

Simulationsgestützte Feuchteuntersuchungen

DBU-Projekt – Beseitigung spezieller Löschwassereinwirkungen an der Herzogin-Anna-Amalia-Bibliothek in Weimar

Dipl.-Ing. U. Gronau

BBS INGENIEURBÜRO, Thomas-Müntzer-Str. 6, 99423 Weimar

Kurzfassung

Die durch Löschwasser verursachten Feuchteschäden sind insbesondere in historischen Gebäuden erheblich und können die Brandschäden finanziell leicht um ein Mehrfaches übersteigen.

Bei ungenügender Austrocknung der Baukonstruktion bestehen langfristig erhebliche Risiken, neben Schimmelbildung an den Oberflächen ist vor allem dem Wachstum von die Bausubstanz stark schädigenden Schwämmen vorzubeugen.

Die im Rahmen des DBU-Projektes an der Herzogin-Anna-Amalia-Bibliothek nach dem Brand durchgeführten theoretischen und meßtechnischen Untersuchungen in einem besonders belasteten Bereich zeigen, daß Simulationsprogramme zum 2dimensionalen Wärme- und Feuchtetransport eine meßtechnische Bauwerksdiagnose zwar nicht ersetzen können, aber für die quantitative Bewertung der vorhandenen und zu erwartenden Probleme sowie bei der Entwicklung von Lösungen eine sinnvolle Ergänzung darstellen.

Der nachfolgende Beitrag soll einen Ausblick auf praktische Anwendungsmöglichkeiten von Simulationsprogrammen zeigen, mit denen der Wärme- und Feuchtetransport instationär und mehrdimensional abgebildet werden kann. Dies erfolgt am Beispiel einer ca. 80cm starken, in Teilbereichen vollständig durchfeuchteten und inhomogenen Natursteinwand im Bibliotheksgebäude.

Instationäre Bauteilsimulationen bieten die Möglichkeit, sowohl die Feuchtezunahme, als auch die Feuchteabnahme in einem Konstruktionsquerschnitt in zeitlicher Abhängigkeit hinreichend genau zu bestimmen, den Einfluß verschiedener Randbedingungen quantitativ zu bewerten und anhand der Ergebnisse geeignete Trocknungsmethoden zu entwickeln.

Das gewählte Beispiel zeigt daneben auch die nur schwer zu beseitigenden Probleme an starken Natursteinwänden bei einer Durchfeuchtung bis in den Mauerkerne. Da sich der Feuchtetransport aus dem Bauteil weitestgehend auf die Mörtelfugen beschränkt, sind die Austrocknungszeiträume ohne weitere Maßnahmen ggf. sehr lang.

Stichwörter: wichtige Fachbegriffe

Einführung

Am 2. September 2004 ist das Mansarddach der Herzogin-Anna-Amalia-Bibliothek durch einen Brand vollständig zerstört worden.

Als Folge des Löschangriffs, zur Brandbekämpfung wurden ca. 180m³ Wasser eingesetzt, sind im Gebäude erhebliche Feuchtebelastungen an der nicht unmittelbar vom Brand betroffenen Baukonstruktion sowie am Interieur (Stuckdecken, Verkleidungen, Regale etc.) zu verzeichnen.

Feuchtigkeit stellt allgemein ein hohes Risiko für historische Baukonstruktionen dar, besonders problematisch war im vorliegenden Fall das Wachstum von Pilzen sowie eine Reaktivierung von Schwammbefall, der als Altlast in allen Deckenkonstruktionen der Bibliothek bereits vor dem Brand diagnostiziert wurde.

