

Domfest am 3.-5. Juni 2016
30 Jahre Sanierung Aachener Dom

Mörtelpflaster und -entwicklung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach

Institut für Bauforschung (ibac)
Bauwerkserhaltung und Polymerkomposite

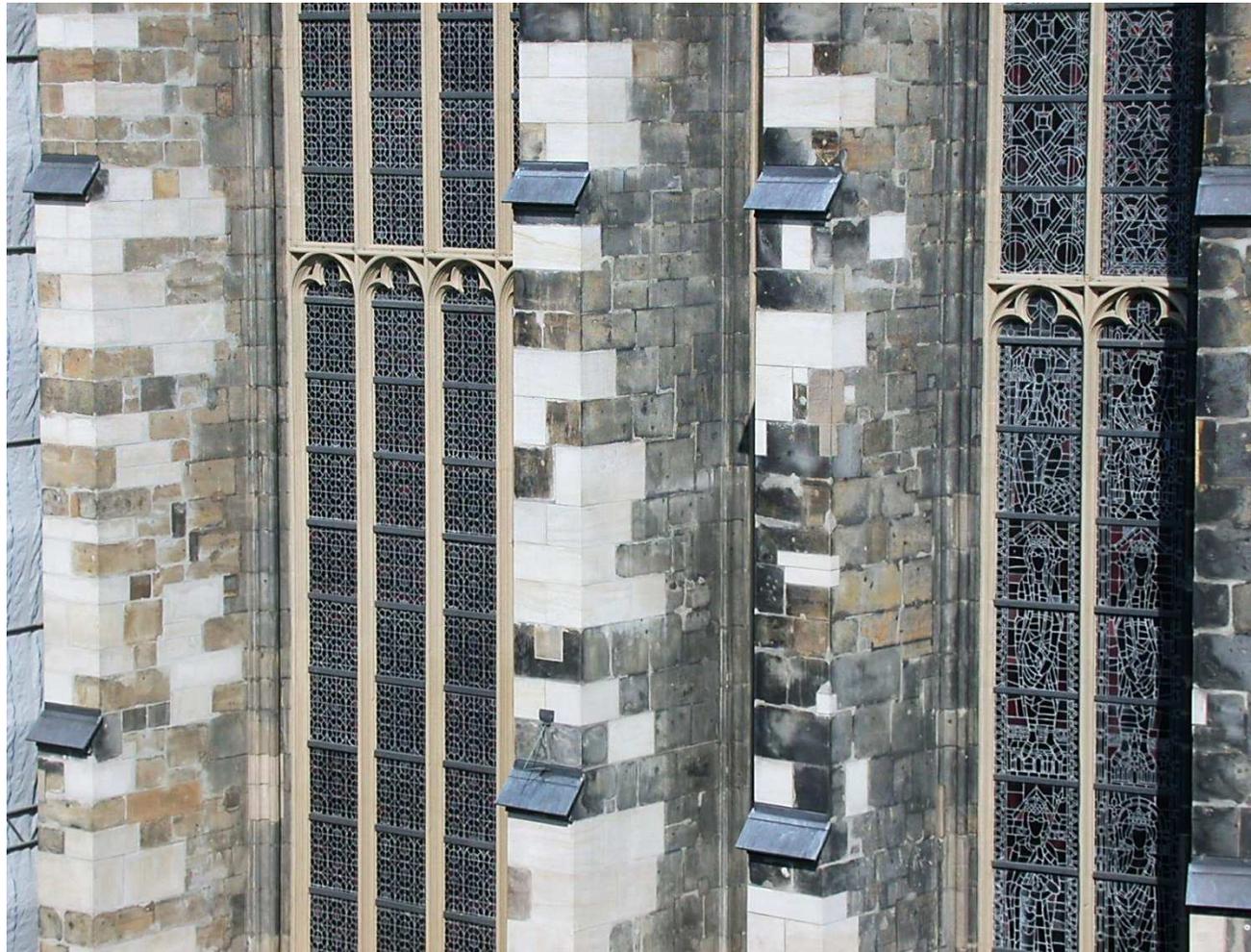


Übersicht

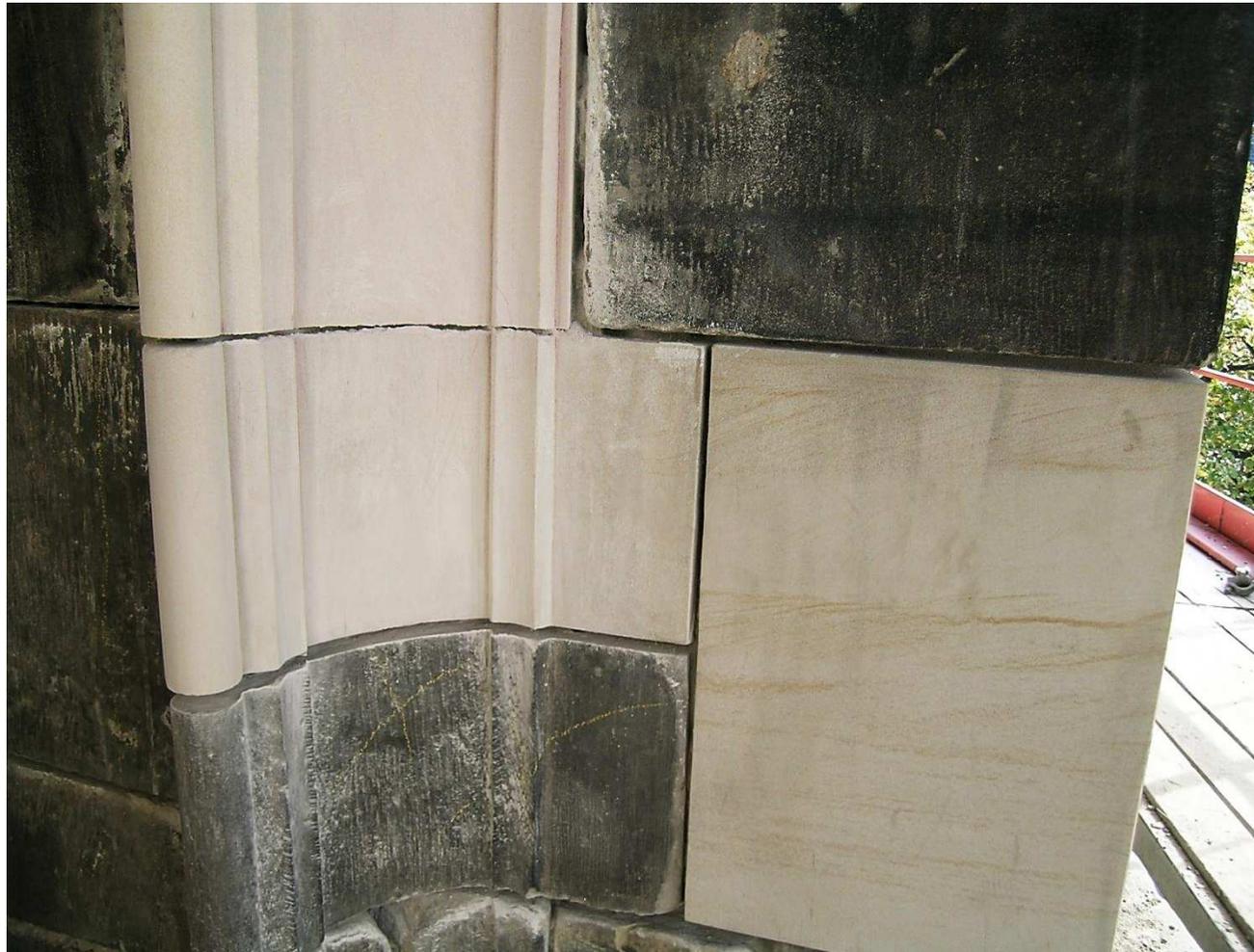
- **Vergussmörtel für die Strebepfeiler der Chorhalle
Studien/Diplomarbeit Herr Engel, 1996/1998**
- **Verfugmörtel für das karolingische Mauerwerk
Diplomarbeit Frau Gargoudi, 2003**
- **Steinergänzungsmörtel für den Nievelsteiner Sandstein
Diplomarbeit Frau Klitzing/Blume, 2005**
- **Feuchtemessungen mit Multiringelektroden (2004)
DBU-Projekt, Diplomarbeit Frau Verstryngge, 2005**
- **Textilbewehrte “Mörtelpflaster“ zum Schutz der Risse im Dach
des Sechzehneckes, DBU-Projekt 2010 und 2016**

Entwicklung des Vergussmörtels

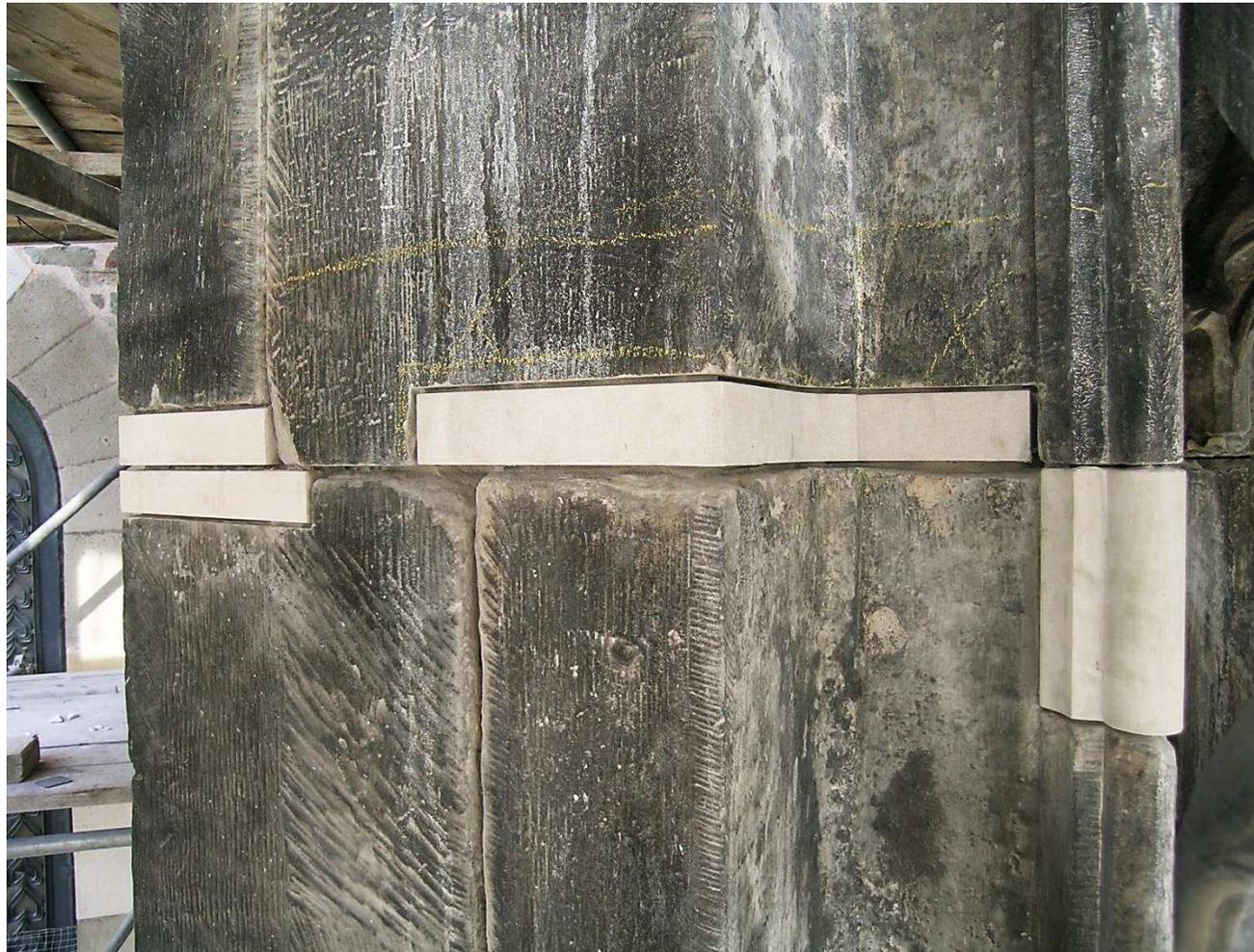
Strebepeiler der Chorhalle: Austausch von Steinen



