	<b>Thema:</b>	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier	
Datum: Februar.2015	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FTW RK1.2.1-1.2.5		
<b>Zusammensetzung:</b>	RK1.2 : RCP Romanzement : roter Sand 1RT : 3RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF.	<b>Zustand:</b>	25 Zyklen
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		

Vorzustand:



Nachzustand:



Beschreibung:

Mittlere Absandung

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	Probekörperauswertung		Bearbeiter:
	Frost Tau Wechsel		Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	Datum: Februar.2015	Thema:	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier
	Objekt:	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
Probekörper:	FTW RK1.3.1-1.3.5		
Zusammensetzung:	RK1.3 : RCP Romazement: Millisil® W3:roter Sand 1RT: 1RT:2RT		
Lagerung:	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF..	Zustand:	25 Zyklen
Beschichtung:	Keine Beschichtung		

Vorzustand:



Nachzustand:



Beschreibung:

Mittlere Absandung

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	Probekörperauswertung		Bearbeiter:
	Frost Tau Wechsel		Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	Datum: Februar.2015	Thema:	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier
	Objekt:	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
Probekörper:	FTW RK 1.4.1-1.4.5		
Zusammensetzung:	RK1.4 : RCP Romazement : Millisil® W3:roter Sand 2RT: 1RT:2RT		
Lagerung:	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF..	Zustand:	25 Zyklen
Beschichtung:	Keine Beschichtung		

Vorzustand:




Nachzustand:



Beschreibung:

Mittlere Absandung



 Datum: Februar.2015	Probekörperauswertung Frost Tau Wechsel		Bearbeiter: Dipl. Rest. Kirsti Krügener	
	Thema:	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier		
	Objekt:	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung		
Probekörper:	FTW RK1.5.1-1.5.5			
Zusammensetzung:	RK1.5 : RCP Romazement : Millisil® W3 1RT: 3RT			
Lagerung:	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF..	Zustand:	25 Zyklen	
Beschichtung:	Keine Beschichtung			

Vorzustand:




Nachzustand:



Beschreibung:

Leichte Absandung

 Datum: Februar.2015	Probekörperauswertung Frost Tau Wechsel		Bearbeiter: Dipl. Rest. Kirsti Krügener	
	Thema:	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier		
	Objekt:	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung		
Probekörper:	FTW RK1.6.1-1.6.5			
Zusammensetzung:	RK1.6 : RCP Roman zement: roter Sand 1RT:3RT			
Lagerung:	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF.	Zustand:	25 Zyklen	
Beschichtung:	Keine Beschichtung			

## Vorzustand:




## Nachzustand:



Beschreibung:

Leichte Absandung

## 7.4.1.2 Prüfreihe RCP Romazement Mörtel

 Datum: Februar.2015	Probekörperauswertung Frost Tau Wechsel		Bearbeiter: Dipl. Rest. Kirsti Krügener	
	Thema:	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier		
	Objekt:	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung		
Probekörper:	FTW TK1.1.1-1.1.5			
Zusammensetzung:	TK1.1 : Trasskalk : Millisil® W3 1RT: 3RT			
Lagerung:	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF..	Zustand:	25 Zyklen	
Beschichtung:	Keine Beschichtung			

Vorzustand:




Nachzustand:



Beschreibung:

Mittlere Absandung

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	Probekörperauswertung Frost Tau Wechsel		Bearbeiter: Dipl. Rest. Kirsti Krügener	
	Datum: Februar.2015	Thema:	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier	
	Objekt:	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung		
Probekörper:	FTW TK1.2.1-1.2.5			
Zusammensetzung:	RK1.2 : Trasskalk: roter Sand 1RT:3RT			
Lagerung:	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF..	Zustand:	25 Zyklen	
Beschichtung:	Keine Beschichtung			
Vorzustand:				
				
Nachzustand:				
				
Beschreibung:	Mittlere Absandung			

 Datum: Februar.2015	Probekörperauswertung Frost Tau Wechsel		Bearbeiter: Dipl. Rest. Kirsti Krügener	
	Thema:	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier		
	Objekt:	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung		
Probekörper:	FTW TK1.3.1-1.3.5			
Zusammensetzung:	TK1.3 : Trasskalk : Millisil® W3: roter Sand 1RT: 1RT:2RT			
Lagerung:	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF..	Zustand:	25 Zyklen	
Beschichtung:	Keine Beschichtung			

## Vorzustand:




## Nachzustand:

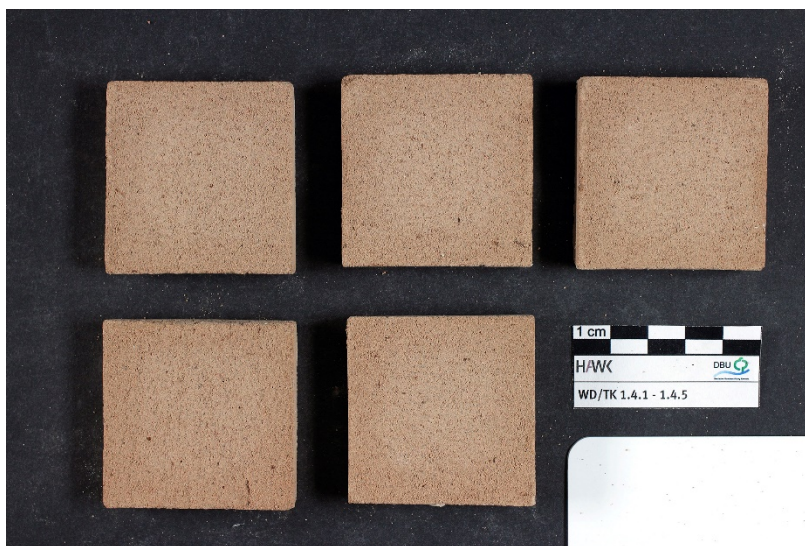


Beschreibung:

Leichte Absandung

 Datum: Februar.2015	Probekörperauswertung Frost Tau Wechsel		Bearbeiter: Dipl. Rest. Kirsti Krügener	
	Thema:	Schutzputz an der Fassade der Konstantinbasilika in Trier		
	Objekt:	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung		
Probekörper:	FTW TK1.4.1-1.4.5			
Zusammensetzung:	TK1.6 : Trasskalk: Millisil® W3: roter Sand - 2RT:1RT:2RT			
Lagerung:	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF..	Zustand:	25 Zyklen	
Beschichtung:	Keine Beschichtung			

## Vorzustand:



## Nachzustand:



Beschreibung:	Leichte Absandung
---------------	-------------------

### 7.4.2 Oberflächenanalyse Frost-Tau Wechsel/ 3D Laserscanning-Mikroskop

Optisch sichtbar sind bei allen Mörteln Substanzverluste, vor allem an der Oberfläche, so wie an den Kanten. Dies zeigt sich durch Verlust von Zuschlägen vor allem bei den Mörteln mit rotem Sand, also einer überwiegenden Glättung der einst rauen Oberfläche, so wie eine Abrundung der Kanten.

Für eine exaktere Auswertung der Oberflächenveränderung/Rauigkeit, wurden die Mörtelproben unter einem 3D-Laserscanningmikroskop<sup>22</sup> bei einem 10-fachen Vergrößerungsfaktor an einem Punkt analysiert. Hierdurch konnten bereits an allen Proben makroskopisch festgestellte Masseverluste bestätigt werden. Exemplarisch werden die Ergebnisse im Folgenden an der Probe RK1.2.1 aufgezeigt. Durch den Einsatz einer Anlageform und der Kennzeichnung der Prüfkörper zu Beginn der Probenreihe, konnte gewährleistet werden, dass die Messpunkte sich bei allen Messungen, bis auf die Verschiebung weniger Mikrometer, an derselben Stelle der Proben befanden. Die Farblaseraufnahmen der Messfläche im Vor- und Nachzustand zeigen die Glättung der Oberfläche im Detail. (siehe Abb.9 und 10) Es zeigen sich im Vorzustand ausgeprägter Tiefen/Schatten, die nach den Frost-Tau-Wechselzyklen weniger ausgeprägt/dunkel erscheinen. Lediglich im oberen linken Bereich der Nachzustandsprobe (roter Pfeil) zeigt sich Substanzverlust (Körnung).



Abb. 9  
Probenreihe FT RK1.2.1 in der  
Farblaseraufnahme, vor der  
Frost-Tau Wechsel Beprobung

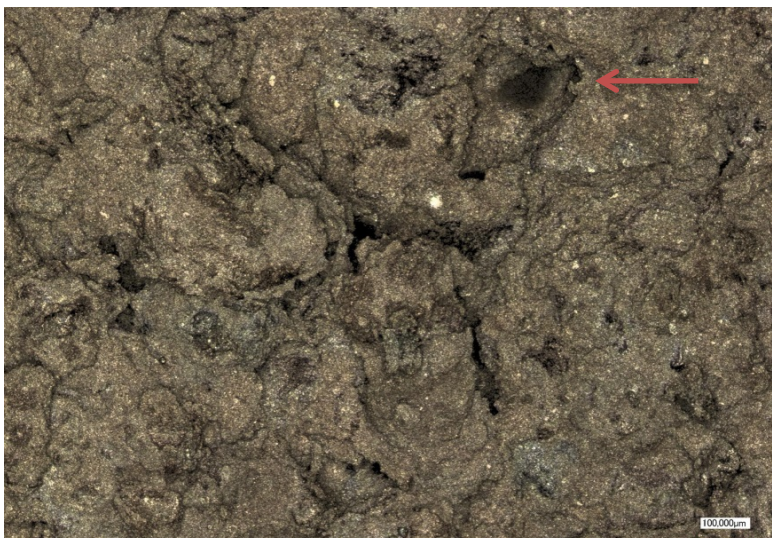


Abb. 10  
Probenreihe FT RK1.2.1 in der  
Farblaseraufnahme, nach der Frost-  
Tau Wechsel Beprobung

<sup>22</sup> Keyence; Konfokales 3D Laserscanning-Mikroskop Modellreihe VK-X100/X200

Weitere vergleichende Analysen wurden unter anderem am Höhenprofil der Prüfkörper durchgeführt. Hierfür fanden im gleichen Abschnitt der Vor- und Nachprobe Messungen des Höhenprofils statt. (siehe Abb.11.). Zwischen der Messung des durchschnittlichen Höhenprofils im Vorzustand von 383,803  $\mu\text{m}$  und 339,343  $\mu\text{m}$ , zeigt sich eine Minderung von ca. 45  $\mu\text{m}$  im Gesamtprofil des gemessenen Ausschnitts. Hierdurch bestätigt sich die schon in den Farblaseraufnahmen sichtbare „Glättung“ der Oberfläche. Allerdings zeigt sich auch eine Ausprägung der Vertiefungen (siehe Abb.12).

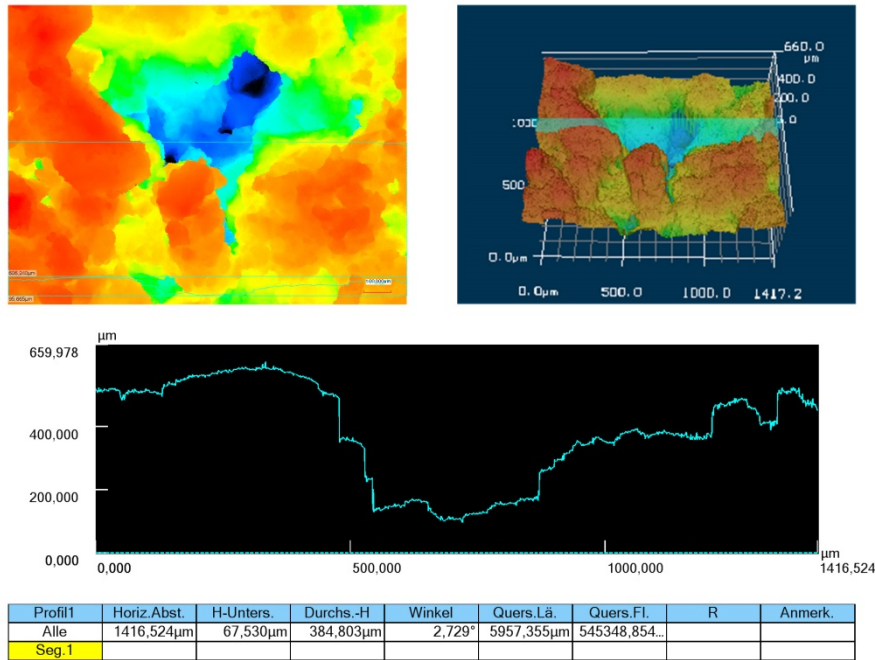


Abb. 11  
Probenreihe RK1.2.1 Vorzustand /Profilanalyse 3D Laserscanning-Mikroskop

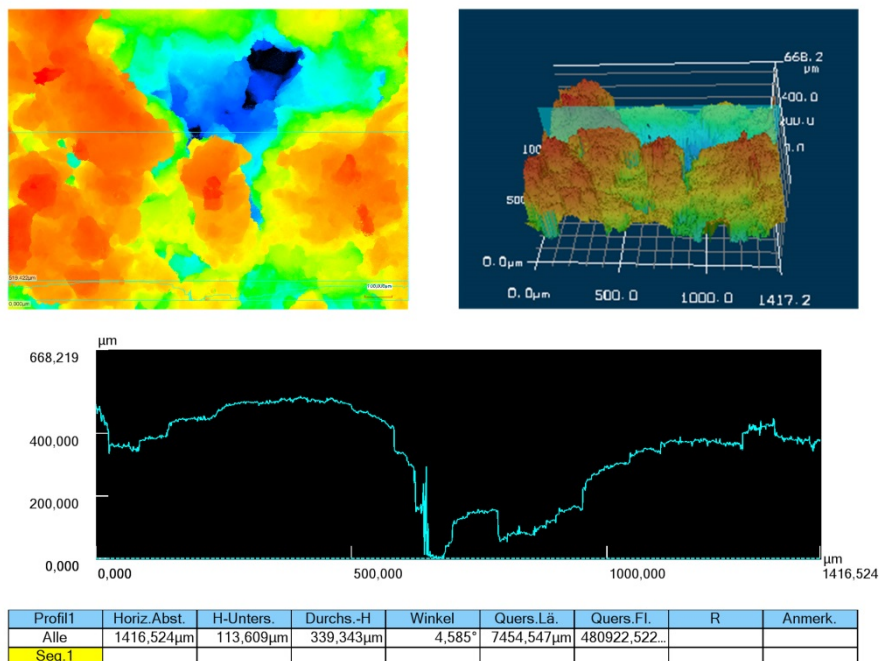


Abb. 12  
Probenreihe RK1.2.1 Nachzustand /Profilanalyse 3D Laserscanning-Mikroskop



### 7.4.3 UV-Beständigkeit (PKR 1 und PKR 2)

Nach der durchgeführten 30-tägigen Bewitterung beider Prüfreiheiten weisen vor allem, die ausschließlich mit Millisil® als Zuschlag gefertigten Prüfkörper, farbliche Veränderungen in der Prüffläche auf. Darüber hinaus, zeigten sich mit einigen Ausnahmen an der Rückseite der Proben weiße Ablagerungen. Diese sind vermutlich auf die Feuchtebelastung während der Kondensationsphase zurückzuführen und lässt auf kalkhaltiges Wasser schließen. Zudem zeigen sich, wie am Beispiel der Prüfreiheit BW TK1.1 (siehe Abb.13) sichtbar, Anlagerungen von Algen. Nach Auskunft des NLD, kann dies aber eher auf eine Verunreinigung des Prüfgerätes zurückzuführen sein. Es ist jedoch festzustellen, dass sich Proben gleicher Mörtelreihe in der Verfärbung unterschiedlich verhalten. Einige zeigen in der Prüffläche leichte Vergilbungen, vor allem am Rand der Prüfflächenrahmen. Andere, vor allem die mit rotem Sand gefertigten Mörtel, lassen in Ihrer Farbigkeit keinen Unterschied zum Vorzustand erkennen.

Alle Prüfkörper wurden vor und nach der Versuchsreihe fotografisch dokumentiert. In *Kap.7.4.3.1* werden die optischen Veränderungen dargestellt und erläutert. Das Bewitterungsfenster wird auf den Fotos als dünner Rahmen auf den Probekörpern angezeigt. Es muss beachtet werden, dass die Farbunterschiede der Prüfkörper auf den einzelnen Fotos evtl. durch die Bearbeitung bzw. die Aufnahmesituation der Bilder bedingt ist.



In *Tabelle 16* werden die Veränderungen für die einzelnen Mörtelreihen bewertend zusammengefasst. Es ist vorab festzuhalten, dass es durch eine in der Breite zu groß hergestellte Form zur Erstellung der Prüfkörper, zu Spannungen und Materialverlust beim Ausbau einiger Prüfkörper gekommen ist. Diese wurden jedoch bei der Bewertung mit einbezogen, soweit die Oberfläche keine Zerstörung aufwies. Exemplarisch werden im Folgenden die Auswertung des Mörtels PF3 mit (b) und ohne Beschichtung(a) dargestellt. Letztere Mörtelmischung wurde im August 2016 für eine Testfläche an der Konstantinbasilika Trier genutzt, daher wird deren Darstellung der Vorzug gegeben.

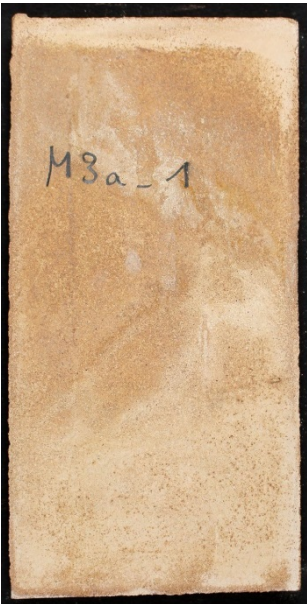
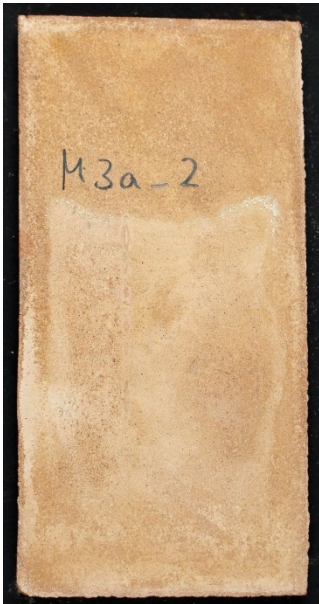
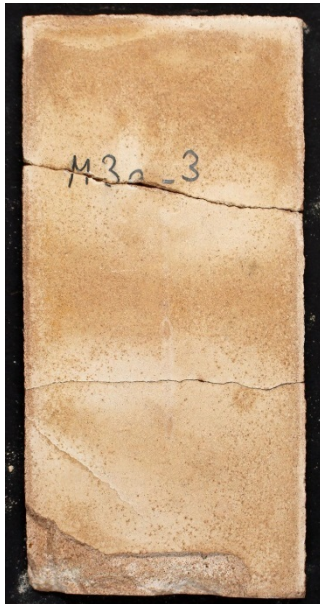


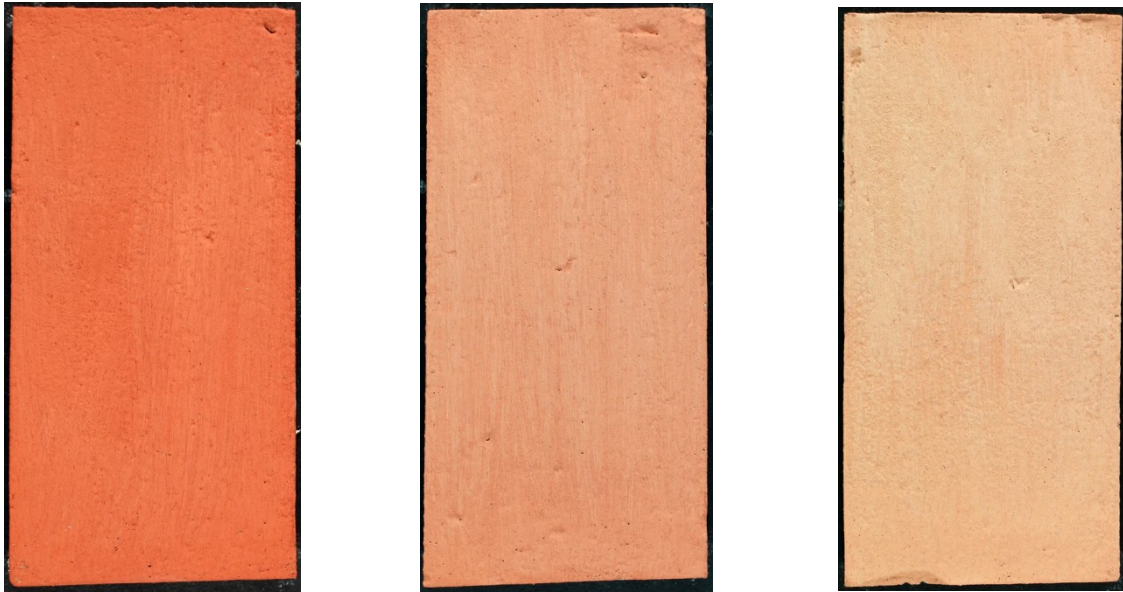

Abb. 13


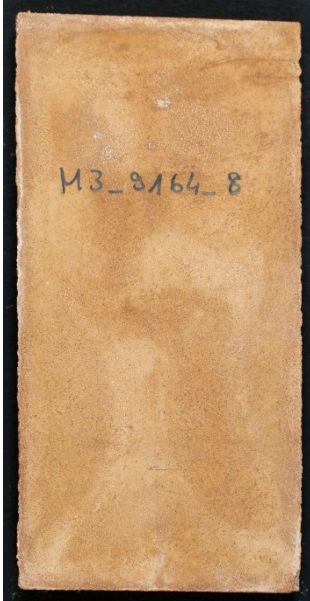

Probenreihe kWA TK1.1 Probereihe nach der Bewitterung mit Anlagerung von Algen

## 7.4.3.1 Auswertung UV-Beständigkeit (PKR 2)

 Datum: 30.03. – 23.05.2016	<b>Probekörperauswertung</b> <b>Künstliche Alterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Stefanie Endrulat M.A.
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne und mit einer Beschichtung aus KEIM Purkristalat (Farbton-Nr. 9162, 9164, 9166)	
<b>Probekörper:</b>	kWA PF3.1a, PF3.2a, PF3.3a vorne		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF3a: Prompt Fix-Zement® : Konz-Köten : Millisil® W3 /1RT: 1,5RT : 1,5RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF	<b>Zustand:</b>	Nach 7 Wochen QUV-Tester
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung (pur)		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>	PF3.3 a ist beim Umstellen der PK zerbrochen. Leichte gelbliche Verfärbungen auf der bewitterten Fläche.		

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung</b> <b>Künstliche Alterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Stefanie Endrulat M.A.
	<b>Datum:</b> 30.03. – 23.05.2016	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne und mit einer Beschichtung aus KEIM Purkristalat (Farbton-Nr. 9162, 9164, 9166)	
<b>Probekörper:</b>	kWA PF3.1a, PF3.2a, PF3.3a hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF3a: Prompt Fix-Zement® : Sand Konz-Könen : Millisil® W3 /1RT: 1,5RT: 1,5RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF	<b>Zustand:</b>	Nach 7 Wochen QUV-Tester
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung (pur)		
<p>Nachzustand:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div>			
<b>Beschreibung:</b>	Die Rückseite der PK wurde trotz Abdeckung von der Bewitterung stark beeinflusst. Es sind gelbbraune, fleckige Verfärbungen zu erkennen.		