Aufgabenstellung

Im Zusammenhang mit der Planung und Entwicklung von Maßnahmen zur Bautrocknung befaßt sich das DBU-Projekt mit den hinsichtlich der Feuchtebelastung und des denkmalpflegerischen Anspruchs besonders sensiblen Bereichen stark feuchtebelasteter Wandkonstruktionen in den Renaissancesälen. Ziel ist letztlich die Entwicklung und Durchführung einer geeigneten Trocknungsmethode, dabei werden folgende Fragenschwerpunkte gesetzt:

- Welcher Feuchtegehalt ist in den einzelnen Konstruktionsquerschnitten / Materialien zulässig, um das Risiko von Folgeschäden für die betroffenen bzw. angrenzenden Konstruktionen hinreichend zu begrenzen (Zielstellung der Bautrocknung)?
- Bei welcher Feuchtebelastung ist eine hinreichende Austrocknung der einzelnen Konstruktionen über den Zeitraum der Sanierung (ca. 12 Monate) ohne besondere Maßnahmen möglich?
- Wie kann die Austrocknungsgeschwindigkeit in stark belasteten Bereichen hinreichend erhöht werden?

Um diese Fragen zu beantworten, wurden auf der Grundlage einer Bauwerks- und Schadensanalyse in Gemeinschaft mit dem EBK Weimar für die verschiedenen Konstruktionsquerschnitte mehrdimensionale Simulationsmodelle mit dem Programm WUFI2D [Berechnung des instationären Wärme- und Feuchtetransportes in 2dimensionalen Konstruktionsquerschnitten] erstellt, um das zeitliche Austrocknungsverhalten bei verschiedenen Randbedingungen zu ermitteln.

Grundlage der Simulationsmodelle waren die Ergebnisse der Bauwerks- und Schadensanalyse, die eine Bestimmung von Schichtaufbauten, Materialkennwerten, Feuchteprofilen und leicht löslicher Bestandteile umfaßte.

Nachfolgend werden die ersten Ergebnisse und die gewählte Verfahrensweise bei der Problembearbeitung am Beispiel einzelner Konstruktionen vorgestellt.

Grundlagen

Die Art der Feuchtebelastung kann allgemein in folgende Kategorien eingeteilt werden:

Poren- bzw. Fasersättigung

Ursache für eine überhygroskopische Sättigung ist die Einwirkung von direkt anstehendem Wasser über einen Zeitraum von mehreren Tagen bzw. Wochen, bei offenporigen Materialien ist jedoch eine kurzzeitige Belastung hinreichend.

Kapillarsättigung

Ursache einer hygroskopischen Sättigung kann eine direkte Befeuchtung bzw. auch eine langfristig extrem hohe relative Luftfeuchte ($> 95\%r.F.$) an der Bauteiloberfläche sein.

Erhöhte Materialfeuchte

Ursache für eine erhöhte Material- bzw. Ausgleichsfeuchte kann eine kurzfristige direkte Befeuchtung bzw. eine langfristig hohe relative Luftfeuchte ($< 95\%r.F.$) an der Bauteiloberfläche sein.

Der die Kategorie charakterisierende Feuchtegehalt der Baustoffe wird in Abhängigkeit vom Meßverfahren als volumenbezogene Baustofffeuchte [Angabe in V-%], als massebezogene Baustofffeuchte [Angabe in M-%] bzw. als spez. Material- oder Ausgleichsfeuchte u [Angabe in kg/m^3] angegeben.

In der nachfolgenden Tabelle sind die ermittelten Materialfeuchten einzelner Baustoffe der Bibliothek bei unterschiedlicher Feuchtebelastung zugeordnet.

