



Trocknungsverhalten von hochgedämmten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage

Masterthesis an der Technischen Universität München,
Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Lehrstuhl für Bauphysik
Studiengang: Bauingenieurwesen

Vorgelegt von

B. Sc. Benedikt Hackl

Matrikelnummer: 03610436

geboren am 17. August 1989

Elektrastraße 20

81925 München

Eingereicht am: 25.03.2015

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

Dipl. Ing. Daniel Zirkelbach, Fraunhofer IBP Holzkirchen

Dipl. Ing. Simon Schmidt, Lehrstuhl für Bauphysik, TU München

Kurzfassung

Die aktuell gültige Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) stellt erhöhte Anforderungen an Gebäude und deren Bauteile. In Erfüllung der geforderten Auflagen entwickelt die Ziegelindustrie Mauerwerksteine, die sowohl hohe Druckfestigkeit als auch eine hohe Dämmwirkung aufweisen. Als Folge werden Mauerwerksteine mit breiten Stegen produziert, um die erforderlichen Druckfestigkeit zu erreichen. Zur Verbesserung der Dämmwirkung werden die breiten Luftkammern der Mauerwerksteine mit Dämmmaterial ausgefüllt. Dabei bleibt die Ziegelmatrix aus Wärmedämmgründen grobporig und porös. Das Ergebnis ist der hochgedämmte Mauerwerkstein mit Dämmeinlage. Da dessen Trocknungsverhalten bisher noch nicht Gegenstand wissenschaftlicher Analysen war, ist es Ziel dieser Arbeit das Trocknungsverhalten von hochgedämmten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage zu untersuchen, und einen Datensatz zu entwickeln, mit dem mittels eines Computerberechnungsprogrammes das Trocknungsverhalten nachberechnet werden kann. Hierbei werden zuerst die Materialkennwerte der ausgewählten Steine im Labor ermittelt und im Anschluss die Transportkoeffizienten über ein iteratives Verfahren mit Hilfe des Computerberechnungsprogrammes WUFI (Wärme- und Feuchteberechnungen instationär) berechnet.

Mit diesem entwickelten Datensatz wird die Nachberechnung der Trocknungsversuche - mit unverputzter Oberfläche, verputzter Oberfläche und der Oberfläche mit abgeschlagenem Putz - möglich.

Im Anschluss werden Rechenexempel durchgeführt, um das Trocknungsverhalten der hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage mit dem Trocknungsverhalten bereits erprobter Mauerwerksteine zu vergleichen. Außerdem werden anhand von Berechnungen die Randbedingungen ermittelt, bei denen nach einem Wasserschaden, auf das Abschlagen der Putzoberfläche zur besseren Rücktrocknung verzichtet werden kann.

Die Auswertung der durchgeführten Berechnungen ergibt, dass sich das Trocknungsverhalten der hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage unmerklich von dem der bereits erprobten Mauerwerksteine ohne Dämmeinlage unterscheidet.

Abstract

The drying behaviour of highly insulated brick stones with an insulation insert has not been investigated until now.

Conditioned by the tight requirements of the contemporary energy saving policy (i.e. EnEV 2014), the brick stone industry has to produce brick stones with both a high compressive strength and high insulation properties. Therefore, brick stones are produced with a wide base to achieve the essential compressive strength. In order to improve the insulation effect the wide air chambers are filled with insulation material.

The aim of this thesis is to investigate the drying behaviour of highly insulated brick stones with an insulation insert and to develop a data set which makes it possible to calculate the drying process.

First of all, the properties of the material were reviewed in the laboratory. Secondly, the transport coefficients were determined by an iterative method with the computer calculation programme WUFI.

By means of the newly developed data set, the calculation of the drying behaviour of highly insulated brick stones with insulation insert, with a surface without plaster, a plastered surface and surfaces with chipped plaster, is possible.

In this connection, calculation examples have been carried out to compare the drying behaviour of highly insulated brick stones with insulation insert to the drying behaviour of already proved brick stones. Besides, a calculation was made to determine the conditions on which the chipping of the plaster after a water damage will not be necessary anymore.

The evaluation of the calculations showed that the drying behaviour of the highly insulated brick stones with an insulation insert hardly differs from the drying behaviour of the brick stones without an insulation insert.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii	
Abstract	iii	
Inhaltsverzeichnis	I	
Abbildungsverzeichnis	III	
Tabellenverzeichnis	IV	
Symbole und Einheiten	V	
1	Problemstellung	7
2	Hygrothermisches Verhalten von porösen, mineralischen Baustoffen	9
2.1	Maßgebliche Feuchtetransportvorgänge	9
2.1.1	Wasserdampfdiffusion	10
2.1.2	Oberflächendiffusion	11
2.1.3	Kapillarleitung	12
2.2	Feuchtespeicherung	13
2.2.1	Sorptionsfeuchtebereich/ Hygroskopischer Bereich	13
2.2.2	Kapillarwasserbereich/ Überhygroskopischer Bereich	14
2.2.3	Übersättigungsbereich	15
2.2.4	Feuchtespeicherfunktion	15
2.3	Besonderheiten beim Feuchtetransport über Materialgrenzen	16
2.3.1	Perfekter hygrischer Kontakt	16
2.3.2	Natürlicher hygrischer Kontakt	17
2.3.3	Schlechter hygrischer Kontakt infolge Ausbildung einer Luftschicht	17
2.4	Das Berechnungsmodell WUFI®	17
2.5	Hygrothermische Materialkennwerte für Feuchteberechnungen mit WUFI	19
2.5.1	Wasseraufnahmekoeffizient w-Wert	19
2.5.2	Feuchtespeicherfunktion	20
2.5.3	Dampfdiffusionswiderstand μ -Wert	20
2.5.4	Flüssigtransportkoeffizienten	20
2.5.5	Ermittlung des Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert (D_{ws} Saugen)	21

Inhaltsverzeichnis

2.5.6	Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung mit Hilfe von Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung	23
3	Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse	25
3.1	Untersuchte Baustoffe	25
3.2	Beschreibung der durchgeführten Versuche	26
3.2.1	w-Wert Ermittlung	27
3.2.2	Freie Wassersättigung	30
3.2.3	Trocknungsverlauf in der Klimakammer/ Trocknungsschrank	32
3.2.4	Sorptionsversuche Adsorption und Desorption	33
3.2.5	Diffusionsversuche wet-cup, dry-cup	35
3.2.6	Vergleich Diffusionsversuche am halben Stein und am Scherben	36
3.2.7	Bestimmung einer Widerstandsschicht	38
4	Rechnerische Untersuchungen und Ergebnisse	40
4.1	Iterative Ermittlung der Flüssigtransportkoeffizienten	40
4.2	Nachberechnung der Trocknungsversuche am halben Stein	42
4.2.1	Nachberechnung der Trocknungsverläufe - Serie ABC „unverputzt“	43
4.2.2	Nachberechnung der Trocknungsverläufe - Serie GHI „verputzt und abgeschlagen“	46
4.2.3	Nachberechnung der Trocknungsverläufe - Serie DEF „verputzt“	52
4.2.4	Nachberechnung der Versuche im Klimaschrank bei 40 °C und 65 % r.F.	55
4.2.5	Vergleich der Trocknungsverläufe hochgedämmter Mauerwerksteine mit Dämmeinlage und bereits untersuchten Mauerwerksteinen	58
5	Ansatz zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	63
5.1	Iterative Ermittlung von Randbedingungen	63
6	Auswertung der Untersuchungen und Diskussion der Ergebnisse	67
7	Ausblick	71
8	Literaturverzeichnis	72
Anhang		75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Feuchtetransport in Abhängigkeit vom Aggregatzustand [Krus, Kießl 1995].....	9
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Feuchtespeicherung mit Hysterese zwischen Desorption und Adsorption [Kießl 1995].....	16
Abbildung 3: Darstellung von Gleichung 8 zur graphischen Bestimmung von D_w	22
Abbildung 4: Thermoplan MZ7	
Abbildung 5: Poroton T8 Perlit	
Abbildung 6: Poroton T8 Mineralwolle.....	25
Abbildung 7: Beispiel einer Prüfeinrichtung zur Bestimmung der freien Wasseraufnahme (DIN EN 12087:06).....	31
Abbildung 8: Ad- und Desorption (E DIN EN ISO).....	34
Abbildung 9: Querschnitt Poroton Perlit.....	37
Abbildung 10: Nachberechnung der Serie A Thermoplan MZ7 verputzt.....	44
Abbildung 11: Nachberechnung Serie B Poroton T8 Perlit unverputzt.....	44
Abbildung 12: Nachberechnung Serie C Poroton T8 MW unverputzt.....	45
Abbildung 13: Nachberechnung der Serie G Thermoplan MZ7 mit angepasstem Datensatz.....	47
Abbildung 14: Nachberechnung der Serie H Poroton T8 Perlit mit angepasstem Datensatz.....	48
Abbildung 15: Nachberechnung der Serie I Poroton T8 MW mit angepasstem Datensatz.....	48
Abbildung 16: Nachberechnung Serie G Thermoplan MZ7 verputzt und abgeschlagen.....	50
Abbildung 17: Nachberechnung Serie H Poroton T8 Perlit verputzt und abgeschlagen.....	50
Abbildung 18: Nachberechnung Serie I Poroton T8 MW verputzt und abgeschlagen.....	51
Abbildung 19: Nachberechnung Serie D Thermoplan MZ7 verputzt.....	54
Abbildung 20: Nachberechnung Serie E Poroton T8 Perlit verputzt.....	54
Abbildung 21: Nachberechnung 40 °C Serie A Thermoplan MZ7 unverputzt.....	56
Abbildung 22: Nachberechnung 40 °C Serie B Poroton T8 Perlit unverputzt.....	57
Abbildung 23: Nachberechnung 40 °C Serie C Poroton T8 Mineralwolle unverputzt.....	57
Abbildung 24: Vergleich des Trocknungsverhaltens der untersuchten Steine mit herkömmlichen Steine.....	60
Abbildung 25: Vergleich unterschiedlicher Steinarten bis zur Unterschreitung von 70 % r.F. an der Oberfläche.....	62
Abbildung 26: Vergleich Trocknungsverlauf Verputz mit abgeschlagenen Putz für Poroton T8 Perlit.....	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezeichnung der Probekörper.....	27
Tabelle 2: Übersicht der ermittelten Transportkoeffizienten für die Steine ABC.....	43
Tabelle 3: Übersicht der ermittelten Transportkoeffizienten zur genauen Nachberechnung der Serie GHI	47
Tabelle 4: Übersicht der ermittelten Transportkoeffizienten für die Steine GHI.....	49
Tabelle 5: Übersicht der verwendeten Eingangsgrößen für die Nachberechnung der Steine DEF.....	53
Tabelle 6: Darstellung der Bezugsfeuchtegehalte und der verglichenen Baustoffe	61
Tabelle 7: Datensatz Serie E Poroton Perlit.....	64

Symbole und Einheiten

T	[°K]	absolute Temperatur
b	[-]	Approximationsfaktor
P_0	[hPa]	atmosphärischer Druck bei Standardbedingungen von 1013.25 [hPa]
D_D	[m ² /s]	Dampfdiffusionskoeffizient in Luft
\dot{m}	[kg/m ² s]	Dampfdiffusionsstromdichte
ρ_w	[kg/m ³]	Dichte von Wasser
s	[m]	Dicke des Probekörpers
$\frac{\partial w}{\partial \varphi}$	[kg/m ³]	Feuchtespeicherfähigkeit des Baustoffs
A	[m ²]	Fläche der Probe
D_φ	[kg/ms]	Flüssigkeitskoeffizient des Baustoffs
m_{Fl}	[kg/m ² ·s]	Flüssigstromdichte
D_w	[m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient
u_f	[kg/m ³]	Freie Wassersättigung
R_D	[J/kg·K]	Gaskonstante für Wasserdampf
p_k	[bar]	Kapillardruck
D_{ws}	[m ² /s]	Kapillartransportkoeffizient bei freier Wassersättigung
D_{w0}	[m ² /s]	Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsfeuchtebereich
K	[-]	Korrekturfaktor abhängig vom Verhältnis D_{ws}/D_{w0}
s_a	[m]	Mittlere Schichtdicke der Luftschicht zwischen Probekörper und Sorbens
p_0	[bar]	Normdruck
$\Delta m'_0$		Prüfdauer (im Allgemeinen ein Tag), in Sekunden
φ	[-]	Relative Luftfeuchte
ϑ	[°C]	Temperatur
p_L	[bar]	Umgebungsluftdruck
h_v	[J/kg]	Verdunstungsenthalpie des Wassers
w	[kg/m ² √h]	Wasseraufnahmebereich

δ	[kg/m·s·Pa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
j	[kg/h]	Wasserdampfdiffusionsstrom
μ	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
p	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck
p_1	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck an der Probenoberseite
p_2	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck an der Probenunterseite
δ_p	[kg/msPa]	Wasserdampfpermeabilität des Baustoffs
p_a	[kg/m ⁻¹ h ⁻¹ Pa ⁻¹]	Wasserdampfpermeabilität von Luft
p_{sat}	[Pa]	Wasserdampfsättigungsdruck
u	[kg/m ³]	Wassergehalt
u_f	[kg/m ³]	Wassergehalt bei freier Sättigung
u_{80}	[kg/m ³]	Wassergehalt bei 80% relativer Feuchte
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs
$\frac{\partial H}{\partial \vartheta}$	[J/m ³ K]	Wärmespeicherfähigkeit des feuchten Baustoffes
$\Delta m'_{tf}$		Wert von Δm auf der Gerade zur Zeit t_f

1 Problemstellung

Im Hinblick auf die Häufung von Leitungswasserschäden und Wasserschäden durch Elementarereignisse an Gebäuden gewinnt die Untersuchung und Optimierung von Trocknungsmöglichkeiten in Abhängigkeit der zu trocknenden Mauerwerksteine und der möglichen verwendbaren Trocknungsapparaturen immer mehr an Bedeutung. Auch die Berücksichtigung der Schimmelpilzbildung nach Feuchteschäden ist dabei ein wichtiger Aspekt [Hensberger et al. 2014].

Bedingt durch die strengen Anforderungen der heutigen Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) ist die Verwendung von Bauteilen mit dicker Wärmedämmschicht nötig, um die gesetzlichen Mindestanforderungen zu erreichen. Diese müssen sogar noch übertroffen werden, um die Voraussetzungen besonderer staatlicher Förderprogramme zu erfüllen. Deshalb werden neben herkömmlichen Mauerwerksteinen in Kombination mit einem Wärmedämmverbundsystem auch hochgedämmte Mauerwerksteine mit Dämmeinlage verwendet.

Hochgedämmte Mauerwerksteine ohne Dämmeinlage erhalten ihre Dämmwirkung durch den Einschluss vieler Luftkammern. Dadurch wird die Konvektionsströmung gering gehalten und die Wärmedämmwirkung verbessert. Allerdings verringert sich bei dieser Konstruktion die Tragfähigkeit der Steine. Daher werden von der Ziegelindustrie hochgedämmte Mauerwerksteine entwickelt, die sowohl Tragfähigkeit als auch Wärmedämmung miteinander vereinen. Diese sind in ihren Hohlräumen mit Dämmstoffen gefüllt. Durch das Einbringen der Dämmstoffe in die Steinkammern kann auf die herkömmliche, filigrane Konstruktion mit Luftkammern verzichtet werden. Als Füllmaterial wird beispielsweise Mineralwolle oder Perlit verwendet. Die Stege der Mauerwerksteine sind ca. 2 cm breit und werden damit auch statischen Anforderungen gerecht. Die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit liegt bei ca. 1,8 MN/m².

Bei porösen mineralischen Baustoffen mit monolithischer Matrix funktioniert der Feuchte-transport gut - sowohl für die Aufnahme von Feuchte bei Kontakt mit Wasser als auch für die Trocknung von Feuchte bei geeigneten klimatischen Randbedingungen. Ein kritischer Fall in der Praxis ist das Binden von Feuchte in der Dämmeinlage einer hochgedämmten Mauerwerkskonstruktion bei Wasserschäden.