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung</b> <b>Künstliche Alterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Stefanie Endrulat M.A
	<b>Datum:</b> 30.03. – 23.05.2016	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne und mit einer Beschichtung aus KEIM Purkristalat (Farbton-Nr. 9162, 9164, 9166)	
<b>Probekörper:</b>	kWA PF3_9162_7, PF3_9164_8, PF3_9166_9, vorne		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF3b: Prompt Fix-Zement® u. Konz-Köen u. Millisil® W3/1RT : 1,5RT : 1,5RT + KEIM Purkristalat (Farbton-Nr. 9162, 9164, 9166)		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF	<b>Zustand:</b>	Nach 7 Wochen QUV-Tester
<b>Beschichtung:</b>	KEIM Purkristalat (Farbton-Nr. 9162, 9164, 9166)		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>	Leichte fleckige Verfärbungen im Bewitterungsfeld.		

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung</b> <b>Künstliche Alterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Stefanie Endrulat M.A.
	<b>Datum:</b> 30.03. – 23.05.2016	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne und mit einer Beschichtung aus KEIM Purkristalat (Farbton-Nr. 9162, 9164, 9166)	
<b>Probekörper:</b>	PF3b_9162_7, M3_9164_8, M3_9166_9, hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF3b: Prompt Fix® Zement u. Konz-Könen u. Millisil® W3/ 1RT : 1,5RT : 1,5RT + KEIM Purkristalat (Farbton-Nr. 9162, 9164, 9166)		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % rLF	<b>Zustand:</b>	Nach 7 Wochen QUV-Tester
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung (pur)		
<p>Nachzustand:</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">    </div>			
<b>Beschreibung:</b>	Die Rückseite der PK wurde trotz Abdeckung von der Bewitterung stark beeinflusst. Es sind gelbbraune, fleckige Verfärbungen zu erkennen.		

Tab. 16 Auswertung der Bewitterungsprüfkörper PKR 1 und PKR 2 kWA

Prüfkörperreihe	Absandungen	Vergilbung	Rissbildung Abplatzung	Anlagerung an der Oberfläche	Anzahl begutachteter Prüfkörper
kWA RK1.1	+	++	-	+	5
kWA R1.2	++	-	-	-	5
kWA R1.3	++	++ (Verdunklung)	-	-	4
kWA RK1.4	++	+ (helle Anlagerung)	-	-	-
kWA RK1.5	+	-	-	-	5
kWA RK1.6	+	+ (helle Anlagerung)	-	-	5
kWA TK1.1	++	+	-	++	5
kWA TK1.2	++	-	-	-	5
kWA T 1.3	+	-	-	-	5
kWA TK1.4	+	-	-	-	3
kWA PF1a	+	++	-	-	3
kWA PF1b	-	-	-	+	3
kWA PF2a	++	+	-	-	3
kWA PF2b	-	-	-	+	3
kWA PF3a	+	+	-	-	3
kWA PF3b	-	-	-	+	3
+ wenig ++ mittel +++ stark- nicht vorhanden					

Abschließend zu den Auswertungen konnte festgestellt werden, dass das Verwitterungsverhalten der Mörtel durch die Nutzung des Schnellbewitterungsgerät Q-Panel, Typ QUV/SE nicht ausreichend beurteilt werden kann. Daher wurde beschlossen einen Expositionsstand zu bauen und eine mindestens einjährige Bewitterung an der HAWK vorzunehmen. Die hierfür beprobten Prüfkörper reduzierten sich auf drei Prüfkörper pro Reihe und wurden aus den Rückstellproben bezogen. Wie zuvor wurden alle Prüfkörper fotografisch vor der Exposition dokumentiert.

#### 7.4.4 Langzeitbewitterung/Freibewitterung (PKR 1 und PKR 2)

Die Erstellung der Mörtelreihen der PKR 1 und PKR 2 fand um ein halbes Jahr zeitlich versetzt statt. Daher ergibt sich für beide Mörtelreihen eine unterschiedliche Bewitterungsdauer.

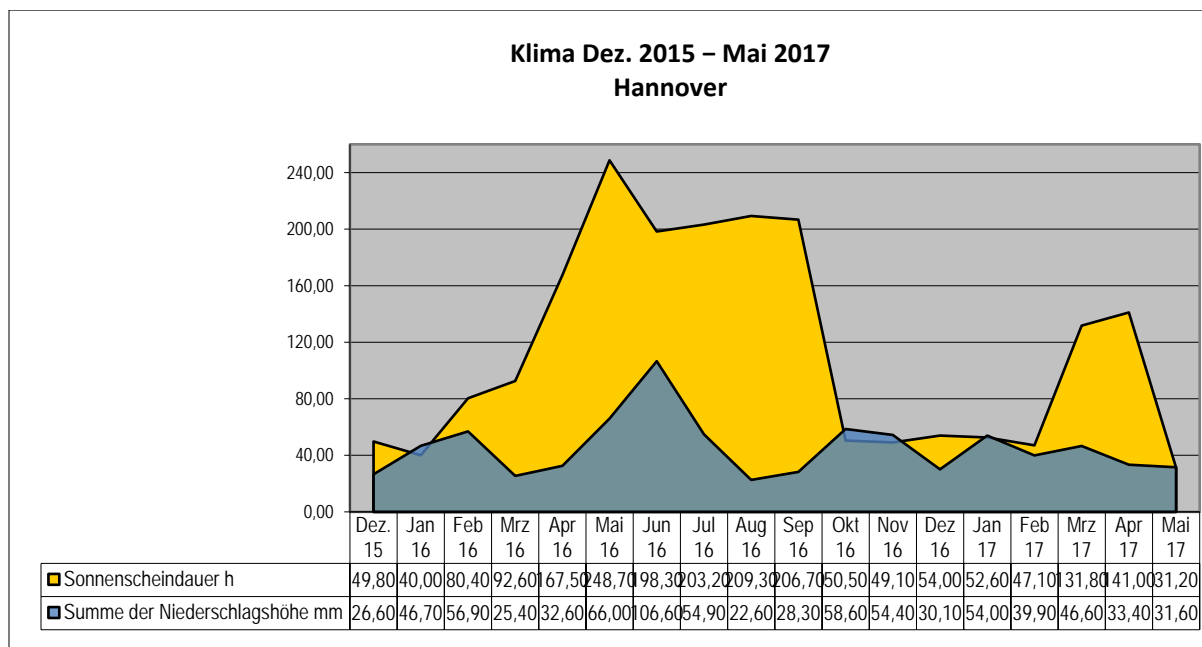
**PKR 1:** 540 Tage

**PKR 2:** 396 Tage

Beide Mörtelreihen wurden jedoch mindestens einer Frost/Tauwechselperiode ausgesetzt (Januar 2016 und Januar 2017). Um den Grad der Oberflächenveränderung im Bezug zu den Witterungseinflüssen beurteilen zu können, werden im folgenden Kapitel die Klimadaten über den gesamten Prüfungszeitraum von 540 Tagen bezüglich Sonnenscheindauer, Niederschlagsmenge, Temperatur und Windgeschwindigkeit dargestellt.

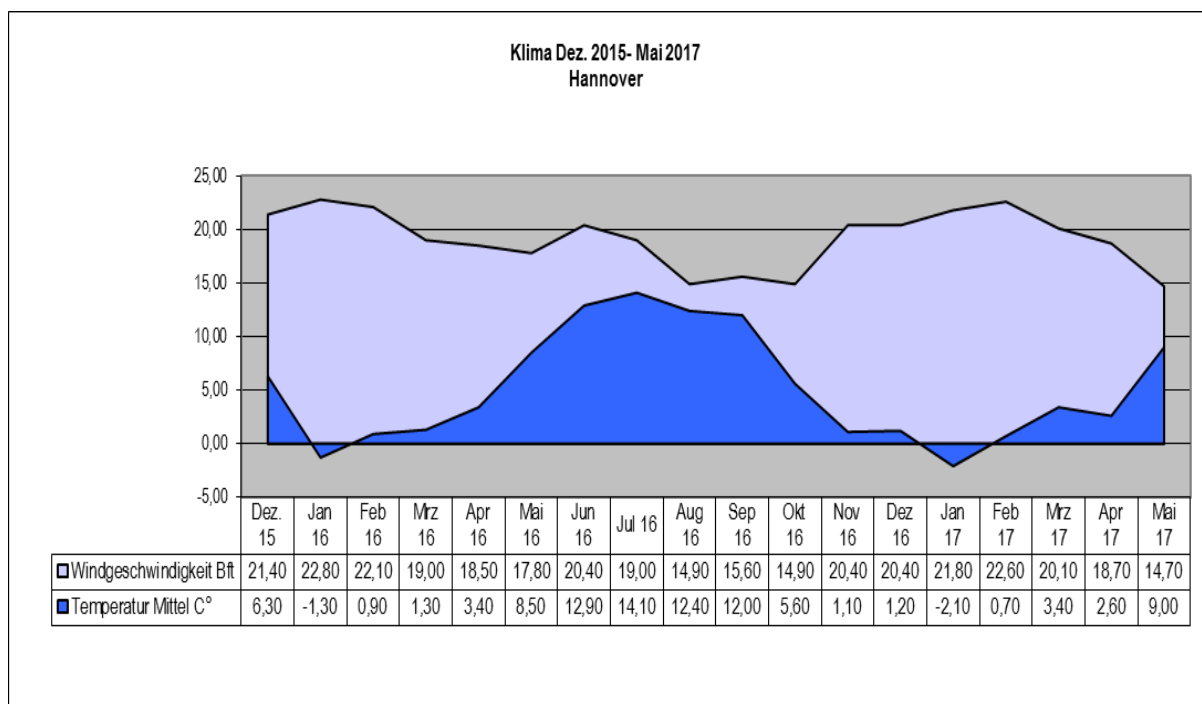
Sämtliche aufgeführten Werte beziehen sich auf Daten, die durch den Deutschen Wetterdienst übermittelt wurden. Da in Hildesheim keine durch den Deutschen Wetterdienst betreute Wetterstation zur Verfügung steht, werden hier die Daten der nächstliegenden Großstadt Hannover zur Auswertung herangezogen. Aufgeführt wird jeweils der Monatsmittelwert.

#### 7.4.4.1 Klimadaten (PKR 1 und PKR 2)



Diagr. 33

Monatsmittelwerte: Sonnenscheindauer [h] und Niederschlagshöhe [mm] von Dez. 2015 bis Mai 2017





Diagr. 34

Monatsmittelwerte: Windgeschwindigkeit [Bft] und Niederschlagshöhe [°C] von Dez. 2015 bis Mai

### 7.4.5 Auswertung Langzeitbewitterung/Freibewitterung (PKR 1 und PKR 2)


In Anlehnung an die Nutzung der Schutzputze in Trier werden in Folge nur die Putze mit roten Sanden und roten Schutzüberzügen der Mörtelreihen RK und PF dargestellt.



<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl.Rest. Kirsti Krügener
	<b>Datum:</b> 10.12.2015.– 31.05.2017	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW RK1.2.4-1.2.6 vorne		
<b>Zusammensetzung:</b>	RK1.2 : RCP Roman Kalk : roter Sand / 1RT : 3 RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 540 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			






<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung</b>		<b>Bearbeiter:</b>
	<b>Freibewitterung</b>		Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW RK1.2.4-1.2.6 hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	RK1.2 : RCP Roman Kalk : roter Sand / 1RT : 3RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 540 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Nachzustand Rückseite:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			


<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	<b>Datum:</b> 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW RK 1.3.4-1.1.6 vorne		
<b>Zusammensetzung:</b>	RK1.3 : RCP Roman Kalk : Millisil® W3: roter Sand / 1RT : 1RT : 2RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 540 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			



<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW RK1.3.4-1.1.6 hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	RK1.3 : RCP Roman Kalk : Millisil® W3: roter Sand / 1RT : 1RT : 2RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 540 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Nachzustand Rückseite:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung</b>		<b>Bearbeiter:</b>
	<b>Freibewitterung</b>		Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW RK1.4.4-1.4.6 vorne		
<b>Zusammensetzung:</b>	R 1.4 : RCP Roman Kalk : Millisil® W3: roter Sand / 2RT : 1RT : 2RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 540 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			


<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	<b>Datum:</b> 10.12.2015 – 31.05.2017	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW RK1.4.4-1.4.6 hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	RK 1.4 : RCP Roman Kalk : Millisil® W3: roter Sand / 1RT : 1RT : 2RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 540 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Nachzustand Rückseite:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener
	<b>Datum:</b> 10.12.2015.– 31.05.2017	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW RK1.6.4-1.6.6		
<b>Zusammensetzung:</b>	RK1.6 : RCP Roman Kalk : roter Sand / 1RT : 3RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 540 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>	Probe RK1.6.4 war nach der Ausformung gebrochen		

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Probekörperauswertung</b>		<b>Bearbeiter:</b>
	<b>Freibewitterung</b>		Dipl. Rest. Kirsti Krügener
<b>Datum:</b> 10.12.2015.– 31.05.2017	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW RK1.6.4-1.6.6 hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	R1.6 : RCP Roman Kalk : roter Sand / 1RT : 3RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 540 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Nachzustand Rückseite:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener, MA Stefanie Endulat
	<b>Freibewitterung</b>		
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung		
<b>Probekörper:</b>	FBW PF3.1a, PF3.5a, PF3.6a vorne		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF3a : Prompt Fix Zement®: Millisil® W3: roter Sand / 1RT : 1,5RT : 1,5RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 396 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>	Probe PF3a 6 viel Windeinfluss vom Expositionsgestell gefallen und zerbrach in zu viele Einzelteile um erneut auf dem Gestell platziert werden zu können.		



<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015.– 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener, MA Stefanie Endulat
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW PF3.4a, PF3.5a, PF3.6a hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF3a : Prompt Fix Zement®: Millisil® W3: roter Sand / 1RT : 1,5RT : 1,5RT		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 396 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keine Beschichtung		
<b>Nachzustand Rückseite:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener, MA Stefanie Endulat
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, mit Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW PF b 1-4-5 vorne		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF 1b-3b/ 1-3		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 396 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keim Purkristalat No.9162		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>	Probe PF3a 6 viel Windeinfluss vom Expositionsgestell gefallen und zerbrach in zu viele Einzelteile um erneut auf dem Gestell platziert werden zu können.		

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener, MA Stefanie Endulat
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, mit Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW PfB 1-4-5 hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF 1b-3b/ 1-3		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 396 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keim Purkristalat No.9162		
<b>Nachzustand Rückseite:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>	Probe PfB 6 ist unter viel Windeinfluss vom Expositionsgestell gefallen und zerbrach in zu viele Einzelteile um erneut auf dem Gestell platziert werden zu können.		

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener, MA Stefanie Endulat
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW PF 2-5-6 vorne		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF1b-3b 1-3		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 396 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keim Purkristalat No.9164		
<b>Vorzustand:</b>			
			
<b>Nachzustand:</b>			
			
<b>Beschreibung:</b>			

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener, MA Stefanie Endulat
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romanzement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romanzement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW PF 2-5-6 hinten		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF1b-3b 1-3		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 396 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keim Purkristalat No.9164		
Nachzustand Rückseite:			
			
<b>Beschreibung:</b>			

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener, MA Stefanie Endulat
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW PFb 4-6		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF1b-3b 1-3		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 396 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keim Purkristalat No.9166		
<b>Vorzustand:</b> 			
<b>Nachzustand:</b> 			
<b>Beschreibung:</b>	Ein Prüfkörper zerbrach beim Ausformen so dass er nicht mehr genutzt werden konnte		

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim Datum: 10.12.2015. – 31.05.2017	<b>Probekörperauswertung          Freibewitterung</b>		<b>Bearbeiter:</b> Dipl. Rest. Kirsti Krügener, MA Stefanie Endulat
	<b>Thema:</b>	Schutzputze aus Romazement an der Fassade Konstantinbasilika in Trier	
	<b>Objekt:</b>	Probekörper aus Romazement mit verschiedenen Sanden, ohne Beschichtung	
<b>Probekörper:</b>	FBW PFb 4-6		
<b>Zusammensetzung:</b>	PF1b-3b 1-3		
<b>Lagerung:</b>	Mind. 3 Monate bei > 90 % r. LF.	<b>Zustand:</b>	nach 396 Tagen Bewitterung
<b>Beschichtung:</b>	Keim Purkristalat No.9166		
Nachzustand Rückseite:			
			
<b>Beschreibung:</b>	Ein Prüfkörper zerbrach beim Ausformen so dass er nicht mehr genutzt werden konnte		

Auf allen Rückseiten der Proben, zeigt sich im oberen und unteren Kantenbereich ein 1 cm breiter senkrechter Streifen (*siehe Abb.14*). Dieser rührt von der Konstruktion des Expositionsgestells her. Ebenso sind die Algenablagerungen an den oberen und unteren Rändern auf dieses zurückzuführen. Es kann angenommen werden, dass lange Zeit Wasser auf den Leisten stand, auf denen die Proben aufgebracht waren. Die Durchfeuchtung an dieser Stelle und Exposition der Rückseite Richtung Norden begünstigten mit großer Wahrscheinlichkeit den Algenwuchs.



Abb. 14  
Probe PF4b  
Algenablagerung an der Rückseite.

In *Tabelle. 17* werden die Veränderungen für die einzelnen Mörtelreihen bewertend zusammengefasst. Es ist vorab festzuhalten, dass es durch Windeinflüsse zum Herabfallen einiger Prüfkörper und dem damit einhergehenden Materialverlust gekommen ist. Diese wurden jedoch bei der Bewertung mit einbezogen, soweit die Oberflächen keine kompletten Zerstörungen aufwiesen.

Tab. 17 Zustandsbewertung der Bewitterungsprüfkörper FBW PKR 1 und PKR 2

Prüfkörperreihe	Absandungen	Vergilbung	Rissbildung Abplatzung	Anlagerung an der Oberfläche	Anzahl begutachteter Prüfkörper
FBW RK 1.1	+++	+	++	-	3
FBW RK 1.2	+	-	-	-	3
FBW RK 1.3	++	+	-	-	3
FBW RK 1.4	+	+	-	-	3
FBW RK 1.5	++	+	+	-	3
FBW RK 1.6	+++	+	+++	-	3
FBW TK 1.1	+	+	-	+	3
FBW TK 1.2	++	+	-	++	2
FBW TK 1.3	++	+	-	+	1
FBW TK 1.4	++	++	-	-	1
FBW PF1a	+	++	-	-	3
FBW PF2a	-	+	-	-	3
FBW PF3a	-	++	-	-	3
FBW PF 9164	-	+	-	-	3
FBW PF 9162	+	+	-	-	2
FBW PF 9166	-	+	-	-	2
+ wenig ++ mittel +++ stark - nicht vorhanden					



### 7.4.6 Dünnschliffe (PKR 2)

Zusätzlich zu den geplanten Untersuchungen, fand eine Überprüfung des Verwitterungsverhaltens, das an der Pilotfläche Konstantinbasilika verwendeten Mörtels (PF3a) mittels Dünnschliff statt. Ebenso wurden von einem mit Schutzlasur (KEIM Purkristalat No.9166) versehenen bewitterten Prüfkörper gleicher Mörtelmischung (BM=Bindemittel/Prompt Fix-Zement®) Dünnschliffe erstellt und analysiert. Alle untersuchten Proben entstammten der Probenreihe kAW bewittert (**PF3.10b** und **PF3.6b**) und wurden mit jeweils einer unbewitterten Referenz (**PF3.2a** und **PF3.2b**) verglichen.

Die Präparation der Proben wurde durch Entnahme eines Streifens aus der Mitte der kWA Prüfkörper mittels Präzisionssäge vorgenommen. Zwei aus diesem Streifen präparierte Dünnschliffe wurden mit den Oberflächen zueinander gerichtet analysiert (MPA Bremen/ Dr. Frank Schlütter).

#### 7.4.6.1 Dünnschliffe Referenzprobe Mörtel PF3.2a unbewittert

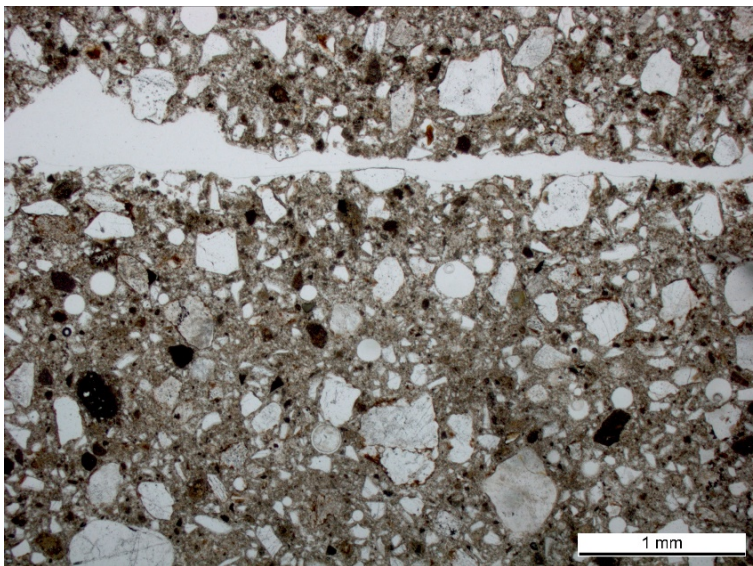


Abb. 15  
Referenzprobe PF3.2a  
Gefüge mit gegenüberliegenden Oberflächen.  
Übersicht.  
Keine Sinterschicht.  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 2,5x

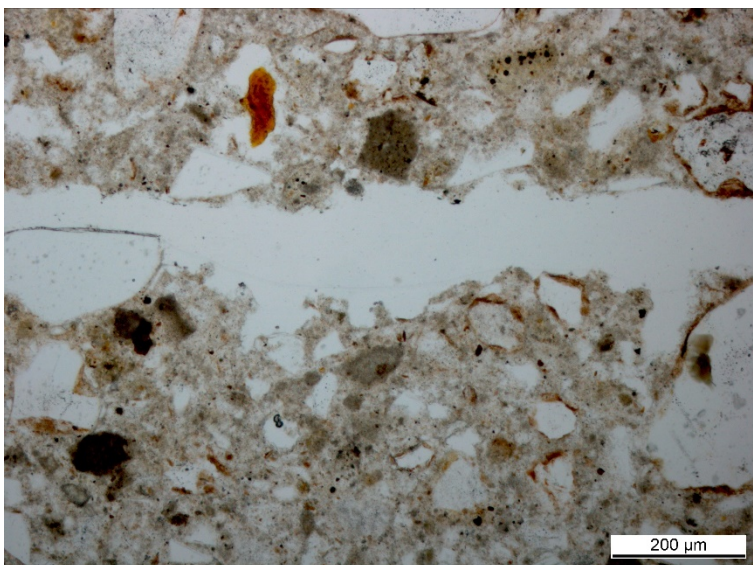


Abb. 16  
Referenzprobe PF3.2a  
Gefüge mit gegenüberliegenden  
Oberflächen. Übersicht.  
Keine Sinterschicht.  
Polarisationsfilter; gekreuzt.  
Objektiv: 10x

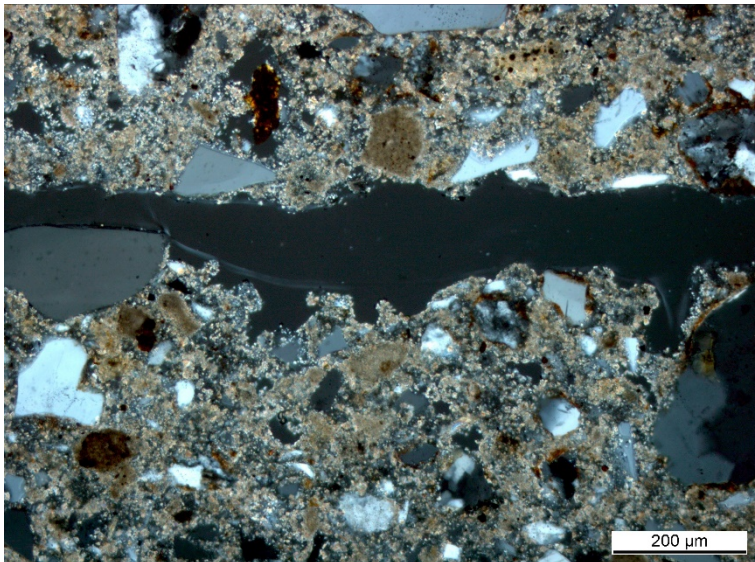


Abb. 17  
Referenzprobe PF3.2a  
Gefüge mit gegenüberliegenden  
Oberflächen. Übersicht.  
Keine Sinterschicht.  
Polarisationsfilter; gekreuzt.  
Objektiv: 10x

