

## 10. Vergleichsuntersuchungen mit unterschiedlichen zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Feuchte- und Salzmessmethoden

Karol Bayer, Wolfram Köhler, Horst Schuh, Eberhard Wendler

### 1. Einleitung

Für die Praxis werden verschiedene Handmessgeräte zur zerstörungsfreien Bestimmung von Feuchtigkeit im Mauerwerk angeboten und auch eingesetzt. Neben Geräten, die dimensionslose Zahlenwerte liefern, geben andere Geräte quantitativ den Feuchtegehalt an. Aus bisherigen Erfahrungen ist jedoch bekannt, dass die Anwesenheit von löslichen Salzen, je nach Messprinzip, das Ergebnis stark beeinflussen kann. Das FIDA (Forschungsinstitut für Denkmalpflege und Archäometrie e.V.) hat sich deshalb vorgenommen, in den nächsten Jahren einige Messgeräte nicht an Mauerwerk oder Probekörpern, sondern an konkreten Objekten zu überprüfen. 2010 wurde das Vorhaben an zwei ausgewählten Objekten in Litomyšl (Tschechien, Ostböhmen) begonnen.

### 2. Vorbemerkung

#### 2.1. Bearbeiter

Folgender Personenkreis war an den Untersuchungen (19./20.04.10) in Litomyšl beteiligt:

Universität Pardubice Fakultät Restaurierung (Karol Bayer)

Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (Bärbel Arnold)

Cubus, Prag (Pavel Fára, Herr Gill)

Institut für Diagnostik und Konservierung, Halle (Jeannine Meinhardt, Bernd Hofestädt, Uwe Kalisch)

Labor Köhler, Potsdam (Irene und Wolfram Köhler, Michael Krempler)

Labor Dr. Ettl / Dr. Schuh, München (Horst Schuh)

Labor Dr. Wendler, München (Eberhard Wendler)

#### 2.2. Objekt

Die Untersuchungen fanden in Litomyšl (Tschechien) statt. Ausgewählt wurden zwei Objekte, die von der Fakultät für Restaurierung der Universität Pardubice als Lehr- und Verwaltungsgebäude bzw. als Werkstätten genutzt werden. Das Herrschaftshaus der Familie Trautmannsdorf wurde in der 2. Hälfte des 17. Jahrhunderts erbaut und im 18. Jahrhundert inklusive der Fassade umgebaut. Das Piaristenheim, das der Erziehung der Jugend aus ärmeren Familien diente, wurde zuerst (1644) als 3-flügelige Anlage erbaut und 1681 mit dem vierten Flügel abgeschlossen. Es ist noch im Eigentum des Piaristenordens. Die Messfläche I (1,2 breit, 2,3 m hoch) befindet sich am SO-Eck der Ostseite des ehemaligen Herrschaftshauses, die Messflächen II und III, jeweils 2 x 2 m, im Piaristenheim, II im Eingangsbereich und III

an der Innenwand des nördlichen Umgangs. Alle Wandflächen zeigten deutlich erkennbare Feuchtesäume und entsprechende Schäden in unterschiedlichen Höhenbereichen.

Bei der Entnahme der Proben wurde festgestellt, dass das Mauerwerk bei beiden Gebäuden aus einem Mischmauerwerk aus Sandstein und Ziegel besteht. Beim Sandstein handelt es sich um einen Kreide-Sandstein (Mitteluron) des Isergebirges, der in der Vergangenheit und teilweise noch heute fast ausschließlich als Baumaterial verwendet wurde. Die feinkörnigen, kalkreichen Sandsteine bestehen überwiegend aus Quarz und Calcit, daneben treten Glaukonit, Feldspäte, Muskovit und Kaolin auf. Das Bindemittel wird überwiegend durch Calcit gebildet, dessen Gehalt zwischen 40 und 60 % schwankt. Die offene Porosität beträgt 10 bis 12 Vol-%. Sämtliche Wandflächen sind mit Materialien aus unterschiedlichen Generationen verputzt, vom historischen Kalkputz bis zu zementhaltigen Putzen.

#### 2.3. Messgeräte

Neben Handmessgeräten zur Feuchtebestimmung von unterschiedlichen Herstellern wurden als weitere zerstörungsfreie Verfahren auch aktive IR-Thermografie und Georadar eingesetzt, um gegebenenfalls weitere Informationen zum Mauerwerksaufbau und -zustand zu erhalten. Da diese Ergebnisse aber keine verwertbaren Aussagen lieferten, bleiben sie im Folgenden unberücksichtigt.

Von den vielen am Markt vorhandenen zerstörungsfreien Feuchtemessgeräten standen für die Untersuchungen drei unterschiedliche Geräte, jeweils 2 bis 3-fach, zur Verfügung: Gann Hydromette Compact B – Doser Feuchtefühler – Hf-Sensor Moist 210B mit den Messköpfen R1, R2 und P. Die folgenden Angaben zum jeweiligen Messverfahren wurden den Unterlagen der Hersteller entnommen und (zunächst) nicht weiter hinterfragt.