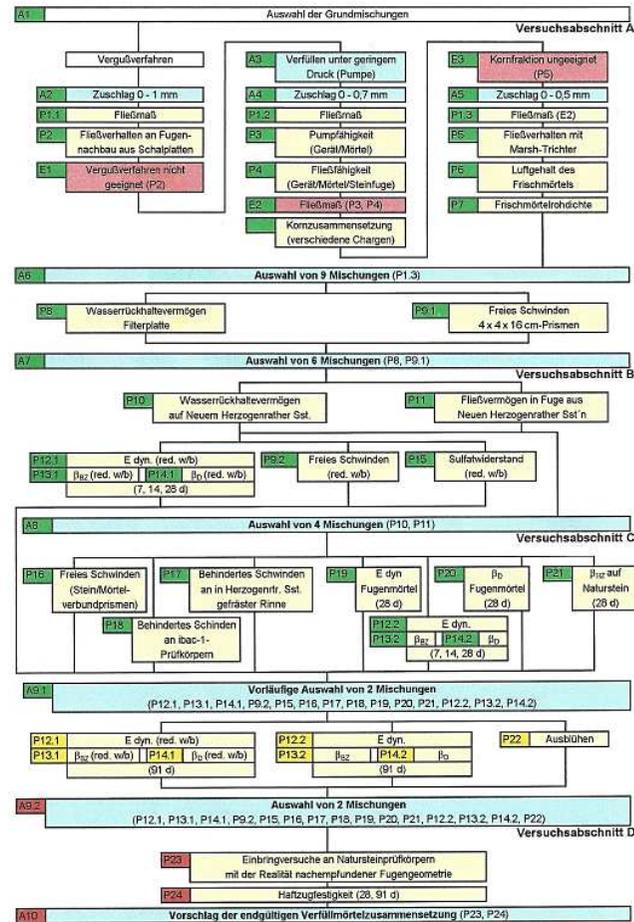
Austausch von ganzen Steinen



Teilaustausch von Steinen: Vierungen



Entwicklung des Vergussmörtels (Rößler, Engel)



/aus Diplomarbeit Engel 1998/



Tabelle A4: Überblick über das Versuchsprogramm; V: Vorversuche, A bis D: Hauptversuchsabschnitte

Kennwert	Anhang	Naturstein	Mörtel													
			M1	M2	M3	M4a	M4b	M5a	M5b	M6a	M6b	M7				
Frischmörtel	Fließmaß	P1	-	-	-	-	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
	Auslaufzeit	P2	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	Fließverhalten in Schalungsfuge	P3	-	-	-	-	-	-	-	V1)	-	-	-	-	-	V2)
	Füllbarkeit Naturstein-Fuge mit Pumpe	P4	Hzn	-	-	-	-	-	-	V3)	-	-	-	-	-	-
	Pumpbarkeit	P5	-	-	-	-	V4)	-	V6)	-	-	V6)	-	-	-	-
	Fließlänge in Natursteinfuge	P6	Hzn	-	-	-	B	B	-	B	B	-	B	B	-	B
	Wasserrückhaltevermögen auf Filterschicht	P7	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	Wasserrückhaltevermögen auf Naturstein	P8	Hzn	-	-	-	B	B	-	B	B	-	B	B	-	B
	Luftgehalt und Rohdichte	P9	-	-	-	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
	Festmörtel	freies Schwinden, 4x4x16-cm ³ -Prismen, Ausgangs-wb-Wert	P10	-	-	-	-	B	B	-	B	B	-	B	B	-
freies Schwinden, 4x4x16-cm ³ -Prismen, reduzierter wb-Wert		-		-	-	-	C	-	-	C	-	-	C	-	-	C
Behindertes Schwinden im Verbund mit Naturstein (Rinne)		P11	Hzn	-	-	-	C	-	-	C	-	-	C	-	-	C
Behindertes Schwinden im Verbund mit Naturstein (zwischen Steinen)			alle	-	-	-	C	-	-	C	-	-	C	-	-	C
Sulfatwiderstand		P13	-	B	B	B	B	B	-	B	B	-	B	B	-	B
E-Modul (dynamisch), 4x4x16-cm ³ -Prismen, Ausgangs-wb-Wert			-	-	-	-	C	-	-	C	-	-	C	-	-	C
E-Modul (dynamisch), 4x4x16-cm ³ -Prismen, reduzierter wb-Wert		P14	-	-	-	-	B	B	-	B	B	-	B	B	-	B
E-Modul (dynamisch), 2x2x1,5-cm ³ -Prismen aus Fugenmaterial			alle	-	-	-	C	-	-	C	-	-	C	-	-	C
Biegezug- und Druckfestigkeit an 4x4x16-cm ³ -Prismen, Ausgangs wb-Wert		P16	-	-	-	-	C	-	-	C	-	-	C	-	-	C
Biegezug- und Druckfestigkeit an 4x4x16-cm ³ -Prismen, reduzierter wb-Wert			-	-	-	-	B	B	-	B	B	-	B	B	-	B
Druckfestigkeit, 2x2x1,5-cm ³ -Prismen aus Fugenmaterial	P17	alle	-	-	-	C	-	-	C	-	-	C	-	-	C	
Hartzugfestigkeit vermörtelter Natursteinprismen		alle	-	-	-	C	-	-	C	-	-	C	-	-	C	
Füllbarkeit Fuge und Hartzugfestigkeit an praxisingerichtem Fugenmodell aus Natursteinen	P19	Hzn, Sav, Bl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	D	

Hzn: Neuer Herzogenrather Sandstein
 Hza: Alter Herzogenrather Sandstein
 Sav: Savonniers-Quolth
 Bl: Aachener Blausandstein
 alle: Hzn + Hza + Sav + Bl

1) Varianten M5a 12 und -22
 2) Variante M7 2
 3) Varianten M5a 12, -13, -15, -16 und -17
 4) Varianten M4a 6, -7 und -9
 5) Variante M4b7
 6) Variante M5a 5

Entwicklung eines Verfugmörtels für das Karolingische Mauerwerk

Karolingisches Mauerwerk – Grauwacke



Karolingisches Mauerwerk – Travertin



Charakterisierung des Bestands

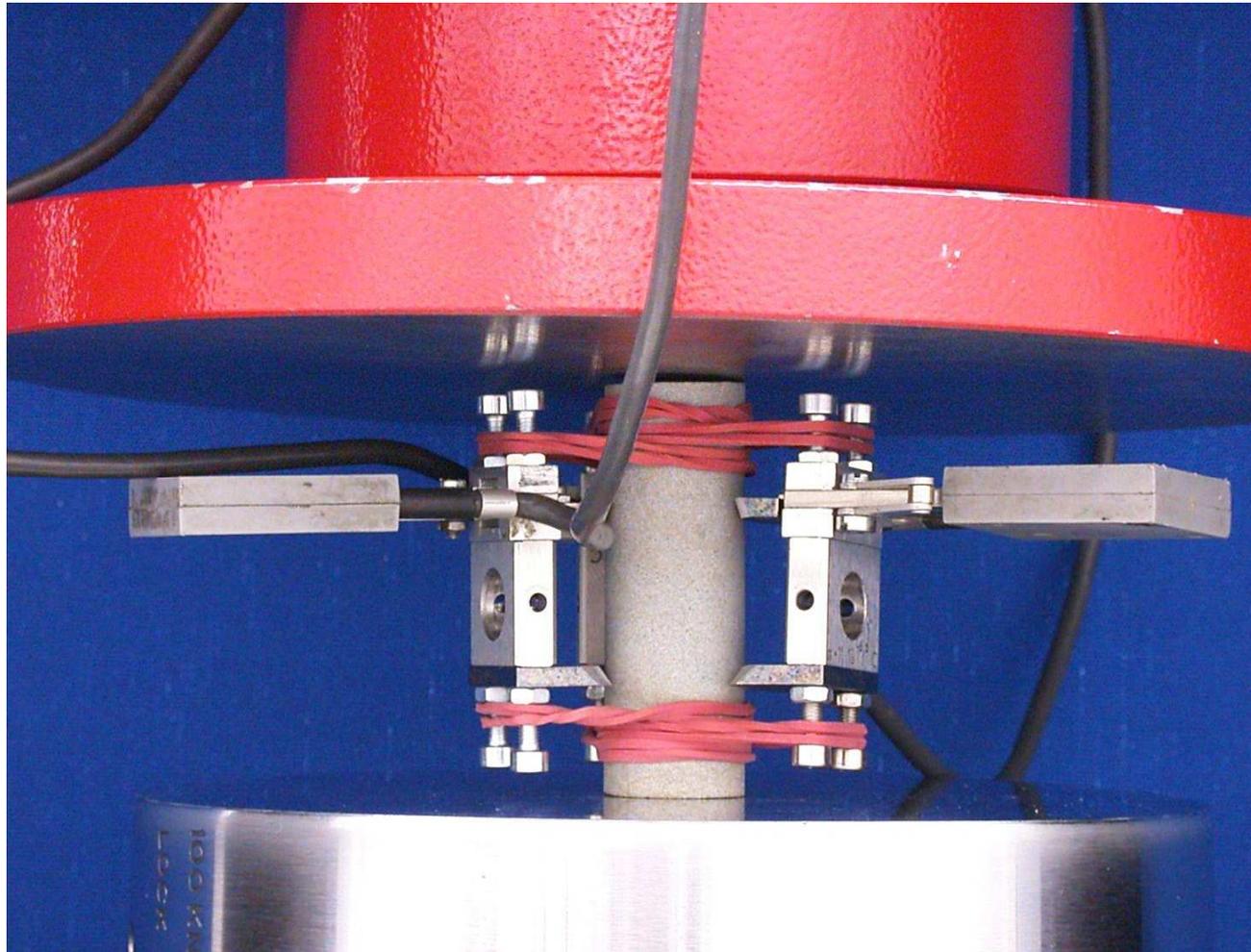
Untersuchung folgender Natursteinvarietäten (ibac und Geologie-Institut der RWTH Aachen, Dr. Fitzner)

- Grauwacke
- Travertin
- Aachener Blaustein
- Lothringer Kalkstein

■ Anlegen einer Bestandsdatenbank

■ Kennwerte für die Abstimmung der Mörtel Eigenschaften

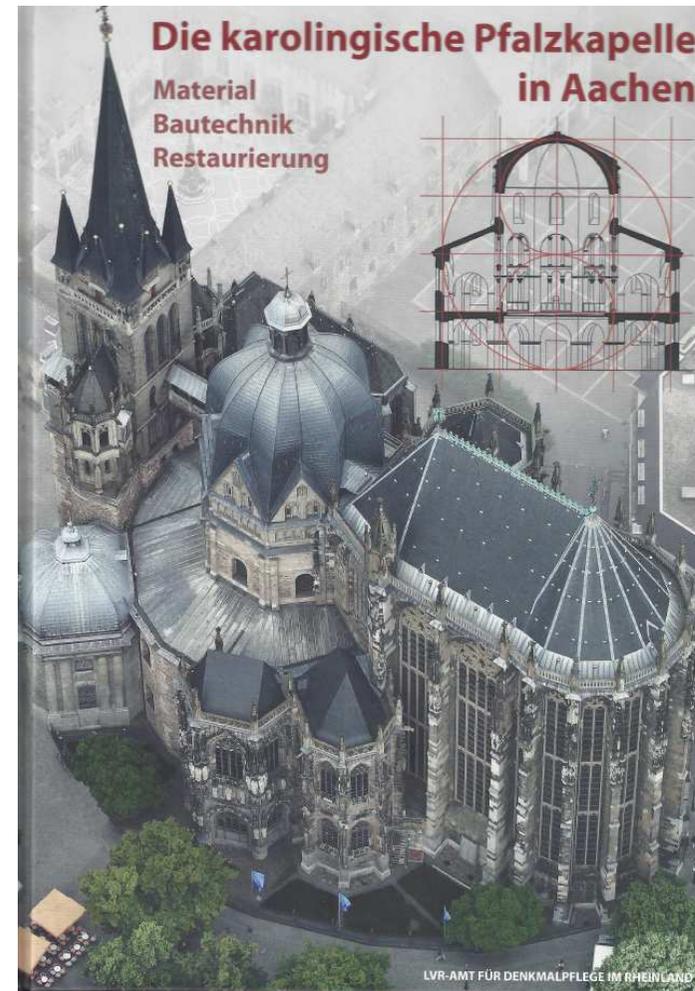
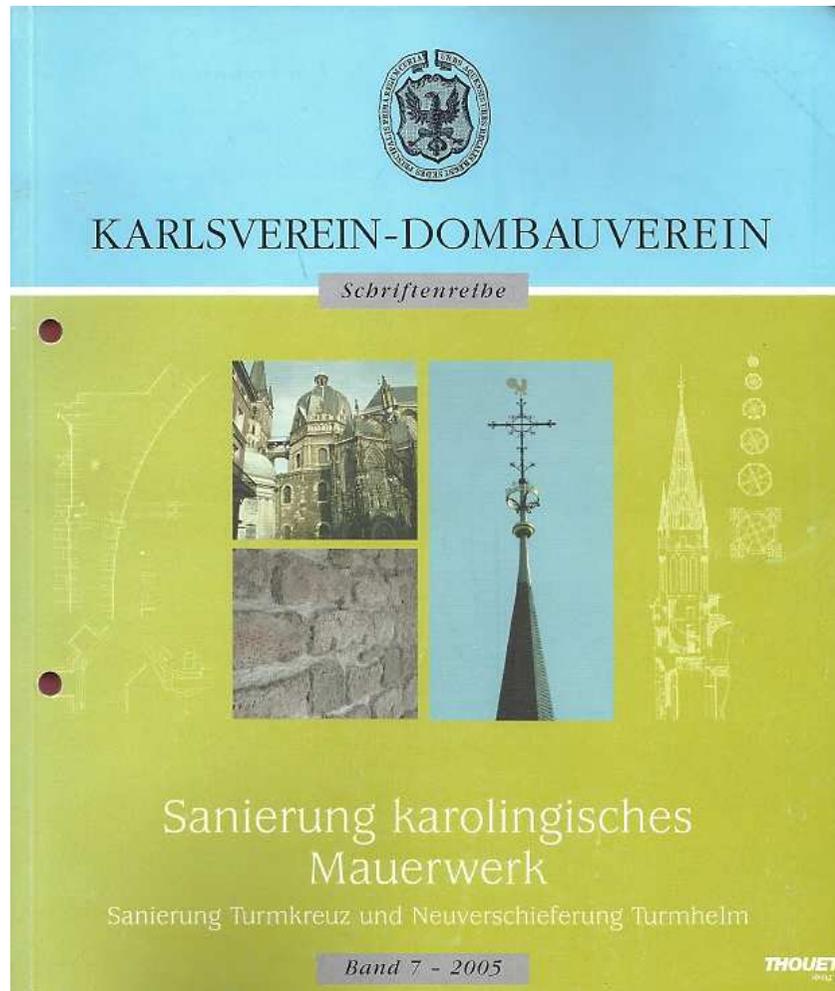
Charakterisierung der Natursteine: Bestimmung des E-Moduls