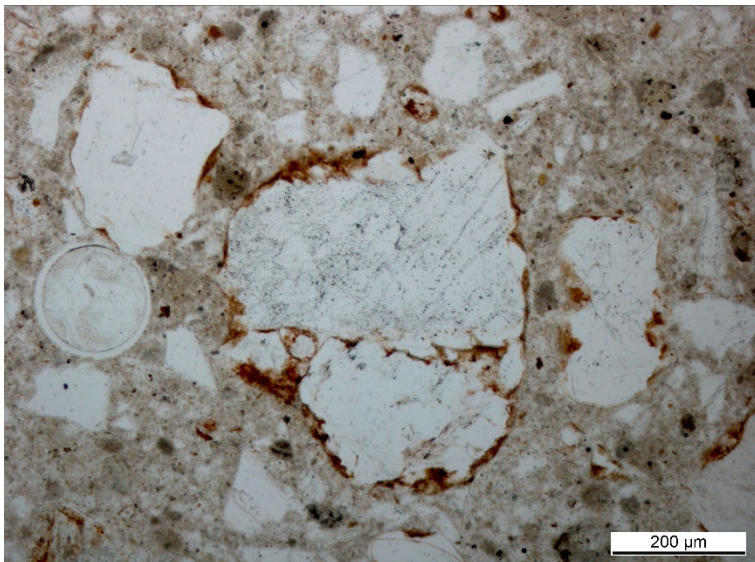


Abb. 18  
Referenzprobe PF3.2a  
Gefüge mit farbigen Zuschlagskörner  
(Eisenoxid/hydroxid-Saum) und Mikrosilica-  
Kugeln.  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 10x

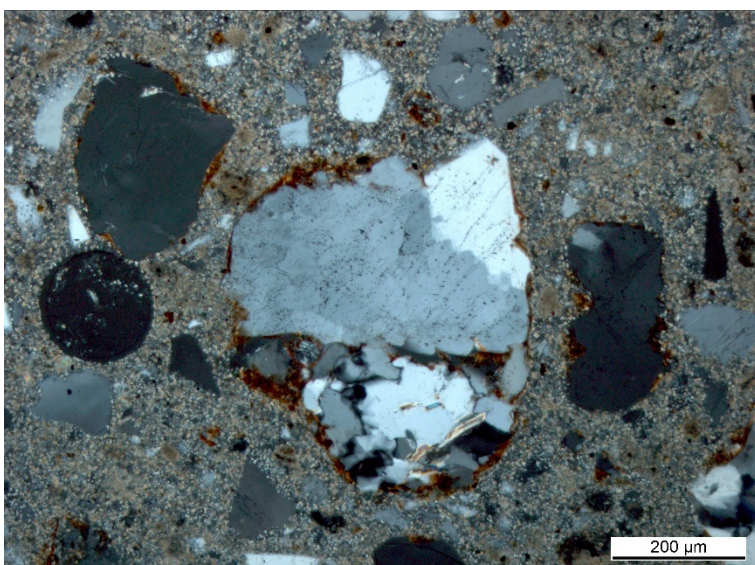


Abb. 19  
Referenzprobe PF3.2a  
Gefüge mit farbigen Zuschlagskörner  
(Eisenoxid/hydroxid-Saum) und Mikrosilica-  
Kugeln.  
Polarisationsfilter; gekreuzt.  
Objektiv: 10x

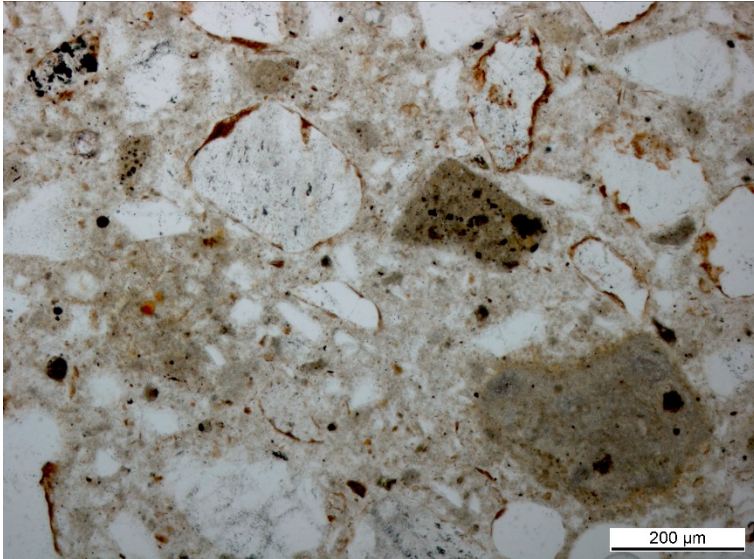


Abb. 20  
Referenzprobe PF3.2a  
Gefüge mit primärem, freien Kalk.  
Grobkörnige BM-Matrix  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 10x

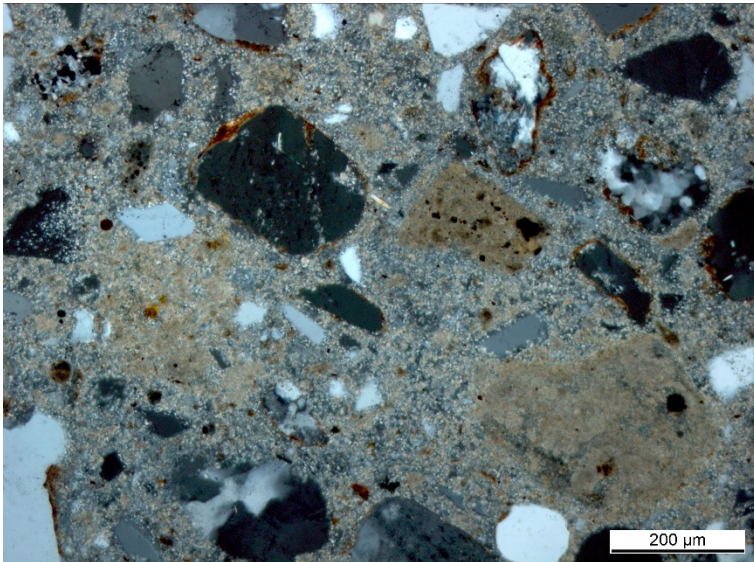


Abb. 21  
Referenzprobe PF3.2a  
Gefüge mit primärem, freien Kalk.  
Grobkörnige BM-Matrix  
Polarisationsfilter; gekreuzt.  
Objektiv: 10x

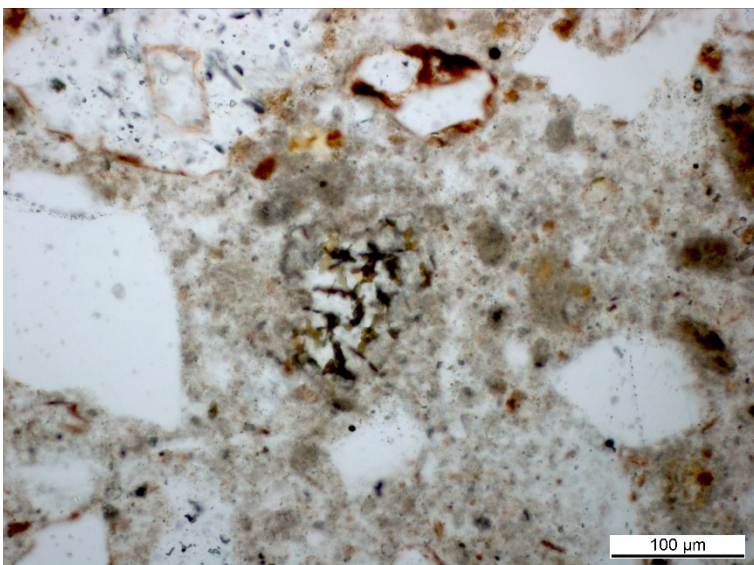


Abb. 22  
Referenzprobe PF3.2a  
Gefüge mit Portlandzement ähnlichem  
Korn. Grobkörnige BM-Matrix  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 20x

### 7.4.6.2 Dünnschliffe Probe Mörtel PF3.10b bewittert

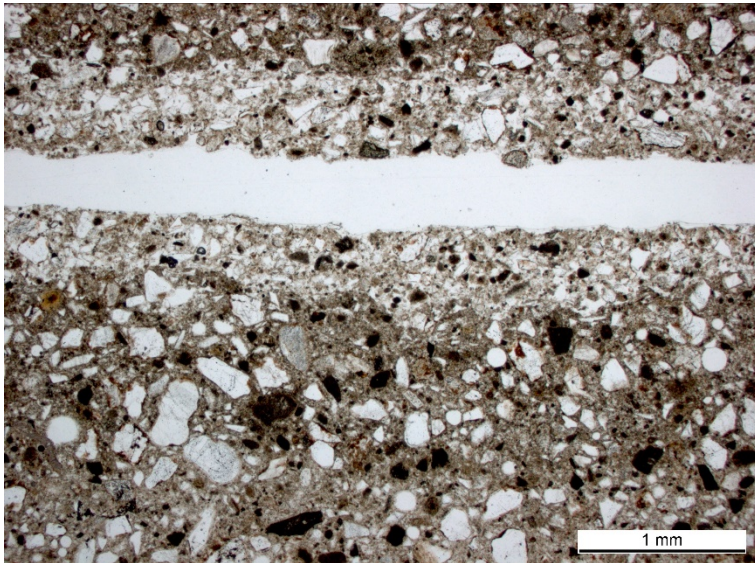


Abb. 23  
Probe PF3.10a  
Gefüge mit gegeneinander orientierten  
Oberflächen. Übersicht.  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 2,5x

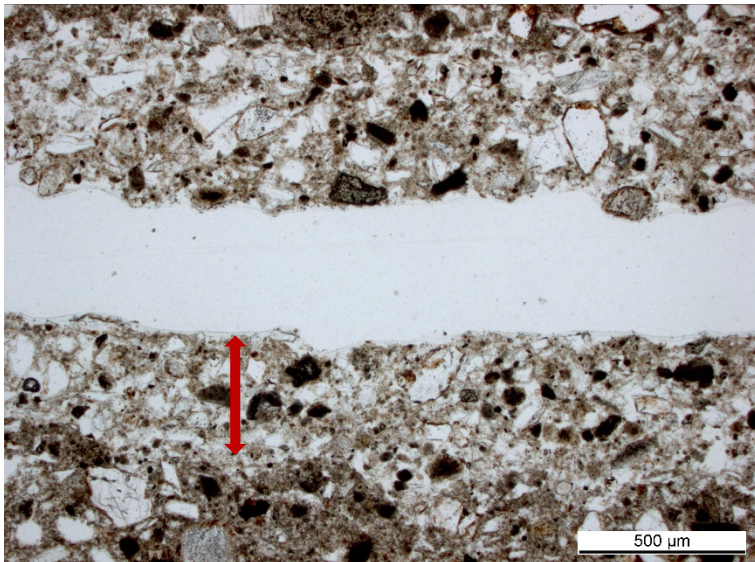


Abb. 24  
Probe PF3.10a  
Gefüge mit gegeneinander orientierten  
Oberflächen. Kalk-Auslaugung in  
Oberflächennähe (Bereich roter Pfeil)  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 5x

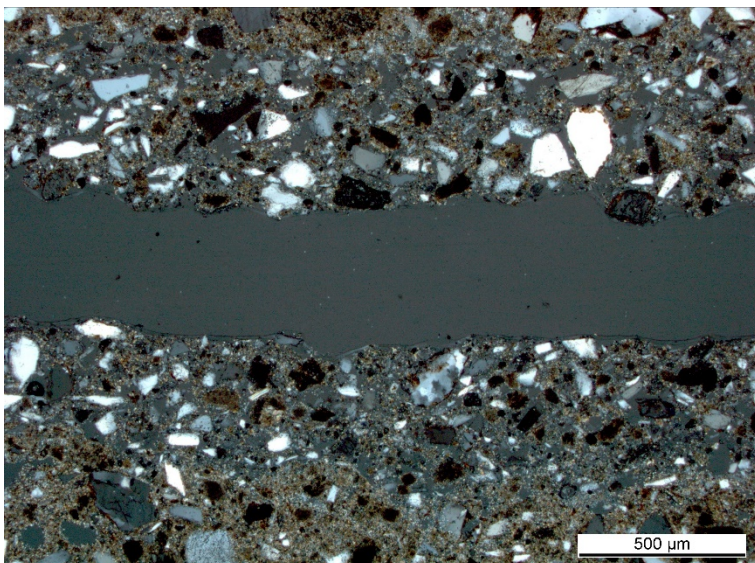


Abb. 25  
Probe PF3.10a  
Gefüge mit gegeneinander orientierten  
Oberflächen. Kalk-Auslaugung in  
Oberflächennähe  
Polarisationsfilter; gekreuzt.  
Objektiv: 5x

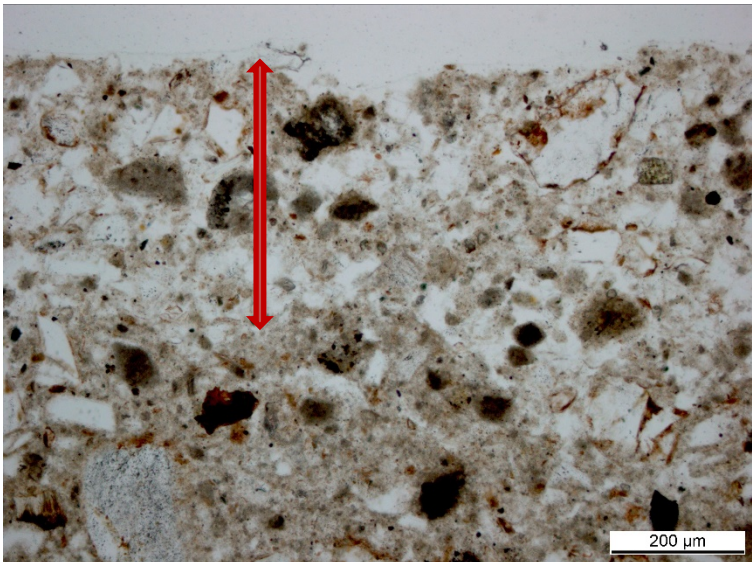


Abb. 26  
 Probe PF3.10a  
 Gefüge mit Kalk-Auslaugung in  
 Oberflächennähe (Bereich roter Pfeil)  
 Polarisationsfilter; parallel.  
 Objektiv: 10x

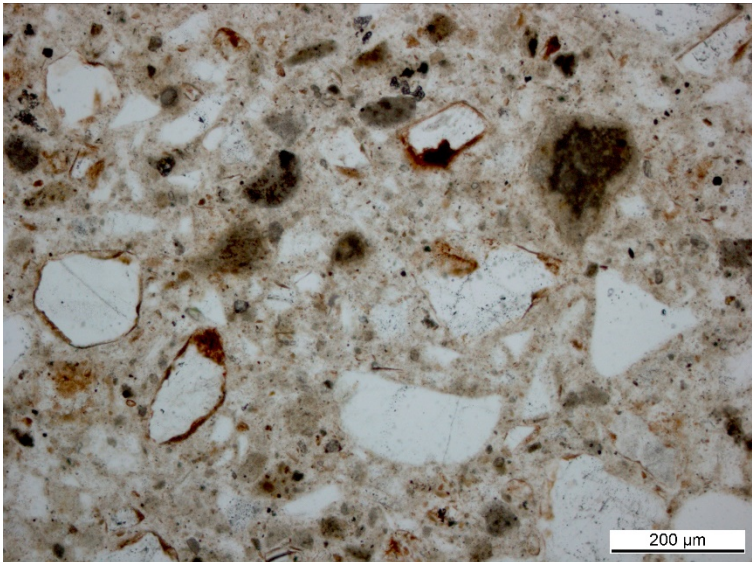


Abb. 27  
 Probe PF3.10a  
 Gefüge des Mörtels im Inneren der  
 Probe/Kalk-Auswaschung. BM  
 Veränderung. Bildung grobkristalliner  
 Kalkcluster  
 Polarisationsfilter; parallel.  
 Objektiv: 10x

#### 7.4.6.3 Dünnschliffe Referenzprobe Mörtel PF3.2b mit Schutzlasur (KEIM Purkristalat No.9166) unbewittert

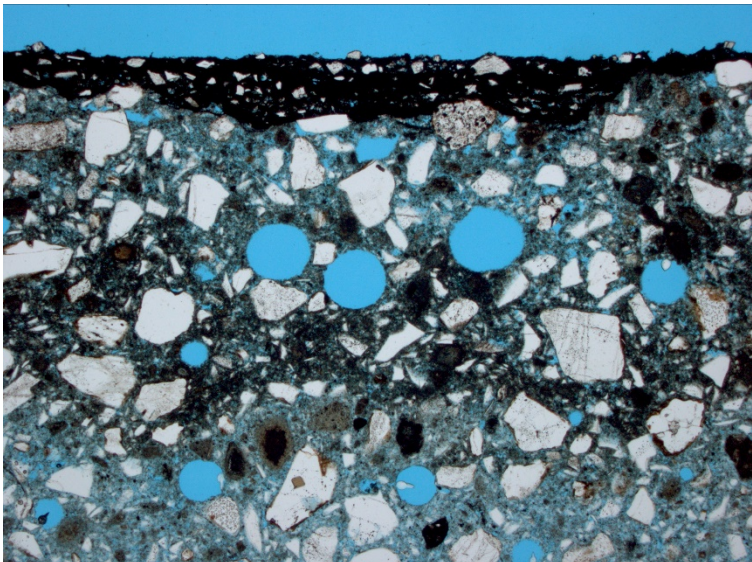


Abb. 28  
 Referenzprobe PF3.2b  
 Mörtel mit Schutzlasur. BM erscheint  
 inhomogen (dunkler Streifen am unter  
 Bildrand)  
 Polarisationsfilter; parallel.  
 Objektiv: 50x

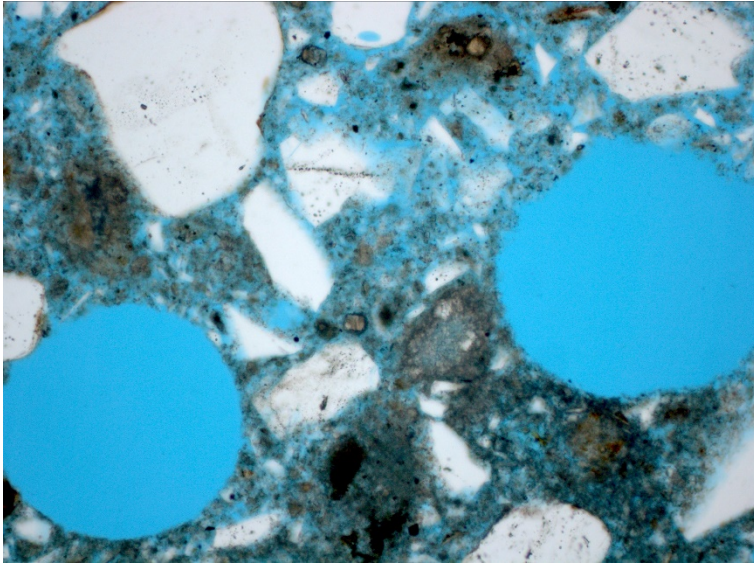


Abb. 29  
Referenzprobe PF3.2b  
Mörtel mit Schutzglasur Detail aus *Abb.28*  
Inhomogenität (höher BM-Gehalt in der unteren Bildhälfte sichtbar)  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 20x

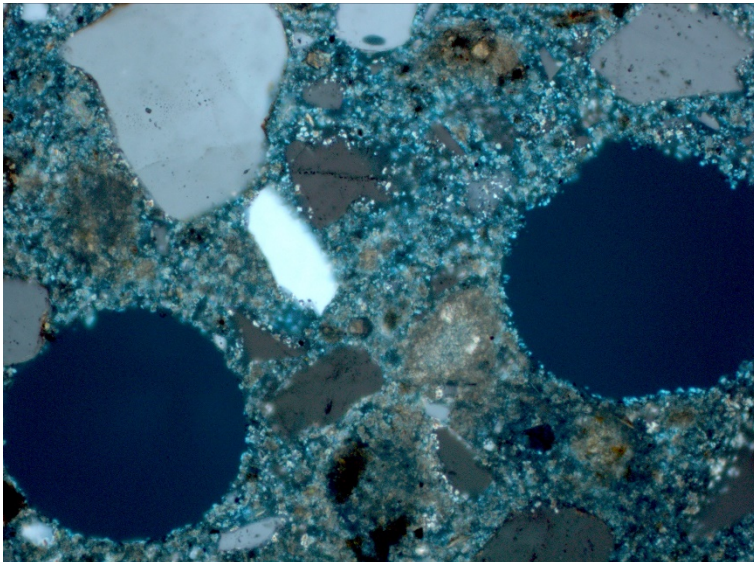


Abb. 30  
Referenzprobe PF3.2b  
Mörtel mit Schutzglasur Detail aus *Abb.28*  
Inhomogenität (höher BM-Gehalt in der unteren Bildhälfte sichtbar)  
Polarisationsfilter; gekreuzt.  
Objektiv: 20x

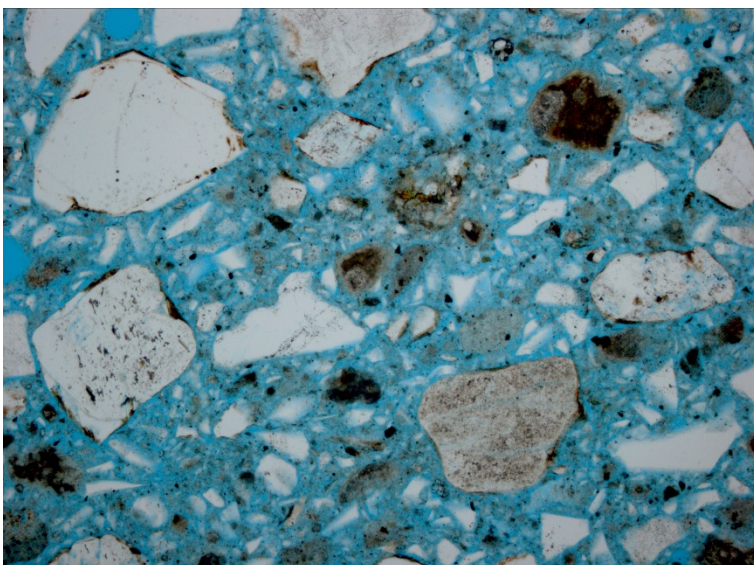


Abb. 31  
Referenzprobe PF3.2b  
Gefüge im Inneren der Probe. Hoch porös  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 10x

