

## Klimastabilisierung und Salzreduzierung in der Krypta von St. Maria im Kapitol in Köln



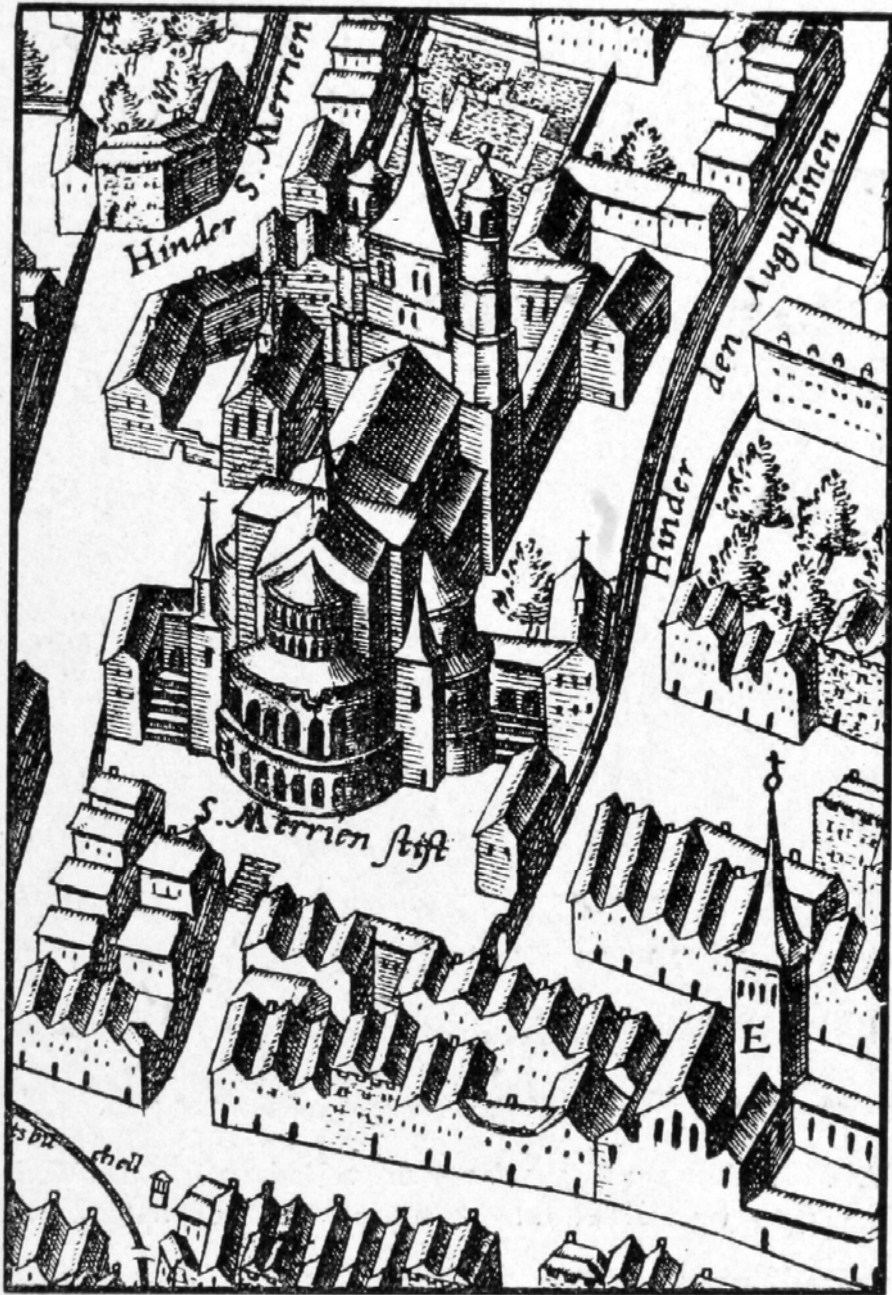
Steffen Laue                      FH Potsdam, Studiengang Restaurierung  
Christoph Schaab                Rheinisches Landesamt für Denkmalpflege, Brauweiler  
Dietmar Krauthäuser            Restauratoren Karthäuserhof GBR, Köln  
Dagmar Drese u. Rudolf Schneider      Architekturbüro Schwarz u. Partner, Köln  
Josef Vogt u. Georg Helfmeier          Ingenieurbüro Vogt, Bedburg



St. Maria im Kapitol, Köln - 2010

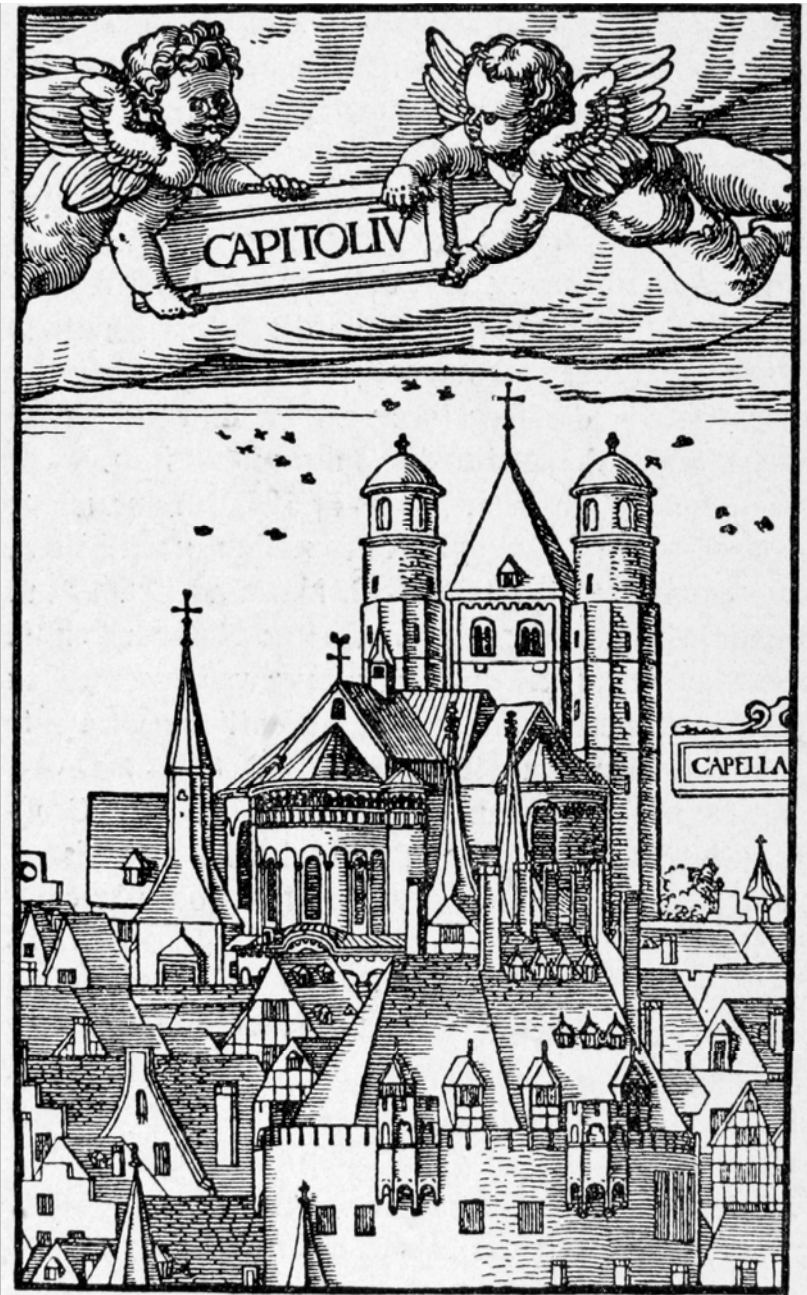






1065

Kirchweihe



Abbildungen aus dem Archiv des Rheinisches Landesamt für Denkmalpflege, Brauweiler

1945



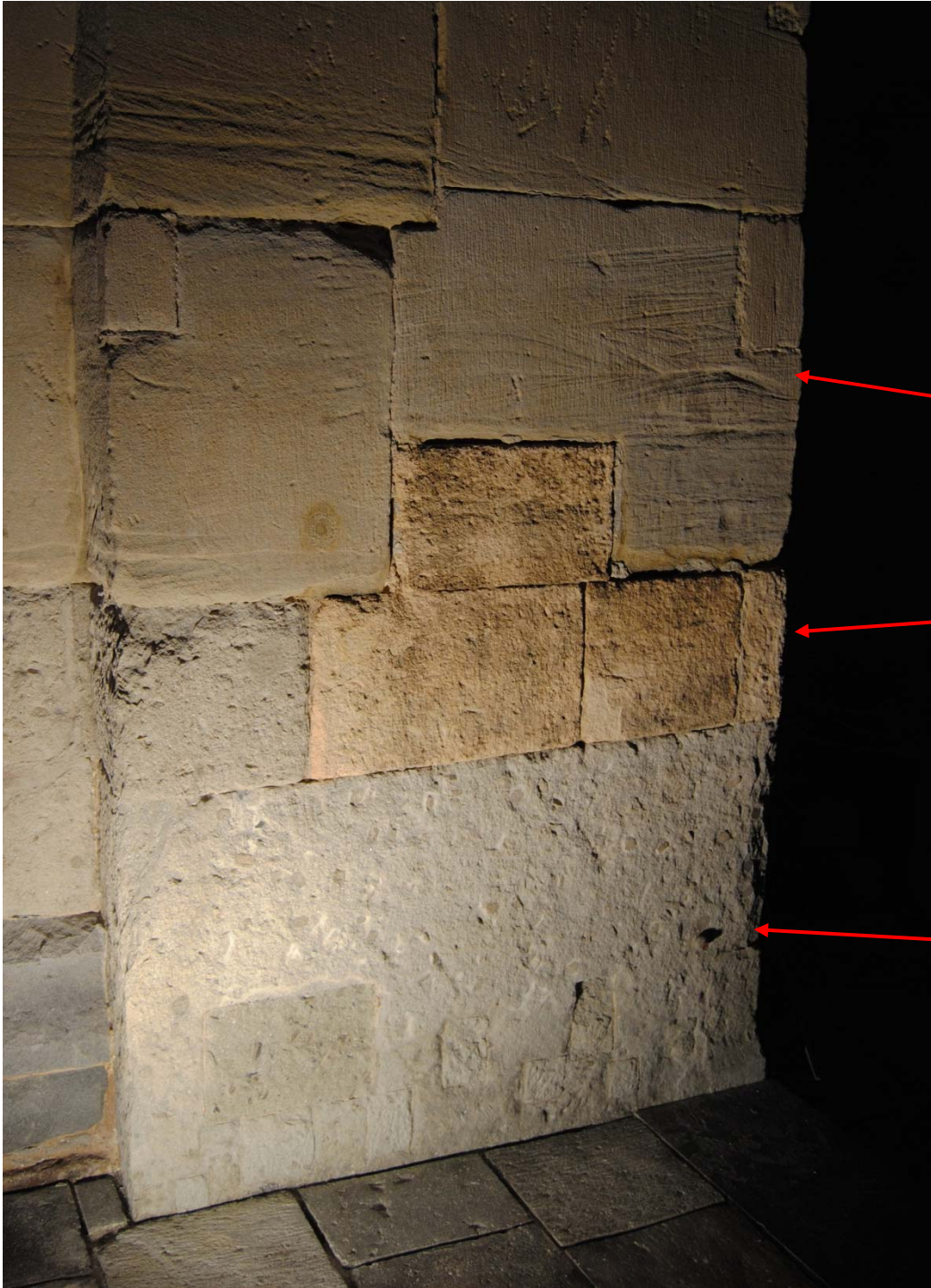
Abbildung aus dem Archiv des Rheinisches Landesamt für Denkmalpflege, Brauweiler





Die Wände und Pfeiler der Krypta bestehen aus Natursteinen, hier Tuffstein





Kordeler Sandstein

Bioklast-Kalkstein

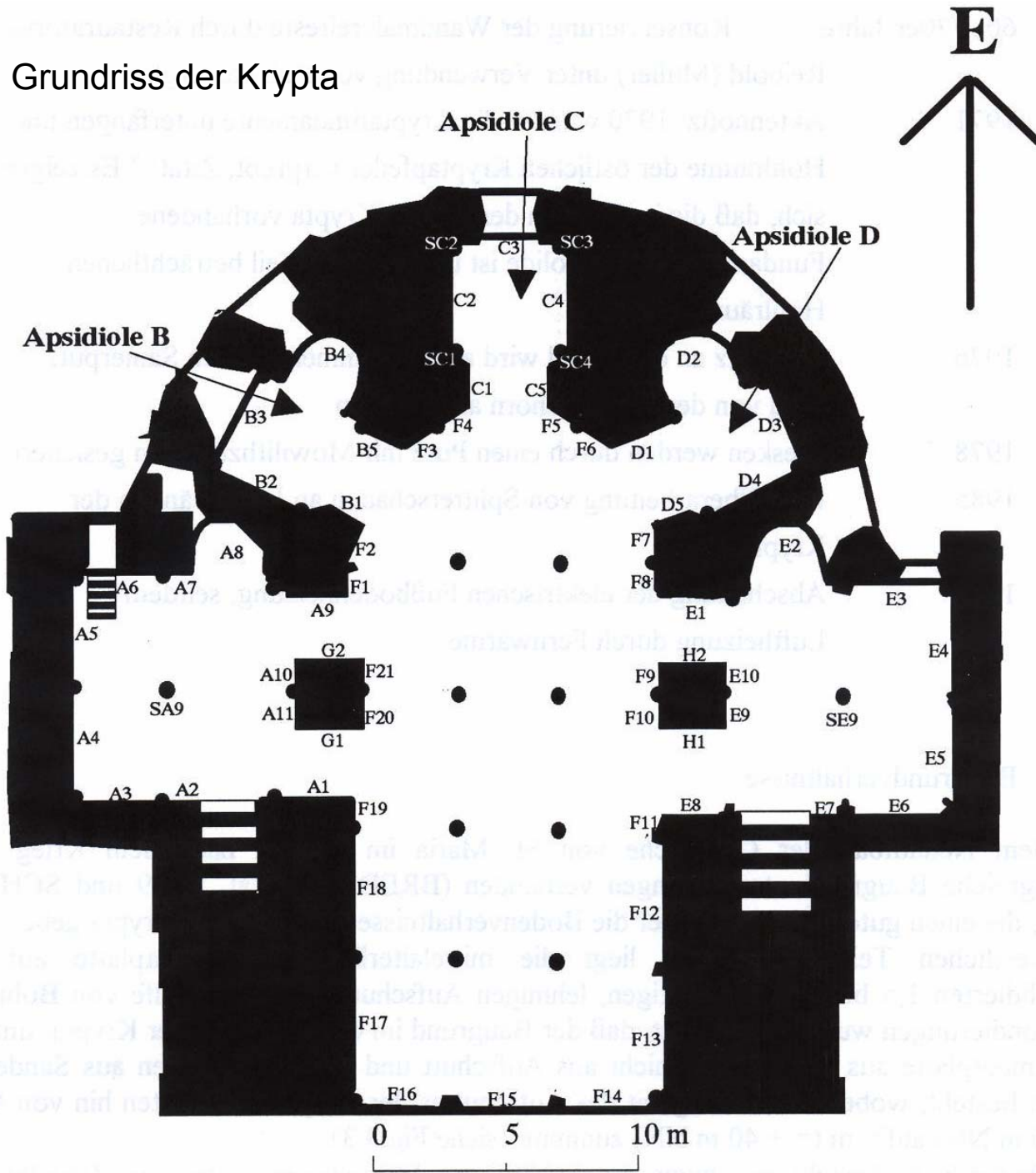
Drachenfels-Trachyt





Reste romanischer Wandmalereien befinden sich in den Gewölben der Konchen

# Grundriss der Krypta



aus Laue (1997)





1993 von Klaus Häfner

1838 bis 1853

Nutzung der Krypta als Salzlager

1969

Einbau einer Fußbodenheizung

massive Salzsäden

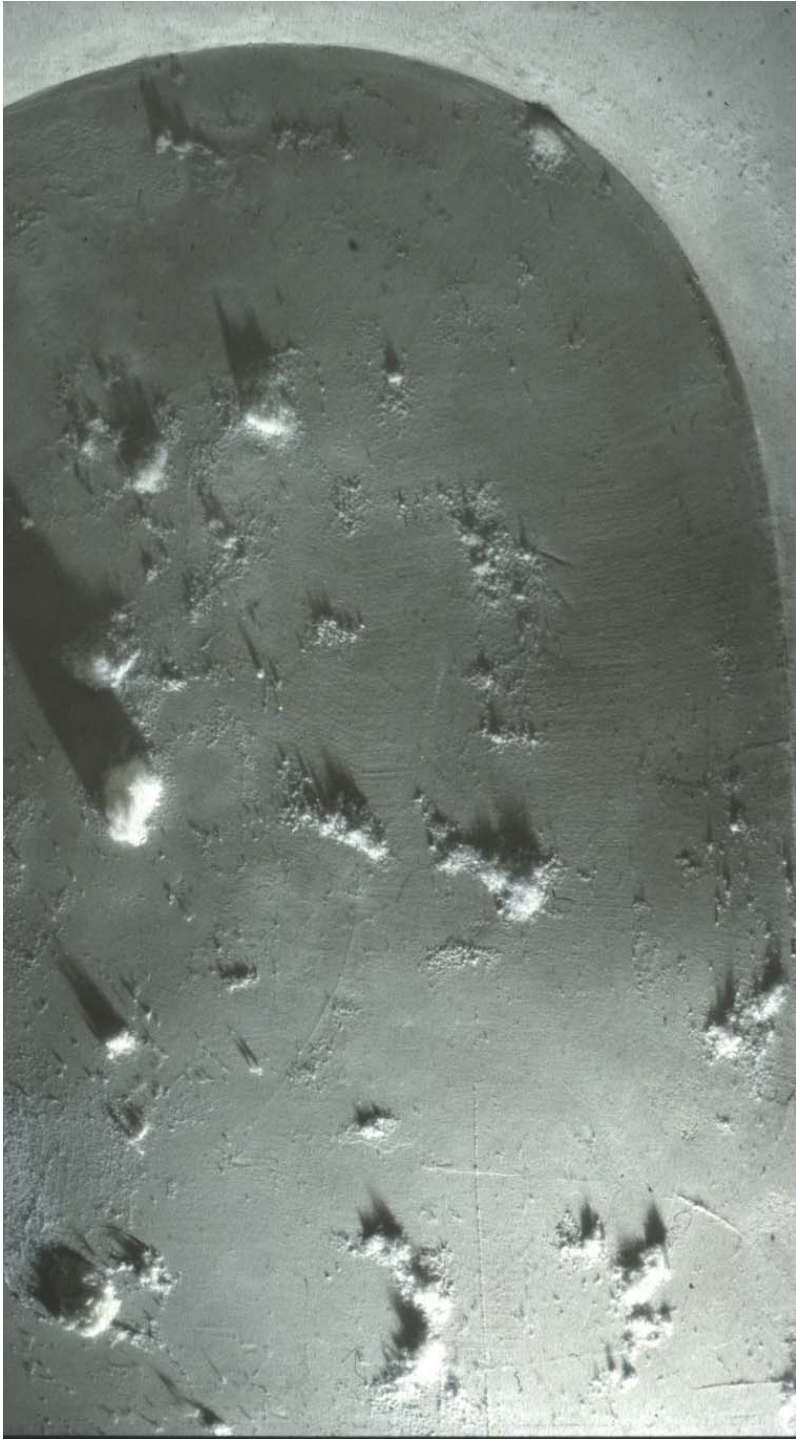




1977

an den Wänden wurde ein  
„Sanierputz“ appliziert





nach wie vor extreme Salzschiiden







Wand F15 mit Sanierputz und aufliegender Salzkruste, 1994

ca. 1 m



1992 wurde die Krypta in das BMFT-Projekt:  
„Erhaltung historischer Wandmalereien“  
integriert:  
→ umfangreiche Untersuchungen zu den Salzen





## Hauptausblühungssalze in der Krypta:

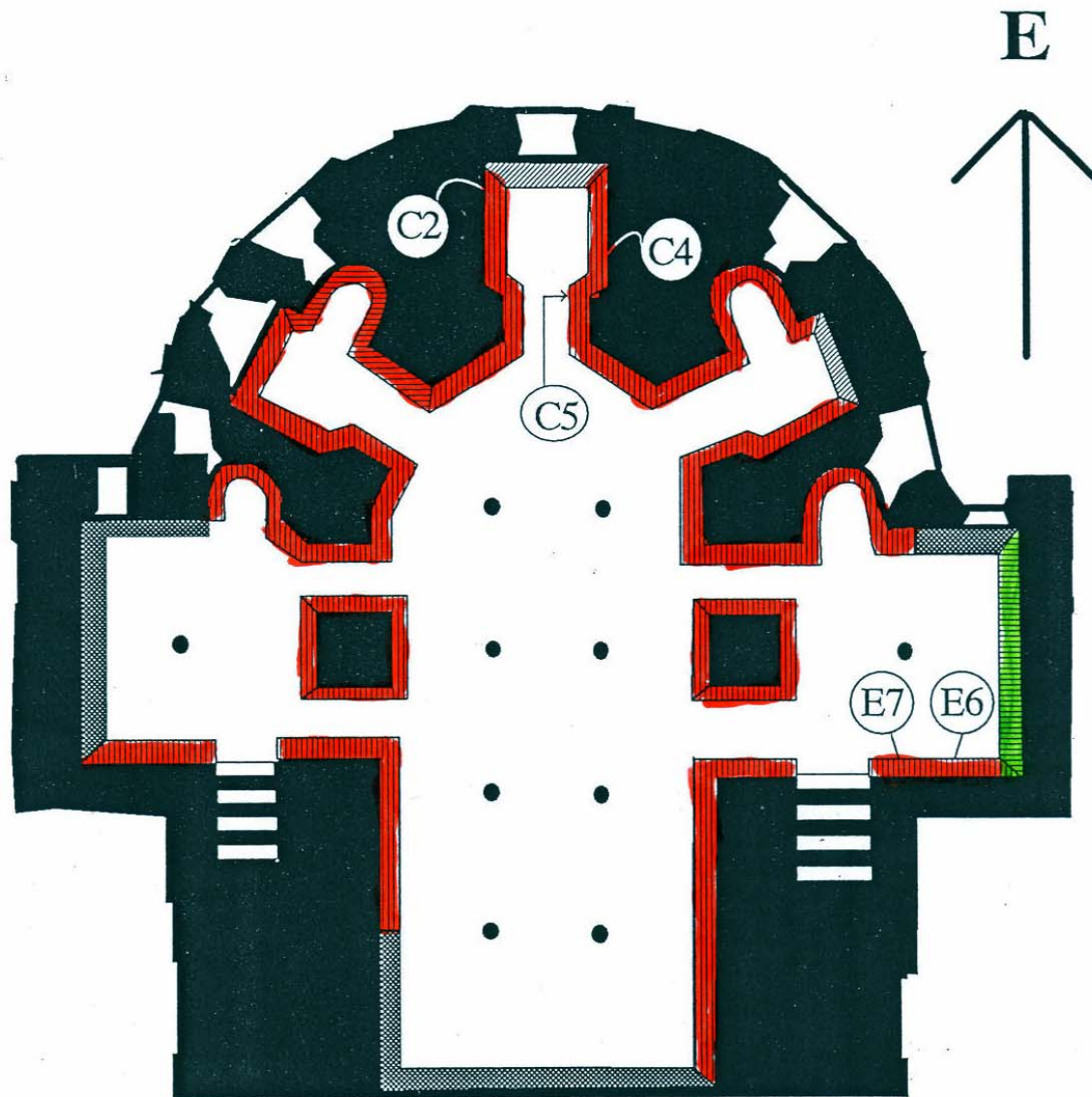
Halit            NaCl

Nitronatrit    NaNO<sub>3</sub>

an den Außenwänden kristallisieren untergeordnet:

Thenardit       Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

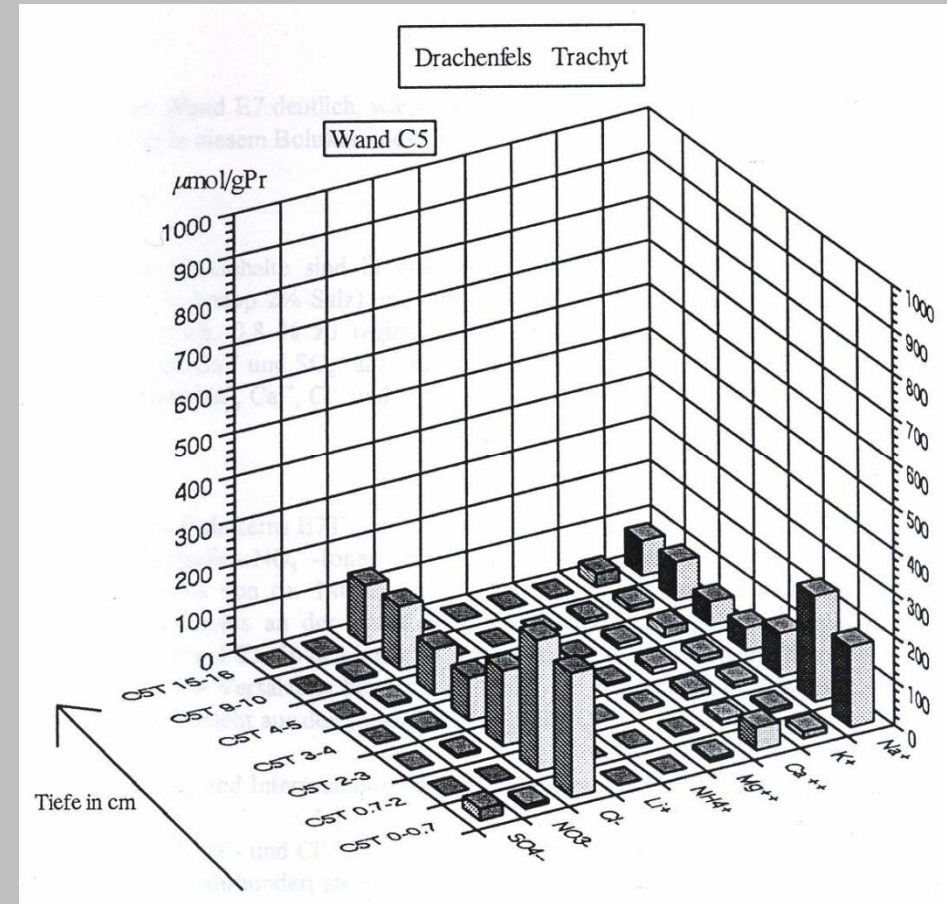
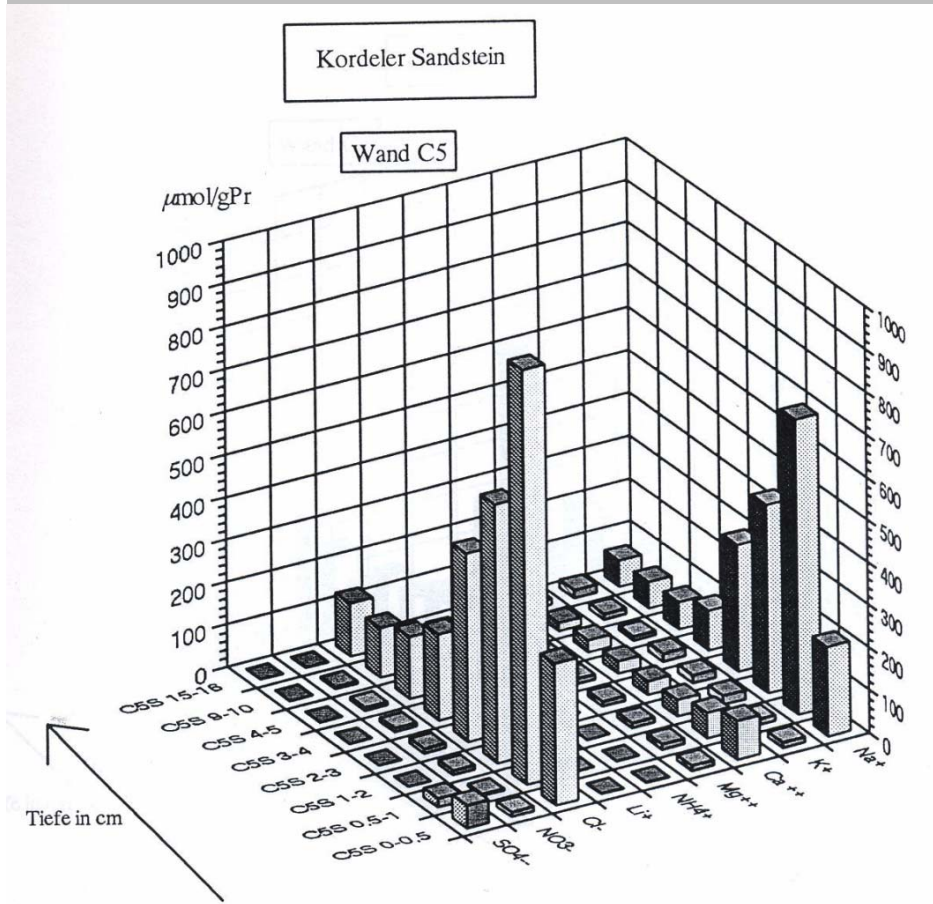
Epsomit        MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O



Verteilung der Ausblühsalze in der Krypta, dargestellt ist jeweils das am häufigste an einer Wand kristallisierte Salz

- |   |         |   |             |
|---|---------|---|-------------|
|  | Halit   |  | Nitronatrit |
|  | Epsomit |  | Thenardit   |





Tiefenprofile der Salzionenverteilung, Wand C5 (aus Laue, 1997)

Das Verhalten der Hauptausblühungssalze in der Krypta (Halit, NaCl, und Nitronatrit, NaNO<sub>3</sub>) wurde mit der Methode „Monitoring von Referenzflächen in Kombination mit Klimamessungen“ (Laue, 2002) untersucht.

Auf der folgenden Seite ist das Verhalten der beiden Salze Halit und Nitronatrit im Laufe eines Jahres (1993/1994) an einer Referenzfläche (Wand C2) dargestellt





August 1993



Oktober 1993

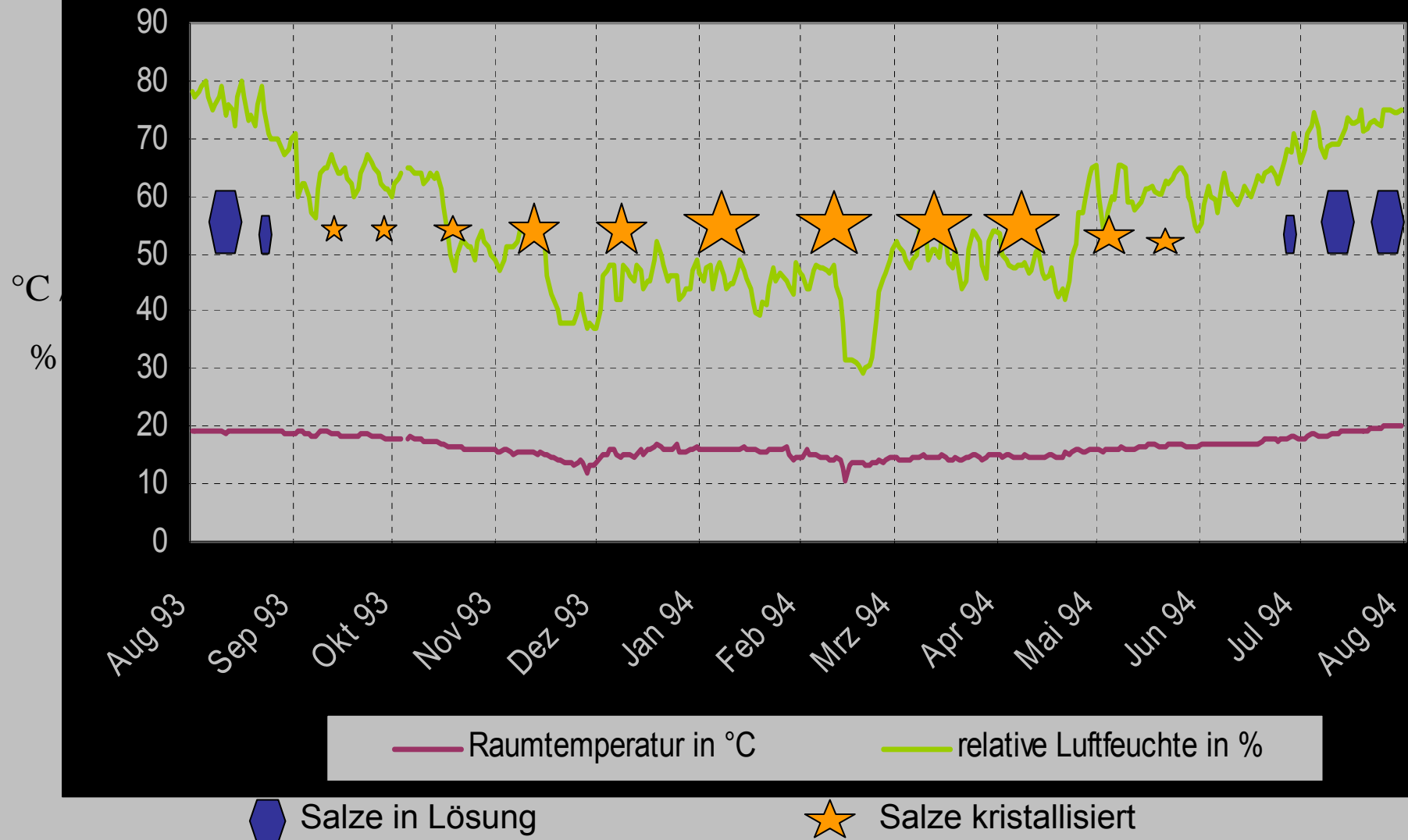


Dezember 1993



Februar 1994

# St. Maria im Kapitol - Raumklima - Tagesmittelwerte





Der Grund für das Sichaflösen der Salze sind die hygroskopischen Eigenschaften der Salze Halit und Nitronatrit.

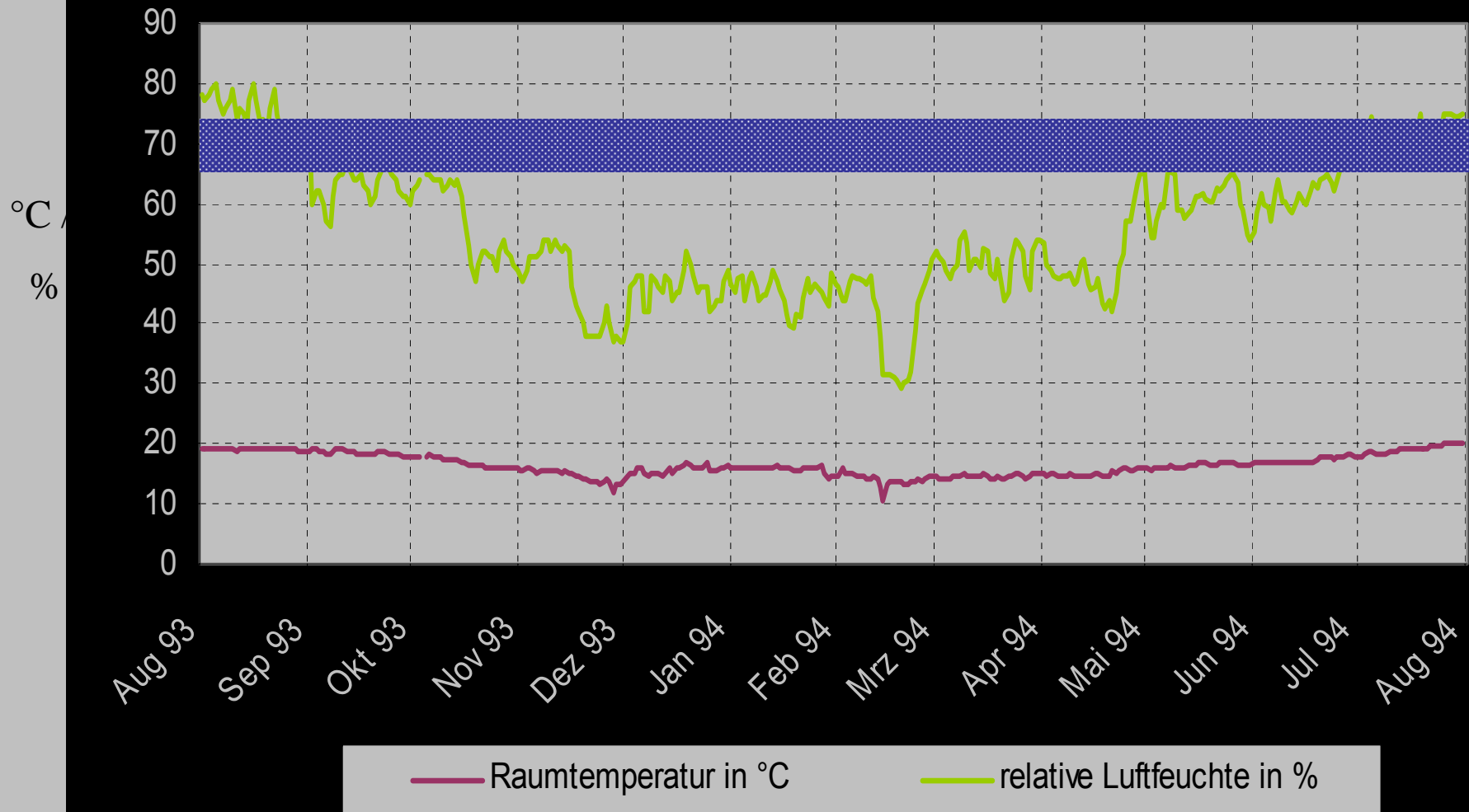
Ein Maß für die Hygroskopizität von Salzen ist deren Deliqueszenzfeuchte, die T-abhängig ist:

Salz		Deliqueszenzfeuchte bei 20°C
Halit	NaCl	75,5 %
Nitronatrit	NaNO <sub>3</sub>	75,4 %

Daten zur Deliqueszenzfeuchte (Gleichgewichtsfeuchte) lassen sich u.a. bei ARNOLD & ZEHNDER (1990) und in Tabellenwerken wie u. a. im *Handbook of Chemistry and Physics* und in der jeweils dort zitierten Literatur finden.

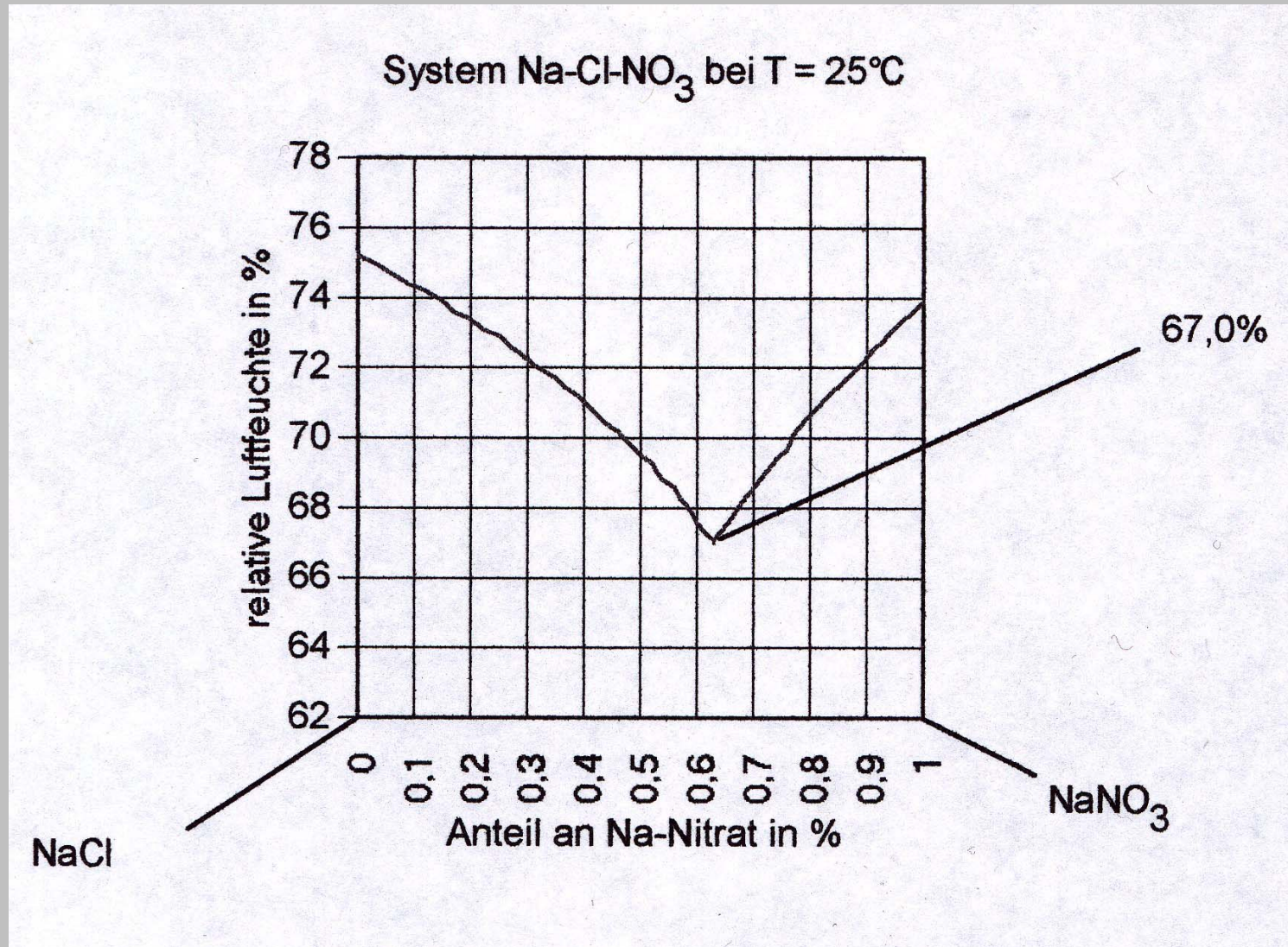
Die Beobachtungen in der Krypta hatten gezeigt, dass die kritische relative Luftfeuchte, bei denen das Sichaflösen und Rekristallisieren der beiden Salze an den Wänden zu beobachten ist, im Bereich zwischen ca. 65 und 72 % relativer Luftfeuchte liegt (blauer Balken).

### St. Maria im Kapitol - Raumklima - Tagesmittelwerte





Das liegt am unterschiedlichen Verhalten von Salzgemischen gegenüber reinen Salzen:



berechnet von Michael Steiger (in Laue, 1997)

## **Zusammenfassung 1996:**

- Ursache für die zyklischen Kristallisationen von Halit und Nitronatrit ist das Beheizen der Krypta
- Der kritische Bereich liegt zwischen 65 und 72 % relativer Luftfeuchte.

## **Empfehlung 1996:**

Einen Winter lang die Heizung mal nicht anschalten und Monitoring des Schadenfortschritts

Anschließend weitere Konservierungsstrategien festlegen.



Die Heizung wurde nicht ausgeschaltet.

Es folgten weitere Untersuchungen in den Jahren 1998 – 2000:

- Rammkernbohrungen zur Klärung des Untergrundaufbaus
- weitere Salztiefenprofile in den Wänden und im Fußboden
- US-Messungen zur Tragfähigkeit des am stärksten gefährdeten Bündelpfeilers



## Ergebnisse:

- Fußboden ist beim Einbau der Fußbodenheizung nach oben hin abgedichtet worden
- hohe Feuchte- und Salzgehalte im Untergrund
- Natursteinwände sind aktive Transportwege der Feuchte und Salze
- Standfestigkeit des Bündelpfeilers reicht aus





Konsequenzen:

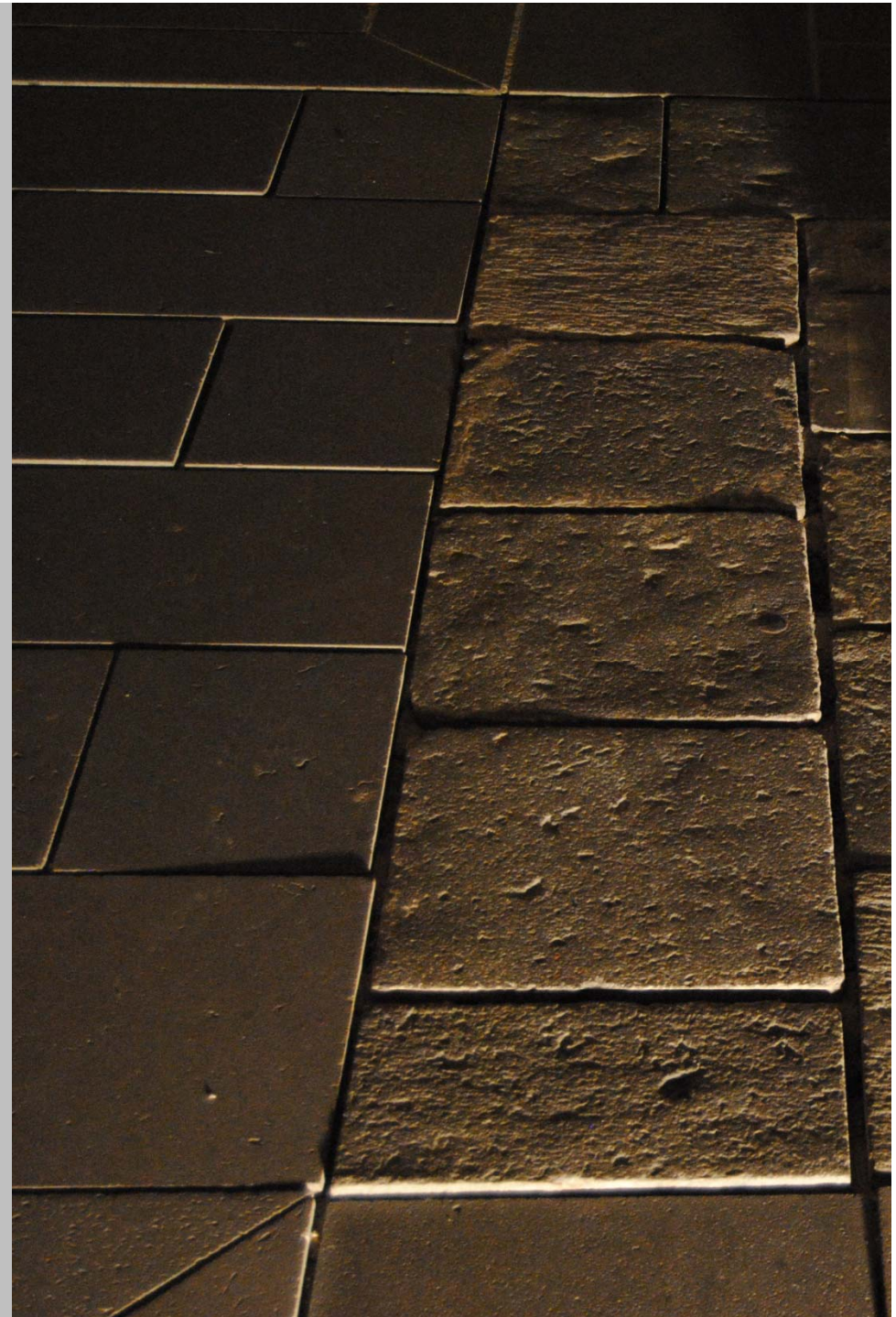
2000

Öffnung und Entsiegelung des Fußbodens  
in Teilbereichen:

Abdeckung der geöffneten Bereiche durch  
Lattenroste

2004

Verlegung des Fußbodens in ein  
Kiesbett mit offenen Fugen



ab August 2000

Holzkästen an acht ausgewählten Stellen unter Wänden angebracht:  
→ Sammlung der Substanz 1x monatlich, ab 2005 2x monatlich





2000

Umbau und Erweiterung der Heizung

## Klimatisierung

Ziel: Vermeidung starker Schwankungen der relativen Luftfeuchte

→ Einschränken der Kristallisationen von Halit und Nitronatrium

Installation von zwei Luftbefeuchtern, es sollte eine relative Luftfeuchte von ca. 70% erreicht werden.





Nov. 2000

Installation von Messfühlern  
Stündliche Aufzeichnung von rel. LF und Temperatur in Kirchenraum,  
Krypta und im Außenbereich





**2004 Abnahme des Sanierputzes**

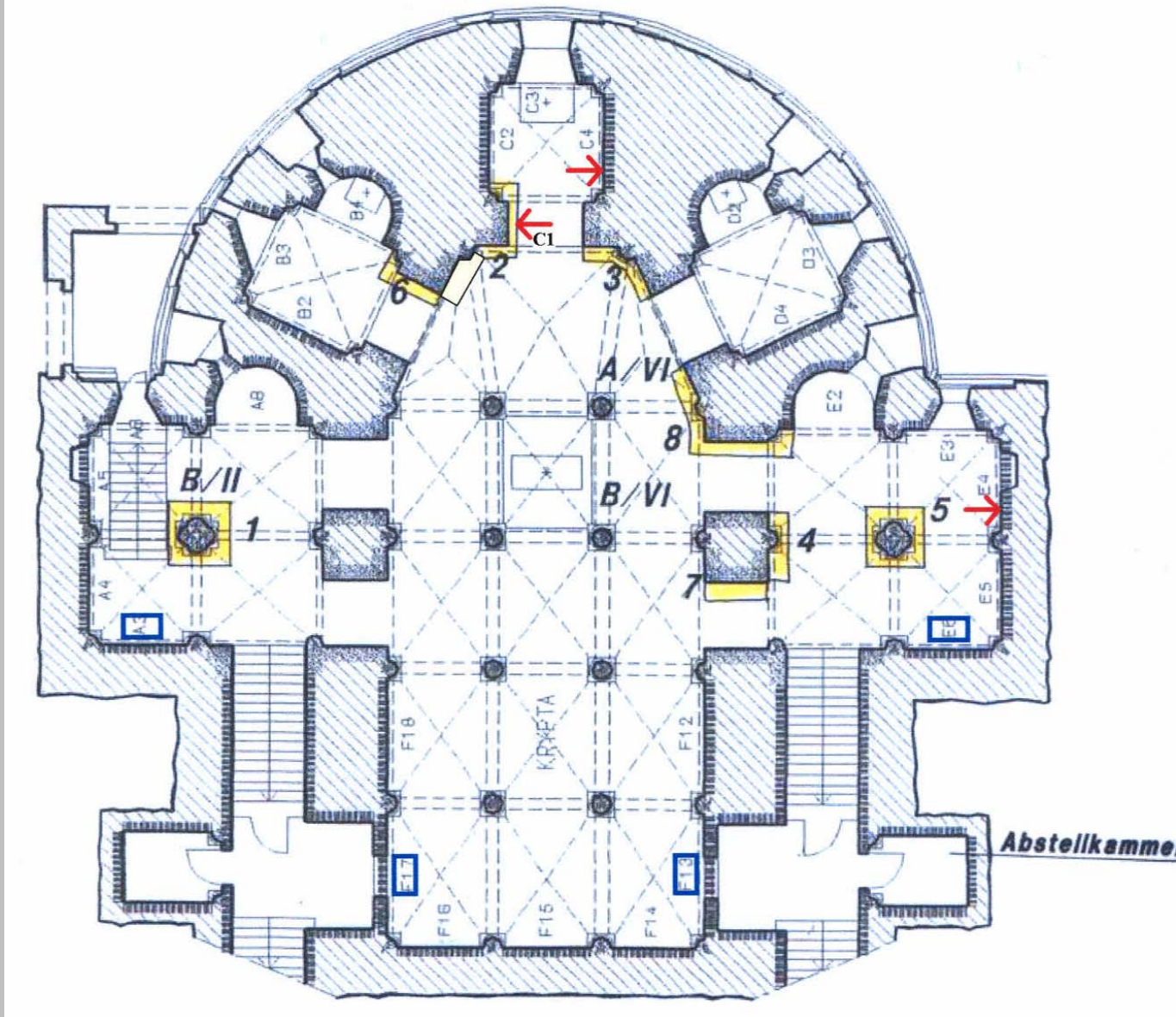


2002 – 2004

- Abdichtungsmaßnahmen an Fenstern und Türen
- Umluftkreislauf der Krypta wird geschlossen
  - klimareguliertes Lüften
- Aufstellung zwei weiterer Luftbefeuchter (insgesamt vier)







aus Vogt et al. (2010)

Anordnung der Auffangkästen für heruntergefallenes Material (gelb) und Aufstellung der Luftbefeuchter (blaue Rechtecke)

Folgende Maßnahmen führten insgesamt zur Stabilisierung des Klimas und zur Reduzierung von Schäden (siehe auch die beiden Grafiken auf den folgenden zwei Seiten):

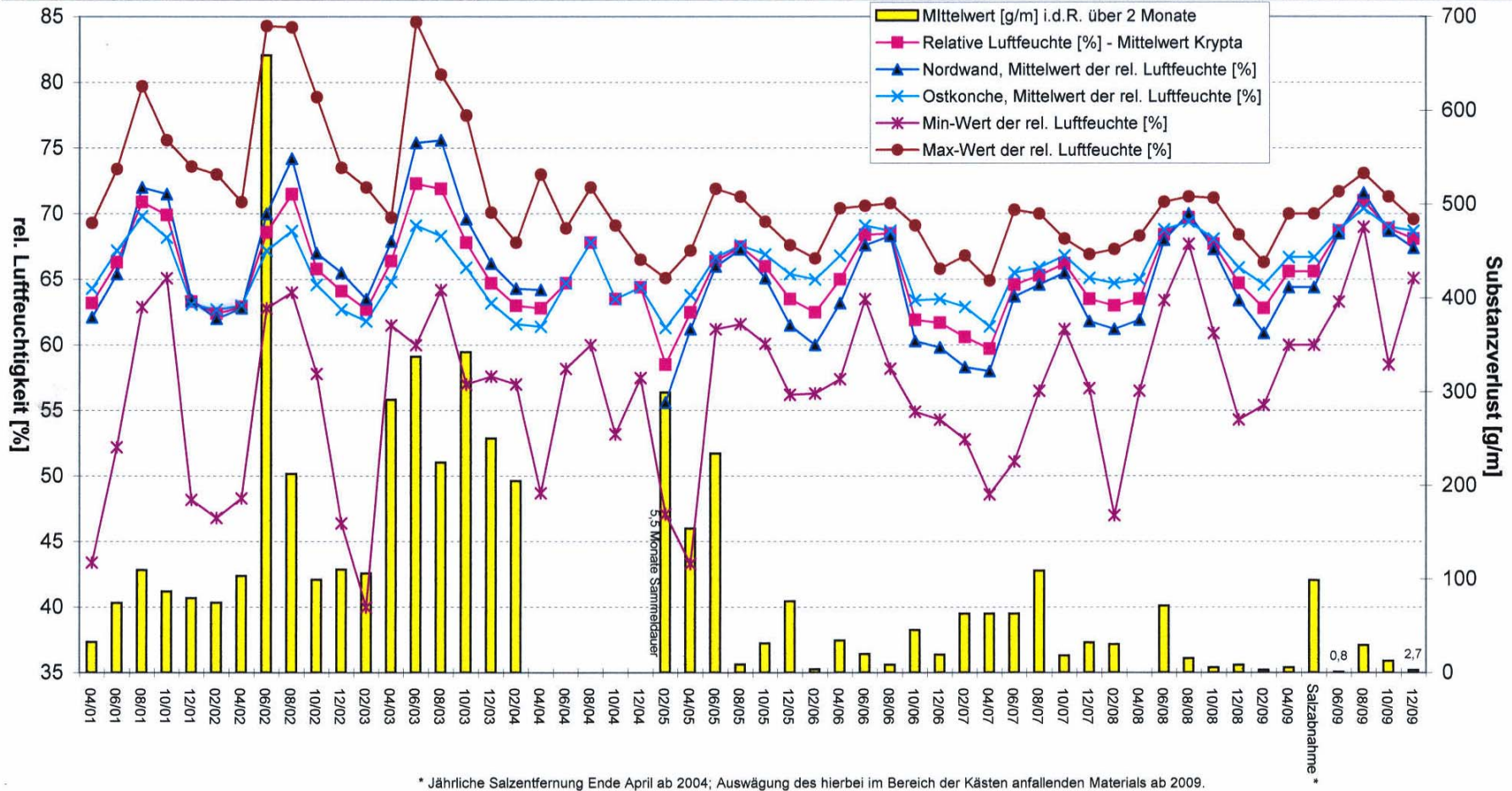
- Abdichten undichter Stellen nach außen
- Luftbefeuchter und klimareguliertes Lüften
- Öffnen der mit Sanierputz behandelten Wände
  - Erhöhung der Pufferwirkung (Sorptionsprozesse)
- Entsiegelung des Fußbodens



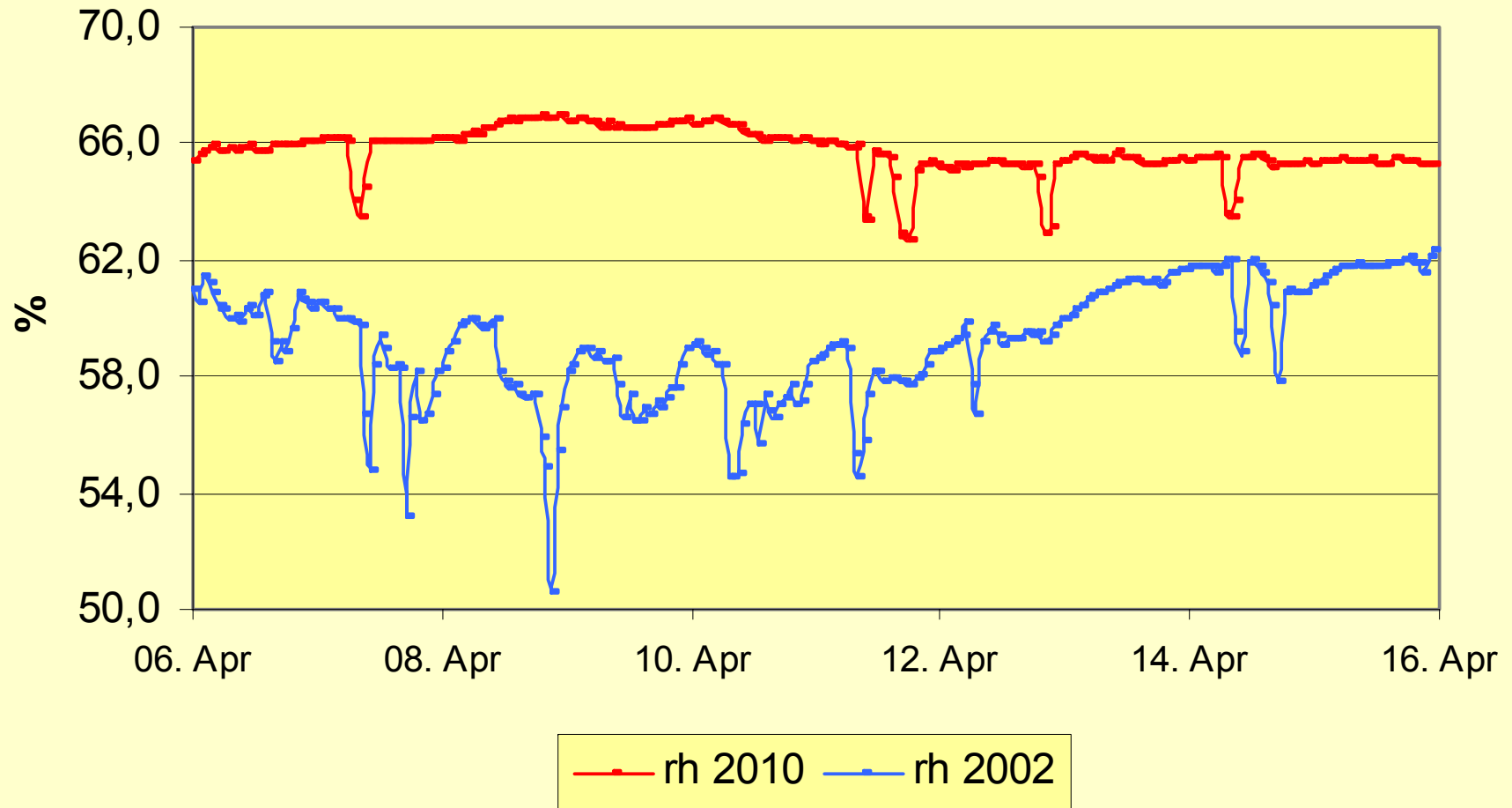
# Entwicklung des Klimas und des Substanzverlustes 2001 bis 2009 (aus Vogt et al. 2010)

## Krypta von St. Maria im Kapitol - Substanzverlust (bis Ende 06/09) und rel. Luftfeuchtigkeit (bis Ende 06/09)

Tendenz ab etwa Mitte 2005: a) geringere Differenzen zwischen Minimal- und Maximalwerten der rel. Luftfeuchtigkeit und b) geringere Substanzverluste



Krypta - relative Luftfeuchte April 2002 und 2010



Stabilisierung des Klimas, Vergleich zweier Monate in 2002 und 2010



Ergänzend zur Klimatisierung wurden Salzreduzierungen mittels Kompressen (reine Cellulose-Kompressen) an ausgewählten Wänden in den unteren Bereichen zur Schadensverminderung durchgeführt, die ersten 2001 (siehe auch Grafik auf Folie 40).

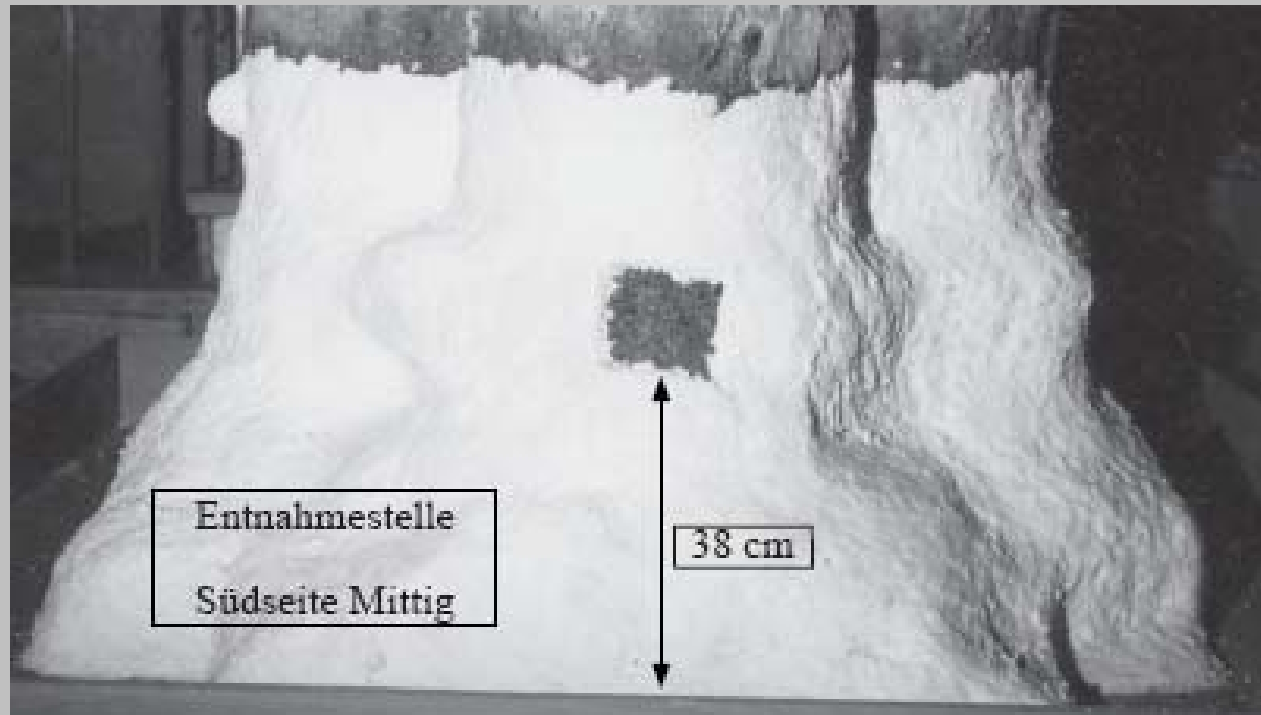
Folgendes Procedere wurde jeweils durchgeführt:

- Abkehren der locker aufliegenden Ausblühungen
- 3 Kompressenzyklen (bis 1,20 m Höhe):
  1. feucht abgenommen nach 72h
  2. feucht abgenommen nach 72h
  3. trocken abgenommen nach 10 Tagen



aus Krauthäuser (2004)

10 x 10 cm wurden aus den Kompressen herausgenommen  
und für quantitative Salzanalysen vorbereitet:



aus Krauthäuser (2006)
















In einigen Jahren wurden so genannte Prüfkompresen angelegt:  
aus 30 x 30 cm großen Kompressenflächen wurde ein 10 x 10 cm  
großer Bereich für die Analyse herausgeschnitten:

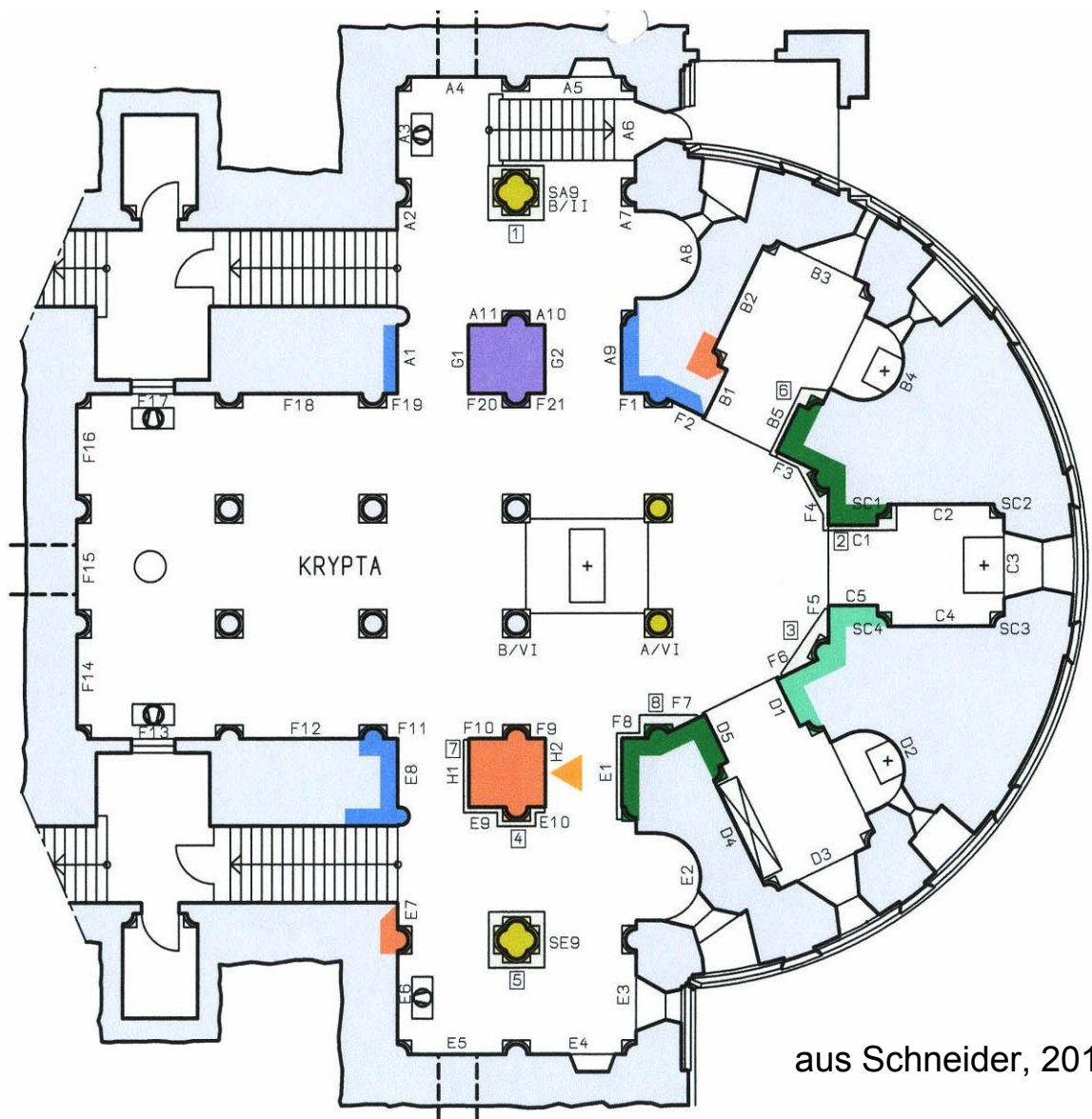


aus Krauthäuser (2006)

Die folgende Grafik veranschaulicht, welche Wände wann mit  
Kompressen behandelt worden sind.

# KOMPRESSENENTSALZUNGSMASSNAHMEN AN STARK ANGEGRIFFENEN TRACHYTOBERFLÄCHEN

- 2001**  
 ◀ DOTATIONSINSCHRIFT (INV.-NR. 5.18)
- 2004**  
 MÄRZ 2004 ERSTMALIG SA9, SE9, ÖSTL. VIERUNGSSÄULEN  
 ◀ DOTATIONSINSCHRIFT (INV.-NR. 5.18)
- 2005**  
 MÄRZ 2005: WIEDERHOLUNG MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 JUNI 2005: ERSTMALIG E7, H1, E9, B1/B2  
 NOV / DEZ 2005: ERSTMALIG E10, H2, F9, F10
- 2006**  
 APRIL 2006: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 APRIL - JUNI 2006: WIEDERHOLUNG MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 APRIL - JUNI 2006: ERSTMALIG F11, E8, TRP  
 ERSTMALIG A9, F1, F2; ERSTMALIG A1, F19  
 ▶ DOTATIONSINSCHRIFT (INV.-NR. 5.18)
- 2007**  
 JULI / AUGUST 2007: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 JULI / AUGUST 2007: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 JULI / AUGUST 2007: WIEDERHOLUNG MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 JULI / AUGUST 2007: ERSTMALIG B5, F3, F4, C1, SC1; ERSTMALIG D5, F7, F8, E1  
 ▶ DOTATIONSINSCHRIFT (INV.-NR. 5.18)
- 2008**  
 Mai / Juni 2008: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 Mai / Juni 2008: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 Mai / Juni 2008: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 Mai / Juni 2008: WIEDERHOLUNG MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 Mai / Juni 2008: ERSTMALIG G2, A10, A11, G1, F20, F21
- 2009**  
 August 2009: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 August 2009: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 August 2009: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 August 2009: PRÜFKOMPRESSEN MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 August 2009: WIEDERHOLUNG MIT VERGLEICHENDER UNTERSUCHUNG  
 August 2009: ERSTMALIG C5, SC4, F5, F6, D1



aus Schneider, 2010

**ST. MARIA IM KAPITOL, KÖLN**  
 STANDSETZUNG KRYPTA -  
 NIERUNG VON SALZFRASS  
 : K 023-311-339  
 TH. KIRCHENGEMEINDE ST. MARIA IM KAPITOL  
 RIENPLATZ 17 - 19  
 576 KÖLN  
 CHITEKTURBURO SCHWARZ UND PARTNER  
 VENICHER WEG 28  
 933 KÖLN  
 TEL 0221/4912289  
 FAX 0221/4972528

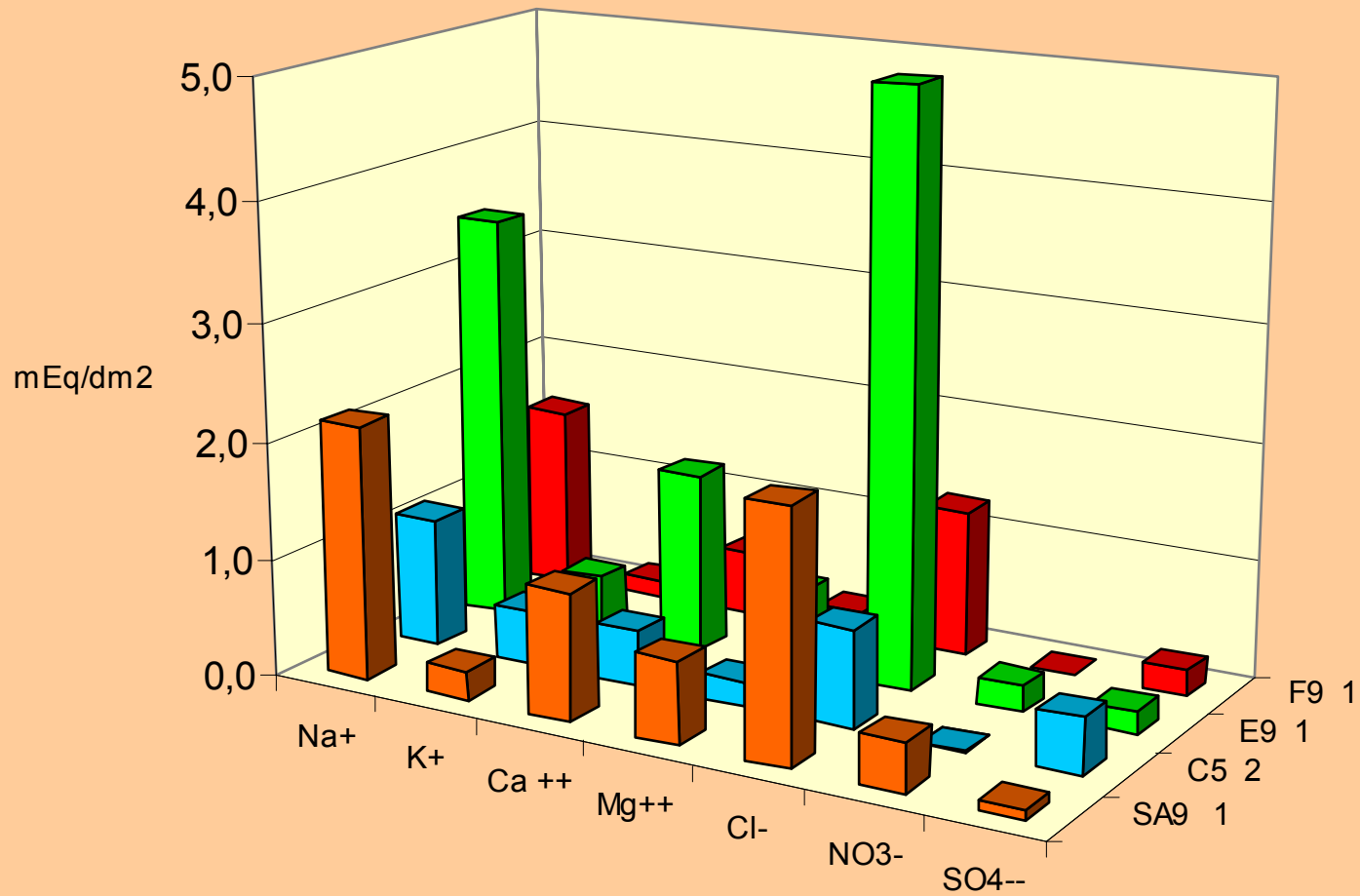
ZEICHNUNG		<b>GRUNDRISS</b>	
		KOMPRESSENENTSALZUNGSMASSNAHMEN	
LEISTUNGSPHASE		DOKUMENTATION - 2009	
MASSTAB	1:200	ÄNDERUNGEN	
GEZEICHNET	rus		
DATUM	03.02.10		
GEPÜFT			
BLATTGRÖSSE			
		PLAN-NR.	539
		DATUM	



  SAMMELKASTEN FÜR ABGEWITTERTE BAUSUBSTANZ



## Ionenzusammensetzungen in den Kompressen 2010



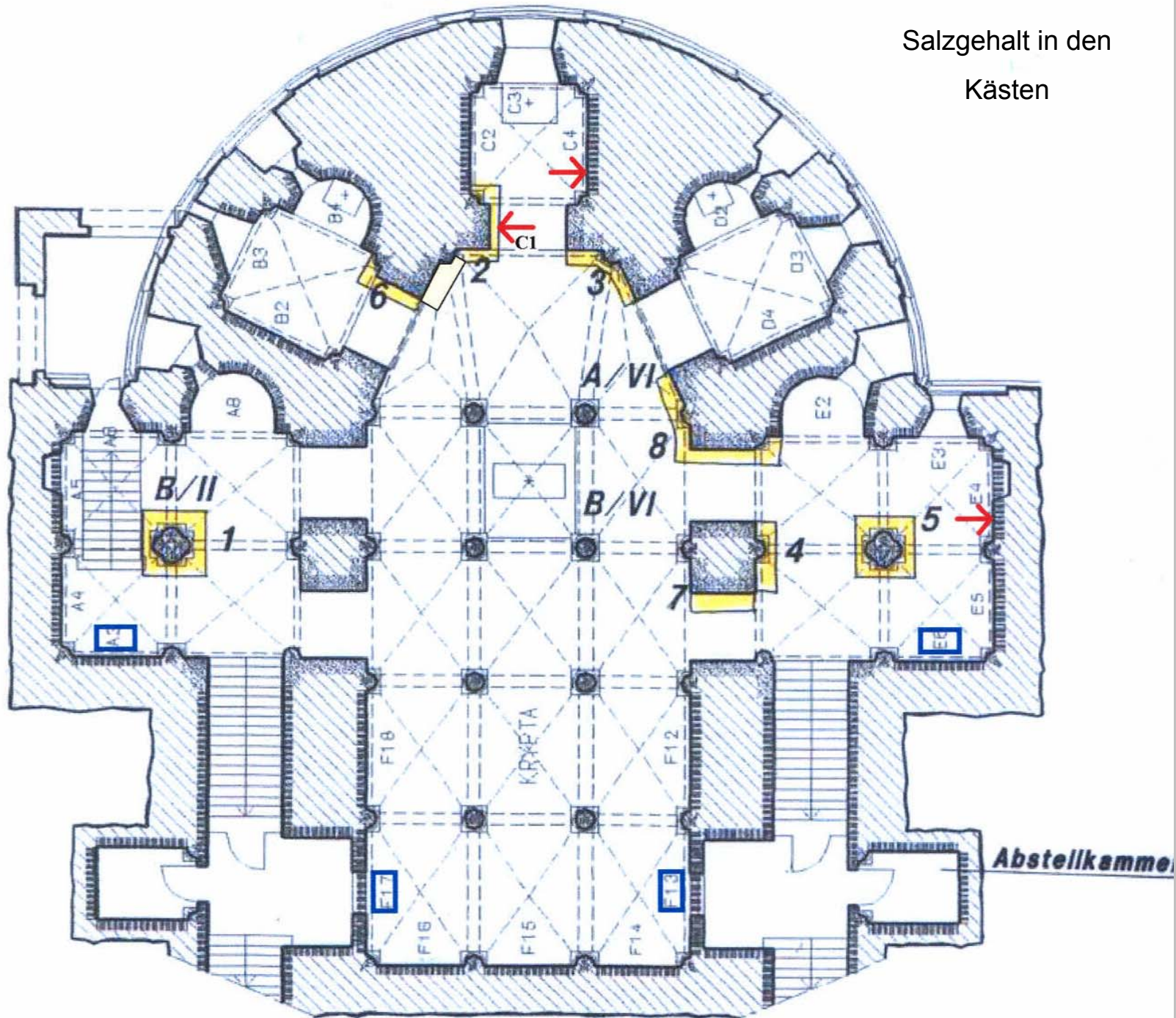


nach Kompressenbehandlung: mikrobiologische Besiedlungen auf den Oberflächen

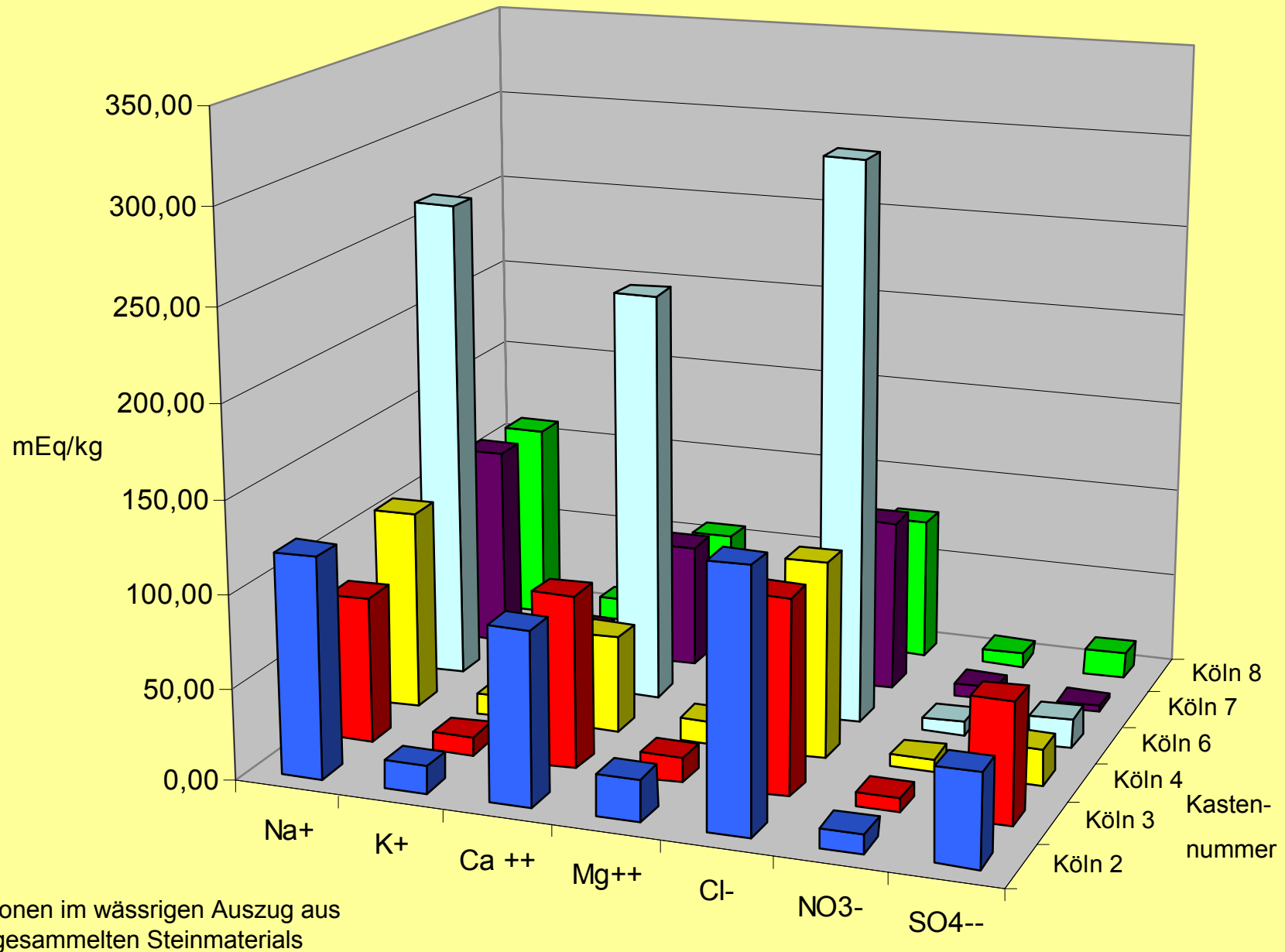


Salzgehalt in den  
Kästen

aus Vogt et al. (2010)



## Salzgehalt in den Kästen





## Blick in die Zukunft:

- aktuell: ausführliche Evaluation u. a. mit
    - Salz- und Schadenskartierungen
    - Monitoring von Referenzflächen
    - quantitative Salzanalysen (Kompressen / Tiefenprofile)
    - Thermodynamische Berechnungen der Deliqueszenzfeuchten entsprechend der Ionenmischungen
- Optimierung der Klimasituation
- Optimierung der Kompressenzusammensetzung
- Konservatorisches Begleiten und Eingreifen an bestimmten Wänden





Dez 2010



## Fazit

Das Problembewusstsein (Verstehen der Zusammenhänge am Objekt) aller Beteiligten (Eigentümer, Amt, Architekten, Restauratoren und Naturwissenschaftler) führt zu einer langfristig angelegten Strategie, um die Schäden in der Krypta zu reduzieren.

Die regelmäßige, gute Kooperation und Kommunikation der o. g. Beteiligten an einem Objekt trägt zum Gelingen der Strategie und zum Umsetzen der Ziele maßgeblich bei.

Die ständige kritische Evaluation der jeweils durchgeführten Maßnahmen und die daraufhin neu abgestimmten Veränderungen bei der Herangehensweise sind weitere wichtige Bausteine, um für ein stark salzbelastetes Gebäude Lösungsvorschläge zu optimieren.

Aufgrund des komplexen Zusammenspiels zwischen Porensystemen, Salzen und Klimaveränderungen bedürfen stark salzbelastete Objekte einer besonderen Herangehensweise und nachhaltigen Pflege.

Herzlichen Dank an

Christoph Schaab                      Rheinisches Landesamt für Denkmalpflege, Brauweiler

Dietmar Krauthäuser                Restauratoren Karthäuserhof GBR, Köln

Dagmar Drese u. Rudolf Schneider    Architekturbüro Schwarz u. Partner, Köln

Josef Vogt u. Georg Helfmeier        Ingenieurbüro Vogt, Bedburg

Adrian Heritage, Hans Leisen, Jacky Beumling und Alison Sawdy (FH Köln)

Elisabeth Jägers                      FH Köln / Labor Jägers

Sarah Schlebusch                      cand. Diplom-Restauratorin

Christine Fuchs                        Labor FH Potsdam

alle BMFT-MitstreiterInnen





## Literatur

- Arnold, A. & Zehnder, K. (1990): Salt weathering on monuments.- In: Advanced workshop Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones, Pavia (Italy), 14.-21. September 1990.
- Handbook of Chemistry and Physics (z.B. 1999), Hrsg: Lide, D.R., CRC Press Inc., Boca Raton, Florida.
- Krauthäuser, D. (2004): Krypta der Basilika St. Maria im Kapitol - Bericht zu den Vorarbeiten zur Reduzierung der Salzbelastung.- unveröffentlichter Untersuchungsbericht, 15 Seiten.
- Krauthäuser, D. (2006): Krypta der Basilika St. Maria im Kapitol - Bericht zu den Entsalzungsmaßnahmen April 2006 – Juni 2006.- unveröffentlichter Untersuchungsbericht, 6 Seiten.
- Laue, S. (1997): Einfluß des Porenraums und des Raumklimas auf die Verwitterung von Steinen durch lösliche Salze.- Dissertation, FB Geowissenschaften, Universität Mainz, Tectum Verlag Marburg, 170 Seiten.
- Laue, S. (2002): Verwitterung von Naturstein durch lösliche Salze an wechselfeuchter Luft.- In: Salze im historischen Natursteinmauerwerk, IFS-Tagung 2002, Institut für Steinkonservierung e.V. (IFS), Mainz, Bericht Nr.14, 19-30.
- Schneider, R. (2010): Grundriss Kompressenentsalzungsmaßnahmen.- unveröffentlichtes Arbeitsdokument des Architekturbüros Schwarz und Partner.
- Vogt, J. & Helfmeier, G. (2010): Krypta der Basilika St. Maria im Kapitol, Klimamessungen und orientierende Baufeuchtemessungen sowie gravimetrische Untersuchung abgewitterter Bausubstanz, Bericht Nr. 24.- unveröffentlichter Untersuchungsbericht, 12 Seiten.