Ergebnisse: karolingischer Mörtel (Dr. Rankers)

- **Basierend auf römischen Technologien nach Vitruv**
- **Verwendung von gebranntem Kalk als Hauptbindemittel**
- **Gebrochene und gemahlene römische Ziegel als Zuschlag**
 - typisch rötliche Färbung des Mörtels
 - puzzolanische Reaktion des Ziegelmehls
 - Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens
- **Sieblinie vergleichbar mit Sieblinie C8 für Beton**
- **Gute Nachbehandlung durch damals vorhandenen Außenputz**

Das Rezept für den Verfugmörtel: Literatur



Verfugmörtel für den Aachener Dom



Vorgehensweise:

- Mörtelentwicklung im Labor
- Untersuchungen bzgl. Verbund, Festigkeit und Frostwiderstand
- kleinere Probeflächen für die Farbtönung
- große Probefläche mit 80 kg Werk trockenmörtel

Verfugtes Mauerwerk : Ansicht aus geringem Abstand



Verfugtes Mauerwerk: Ansicht aus größerem Abstand



Entwicklung eines Steinergänzungsmörtels

Diplomarbeit Frau Klitzing/Blume: Steinerergänzungsmörtel SEM

- **SEM-Entwicklung zunächst für den Nievelsteiner Sandstein der Matthias- und Annakapelle des Aachener Doms**
- **Bindemittel basiert auf der Rezeptur des Verfugmörtels**
- **Variation verschiedener Kombinationen aus Leicht-Zuschlägen, Überprüfung aller relevanten Eigenschaften**
- **Ergebnis: SEM Nr. 138 ist für den Nievelsteiner Sandstein hervorragend geeignet**

➔ Der SEM kann für andere Steine modifiziert werden!

Mit dem Steinerergänzungsmörtel instandgesetzter Naturstein



Optische Anpassung an weitere Steinsorten möglich!



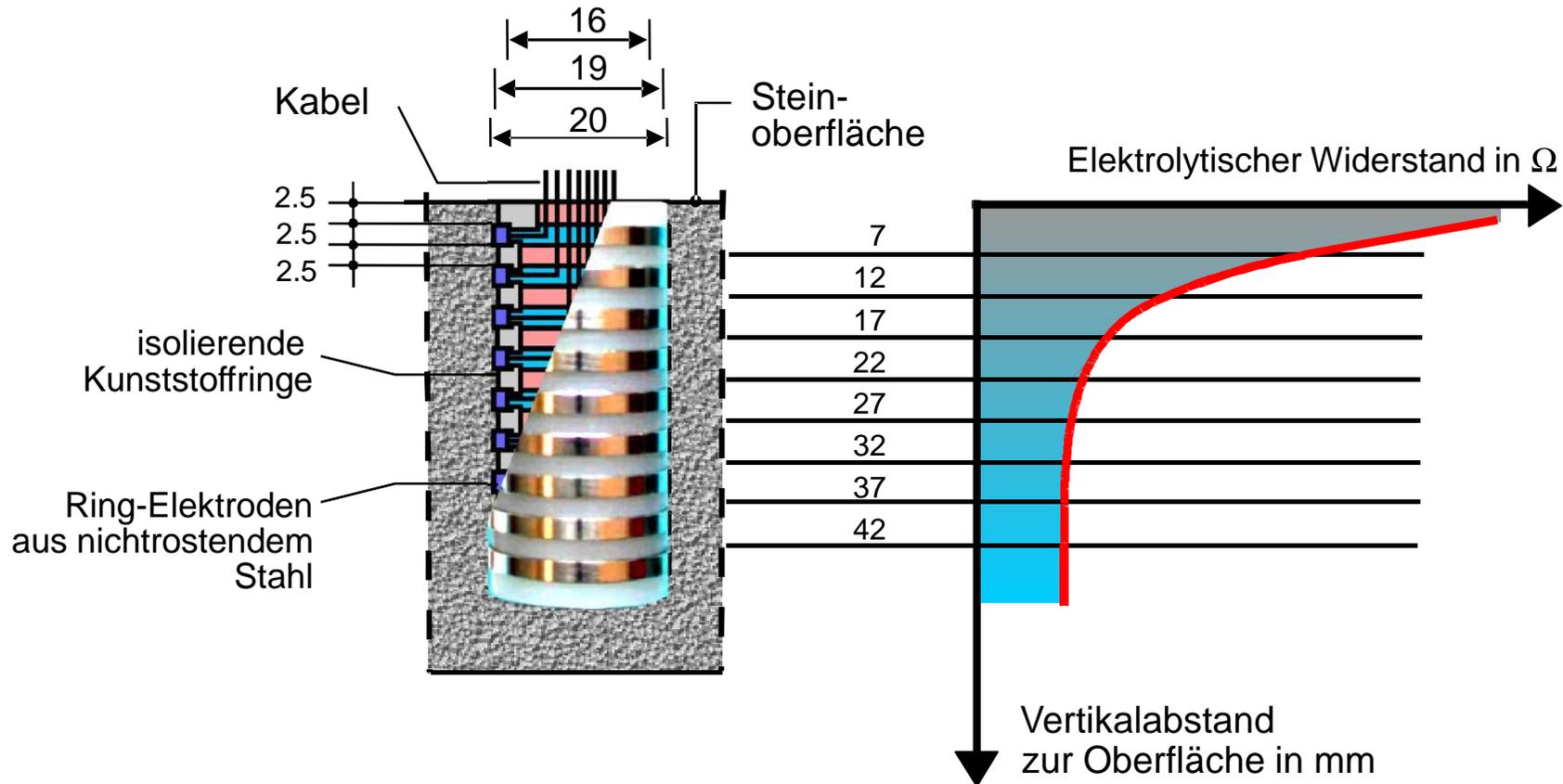
Feuchtemessungen mit Multiring-Elektroden

Fragestellungen bezüglich der Baustoffeuchte

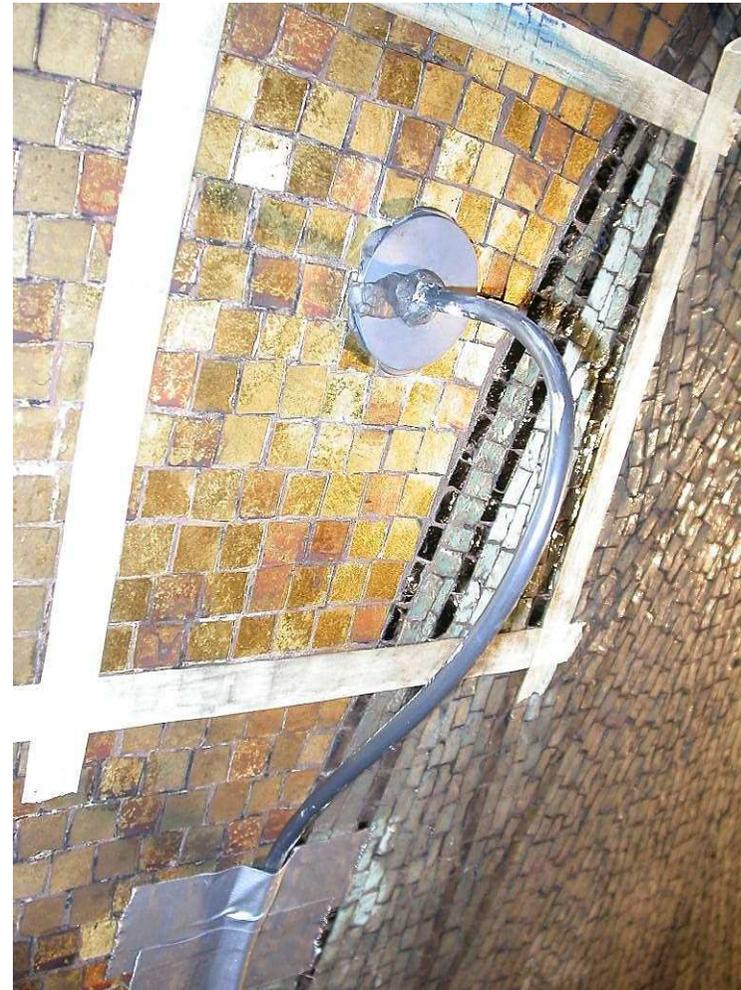
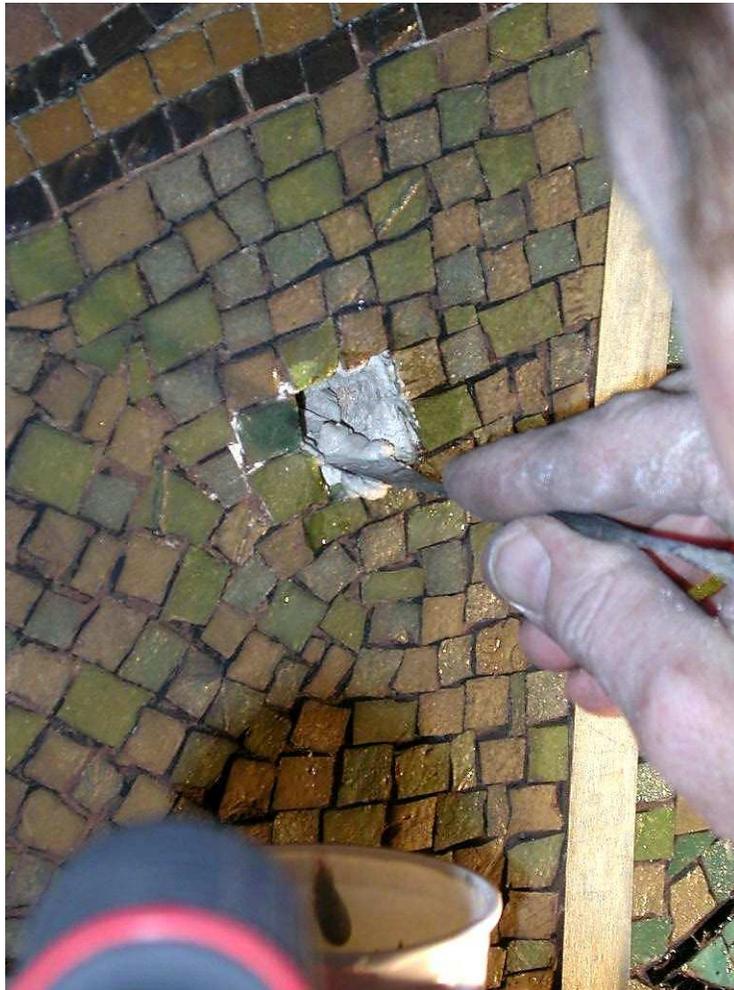
- Welche Feuchtebelastung erfährt der **Mörtel hinter den Mosaiken** durch die Dombesucher bei feuchtem Wetter?
 - Wie muss der **Verfugmörtel feuchtgehalten** werden, damit er nach der Herstellung nicht zu stark trocknet?
 - Welche Feuchtigkeit stellt sich nach der Instandsetzung an der Oberfläche der **Ringanker aus Eisen** ein?
 - Wie reagiert der Wassergehalt im Mauerwerk an der Außenseite des Doms auf Regenereignisse (**Fensterbänke**)?
- ➔ **Bestimmung der Feuchteverteilung mit Multiring-Elektroden (DBU-Projekt)**