#### 7.4.6.4 Dünnschliffe Referenzprobe Mörtel PF3.6b mit Schutzlasur (KEIM Purkristalat No.9166) bewittert

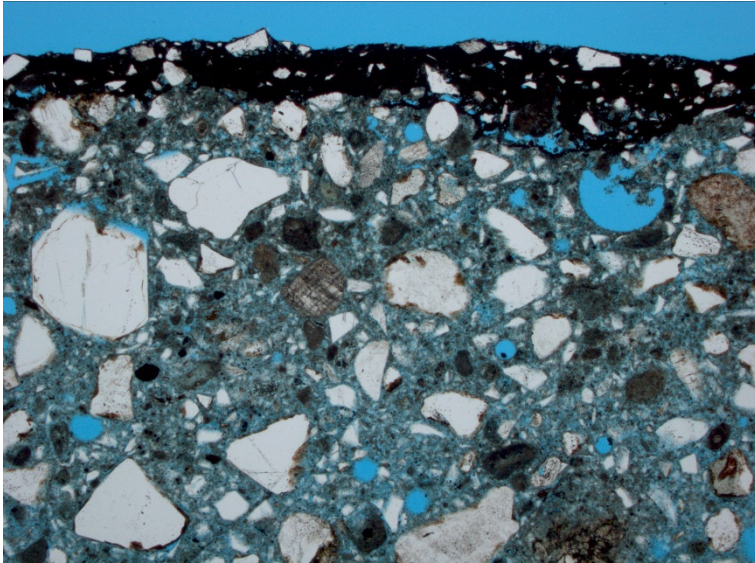


Abb. 32  
Probe PF3.6b  
Mörtel mit Schutzlasur. Homogenes Gefüge bis unmittelbar an die Lasur. Keine BM-Inhomogenität  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 5x

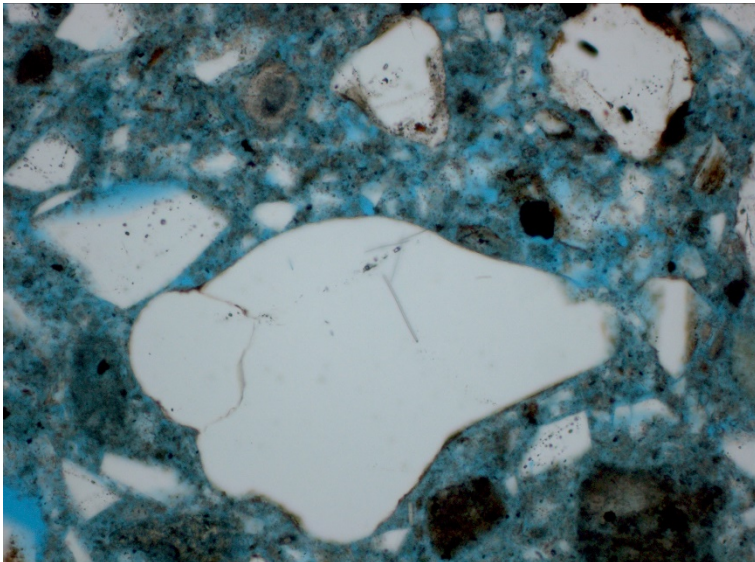


Abb. 33  
Probe PF3.6b  
Detail aus *Abb.32* Leicht körniges Bindemittel (Kalkkörchen)  
Polarisationsfilter; parallel.  
Objektiv: 20x

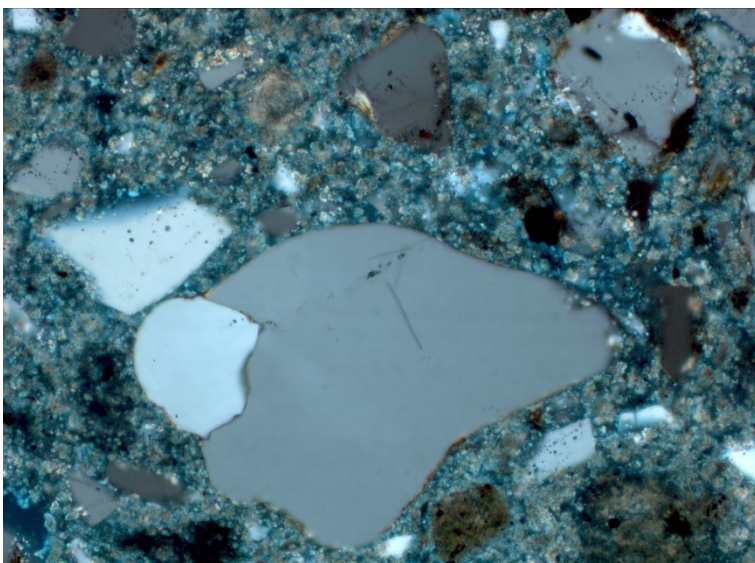


Abb. 34  
Probe PF3.6b  
Detail aus *Abb.32* Leicht körniges Bindemittel (Kalkkörchen)  
Polarisationsfilter; gekreuzt.  
Objektiv: 20x

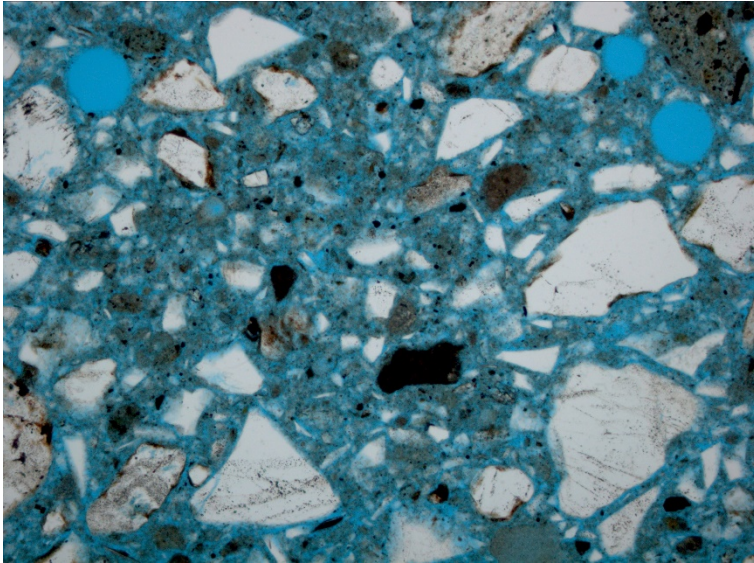


Abb. 35  
Probe PF3.6b  
Gefüge des Mörtels im Inneren der Probe. "normales" Gefüge. Tendenziell etwas BM-ärmer als unter der Lasur  
Polarisationsfilter, parallel.  
Objektiv: 10x

#### 7.4.7 Zusammenfassung der Auswertung Dünnschliffe

Anhand der unbeschichteten Probe PF3.10a zeigen sich bereits nach einjähriger Bewitterung gegenüber der Referenzprobe PF3.2a Kalkauswaschungen aus dem Bindemittelgefüge. Diese Mörtelmischung befindet sich seit September 2016 an der Probeachse einer Fensterlaibung der Konstantinbasilika Trier (W1-N15). Hingegen ist bei der mit Schutzlasur versehenen Probe mit gleicher Mörtelmischung (PF3.6b) kein Einfluss der Bewitterung auf den Mörtel erkennbar. Auch an den Schlämmen selbst sind keine Unterschiede zwischen bewitterter und unbewitterter Probe ersichtlich. An der unbewitterten Referenz (PF3.2b) ist unter der Schutzlasur eine vermutlich herstellungsbedingte BM-Anreicherung vorhanden (im mikroskopischen Bild *Abb.28*, als dunkler Streifen). Die bewitterte Probe (PF3.6b) stellt sich weitestgehend homogen dar. Eine leichte Tendenz zur BM-Anreicherung unter der Lasur ist zwar auch hier vorhanden, aber im mikroskopischen Bild nicht erkennbar. Die an den Proben PF3.10a zuvor untersuchten vorhandenen Gefügemerkmale (Auswaschungen, Calcitvergrößerung) sind an keiner der beiden Proben (PF3.2b und PF3.6b) vorhanden.

Der Auftrag einer Schutzlasur auf den Schutzputz aus Romazement zur Verbesserung der Langzeithaltbarkeit, kann also nach den bisherigen Ergebnissen als zielführend eingeschätzt werden. Nach dem Bewitterungsverhalten des Schutzputzes ohne Lasur ist sogar der Auftrag einer solchen vor dem Ablauf eines Jahres als sinnvoll anzusehen.



## 8. Konstantinbasilika Trier

### 8.1 Testfläche

Im Zuge der Untersuchungen zur Wahl des finalen Schutzputzmörtels für die Fassadenmalereien der Konstantinbasilika Trier, kamen im Rahmen einer Testflächenerstellung im August 2016 der im Projekt konzipierte Mörtel PF3a zum Einsatz. Die gesamte Fensterlaibung W8 (West Seite) wurde im Bereich der originalen Putzoberflächen mit dem Schutzputzsystem (Cyclododecan/Armierung/ Mörtel) versehen. Durchgeführt wurde diese Maßnahme von der Firma Hangleiter, Otzberg.

Die Begleitung dieser Maßnahmen lag außerhalb des geförderten Forschungsprojekts, wird aber aufgrund der Übernahme der im Projekt entwickelten Mörtelrezeptur für die Testfläche dokumentiert. Die Darstellung des Zustands der Testfläche nach 1 Jahr Standzeit (Sep. 2017) erfolgt durch fotografische Aufnahmen und wurde durch Dipl.-Rest Friderike Funke durchgeführt und bewertet.



Abb. 36  
Einrüstung der Probeachse Fensterlaibung  
W8 (2017)









### 8.2 Evaluation der Pilotfläche Konstantinbasilika/W1.8 N-W1.8 S (Sep. 2017)

Die Oberflächen der Überputzungen sind stabil. Bereits 2016 nach der Maßnahme vereinzelt beobachtete Risse haben sich nicht deutlich vergrößert oder verlängert. Es sind keine neuen Risse hinzugekommen. Es sind keine Abrisse an den Rändern zwischen den Überputzungen und den darunterliegenden Restaurierungsputzen zu beobachten.

An der Fassade ordnet sich die aktuelle Farbigkeit der Überputzung optisch unter den Gesamteindruck aller Architekturglieder.

Die Fotos (2017) der Tabelle 18 zeigen die Testflächen in der entsprechenden Achsengliederung von oben nach unten.

Tab. 18 Dokumentation der Testflächen Konstantinbasilika Trier 2017

W1.8 N	W1.8 S
	
	
<b>Detail</b> 	
	

## 9. Identifikation relevanter Kenndaten für die THz-Analyse

In der ersten Projektphase erfolgte die Charakterisierung von Mörteln, Bindemitteln, Zuschlägen, Trennmitteln und Armierungsmaterial im THz-Frequenzbereich (Materialdatenbank) und die Identifizierung dielektrischer Parameter, auf deren Grundlage sich eine Aussage über den Materialzustand/Materialzusammensetzung treffen lässt. Nur mit Kenntnis der dielektrischen Eigenschaften lassen sich aus den Messdaten die Wechselwirkungen der THz-Wellen mit dem Rückschluss auf das Schichtsystem (Schutzputz - Trennmittel/Hohlraum – originale Oberfläche) ableiten und somit in einer Strukturanalyse und Bewertung (Defektdetektion, Wirksamkeit konservatorischer Maßnahmen) überprüfen.

Durch Messungen an den gefertigten Referenzprüfkörpern (Presslingen etc.) wurden Materialparameter wie der Brechungsindex und der Absorptionskoeffizient der Materialien in Zusammenarbeit mit der HFuLT ermittelt und ausgewertet. Gemessen wurde im Transmissionsaufbau. Bei der Herstellung der Presslinge unter Druck zeigte sich das diese, bis auf die reinen Bindemittel **TK**, **PFZ** und **RK**, nicht ohne die Zugabe eine PP-Pulvers<sup>23</sup> gefertigt werden konnten.

Bei den mit PP hergestellten Presslingen, musste somit die Materialdichte über die Masse beider Komponenten und deren Volumenverhältnis zueinander berechnet werden. Der Dichtewert dient zur genauen Berechnung der Materialparameter des Brechungsindex und der Absorptionskoeffizient in THz-Strahlung.

Die angestellte Berechnung basiert darauf, dass die Komponenten "Additiv" und "PP" homogen vermischt sind und sich das Massenverhältnis beim Einfüllen in die Tablettenform nicht verändert, hat, sondern konstant blieb.

Die Messung für die jeweilige Probendicke, erfolgte mittels einer Mikrometerschraube (Mittelwert aus vier Messungen), oder wurde durch Analyse der Auswertesoftware des Messsystems bestimmt.

Für die Kenndatenermittlung dienten pro Material jeweils 1 bis 3 Prüfkörper (Ausnahme Cyclododecan und Mowilith® LDM 6880). Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern wurden für jede Punktmessung jeweils die Daten von vier Messungen der Probe, sowie sechs Referenzmessungen gemittelt. Die Referenzmessungen wurden je zur Hälfte vor, bzw. nach der Probemessung durchgeführt um evtl. auftretende Schwankungen des Messsystems auszugleichen.

Die Daten jeder Messung wurden aus dem Mittelwert von 4 genau übereinanderliegenden Punktemessungen ermittelt. Dieses diente dem Ausschluss von möglichen verrauschten Signalen durch Schwankungen im System. Vor und nach jeder Materialmessung wurden drei Referenzmessungen unter Stickstoffatmosphäre vorgenommen. Aus diesen Daten ergab sich der jeweilige Referenzpuls für das untersuchte Material.

Trotz der Herstellung von 3 Presslingen unterschiedlicher Dicke konnten keine Auswertung des Mörtels NHL-P vorgenommen werden. Bei allen gemessenen Presslingen traten störende Doppelpulse auf, die auf eine Streuung innerhalb der Materialmischungen hindeuten. Für diesen Mörtel konnten keine Charakterisierung in THz-Strahlung vorgenommen werden.

Ebenso konnte aus den Armierungsfasern (Para-Aramidfasern, KEVLAR®) kein Pressling hergestellt und somit keine Auswertung vorgenommen werden. Für die Charakterisierung von Cyclododecan erfolgte dessen Aufstrich auf einen Glasträger. Zunächst musste der Glasträger charakterisiert, und anschließend das darauf applizierte Cyclododecan gemessen werden. Um die Oberfläche flach und plan für die Messung zu gestalten erfolgte der Auftrag mehrschichtig. Die Dicke der Glasplatte und der Cyclododecanschicht betrug etwa 0,98 mm bzw. 5,4 mm. Die Extraktion der Materialparameter erfolgte mit der Teralyzer-Software, unter Berücksichtigung dieses Zweischichtsystems.

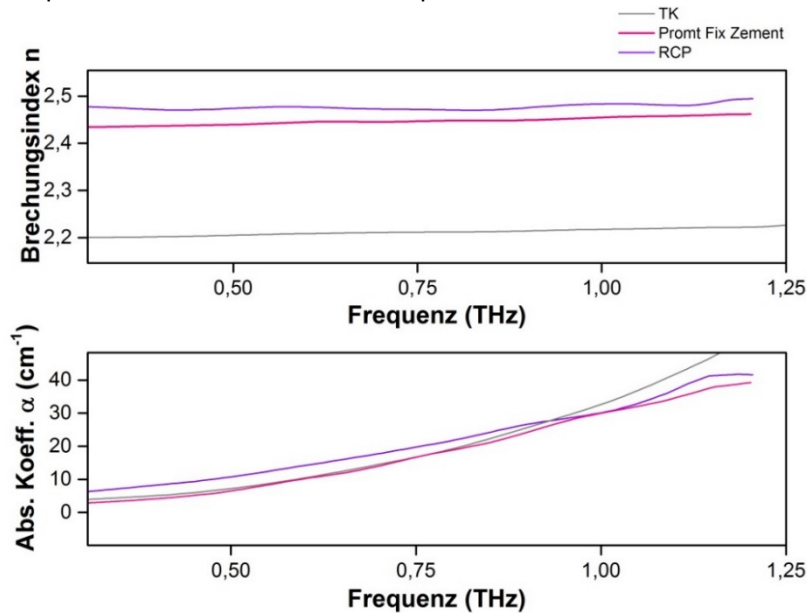
---

<sup>23</sup> PP Bezeichnung für Polypropylen

## 9.1 Bindemittelrohstoffe

### 9.1.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz

Die folgenden Grafiken zeigen die für die Bindemittelrohstoffe aus *Tab.1* ermittelten Brechungsindizes und Absorptionskoeffizienten im THz-Frequenzbereich.

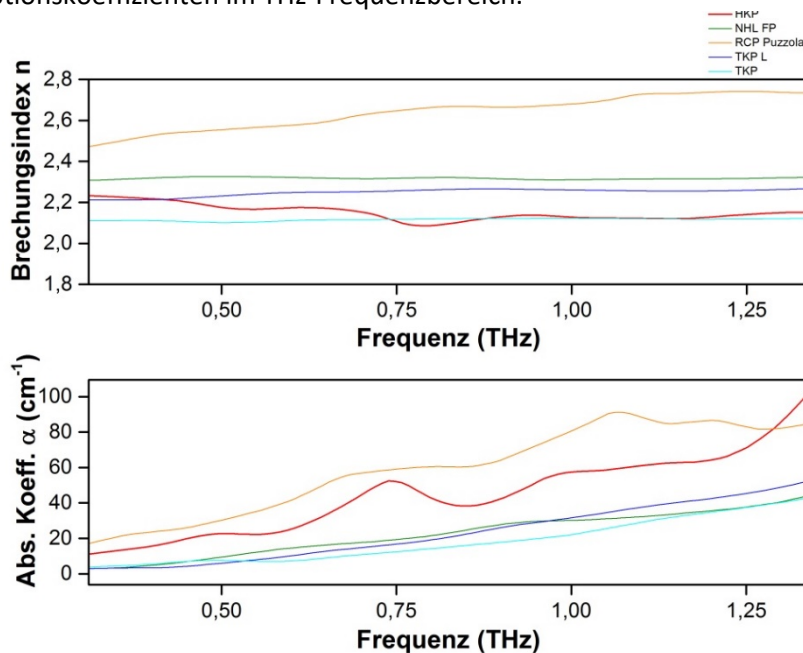


Diagr. 35 Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) der Bindemittelrohstoffe aus *Tab.1*

## 9.2 Mörtelmischung vom Werk

### 9.2.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz

Die folgenden Grafiken zeigen die für die Mörtel aus *Tab.2* ermittelten Brechungsindizes und Absorptionskoeffizienten im THz-Frequenzbereich.

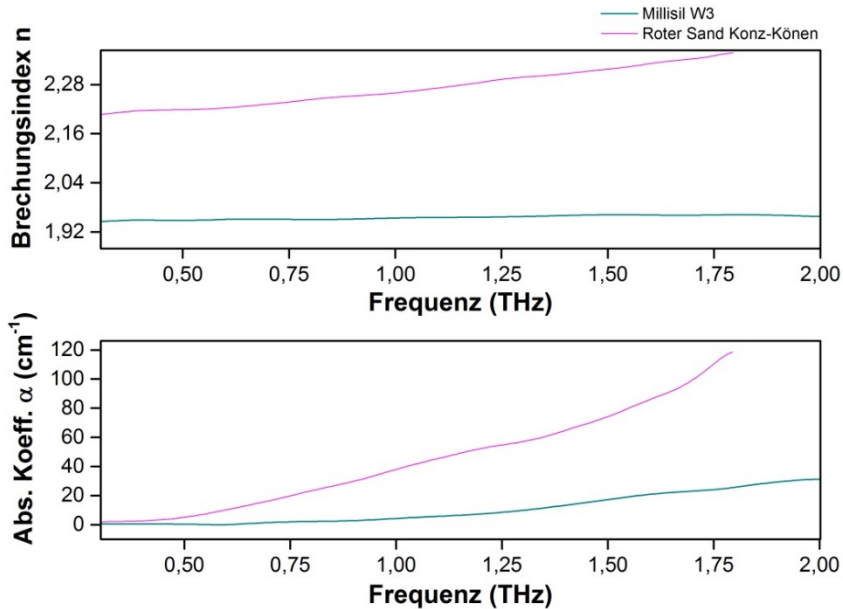


Diagr. 36 Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) der Mörtel aus *Tab.2*

### 9.3 Zuschläge

#### 9.3.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz

Die folgenden Grafiken zeigen die für die Mörtel aus *Tab.3* ermittelten Brechungsindizes und Absorptionskoeffizienten im THz-Frequenzbereich.

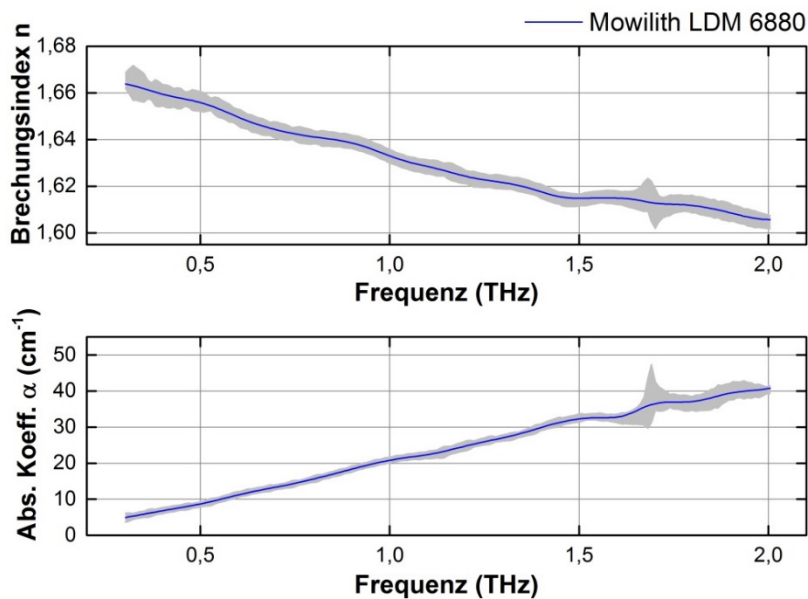


Diagr. 37 Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) der Zuschläge aus *Tab.3*

### 9.4 Mowilith® LDM 6880 (Firma Ha-Be Betonchemie)

#### 9.4.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz

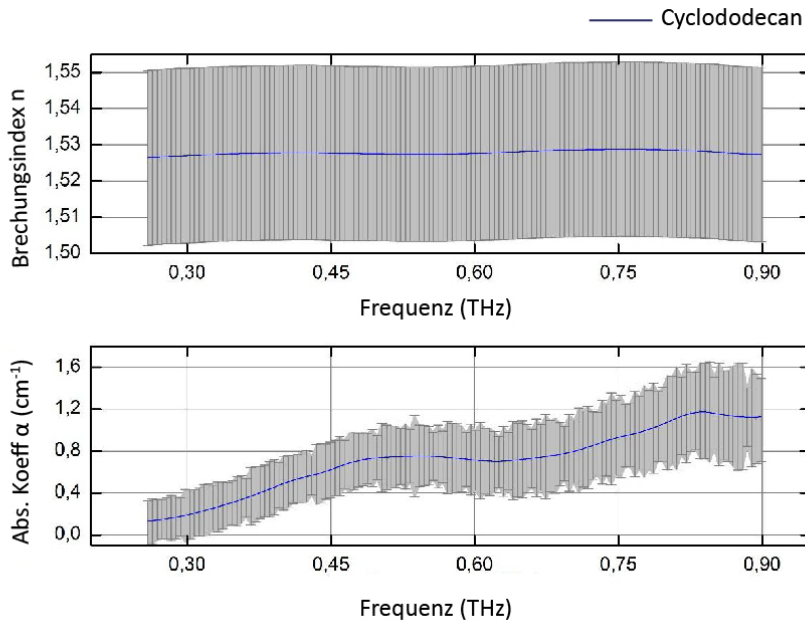
Die folgenden Grafiken zeigen die für Mowilith® LDM 6880 ermittelten Brechindizes und Absorptionskoeffizienten im THz-Frequenzbereich. Abweichend von den an Presslingen vorgenommenen Messungen, wurden Aufstriche auf Objektträgern eingemessen.