Bez.	Zustand	Travertin	Ziegel	Kalkmörtel	Kalkputz	Gipsputz	Eiche
u_{max}	vollständige Sättigung	130	240	280	300	305	730
u_F	Poren-/Faser-sättigung	75	190	247	250	264	600
u_{100}	Kapillar-sättigung	11	60	13.5	100	3.5	100
u_{80}	Ausgleichsfeuchte bei 80%r.F.	3.5	18	6.5	30	1.8	30
u_{50}	Ausgleichsfeuchte bei 50% r.F.	1	5	3.5	20	1	20

Tabelle 1 – Feuchtegehalt von Baustoffen, Angaben in $[kg/m^3]$

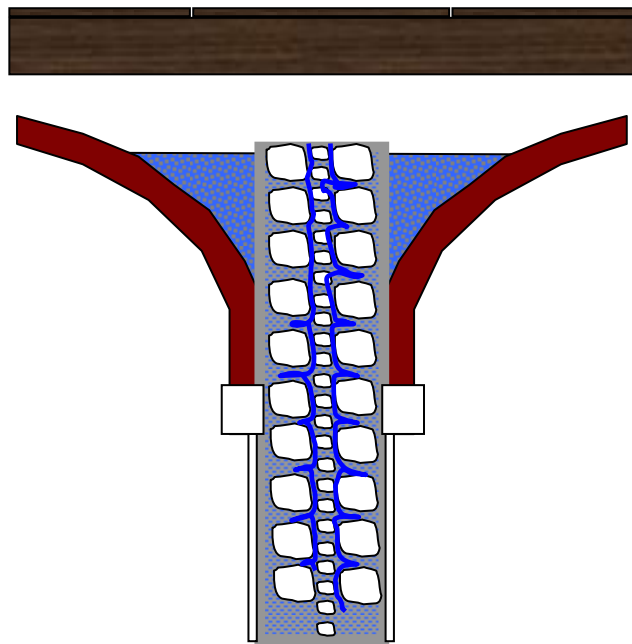
Problembeschreibung Mittelwand Erdgeschoß

Extrem war die direkt durch Löschwasser bedingte Feuchteaufnahme in den Wänden und Gewölbedecken der Renaissancesäle im Erdgeschoß.

Bereits unmittelbar nach dem Löscheinriff (ca. 24h) war an einzelnen Gewölben bzw. Pfeilervorlagen der Renaissancesäle großflächige Durchfeuchtungen der Putzschichten festzustellen.

Zu vermuten war, daß sich Löschwasser in den Gewölbetiefpunkten der Decke über EG aufgestaut hat. Dementsprechend wurden umgehend Entspannungsbohrungen gesetzt, wobei jedoch kein stehendes Wasser festgestellt wurde.

Zunächst konnte die völlige Durchfeuchtung der Konstruktionen unmittelbar nach dem Brand nicht erklärt werden kann. Nach Auswertung der Mauerwerksanalysen des EBK Weimar so-



wie dem Öffnen eines Teilbereiches konnte jedoch folgende Ursache festgestellt werden:

Während des Löschangriffs standen Teilbereiche der Holzbalkendecken über dem Gewölbe komplett unter Wasser. Durch Quellen der Ausgleichsschüttung (Sägespäne) ist das Löschwasser jedoch nur partiell in die darunterliegenden Hohlräume über dem Gewölbe eingedrungen.

Das Natursteinmauerwerk wurde durch Aufstellen von 2 Mauerwerksschalen mit relativ großformatigen und behauenen Kalk- bzw. Travertinsteinen und Verfüllen des Zwischenraumes mit kleineren Feldlesesteinen aus stark porösem Mörtel erstellt. Die Poren der Verfüllung sind durch Hohlräume und Risse im Mörtel als wasserdurchlässig zu betrachten, die Risse setzen sich in den Fugen der Mauerwerksschalen

fort.

Das in den Gewölbetiefpunkten gesammelte Löschwasser konnte damit im Bereich der nicht durch Putzschichten geschlossenen Mauerwerksflächen annähernd ohne Widerstand tief in den Mauerwerkskern eindringen und nach unten sowie nach außen zu den Putzschichten durchlaufen.

Unterhalb der Gewölbe wurde das Überschußwasser von den Putzschichten gesperrt, führte jedoch kurzfristig zu einer völligen Durchfeuchtung der dünnen Putzschichten. Die Verteilung im Mauerwerk folgte dabei dem ungeordneten Ribbild und der Schwerkraft.