Das Sensorsystem

Multiringelektroden → tiefenabhängiger Wassergehalt



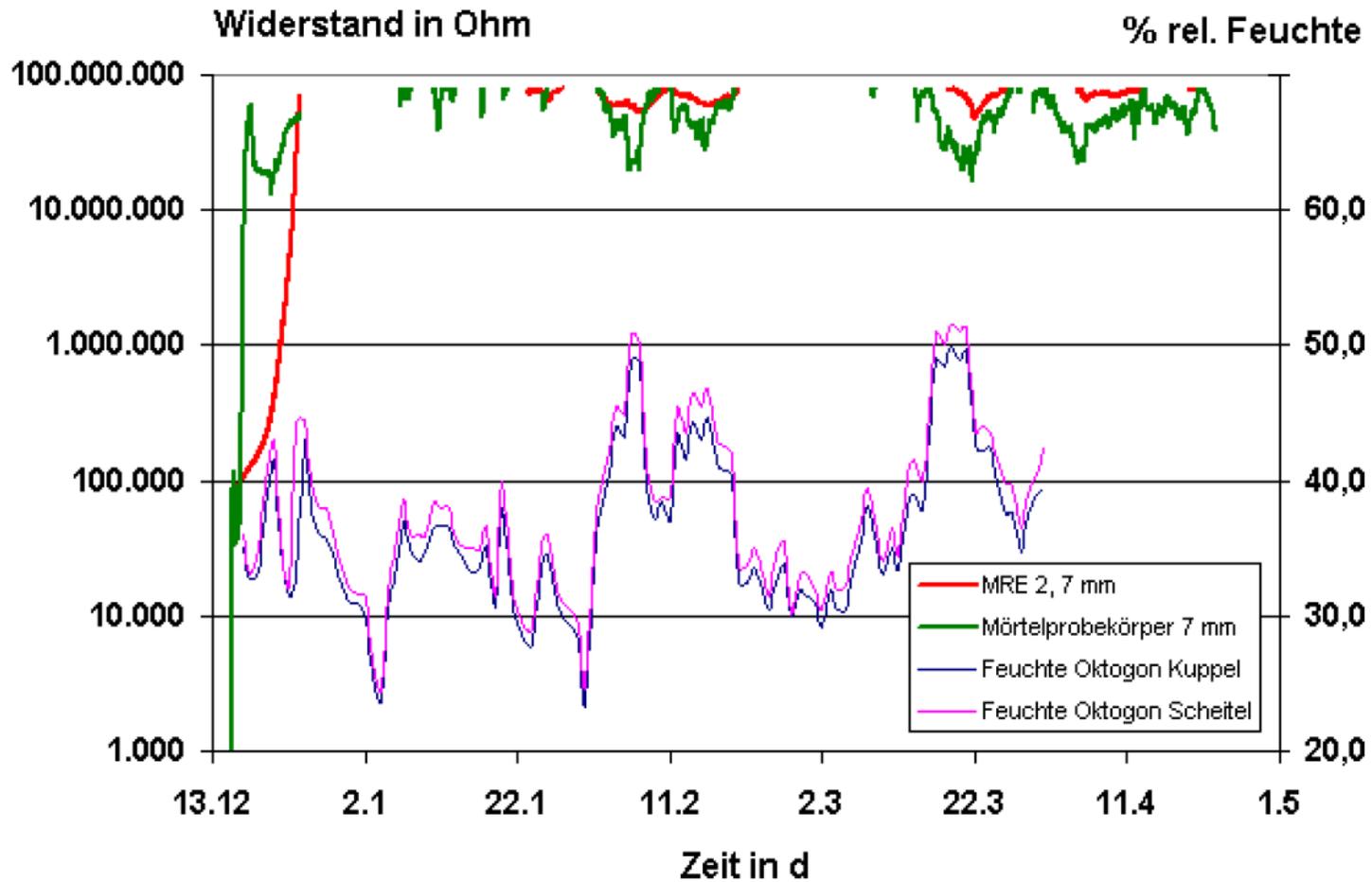
Einbau der MRE im Oktagon (vor der Sanierung der Mosaik!)



Datenerfassungssystem für die MRE



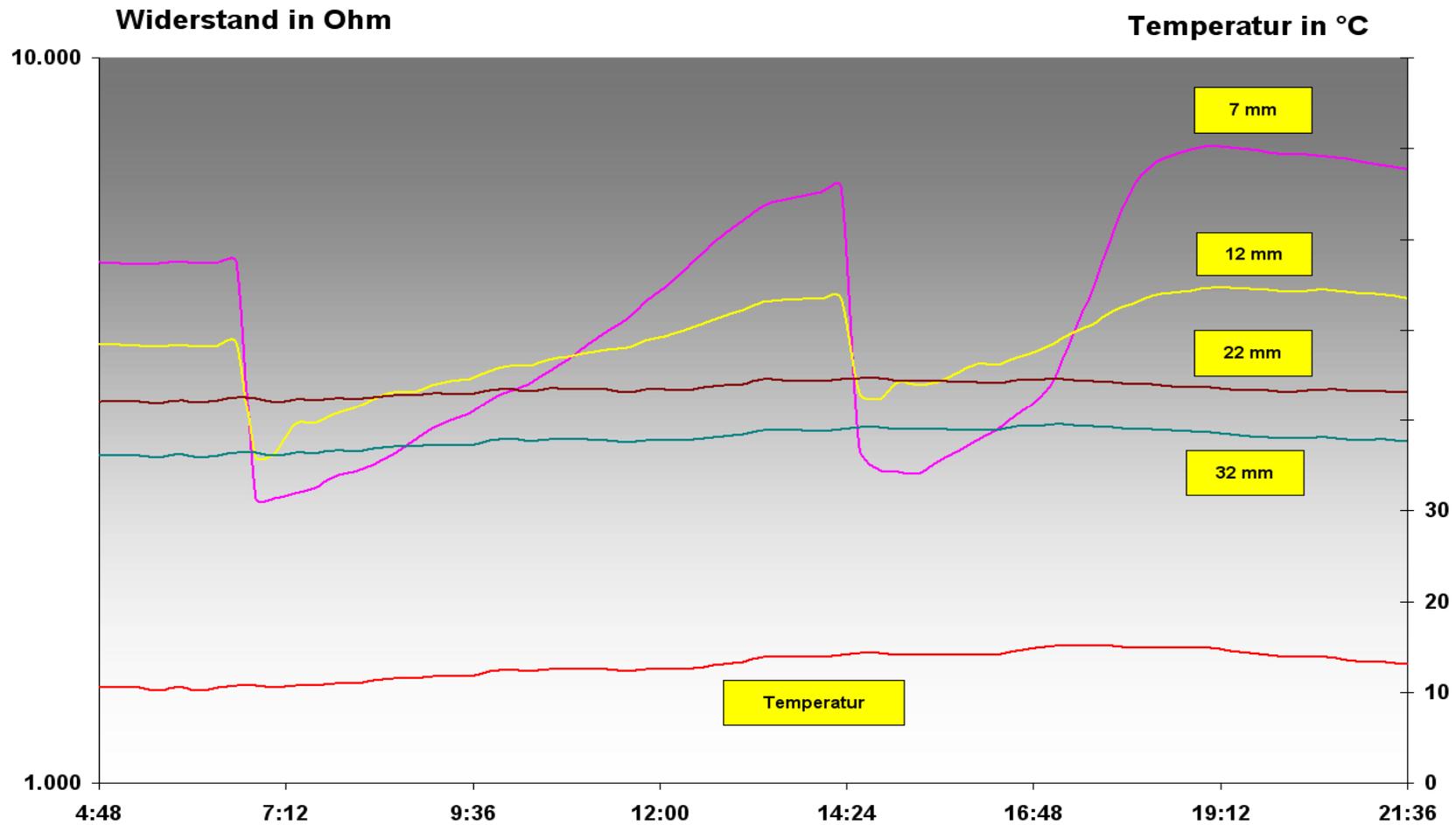
Ergebnisse: MRE im Kuppelbereich des Oktogons