Diagr. 38 Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) von Mowilith® LDM 6880

## 9.5 Cyclododecan

### 9.5.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz

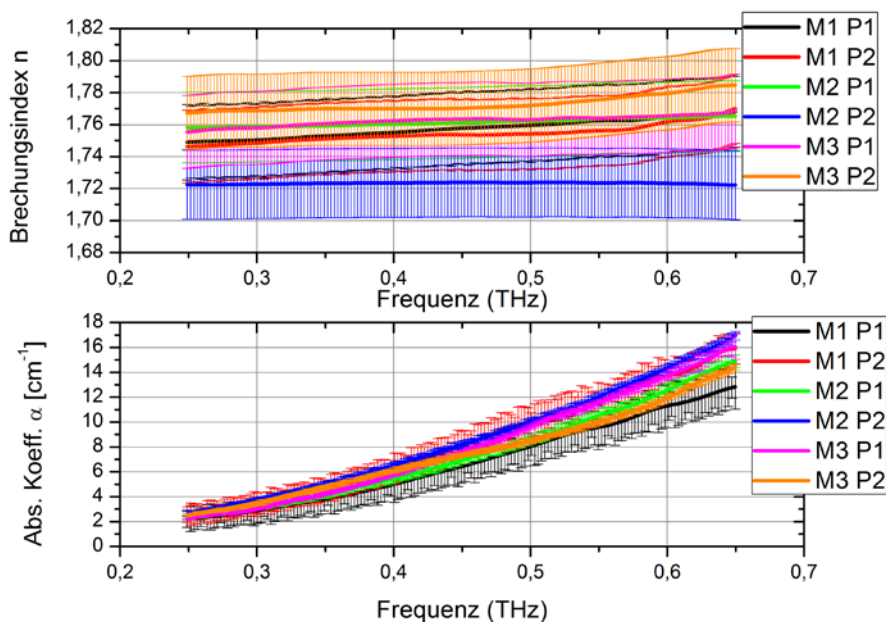


Diagr. 39 Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) von Cyclododecan

## 9.6 Mörtel PF3a

### 9.6.1 Auswertung des Brechungsindex und Absorptionskoeffizient für THz

Die analysierte Mörtelmischung PF3a wurde für die Schutzputze der Pilotfläche 2016 genutzt und wurde daher zusätzlich eingemessen. Um den Einfluss durch die unterschiedliche Durchmischung der Grobanteile/roter Sand auf die Detektierbarkeit des THz-Signals auszuschließen wurden 3 Proben (M1-M3) an je 2 Punkten (P1-2) bezogen auf 4 Referenzmessungen ausgewertet. Die Proben waren alle ca. 6,5 mm dick, daher ist eine Auswertung nur bis 0,65 THz möglich.



Diagr. 40 Brechungsindex (oben) und Absorptionskoeffizient(unten) des Mörtels PF3a

## 9.7 Zusammenfassung der Materialdatenbank

Um im weiteren Verlauf des Projektes eine vereinfachte Auswertung der Messdaten bzgl. der Signallaufzeiten und somit der Schichtdicken auch bei Mischungen der Materialien zu ermöglichen, wurden aus den dargestellten Messergebnissen *Diagr.36-39* der jeweilige Brechungsindex bei 0,5 THz *Tab.40* bei 0,65 THz bestimmt und in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tab. 19 Brechungsindex der untersuchten Materialien bei einer Frequenz von 0,75 THz

Material	Brechungsindex	Material	Brechungsindex
HKP	2,19	M	1,95
TKP	2,10	RS	2,23
TK-PL	2,25	Mowilith	1,6
NHL-FP	2,31	Cyclododecan	1,53
RP	2,64	PF3a	1,7
RK	2,47		
TK	2,21		
FPZ	2,44		

## 10. Ermittlung des Abbindeverhalten / Materialfeuchte für die Messbarkeit mit THz- Strahlung bei Reflexionsmessungen

Um die Auswertung der Messbarkeit von THz-Pulsen an feuchtem Mörtel bewerten zu können, wurden Prüfkörper definierter Dicke (0,5 cm) im Reflexionssaufbau (*siehe Abb38.*) gemessen. Parallel zu den THz-Messungen wurden die Gewichtsabnahme und Klimadaten aufgezeichnet und gemeinsam mit den THz-Daten ausgewertet. Dies geschah, um eine präzise Aussage zum aktuellen Feuchtegehalt des jeweiligen Mörtels und den klimatischen Bedingungen während der Abbindung treffen zu können.

Um auch verlässlich Aussagen zur Detektierbarkeit der Rückseite zu erhalten, wurde die Referenzmessung an einem Metall außerhalb der Messlinie ermittelt. Dies diente vor allem dazu, den THz-Puls ausschließlich zur Durchmessung der Mörtel zu nutzen und nicht durch vorgeschaltete Materialien zu dämpfen. Um verlässlich ein Signal von der Rückseite der Probe zu erhalten, wurde entschieden, den Mörtel auf eine an dem Probenhalter angebrachte Metallfolie aufzutragen (*siehe Abb.37*). Vergleichende THz-Messungen wurden außerdem an identischen Mörtelmischungen mit unterschiedlichen Bindemitteln (RCP Romazement und Prompt Fix-Zement®) vorgenommen.

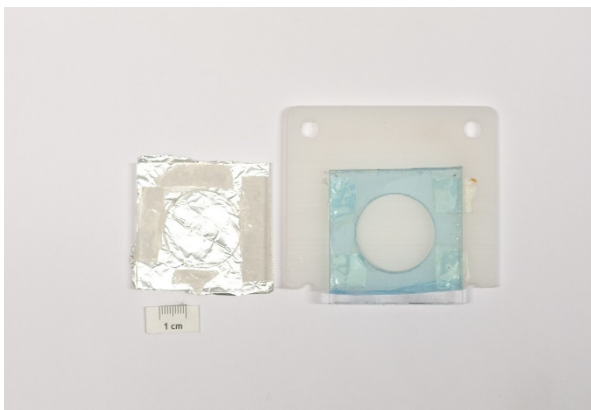


Abb. 37

Links: Probenhalter mit Metallfolie an der Rückseite

Rechts: vorheriger Probenhalter mit HDPE Referenz



Abb. 38  
Veränderter THz-Reflexionsmessaufbau mit Waage  
und Klimalogger

### Versuchsdurchführung

Für die Halterung der Probe wurde eine 5 mm starke, mit runder Aussparung versehene Plexiglasplatte genutzt. Eine einseitige Abklebung erfolgte mit Alufolie. Diese Folie wurde für die Langzeitmessung benötigt, um durch die Materialeigenschaften der Totalreflexion von Metall in THz-Strahlung in der Auswertung verlässlich nachvollziehen zu können, bei welchen Materialbedingungen (Feuchtegehalt) Mörtel in THz-Strahlung messbar ist. Während der gesamten Messzeit fand parallel ebenfalls an einer Metallplatte die Messung des Referenzpulses statt. Diese Referenz wurde auf Grund der Langzeitmessung von über 24h benötigt, um in der Auswertung nachvollziehen zu können, ob das System (Laser etc.) während der gesamten Messzeit stabil gelaufen ist. Platziert im THz-Fokuspunkt auf der Wägeplatte<sup>24</sup> erfolgte die min. 25h Messung in Reflexion unter Aufzeichnung der Klimadaten, eines in der Waage platzierten Klimaloggers<sup>25</sup>. Die Waage war zum Zeitpunkt der Messung zu allen Seiten geschlossen.

Die einseitige Öffnung in Richtung THz-Messkopf wurde mit Folie geschlossen und im Bereich des Strahlengangs mit einem Loch versehen, um ein stabiles Klima während des Abbindprozesses zu ermöglichen. Eine optimale relative Luftfeuchte für die Mörtelabbindung von 70-90 % rLF konnte auf Grund der stabilen Laborbedingungen nicht geschaffen werden.

Die Trocknung des Mörtels erfolgte in Anlehnung an die Originalflächen über eine Oberfläche.

Die Erstellung der Mörtelmischungen erfolgte in zeitlicher Anlehnung an die Herstellung im Projekt. Da nur kleine Mengen verwendet wurden geschah die Mischung händisch. Die Messungen wurden 1 min nach Fertigstellung der Mörtelmasse gestartet. Es erfolgten Messungen der Mörtelmischungen RK1.1 und RK1.2 (*ohne Mowilith*), sowie im gleichen Mischungsverhältnis mit dem Bindemittel Prompt Fix-Zement® die Mörtelmischungen PF1a und PF3a.

<sup>24</sup> Kern Waage ARS 220-4; 220max; 0,001g

<sup>25</sup> TFA Klimalogg Pro Termo-Hygro-Station



### 10.1 Auswertung der THz-Langzeitmessung zur Mörteltrocknung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Langzeitmessung, an trocknenden Mörteln RK1.1, RK1.2 und PF3a in Diagrammen mit folgender Aufteilung aufgeführt:

Oberes Diagramm:

Schwarz: Zeigt die Peak to Peak Amplitude des Pulses von der Vorderseite, Normalisiert auf den Referenzpuls in Einheit [%].

Blau: Gewicht [g], das auf der Waage ermittelten Probengewicht während der Messung

Mittleres Diagramm:

Schwarz: Temperatur in der Waage [°C] während der Messung.

Blau: Luftfeuchte in der Waage [%] während der Messung.

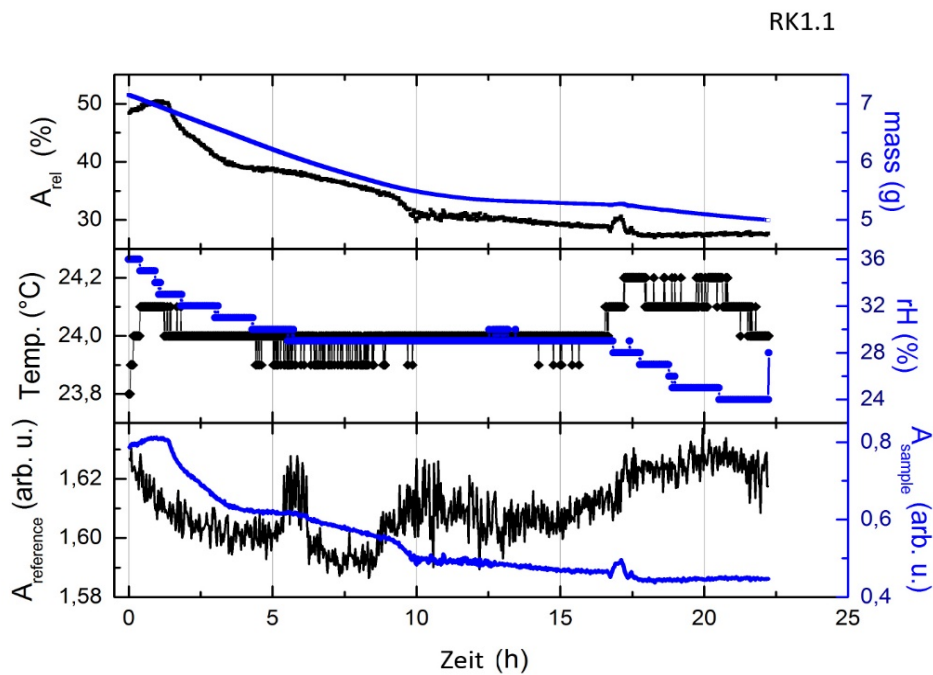
Unteres Diagramm:

Schwarz: Amplitude des Referenzpulses

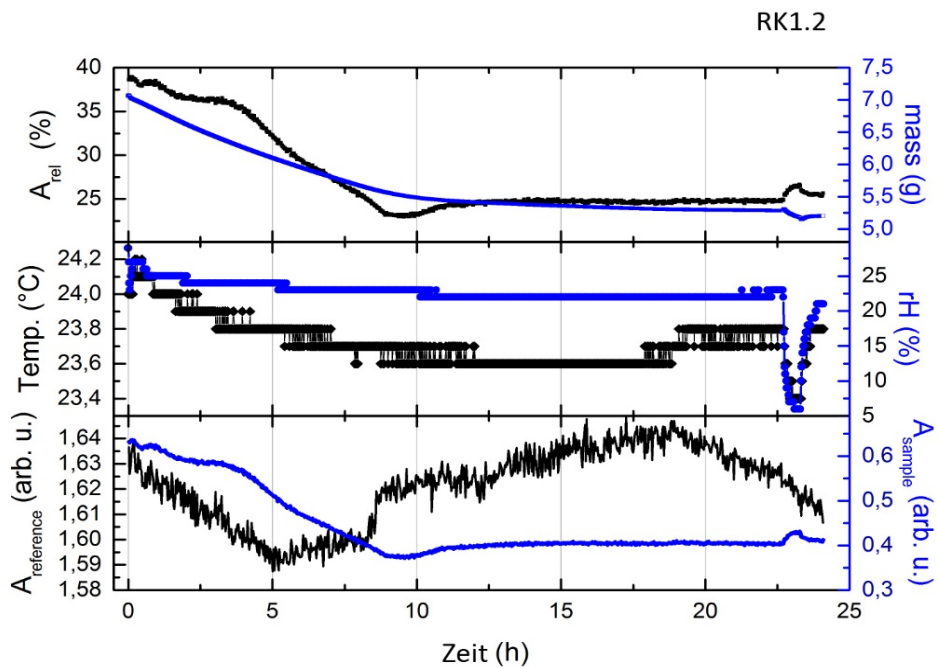
Blau: Amplitude des Pulses von der Rückseite

Beiden Kurven zusammen ergeben die schwarze Kurve im obersten Graph

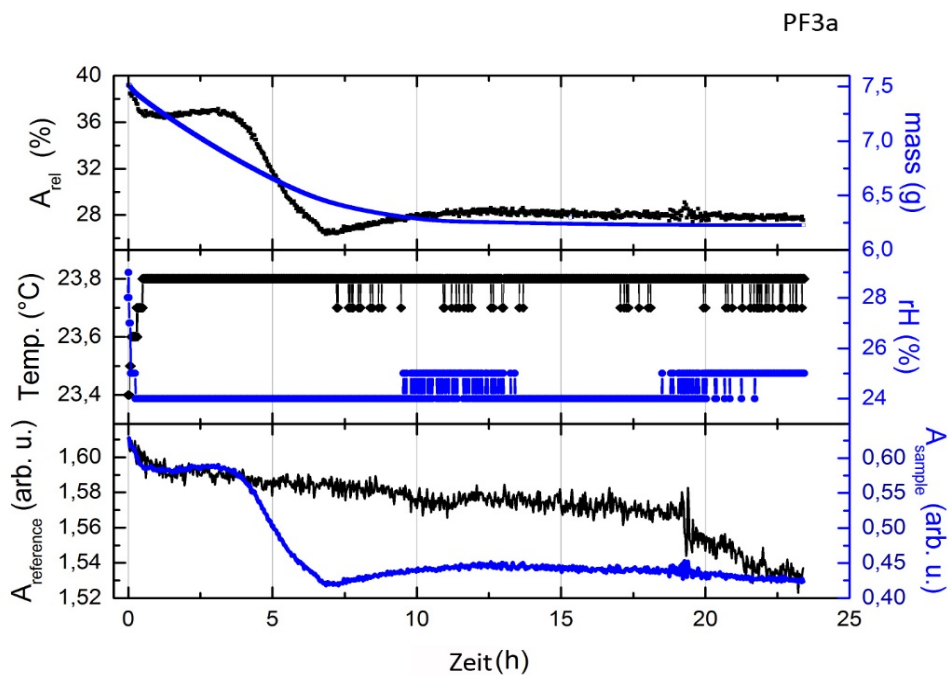
Die x-Achse beschreibt die Messzeit [h].



Diagr. 41 THz-Langzeitmessung Mörtel RK1.1



Diagr. 42 THz-Langzeitmessung Mörtel RK1.2



Diagr. 43 THz-Langzeitmessung Mörtel PF3a

In den zwei Messreihen zeigt sich, dass die Temperatur mit 23-24°C während der gesamten Messzeit annähernd stabil bleibt. Alle Messungen verzeichnen jedoch eine Abnahme bzw. Schwankungen der rLF %. Dies spricht zum einen für eine Nutzung der Umgebungsfeuchte für den Abbindeprozess des jeweiligen Mörtels, zum anderen auch für den Einfluss des für das THz-System genutzten Stickstoffs. Um störende Wasserlinien im THz-Signal zu vermeiden erfolgte die Verpackung und Flutung mit Stickstoff.

Durch die unmittelbare Nähe zur Öffnung der Waage, vor die der Messkopf (Detektor) platziert war, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass Stickstoff in geringen Mengen in die Waage gelangt, und somit Einfluss auf die rLF% gehabt hat.

Auffällig ist, dass der Prompt Fix-Zement® gebundene Mörtel einen Sprung in der Amplitudenhöhe bei ca. 3,5h zeigt. Diese Erhöhung der Amplitude nach 3,5h bei vorherigem Abfall spricht zum einen für einen höheren Wassergehalt an der Oberfläche in kurzer Zeit (THz-Strahlung wird durch Wasser stark absorbiert). Dies würde bedeuten, dass sich im Laufe des Abbindeprozesses in dieser Zeit vermehrt Wasser im Bereich der Oberfläche ansammelt. Ein weiterer Sprung in der Amplitudenhöhe zeigt sich bei 10h. Nach einer Wassereinbindung der Mörtel, die auch durch die konstante Gewichtsabnahme der Proben belegt wird, zeigt sich eine erneute Anreicherung von Wasser/Wasserabgabe an der Oberfläche. Jedoch scheinen die Zuschläge (Millisil/roter Sand) diese Wasseranlagerung zeitlich zu beeinflussen. Der rote Sand mit seinem tonhaltigen Anteil spricht für eine längere Einbindung des Anmachwassers, der sich somit auch im späteren Anstieg der Amplitudenhöhe bei 10h widerspiegelt.

Hingegen zeigen die RCP gebundenen Mörtel einen eher geringen Sprung der Amplitudenhöhen bei 1,5h. Bei diesen Mörtelmischungen zeigt sich ein Unterschied eines zweiten Anstiegs in der Amplitudenhöhe der auch hier durch den Zuschlag (Millisil, roter Sand) beeinflusst wird. Bei diesen Mörtelmischungen zeigt sich ein Unterschied eines zweiten Anstiegs in der Amplitudenhöhe, der auch hier durch den Zuschlag beeinflusst wird ebenfalls wesentlich geringer bei RK1.1 (10h) und RK1.2 (10,5h). Der rote Sand mit seinem tonhaltigen Anteil spricht für eine längere Einbindung des Anmachwassers, der sich somit auch im späteren Anstieg der Amplitudenhöhe bei 7,5h widerspiegelt.

Anhand der vorliegenden Messergebnisse kann bereits eine Tendenz im unterschiedlichen Abbindeverhalten der Bindemittel abgelesen werden. Diese wird vor allem im Bereich des Monitorings als sehr nützliches Instrument gesehen. Vor allem Fragen hinsichtlich von Rissbildung durch zu geringe Materialfeuchte könnten hier perspektivisch durch den Einsatz von THz-Technik geklärt werden.

## 10.2 Auswertung der THz Langzeitmessungen

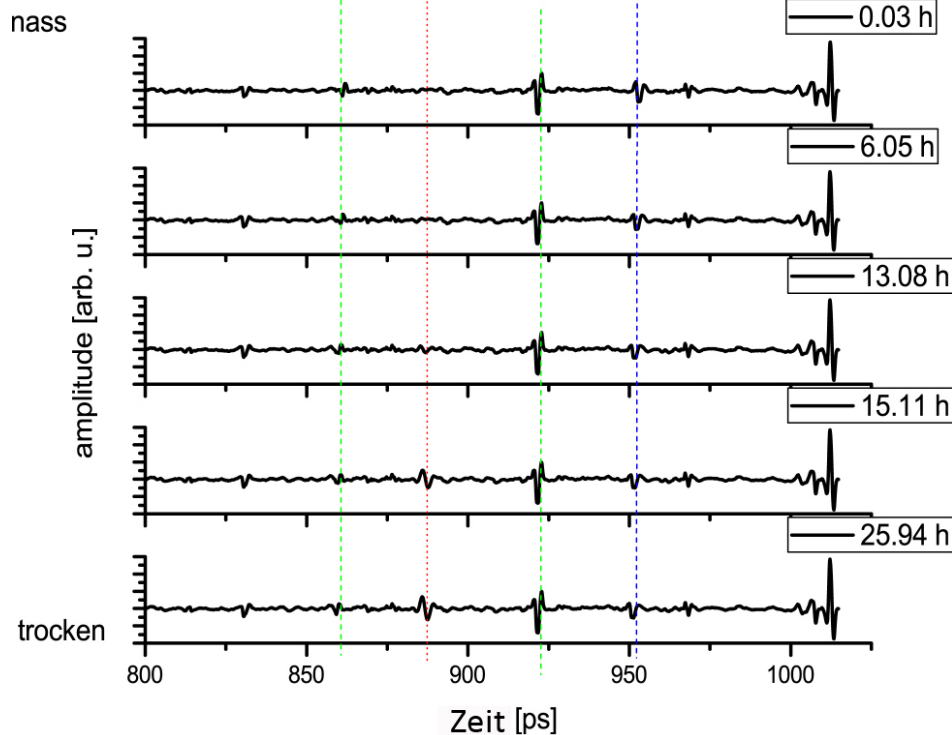
Um die Auswertung der Messbarkeit von THz-Pulsen an feuchtem Mörtelmaterial hinsichtlich der Darstellbarkeit der Rückseite der Mörtelfläche bewerten zu können wird in Kapitel 10.2.1 ein gemessener Prüfkörper mit einem erweiterten Messfenster [ps] in einer Time of Flight (ToF) Auswertung dargestellt. Anhand der Ablesbarkeit der reflektierten THz-Pulse an den jeweiligen Grenzflächen der 0,5 cm dicken Probe (Oberfläche/Rückseite) können Aussagen hinsichtlich der Detektierbarkeit der Rückseite bei einem bestimmten Feuchtegehalt immer in Bezug auf die Referenzmessung (Aluplatte) getroffen werden. Dies ist vor allem für die Untersuchung zur Anbindung von Mörteln an den Untergrund und mögliche Analysen von Ablösungen und Hohlräumen für die Untersuchungsziele des Projekts relevant. Exemplarisch wird dies im Folgenden an der Mörtelprobe PF2a dargestellt (siehe Diagr.44).

### 10.2.1 Darstellung der Messergebnisse/Mörtelmischung PF2a

THz Reflexionspunktmessung /Time of Flight

PF2a

- 1.Oberfläche
- Reflexion vom Beamsplitter
- Rückseite



Diagr. 44 Time of Flight Messung an der abbindenden Mörtelprobe PF2a

### 10.2.2 Auswertung der THz-Langzeitmessungen/Materialfeuchte

Bei Betrachtung aller Ergebnisse ist festzustellen, dass die Detektion, eines Übergangs zwischen Rückseite einer Mörtelschicht und einem Hohlraum mittel THz-TDS möglich ist. Die einzelnen Positionen der reflektierten Pulse sind von der Dicke und dem Brechungsindex des Materials abhängig. Es ist zu beachten, dass durch die Inhomogenität eines Materials, Pulse an verschiedenen Grenzflächen innerhalb des Materials gestreut und abgelenkt werden können. Der empfangene Puls der nach dem Durchlaufen der genannten Störungen gemessen wird ist dann nicht mehr differenzierbar, das THz-Signal geht im Rauschen auf. Bei den untersuchten und später zur Anwendung kommenden Mörtelmischungen, ist dies jedoch nach Auswertung der Messungen nicht der Fall.

Es zeigt sich, dass nach einer Messzeit von 13.08h bereits der von der Rückseite reflektierte Puls sichtbar ist. Unter Einbezug der dargestellten Messergebnisse zum Wasserverlust in [g] kann davon ausgegangen werden, dass nach einer rel. Massekonstanz trotz Restfeuchte THz-Messungen an frischen Putzoberflächen durchgeführt werden können.