Durch die Verteilung des Löschwassers über Hohlräume innerhalb der Wandkonstruktion stellten sich damit partiell extreme Feuchtegehalte ein, die im Bereich der freiwilligen Wasseraufnahme liegen.

Zielstellung für die Bautrocknung

Der Feuchtegehalt über den Gesamtquerschnitt gemittelt soll über die Bauzeit in allen durch Löschwasser belasteten Bereichen auf Werte unterhalb der Ausgleichsfeuchte von u_{80} begrenzt werden. Schwerpunkt für diese Entscheidung ist der Schutz der darüberliegenden Holzbalkendecke zum Rokokosaal.

Die Trocknung soll wenn möglich zerstörungsfrei, zumindest jedoch zerstörungswarm erfolgen. Die gipshaltigen Renaissanceputze sind dabei zu halten.

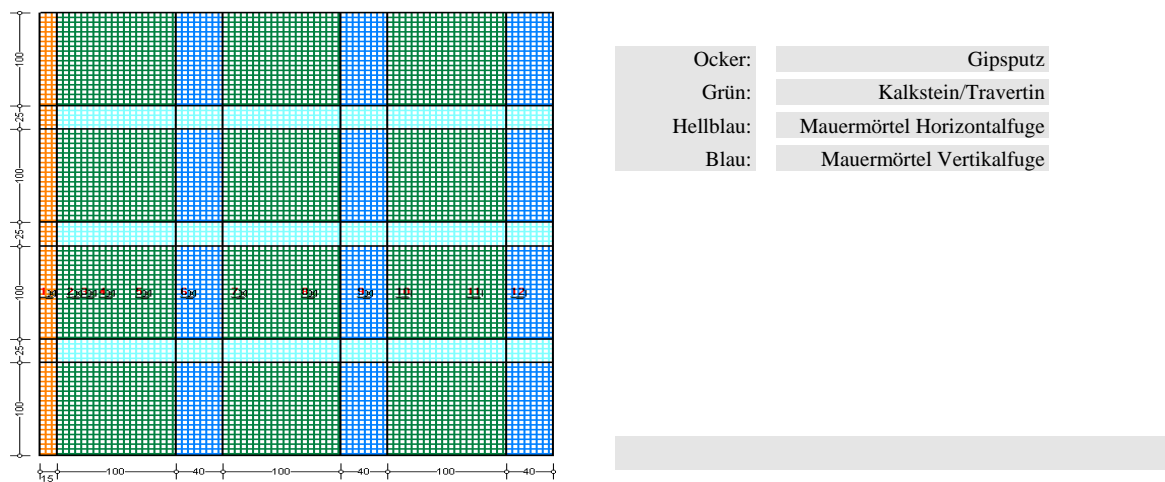
Simulationsmodell

Während das Löschwasser relativ ungehindert in das Mauerwerksgefüge eindringen und zu einer annähernd vollständigen Sättigung führen konnte, erfolgt die Austrocknung ausschließ-

lich über Kapillartransport/Diffusion an die Außenflächen und Verdunstung wesentlich langsamer.

Um den Austrocknungsvorgang bzw. den Einfluß von Maßnahmen quantifizieren zu können, mit denen die Austrocknung beschleunigt werden kann, wurden in Abhängigkeit von den Randbedingungen (Innen- bzw. Außenwand; Decke) Simulationsmodelle erstellt, mit denen der Feuchtetransport dynamisch abgebildet werden kann.

Die Wand wurde entsprechend der analysierten Mauerwerksstruktur und Materialkennwerte als 2dimensionales Modell abgebildet.