Untersuchungen zur erforderlichen Nachbehandlung am Westwerk

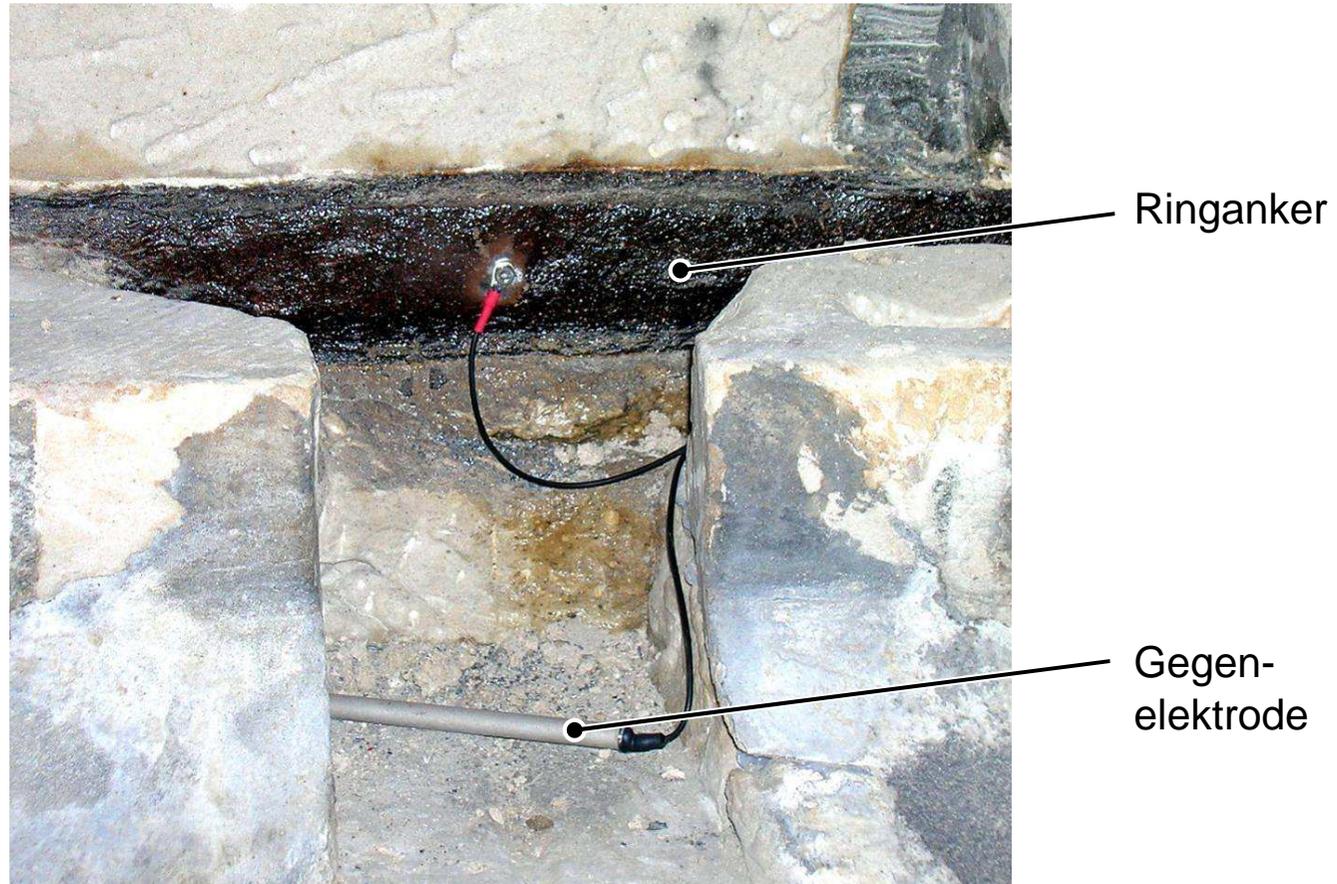


Ergebnisse: MRE im Westwerk des Aachener Doms

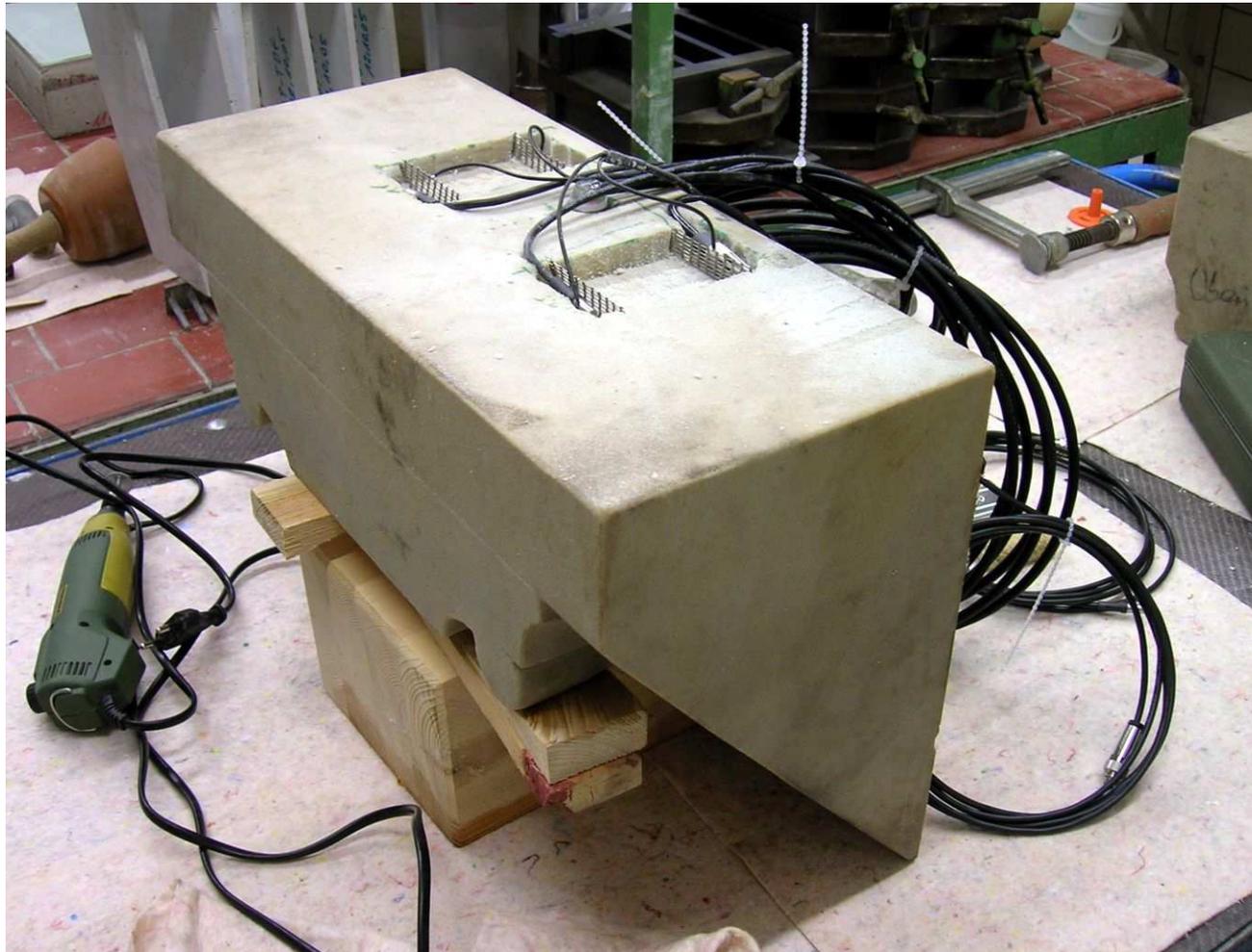


Sensoranordnung am Ringanker

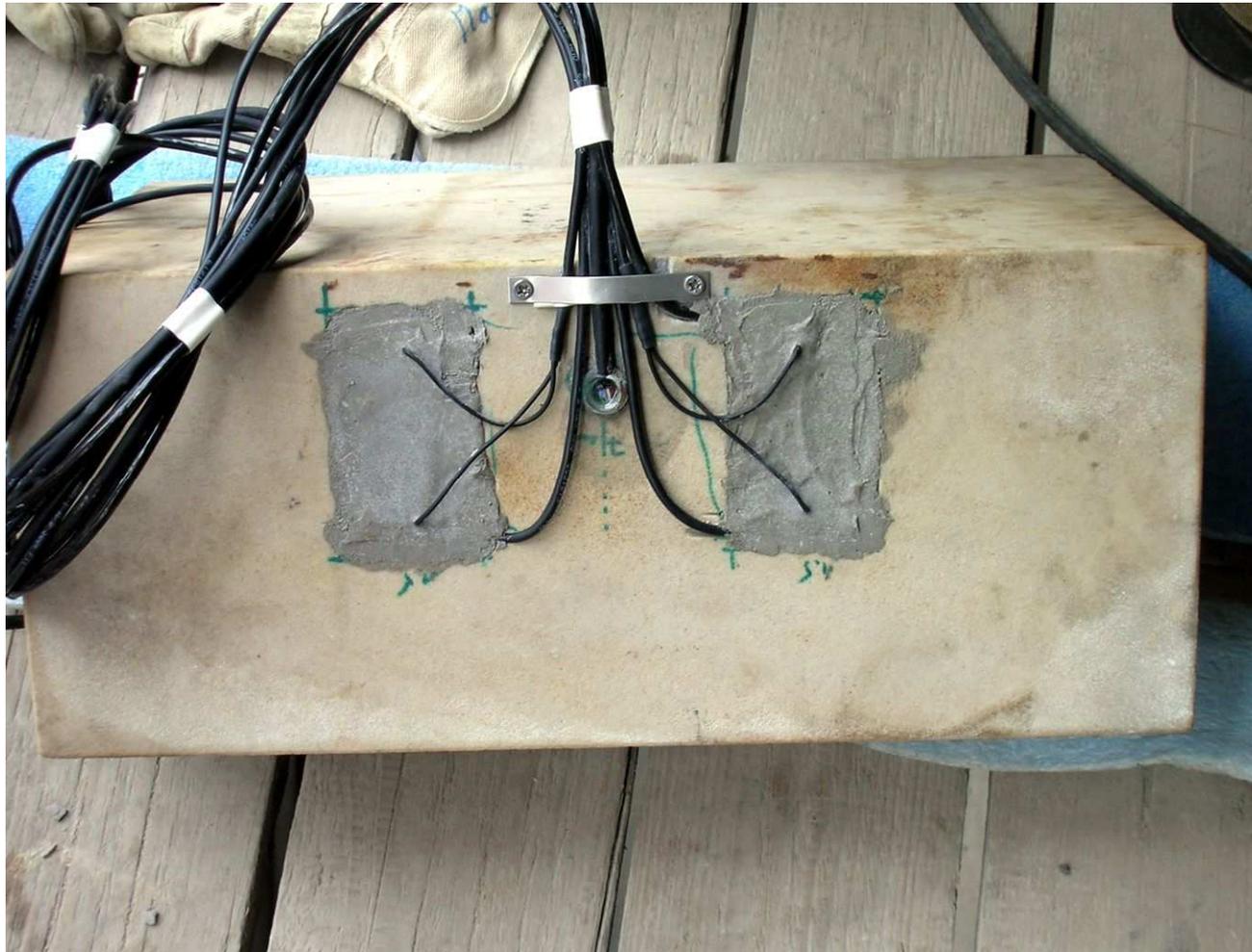
Gegenelektroden → Korrosionsverhalten Ringanker



Einbau der Sensoren in der Annakapelle (1)



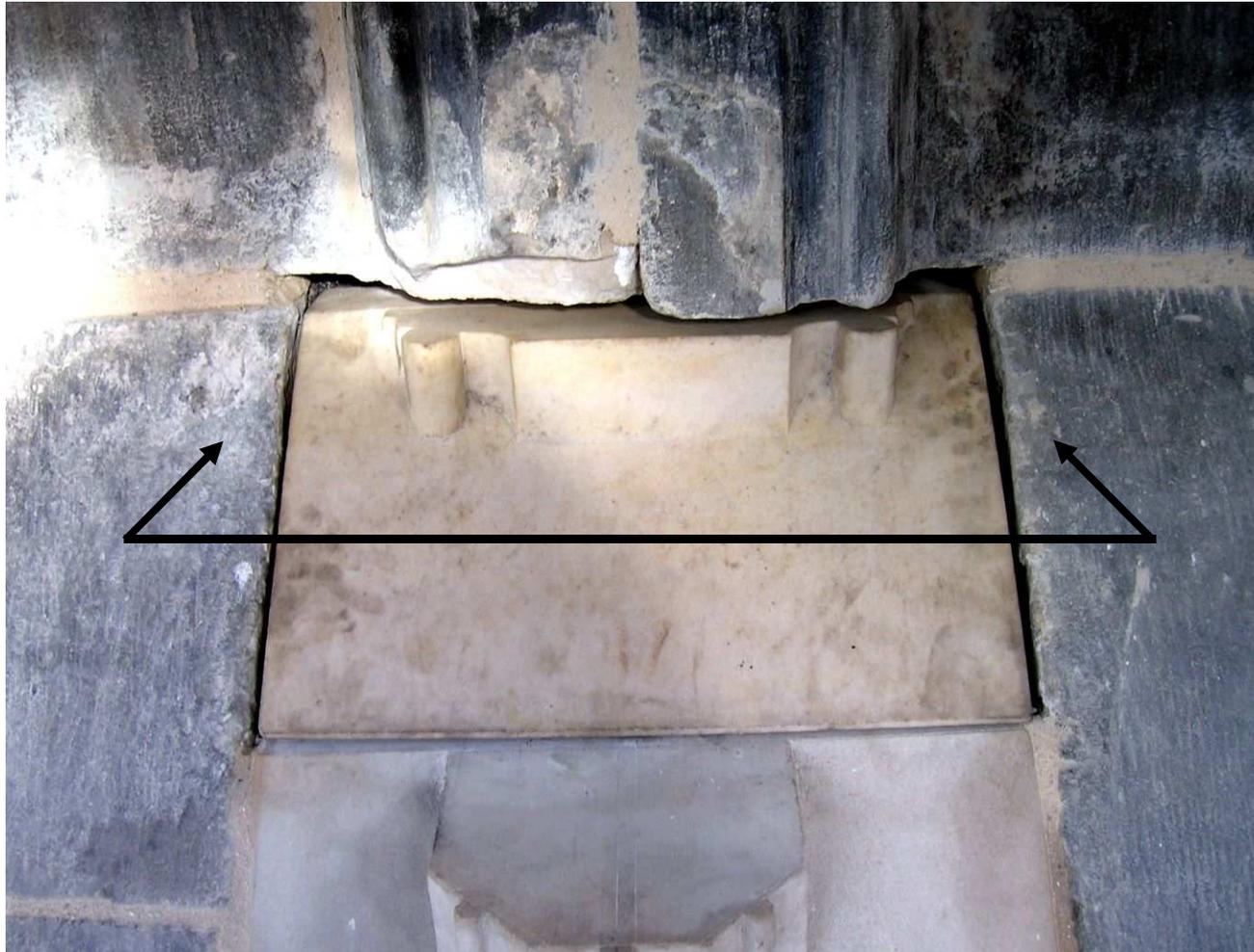
Einbau der Sensoren in der Annakapelle (2)