Der Phasenübergang zwischen Material/Luft weist naturgemäß einen höheren Brechungsindexsprung und somit die Ausprägung eines klareren THz-Pulses, im Gegensatz zu im Brechungsindex ähnlichen Materialien auf. Auf Grund dessen kann angenommen werden, dass gemessene Pulse im Übergang Material/Material eine Dämpfung des Signals in der Amplitudenhöhe zeigen, ein Puls im Übergang Material/Hohlraum jedoch deutlicher detektierbar wäre. Dies würde eine frühzeitige Messbarkeit von Materialanbindung- bzw. Ablösung ermöglichen.

Die durchgeführte Messreihe lieferte eine gute Datenbasis zur Bewertung des Einflusses der Mörtelfeuchte auf Untersuchungen mit THz-Wellen. Eine Festlegung eines maximalen Wassergehalts, welcher Messungen noch zulässt ist jedoch nicht ohne Einschränkungen möglich. Immer ist dies vom Messobjekt und der genutzten Mörtelmischung, ebenso wie die gewünschte Eindringtiefe abhängig. Die hier untersuchte Mörteldicke orientierte sich an den bereits verwendeten Dicken der Schutzputze an der Konstantinbasilika in Trier.

### 11. Darstellung und Bewertung einer THz-Imagemessung an originalem Schutzputzfragment im Labor

Für die evaluierenden Untersuchungen zur Analyse von Ablösungen und Detektion der Rückseite von Schutzputzen wurde ein originales Putzfragment einer Testfläche aus dem Jahr 2013 an der Konstantinbasilika von der Firma Hangleiter entnommen. Genutztes Bindemittel hier Prompt Fix-Zement® mit Zuschlag Millisil®. Die Putzdicke des Probeputzes beträgt zwischen 0,2 bis 0,6 cm. Der Putzaufbau besteht aus zwei Putzschichten, mit in der Mitte eingebrachtem Armierungsnetz. (siehe Abb.39) Die Rückseite der Putzfläche ist durch die Oberflächenstruktur der Putzfläche, auf die diese aufgebracht war, unregelmäßig. Die Oberfläche der Putzprobe ist hingegen plan.

Die gerasterte Aufnahme (Image) der einzelnen Messpunkte fand in Messschritten von 1 mm (1 px pro mm) bei einer definierten Prüfkörpergesamtfläche (siehe Abb.40) von (26 x 26 mm<sup>2</sup>) statt. Eine in der x und y-Achse bewegliche Verfahrenseinheit gewährleistete ein schwingungsfreies Abrastern des Prüfkörpers. Die Messungen wurden mit fokussiertem THz Strahl durchgeführt, wobei die Fokusebene nicht auf der Oberfläche, sondern in die Mitte der Probe gelegt wurde. Grund hierfür war das Bestreben eine möglichst genaue Auflösung von der Probenmitte bis zur Rückseite zu erreichen.

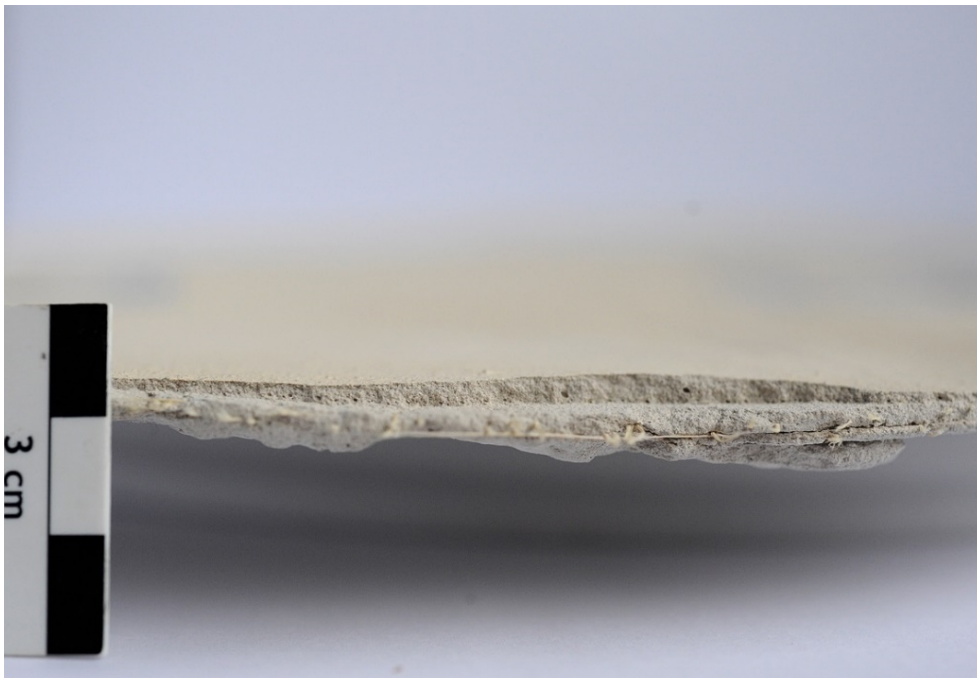


Abb. 39

Putzschichten mit Armierung der entnommenen Schutzputztestfläche Konstantinbasilika Trier

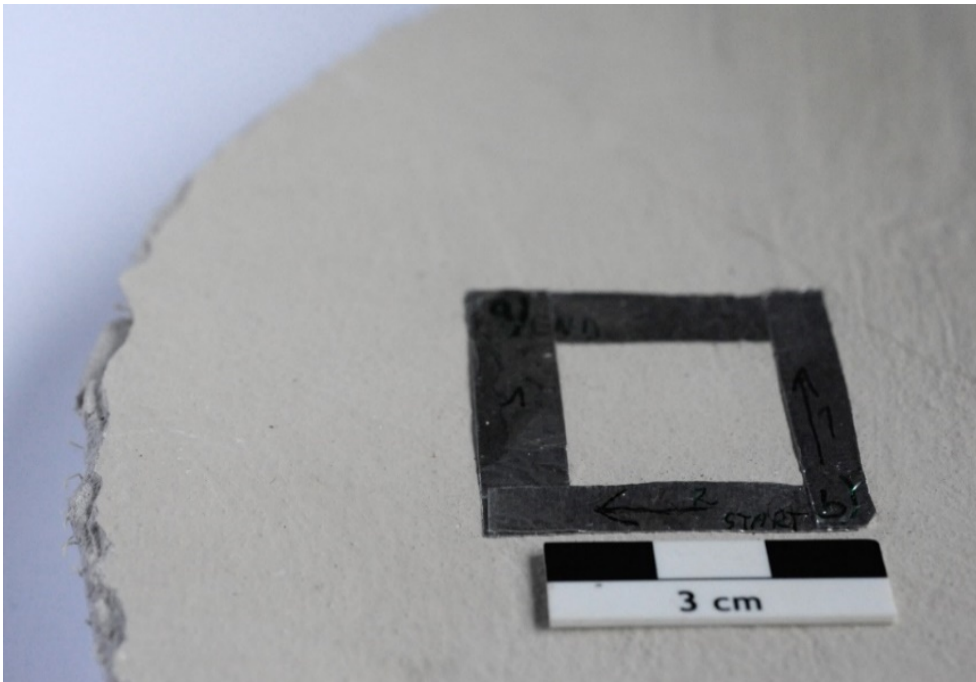


Abb. 40  
Abgeklebte definierte Prüfkörperfläche für die Messung des THz-Image

Bei der Auswertung des THz-Images müssen immer die in den einzelnen Messpunkten aufgenommenen THz-Pulse hinsichtlich ihrer Laufzeit betrachtet werden. Auf der linken Seite in *Abb.41* zeigt die Peak-to-Peak Amplitude des gesamten Zeitbereichssignals. Die Folienkante an der unteren und der linken Seite sind deutlich zu erkennen. In *Abb.41* rechts ist die Peak-to-Peak Amplitude eines späteren Teils des Zeitbereichssignals aus der Tiefe der Probe dargestellt. Das Zeitfenster wurde ausgewählt um diesen zweiten THz-Puls aufzunehmen und zu bewerten. Dieser Puls geben Hinweise auf die Tiefe einer detektierten Störung. In diesem Fall sind die zweiten Pulse in Bezug auf die Oberflächenreflexion um ca. 20 ps verzögert. Legt man einen Brechungsindex von ca.1,75 (PF3a) zugrunde, ergibt sich die Detektion eines Hohlraumes (schwarzer Kreis).

Im Folgenden sind die Intensitäten der einzelnen THz-Pulse pro Messpunkt von blau (schwach, also kompaktes Material) über hellblau bis grün, gelb bis rot (stark, also möglicher Hohlraum) gegliedert. Große Intensität eines THz-Puls ist ein Indiz für einen großen Zwischenraum oder aber Reflexion an Metall.

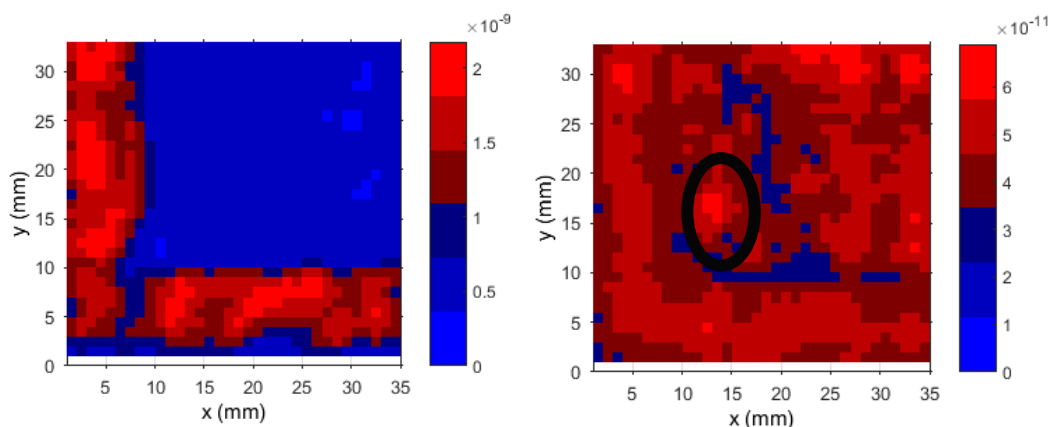


Abb. 41  
THz-Image (Peak to Peak Amplitude, blau-schwach zu rot stark) der in Abb.40 dargestellten Prüffläche.

Das Ergebnis an der ausgewählten Putzfläche zeigte, dass unter Berücksichtigung aller Parameter eine optische Darstellung der Störungen im Tiefenprofil, an nicht parallel verlaufenden Hohlräumen und eine damit verbundene Schadenskartierung an Putzschichten möglich sind. Die Rückseite konnte trotz sehr unebener Fläche in einzelnen Punkten detektiert werden.

## 12. THz-Messung an der Konstantinbasilika Trier

Zwei Wochen nach der Verputzung wurden am 12. und 13. September 2016 in einem festgelegten Messfeld (siehe Abb.42) THz-Messungen an der Konstantinbasilika in Trier vorgenommen.

Ziel war es, mittels der Terahertz-Time-Domain Spektroskopie Hohlräume zu detektieren und zu bemessen, die nach der Sublimierung von Cyclododecan zwischen Originalmalerei und Schutzputz entstanden sein können. Eine Aussage zur Hohlraumgröße, dem an dieser Stelle möglichen entstehenden Mikroklima und den Folgen für die Originalmalerei sollte somit getroffen werden können. Ausgehend von den Ergebnissen der Voruntersuchungen an originaler Schutzputzfläche (siehe Kap.11) wurde eine Schichtdicke des Cyclododecan von unter 1 mm und einer Putzdicke von ca.7 mm angenommen.

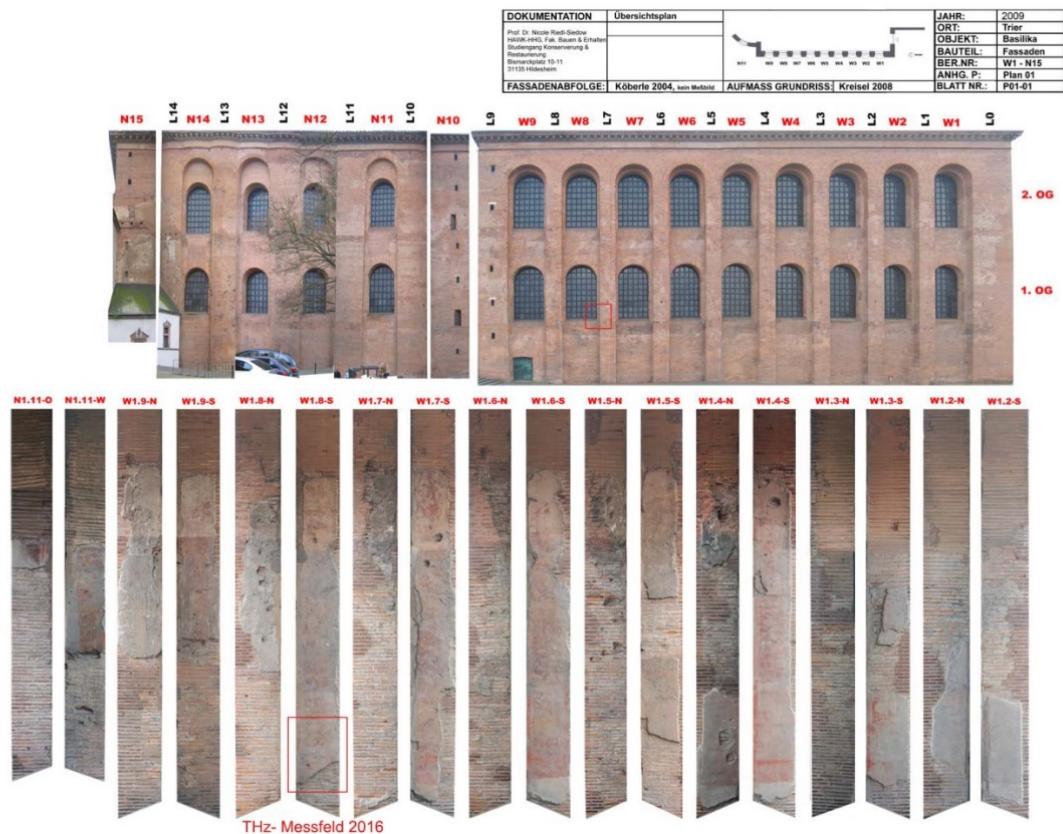


Abb. 42

Übersichtplan Fassadenabfolge W1-N15 Konstantinbasilika Trier mit THz-Messfeld (rot umrahmt)

### 12.1 Genutzter THz-Messaufbau

Für die Anforderung der bildgebenden Messungen (Imaging) von potentiellen Hohlräumen wurde ein mobiles THz-System mit faseroptischer Verzögerungsstrecke genutzt. Der Aufbau der Sender- und Empfängerantennen erfolgte in Reflexion an einer Verfahrereinheit, die sich in x- und y Richtung ansteuern ließ. Die Antennenhalter wurden in einem Messkopf so platziert, dass die THz-Strahlung auf eine zusätzliche Linse (große Linse) aus der Linsenachse traf. Auf diese Weise wurde die emittierte THz-Strahlung unter einem Winkel zur Linsenachse fokussiert und dann von der untersuchten Oberfläche reflektiert, von derselben Linse kollimiert und zur Empfängerantenne geleitet.

Die genutzten Bowtie Antennen mit identischen Linsen waren auf eine Messung mit kollimierter Strahlung ausgelegt und im Messkopf platziert.

Die Einstellung des Reflexionsaufbaus zeigte, dass die Bandbreite von maximal 0,5 THz mit einer Spitzenintensität von 0,1 THz und 50 dB erreicht wurde. Kleine Bandbreite des Systems bedeuten, dass die THz-Pulse relativ breit sind, was es erschwert, sehr dünne Schichten zu analysieren.

Aufgrund der angenommenen Dicke der Mörtelschicht und ihrer zunehmenden Absorption bei höheren Frequenzen hätte eine größere Bandbreite jedoch keinen Vorteil.

Eine weitere Einstellung des Systems zeigte, dass die Fokuspunktgröße bei ungefähr 14 mm lag. Ein weiter und somit „unscharfer“ Fokus bedeutet, dass keine hohe laterale Auflösung erreicht werden kann. Dies bedeutet jedoch auch, dass die Divergenz des Strahls im Fokus klein ist, was es ermöglicht, Signale aus einem breiteren Spektrum, das heißt von der Oberfläche der Probe, sowie einigen Millimeter darunter zu detektieren. Dies war wesentlich für die vorgesehene Anwendung.

Die Messungen wurden 2016 mit zwei verschiedenen Fokusbereichen durchgeführt. Zum einen wurde der Fokuspunkt auf die Oberfläche zum anderen 7 mm unterhalb der Oberfläche gelegt. Der zweite Fokuspunkt wurde in der Tiefe des erwarteten Übergangs zwischen Schutzputz und Originalfläche gelegt.

Aufgrund der Tatsache, dass die Wand nicht vollständig flach ist und einige Unebenheiten aufweist, variierte die Fokusposition über eine Fläche von bis zu ungefähr 4 mm. Da in den Ergebnissen 2016 kein wesentlicher Qualitätsunterschied zwischen den Fokuslagen festgestellt werden konnte, wurde 2017 nur ein einziges Bild pro Fläche mit einem Fokus von ca. 7 mm unterhalb der Oberfläche durchgeführt. Daher werden in diesem Bericht nur Images gezeigt, deren Daten aus Messungen mit einem Fokus unterhalb der Oberfläche gewonnen wurden.

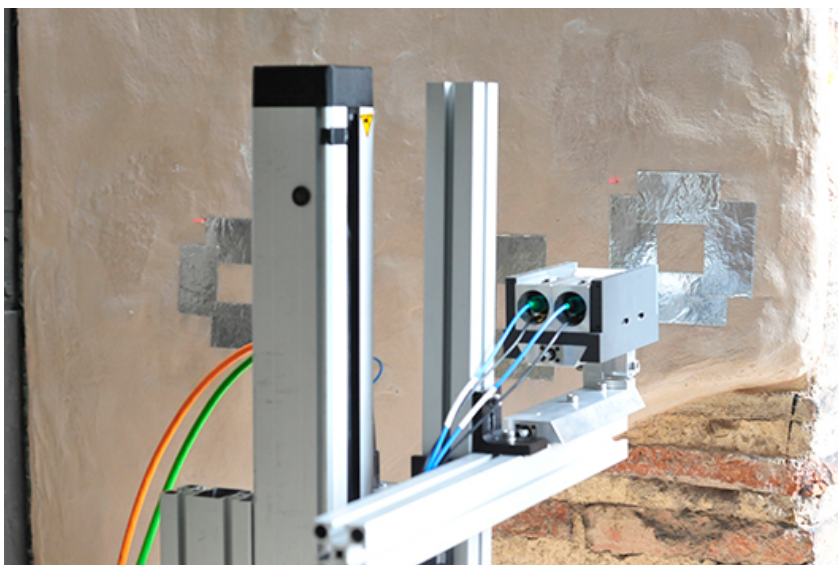


Abb. 43  
THz-Messkopf platziert vor der Messfläche



## 12.2 Messflächen

Basierend auf einer 1:1 Kartierung der gesamten Messfläche wurden 3 Messfelder in der Größe ca. 5 x 5 cm ausgewählt, mit Aluminiumstreifen als Referenz für die THz-Messungen abgesteckt und für weitere Messungen kartiert. Entsprechend dem Durchmesser des Strahlprofils wurde sich für Messungen in 5 mm Schritte entschieden, was zu Bildern von 10 x 10 Pixeln führt.

Die Flächen wurden von links oben nach rechts unten abgerastert. Die Messungen fanden ohne Kartierfolie statt.

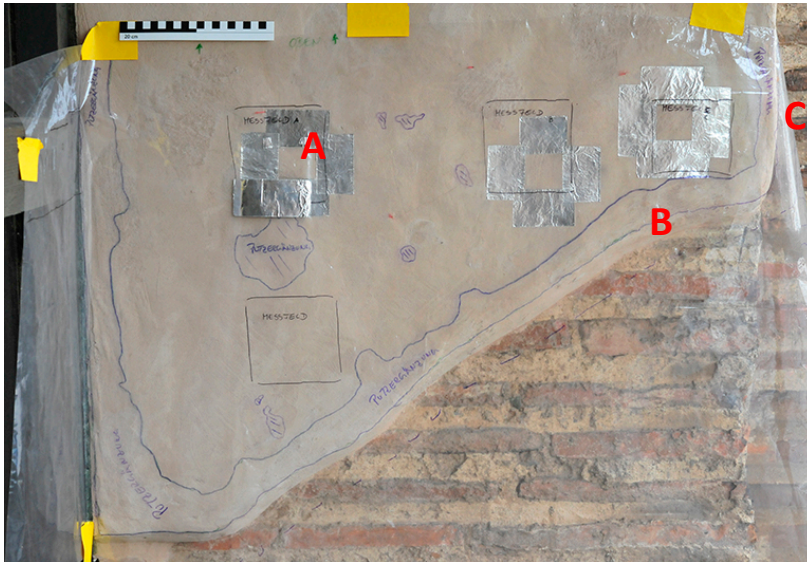


Abb. 44  
1:1 Kartierung der THz-Messfläche.  
Ausgewählte Testflächen A und B  
und C.

Die Abmessungen der untersuchten Felder sind in der folgenden Tabelle aufgeführt, wobei y1 und y2 die linke und rechte vertikale Seitenlänge des jeweiligen Messfeldes darstellen und x1 und x2 die obere und die untere horizontale Seitenlänge des jeweiligen Messfeldes aufzeigt.

## 12.3 THz-Messergebnisse Analyse/Pilotfläche 2016

Die 2016 durchgeführten Messungen fanden bei für das THz-System extremen Temperaturbedingungen statt. Die Temperaturen erreichten über 30°C, was dazu führte, dass der Laser die Mode-Lock-Funktion verlor und das System die Messung abbrach. Daher wurden einige Messungen bis spät in die Nacht durchgeführt, was die Ausrichtung an den Oberflächen erschwerte, das Messfeld C konnte nicht komplett vermessen werden.

Tab. 20 Bemaßung der Testflächen 2016

2016	A	B	C
y1	4.2 cm	4.8 cm	4.6 cm
y2	4.2 cm	4.6 cm	4.7 cm
x1	4.9 cm	5.0 cm	4.9 cm
x2	4.9 cm	5.2 cm	4.8 cm

Tab. 21 Bemaßung der Testflächen 2017

2017	A	B	C
y1	4.1 cm	4.7 cm	4.8 cm
y2	4.2 cm	4.7 cm	4.8 cm
x1	5.0 cm	4.9 cm	4.9 cm
x2	5.1 cm	5.0 cm	4.8 cm



Abb. 45

Gekennzeichnete Testflächen A und B und C. mit sichtbarer Oberflächenrauigkeit

## 12.4 Messergebnisse der Pilotfläche

Die Analysen der aufgenommenen Daten zeigen, dass der Messkopf nicht vollständig parallel zur Wand positioniert stand, daher wurden die Zeitbereichssignale zunächst so korrigiert, dass stets der Minimalwert des ersten THz-Impulses gleichzeitig erschien. Die Daten wurden auf zwei Arten analysiert:

- Zeitliche Korrektur
- Zeitliche Korrektur mit Normalisierung auf den Peak-to-Peak Wert des ersten THz-Pulses

### 12.4.1 THz-Images

Die Ergebnisse der Images der Testflächen sind in den folgenden drei Abbildungen für die Flächen A, B bzw. C (siehe Abb.45) dargestellt. Die linken Abbildungen entsprechen dem Jahr 2016 und die Rechte dem Jahr 2017. Für das Jahr 2016 werden Ergebnisse für die Messungen mit dem Fokus 7 mm unter der Oberfläche angezeigt, ausgenommen ist die unfertige Messung der Testfläche C. Für diese wird das Image mit dem Fokus auf der Oberfläche dargestellt.