Der elektronische Baufeuchteindikator Gann Hydromette Compact B verwendet das Dielektrizitätskonstante-/Hochfrequenz-Messprinzip. Das Messgerät kann problemlos mit einer Hand bedient werden, die Messwerte werden digital in einem Messbereich von 0 bis 100 Digits materialunabhängig angezeigt. Mit der kugelförmigen Sonde (Durchmesser 2 cm) kann auch bei gefährdeten Oberflächen zerstörungsarm gemessen werden.

Die Fa. Doser stellt eine Sonde mit drei Federbügeln her, die auch von mehreren anderen Herstellern an deren Messgeräte angepasst wird. Die drei Metallfedern an der Sonde werden auf die ebene Baustoffoberfläche gedrückt. Mit dem kapazitiven Messprinzip ermittelt das Gerät die Dielektrizitätskonstante des Untergrundes. Da Wasser eine sehr hohe Dielektrizitätskonstante besitzt, kann aus dem ermittelten Wert auf die Material-

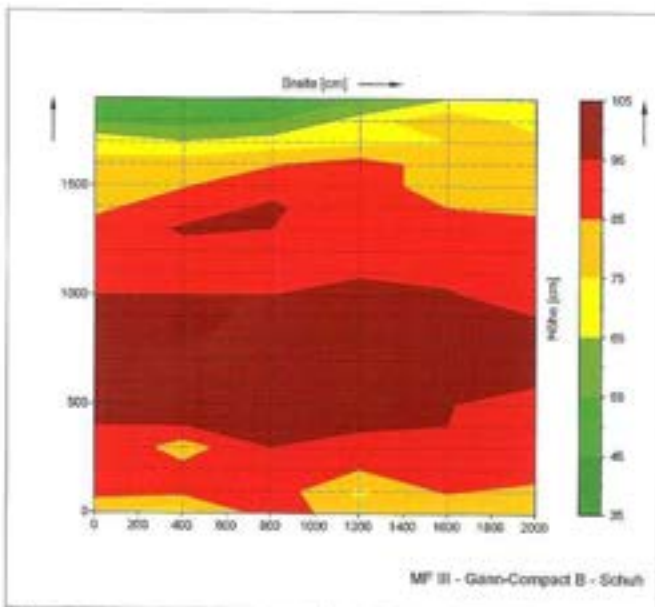


Abb. 1: MF III – Gann Compact B (Schuh)

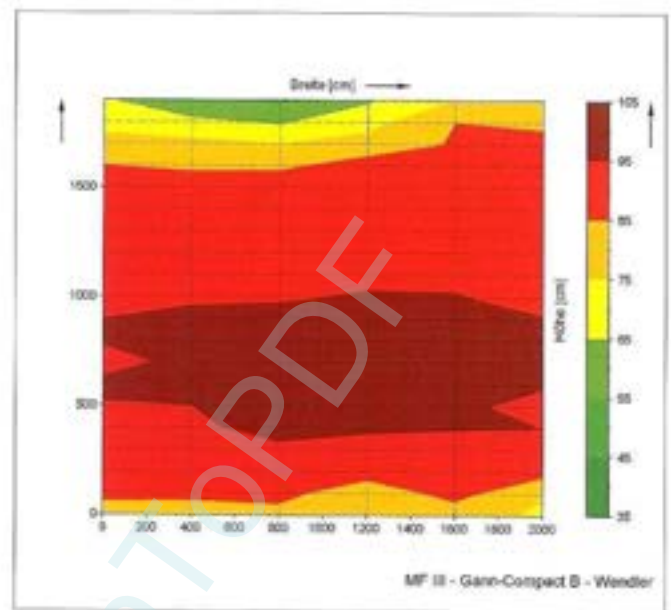


Abb. 2: MF III – Gann Compact B (Wendler)

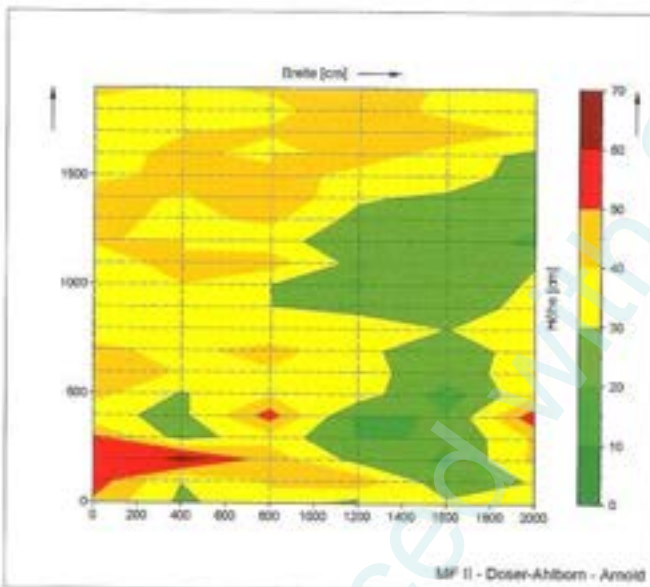


Abb. 3: MF II – Doser-Ahlborn (Arnold)

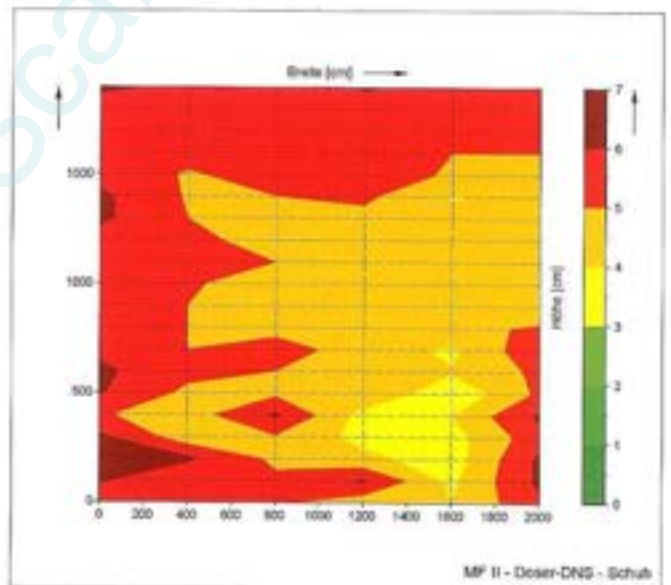


Abb. 4: MF II – Doser-DNS (Schuh)

feuchte geschlossen werden. Die Sonde ist in einem Fall fest an ein Messgerät der Fa. Denzel (DNS G815) angebaut. Es handelt sich ebenfalls um ein Einhandmessgerät.

Die gleiche Sonde (Materialfeuchtesonde FH A696-MF) kann auch über ein Kabel an Messgeräte oder Datenlogger der Fa. Ahlborn angeschlossen werden (daher kein Einhandmessgerät). In beiden Fällen wurden keine materialabhängigen Kennlinien verwendet.

Das Messgerät Moist 210 (HfSensor) mit seinen Messköpfen für unterschiedliche Eindringtiefen gehört auch zur Kategorie der dielektrischen Messverfahren, wobei die Wassermoleküle im Untergrund mit Mikrowellen angeregt werden. Der Hersteller verweist darauf, dass aufgrund der Mikrowellenanregung ausschließlich Wasser erfasst wird und die Messköpfe nicht auf Salze reagieren. Die Messköpfe sind durch ein Kabel mit dem Messgerät verbunden (Zweihandmessgerät). Es kamen drei unterschiedliche Sonden zum Einsatz: Moist-R1 – Ein-

dringtiefe bis 4 cm, Moist-R2 – Eindringtiefe bis 7 cm, Moist-P – Eindringtiefe bis 30 cm. Aufgrund der großen Auflagefläche der Messköpfe ist die Verwendung bei gefährdeten Oberflächen nicht ganz zerstörungsfrei. Auch in diesem Fall wurden nicht die vom Hersteller einprogrammierten Eichkurven für unterschiedliche Baustoffe verwendet, sondern der sogenannte Feuchteindex (dimensionslos).

An den drei Messfeldern wurden je 4 bis 6 Messachsen im Abstand von 20 cm und jeweils Messpunkte im Abstand von 10 cm Höhe markiert (10 bis 200 bzw. 230 cm Höhe). Die Messergebnisse wurden anschließend in Falschfarben grafisch dargestellt (Ampelfarben: dunkelgrün – hellgrün – gelb – orange – rot – dunkelrot). Die Skalierung der Legende wurde so gespreizt, dass einerseits unterschiedliche Verteilungen in einem Messfeld abzulesen sind und andererseits die drei Messfelder untereinander verglichen werden können. Für ein Messgerät bzw. eine Sonde wurde unabhängig vom Bearbeiter jeweils eine Skalierung gewählt. Im



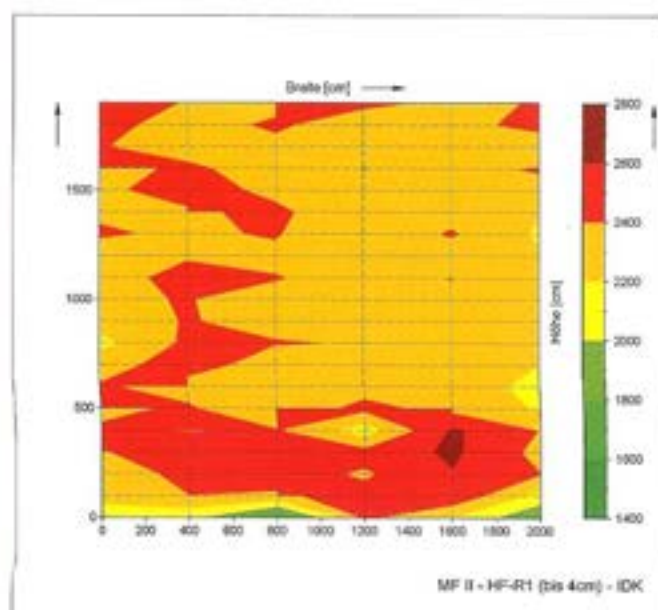


Abb. 5: MF II - HF-R1 (IDK)

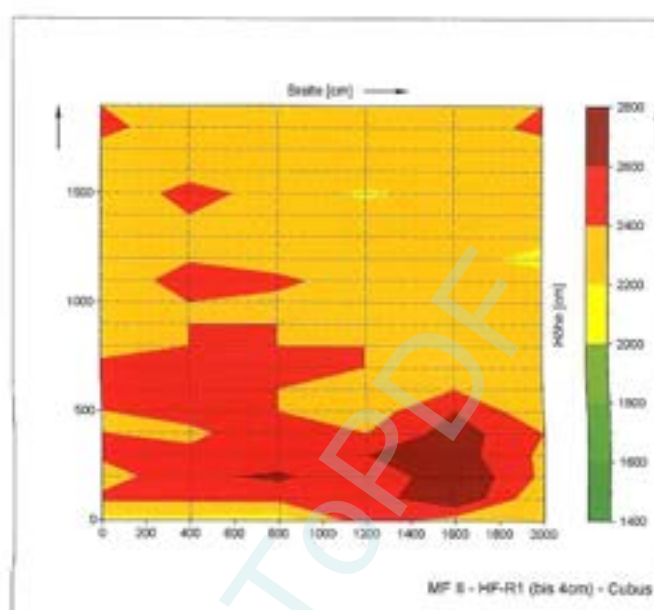


Abb. 6: MF II - HF-R1 (Cubus)

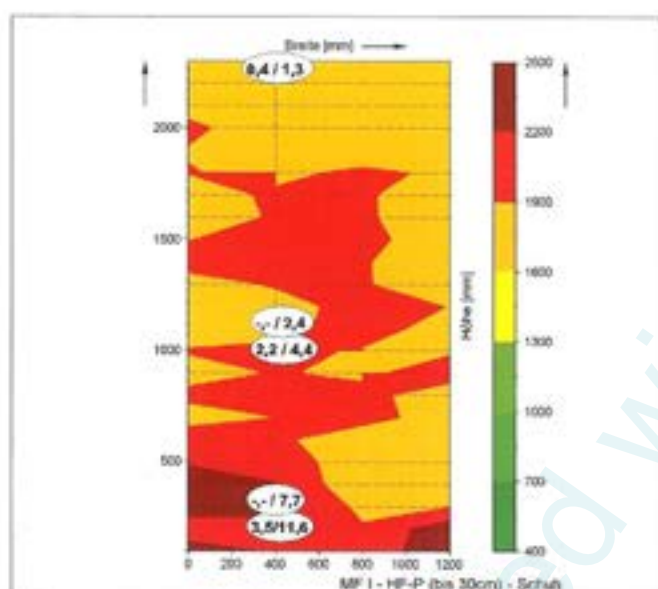


Abb. 7: MF I - HF-P (Schuh) mit Feuchtegehalt in M-% (Putz / Mauerwerk)

Anschluss an die zerstörungsfreien Messungen erfolgte die gezielte Entnahme von Baustoffproben (Putz, Ziegel, Sandstein).

### 3. Interpretation der Diagramme

Bei einem verputzten Mauerwerk kann man ohne Bauteilöffnung nicht den Mauerwerksaufbau hinter der Messfläche erkennen. Aus diesem Grund ist man zunächst allein auf die Ergebnisse der zerstörungsfreien Messergebnisse angewiesen. Eine brauchbare Interpretation der Ergebnisse muss daher mit einer anschließenden, gezielten Probenahme ergänzt werden.

#### 3.1. Reproduzierbarkeit

Der Vergleich der grafischen Darstellungen mit jeweils zwei gleichartigen Messgeräten zeigt für die drei unterschiedlichen

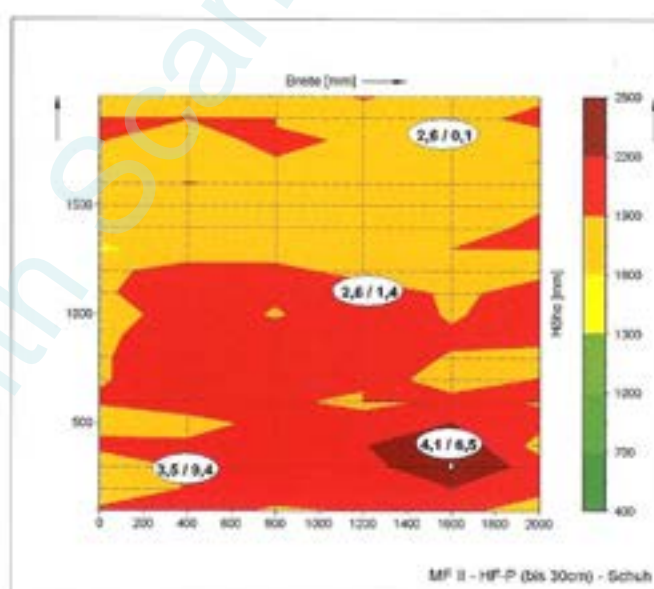


Abb. 8: MF II - HF-P (Schuh) mit Feuchtegehalt in M-% (Putz / Mauerwerk)

Verfahren eine gute Übereinstimmung, unabhängig vom Bearbeiter und Messgerät.

Die Abbildungen 1 und 2 ergeben ein übereinstimmendes Bild für die Messungen mit der Gann-Hydromette-Compact B. Eine mittlere Zone mit sehr hohen Messwerten, in der sich erfahrungsgemäß die größte Feuchte- und Salzbelastung befindet, ist jeweils flankiert von trockeneren Bereichen. Die oberste sehr trockene Zone ist nach Praxiserfahrungen auch salzfrei.

Mit der Sonde der Fa. Dosier ist zwar keine so gute Übereinstimmung vorhanden (Abbildung 3 und 4), doch zeigt sich auch hier im Grundsatz eine ähnliche Verteilung. Die niedriger belasteten Bereiche liegen jeweils in der unteren rechten Bildhälfte.

Gute Übereinstimmung lässt sich auch mit der Oberflächensonde des HF-Sensors erzielen (Abbildung 5 und 6). Allerdings ergibt sich für das Messfeld II ein grundsätzlich anderes, zunächst scheinbar widersprüchliches Bild im Vergleich mit der

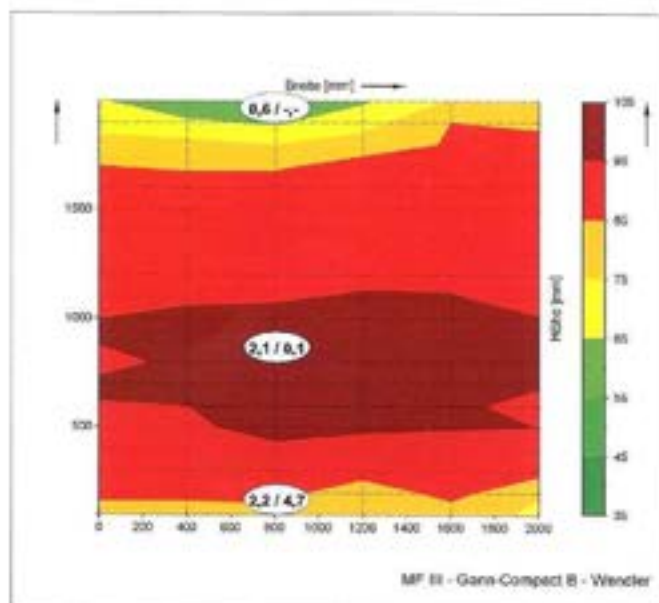


Abb. 9: MF III - HF-P (Schuh) mit Feuchtegehalt in M-% (Putz / Mauerwerk)

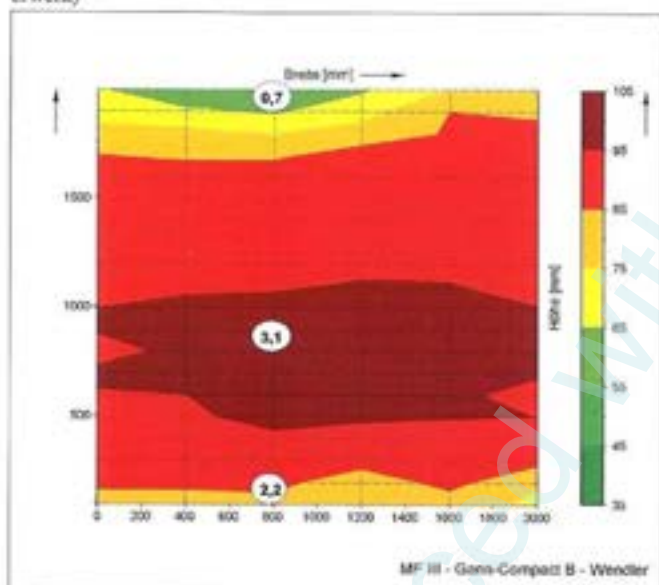


Abb. 11: MF III - Gann Compact B (Wendler) mit Salzgehalt in M-%

Doser-Sonde (Abbildung 3 und 4). Beim HF-Sensor tritt nämlich gerade der untere, rechte Bereich als „Feuchteinsel“ hervor.

### 3.2. Vergleich der Messfelder

Die Abbildungen 7-9 zeigen die Resultate mit dem Moist-HF-Sensor P für die Musterflächen MF I - MF III. Ergänzt werden die Darstellungen durch Angaben der an ausgewählten Punkten ermittelten Entnahmefeuchten im Putz und dem dahinter liegenden Mauerwerk. Hier läßt sich in den meisten Fällen ein direkter Bezug herstellen, d.h., stark durchfeuchtete Bereiche entsprechen hohen Messwerten und umgekehrt. Eine stärkere Durchfeuchtung tieferer Bereiche scheint im Vergleich mit der Oberflächensonde-R1 auch Auswirkungen auf das Messergebnis mit dem Sensor P zu haben (z.B. Abbildung 8 oben / Mitte im Vergleich mit Abbildung 5 und 6). Ein systematischer Zusammenhang mit der Tiefenverteilung der Feuchte

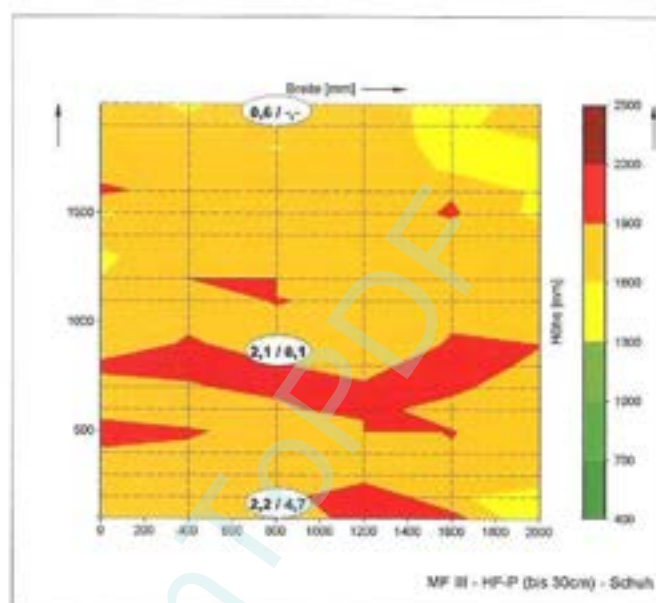


Abb. 10: MF III - Gann Compact B (Wendler) mit Feuchtegehalt in M-% (Putz / Mauerwerk)

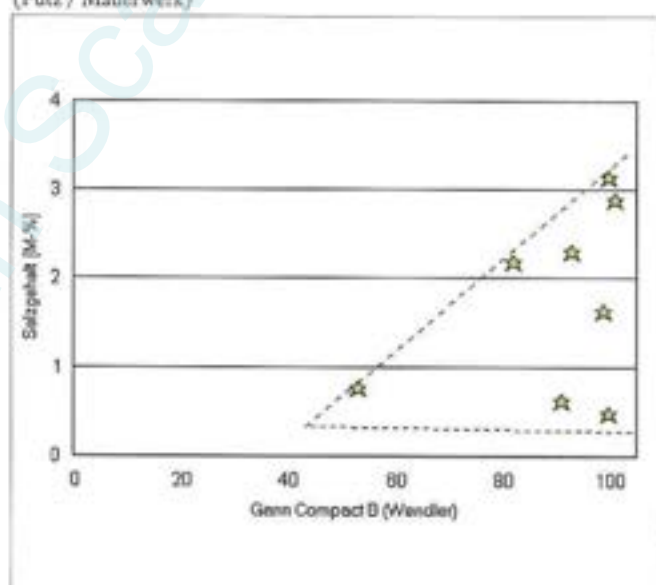


Abb. 12: MF II / MF III - Gann Compact B (Wendler) mit Salzgehalt in M-%

ist aber nicht herzuleiten. Eine Korrelation der Messergebnisse mit den tatsächlichen Feuchtegehalten der Materialproben ist jedoch nicht möglich, die Darstellung gibt lediglich eine grobe flächige Feuchteverteilung wieder. Die roten Flächen in der Mitte der Musterfläche III (Abb. 9) aber auch im oberen Bereich der Musterflächen I und II (Abb. 7 und 8) stellen somit nicht zwingend „Feuchteinseln“ dar, sondern können auch ein Ergebnis von unterschiedlich porösen Putzen und Wandbaustoffen sein.

Kein sinnvoller Zusammenhang ergibt sich dagegen zwischen den Meßwerten mit der Gann-Hydromette an MF III und den zugehörigen Feuchtegehalten (Abb. 10). Werden dieselben Meßwerte jedoch mit den an identischen Positionen ermittelten Salzgehalten verglichen, ergibt sich eine brauchbare Korrelation (Abb. 11). Das bedeutet, dass das Messprinzip der Gann-Hydromette sensibel auf Salzgehalte im Untergrund reagiert.



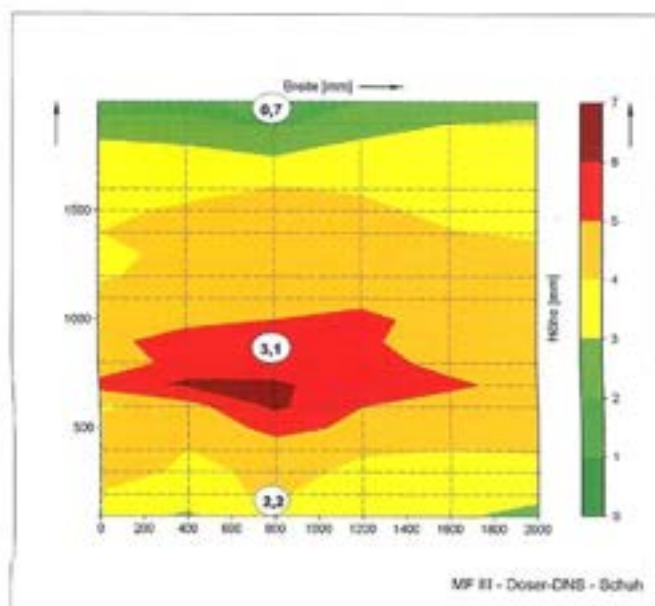


Abb. 13: MF III Doser (Schub) mit Salzgehalt in M-%

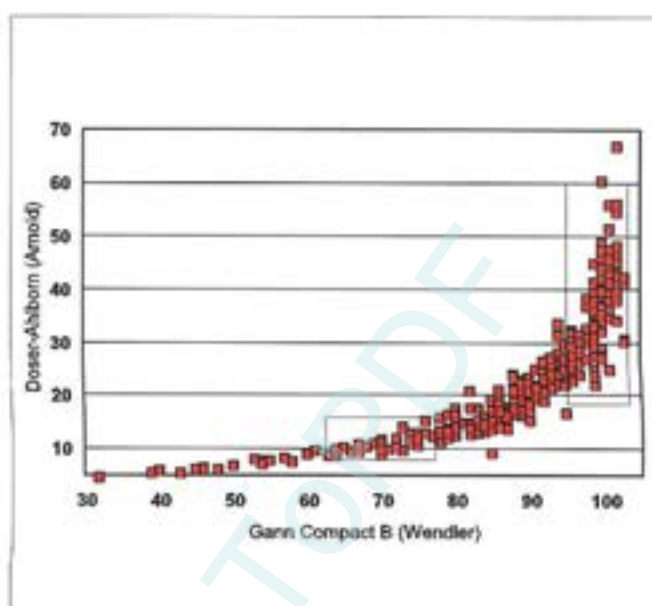


Abb. 14: MF I - MF III, Korrelation Gann (Wendler) / Doser (Arnold)

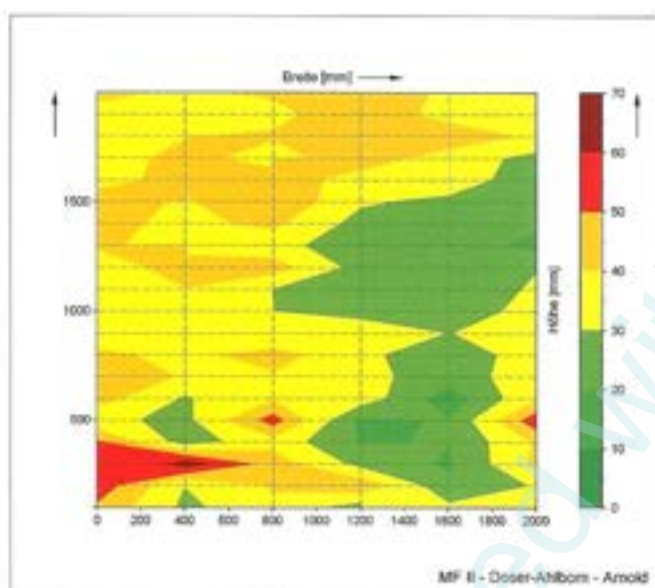


Abb. 15: MF II Doser-Ahborn (Arnold)

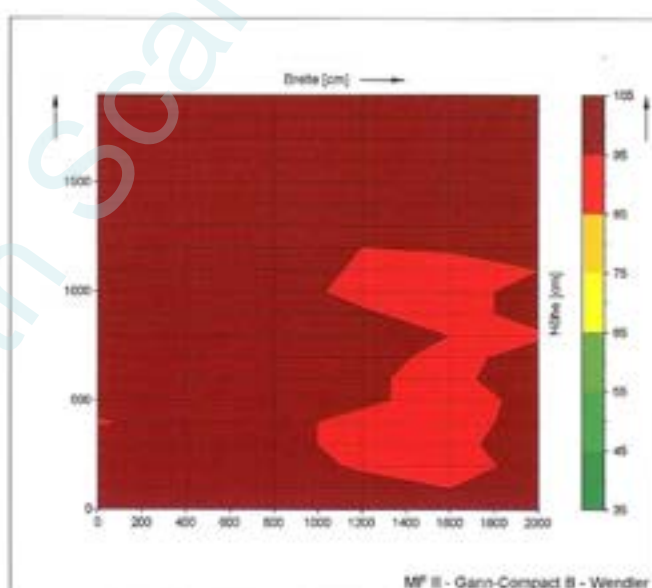


Abb. 16: MF II Gann Compact B (Wendler)

Trägt man die festgestellten Salzgehalte gegen die Meßwerte (Gann Compact B) auf, ergibt sich der in Abbildung 12 ablesbare Zusammenhang: Hohe Meßwerte können sowohl bei sehr geringer als auch bei deutlicher Salzbelastung erzielt werden. Die einhüllenden Linienzüge kennzeichnen den messtechnisch möglichen Bereich. Eine lokale Salzbelastung von beispielsweise 3 M-% hat generell Meßwerte  $>90$  zur Folge, eine Belastung von 1 M-% immer Werte  $>50$ . Umgekehrt kann aber ein Wert von 100 innerhalb einer sehr weiten Streuung der Salzbelastung auftreten, d.h., hohe Durchfeuchtung kann bei geringer Salzlast ähnliche Werte bedingen wie hohe Salzlast bei geringem Feuchteanteil. Ein ähnliches Bild liefert der Versuch einer Korrelation mit den hygroskopischen Feuchteanteilen derselben Proben (hier nicht dargestellt).

Ähnliche Zusammenhänge mit der Salzbelastung wie für die Gann Compact B gelten im Grundsatz auch für das Doser-Meßverfahren (beispielhaft dargestellt für MF III, Abb.13). Bei bei-

den Meßverfahren signalisieren hohe Werte also hohe Belastungen mit Feuchte u./o. Salzen, eine weitere Differenzierung und Quantifizierung ist in der Folge nur durch eine gezielte Beprobung der zuvor meßtechnisch erkannten „hot spots“ möglich.

Ein Vergleich aller 336 an den drei Musterflächen erhaltenen Meßwerte mit der Gann-Hydromette und dem Doser-Meßfühler zeigt, unabhängig von Materialart und Oberflächenbeschaffenheit eine gute, quasi lineare Korrelation bis zu Gann-Werten um 70, in den zugehörigen Doser-Werten treten nur geringe Varianzen auf. Für höhere Gann-Werte zeigen die korrespondierenden Doser-Werte jedoch eine erheblich stärkere Differenzierung. Bei Gann-Werten zwischen 95 und 100 können beispielsweise Varianzen um den Faktor 3 in den zugeordneten Doser-Werten auftreten (Abb. 14).

Diese stärkere Differenzierung im oberen Wertebereich wird besonders im Ergebnisvergleich an Musterfläche MF II deutlich (Abb. 15 und 16). Die hohe Feuchte-/Salzbelastung dieser

Wand erlaubt bei Messung mit der Gann-Hydromette nur eine äußerst geringe Differenzierung, die Messung mit dem Doser-Meßfühler zeigt eine deutlich stärkere Strukturierung.

### Zusammenfassung

Der Einsatz unterschiedlicher Meßgeräte zur zerstörungsfreien Detektion von Feuchte im Mauerwerk kann zu stark voneinander abweichenden Interpretationen führen, wenn die jeweiligen Grenzen der Einsatzbereiche nicht berücksichtigt werden. Unabhängig vom individuellen Gerät und der messenden Person liefern jeweils gleichartige Meßinstrumente zufriedenstellende Reproduzierbarkeit. Die Korrelation zwischen Werten aus Messungen mit der Gann Compact B und dem Doser-Meßfühler ist für niedrige und mittlere Zahlenwerte zufriedenstellend, bei hohen Gann-Werten erlaubt die Messung mit dem Doser-Meßfühler eine deutlich stärkere Differenzierung. Die flächenhafte Darstellung aller Resultate in Falschfarben zeigt für konkrete Wandsituationen zunächst scheinbare Widersprüche zwischen Resultaten mit dem HF-Sensor einerseits und solchen mit der Gann Compact B oder dem Doser-Meßfühler andererseits. Erst die gezielte Beprobung an optisch her-

vortretenden Positionen und die Ermittlung von Entnahme-feuchten und Salzgehalten zeigte, daß mit dem HF-Sensor im wesentlichen nur die reine Feuchtigkeit gemessen wird, während die beiden anderen Verfahren sehr sensibel auf Salzgehalte reagieren. Da die Randbedingungen zwischen Meßwertbereich und Salzgehalten herausgearbeitet werden konnten, kann dies für eine stärker differenzierte Zustandserfassung genutzt werden. Grundsätzlich kann aber durch den kombinierten Einsatz von rein feuchtesensiblen mit feuchte- und salzsensitiven Verfahren eine darüber hinaus notwendige Probennahme gezielter durchgeführt und somit auf ein Minimum beschränkt werden. Allen Verfahren gemeinsam ist eine Tiefenabhängigkeit des Meßsignals. Die in diesem Artikel dargestellten zweidimensionalen Schnitte der Feuchte- u./o. Salzbelastung geben also nur ein integrales Bild über die jeweilige (gerätespezifische) Erfassungstiefe ohne Information über die tatsächliche Tiefenverteilung. Dieser funktionale Zusammenhang sollte zukünftig durch Labormessungen an künstlich mit Feuchte (ggf. und Salz) konditionierten Proben besser herausgearbeitet werden, um letztlich für die In-Situ-Messungen eine erhöhte Sicherheit bei der Interpretation zu gewährleisten. Ebenso sollte der Einfluss von unterschiedlich porösen Putzschichten auf das Messergebnis detaillierter untersucht werden.

Produced with ScanTopdf