Anhand der Simulationsmodelle wurde das Austrocknungsverhalten unter folgenden Randbedingungen berechnet:

1. ohne besondere Maßnahmen
2. bei Entfernen der Putzschichten
3. bei Erhöhung der Partialdruckdifferenz (niedrige Umgebungsfeuchte bzw. Temperierung an der Oberfläche)
4. bei starker Erhöhung der Partialdruckdifferenz (Bauteiltemperierung)
5. bei extrem starker Erhöhung der Partialdruckdifferenz (Bauteilheizung)

Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Die folgenden Grafiken zeigen den Verlauf der Materialfeuchten in den einzelnen Materialien sowie über das Bauteil gemittelt (schwarz) bei unterschiedlichen Bauteiltemperaturen.

Für den Anfangszustand wurden der Mörtel- und Putzschichten als porengesättigt, der Naturstein mit einer Ausgleichsfeuchte von 50% angesetzt.

Dies entsprach den diagnostizierten Feuchtegehalten in extrem belasteten Bereichen.

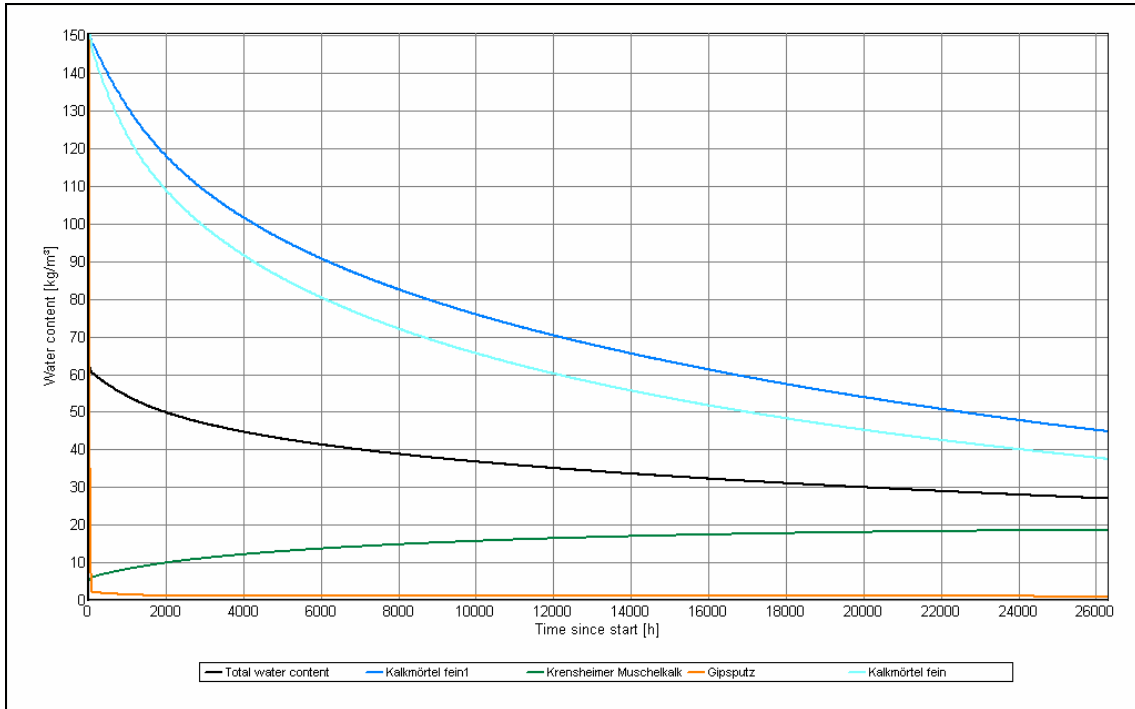


Abb.: Mittelwand Entwicklung des Wassergehaltes für eine Bauteiltemperatur von 15°C