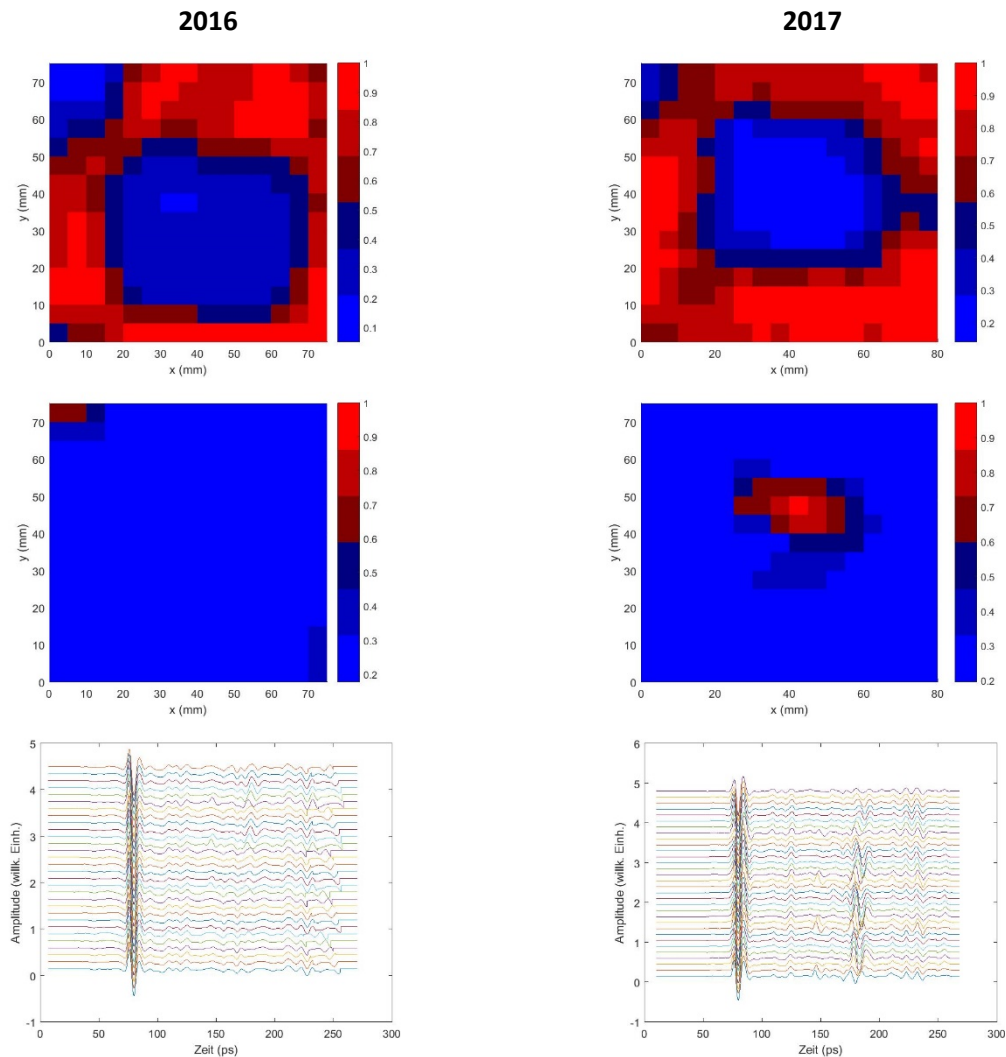
#### Testfläche A

Die erste Reihe des Images entspricht der Peak-to-Peak-Amplitude des ersten Pulses (Oberflächenreflexion). Die zweite Reihe entspricht der Peak-to-Peak-Amplitude des (potentiellen) zweiten Pulses der Rückseite der Schutzputzfläche (Peak-to-Peak-Amplitude wurde für das gesamte Zeitbereichssignal bezogen auf den ersten Puls berechnet).

Die Amplituden für jedes Image sind auf die maximale Amplitude normiert, daher entspricht rot der höchsten Amplitude 1 und hellblau der niedrigsten Amplitude, wie durch die Farbskala ersichtlich. In der dritten Zeile werden so genannte THz time-domain-traces von einem Punkten aus der Mitte der Probe, vorzugsweise aus dem Bereich mit einer hohen Peak-to-Peak-Amplitude gezeigt. Hier sind alle Pulse die innerhalb eines Messsignals eines Messpunktes aufgezeichnet werden gemeinsam zu sehen. Innerhalb eines Signales können somit die Pulse der Reflektion von der Oberfläche, so wie die Pulse aus tieferen Grenzschichten an verschiedenen Messpunkten abgelesen werden.

Im Vergleich der Zeitbereichsdaten des ersten (Oberflächen) Pulse der Messfläche A, ist ein deutlicher Amplitudenanstieg im Vergleich zwischen den Jahren 2016 bis 2017 zu sehen. Auch bei Betrachtung der einzelnen- time-domain-traces von 2017, sind Pulse von unterhalb der Oberfläche bei etwa 150 ps zu bestimmen. Diese "späteren" Pulse erscheinen etwa 104 ps nach dem Oberflächenpuls. Durch Nutzung der in Kapitel 11. bereits erwähnten Formel, kann eine Dicke der schützenden Mörtelschicht von etwa 8 mm errechnet werden.

## Messfläche A



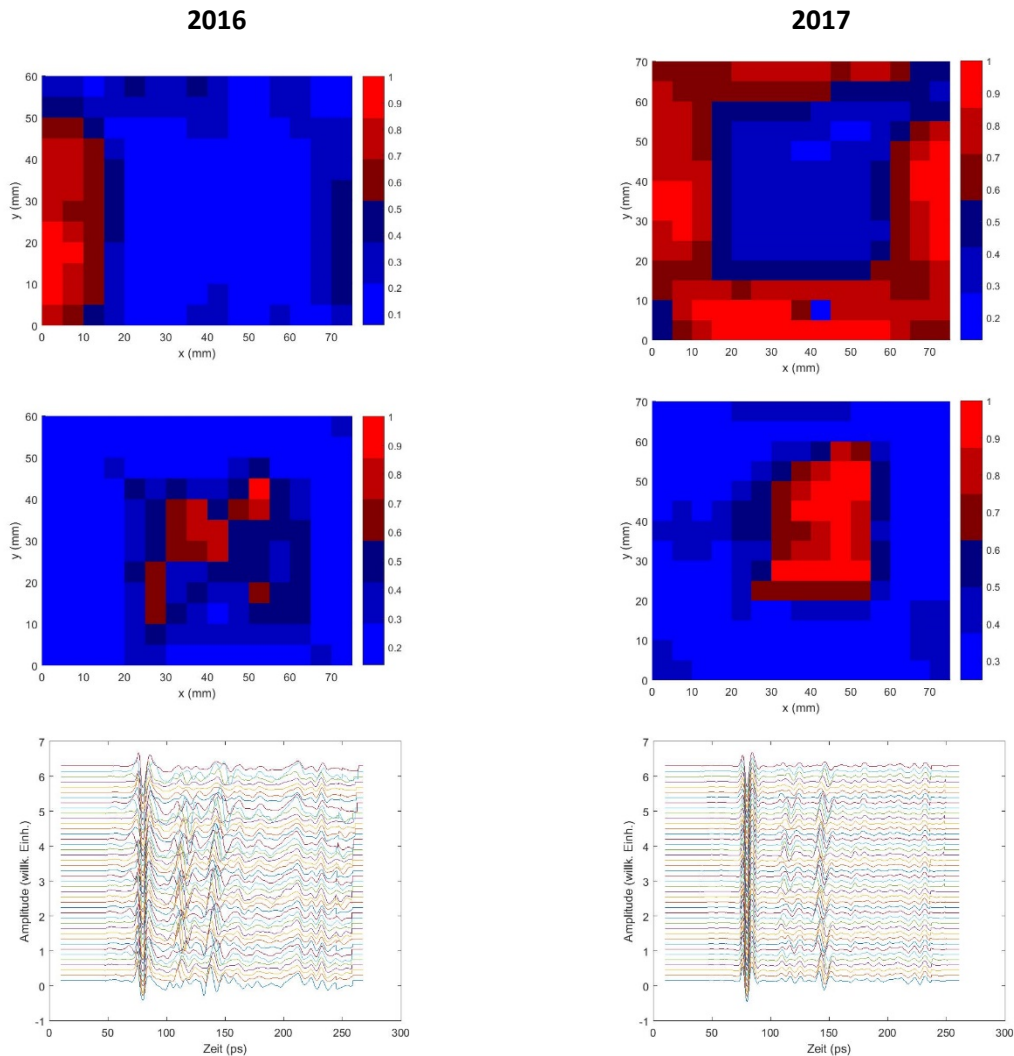
Tab. 22 Auswertung der THz-Messung Pilotfläche, Messfeld A

**Testfläche B**

Betrachtet man die Images des Jahres 2016, so ist kein klarer Aluminiumfolienrahmen zu erkennen, der das Messfeld abgrenzt. Ein Grund dafür, können Änderungen im Systembetrieb aufgrund der zunehmenden Temperatur und der Fehlausrichtung des Messkopfes zur unebenen Wand sein. Wenn man jedoch die relative Amplitude des „späteren“ Pulses mit dem Oberflächenpuls vergleicht, kann eine Zone in der Mitte des Messfeldes B mit hoher Amplitude festgestellt werden. Aufgrund der Unterteilung der Oberflächenimpulsamplitude wird der Effekt der Systeminstabilität verringert. In einzelnen time-domain-traces kann ein Puls bei etwa 100 ps beobachtet werden. Zusätzlich sind einige Pulse um 75 ps zu sehen, die einem potentiellen Luftraum entsprechen können. Ähnliche Ergebnisse sind in den Messergebnissen von 2017 zu erkennen. Einzelne time-domain-traces erscheinen weniger „verrauscht“ zu sein, als die der Messungen von 2016. Dies vereinfacht eine Bestimmung der einzelnen Pulse, die bei etwa 110 ps liegen und die Rückseite des Hohlraums markieren. Ähnlich wie 2016 können zusätzliche Pulse bei etwa 85 ps beobachtet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Position des Oberflächenpulses zwischen den Messungen ungefähr 10 ps verschoben war.

Die „späteren“ Pulse erscheinen ca. 67 ps nach dem Oberflächenpuls, was berechnet der Schutzmörtelschichtdicke von ca. 5,8 mm entspricht. Dies deutet darauf hin, dass die Schutzmörtelschichtdicke der Fläche B an dieser Stelle etwa 3 mm dünner ist als die der Fläche A.

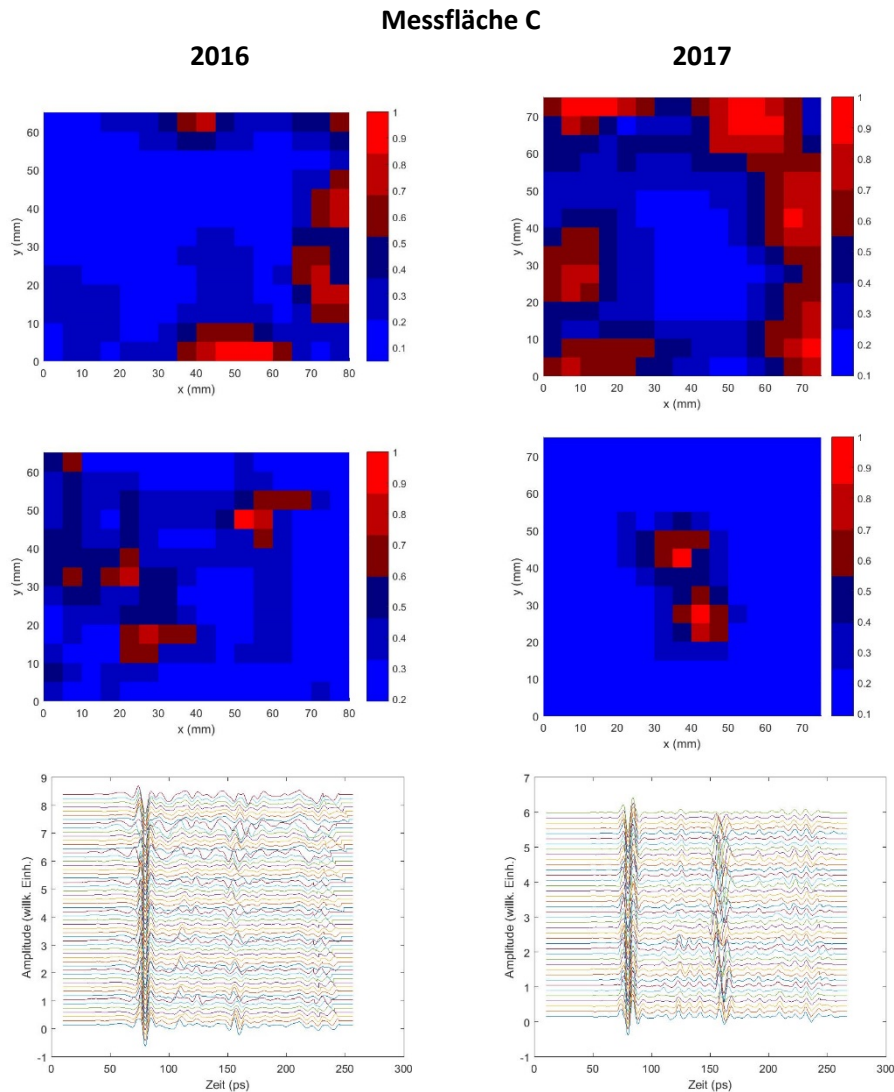
## Messfläche B



Tab. 23 Auswertung der THz-Messung Pilotfläche, Messfeld B

**Testfläche C**

Während der Imagemessung von Messfeld C im Jahr 2016 setzte das System wärmebedingt teilweise aus. Daher konnten nur ein Image mit dem Fokus auf der Oberfläche der Probe vollständig gemessen werden. Aus den Daten unterhalb der Oberfläche (2016) können nur einige Pulse an verschiedenen Punkten betrachtet werden. Im Jahr 2017 waren die Pulse jedoch leicht abzulesen. Sie erscheinen bei ca. 80 ps nach dem Oberflächenimpuls, was einer ungefähren Dicke des Schutzputzes von 6,9 mm an dieser Stelle entspricht.



Tab. 24 Auswertung der THz-Messung Pilotfläche, Messfeld C

### 12.5 Zusammenfassung der THz-Messergebnisse Pilotfläche Konstantinbasilika Trier

Die vergleichenden Messungen an den drei Messflächen der Pilotfläche zeigen, dass eine Hohlraumdetektion und auch die Vermessung der Mörteldicke des Schutzputzes möglich sind. Zur genauen Vermessung der Hohlräume werden weitere Auswertungen, über die Projektlaufzeit hinaus angestrebt. Kleinste Hohlräume, wie sie durch die Sublimation der Cyclododecanschicht entstehen können, bedingen in der Laufzeit eine Folge von kurz hintereinander reflektierten Pulsen, die durch ihre „Breite“ ineinanderlaufen. Die Separation dieser Pulse kann nur rechnerisch, durch Entfaltung des Signals erfolgen. Erste Berechnungen haben gezeigt, dass dies möglich ist.

### 13. THz-Messungen zur Überwachung des Sublimierungsverhaltens der Trennschicht Cyclododecan im Labor

Im Zuge der Untersuchungen zur Wahl des finalen Schutzputzmörtels/Systems für die Fassadenmalereien der Konstantinbasilika Trier, kamen im Rahmen einer Testflächenerstellung im August 2016 der im Projekt konzipierte Mörtel PF3a zum Einsatz. Das Schutzputzsystem bestand in seinem Auftrag aufbauend auf dem der originalen Oberfläche aus: Cyclododecan/Armierung/Mörtel. Nach Erfahrungswerten, die die Firma Hangleiter (Otzberg) mit Cyclododecan gemacht hat, ist das Sublimierungsverhalten, erheblich abhängig von den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Wind) während dessen Verarbeitung. Über die genaue Abbaurrate von unter dem Putz aufgetragenem Cyclododecan gibt es keine Studien. Um nun die Ergebnisse der THz-Messungen an der Testfläche in Trier genau auswerten zu können, wurde die Verputzsituation an Modellen im Labor praxisnah nachgestellt und über einen Zeitraum von 277 Tagen in 21 Messintervallen gemessen. Für die Messungen wurde derselbe Messaufbau wie für die Messungen an der Konstantinbasilika in Trier, mit einem Fokus unterhalb der Oberfläche von 7 mm genutzt.

#### 13.1 Aufbau des Messmodells

Die Grundlage der Messmodelle bildete ein Holzrahmen mit **sechs** Feldern von denen **vier** (siehe Abb.46 von I-VI) als Messfelder (14,5 cm x 12 cm.) genutzt wurden. Das fünfte Messfeld wurde mit einem Prüfkörper mit Cyclododecan bestückt, um die Sublimation ohne Überzug zu beobachten.

1. Die Fläche des Holzrahmens wurde mit Alufolie beklebt, um ein verlässliches Signal von der Rückseite des gesamten Putzpakets zu bekommen. Er bildet die untere Schicht.
2. In die vier Felder wurde ein getrocknetes Putzstück (Dicke ~ 5 mm) gelegt und jeweils zur Hälfte mit Armierung versehen. Ein Alustreifen trennt den Bereich mit und ohne Armierung.
3. Darauf folgte der Auftrag einer Cyclododecanschicht (Dicke ~ 1 mm)
4. Abschließend wurde eine Mörtelschicht der Mischung PF3a (Dicke 5 mm) aufgebracht. Die Dicke der Mörtelschicht entspricht der in Trier vorgegebenen Schutzputzdicken.
5. Als Referenz für die THz-Messung wurden zusätzlich die Holzleisten des Rahmens mit Alufolie beklebt (in den Abbildungen nicht zu sehen).

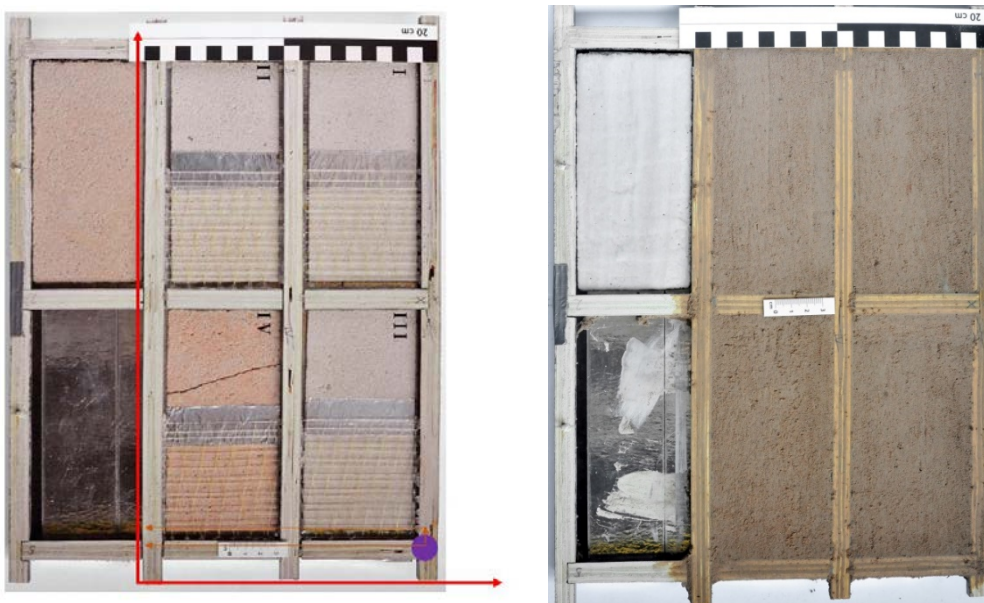


Abb. 46 Messmodell ohne Cyclododecan und Schutzputz (PF3b) Messmodell nach Auftrag der Putzschicht

Die roten Pfeile in *Abb.46* geben das Koordinatensystem der aufgenommenen THz-Images an (x-Achse im THz-Image entspricht dem horizontalen Pfeil im Bild und die y-Achse bezieht sich auf den vertikalen Pfeil). Der violette Punkt repräsentiert den Ausgangspunkt der Rastermessung. Die orangefarbenen Pfeile repräsentieren die Richtung der Abrasterung. Die x-Achse wurde zuerst gescannt.

### 13.2 Messplan Labormessungen

Die Gesamtzeit für die Abrasterung der kompletten Probefläche betrug 12 Stunden. Eine erste vollständige Messung der gesamten Probefläche wurde erst vorgenommen nachdem der Mörtel trocken genug war um eine Rückreflexion von der Mittelschicht der Probe (mit Alufolie) zu erkennen. Um diesen Zeitpunkt bestimmen zu können, fanden in regelmäßigen Abständen Punktmessungen statt. Danach wurde in den ersten 20 Tagen die bildgebende Messung alle 1 – 3 Tage durchgeführt.

In der folgenden Liste werden die Zeitpunkte der durchgeführten Messungen aufgeführt:

Tab. 25 Messliste THz-Monitoring

Nr.	Datum	Zeit (Tage)
1	02.12.2016	0
2	05.12.2016	3
3	07.12.2016	5
4	09.12.2016	7
5	12.12.2016	10
6	13.12.2016	11
7	14.12.2016	12
8	16.12.2016	14
9	19.12.2016	17
10	21.12.2016	19
11	22.12.2016	20
12	16.01.2017	45
13	29.03.2017	117
14	03.05.2017	152
15	04.05.2017	153
16	08.05.2017	157
17	01.06.2017	181
18	02.06.2017	182
19	05.07.2017	215
20	14.08.2017	255
21	04.09.2017	277

### 13.3 Resultate des THz-Monitoring

In diesem Kapitel wird die Langzeitmessung ausgewertet und deren Ergebnisse diskutiert.

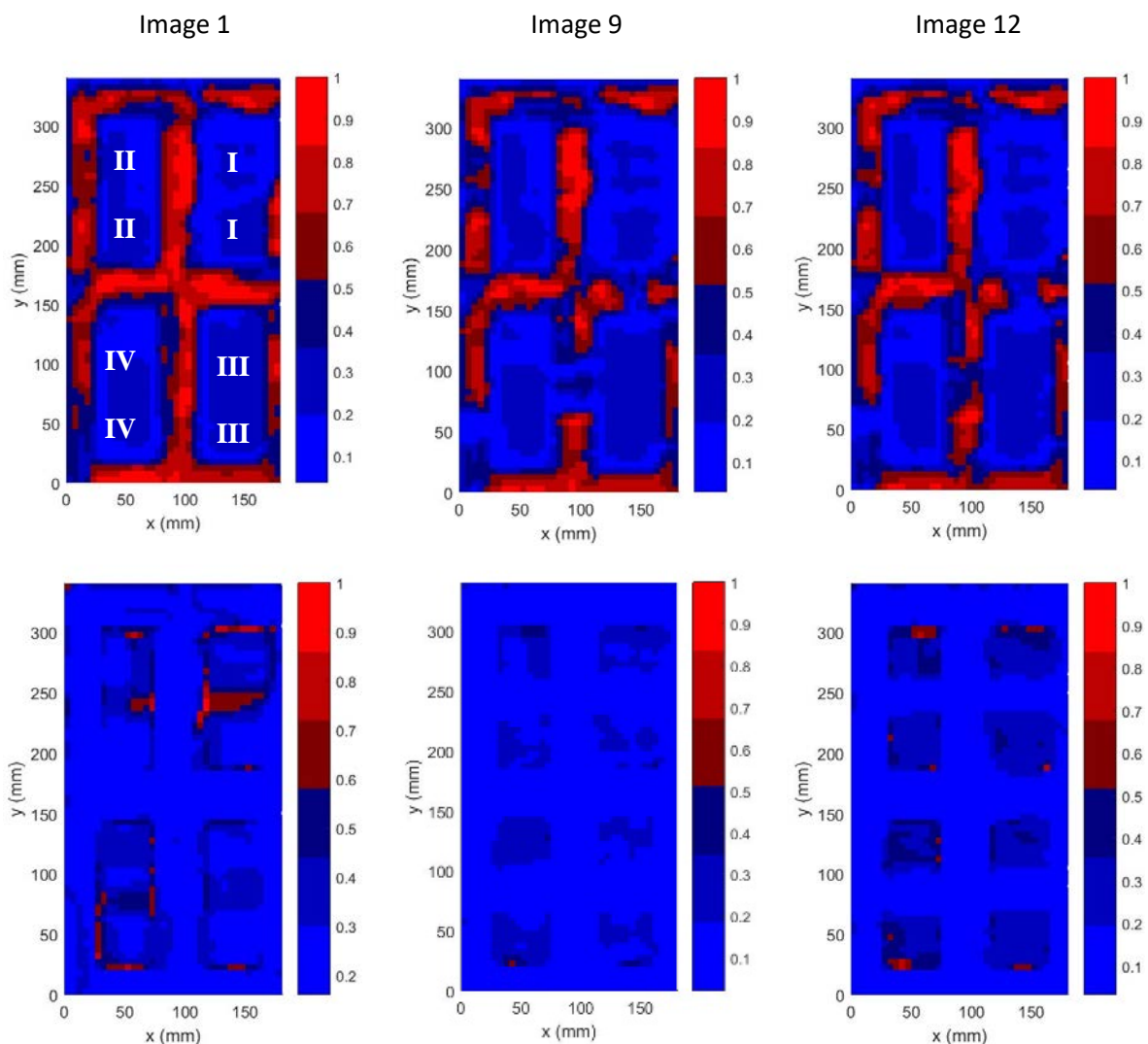
#### 13.3.1 Analysebeschreibung und Durchschnittsergebnisse aller Proben (Time of flight)

Die Ergebnisse der in den ersten 45 Tagen durchgeführten Imagemessungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Images wurden erfolgreich aufgenommen. Die Form der Proben ist ersichtlich.
- Der Peak aus der Cyclododecanschicht ist zu sehen.
- Im Zeitbereich kann kein Doppelpuls für die Cyclododecanschicht festgestellt werden, daher ist eine Analyse im Frequenzbereich erforderlich, die aber bei der begrenzten Bandbreite eine Herausforderung darstellt.