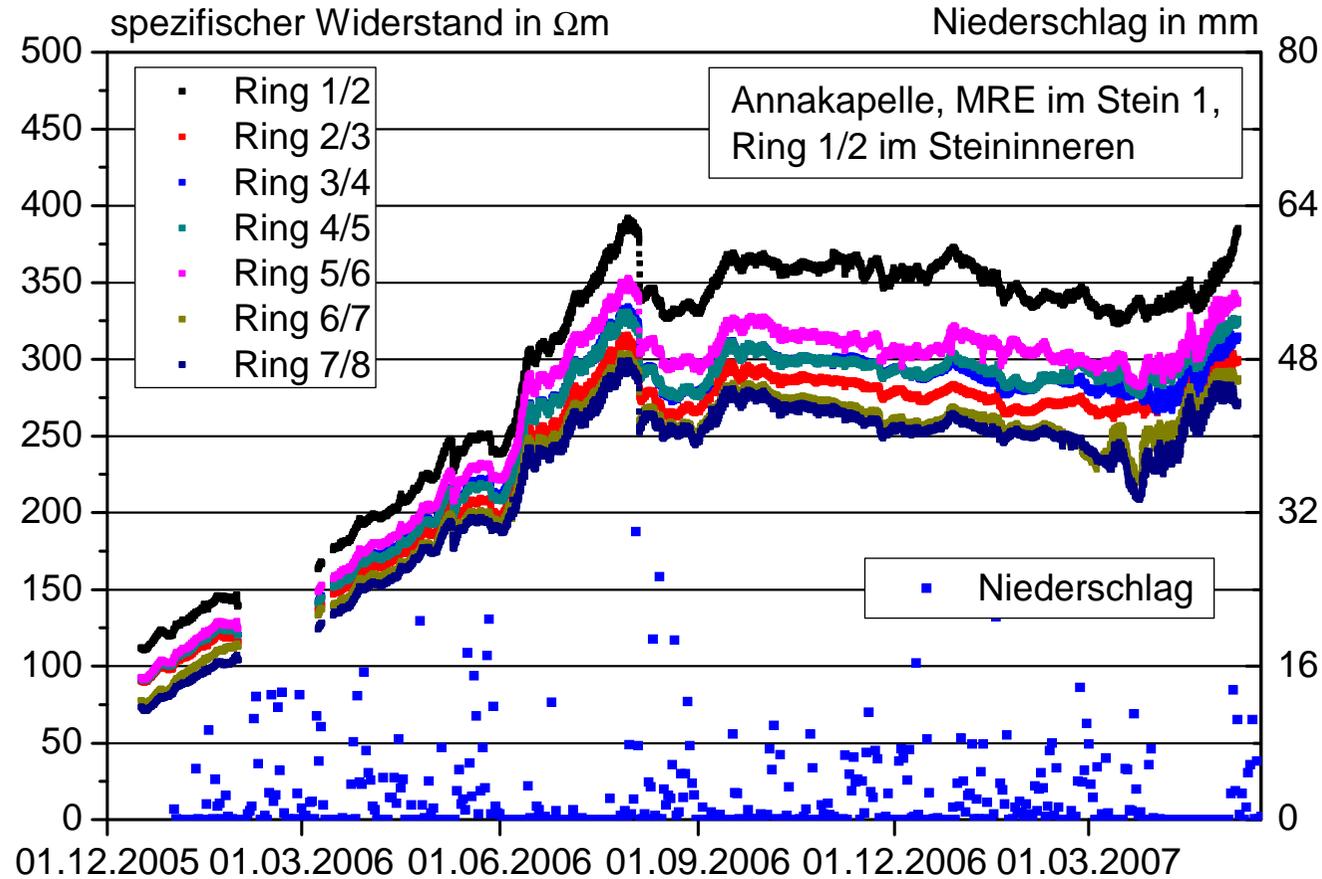
Einbau der Sensoren in der Annakapelle (3)



Position der Sensoren in der Annakapelle

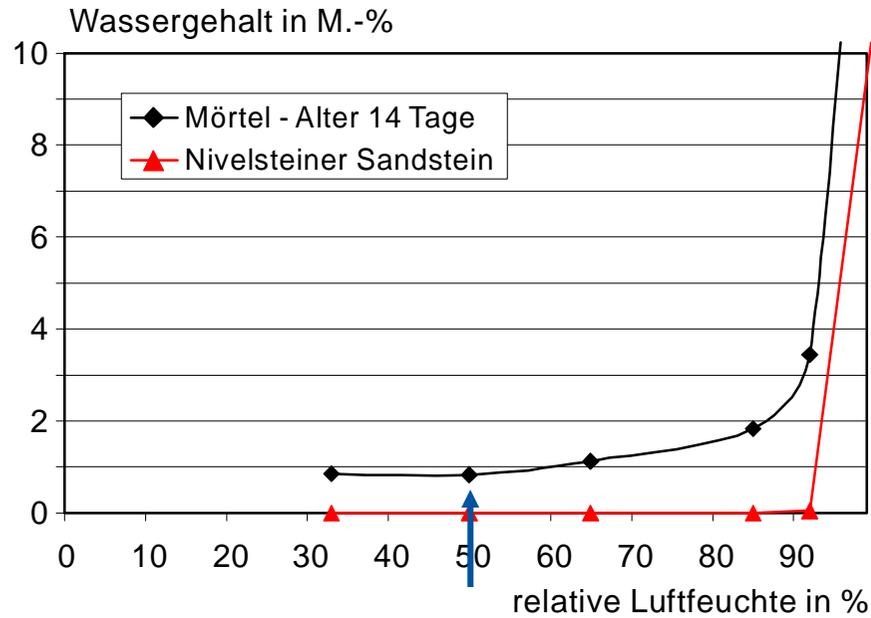


Ergebnisse der Multiringelektroden – Annakapelle

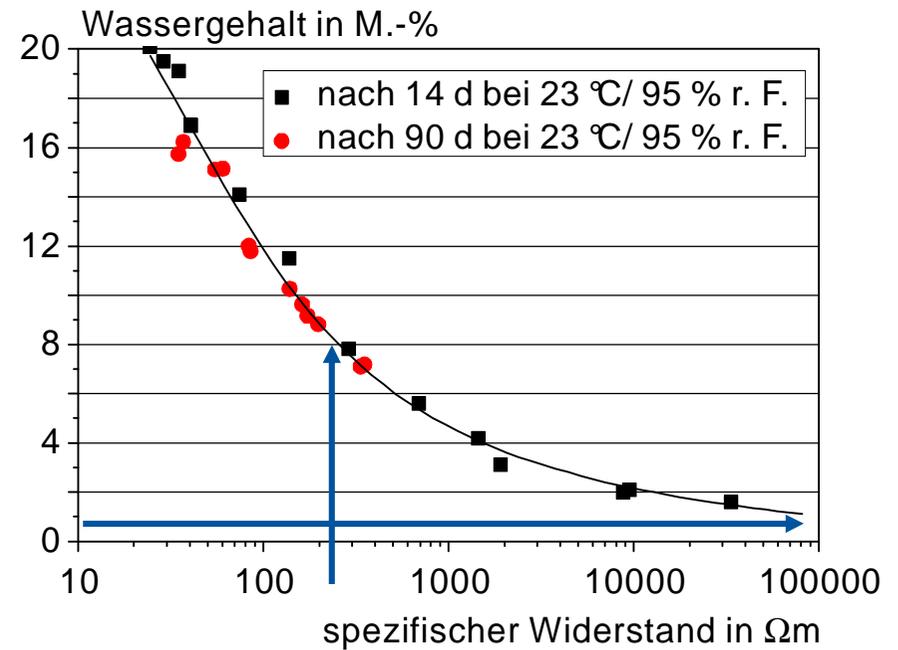


Diskussion der Messwerte (Verstrynghe, Leuven 2005)

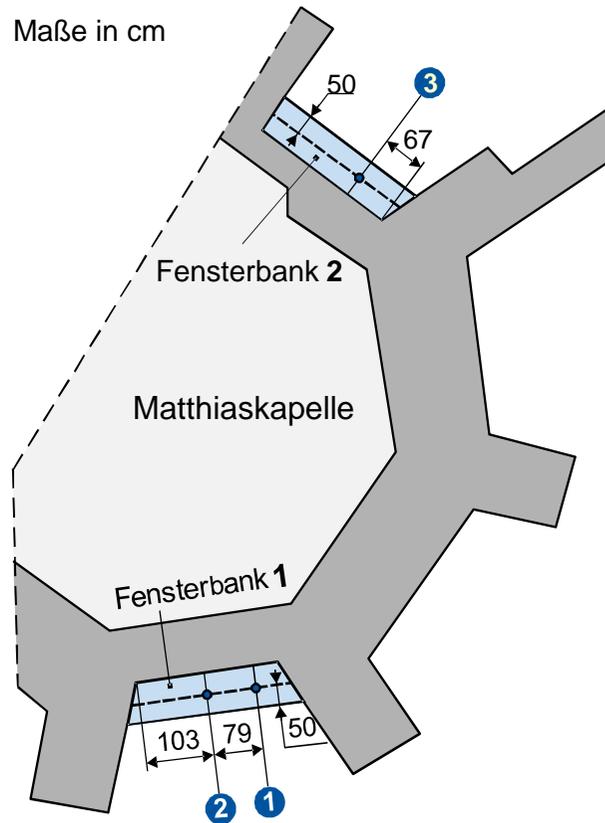
Sorptionsisotherme



Kalibrierung der Elektroden

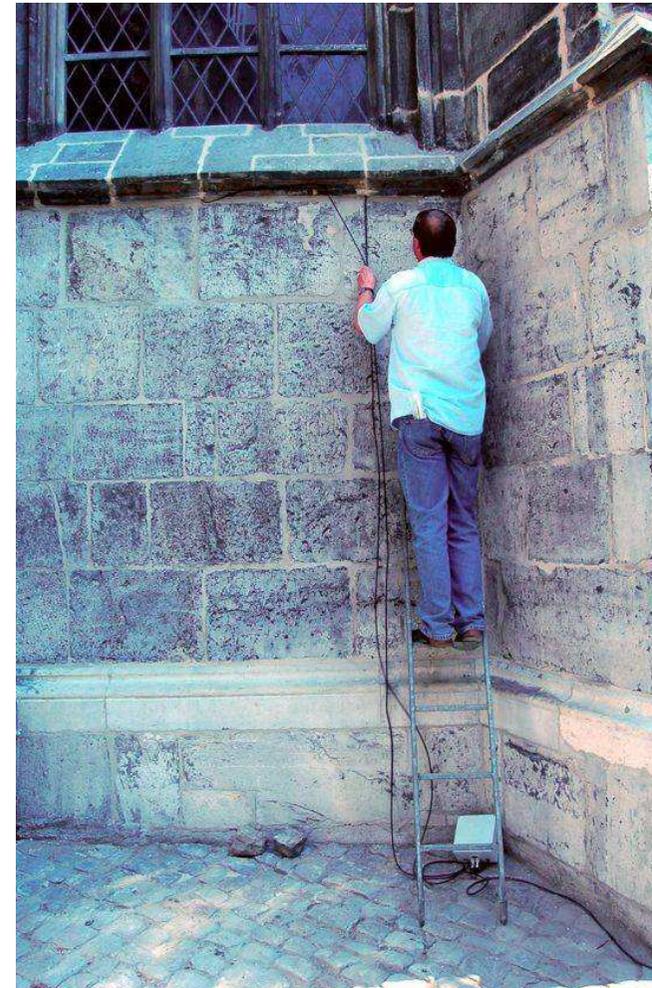


Multiringelektroden in den Fensterbänken/Matthiaskapelle (1)