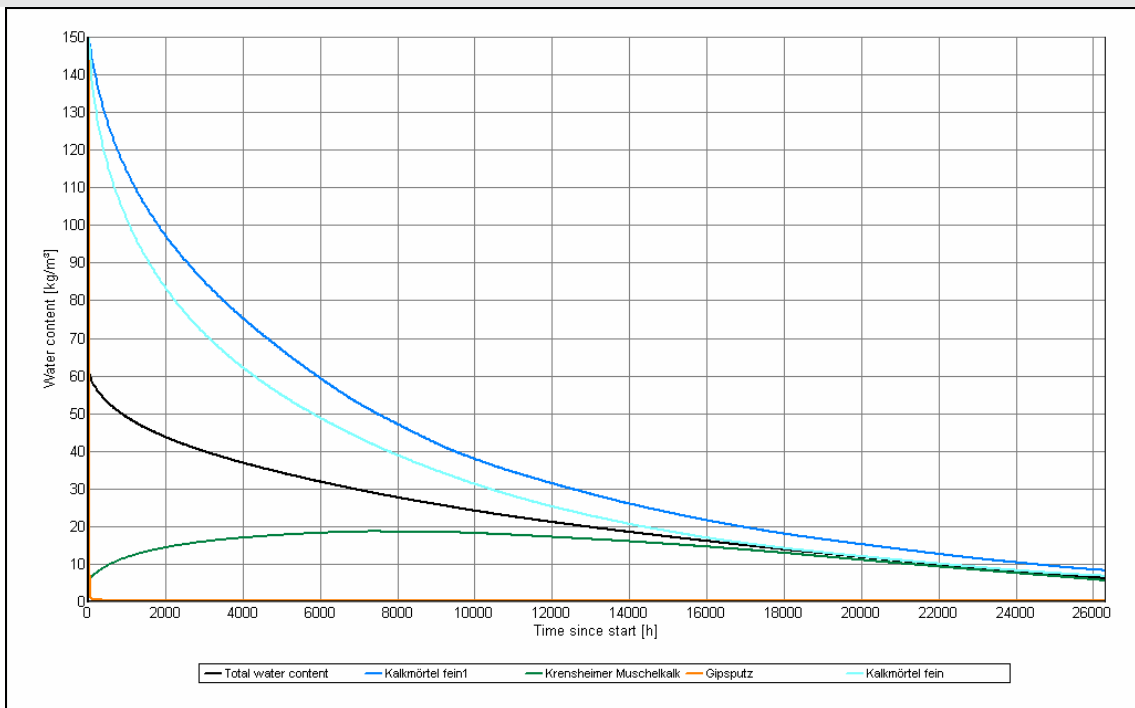


Abb. 1 Mittelwand Entwicklung des Wassergehaltes für eine Bauteiltemperatur von 36-40°C