Die Imageauswertung der Peak-to-Peak-Amplitude wird hier exemplarisch an den Images 1, 9 und 12 aus der Messreihe der ersten 45 Tage (*siehe Tab.26*) dargestellt.

In der ersten Zeile der folgenden Abbildung sind die Images der Peak-to-Peak-Amplitude des ersten, von der Oberfläche stammenden THz-Pulses dargestellt. In der zweiten Zeile sind die Peak-to-Peak-Amplitude des letzten THz-Pulses (Rückreflexion von der unteren Folie) gezeigt.



Diagr. 45 THz-Images Langzeitmessung 1,9,12

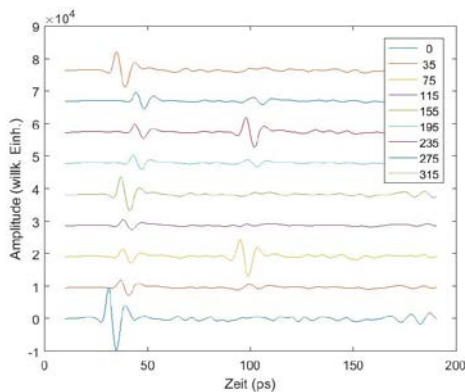


Anhand der Images ist ersichtlich, dass diese die gleiche Form aufweisen, was für eine unveränderte Position bei den Messungen und somit einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse spricht. Mit der Auswertungssoftware konnte die Rückreflexion der Cyclododecanschicht ermittelt werden. Dies bestätigt unsere Annahmen nach Auswertung der Ergebnisse aus Trier. Vergleicht man die zweite Reihe mit dem darüber liegenden Image, so können die Formen der acht unter der Oberfläche liegenden Flächen am besten anhand des Image 12 aufgelöst dargestellt werden. Insbesondere Image 1. zeigt, dass die oberste Mörtelschicht zu Beginn noch viel Wasser enthielt.

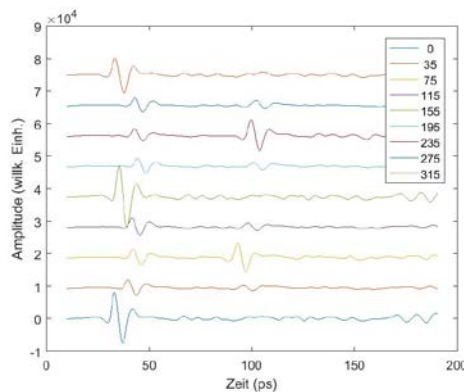
Die folgende Abbildung zeigt die Zeitbereichssignale (Time of Flight) an zwei verschiedenen x-Positionen für 9 verschiedenen y-Positionen hier an Image 1 beispielhaft dargestellt:

- X = 45 mm – Entspricht den Bereichen IV und II
- X = 13 mm – Entspricht den Bereichen III und I
- Y = 0 – Rand des Messaufbaus (Folie)
- Y = 35 mm – Bereich IV und III mit Armierung
- Y = 75 mm – IV und III an der Stelle in der Folie zwischen dem Bereich mit und ohne Armierung versehen ist.
- Y = 115 mm – Bereich IV und III ohne Armierung
- Y = 155 mm – Folie zwischen den Bereichen IV und II + III und I
- Y = 195 mm – Bereich II und I mit Armierung
- Y = 235 mm – Bereich II und I in der die Folie auf dem Holz zwischen den Proben angebracht wurde
- Y = 275 mm – Bereich II und I ohne Armierung
- Y = 315 mm – Rand des Messaufbaus (Folie)

X=45 mm



x=135 mm



Diagr. 46

Time of Flight Auswertung an zwei X-Werten (links 45 mm, rechts 135 mm) und 9 y-

Die ersten Pulse links zeigen die Reflexion des THz-Signals an der Oberfläche vom Putz (1. Puls oder Metall (Alu), 2. Puls) an den verschiedenen Messpunkten des Messfeldes. Die Pulse bei ca. 100 ps zeigen für zwei ausgeprägte Pulse (y 75 mm und 235 mm) den Rückreflex der Folie, die auf den Prüfkörpern zwischen dem Übergangsbereich zwischen Armierung und ohne Armierung angebracht wurde. In der gleichen Ebene bei ca. 100 ps zeigen sich leichte Pulse (z.B. y 115 mm, x 135 mm), die vom Übergang des Cyclododecan herrühren.

Da noch kein reflektierter Puls von der Rückseite der unteren Mörtelschicht detektiert werden konnte, muss angenommen werden, dass die obere Mörtelschicht zum Zeitpunkt der Messung noch zu feucht gewesen ist. Bei späteren Messungen ist ein klarer Puls bei ca. 170 ps von der Rückseite der Probe messbar (hier nicht gezeigt).

### 13.3.2 Analysebeschreibung und Durchschnittsergebnisse der gesamten Monitoring-Proben (Peak-to-Peak)

Wenn man bedenkt, dass jedes Image aus etwa 2500 THz-Zeitbereich (TD) Datenpunkten besteht und dass 28 Images erfolgreich analysiert wurden, musste bei der Fülle der Datenmenge an einen weiteren Ansatz für die Ergebnisdarstellung nachgedacht werden. Die folgend dargestellten Ergebnisse sind Auswertungen einer Peak-to-Peak-THz-Amplitude, die aus TD-Daten resultiert, dividiert durch die Referenz und gemittelt für einen zuvor bestimmten Bereich der Probe.

Hierfür muss noch einmal der Probenaufbau betrachtet werden:

Die Gesamtprobe besteht aus vier Teilproben, die alle in zwei Teilbereiche aufgeteilt sind. Insgesamt sind dies acht Bereiche, die alle durch eine Folienschicht geteilt sind. Diese Folie wurde entweder auf der unteren Mörtelschicht oder oben auf die Holzkanten des Probenhalters aufgebracht. Jeder der acht Bereiche wurde unabhängig voneinander Punkt für Punkt analysiert. Punkte, die zu nahe am Rand des Bereichs (Folie) lagen, wurden nicht in die Auswertung einbezogen, um den Einfluss der Reflexion der Folie an den Kanten zu vermeiden. Die Datenanalyse für jeden Punkt fand mittels TDS statt und wurde jeweils in drei Teile unterteilt.

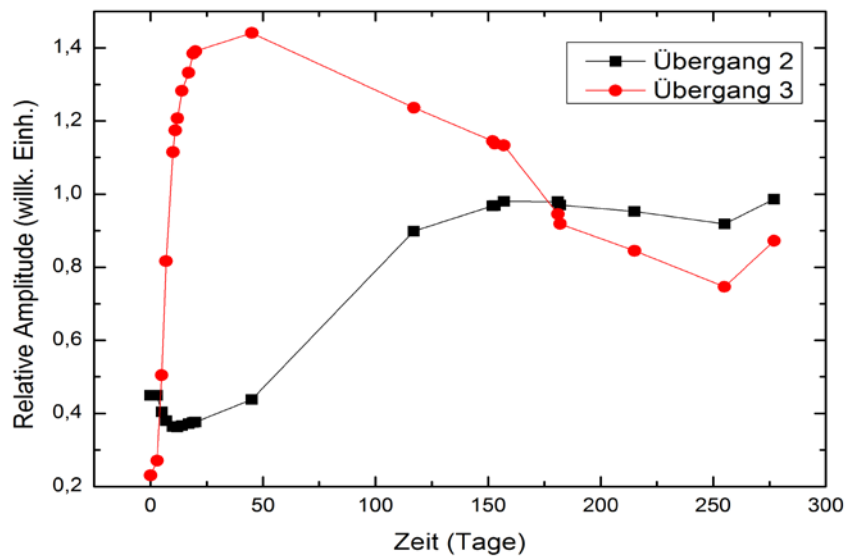
Jeder Teil des Zeitfensters bestand aus einem THz-Puls von:

1. Der obersten Mörteloberfläche
2. Der Cyclododecan Trennschicht
3. Der Folie auf der Unterseite der unteren Mörtelschicht

Für jeden der drei Teile wurde die Peak-to-Peak-Amplitude berechnet. Der zweite und der dritte Wert wurden durch den ersten geteilt (Peak-to-Peak-Wert des THz-Pulses von der Oberfläche). Hieraus ergaben sich die relativen Peak-to-Peak-Werte für alle Punkte gemittelt, die einem einzelnen Bereich entsprechen.

Trotz der Mittelung ergaben sich einige Unterschiede in den Ergebnissen der acht Messflächen. Grund hierfür können unter anderem die vier verschiedenen Mörtelarten in der unteren Schicht und der Einfluss der Armierung sein.

In der folgenden Grafik (*Diagr.46*) werden zunächst die durchschnittlichen Ergebnisse für die gesamte Probe präsentiert. Der Durchschnitt ergibt sich aus der nochmaligen Mittelung und Berechnung des Durchschnitts aller Werte aus den Bereichen der Images. Aus diesen Ergebnissen wurde die folgende Grafik gefertigt



**Diagr. 47** Die relative Amplitude der ersten beiden Peaks dividiert durch die Amplitude vom ersten Peak/Pulses gegenüber der Zeit, die seit der ersten Messung vergangen ist.

In den ersten 20 Tagen nach der ersten Messung nahm die relative Amplitude des dritten Pulses zu, während die relative Amplitude für den Pulse 2 abnahm. Ein Grund dafür ist, dass die oberste Mörtelschicht noch trocknete, was zu einer geringeren Absorption der THz-Strahlung führte, die von der Cyclododecanschicht und der Folie reflektiert wird. Interessant ist, dass im gleichen Zeitrahmen die Amplitude des zweiten Pulses ebenfalls abnahm. Nach den ersten 20 Tagen kann jedoch ein deutlicher Trend der zunehmenden Amplitude des Pulses 2 und der abnehmenden Amplitude des Pulses 3 festgestellt werden. Dies ergibt sich aus Änderungen in der mittleren Schicht (Cyclododecan). Nach 180 Tagen änderten sich die Amplituden nicht drastisch, was bedeuten könnte, dass die Cyclododecanschicht sich nicht weiter verändert.

### 13.3.3 Zusammenfassung der THz-Ergebnisse der Monitoring-Proben

An dem Messmodell, welches die Schutzputze (Sep. 2016) an der Konstantinbasilika repräsentiert, wurden in einem Zeitraum von 277 Tagen 21 THz-Images in der Reflexionsgeometrie gemessen. Das Messmodell bestand aus vier Messfeldern, die jeweils in zwei Teilbereiche unterteilt wurden. Jedes der Images besteht aus etwa 2500 Punkten THz-TD-Daten. Die Analyse erfolgte in TD durch Analyse der Peak-to-Peak-Amplituden von drei THz-Pulsen.

Die gemittelten Ergebnisse zeigen, dass die obere Mörtelschicht nach 20 Tagen trocken ist und dass die Amplitude des THz-Pulses, der aus der Trennschicht (Cyclododecan) resultiert, mit der Zeit zunimmt. Dieses Inkrement bezieht sich auf Änderungen und mögliche Sublimierung der Trennschicht. Um diese Analyse zu bestätigen, wurden die Mörtelpakete der einzelnen Messfelder im Anschluss an eine abschließende Messung in einem Epoxidharz eingebettet, gesägt und die durch die Sublimation des Cyclododecans entstandenen Hohlräume unter dem Digitalmikroskop vermessen.

Exemplarisch ist die Vermessung in *Abb.47* dargestellt. Reste von Cyclododecan konnte an keinem der untersuchten Proben festgestellt werden.

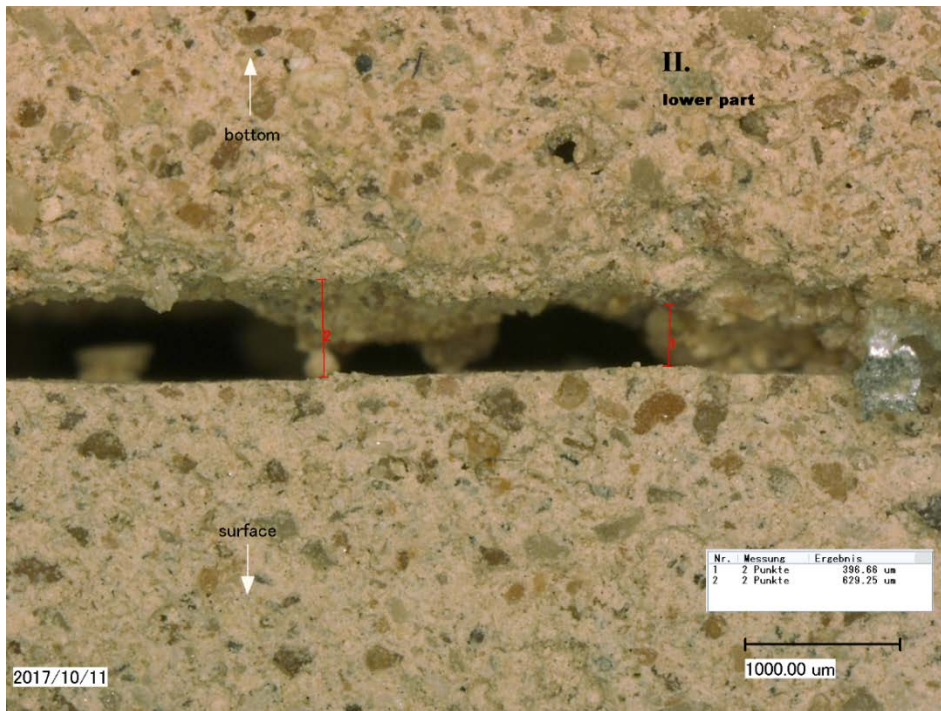


Abb. 47  
Probe II/Schnitt durch die Mitte der Probe. 50-fache Vergrößerung

## 14. Fazit

Zusammenfassend können die Untersuchungen der physikalischen Kennwertermittlung an allen Mörteln dahingehend bewertet werden, dass sich der Mörtel PF3a durchaus für den Einsatz als Schutzputz eignet, vor allem auch hinsichtlich seiner Eigenschaften zur Wasseraufnahme und Abgabe, bzgl. seiner Festigkeits- und Verwitterungseigenschaften sowie aufgrund der optischen Eigenschaften. Das Verwitterungsverhalten des Mörtelgefüges hingegen zeigt nach einjähriger Bewitterung bereits einen Materialverlust bzw. Materialveränderung innerhalb des Gefüges, die einer Langzeitschutzmaßnahme eher nicht zuträglich erscheinen. Daher können die Untersuchungen und Ergebnisse an mit Schutzlasur versehenem Schutzputzen als mögliche Erweiterung des bisherigen Schutzsystems gesehen werden. Vor allem die Auswertungen der Dünnschliffe zeigen die Vorteile einer Schutzlasur sehr deutlich.

Des Weiteren wurde ersichtlich, dass sich der Einsatz von Mowilith® LDM 6880 im Anmachwasser sich nachteilig vor allem nachteilig auf die Optischen- und Festigkeitseigenschaften auswirkt. Vor allem bei sehr hell eingestellten Mörteln mit dem Zuschlag Millisil® W3 konnte dies beobachtet werden.

### THz-Messkampagne

Die derzeit genutzten Methoden zur Analyse Anbindung und von Ablösungen von Schutzputzen sowohl nahe der Oberfläche als auch im Tiefenbereich können nicht zerstörungsfrei vorgenommen werden. Hier setzte das im Rahmen des Projektes erforschte Potenziale der Terahertz-Zeitbereichs-Spektroskopie (THz-TDS) als Messtechnik zur tiefenaufgelösten Diagnostik an Schutzputzen zur Evaluierung von Materialübergängen/Ablösungen an. Es gelang im Rahmen der Projektlaufzeit, die zu Beginn des Projektes gesteckten Ziele erfolgreich umzusetzen.

Sowohl im Rahmen der Laboruntersuchungen, wie auch bei den Messungen an der Pilotfläche, konnten sowohl tiefenaufgelöst Störungen, wie auch Materialübergänge zerstörungsfrei genau detektiert und verortet werden. Demarkierungen beim Einsatz der THz-Strahlung nach dem heutigen Stand der Technik konnten ebenso ausgelotet werden, wie das Potenzial dieses neuartigen Analyseverfahrens bestätigt.

Auch bei vorhandener Feuchte im Material konnte festgestellt werden, dass diese zwar Einfluss auf die Pulsintensität, nicht aber auf die genaue Ermittlung eines THz-Pulses bei Materialübergängen (z.B. Mörtel/Hohlraum) hat. Ausschließlich die Amplitudenhöhe (Dämpfung) zeigte hier Grenzbereiche auf. Bei der Untersuchung der Eigenschaften von Mörteln und Mörtelmischungen ist stets zu berücksichtigen, dass diese singuläre, heterogene Gemenge sind und sich damit von den künstlichen, zumeist normierbaren Werk- und Baustoffen grundsätzlich unterscheiden. Das Anlegen einer Materialdatenbank in diesem Projekt, wurde daher als eine wichtige Grundlage gesehen die, wie bei jedem Analyseverfahren, Ausgangspunkt für die vergleichenden Untersuchungen von Materialien darstellt. Die untersuchten Mörtel und konservatorisch relevanten Materialien stellen daher nur den Anfang einer weiter zu entwickelnden Datenbank dar, die für den Einsatz der THz-Analyse in der Denkmalpflege nötig ist.

Mit den erfolgreich durchgeführten Messungen an der Pilotfläche lässt sich eine eindeutig positive Tendenz für den Einsatz der THz-Technologie in der Denkmalpflege erkennen. Die Möglichkeit THz-Systeme mobil, auch im Außenbereich einsetzen zu können zeigt, dass diese für z. B. Monitoring oder Maßnahmenüberprüfung an Objekten durch die unmittelbare Auswertungsmöglichkeit des „Livepulses“ problemlos genutzt werden können.

Schon im Laufe der laufenden Messkampagne hat sich die Technik weiterentwickelt. Somit kann perspektivisch davon ausgegangen werden, dass mit neueren verbesserten Systemen noch eine höhere Messgenauigkeit erzielt werden kann. Daher wird ein hohes Potenzial in der zerstörungs- und berührungslosen Analyse mittels THz-Strahlung an wertvollem Kulturgut gesehen.

## Literaturverzeichnis

- AURAS, M. (2003): Einleitung in: Umweltbedingte Gebäudeschäden an Denkmälern durch die Verwendung von Dolomitmalkmörteln, Institut für Steinkonservierung e.V., Bericht Nr. 16, S. 1-3.
- BRANDES, C. (1995): Untersuchung zur Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit von Anstrichsystemen auf Natursteinen, Dissertation Universität Hannover
- HANGLEITER, M., SALTZMANN-TYLL L. (2012): Reversible Überputzungen, in: ICOMOS Hefte des deutschen Nationalkomitees LV, Weltkulturerbe Konstantinbasilika Trier, Wandmalerei in freier Bewitterung als konservatorische Herausforderung, Berlin
- HENNING, O.; KNOFEL, D (1997): Baustoffchemie. Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten, Berlin
- KRAUS, K., QU A., STRÜBEL G. (2001): Eigenschaften von Mörteln aus Kalken mit natürlichen und zugemischten hydraulischen Anteilen, Bericht Nr. 12-2001 Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz
- KNOBLOCH, H., SCHNEIDER, U. (2001): Bauchemie, 5. Neubearb. und erw. Aufl., Düsseldorf
- POSCHLOD, K. (1990): Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung, Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, München
- RIEDL, N.: (2012) Auswirkungen der freien Bewitterung an Wandmalereien – Herausforderungen für die Zukunft, in: Wandmalerei in freier Bewitterung, ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees, Berlin
- SBV SAKOWSKY: (2013): Romanzement: Technische Dokumentation, Freiberg a. N
- SCHWERDTFEGER, et al. (2013): Buried sub-wavelength fracture imaging in sculpture and construction materials by time-of-flight terahertz time-domain spectroscopy; Applied Optics Vol.52 No.3
- SNETHLAGER, R. (2008) Leitfaden für Steinkonservierung, Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein, 3., überarbeitete Auflage, Stuttgart

## Unveröffentlichte Quellen

- D'HAM, G. (2003): Methoden der Kennwertermittlung im Tiefenprofil zur Planung und Überprüfung von Konservierungsmaßnahmen. Untersuchung ausgewählter Messverfahren am Beispiel des Hildesheimer Rhätsiltsteines vom Kreuzgang der St. Michaeliskirche, Facharbeit zum Diplom, HAWK Hildesheim /Holzminden / Göttingen 2003.
- ENDRULAT S. (2012): Kennwertermittlung von dünn-schichtigen Mörtelsystemen am Beispiel der renaissancezeitlichen Wandmalerei im Brömserhof in Rudesheim am Rhein, M.A.-Thesis, Hannover 2012.
- RIEDL, N. (2013): Trier Konstantinbasilika, Voruntersuchung zur Projektkartierung: Bestandsaufnahme römischer Putzflächen, Untersuchung 2013 mineralische Schutzüberzüge, unveröffentlichter Untersuchungsbericht, Hildesheim 2013.

RUTZ, F.(2007): Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie: Zerstörungsfreie Charakterisierung von Polymeren und Verbundwerkstoffen; Dissertation; Technische Universität Braunschweig

## **Anhang**

### **Verwendete DIN-Normen:**

DIN 52617 (Ausgabe 05/1987): Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen.

DIN EN 13755 (Ausgabe 03/2002): Prüfverfahren für Naturstein. Bestimmung der Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck.

DIN EN 1936 (Ausgabe 07/199): Prüfverfahren für Naturstein. Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität.

DIN 52615 (Ausgabe 11/1987): Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dammstoffen.

DIN 52450 (Ausgabe 08/1985): Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe. Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern.

DIN 18555-3 (Ausgabe 09/1982): Portland-, Eisenportland-, Hochofen und Trass Zement. Teil 7: Bestimmung der Festigkeit

DIN 52104 (Ausgabe 11/1982): Prüfung von Naturstein. Teil1: Frost-Tau-Wechsel-Versuch.