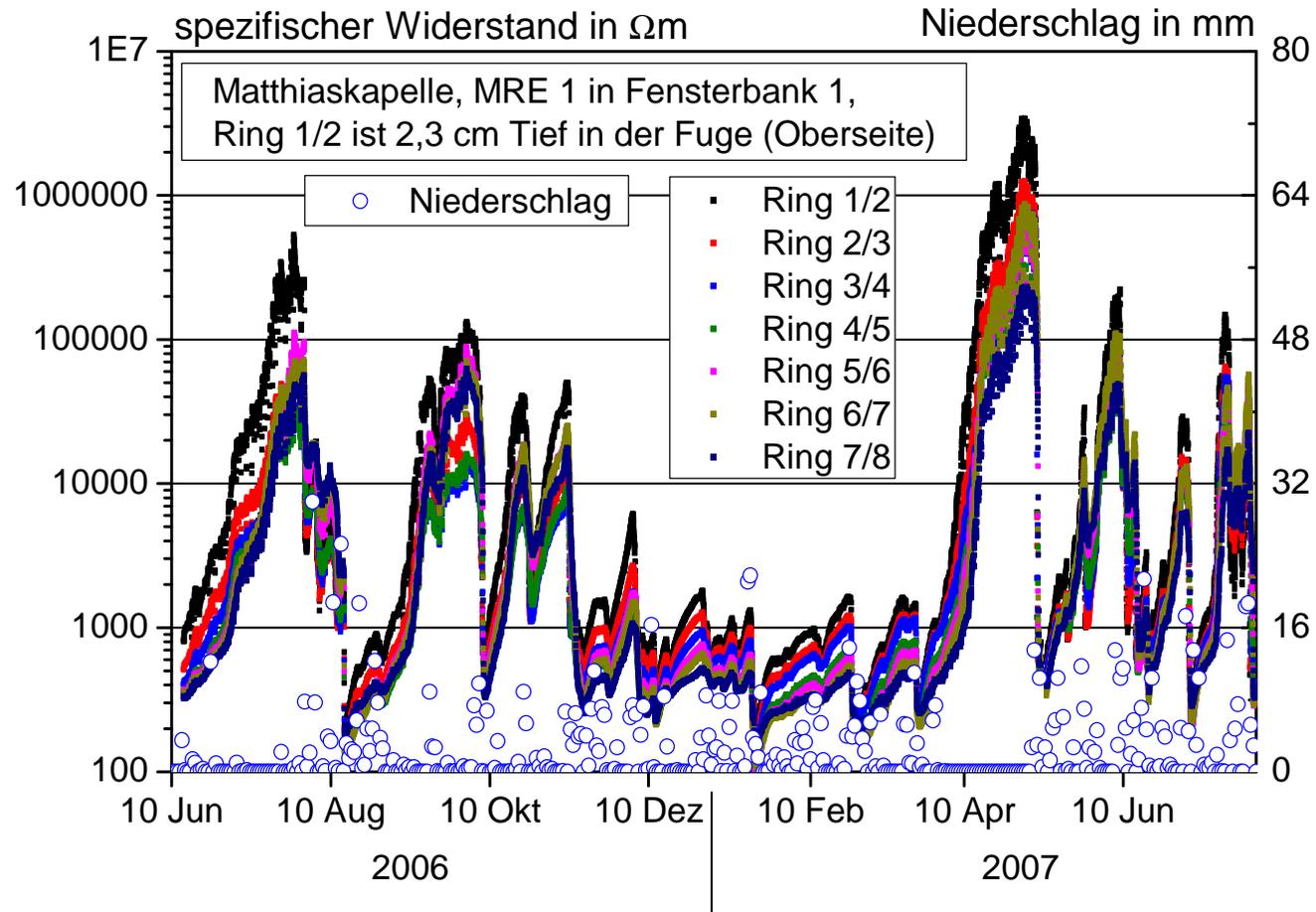


① ② ③ : Feuchtesensoren

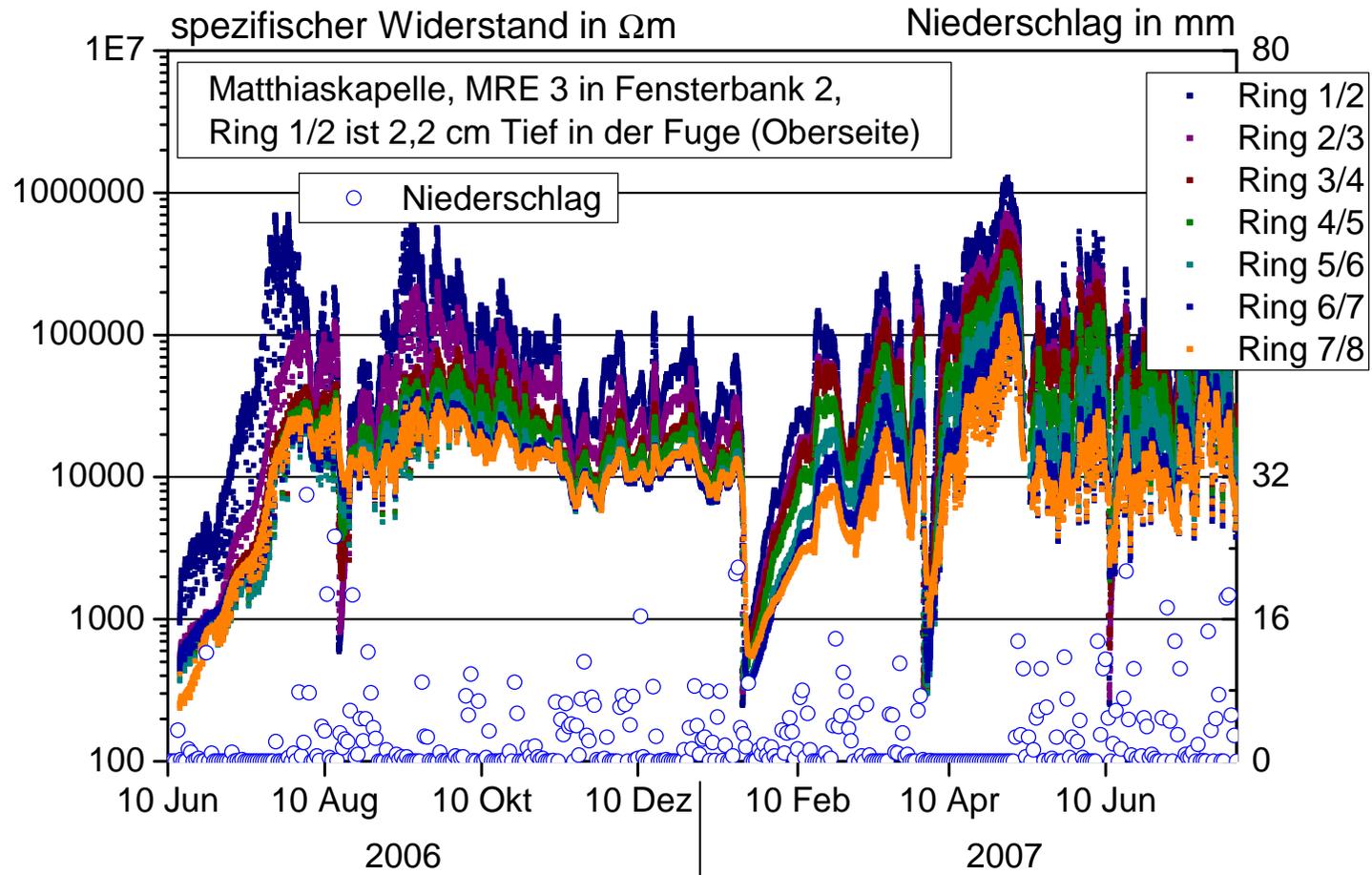
Fensterbank 1 ist stärker bewittert als Fensterbank 2



Multiringelektroden in den Fensterbänken/Matthiaskapelle (2)



Multiringelektroden in den Fensterbänken/Matthiaskapelle (3)



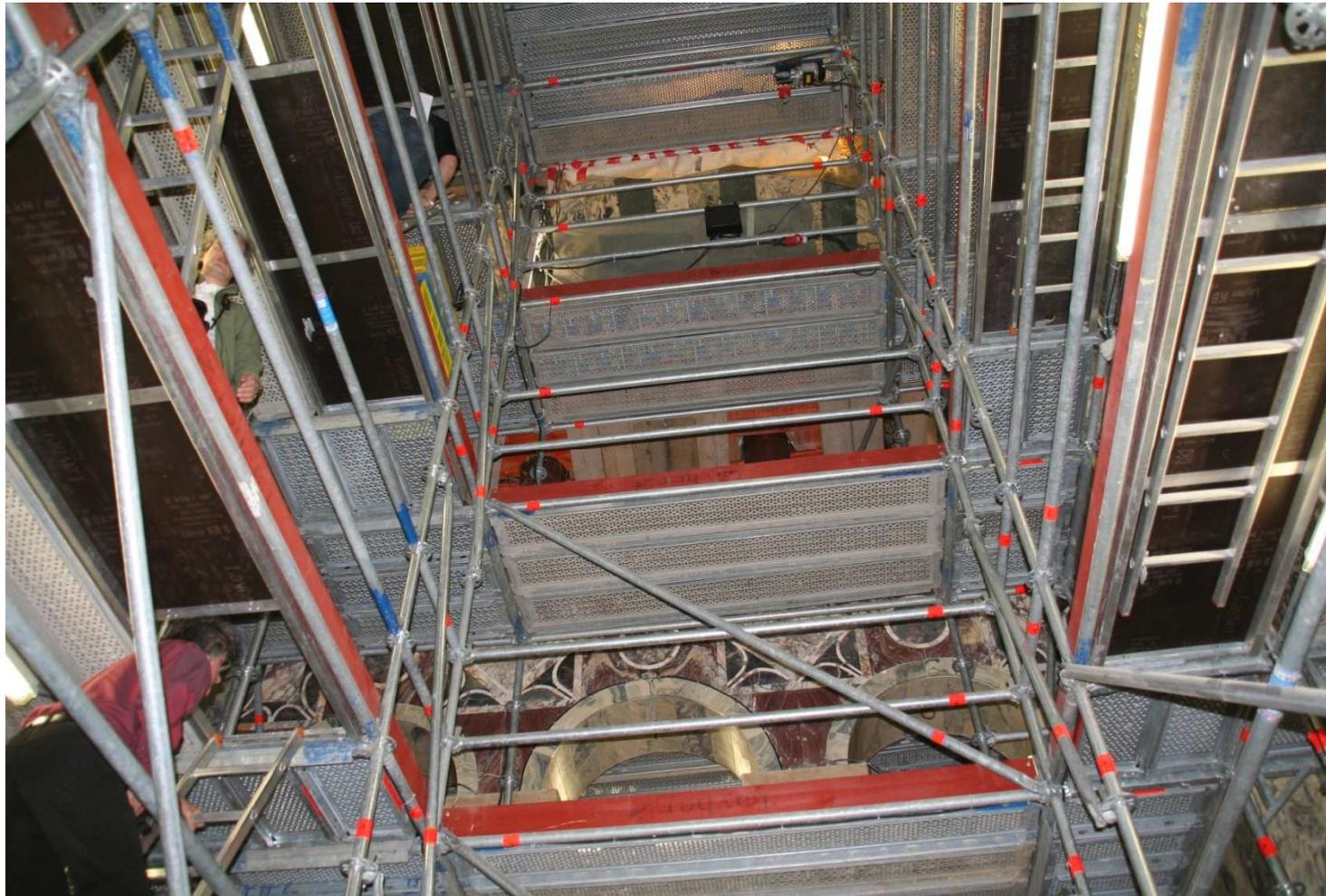
Wetterschutz Seite der Matthiaskapelle

Ergebnisse der Messungen mit Multiring-Elektroden

- **Hinter den Mosaiken im Kuppelbereich ist die Feuchtigkeit durchgehend sehr gering!**
 - **Der Verfugmörtel muss > 1 mal täglich feuchtgehalten werden, damit er nach der Herstellung nicht zu stark trocknet!**
 - **Die Feuchte an der Oberfläche der Ringanker sinkt sehr langsam über Jahre hinweg!**
 - **Der Wassergehalt im Mauerwerk an den Fensterbänken reagiert leicht zeitverzögert deutlich auf Regenschauer!**
- ➔ Die Messungen können beliebig fortgesetzt werden!**

Mörtelpflaster mit Carbontextilbewehrung

Arbeiten an den Mosaiken im Innenbereich



Instandsetzung der Mosaik



Problem: Risse, die durch die ganze Decke gehen!



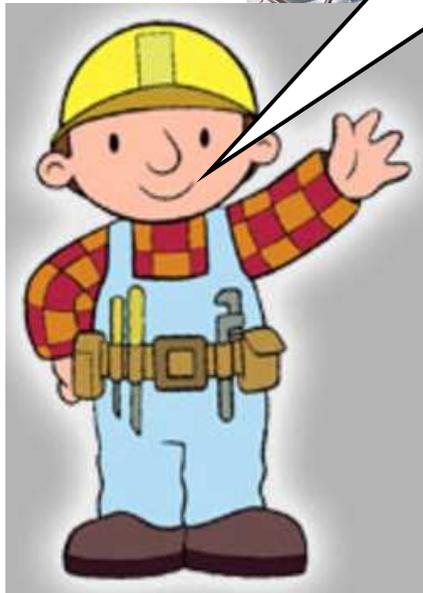
Riss von oben auf dem Dach nach Reinigung des Untergrundes



Bleiverguss unterhalb des karolingischen Mörtels (803)



Ziel: Der Riss soll sich nicht mehr bewegen und dicht bleiben!