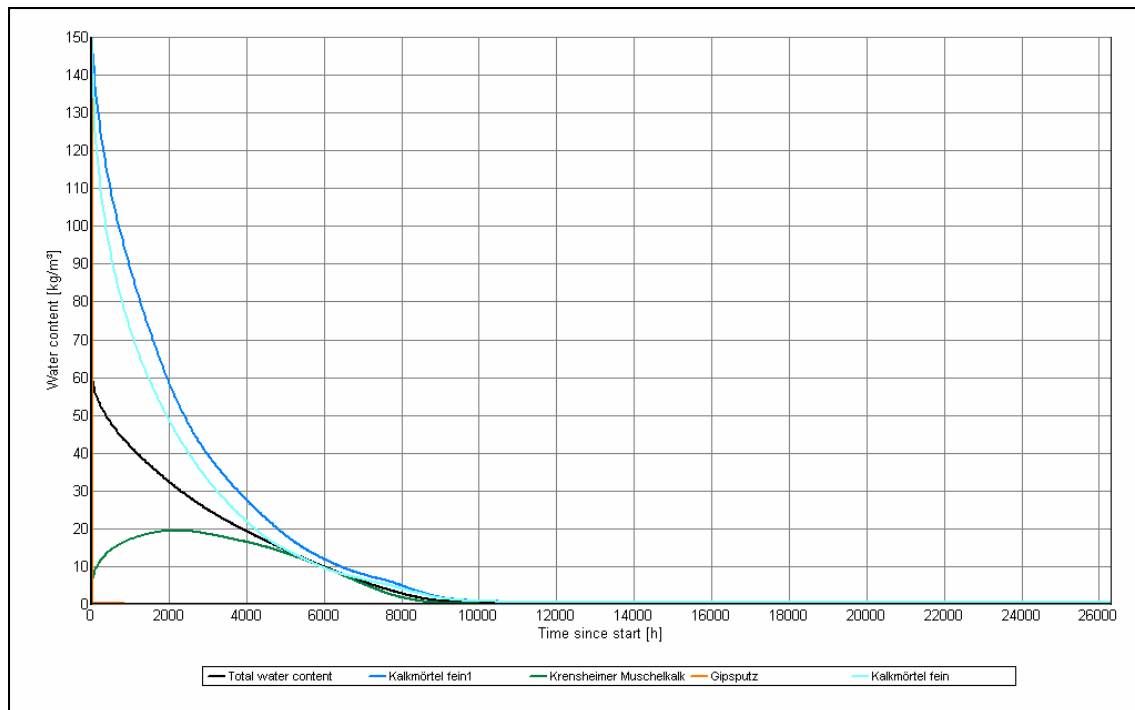


Abb.: Mittelwand Entwicklung des Wassergehaltes für eine Bauteiltemperatur von 62-70°C

Ergebnisinterpretation

Aus den Feuchteverläufen konnten u.a. folgende Grundlagen für ein Trocknungskonzept abgeleitet werden:

- Ohne weitere Maßnahmen ist bei hoher Feuchtebelastung im Mauerwerk ein Austrocknungszeitraum > 10 Jahre erforderlich.
- Das Entfernen der Putzschichten hat keinen gravierenden Einfluß auf die Austrocknungsgeschwindigkeit im Mauerwerk.
- eine Erhöhung der Bauteiltemperatur im oberflächennahen Bereich bzw. eine starke Beheizung der Räume kann den Austrocknungsvorgang für den gesamten Konstruktionsquerschnitt nur gering beschleunigen (Unterbrechung des Kapillartransportes vom Kern zur Oberfläche).
- Die Austrocknungsgeschwindigkeit kann bei Anhebung der Temperatur im Bauteilkern deutlich erhöht werden.
- Bei einem zur Verfügung stehenden Zeitraum von 12 Monaten muß die Kerntemperatur im vollständig gesättigten Mauerwerk über den gesamten Trocknungszeitraum auf min. 70°C angehoben werden.

Ausblick

Auf der Grundlage von Meß- und Simulationsergebnisse wurde für die Mittelwand eine technische Trocknungsmethode entwickelt und im Versuchsaufbau bereits getestet. Die ersten Ergebnisse der meßtechnischen Begleitung durch das EBK Weimar zeigten neben dem Trocknungserfolg auch eine hinreichende Übereinstimmung des realen Austrocknungsverhaltens mit den Simulationsergebnissen.

Das Verfahren soll zur Trocknung der extrem belasteten Natursteinmauern weiter verwendet und im Rahmen des DBU-Projektes durch weiterführende Berechnungen und die meßtechnische Begleitung optimiert werden.

Literatur

- [1] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes in Bauteilen mit einfachen Kennwerten (1994), von der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Abhandlung
- [2] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken (1995), von der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Abhandlung
- [3] Krus, M., Holm, A.: Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung, Sonderdruck aus Bauinstandsetzen 4 (1998), Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- [4] Künzel, H. M., Kießl, Kurt, Krus, M.: Feuchteemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern, Sonderdruck aus Bauinstandsetzen 1 (1995), Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- [5] WTA-Merkblatt E-6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, Entwurf 05/2001
- [6] WTA-Merkblatt 6-1-01/D: Leitfaden für hygrotechnische Simulationsberechnungen
- [7] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse