

Thermische und hygri sche Verhältnisse im Naturstein der Domtürme in Münster

Jochen MÜLLER-ROCHHOLZ, Ingo FENNEKER, Fachhochschule Münster

Kurzfassung. Die Beanspruchung von Natursteinen durch hygri sche und thermische Verformungen stellen einen wesentlichen mechanischen Grund für Schäden an Natursteinfassaden dar. Besonders die Denkmalpflege benötigt bei Steinersatz oder Beschichtungen auf Steinen hierzu Informationen. Mit den aus der Stahlbetonüberwachung stammenden Sensoren wurden an den Domtürmen in Münster seit 2004 Dauermessungen durchgeführt, die den Jahresgang der Feuchte als Langzeitaussage liefern, aber auch mit einem Messintervall von 10 min die Reaktion des Bauwerks auf Starkregen, Wind und Sonne zeigen. Ausgewählte Messkurven sind angegeben. Es gibt keine langfristige Feuchtanreicherung, der Winter trocknet die Wände durchgehend aus. Temperatureindringung ist deutlich schneller als Feuchteindringung. Detailprobleme mit Rechnern im Dauerbetrieb werden erwähnt.

1. Einleitung

Das regelmäßige Ausdehnen bei Sonneneinstrahlung (thermisch) und Regenanfall (hygri sch) und das entsprechende Zusammenziehen bei Abkühlung und Trocknung ist Ursache für Schäden an Natursteinfassaden, da durch Öffnungen, andere Baustoffe (Mörtel, inhomogene Steine) Zwängungen und damit Spannungen auftreten können. Der tatsächliche Feuchte- und Temperaturverlauf kann durch instationäre Verhältnisse abbildende Rechenprogramme (WUFI) [1] näherungsweise gerechnet werden oder mit Messung vor Ort erfasst werden. Sensoren aus der Stahlbetonüberwachung wurden im Zuge der Sanierung der Domtürme des Paulusdoms zu Münster eingebaut und ihre Werte mit einem PC-basierten Messwerterfassungssystem seit 2004 aufgezeichnet.

2. Bauwerk

Die beiden Türme des mittelalterlichen Bauwerks waren zuletzt nach der Beseitigung der Kriegsschäden instandgesetzt worden. Nach ca. 40 Jahren waren herabfallende Steinverwitterungsstücke zum Risiko geworden. Die Natursteine der Türme sind Baumberger (Kalk-)Sandstein und Altenberger Schalenkalke. In Voruntersuchungen wurde durch das Institut für textile Bau- und Umwelttechnik GmbH, tbu, Greven festgestellt, dass hygri sche und thermische Verformungskenngrößen einen Steinersatz durch Baumberger Sandstein zulassen. Nach intensiver Beratung wurde auf eine Oberflächenbehandlung der Türme verzichtet. Beim Ersatz von Steinen konnten die Messsysteme zum Feuchtemonitoring in Werksteine der Fassade eingebaut werden. Die Messsysteme wurden mit schwindarmem Mörtel angekoppelt [2]. Die Bilder 1 und 2 zeigen die Situation am Dom Münster mit eingerüstetem Südturm, nachdem der Nordturm vorher fertiggestellt wurde.

Die Bilder 3 bis 6 beschreiben die Lage der Sensoren, die Bilder 7 bis 9 zeigen den Einbau des „Sensorsteins“ in eine Turmecke, Bild 13 die Einbaulage der Sensoren im Stein.



Bild 1, 2, 3: Dom Münster mit eingerüstetem Südturm und Lage der Sensoren im Südturm

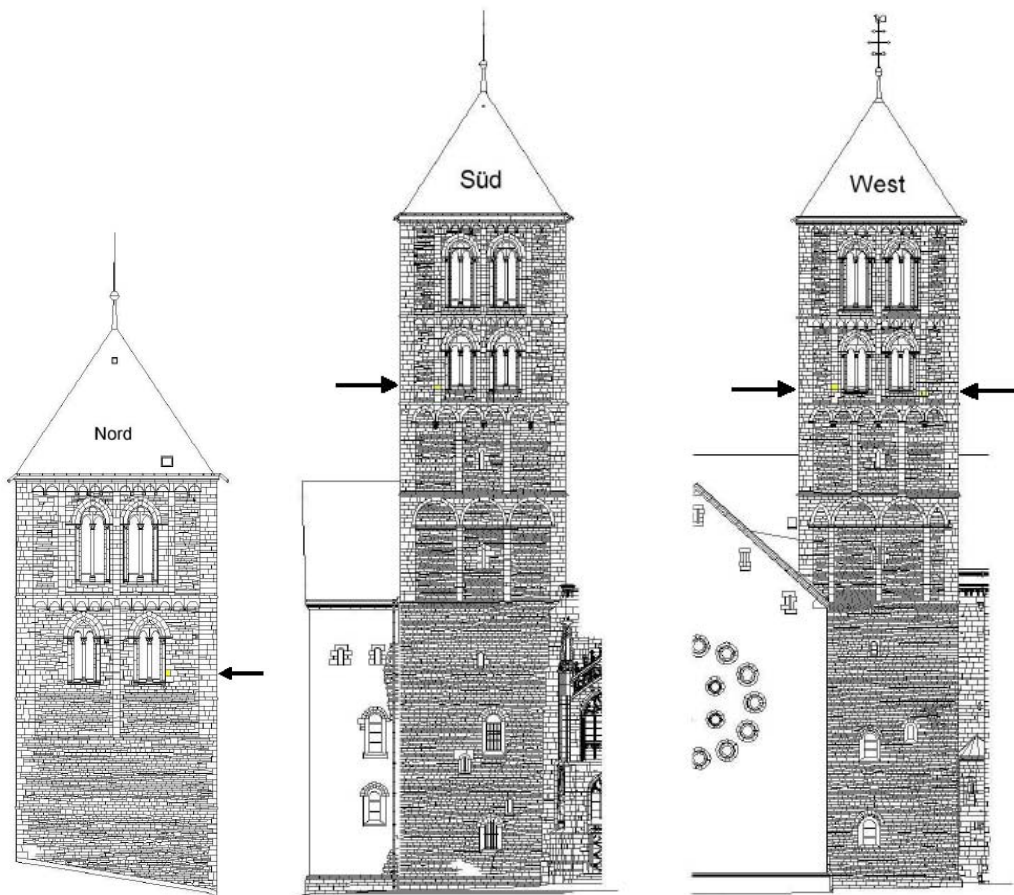


Bild 4, 5, 6: Lage der Sensoren (aus [2])



Bild 7, 8, 9: Einbau des „Sensorsteins“

3. Multiringfeuchte(MR)- und Multiringtemperatur(MT)-Sensoren

3.1 Multiringfeuchtesensoren (Bild 10)

Bei der am ibac-Institut in Aachen entwickelten Multiring-Elektrode handelt es sich um einen Widerstandssensor, mit dem in Abständen von 5 mm die Verteilung des Elektrolytwiderstandes im Sandstein gemessen wird. Durch die enge Korrelation zwischen Widerstand und Feuchtegehalt des Sandsteins lässt sich anhand der Messwerte der tatsächliche Feuchtegehalt im Stein abschätzen. Der Sensor gibt die gemessenen Werte über eine integrierte Steckverbindung an ein Wechselstromwiderstandsmessgerät weiter, welches die Messwerte bei definierter Messfrequenz und Wechselspannung speichert, so dass sie über eine serielle Schnittstelle auf einen PC übertragen und mit Hilfe eines speziell programmierten Excel-Makros ausgewertet werden können [3].

3.2 Multiringtemperatursensoren (Bild 11)

Der Multi-Temperatur-Fühler besteht aus acht PT-1000-Temperatursensoren, die entsprechend den Abständen der Stahlringe der Multi-Ring-Elektrode auf eine Platine gelötet sind. Sie messen den Widerstand in Ohm [Ω], der sich anhand von Tabellen basierend auf den folgenden Formeln in die entsprechende Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] umrechnen lässt.

Temperaturbereich von -200°C bis 0°C :

$$R_t = 100 \cdot \left[1 + 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5,775 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 4,183 \cdot 10^{-12} \cdot (t - 100) \cdot t^3 \right]$$

Temperaturbereich von 0°C bis $+850^{\circ}\text{C}$:

$$R_t = 100 \cdot \left[1 + 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5,775 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 \right]$$

mit R_t = Widerstand in Ohm [Ω] bei der Temperatur t
 t = Temperatur in $^{\circ}\text{C}$

Die gemessenen Werte werden ebenfalls über eine integrierte Steckverbindung an ein Wechselstromwiderstandsmessgerät und dann über eine serielle Schnittstelle auf einen PC übertragen und mit Hilfe eines Excel-Makros ausgewertet.

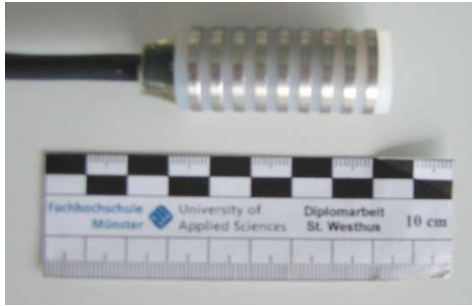


Bild 10: Multiringfeuchtesensor



Bild 11: Multiringtemperatursensor

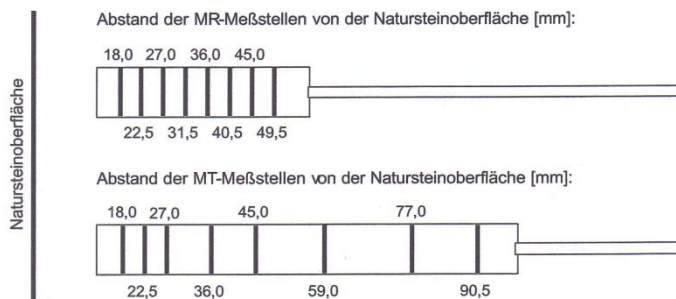


Bild 12: Einbaulage der Sensoren im Stein

4. Laborversuche

4.1 Versuchskörper

Um die Auswirkung einer Silikonharzbeschichtung auf einem porösen Rütthener Sandstein zu erproben, wurden zwei gleichartige Werksteine mit Bohrungen zur Aufnahme von Widerstands- und Temperatursensoren versehen [4]. Nach dem Einbringen der Sensoren wurde die „Frontseite“ eines Steines beschichtet während die anderen fünf Seiten mit Bitumendickbeschichtung und Al-Folie abgedichtet wurden. In einer Umhüllung aus Porenbeton wurden diese Steine nach Süden/Westen ausgerichtet und über längere Zeit beobachtet. Beim zweiten Beobachtungszeitraum wurde zusätzlich ein Loch durch den Stein gebohrt, um die „HF-Tiefensonde“ zu Vergleichsmessungen der Feuchteverteilung über die Steintiefe nutzen zu können. Die Bilder 13 und 14 zeigen die Versuchssteine auf dem Carport in Münster-Nienberge sowie die Lage der Bohrungen auf der Rückseite der beiden Versuchssteine.

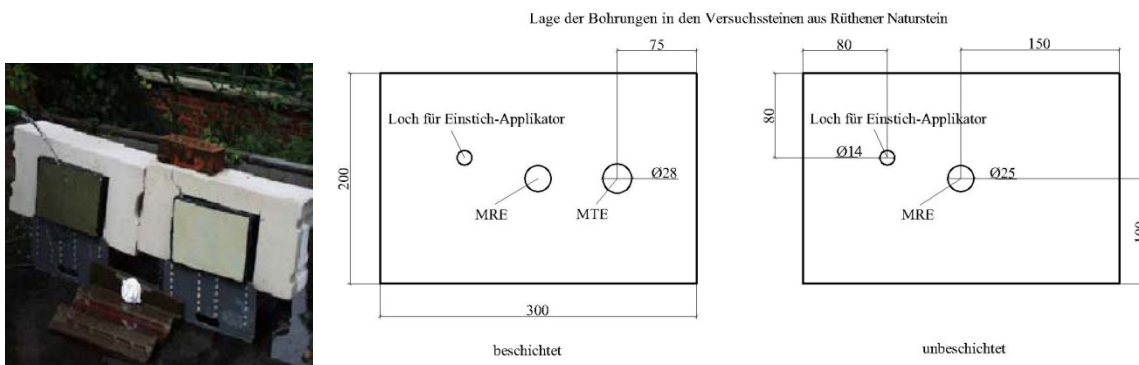


Bild 13, 14: Versuchssteine mit und ohne Beschichtung bei Außenbewitterung

4.2 Wirkung der Beschichtung

An den Rütthener Proben mit und ohne Silikonharzbeschichtung kann der Widerstandsverlauf bei einem Regenereignis gut erkannt werden (Bilder 15, 16).

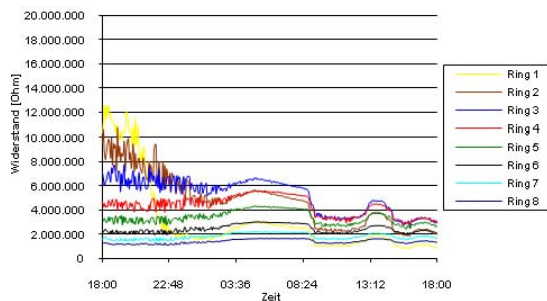


Bild 15: Regenereignis unbeschichteter Stein

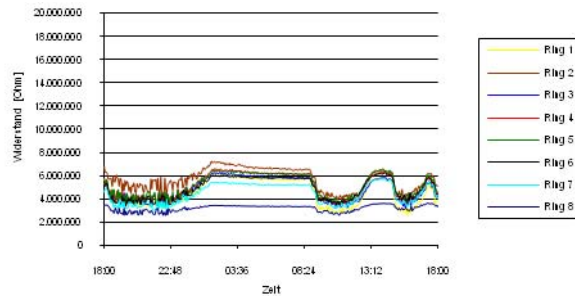


Bild 16: beschichteter Stein

Es ist gut der generelle Verlauf zu sehen: krasser Abfall der des oberflächennahen Rings 1 beim unbeschichteten Stein (Bild 15) und verzögertes Folgen der tieferliegenden Ringe. Beim beschichteten Stein (Bild 16) schwankt die Feuchtigkeit nicht in dem Maße, das Niveau des Widerstandes ist etwas höher und somit trockener. Zeitlich geringer aufgelöst erkennt man (für mehrere Tage, Bilder 17, 18) die großen Unterschiede durch die Beschichtung und die große hygrische Beanspruchung der vorderen Zentimeter des Sandsteins.

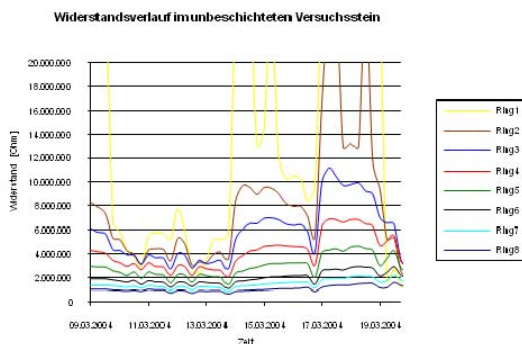


Bild 17: unbeschichteter Stein

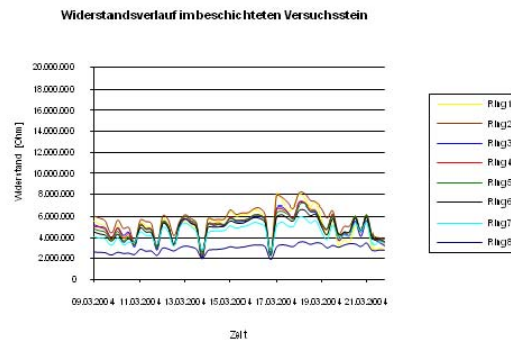


Bild 18: beschichteter Stein

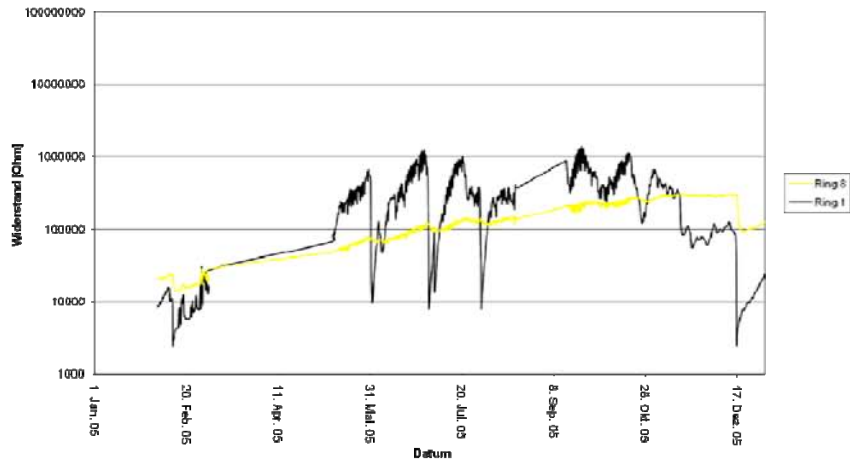
5. Auswertungen

5.1 Langzeitaufzeichnung

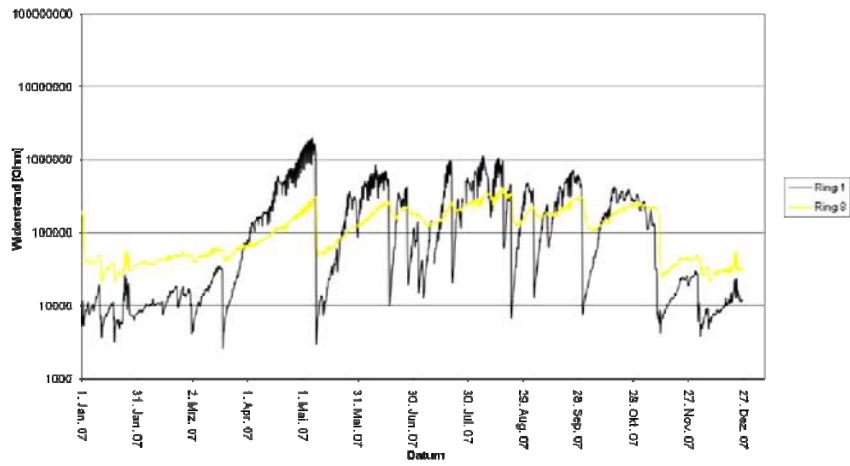
Um die Grafiken übersichtlich zu halten, sind für den Zeitraum von 2004 bis 2009 für einen Sensor (Westwand, südlicher MR-Sensor) die Ganglinien für den ersten (vordersten) und achten (hintersten) Ring für die Jahre 2005, 2007, 2009 als Bilder 19, 20, 21 angegeben. Der Jahresgang der Temperatur in 2007 ist für den neben dem MR-Sensor eingebauten MT-Sensor angegeben (Bild 22).

Aus dem Langzeitverlauf ist gut zu erkennen, dass weitgehend unabhängig von den Regenereignissen der Sommerperiode das Bauwerk im Winter wieder auf das über die Jahre gleiche Niveau austrocknet, also keine Feuchteakkumulation im Stein erfolgt.

Dom Feuchtesensor Westwand -nördlich- Ring 1 und Ring 8 von 2005



Dom Feuchtesensor Westwand -nördlich- Ring 1 und Ring 8 von 2007



Dom Feuchtesensor Westwand -nördlich- Ring 1 und Ring 8 von 2009

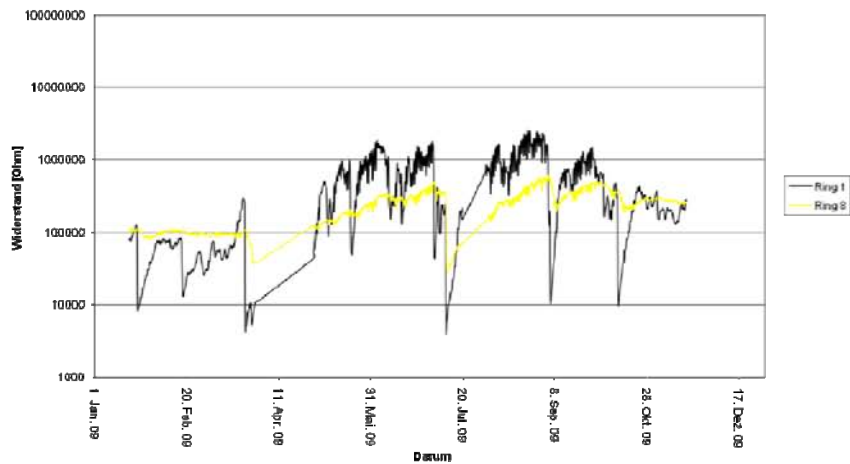


Bild 19, 20, 21: Jahresganglinien MR Westwand (N)

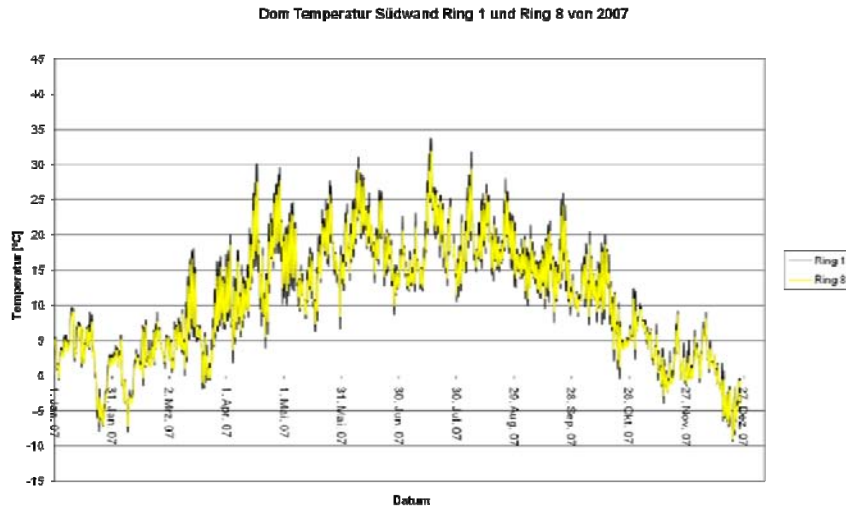


Bild 22: Jahresgang Temperatur 2007

5.2 Kurzzeitereignisse

Aus den Aufzeichnungen 2007 wurde der Zeitraum um den 7. Mai ausgewählt, an dem es mit über 40 mm Niederschlag in 24 h (Wettermessdaten dankenswerterweise vom Lehrstuhl für Landschaftsökologie, Prof. Klemm, WWU Münster) ein sehr starkes Regenereignis bei westlichen Winden mit Windgeschwindigkeiten von 2,5 – 5,5 m/s gab. Bild 23 gibt den Widerstandsverlauf, Bild 24 die Regenmengen und Bild 25 den Temperaturverlauf für diesen Zeitraum wieder. Bild 26 zeigt zeitlich hoch aufgelöst (Messungen im 10 min-Intervall) die Durchfeuchtung beginnend am 1. Sensorring und dann über rd. 5 Stunden das Erreichen des letzten Sensorrings in ca. 50 mm Tiefe. Gut zu erkennen, dass das diffuse Austrocknen gegenüber dem kapillaren Befeuchten deutlich länger dauert (ca. 6 Wochen, also 5 h zu 1000 h ~1:200).

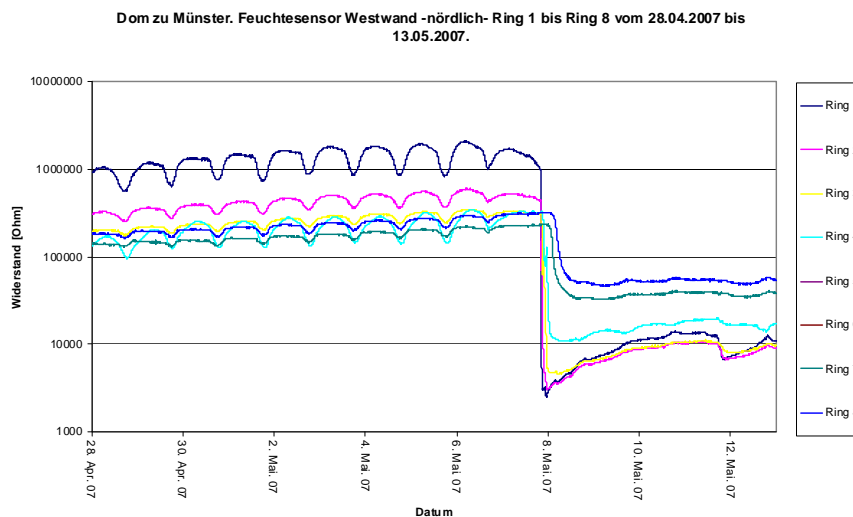


Bild 23: Widerstands(Feuchte)-Verlauf bei Starkregen am 07.05.2007

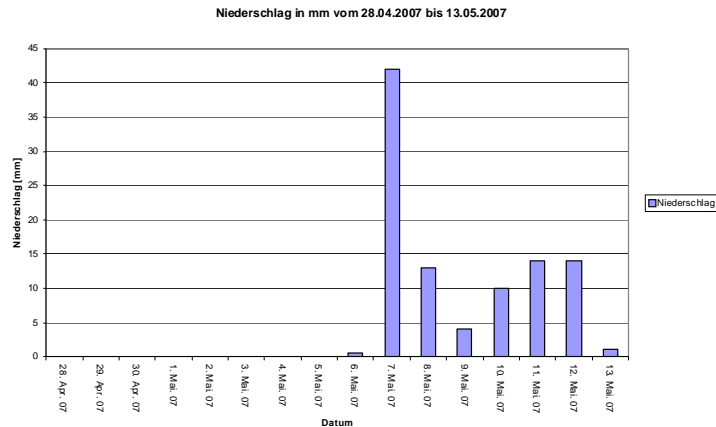


Bild 24: Regenereignisse im Mai 2007

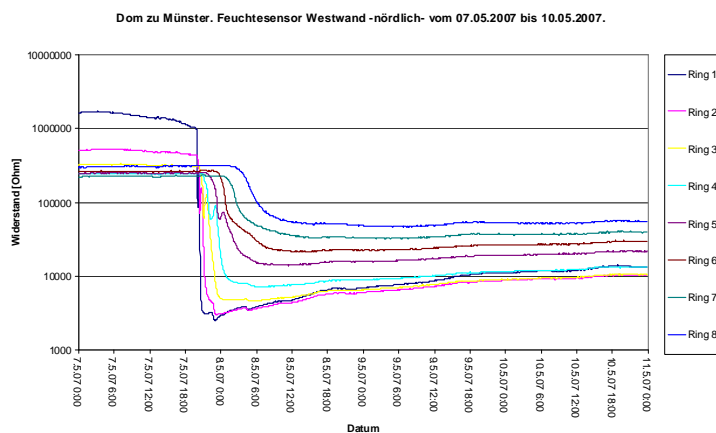


Bild 26: Hochaufgelöster Widerstands(Feuchte)-Verlauf bei Starkregenereignis

6. Bewertung der Messungen

Die Langzeitmessungen von Widerstand (als Maß für die Materialfeuchte) und Temperatur (zur Kompensation der gemessenen Widerstandswerte erforderlich und zur Ermittlung von thermischen Zwängen) in Naturstein sind mit den für Stahlbeton im ibac, RWTH Aachen, entwickelten Sensoren gut möglich. Die Kalibrierung zu Materialfeuchten steht noch aus für den Baumberger Sandstein. Probleme bereiteten die für Dauerbetrieb im exponierten Turm nur begrenzt geeigneten PC-Hardware-Komponenten. Stromausfälle, Pufferbatterieversagen führten zu Datenausfällen. Auf eine zeitnahe Funkübertragung der Messwerte in die Hochschule wurde aus Kostengründen verzichtet.

Referenzen

- [1] M. Krus, *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken*, Lehrstuhl Konstruktive Bauphysik, Universität Stuttgart, 1995
- [2] S. Westhus, *Naturstein am Dom Münster – Anpassung von Multiringfeuchte – und Multitemperatursonden an Baumberger Kalksandstein und erste Messungen*, Diplomarbeit im Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachhochschule Münster, September 2002
- [3] M. Raupach, *Smart Structures – Intelligente Bauwerke, Ergebnisse eines europäischen Forschungsvorhabens*, Vortrag beim 29. Aachener Baustofftag, November 2003
- [4] W. Reers, *Feuchtemessung in Mauersteinen – St. Paulus Dom in Münster, Paulus-Kirche in Hamm*, Diplomarbeit im Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachhochschule Münster, April 2004