- **Idee: Riss und Rissbewegungen mit einem “Heftpflaster“ dauerhaft heilen....**

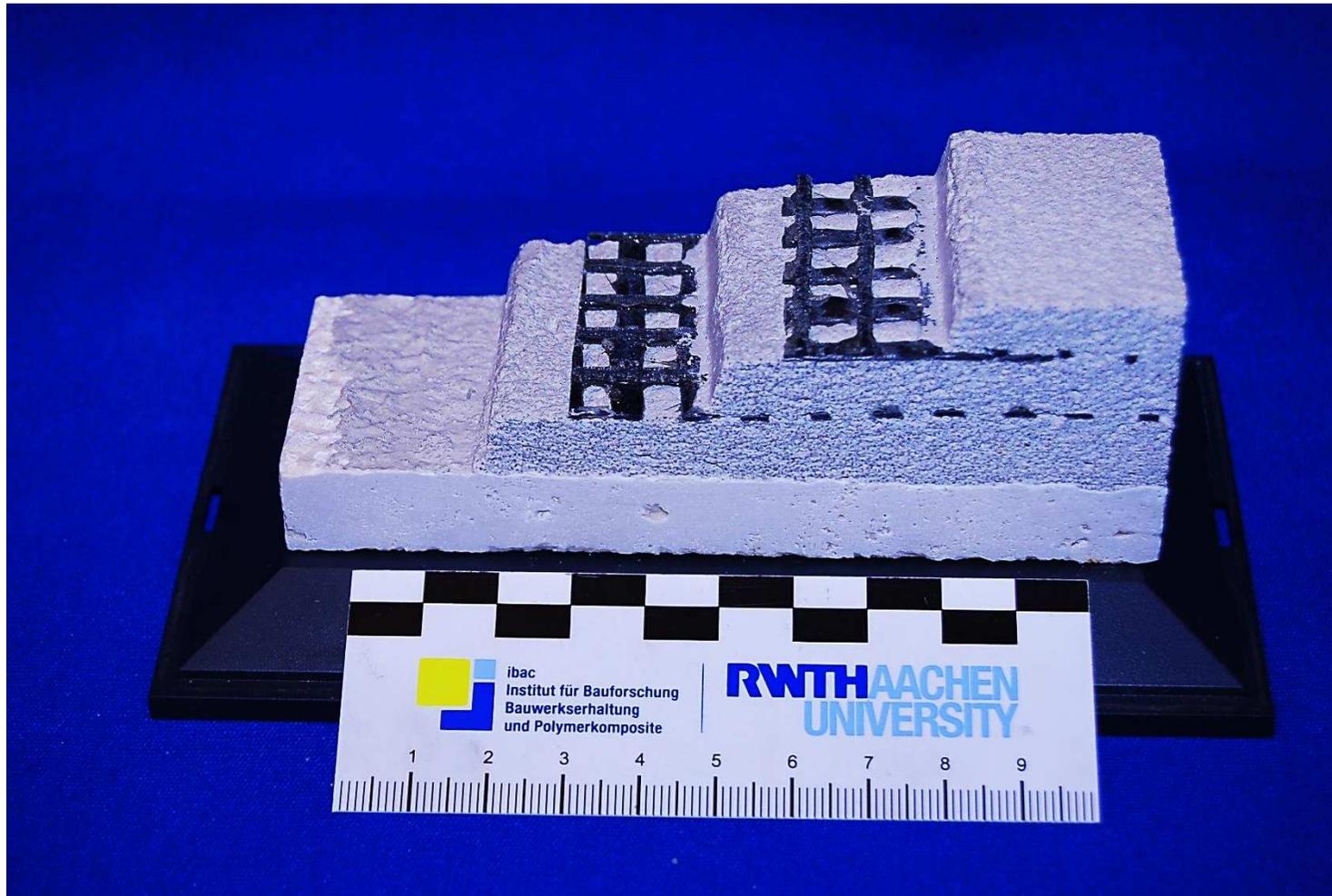
- **Mögliche Materialien:**

- großes Heftpflaster
- Kunststoff
- Gummi
- Stahl
- Beton ?

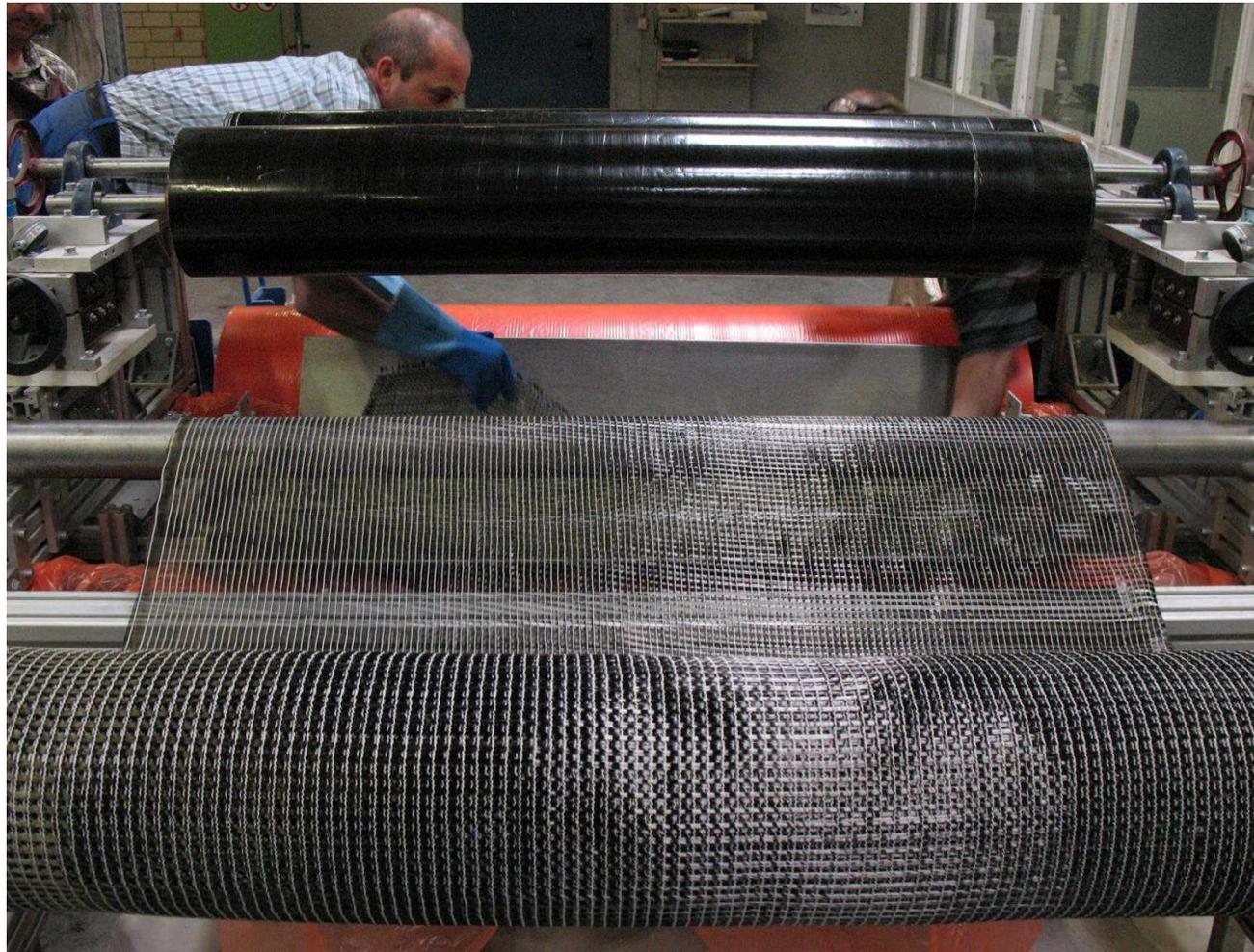
Versuch macht
klug !



Die Lösung: Textilbeton



Carbonnetz mit Epoxidharzbeschichtung (1)



Carbonnetz mit Epoxidharzbeschichtung (2)



■ Kompatibilität mit Anforderungen aus dem Mauerwerk und dem Denkmalschutz (Basis: Verguss-/Verfugmörtel)

Bindemittel:

- CEM I 42,5 R-HS/NA
- Weißkalkhydrat
- Hüttensand
- Rheinischer Trass

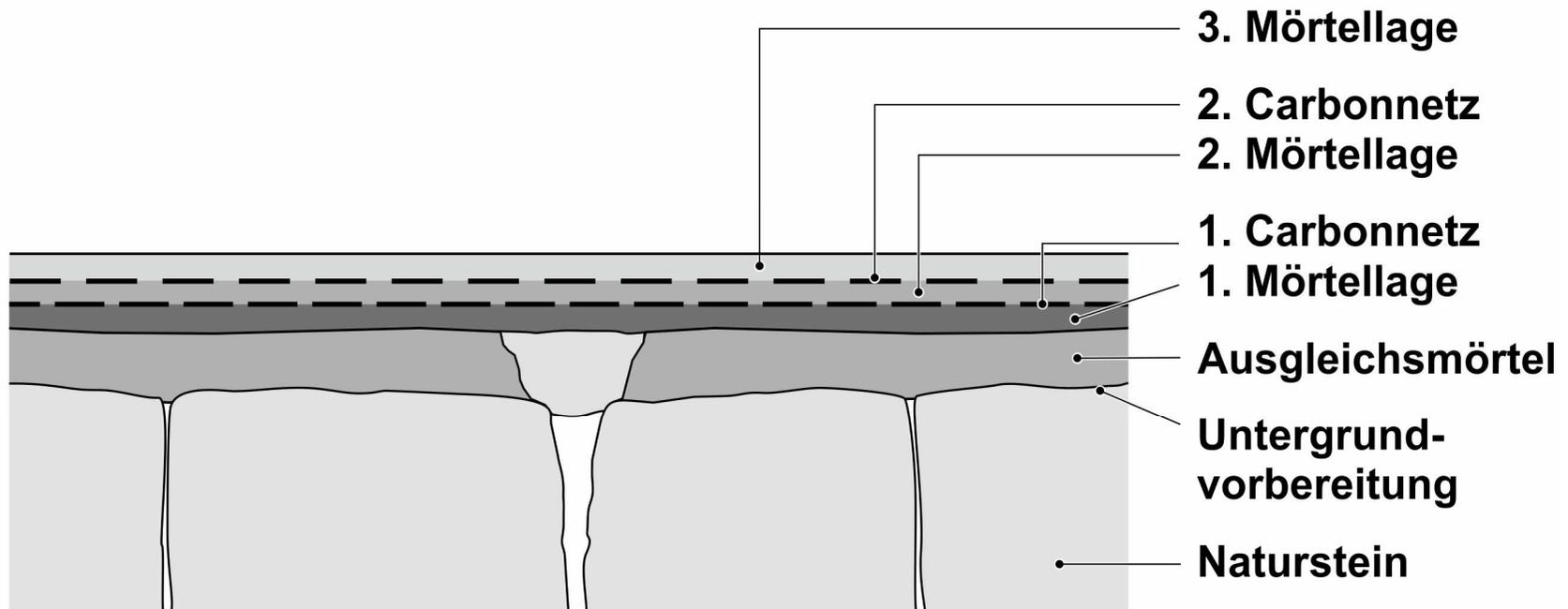
Zuschlag:

- Kalksteinmehl
- Quarzsand 0,2 – 0,6 mm
- Slurry und Wasser
- 8 mm PVA Fasern

■ Anforderungen:

- plastische Konsistenz
- minimaler Rissabstand

Aufbau des Pflasters: textilbewehrte Rissbandage



/Büttner, T., Raupach, M., Maintz, H.; 2010, 2011/

Ausgleichsmörtel: Kennzeichnung des Risses



Abschnittsweise Herstellung des Mörtelpflasters



Guter Verbund zwischen Mörtel und Carbonnetz !



Blick von oben auf das erste Mörtelpflaster 2010 (Nord/West-Seite)



Monitoring: Überwachung der Rissbewegungen und Verformungen



**Wegaufnehmer über den Rissen
mit Temperaturfühler**

Vorbereitung der beiden Mörtelpflaster 2016 (Südseite)



Einbau der Mörtelpflaster 2016: Einlegen des 2. Textils



Blick von oben auf die beiden fertigen Mörtelpflaster 2016



Zusammenfassung

- **Das ibac konnte bei der Sanierung des Aachener Doms Beiträge zur Entwicklung spezieller Materialien leisten, die nun auch für andere Bauwerke verfügbar sind**
- **Mit Hilfe der Monitoring-Systeme können Feuchteverteilungen und Rissbewegungen zukünftig verfolgt werden**
- **Vielen Dank an alle, die mitgewirkt haben:
LVR-Amt für Denkmalpflege, Materiallieferanten,
Handwerksbetriebe, Mitarbeiter des ibac, Förderer, DBU,
Dombauleitung und speziell unserem Dombaumeister!**

11/11/16
2016