Beim Rücktrocknen muss das Wasser die zur Dämmung benötigten Luftporen, sowie die eingeschlossene Dämmung „umwandern“. Die hierzu benötigten Wege sind daher länger als bei herkömmlichen Mauerwerksteinen. Außerdem muss die gespeicherte Feuchte der Dämmmaterialien in den Zwischenräumen ausgetrocknet werden.

Die eventuell verringerte Trocknungsgeschwindigkeit hätte zur Folge, dass der Trocknungsprozess auch teurer werden würde (Versicherungen müssten somit möglicherweise ihre Versicherungsprämien für Leitungswasserschäden und Elementarschäden anpassen). Das Austrocknungsverhalten exemplarisch ausgesuchter hochgedämmter Mauerwerksteine mit Dämmeinlage wird im Folgenden untersucht und mit bereits erprobten Steinen wie Porenbeton, Bimsbeton, Blähton und porosierten Hochlochziegeln ohne Dämmeinlage verglichen.

Zur Untersuchung werden hochgedämmte Mauerwerksteine mit Dämmeinlage der Firma Wienerberger „T8 Poroton Perlit“ und „T8 Poroton Mineralwolle“ sowie der Stein „Thermoplan MZ7“ von der Ziegelei Süd-West herangezogen. Dabei werden zuerst die erforderlichen Materialkennwerte durch Versuche im Labor bestimmt und im Anschluss Trocknungsversuche am halben Stein durchgeführt. Die gemessenen Ergebnisse dienen zum einen als Eingangsdaten für die computergestützte Nachberechnung und zum anderen als Vergleich zur Validierung der Berechnungen. Ziel der Arbeit ist es, dass alle durchgeführten Trocknungsversuche mit Hilfe des Computerprogrammes WUFI (Wärme- und Feuchteberechnungen instationär) nachberechnet werden können. Somit soll eine Vorhersage des Trocknungsverlaufes von hochgedämmten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage möglich werden.

2 Hygrothermisches Verhalten von porösen, mineralischen Baustoffen

2.1 Maßgebliche Feuchtetransportvorgänge

Der Feuchtetransport kann nach Abbildung 1 flüssig, gasförmig oder molekular erfolgen. In dieser Arbeit wird der Feuchtetransport von hochgedämmten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage untersucht. Laut [Krus 1995] und [Kießl 1995] treten in den verwendeten porösen, mineralischen Baustoffen nur drei maßgebliche Transportvorgänge auf. Dies sind die Wasserdampfdiffusion, die Oberflächendiffusion und die Kapillarleitung.

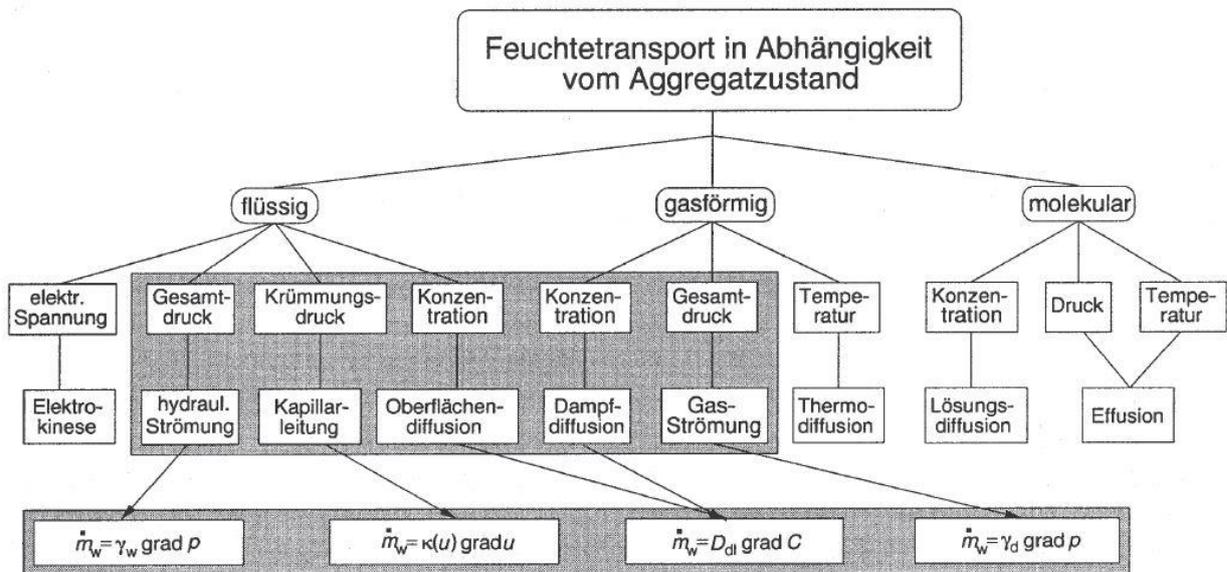


Abbildung 1: Feuchtetransport in Abhängigkeit vom Aggregatzustand [Krus, Kießl 1995]

2.1.1 Wasserdampfdiffusion

Aufgrund des Partialdampfdruckgefälles kann der Feuchtetransport sowohl in Form von Wasserdampfdiffusion als auch in Form von Effusion stattfinden. Als Wasserdampfdiffusion bezeichnet man den Transport von Wasserdampf entlang des Partialdampfdruckgefälles. Der als Wasserdampfdiffusion bezeichnete Gastransport findet bei größeren Porendurchmessern als der freien Weglänge statt. Der Transportvorgang wird hier durch Stöße der Wassermoleküle untereinander bestimmt. Effusion liegt vor, wenn die mittlere freie Weglänge (ca. 10^{-8} m) größer als der Porenraumdurchmesser ist. Effusion findet somit nur im Mikroporenbereich statt. Der Transportvorgang wird durch die Stöße der Wassermoleküle gegen die Porenwand bestimmt. Der Bereich zwischen der reinen Effusion und der reinen Diffusion wird als Übergangsbereich bezeichnet. Hier kommen beide Transportmechanismen vor [Krus 1995]. Bei porösen, mineralischen Baustoffen ist ein breites Porenraumspektrum vorhanden. Eine genaue Unterscheidung zwischen reiner Diffusion und reiner Effusion ist nicht möglich, nach [Künzel 1994] auch nicht notwendig, da das Zusammenwirken von Effusion und Diffusion in einer für den jeweiligen Baustoff charakteristischen Diffusionswiderstandszahl berücksichtigt wird. Im bauphysikalischen Gebrauch wird der Transport aus Diffusion und Effusion nach [Hauser 2006] ausreichend genau mit folgendem Ansatz bestimmt:

$$\dot{m} = \frac{-D_D}{\mu \cdot R_D \cdot T} \cdot \nabla p = -\frac{\delta}{\mu} \cdot \nabla p \quad \text{Gleichung 1}$$

Dabei ist:

\dot{m}	[kg/m ² s]	Dampfdiffusionsstromdichte
D_D	[m ² /s]	Dampfdiffusionskoeffizient in Luft
R_D	[J/kg·K]	Gaskonstante für Wasserdampf
p	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck
μ	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
δ	[kg/m·s·Pa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft

Der Dampfdiffusionskoeffizient in Luft ist stark temperaturabhängig und wird näherungsweise mit folgender Formel bestimmt.

$$D_D = 2.3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{p_0}{p_L} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit:

p_0	[bar]	Normdruck
p_L	[bar]	Umgebungsluftdruck

Gleichung 1 beschreibt den Transport von Wasserdampf entlang des Partialdruckgefälles. Hier findet eine Wasserdampfwanderung zwischen Bereichen unterschiedlicher Luftfeuchte statt. Die Geschwindigkeit hängt dabei von Temperatur, Luftdruck und relativer Feuchte ab.

2.1.2 Oberflächendiffusion

Während des Sorptionsvorganges bildet sich durch die Anlagerung von Wassermolekülen an den Porenwänden ein sogenannter Sorbatfilm [Künzel 1994]. Die Dicke des Sorbatfilms nimmt bei steigender relativer Luftfeuchtigkeit zu. Bei Bestehen eines Gradienten in der relativen Luftfeuchte tritt ein Feuchtetransport an der Porenwand auf. Dieser bewegt sich in Richtung des dünner werdenden Sorbatfilms, also in Richtung niedriger relativer Luftfeuchte [Klopfer 1974]. Bei porösen mineralischen Baustoffen ist der Feuchtetransport durch Oberflächendiffusion bei relativen Luftfeuchten von über 50 % von Bedeutung [Roos, Niesel, Hoffmann 1988]. Die Oberflächendiffusion ist um ein Vielfaches leistungsfähiger als die reine Dampfdiffusion. Die Transportintensität nimmt bei steigender Temperatur zu [Chang, Hutcheon 1956].

2.1.3 Kapillarleitung

Poröse mineralische Baustoffe weisen eine äußerst schwer zu ermittelnde Hohlraumstruktur auf. Dies liegt an den Querschnittsänderungen sowie an den Verbindungen der Transportkanäle, welche sich durch einfache Modelle nicht mehr abbilden lassen. Unter anderen erläutern [Schubert 1982] und [Bakker 1926] die Ursachen und Gesetzmäßigkeiten der Kapillarleitung. Die Voraussetzung für den Flüssigkeitstransport durch Kapillarleitung ist eine vollständig mit Wasser gefüllte Pore. Speziell bei porösen, mineralischen Baustoffen, wie den in dieser Arbeit untersuchten hochgedämmten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage, kann eine vollständige Porensättigung entweder durch Adsorption bei einem Sorptionsfeuchtegehalt ab 97 % r.F. oder durch den direkten Kontakt mit Wasser eintreten. Die Flüssigkeit beim Kapillartransport wird durch kapillare Zugkräfte beschleunigt, bis ein Gleichgewicht zwischen dem kapillaren Zug und dem Strömungswiderstand vorliegt. In einer Zylinderkapillare ist die Zugkraft proportional zum Kehrwert des Radius, und der Strömungswiderstand ist proportional zum Kehrwert des Radius im Quadrat. Somit funktioniert der Flüssigtransport in größeren Kapillaren trotz niedrigerer Zugkraft besser [Krus 1995]. Den Flüssigtransport beschreiben [Kießl 1995] und [Künzel 1994] mit dem Diffusionsansatz:

$$m_{Fl} = -D_w(u) \cdot \nabla w \frac{dw}{dx} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit:

m_{Fl}	[kg/m ² ·s]	Flüssigstromdichte
D_w	[m ² /s]	Flüssigtransportkoeffizient
u	[kg/m ³]	Wassergehalt

2.2 Feuchtespeicherung

Der Wassergehalt während der Feuchtespeicherung lässt sich bei porösen mineralischen Baustoffen in drei Bereiche einteilen:

- Sorptionsfeuchtebereich/ Hygroskopischer Bereich
- Kapillarwasserbereich/ Überhygroskopischer Bereich
- Übersättigungsbereich

Im Folgenden werden diese Bereiche einzeln beschrieben.

2.2.1 Sorptionsfeuchtebereich/ Hygroskopischer Bereich

Unter dem Sorptionsfeuchtebereich, auch hygroskopischer Bereich genannt, wird die Anlagerung von Wasser aus der Umgebungsluft bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes verstanden. Bei konstanter Temperatur gibt die Sorptionsisotherme einen Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und der Menge des angelagerten Wassers an. Die Sorptionsisotherme weist für poröse Baustoffe einen typischen S-förmigen Verlauf auf (Abbildung 2). Vergleicht man das Gleichgewichtsfeuchteniveau der Feuchtaufnahme (Adsorption) mit dem der Rücktrocknung (Desorption), so ist ein Hystereseeffekt erkennbar. Dieser Effekt wird durch die unterschiedlichen Benetzungseigenschaften bzw. die Porenraumgeometrie hervorgerufen. Messungen nach [Künzel 1994] zeigen, dass der Hystereseeffekt für die meisten Baustoffe sehr gering - und somit meist wenig relevant - ist. Zur Charakterisierung des Sorptionsfeuchtebereiches ist die Adsorptionsisotherme somit meist ausreichend. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, wird der Bereich bei niedriger relativer Feuchte bis zu 15 % als monomolekulare Belegung der Feststoffoberfläche bezeichnet. Diese geht dann über in die multimolekulare Belegung, welche bei ca. 50 % r.F. erreicht wird. Unter der monomolekularen Schicht wird eine Wasseroberfläche an der Innenseite der Poren verstanden, welche die Schichtdicke eines einzelnen Wassermoleküls aufweist. Im multimolekularen Bereich wird diese Schicht dicker und bildet eine Schicht aus mehreren übereinander liegenden Wassermolekülen. Ab einer relativen Feuchte von ca. 75 % beginnt die Kapillarkondensation. Der Wassergehalt steigt progressiv an. Dabei treten durch Kondensation im Mikroporenbereich ($1 \cdot 10^{-9}$ m bis $1 \cdot 10^{-7}$ m) kleine Wasserflächen auf. Die Ränder dieser Flächen sind konkav gekrümmt und weisen nach dem Kelvin-Thomson Gesetz eine Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes auf [Krus 1995]. Bei der Sorptionsisotherme von Ziegelsteinen, wie sie im Rahmen dieser Ar-

beit untersucht werden, ist ein deutlicher Anstieg in der Sorptionsisotherme erst ab dem Kapillarwasserbereich bei einer relativen Feuchte von 95 % sichtbar.

2.2.2 Kapillarwasserbereich/ Überhygroskopischer Bereich

Nach dem Bereich der Kapillarkondensation, welcher zwischen ca. 60 % r.F. und 95 % r.F. herrscht, beginnt der Kapillarwasserbereich. Dieser zeichnet sich durch einen deutlichen Anstieg der Sorptionsisotherme ab ca. 95 % r.F. aus. Ab diesem Feuchtegehalt ist kein Messverfahren bekannt, welches die Luftfeuchte mit hoher Genauigkeit messen könnte. In diesem Bereich wird Wasser von kapillarporösen, hygroskopischen Materialien bis zum Erreichen der freien Wassersättigung aufgesaugt. Mit freier Wassersättigung ist diejenige Stofffeuchte deklariert, welche sich durch freies Saugen, ohne Einwirkung von äußeren Kräften, unter Normaldruck einstellt. Die freie Wassersättigung liegt immer unterhalb der maximal aufnehmbaren Wassermenge durch den offenen Porenraum. Dies liegt am Vorhandensein eingeschlossener Luftblasen. Die freie Wassersättigung stellt einen wichtigen Kennwert bei Bauprodukten dar. Der Kapillardruck wird mit Hilfe der Kelvin-Beziehung bestimmt [Krus 1995].

$$\varphi = \exp\left[\frac{-p_k}{\rho_w \cdot R_D \cdot T}\right] \quad \text{Gleichung 4}$$

mit:

φ	[-]	Relative Luftfeuchte
p_k	[bar]	Kapillardruck
ρ_w	[kg/m ³]	Dichte von Wasser
R_D	[J/kg·K]	Gaskonstante für Wasserdampf

Gleichung 4 beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt eines kapillarporösen Materials und dessen Kapillardruck.

2.2.3 Übersättigungsbereich

Mit dem Übersättigungsbereich wird das Füllen der Poren beschrieben, welche durch freie Wassersättigung, siehe Kapitel 2.2.2, noch nicht gefüllt sind. Um die freie Wassersättigung zu überschreiten, ist entweder ein äußerer Druck oder eine lange Wasserlagerung nötig, bei der sich die Luftporen mit der Zeit im Wasser lösen. Da unter natürlichen bauphysikalischen Bedingungen eine Wasseraufnahme über die freie Wassersättigung hinaus selbstständig selten auftritt, wird der Übersättigungsbereich bei bauphysikalischen Berechnungen oft nicht beachtet [Krus 1995]. Die WUFI-Software ist heute in der Lage, diesen in Berechnungen zu berücksichtigen.

2.2.4 Feuchtespeicherfunktion

Der Wassergehalt in Baustoffen in Abhängigkeit von der relativen Feuchte wird insgesamt als Feuchtespeicherfunktion bezeichnet. Die Feuchtespeicherfunktion setzt sich somit aus den zuvor genannten drei Bereichen, Sorptionsfeuchtebereich, Kapillarwasserbereich sowie Übersättigungsbereich, zusammen (Abbildung 2). Im Labor ist es mit Hilfe von Klimakammern möglich, die Sorptionsisotherme von 50 % r.F. bis zu einer relativen Luftfeuchte von 97 % r.F. zu bestimmen. Für die meisten Baustoffe genügt dieser Feuchtebereich, um eine ausreichend genaue Feuchtespeicherfunktion zu erstellen. Der Bereich zwischen 97 % r.F. und 100 % r.F. kann entweder approximiert oder durch eine Saugspannungsmessung ermittelt werden. Bei grobporigen Materialien, speziell bei Mauerwerksteinen aus Ziegel, beginnt eine nennenswerte Feuchteaufnahme erst ab ca. 80 % relativer Luftfeuchte. Der Bereich zwischen 97 % r.F. und 100 % r.F. ist in Klimakammern nicht herzustellen, da der Feuchtebereich nicht mit ausreichender Genauigkeit eingestellt werden kann. Grobporige Materialien erfahren jedoch in diesem Feuchtebereich einen drastischen Anstieg in der Sorptionsisotherme. Deshalb kann hier die Saugspannungsmethode von [Krus 1995] angewendet werden. Diese wurde speziell zur Ermittlung des Wassergehaltes bei hohen relativen Luftfeuchten entwickelt.

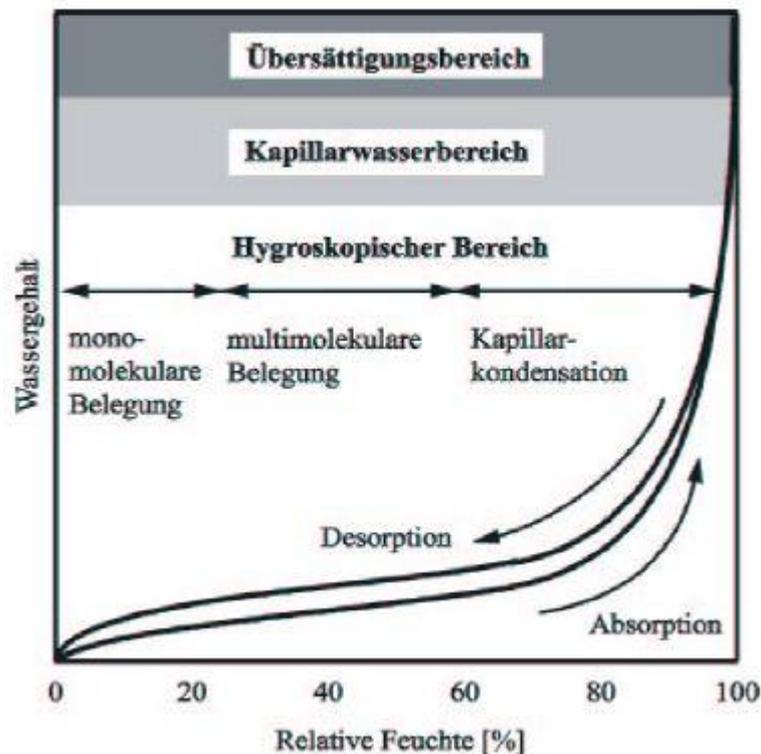


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Feuchtespeicherung mit Hysterese zwischen Desorption und Adsorption [Kießl 1995]

2.3 Besonderheiten beim Feuchtetransport über Materialgrenzen

Nach [Holm 1996] können beim Feuchtetransport über Materialgrenzen drei Kontaktmöglichkeiten unterschieden werden: Der perfekte hygrische Kontakt, der natürliche hygrische Kontakt sowie der schlechte hygrische Kontakt. Im Folgenden werden diese Kontaktmöglichkeiten beschrieben.

2.3.1 Perfekter hygrischer Kontakt

In der Praxis ist ein perfekter hygrischer Kontakt nicht möglich. Die kapillaren Zugkräfte dürften dabei nicht unterbrochen werden. Dies würde voraussetzen, dass die Kapillarleitungen zweier Materialien die gleichen Transporteigenschaften aufweisen. Die Porenstrukturen der beiden Kontaktflächen müssten dabei ideal miteinander verbunden sein. Dies tritt in der Praxis kaum auf [Zirkelbach 2001].

2.3.2 Natürlicher hygrischer Kontakt

Diese Kontaktvariante ist in der Realität am häufigsten vorzufinden. Die Kontaktflächen zweier Materialien liegen zwar ideal aneinander an, allerdings gibt es Unterschiede hinsichtlich der Porenstrukturen an den Kontaktflächen. Da die beiden aneinandergefügten Materialien keine identischen Transporteigenschaften aufweisen, ist die Kapillarleitung teilweise unterbrochen oder zumindest gehemmt. [Holm 1996] hat durch Untersuchungen festgestellt, dass speziell beim Aufbringen von Putz auf Mauerwerk unter Umständen ein starkes „Verstopfen“ der Poren stattfindet. Dies geschieht, indem beim Aushärten der Putzschicht die kristallisierenden Bestandteile in die Poren der Grenzschicht wandern. Diese Verdichtung der Poren durch den Putz bezeichnet er als „Widerstandsschicht“. Laut [Holm 1996] ist diese Schicht in der Lage, die Transportkoeffizienten bis zu einem Faktor von 2000 zu verringern. Eine solche Widerstandsschicht tritt nicht bei allen Putzen gleichmäßig auf. Beispielsweise existiert laut [Bednar 2000] keine Widerstandsschicht beim Aufbringen von reinen Gipsputzen auf Ziegelsteinen.

2.3.3 Schlechter hygrischer Kontakt infolge Ausbildung einer Luftschicht

Falls die Kontaktflächen keinen direkten Kontakt aufweisen, sondern z.B. durch eine Luftschicht getrennt sind, wird der komplette Flüssigtransport über die Kapillarleitung unterbrochen. Eine Weiterverteilung der Feuchte ist dann nur durch Diffusion möglich. Dieses Phänomen kann beispielsweise bei Bauschäden, welche auf Frostschäden oder Setzungsrisse zurückzuführen sind, entstehen.

2.4 Das Berechnungsmodell WUFI®

Die Abkürzung WUFI [Künzel 1994] steht für „Wärme- und Feuchtetransport Instationär“. Das Programm ist in der Lage, das hygrothermische Verhalten von Bauteilen in Abhängigkeit von klimatischen Randbedingungen zu simulieren. WUFI wird stets - gemäß aktuellen Forschungsergebnissen - validiert. Die Software wird hauptsächlich für Berechnungen an Bauteilen/ Konstruktionen bezüglich Austrocknungsverhalten, Tauwasserbildung und Niederschlagseinwirkungen angewendet. Das Programm bezieht sich vorwiegend auf gekoppelte Differenzialgleichungen des Wärme- und Feuchtetransportes. Der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport wird mit folgenden Bilanzgleichungen gelöst:

Wärmebilanz:

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla \vartheta) + h_v \cdot \nabla(\delta_p \cdot \Delta(\varphi \cdot p_s)) \quad \text{Gleichung 5}$$

Feuchtebilanz:

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla(D_\varphi \nabla \varphi + \delta_p \nabla(\varphi p_{sat})) \quad \text{Gleichung 6}$$

mit:

$\frac{\partial H}{\partial \vartheta}$	[J/m ³ K]	Wärmespeicherfähigkeit des feuchten Baustoffes
$\frac{\partial w}{\partial \varphi}$	[kg/m ³]	Feuchtespeicherfähigkeit des Baustoffs
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs
D_φ	[kg/ms]	Flüssigkeitskoeffizient des Baustoffs
δ_p	[kg/msPa]	Wasserdampfpermeabilität des Baustoffs
h_v	[J/kg]	Verdunstungsenthalpie des Wassers
p_{sat}	[Pa]	Wasserdampfsättigungsdruck
ϑ	[°C]	Temperatur
φ	[-]	relative Feuchte

Der Berechnungsalgorithmus bezieht sich sowohl für Wärme, als auch für Feuchte auf den Erhaltungssatz. Somit beschreibt der linke Teil der Gleichungen die Wärmeenthalpie bzw. die Feuchtespeicherung. Auf der rechten Seite der Gleichungen wird der Transportvorgang beschrieben. Die Änderung der Enthalpie bzw. der Feuchtemenge wird bestimmt durch die unterschiedlichen Wärme- und Feuchteströme. Zur Lösung der Gleichung wird das Finite-Volumen-Verfahren verwendet. Die Genauigkeit der Rechenergebnisse hängt von der Anzahl der gewählten Gitterelemente, sowie der gewählten Zeitschritte ab. Ein Finite-Elemente-Verfahren eignet sich nicht für den komplexen gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport [Künzel 1994].

2.5 Hygrothermische Materialkennwerte für Feuchteberechnungen mit WUFI

Die Materialdatenbank der WUFI-Software ist bereits mit Daten einer großen Anzahl von Baumaterialien gefüllt. Auf diese Informationen kann man bei der Zusammenstellung von Konstruktionen zurückgreifen. Es ist jedoch auch möglich neue Baustoffe in die Datenbank aufzunehmen. Hierzu sind die, in folgenden Kapiteln beschriebenen, bauphysikalischen Kennwerte erforderlich. WUFI bietet vereinfachend auch Approximationen von Feuchtespeicherfunktionen und Transportkoeffizienten zum Flüssigtransport an. Zur Berechnung sind folgende Eingangsgrößen nötig:

- w-Wert Wasseraufnahmekoeffizient
- Feuchtespeicherfunktion
- μ -Wert Wasserdampfdiffusionswiderstand
- ρ Rohdichte
- Bezugsfeuchtegehalt
- Sättigungswassergehalt
- Flüssigtransportkoeffizienten
- λ -Wert Wärmeleitfähigkeit

Es ist teilweise möglich, über Produktdatenblätter der Baustoffe den Wasseraufnahmekoeffizient, die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und die Rohdichte zu erhalten. Die weiteren Kenngrößen müssen meist im Labor ermittelt werden. Das Ergebnis jeder Simulation kann jedoch nur so gut sein wie deren Eingabedaten, in diesem Fall also wie die hygrothermischen Materialkennwerte der verwendeten Baustoffe. Je exakter die Materialdaten bekannt sind, umso genauer lassen sich die Feuchteverteilungen im Bauwerk berechnen und darstellen.

2.5.1 Wasseraufnahmekoeffizient w-Wert

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die Feuchteaufnahme eines Materials über dessen Benetzungsfläche. Bei Materialien mit konstant bleibender Porenstruktur erfolgt die Wasseraufnahme in der Regel linear über der Wurzel der Zeit.

2.5.2 Feuchtespeicherfunktion

Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt den Wassergehalt eines Baustoffes im Gleichgewicht mit den jeweiligen Randbedingungen. Bei der Bestimmung der Speichereigenschaften muss zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich und dem Kapillarwasserbereich unterschieden werden.

[Künzel 1994] beschreibt die Approximation der Feuchtespeicherfunktion wie folgt:

$$u = u_f \cdot \frac{(b-1) \cdot \varphi}{b - \varphi} \quad \text{Gleichung 7}$$

mit:

u	[kg/m ³]	Wassergehalt bei φ
u_f	[kg/m ³]	Freie Wassersättigung
b	[-]	Approximationsfaktor
φ	[-]	Relative Luftfeuchte

Die Approximation der Feuchtespeicherfunktion eignet sich besonders für poröse mineralische Baustoffe, da diese, wie auch der hier untersuchte Mauerwerkstein aus Ziegel, eine deutliche Feuchteaufnahme erst ab 97 % r.F. erfahren.

2.5.3 Dampfdiffusionswiderstand μ -Wert

Die Diffusionswiderstandszahl beschreibt den Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Materials im Vergleich zu einer Luftschicht gleicher Dicke. Die Diffusionswiderstandszahl von Luft ist dementsprechend gleich 1, wogegen die der Baumaterialien meist deutlich höher liegen.

2.5.4 Flüssigtransportkoeffizienten

Zur Berechnung von Feuchtetransportvorgängen benötigt WUFI folgende Transportkoeffizienten;

- D_{wo} bei 80 % relativer Feuchte
- D_{ws} Saugen bei freier Sättigung mit direktem Wasserkontakt
- D_{ww} Weiterverteilung bei freier Sättigung ohne direkten Wasserkontakt

Außerdem können zur Spezifizierung der Nachberechnung weitere Transportkoeffizienten zwischen 100 % r.F. und 80 % r.F. ermittelt werden. Mit Hilfe der Transportkoeffizienten lässt sich die Befeuchtungs- und Trocknungsgeschwindigkeit eines Baustoffes berechnen.

2.5.5 Ermittlung des Kapillartransportkoeffizienten für den Saugvorgang mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert (D_{ws} Saugen)

Die computergestützte Berechnung des Feuchteverhaltens von Bauteilen findet häufig Anwendung. Voraussetzung für plausible Rechnungsergebnisse ist die präzise Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten. Diese sind durch aufwändige messtechnische Maßnahmen ermittelbar. [Krus, Holm, Schmidt 1997] entwickelten eine Methode, diese Koeffizienten aus einfacher zu messenden Kennwerten, wie der freien Wassersättigung u_f , dem Bezugsfeuchtegehalt u_{80} und dem Wasseraufnahmekoeffizient zu ermitteln. Gleichung 8 berücksichtigt die Gleichung für den Wasseraufnahmekoeffizient nach [DIN 52617] und den Diffusionsansatz nach [Krischer, Kast 1978]. Durch das 2. Fick'sche Gesetz lässt sich eine Beziehung zwischen Kapillartransportkoeffizient und dem w-Wert herstellen.

Für einen Großteil der Baustoffe lassen sich die Kapillartransportkoeffizienten mit einer Exponentialfunktion approximieren. Um den Einfluss des Feuchtegehalts zu berücksichtigen, wird ein Korrekturfaktor K eingeführt. Dieser ist abhängig vom Verhältnis des Transportkoeffizienten bei freier Wassersättigung D_{ws} im Vergleich zum Transportkoeffizienten bei 80 % r.F. D_{w0} . Aufgrund von Untersuchungen lässt sich ein pauschaler Transportkoeffizient bei 80 % r.F. von $2 \cdot 10^{-10}$ bestimmen. Dieser Wert gilt jedoch nur für die meisten mineralischen Baustoffe.

Mit der Annahme von $D_{w0} = 2 \cdot 10^{-10}$ lässt sich mit Gleichung 8 bei Kenntnis des w-Wertes, der freien Wassersättigung und des Bezugsfeuchtegehaltes auch der Transportkoeffizient D_{ws} bei freier Wassersättigung ermitteln.

$$\frac{4 \cdot (D_{ws} - D_{w0})}{\pi \cdot K \cdot \ln\left(\frac{D_{wf}}{D_{w0}}\right)} = \frac{w^2}{u_f(u_f - u_{80})}$$

Gleichung 8

mit:

D_{ws}	[m ² /s]	Kapillartransportkoeffizient bei freier Wassersättigung
D_{w0}	[m ² /s]	Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsfeuchtebereich
w	[kg/m ² √h]	Wasseraufnahmebereich
u_f	[kg/m ³]	Wassergehalt bei freier Sättigung
u_{80}	[kg/m ³]	Wassergehalt bei 80 % r.F.
K	[-]	Korrekturfaktor abhängig vom Verhältnis D_{ws}/D_{ws} .

Mit Hilfe der rechten Seite von Gleichung 8 lässt sich der Transportkoeffizient D_{ws} bei freier Wassersättigung anhand Abbildung 3 alternativ auch grafisch ermitteln.

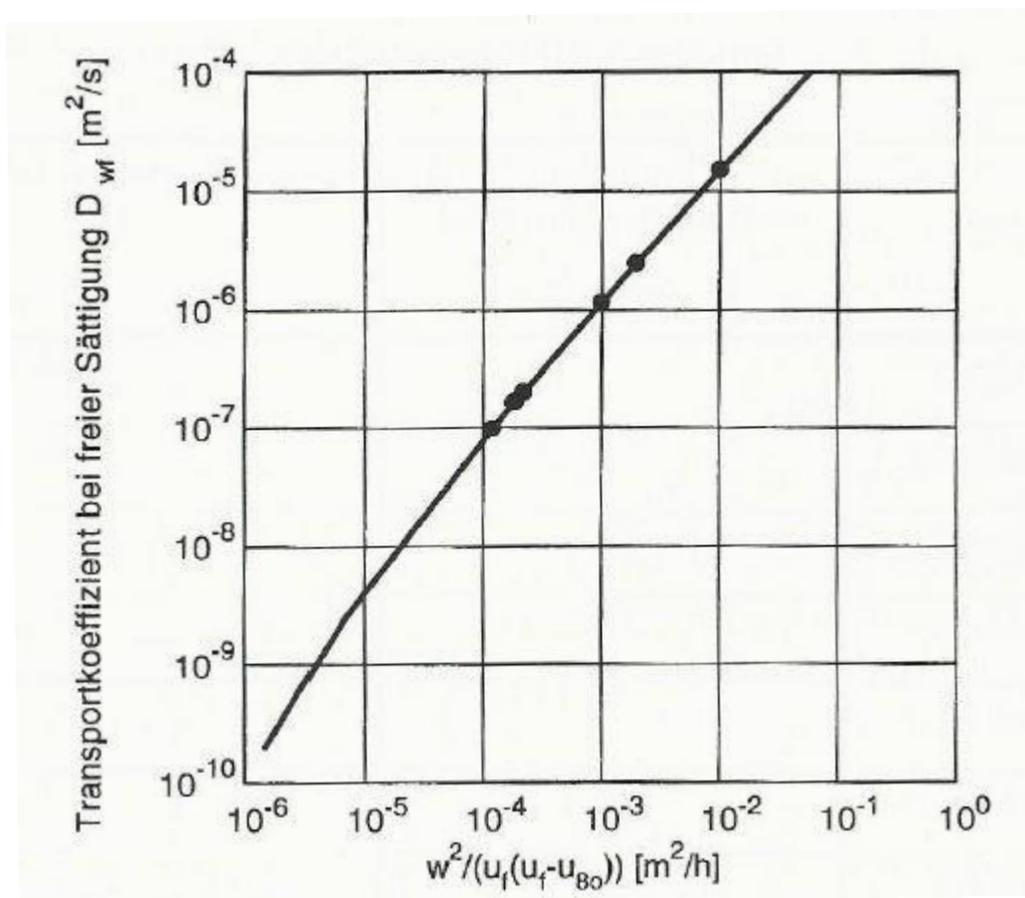


Abbildung 3: Darstellung von Gleichung 8 zur graphischen Bestimmung von D_w

2.5.6 Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung mit Hilfe von Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung

Um den Feuchtehaushalt in Baustoffen vollständig beschreiben zu können, ist nicht nur die rechnerische Ermittlung des Saugverhaltens von Baustoffen (Kapitel 2.5.5) sondern auch das Trocknungsverhalten (Weiterverteilung) relevant. Für den Trocknungsvorgang ergeben sich deutlich kleinere Transportkoeffizienten als für den Saugvorgang. Dies liegt daran, dass beim Saugvorgang die großen Poren eine geringere Saugspannung als die kleinen Poren haben aber auch einen geringeren Strömungswiderstand als die kleinen Poren aufweisen. Sobald der Kontakt der Saugfläche mit dem Wasser unterbrochen wird, beginnen die kleineren Poren die großen Poren leer zu saugen. Diese Weiterverteilung läuft somit langsamer als der Saugvorgang ab. Deshalb muss für die Weiterverteilung ein eigener Transportkoeffizient D_{ww} ermittelt werden. [Holm und Krus 1998] beschreiben ein Verfahren aus einfachen Trocknungsversuchen und iterativen Berechnungen, mit dem man auch die Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung ermitteln kann. Das Verfahren beruht ebenfalls auf einer exponentiellen Näherung für die feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten. Da laut [Holm und Krus 1998] im hygrokopischen Bereich die Weiterverteilung sowie das Saugen ähnlich verlaufen, wird im Bezugsfeuchtebereich von 80 % r.F. der Transportkoeffizient zunächst für alle mineralischen Baustoffe vereinfachend auf $2 \cdot 10^{-10}$ m²/s festgelegt. Weitere Transportkoeffizienten bei Feuchtegehalten entlang der Feuchtespeicherfunktion können iterativ mit Hilfe von hygrothermischer Simulation ermittelt werden. Hierbei wird ein gemessener Trocknungsverlauf nachberechnet. Der berechnete Trocknungsverlauf wird durch iterative Anpassung der Transportkoeffizienten an den gemessenen Verlauf angepasst. Die Anpassung wird in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt wird der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient α , bestimmt. Dieser beeinflusst die Steigung der Trocknungskurve in den ersten Stunden, bis das freie Oberflächenwasser verdunstet ist. In diesem Bereich ist die Verdunstungsgeschwindigkeit unabhängig vom Material. Der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient α , ist ebenfalls von der genauen Position der Probe in der Klimakammer abhängig. Als Startwert wird ein Wärmeübergangswiderstand von 0,08 m²K/W an der Innenoberfläche gewählt und solange angepasst bis eine Übereinstimmung mit dem gemessenen Trocknungsverlauf erreicht wird. Im zweiten Schritt erfolgt die Anpassung der Transportkoeffizienten. Hier wird der Transportkoeffizient zur Weiterverteilung D_{ww} bei 100 % r.F. mit einem Startwert von $2 \cdot 10^{-$

¹⁰ angesetzt und so lange reduziert, bis eine Übereinstimmung mit der gemessenen Kurve vorliegt. Bei Ziegelsteinen kann es sinnvoll sein, weitere Transportkoeffizienten - im Bereich zwischen 80 % r.F. und 100 % r.F. - zu wählen. Bei Materialien, die entweder einen sehr hohen oder einen sehr niedrigen w-Wert aufweisen, ist gegebenenfalls zusätzlich eine Korrektur des Start-Transportkoeffizienten D_{w0} beim Bezugsfeuchtegehalt von 80 % r.F. vorzunehmen.

Die Anzahl der nötigen Iterationen hängt von der Erfahrung des Bearbeiters ab. Schon nach ca. 4 bis 5 Iterationen ist eine gute Übereinstimmung mit der Messung erreichbar. Nach [Holm und Krus 1998] ergeben sich für die Trocknungsverläufe meist kleinere Transportkoeffizienten als für den Saugvorgang. Das verwendete Material spielt dabei jedoch eine starke Rolle.

3 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

3.1 Untersuchte Baustoffe

Im Laufe dieser Arbeit werden drei verschiedene, hochgedämmte Mauerwerksteine mit Dämmeinlage untersucht. Es handelt sich im Einzelnen um:

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| A) Thermoplan MZ7 36,5 | Ziegelstein mit Brickrock Dämmeinlage |
| B) Poroton T8 36,5 Perlit | Ziegelstein mit Perlit Füllung |
| C) Poroton T8 36,5 MW | Ziegelstein mit Mineralwolldämmung |

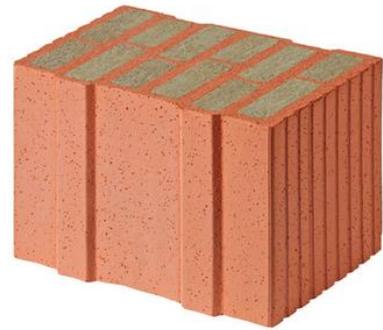
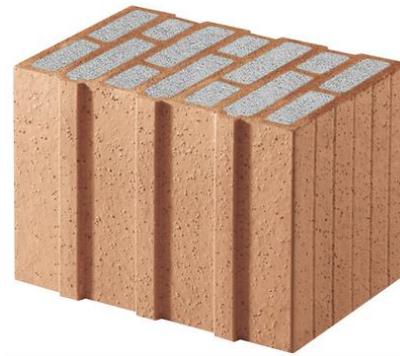


Abbildung 4: Thermoplan MZ7

Abbildung 5: Poroton T8 Perlit

Abbildung 6: Poroton T8 Mineralwolle

Der Thermoplan-Stein wird in der Ziegelei „Bellenberger Süd-West“ hergestellt. Die beiden Poroton-Steine stammen aus der Produktion „Wienerberger“. Die Wärmedämmeigenschaften dieser Ziegelsteine sind durch die Füllung mit Dämmstoff besser als die, herkömmlicher erprobter Ziegelsteine mit Luftkammern. Außerdem wird die Dämmwirkung der untersuchten Steine durch die Porosierung der Ziegelstruktur erhöht. Die Dämmmaterialien Mineralwolle und Perlit sind laut Herstellerangaben jeweils hydrophobiert. Die hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage werden in folgenden Ausführungen untersucht:

- Mauersteine mit unverputzter Oberfläche (Serie A, B, C)
- Mauersteine mit verputzter Oberfläche aus Kalk-Gips-Putz (Serie D, E, F)
- Mauersteine mit abgeschlagenem Kalk-Gips-Putz (Serie G, H, I)

Alle Ziegelsteine haben eine Breite von 36,5 cm. Da die Messung am ganzen Stein zu lange dauern würde, wird der Stein in der Mitte der Einbaudicke halbiert. Außerdem entspricht die Halbierung den symmetrischen Verhältnissen der Wand. Die Oberfläche (gegenüberliegend der Schnittfläche) wird dann entweder unverputzt belassen, verputzt und gestrichen oder verputzt und anschließend der Putz wieder abgeschlagen. Als Farbansstrich wird eine Dispersionsfarbe verwendet. Diese wird zweilagig aufgetragen. Außerdem werden aus dem Kalk-Gips-Putz, der Norm entsprechend, runde Proben mit 10 cm Durchmesser und 2 cm Dicke hergestellt. Mit diesen Proben wird die Dampfdiffusion der Putzschicht im gestrichenen und ungestrichenen Zustand ermittelt.

3.2 Beschreibung der durchgeführten Versuche

Ziel der Arbeit ist es, das Trocknungsverhalten der in Kapitel 3.1 beschriebenen hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage anhand von Versuchen und Rechnungen zu untersuchen. Um einen aussagekräftigen Mittelwert zu erhalten, werden von jeder Probe drei Exemplare präpariert. Somit existieren für jeden Stein und jede Oberflächenvariante jeweils drei Prüfkörper (z.B. A1, A2, A3). Neben den Trocknungsverläufen werden weitere Versuche durchgeführt, um Kennwerte für die Nachberechnung mit WUFI zu ermitteln. Zunächst werden die w -Werte der Probekörper, wie in Tabelle 1 aufgelistet, ermittelt. Danach werden die Probekörper zur freien Wassersättigung in ein Wasserbecken gelegt. Im Anschluss erfolgt die Rücktrocknung der Probekörper. Diese vollzieht sich bei den in Tabelle 1 dargestellten Prüfkörpern in einer Klimakammer bei 23 °C und 65 % r.F. Zur Validierung des ermittelten Datensatzes wird ein weiterer Rücktrocknungsprozess im Trocknungsschrank bei 40 °C und 65 % r.F. untersucht. Hierfür wird jeweils nur ein Stein verwendet. In diesem Fall bleibt die Oberfläche der Versuchssteine unverputzt. Neben den Versuchen zur Bestimmung des w -Wert, der freien Wassersättigung und des Trocknungsverlauf, welche ausschließlich am halben Stein durchgeführt werden, folgen weitere Kennwertermittlungen am Scherben. Für alle drei Steine wird bei 50 % r.F, 65 % r.F, 80 % r.F., 95 % r.F. und 97 % r.F. die Adsorption in den Klimakammern und anschließend die Desorption in der Trockenkammer bestimmt. Außerdem werden Diffusionsmessungen durchgeführt. Diese werden an je drei Scherben der jeweils drei untersuchten Steine vollzogen. Des Weiteren wird zusätzlich probeweise die Diffusionsmessung am halben Stein durchgeführt. Die Diffusionsversuche werden sowohl bei Putzproben des verwendeten

Kalk-Gips-Putzes mit Dispersionsfarbe gestrichenen, als auch im ungestrichenen Zustand durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die drei verschiedenen untersuchten Steine in Kombination mit den drei verschiedenen Oberflächen.

Tabelle 1: Bezeichnung der Probekörper

	Oberfläche unverputzt	Oberfläche verputzt	Verputzt und abgeschlagen
Thermoplan Mineralwolle	A	D	G
	A1	D1	G1
	A2	D2	G2
	A3	D3	G3
Poroton T8 Perlit	B	E	H
	B1	E1	H1
	B2	E2	H2
	B3	E3	H3
Poroton T8 Mineralwolle	C	F	I
	C1	F1	I1
	C2	F2	I2
	C3	F3	I3

Eine vollständige Tabelle mit den durchgeführten Versuchen ist im Anhang 4 zu finden.

3.2.1 w-Wert Ermittlung

Der w-Wert bezeichnet die von einem Prüfkörper je Flächeneinheit und Wurzel der Zeit aufgenommene Wassermenge [DIN EN ISO 15148].

Laut DIN EN ISO 15148:2002 bestehen die Feuchtebewegungen in einem hygroskopischen, kapillarporösen Baustoff aus einer Kombination aus dampfförmigen und flüssigen Feuchteströmen. Es werden drei Methoden unterschieden:

- 1) Feuchtetransport allein durch Wasserdampfdiffusion (dry-cup-Prüfung)
- 2) Feuchtetransport bei ca. 95 % r.F. → Kombination der Wasseraufnahme aus dampfförmigen und flüssigen Feuchteströmen
- 3) Feuchteaufnahme oberhalb von 95 % r.F.. Der komplette Massentransport erfolgt über die Flüssigphase. Das Wasser wird über hydraulischen Unterdruck, der durch Saugspannungen hervorgerufen wird, in die Probe aufgenommen.

In der vorliegenden Arbeit wird der w-Wert nach Methode 3) ermittelt.

Die durch teilweises Eintauchen erreichte Wasseraufnahme wird durch Messen der Massenänderung des Probekörpers bestimmt. Während der Messung ist der Prüfkörper über eine Zeitspanne von 24 Stunden, mit der Unterseite in Kontakt mit Wasser. Die Versuchskörper müssen für den Baustoff repräsentativ sein und eine regelmäßige Form mit konstantem Querschnitt aufweisen. Die Wasseraufnahmefläche muss mindestens 50 cm² betragen. Es werden mindestens drei Probekörper je Stein und Serie geprüft. Die ursprüngliche Oberflächenstruktur des Bauproduktes darf beim Versuch nicht geändert werden und entspricht somit der realen Oberfläche einer Gebäudewand auf der Baustelle. Die Prüfkörper werden an fünf Seiten mit einer wasser- und dampfdichten Schicht abgedichtet. Die Kanten werden durch Paraffin abgedichtet. Die Fläche, welche vom Paraffin im Zuge der Bearbeitung bedeckt wurde, wird von der definierten Saugoberfläche abgezogen. Die wasseraufnehmende Fläche des Probekörpers ist zu ermitteln. Die Prüfung muss bei einer Raumtemperatur zwischen 18 °C und 28 °C (max. Schwankung 2 °C) mit einer relativen Luftfeuchte von 40 % bis 60 % (max. Schwankung 5 %) stattfinden.

Prüfungsvorbereitung:

- 1) Bestimmung der Anfangsmasse m des Probekörpers.
- 2) Der Wasserbehälter wird gefüllt, so dass nach Eintauchen des Prüfkörpers der Wasserspiegel 1 cm über der Prüfkörperunterkante liegt.

Der Prüfkörper wird so in den Wasserbehälter gestellt, dass seine nicht abgeklebte Unterseite punktförmig aufliegt und somit den Behälterboden nicht berührt. Beim Eintauchen des Prüfkörpers ist darauf zu achten, dass keine Luftblasen unter der Oberfläche eingeschlossen werden.

Prüfungsablauf: Die Prüfungszeit beginnt mit dem Eintauchen des Probekörpers ins Wasser. Innerhalb von 24 Stunden ist der Prüfkörper mindestens neun Mal zu wiegen. Vor dem Wiegen ist jeweils darauf zu achten, dass das oberflächlich haftende Wasser an der Saugfläche mit einem feuchten Schwamm entfernt wird. Somit können eine Reihe von Messwerten m_t zu bestimmten Zeiten gewonnen werden. Sobald der Prüfkörper in dem Maße durchfeuchtet ist, dass Wasser auf der Oberseite der Probekörper erscheint, ist die Prüfung abzubrechen. Falls die Massenzunahme nach 8 Stunden geringer ist als 8 g/m² ist die Prüfung ebenfalls abzubrechen und der Prüfkörper gilt als nicht Wasser aufnahmefähig [DIN EN 12078:06].

Die Massendifferenzen der jeweiligen Wägungen sind nach folgender Gleichung zu ermitteln:

$$\Delta m_t = (m_t - m_i)/A \quad \text{Gleichung 9}$$

Die ermittelten Massen sind über der Wurzel der Wägezeit \sqrt{t} aufzutragen. Die resultierende Kurve kann anschließend zwei Kurventypen entsprechen:

TYP A:

Nach einer kurzen anfänglichen Stabilisierungsphase wird eine Linie durch die Werte von Δm_t und \sqrt{t} gezeichnet. Verlängert man diese Linie bis zu dem Zeitpunkt Null, schneidet die Vertikale bei $\Delta m'_0$. Der Wasseraufnahmekoeffizient wird somit wie folgt berechnet:

$$A_w = \frac{\Delta m'_{tf} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}} \quad \text{Gleichung 10}$$

Dabei ist:

- $\Delta m'_{tf}$ der Wert von Δm auf der Geraden zur Zeit t_f
- $\Delta m'_0$ die Prüfdauer (im Allgemeinen ein Tag) in Sekunden

TYP B:

Die Kurve von Δm_t über \sqrt{t} ergibt keine gerade Linie, sondern einen beliebigen Verlauf. In diesem Fall muss der Wert für Δm_t zum Zeitpunkt von 24 Stunden nach Prüfbeginn als Δm_{tf} angenommen werden. Somit wird A_w berechnet, indem Δm_{tf} durch $\sqrt{86400}$ dividiert wird. Der w-Wert nach 24 Stunden wird aus dem Quotienten aus Δm_{tf} und $\sqrt{24}$ bestimmt. Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen sind im Anhang 1.1 zu finden.

Abweichungen im Prüfungsablauf der durchgeführten Versuche

Abweichungen:

- Keine Punktauflager zur Positionierung des Prüfkörpers im Wasser, sondern Gitterrost.
- Keine Möglichkeit, den Wasserspiegel konstant auf 2 mm zu halten → Händisches Nachmessen und weitere Wasserzugabe nach Bedarf.
- Der Wasserspiegel über Unterkante des Versuchskörpers beträgt ca. 1-2 cm.

3.2.2 Freie Wassersättigung

Die freie Wasseraufnahme ist nach der DIN EN 12087:2013 geregelt. Hier werden zwei Prüfverfahren unterschieden.

Prüfverfahren 1: Teilweises Eintauchen

In diesem Fall wird die Gewichtsveränderung eines Probekörpers bestimmt. Dieser liegt im Laufe der Prüfung ausschließlich mit der unbehandelten Unterseite für einen Zeitraum von 28 Tagen im Wasser.

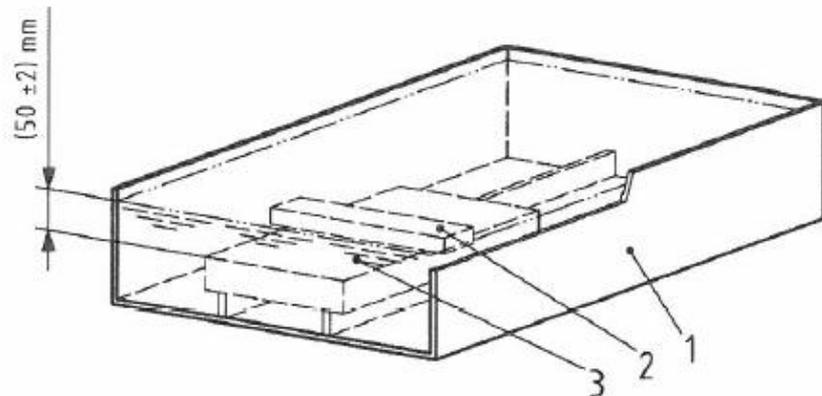
Prüfverfahren 2: Vollständiges Eintauchen

In diesem Fall wird die Gewichtsveränderung des Probekörpers bei vollständigem Eintauchen bis zum Erreichen der Messkonstanz gemessen. Nach Vereinbarung dürfen Messungen auch in kürzeren Zeitabständen vorgenommen werden. Das überschüssige Wasser, das an der Oberfläche haftet und vom Prüfkörper nicht absorbiert worden ist, wird durch Abtropfen entfernt.

In dieser Arbeit wird das Prüfverfahren 2 angewendet.

Zur Durchführung der Prüfung ist folgende Prüfeinrichtung erforderlich:

- Waage zur Bestimmung der Masse des Probekörpers auf 0,1 g Genauigkeit
- Wasserbehälter mit einer Einrichtung, die den Wasserspiegel mit einer Abweichung von 2 mm konstant hält (DIN EN 12087:06).



Legende

- 1 Wasserbehälter
- 2 Auflast, die das Aufschwimmen des Probekörpers verhindert
- 3 Probekörper

Abbildung 7: Beispiel einer Prüfeinrichtung zur Bestimmung der freien Wasseraufnahme (DIN EN 12087:06)

Die Dicke der Probekörper sollte der Lieferdicke des auf der Baustelle verbauten Produkts entsprechen. In dieser Arbeit werden halbierte Mauerwerksteine verwendet. Die Anzahl der Probekörper ist laut den entsprechenden Produktnormen festzulegen. Fehlt eine solche, sind mindestens vier Probekörper pro Serie zu prüfen. In dieser Arbeit werden drei Prüfkörper pro Serie und Stein verwendet. Vor Beginn der Prüfung, müssen die Probekörper mindestens 6 Stunden bei 23 °C (abw. 5 °C) gelagert werden [DIN EN 12078:06]. Die Maße der Probekörper sind nach EN 12085 auf 0,5 mm genau zu ermitteln. Die Ausgangsmasse m_0 des Probekörpers ist auf 0,1 g zu bestimmen. Anschließend ist der Probekörper in einen leeren Wasserbehälter zu legen und zu beschweren, so dass er beim Einfüllen des Wassers nicht aufschwimmt. Der Wasserspiegel soll ca. 10 mm über der Oberkante des Probekörpers liegen. Es ist darauf zu achten, dass der Wasserspiegel konstant bleibt. Vor dem Wägen ist das überschüssige Wasser, welches der Prüfkörper nicht absorbiert hat, durch Abtropfen zu entfernen. [DIN EN 12078:06]

Die volumenbezogene Wasseraufnahme bei gleichzeitigem, vollständigem Eintauchen, W_{lt} in Prozent, ist laut [DIN EN 12078:06] nach folgender Gleichung zu berechnen:

$$W_{lt} = \frac{m_{28} - m_0}{V} \cdot \frac{100}{\rho_W}$$

Gleichung 11

Dabei ist:

- m_{28} die Masse des Probekörpers nach 28 tägigem Eintauchen in kg
- m_0 die Ausgangsmasse des Probekörpers in kg
- V das Ausgangsvolumen des Probekörpers in m^3
- ρ_W die Dichte des Wassers (ca. 1000 kg/m^3)

W_{it} ist auf 0,1 % zu runden.

3.2.3 Trocknungsverlauf in der Klimakammer/ Trocknungsschrank

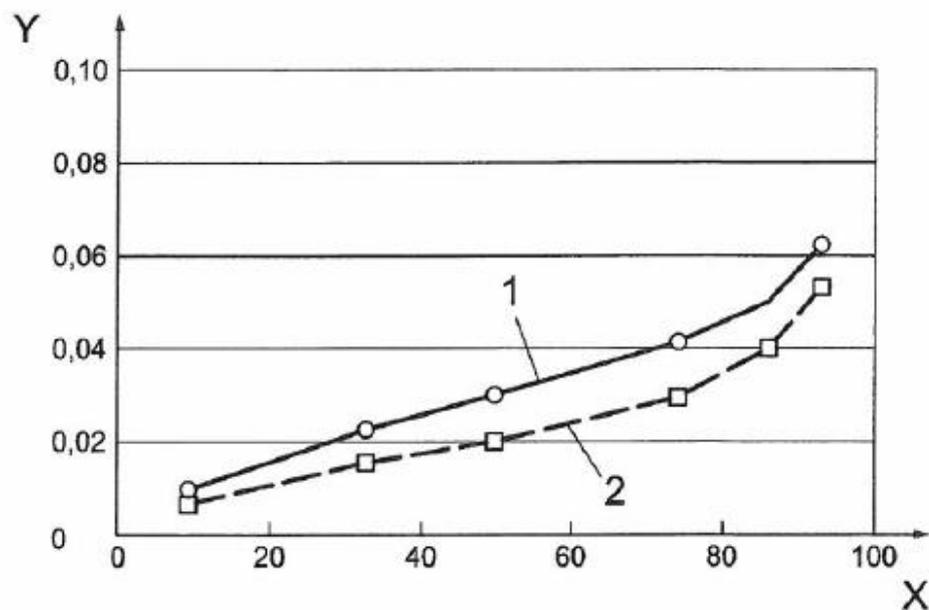
Nach der Ermittlung des w -Wertes und der freien Wassersättigung werden die Prüfkörper zur Rücktrocknung in die Klimakammer gelegt. Der Trocknungsvorgang in der Klimakammer erfolgt bei $23 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65 \% r.F. . Ein weiterer Trocknungsversuch zur Validierung der Nachberechnung in anderen Temperaturbereichen wird in einem Klimaschrank bei $40 \text{ }^\circ\text{C}$ und 65 \% r.F. durchgeführt. Die Prüfkörper werden in der ersten Woche sieben Mal pro Tag gewogen. Ab der zweiten Woche erfolgt das Wiegen nur noch täglich. Der Trocknungsverlauf der Steine wird über einen Zeitraum von sechs Monaten gemessen. Die Proben werden an fünf Seiten dampfdicht mit Aluminium-Klebeband und Parafin abgedichtet und können somit ausschließlich auf einer definierten Fläche rücktrocknen.

Aus der Beobachtung des Trocknungsverhaltens eines anfangs wassergesättigten Versuchskörpers sollen Informationen über die Kapillartransportkoeffizienten für den Weiterverteilungs- bzw. Trocknungsvorgang gewonnen werden. Bei der Trocknung eines wassergesättigten porösen Baustoffes stellen sich unterschiedliche Trocknungsphasen ein. Solange der Kapillartransport groß genug ist, um die an der Oberfläche verdunstende Wassermenge aus dem Inneren der Probe nach zu fördern, bleibt die Verdunstung bei unveränderten äußeren Klimarandbedingungen, an der Oberfläche nahezu konstant. In diesem ersten Abschnitt der Trocknung ist die Trocknungsgeschwindigkeit nur vom Wärme- und Feuchteübergang sowie den Klimabedingungen in der Kammer abhängig; die Eigenschaften des Baustoffes haben keinen Einfluss. Da der Kapillartransport im Baustoff mit sinkendem Wassergehalt zurückgeht, wird zu einem bestimmten Zeitpunkt die an die Oberfläche transportierte Flüssigkeitsmenge nicht mehr ausreichen, um die Anfangs-

trocknungsgeschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Dies führt dazu, dass man in diesem Trocknungsabschnitt eine sinkende Trocknungsgeschwindigkeit beobachtet. Der Trocknungsverlauf ist hier, außer von den Klimarandbedingungen, auch von der Diffusionswiderstandszahl und den Flüssigtransportkoeffizienten abhängig.

3.2.4 Sorptionsversuche Adsorption und Desorption

Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt den Wassergehalt eines Baustoffes im Gleichgewicht mit den jeweiligen Randbedingungen. Bei der Bestimmung der Speichereigenschaften wird zwischen dem Sorptionsfeuchtebereich und dem Kapillarwasserbereich unterschieden. Zur Bestimmung der Sorptionsfeuchte gibt es ein bewährtes Verfahren, bei dem die Probe in einem Klima gelagert wird, welches über eine Salzlösung oder mit Hilfe einer Klimakammer eingestellt ist. In gläsernen Bechern werden die Probekörper, bestehend aus ca. 100g kleiner Scherben eines Ziegelsteines, in die Klimakammern gestellt. Dort werden die Probekörper bis zur Massekonstanz gelagert. Durch schrittweises Variieren der relativen Luftfeuchte von 50 % r.F., 65 % r.F., 80 % r.F., 95 % r.F. und 97 % r.F. erhält man die Adsorptionsisotherme bzw. bei umgekehrter Vorgehensweise die Desorptionsisotherme. Messungen oberhalb von 97 % r.F. sollten nicht durchgeführt werden, da in diesem Bereich bei hygroskopischen, mineralischen Baustoffen die Sorptionsisotherme sehr steil ist. Kleine, nicht auszuschließende Schwankungen der relativen Luftfeuchte (z.B. durch Temperaturschwankungen), bewirken hier bereits große Änderungen der Sorptionsfeuchte. Die Ermittlung einer Sorptionsisotherme dauert je nach Probenmaterial und der Anzahl der Feuchtestufen, aufgrund der sehr langsamen Einstellung der Ausgleichsfeuchte, mehrere Wochen bis Monate. Dieses angewandte Messverfahren ist durch die DIN EN ISO 12571 [45] geregelt.



Legende

- X relative Luftfeuchte, ϕ , in Prozent
- Y massebezogener Feuchtegehalt, u , in kg/kg
- 1 Desorptionskurve
- 2 Sorptionskurve

Abbildung 8: Ad- und Desorption (E DIN EN ISO)

Abweichung zur Norm DIN EN ISO 12570

Die Probekörper zur Bestimmung der Sorptionsisotherme werden für die Versuchsreihen dieser Arbeit mit kleinen Abweichungen zur DIN EN ISO 12570 hergestellt:

- Die Norm DIN EN ISO 12570 sieht vor, die Probekörper vor Beginn der Sorptionsuntersuchungen, laut entsprechender Produktnorm, bei einer vorgeschriebenen Temperatur auf Massekonstanz zu trocknen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Probekörper bei Raumtemperatur 23 °C und 50 % r.F. gelagert. Eine Trocknung vor Beginn der Sorptionsversuche wird nicht vorgenommen.
- Die Rücktrocknung (Desorption) wird mit Hilfe eines Trockenschrankes bei 40 °C und ca. 2 % r.F. durchgeführt. Eine absteigende Rücktrocknung nach DIN EN ISO 12570 erfolgt nicht.

3.2.5 Diffusionsversuche wet-cup, dry-cup

Die Durchführung der Messung von Dampfdiffusionskoeffizienten wird in der DIN EN ISO 12572 geregelt. Die Messungen erfolgen unter isothermen Bedingungen. Dazu wird eine plattenförmige Probe des zu prüfenden Materials als oberer Abschluss auf ein Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden. Im Gefäß wird durch ein Trocknungsmittel oder eine geeignete gesättigte Salzlösung eine konstante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Zur Messung werden die Gefäße in einen Klimaraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchte gebracht. Unter dem Einfluss des Wasserdampfpartialdruckgefälles, zwischen den an die Probenoberfläche angrenzenden Lufträumen, wandert der Wasserdampf durch die Proben hindurch. Nach Einstellen eines stationären Gleichgewichtes ergibt sich eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsänderung des Messgefäßes, welche dem Diffusionsstrom des angelegten Luftfeuchtegradienten entspricht. Während der Messung wird die gesamte Masse des Gefäßes periodisch gemessen. Nach dem Erreichen stationärer Bedingungen, die mit einer zeitkonstanten Gewichtsänderung einhergehen, kann der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\mu = \frac{1}{s} \left(p_a * A * \frac{p_1 - p_2}{j} - s_a \right)$$

Gleichung 12

mit:

s	[m]	Dicke des Probekörpers
p_a	[kg/m ³ h ⁻¹ Pa ⁻¹]	Wasserdampfpermeabilität von Luft
A	[m ²]	Fläche der Probe
s_a	[m]	Mittlere Schichtdicke der Luftschicht zwischen Probekörper und Sorbens
p_1	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck an der Probenoberseite
p_2	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck an der Probenunterseite
j	[kg/h]	Wasserdampfdiffusionsstrom

Zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands von Baustoffen ist die Kenntnis der Wasserdampfpermeabilität von Luft erforderlich. Diese kann über die nachfolgende Gleichung berechnet werden.

$$p_a = \frac{0.083}{R_D T} \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81}$$

Gleichung 13

Dabei ist:

R_D [Nmkg⁻¹K⁻¹]

Gaskonstante von Wasserdampf mit 462 [Nmkg⁻¹K⁻¹]

T [°K]

absolute Temperatur

P_0 [hPa]

atmosphärischer Druck bei Standardbedingungen von 1013.25 [hPa].

3.2.6 Vergleich Diffusionsversuche am halben Stein und am Scherben

Im Folgenden wird geprüft, ob auf Basis einer Diffusionsmessung an einem Scherben der μ -Wert eines gesamten, hochgedämmten Mauerwerksteines mit Dämmeinlage berechnet werden kann. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Dämmeinlage, wie Mineralwolle oder Perlit, einen μ -Wert von 1,0 aufweisen kann. Außerdem wird der Diffusionswiderstand der Stege vernachlässigt. Somit kann über den s_d -Wert der Gleichwertigkeitsnachweis geführt werden. Der Nachweis wird im Folgenden, am Beispiel des Poroton-Steines T8 mit Perlitfüllung der Serie B, geführt.

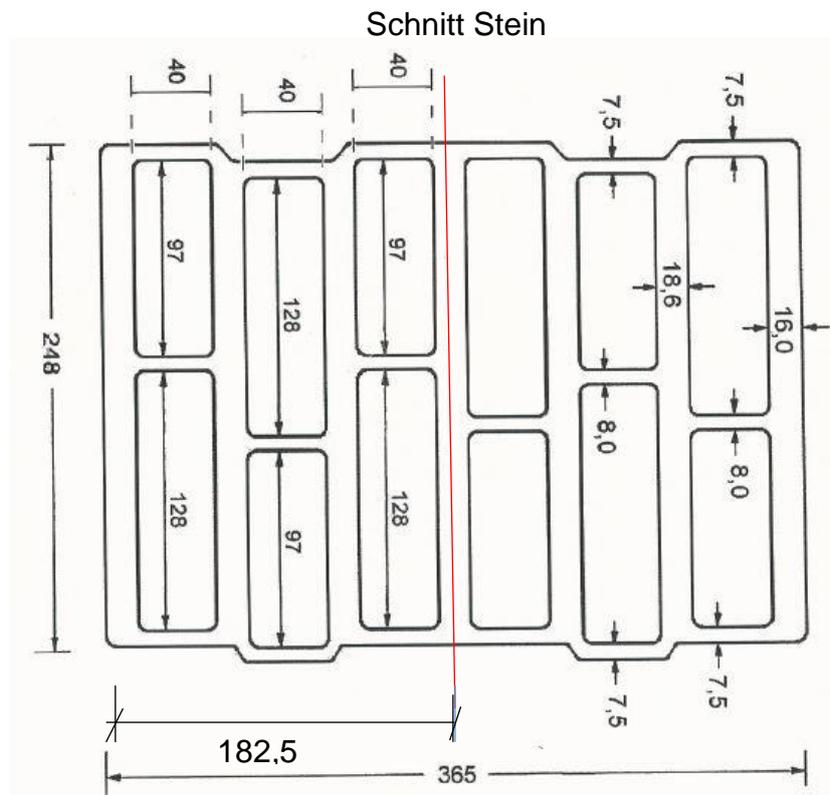


Abbildung 9: Querschnitt Poroton Perlit

Abbildung 9 zeigt die Schichtstärken der Stege eines Poroton-Steines. Der Mittelwert des Diffusionswiderstands wird anhand des Scherbens mit $\mu = 18$ ermittelt. Der gemessen effektive μ -Wert des halben Steins beträgt $\mu = 6,9$.

1.) Aufsummierung der Ziegel-Stegstärken:

$$(2,5 \cdot 0,0186) + 0,016 = 0,0625 \text{ m}$$

2.) Aufsummierung der Dämmkammern:

$$3 \cdot 0,04 = 0,12 \text{ m}$$

3.) $S_{d, \text{ Stein}} = 0,0625 \cdot 18 = 1,125 \text{ m}$

$$S_{d, \text{ Perlit}} = 1 \cdot 0,12 = 0,12 \text{ m}$$

4.) Summe der S_d -Werte:

$$1,125 + 0,12 = 1,245$$

5.) Berechnung μ -halber Stein gerechnet:

$$\frac{1,245}{0,1825} = 6,82 \longrightarrow 6,9 \text{ gemessen im dry-cup Test}$$

Wie durch obige Rechnung gezeigt, kann anhand des Ergebnisses der μ -Wert Messung an einem einfachen Scherben, vereinfacht auf den μ -Wert eines kompletten Steines mit Dämmfüllung berechnet werden. Die Annahme, die Dämmstoffe Mineralwolle und Perlitfüllung mit einem Diffusionswiderstandswert von 1,0 anzusetzen und die Vernachlässigung der Diffusionswiderstände durch die Stege ist somit als gute Näherung zu sehen. Die beiden Steine der Serie A und C mit Mineralwolldämmung werden ebenfalls geprüft und nachgerechnet. Die Ergebnisse zeigen eine Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung auf.

3.2.7 Bestimmung einer Widerstandsschicht

In Kapitel 3.2 wird der Versuchsumfang für das Trocknungsverhalten von drei verschiedenen Steinen mit jeweils drei unterschiedlichen Oberflächen beschrieben

- 1) Serie A, B, C: Steine unverputzt
- 2) Serie D, E, F: Steine mit verputzter und gestrichener Oberfläche
- 3) Serie G, H, I: Steine mit abgeschlagenem Putz

Die Porenstruktur der unverputzten Steine der Serie A, B und C ist nicht behandelt. Somit sind keine Widerstandsschichten an der Materialgrenze zu erwarten. Bei den verputzten Steinen der Serie D, E, F, werden durch das Aufbringen einer Putzschicht auf das Mauerwerk zwei Baustoffe miteinander verbunden. Dabei wird ein natürlicher hygrischer Kontakt der beiden Materialien, wie unter Kapitel 2.3.2 beschrieben, angenommen. Dies bedeutet, dass ungleiche Porenstrukturen sowie Transporteigenschaften an den Kontaktflächen aufeinander treffen. Die Transportkoeffizienten sind somit unterschiedlich und das Trocknungsverhalten ist verlangsamt. Nach Aushärten des Putzes, werden durch seine kristallisierenden Bestandteile, die Poren des Mauerwerkes verstopft und damit die Kapillarleitung gehemmt. Diese Verdichtung der Poren wird als „Widerstandsschicht“ bezeichnet. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse von [Bednar 2000] kann zwar angenommen werden, dass sich durch das Verputzen der Ziegelsteine mit reinem Gipsputz, an der Oberfläche

keine Widerstandsschicht bildet. Allerdings handelt es sich bei dem verwendeten Innenputz um einen Kalk-Gips-Putz. Bei diesem ist die Ausbildung einer Widerstandsschicht zu erwarten. Der auf die Steine der Serie G, H, I aufgetragene Kalk-Gips-Putz wird nach 28 Tagen Aushärtung wieder abgeschlagen. Trotz entferntem Putz wird das Zurückbleiben einer Widerstandsschicht erwartet. Es soll sowohl für diese, nach Abschlagen des Putzes verbleibende Widerstandsschicht, als auch für die Widerstandsschicht zwischen Putz und Ziegelstein ein allgemein verwendbarer Datensatz für alle drei Steintypen entwickelt werden. Dies geschieht, indem nach einheitlichem Schema, in den Datensätzen der jeweiligen Steine A, B und C die Transportkoeffizienten verringert und die Diffusionswiderstände vergrößert werden. Mit diesem Schema soll die Nachberechnung mit WUFI sowohl für die Serie D, E, F mit verputzter Oberfläche als auch für die Serie G, H, I mit abgeschlagenem Putz, möglich werden.

4 Rechnerische Untersuchungen und Ergebnisse

4.1 Iterative Ermittlung der Flüssigtransportkoeffizienten

Durch die Software WUFI ist es bereits möglich, Feuchteverhalten mit guter Übereinstimmung zur Realität zu berechnen. Voraussetzung für ein genaues Rechenergebnis ist die Korrektheit der Stoffkennwerte. [Krus, M., Holm, A., Schmidt, T.1997] haben ein Verfahren entwickelt, mit dem aus einfachen Trocknungsverläufen, sowie der freien Wassersättigung u_f , dem Bezugsfeuchtegehalt u_{80} und dem Wasseraufnahmekoeffizient w -Wert, eine gute Approximation zur Ermittlung der Transportkoeffizienten möglich ist. Das Verfahren bezieht sich auf die Kenntnis einer exponentiellen Näherung für die feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten. Der Startwert für den Flüssigtransport beim Bezugsfeuchtegehalt wird vereinfacht sowohl für das Saugen, als auch für die Weiterverteilung mit $2 \cdot 10^{-10}$ festgelegt. Dieser Wert gilt ausschließlich für mineralische Baustoffe. Den kompletten exponentiellen Verlauf der Transportkoeffizienten erhält man mit Hilfe einer iterativen Anpassung an die Messergebnisse. Für diese Arbeit erfolgt die Ermittlung der Transportkoeffizienten in folgenden Schritten:

- 1.) Damit das Computerberechnungsprogramm WUFI (Wärme- und Feuchteberechnung instationär) möglichst genaue Ergebnisse liefert, werden die genauen Materialkennwerte der zu berechnenden Stoffe benötigt. Deshalb werden diese, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben und ermittelt, in die Software eingetragen.
- 2.) Ermittlung einer kompletten Feuchtespeicherfunktion in WUFI. Hierbei werden die Werte der durchgeführten Sorptionsversuche als Stützpunkte bei 50 % r.F., 65 % r.F., 80 % r.F., 93 % r.F. und 97 % r.F. verwendet. Die Werte zwischen 97 % r.F. und 100 % r.F. können nicht in der Klimakammer gemessen werden. Deshalb werden weitere Stützpunkte zwischen 97 % r.F. und 100 % r.F. mit Hilfe der Software Fit FspF 2 berechnet. Zur besseren Vergleichbarkeit der Steintypen A, B und C werden die individuell ermittelten Feuchtespeicherfunktionen in die Software eingegeben.
- 3.) Einlesen der gemessenen Ergebnisse des Trocknungsverlaufes.

Das Programm ist nun in der Lage einen Trocknungsverlauf zu berechnen. Selbstverständlich stimmt die erste Berechnung mit WUFI nicht perfekt mit den tatsächlich gemessenen Werten des Trocknungsverlaufes überein. Deshalb wird mit Hilfe der Schritte 4 und 5 die Rechenkurve an den gemessenen Trocknungsverlauf angepasst.

- 4.) Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten
- 5.) Anpassung der Kapillartransportkoeffizienten für die freie Wassersättigung und den Bezugswassergehalt, bis sich für die weitere Trocknung eine minimale Abweichung zwischen berechnetem und gemessenem Verlauf ergibt. Es ist möglich, Stützstellen zwischen 80 % r.F. und 100 % r.F. zu setzen und für diese eigene Transportkoeffizienten zu bestimmen.

Die Wärmeübergangskoeffizienten sind für den anfänglichen Anstieg des berechneten Trocknungsverlaufes verantwortlich. Dieser Kennwert berücksichtigt die Lage des Prüfkörpers in der Klimakammer. Der Wert wird in dieser Arbeit zwischen 0,08 m²K/W und 0,1 m²K/W gewählt. Der Wärmeübergangskoeffizient beeinflusst ausschließlich die Geschwindigkeit der freien Verdunstung und somit nur die Anfangszeit der Trocknungsphase bis zum Beginn des Nachtransportes. Die Positionierung, z.B. in der Nähe eines Ventilators in der Klimakammer spielt hierbei eine Rolle, da durch die Intensität der Luftbewegung das, an der Oberfläche des Prüfkörpers stehende Wasser schneller aufgenommen wird. Sobald der Flüssigkeitstransport über Kapillarwirkung verläuft und der Nachtransport beginnt, spielt die Luftbewegung in unmittelbarer Umgebung des Prüfkörpers bezüglich des Trocknungsverhaltens keine Rolle mehr. Des Weiteren kann die Berechnung der Trocknungskurve durch die Anpassung der Transportkoeffizienten erfolgen. Diese sind jedoch nur im Bereich des Flüssigtransportes zwischen 80 % r.F. und 100 % r.F. wirksam. Unterhalb eines Feuchtegehalts von ca. 80 % r.F. läuft die Trocknung ausschließlich über Diffusion ab. Um die berechnete Trocknungskurve besser an den gemessenen Trocknungsverlauf anzupassen, werden bei Bedarf zwischen Startwert bei 80 % r.F. und Endwert bei 100 % r.F. gegebenenfalls mehrere Transportkoeffizienten in Abhängigkeit der gewählten Zwischenwerte ergänzt. Im Folgenden werden alle durchgeführten Nachberechnungen beschrieben.

4.2 Nachberechnung der Trocknungsversuche am halben Stein

Das Trocknungsverhalten der in Kapitel 3.1 vorgestellten, hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage wird nachfolgend untersucht. Hierzu wird der Trocknungsverlauf der jeweiligen Steine nachberechnet. Von jedem Steintyp werden jeweils drei Versuchskörper hergestellt. Somit sind die unter 4.2.1 bis 4.2.4 aufgeführten Messkurven als Mittelwertkurven zu verstehen.

Im ersten Schritt werden die Messergebnisse der unverputzten Steine der Serie ABC nachberechnet. Im zweiten Schritt wird der Trocknungsverlauf der Serie GHI approximiert. Bei der ersten Nachberechnung ist zu erkennen, dass der berechnete Trocknungsverlauf schneller als der gemessene erfolgt. Somit wird deutlich, dass durch das Aufbringen und Abschlagen der Putzschicht eine Widerstandsschicht an der Bauteiloberfläche entstanden ist. In dieser Widerstandsschicht sind die Transportkoeffizienten kleiner und der Diffusionswiderstand größer als im unverputzten Stein. Diese Nachberechnung ist nur möglich, da durch weitere Iterationsvorgänge erkannt wird, dass bei Annahme einer Widerstandsschicht von 5 mm, in welcher die Transportkoeffizienten um das 200-fache verringert und der Diffusionswiderstand um das 40-fache erhöht werden, eine gute Approximation der berechneten und der gemessenen Verläufe zu erkennen ist. Diese pauschale Anpassung gilt für alle drei Steine der Serie GHI mit abgeschlagenem Putz.

Im dritten Schritt wird der Trocknungsverlauf der Serie DEF „verputzte Steine“ approximiert. In diesem Fall bleibt die Widerstandsschicht unverändert beibehalten. Der Innenputz wird mit einem Rotkalk-Innenputz modelliert. Die Rechnungsergebnisse stimmen wegen fehlender Kennwerte für Kalk-Gips-Putz nicht genau mit den Messdaten überein, jedoch sind diese auf der sicheren Seite gehalten.

4.2.1 Nachberechnung der Trocknungsverläufe - Serie ABC „unverputzt“

Die Nachberechnung des Trocknungsverlaufes wird nach dem in Kapitel 4.1 beschriebenen Verfahren durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die ermittelten Transportkoeffizienten und Diffusionswiderstände.

Tabelle 2: Übersicht der ermittelten Transportkoeffizienten für die Steine ABC

	Stein A Thermoplan	Stein B Poroton Perlit	Stein C Poroton MW
U_{80} [kg/m ³]	2,5	7,3	3,0
μ -Wert [-]	4,76	6,9	4,19
$D_{ww, 80\% \text{ r.F.}}$	2E-14	4E-13	2E-13
$D_{ww, 90\% \text{ r.F.}}$		2,7E-12	
$D_{ww, 97\% \text{ r.F.}}$			2E-10
$D_{ww, 98\% \text{ r.F.}}$		8,8E-6	
$D_{ww, 99,4\% \text{ r.F.}}$	2E-7		
$D_{ww, 100\% \text{ r.F.}}$	2,2E-6	8,8E-4	8,0E-4

Die folgenden Diagramme zeigen, mit welcher Genauigkeit ein Trocknungsverlauf bei Anpassung der Transportkoeffizienten nachberechnet werden kann. Die in Tabelle 2 dargestellten Werte werden ebenfalls im nächsten Kapitel bei der Berechnung der Serie DEF „verputzt“ sowie der Serie GHI „verputzt und abgeschlagen“, verwendet. Die jeweiligen Feuchtespeicherfunktionen, Transportkoeffizienten, Wärmeübergangswiderstände und Diffusionswiderstände der Steine A, B und C werden bei weiteren Berechnungen auch beibehalten, da nur der Kapillartransport an der Grenzschicht durch den Putz beeinträchtigt werden kann und dieser durch das Ausbilden der Widerstandsschicht berücksichtigt ist. Somit ist es im Allgemeinen möglich, eine für die Praxis verwendbare Nachberechnung von Trocknungsverläufen hochgedämmter Mauerwerksteine mit Dämmeinlage bei unterschiedlichen Oberflächen durchzuführen.

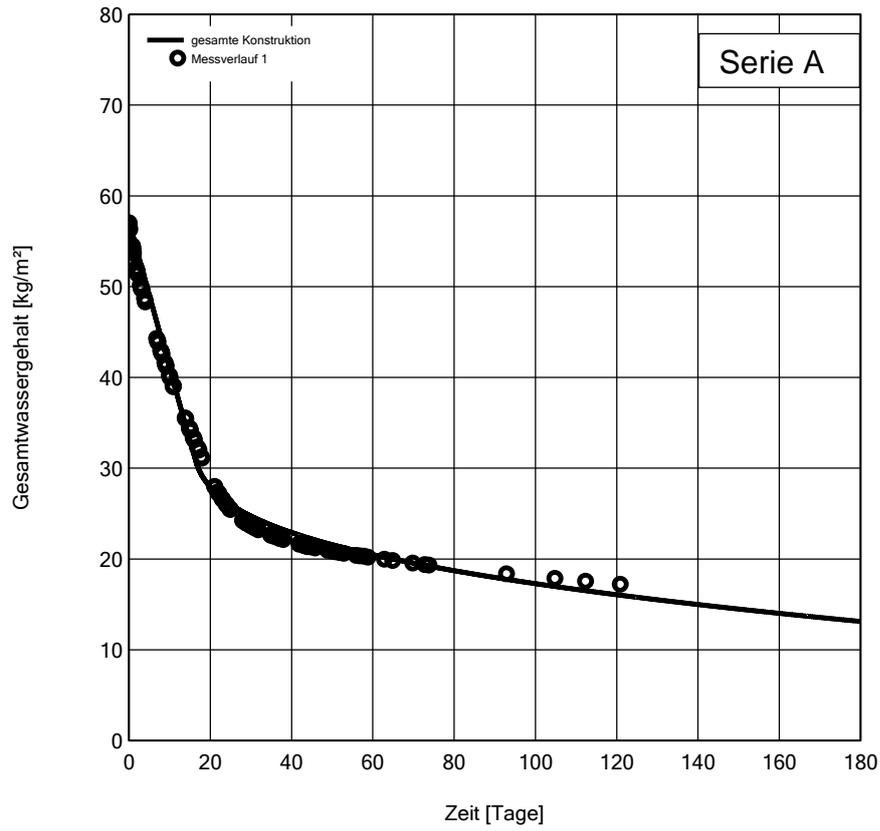


Abbildung 10: Nachberechnung der Serie A Thermoplan MZ7 verputzt

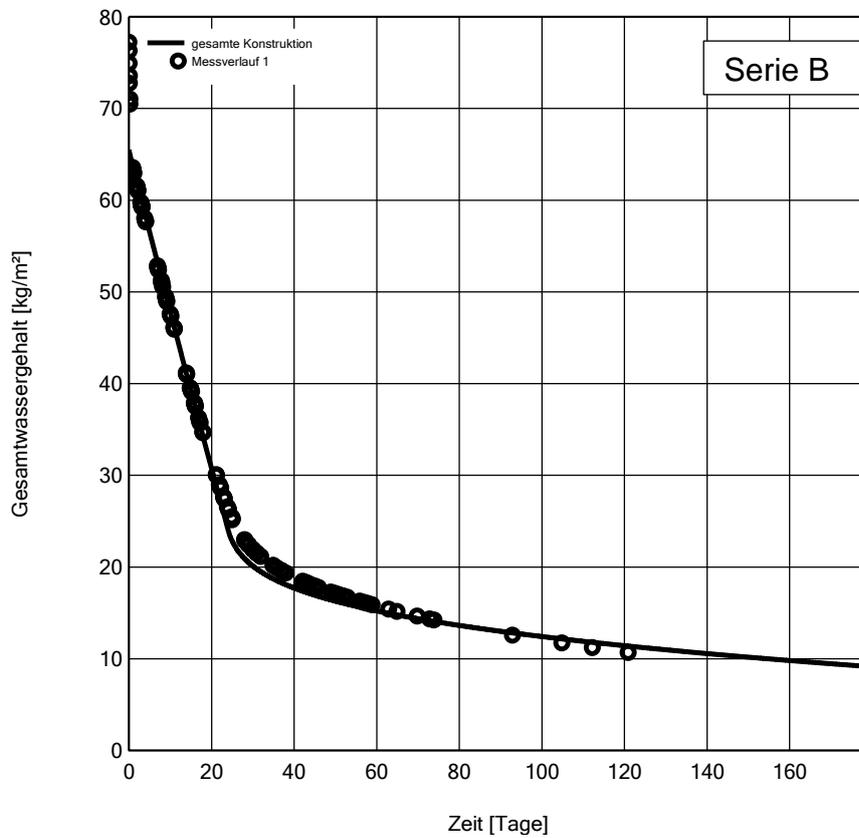


Abbildung 11: Nachberechnung Serie B Poroton T8 Perlit unverputzt

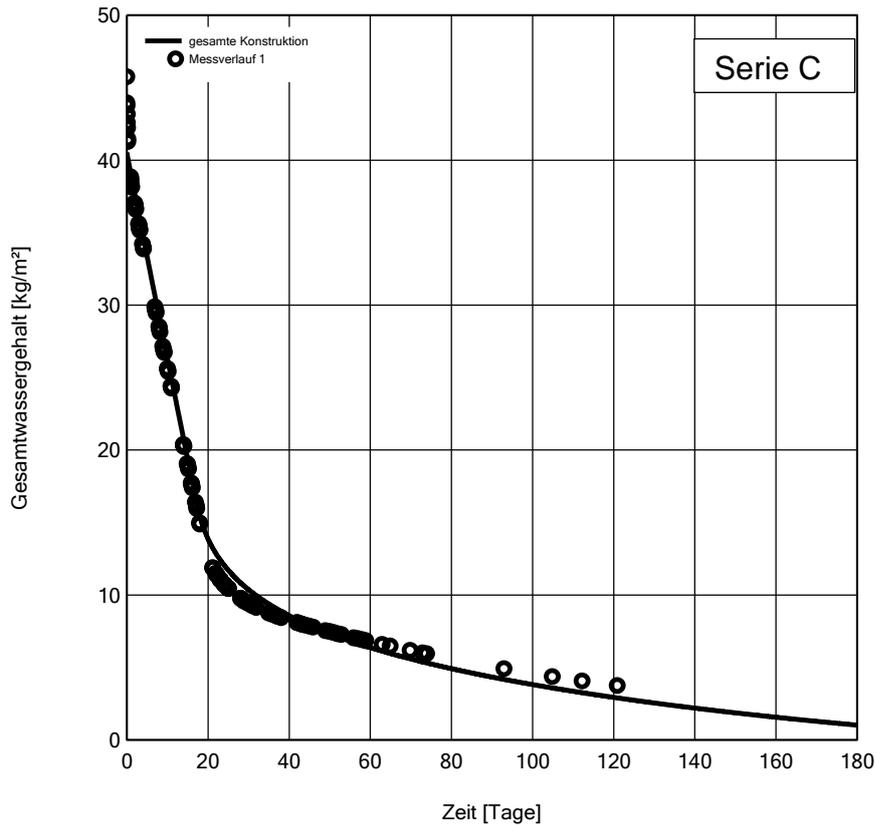


Abbildung 12: Nachberechnung Serie C Poroton T8 MW unverputzt

Alle drei Steine zeigen den gleichen Trocknungsverlauf. In den ersten 20 Tagen verläuft die Trocknung und somit die Verdunstung über den Flüssigtransport. Die Geschwindigkeit hängt vom flüssigen Nachtransport ab. In den Abbildungen 10 bis 12 ist zu erkennen, dass der Graph nach dem Knick deutlich flacher verläuft. Ab hier ist der Nachtransport über Diffusion zu erkennen. Die Steine der Serie C „Poroton Mineralwolle unverputzt“, siehe Abbildung 12, zeigen eine schnellere Trocknung. Dies liegt am niedrigeren Anfangswassergehalt beim Start des Trocknungsversuches. Die Steine haben nach dem Wasserbad nur ca. 24 Vol. % Wasser aufgenommen, wobei die Steine der beiden Serien A „Thermoplan Mineralwolle unverputzt“ und B „Poroton Perlit unverputzt“ jeweils einen Feuchtegehalt von ca. 40 Vol. % aufweisen.

4.2.2 Nachberechnung der Trocknungsverläufe - Serie GHI „verputzt und abgeschlagen“

Die Serie GHI repräsentiert die Situation nach einem Wasserschaden nach Abschlagen der Putzoberfläche. Bei der ersten Nachberechnung ist zu erkennen, dass der berechnete Trocknungsverlauf schneller erfolgt als der gemessene. Somit wird ersichtlich, dass durch das Aufbringen und Abschlagen der Putzschicht eine Widerstandsschicht an der Bauteiloberfläche entstanden ist. In dieser Widerstandsschicht sind die Transportkoeffizienten kleiner und der Diffusionswiderstand größer als im unverputzten Stein. Die erste Version berücksichtigt eine Anpassung der Transportkoeffizienten sowohl in der Widerstandsschicht als auch im kompletten Stein. Ebenfalls werden die Feuchtespeicherfunktion und die Wärmeübergangswiderstände angepasst. Diese Veränderung ist nicht sinnvoll und kann in der Realität auch so nicht auftreten. Bei dieser Art der Approximation ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung zu erkennen. Die Berechnungsvariante zeigt zwar, dass die Trocknungsverläufe sehr genau nachgerechnet werden können, eine Anwendung in der Praxis hier jedoch nicht möglich ist, da die individuelle Nachberechnung ausschließlich eine Prognose für den jeweiligen Stein darstellt, und keine allgemein gültigen Aussagen getroffen werden können. Außerdem ist eine unterschiedliche Widerstandsschicht nicht für jede Kombination aus Stein und Putz allgemein anwendbar. Deshalb werden in einer zweiten Version die Variablen der Widerstandsschicht nach einem möglichst einfachen Schema für alle Steine angepasst. Dies geht jedoch auf Kosten der Genauigkeit. Dafür ist der Ansatz aber universell einsetzbar. Die Rechenergebnisse geben den gemessenen Verlauf zwar nicht mit gleich guter Genauigkeit wieder, aber die Übereinstimmung ist noch ausreichend genau und der Datensatz somit verwendbar. Das Ergebnis zeigt, dass die in Tabelle 4 aufgeführten Transportkoeffizienten zur Approximation des gemessenen Trocknungsverlaufes auf der sicheren Seite liegen und somit in der Praxis einsetzbar sind. Tabelle 3 zeigt die angepassten Transportkoeffizienten anhand derer eine Nachberechnung des gemessenen Trocknungsverlaufes mit höchster Genauigkeit erzielt wird.

Tabelle 3: Übersicht der ermittelten Transportkoeffizienten zur genauen Nachberechnung der Serie GHI

	Stein G Thermoplan		Stein H Poroton Perlit		Stein I Poroton MW	
U_{80} [kg/m ³]	2,5		7,3		3,0	
μ -Wert [-]	4,76		6,9		4,19	
	Stein	Widerstandsschicht	Stein	Widerstandsschicht	Stein	Widerstandsschicht
$D_{ww, 80\% \text{ r.F.}}$	8E-12	7E-14	2,7E-12	7E-14	7E-10	7E-13
$D_{ww, 98\% \text{ r.F.}}$		1E-13		8E-13		1E-12
$D_{ww, 99,4\% \text{ r.F.}}$	6E-8	8E-12		8E-9		4E-9
$D_{ww, 100\% \text{ r.F.}}$	2,2E-6	8E-9	8,8E-6	8E-7	8E-5	8E-7

Im Zuge der Nachberechnung der unbehandelten Steine werden bei den Poroton-Steinen ausschließlich Transportkoeffizienten beim Sättigungswassergehalt und beim Bezugsfeuchtegehalt verwendet. Um eine hohe Übereinstimmung auch beim Thermoplan-Stein zu erzielen, wird eine weitere Stützstelle bei 99,4 % r.F. festgelegt. Bei der Modellierung der Widerstandsschicht wird zusätzlich die Verwendung von Stützstellen bei 99,4 % r.F. und 98 % r.F. benötigt.

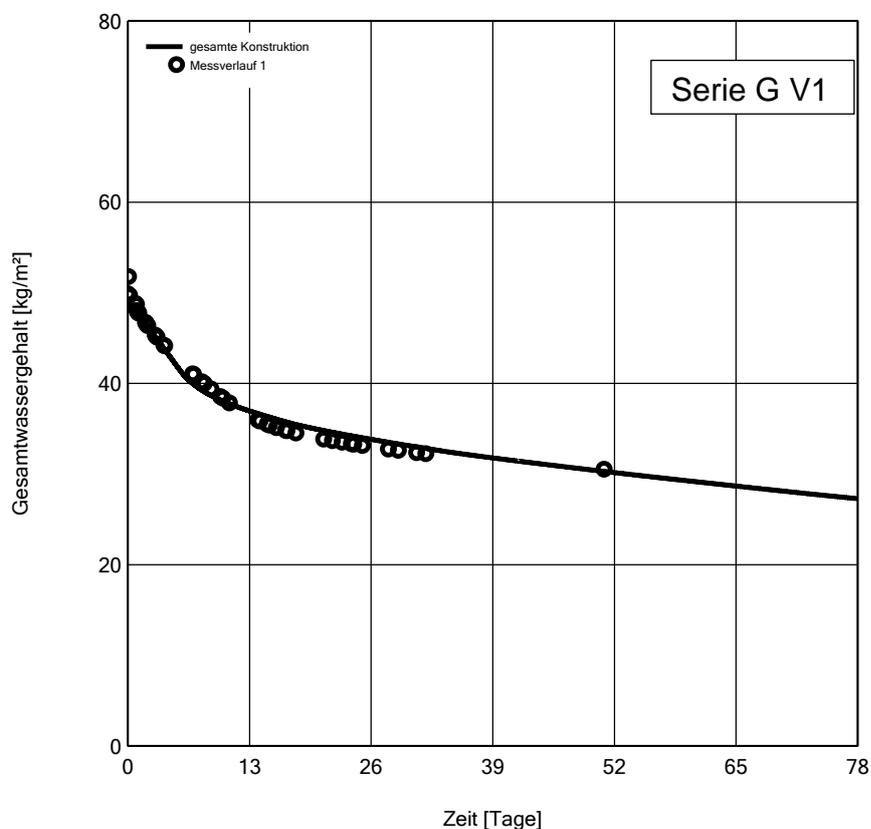


Abbildung 13: Nachberechnung der Serie G Thermoplan MZ7 mit angepasstem Datensatz

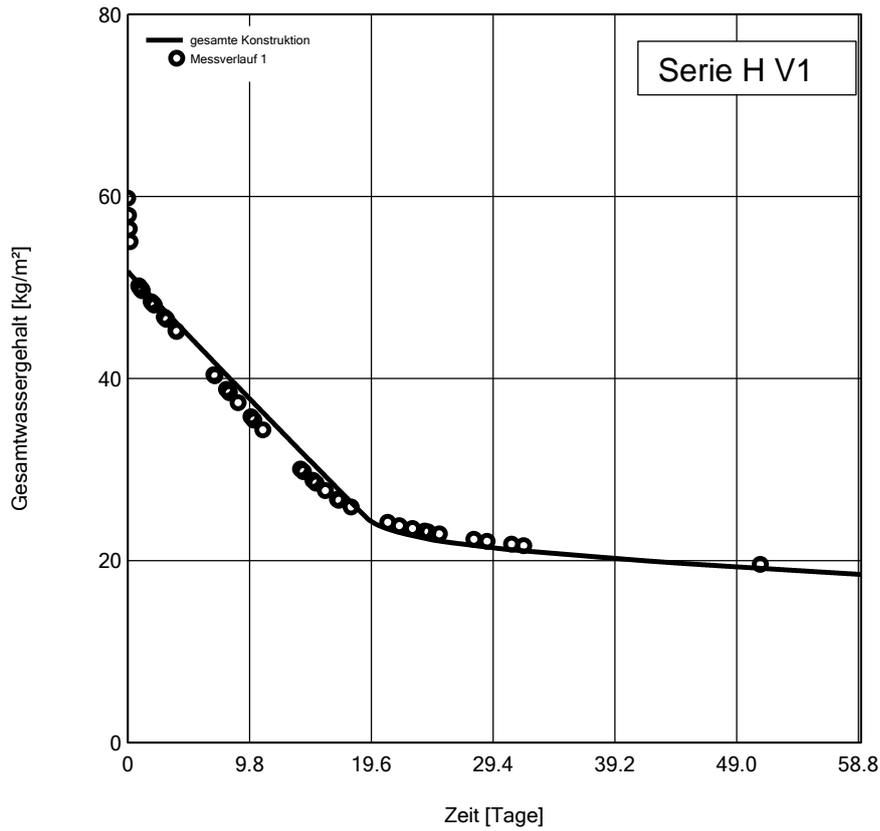


Abbildung 14: Nachberechnung der Serie H Poroton T8 Perlit mit angepasstem Datensatz

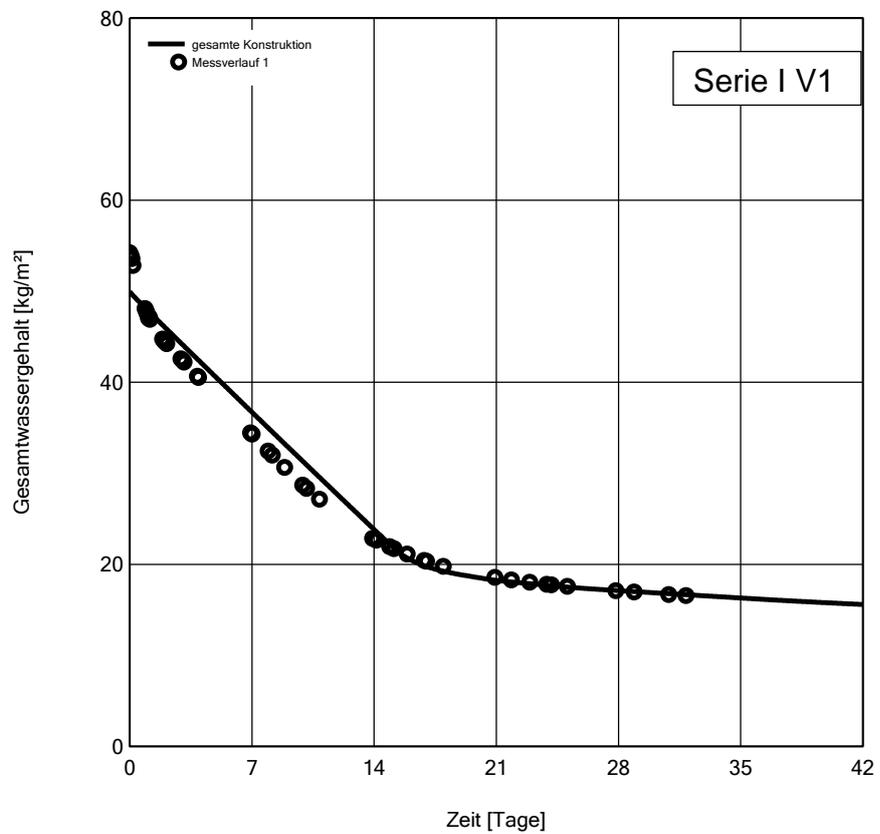


Abbildung 15: Nachberechnung der Serie I Poroton T8 MW mit angepasstem Datensatz

Die zweite Version der Berechnung ist in der Praxis verwendbar. Hier wird zur Modellierung des Steines der Datensatz der Steine der Serie ABC unverändert übernommen. Zusätzlich wird an der Oberfläche eine Widerstandsschicht aufgebracht. Zur Modellierung dieser Widerstandsschicht wird ein allgemeines Schema entwickelt, mit dem die Variablen der Widerstandsschicht immer gleich angepasst werden können:

- Über iterative Berechnung wird die Widerstandsschicht an der Materialgrenzschicht von 5 mm ermittelt.
- In dieser Widerstandsschicht verringern sich die Transportkoeffizienten um das 200-fache.
- Die Diffusionswiderstände in der Widerstandsschicht steigen um den Faktor 40.

Mit dem erarbeiteten Schema verringert sich der Flüssigtransport um den Faktor 200 und der Diffusionswiderstand erhöht sich um den Faktor 40.

Mit dieser pauschalen Anpassung ist ebenfalls eine gute Nachberechnung der Messung möglich.

Tabelle 4: Übersicht der ermittelten Transportkoeffizienten für die Steine GHI

	Stein G Thermoplan		Stein H Poroton Perlit		Stein I Poroton MW	
	Stein	Widerstandsschicht	Stein	Widerstandsschicht	Stein	Widerstandsschicht
U_{80} [kg/m ³]	2,5		7,3		3,0	
μ -Wert [-]	4,76	190,4	6,9	276	4,19	167,6
$D_{ww, 80\% \text{ r.F.}}$	2E-14	2E-16	4E-13	4E-15	2E-13	2E-15
$D_{ww, 90\% \text{ r.F.}}$			2,7E-12	2,7E-14		
$D_{ww, 97\% \text{ r.F.}}$					2E-10	2E-12
$D_{ww, 98\% \text{ r.F.}}$			8,8E-6	8,8E-8		
$D_{ww, 99,4\% \text{ r.F.}}$	2E-7	2E-9				
$D_{ww, 100\% \text{ r.F.}}$	2,2E-6	2,2E-8	8,8E-4	8,8E-6	8,0E-4	8,0E-6

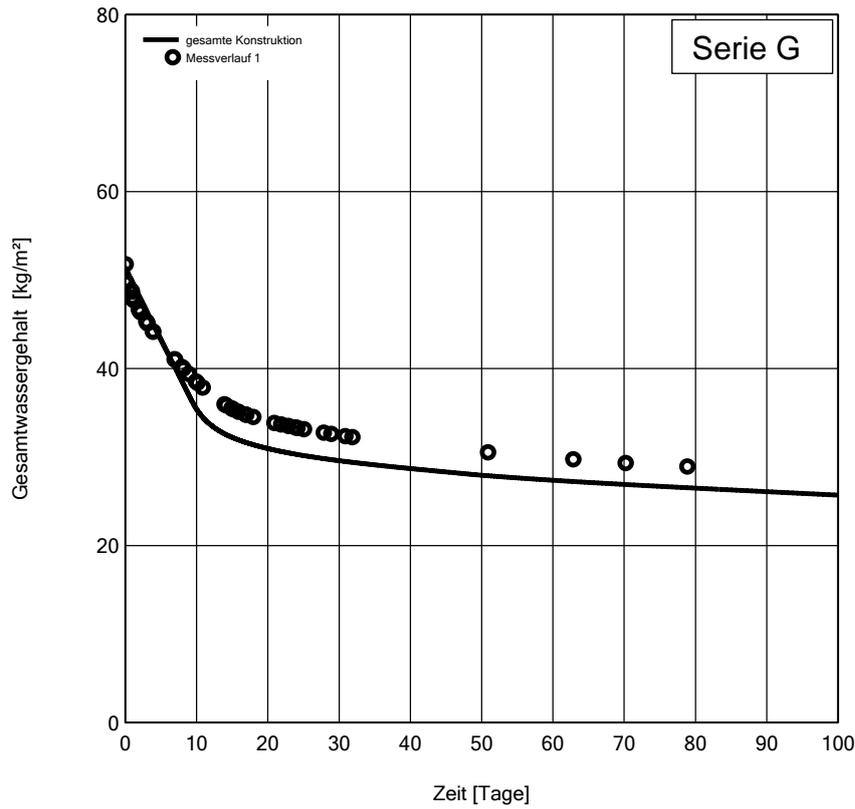


Abbildung 16: Nachberechnung Serie G Thermoplan MZ7 verputzt und abgeschlagen

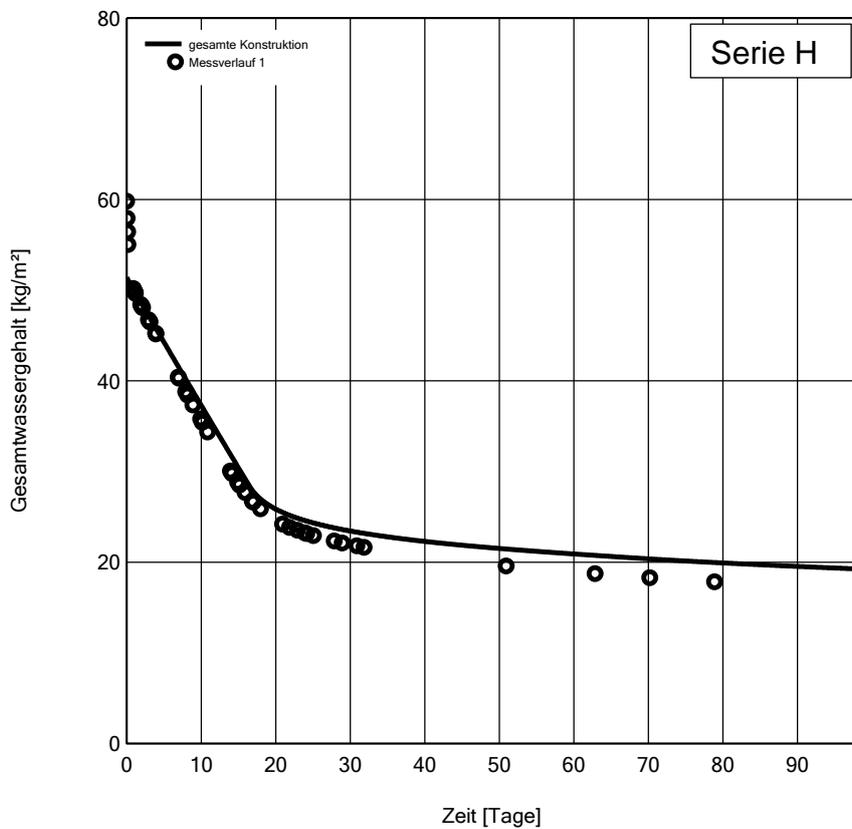


Abbildung 17: Nachberechnung Serie H Poroton T8 Perlit verputzt und abgeschlagen

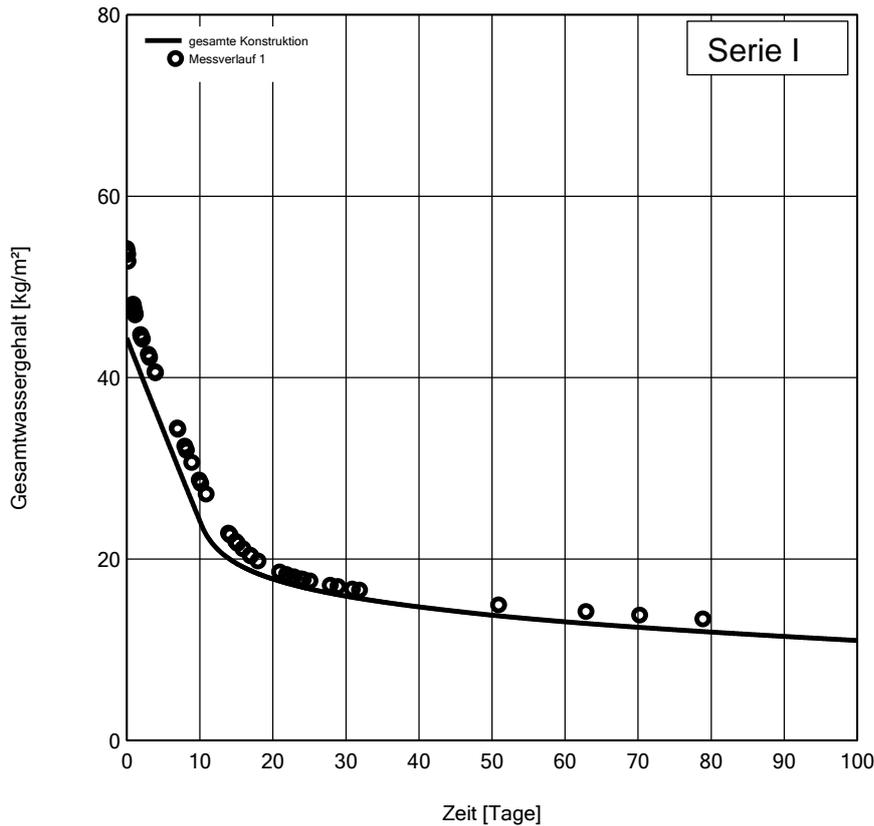


Abbildung 18: Nachberechnung Serie I Poroton T8 MW verputzt und abgeschlagen

Die abweichenden Startwassergehalte sind einerseits durch die unterschiedlichen Geometrien der Steine zu erklären. Dies resultiert aus dem Halbieren der Steine durch den mittleren Steg. Andererseits ergeben sich die ungleichen Startwassergehalte aus den unterschiedlich langen Aufenthalten im Wasserbad. Die in Abbildung 16 bis 18 dargestellten Kurven können als sinnvolles Ergebnis gesehen werden – vor allem mit Berücksichtigung der Tatsache, dass die Eingangsgrößen wie Transportkoeffizienten, Diffusionswiderstände und Feuchtespeicherfunktionen komplett von dem Datensatz der Serie ABC „unverputzte Oberfläche“ übernommen werden und die Widerstandsschicht mit oben beschriebenem Schema angepasst wird. Diese Annäherung gilt als absolut sinnvoll und stellt keinerlei Einschränkungen dar.

4.2.3 Nachberechnung der Trocknungsverläufe - Serie DEF „verputzt“

Die Serie DEF stellt eine Oberfläche bei einem Wasserschaden ohne Abschlagen des Putzes dar. Bei der Nachberechnung werden, wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, zwei Versionen erstellt. Das Ziel der ersten Version ist es, eine möglichst genaue Nachberechnung der gemessenen Trocknungsverläufe zu erhalten. Sie berücksichtigt eine Anpassung der Transportkoeffizienten sowohl in der Widerstandsschicht als auch im kompletten Stein. Diese Veränderung ist nicht sinnvoll und kann in der Realität auch so nicht auftreten. Außerdem werden die genauen Materialkennwerte der verwendeten Putzschicht in dieser Arbeit nicht untersucht. Somit ergibt sich selbst bei individueller Anpassung des Datensatzes für den Stein und die Widerstandsschicht keine bessere Näherung als durch die Modellierung der Widerstandsschicht mit dem in Kapitel 4.2.2 dargestellten Schema und der Übernahme des Ausgangsdensatzes. Auf die Darstellung der ersten Berechnungsdurchläufe wird hier somit verzichtet. Die zweite Version der Berechnung ist praxistauglich. Hier wird der ermittelte Datensatz von den Steinen der Serie ABC unverändert übernommen und eine Widerstandsschicht aufgebracht. Außerdem wird ein Rotkalkputz zur Approximation des verwendeten Kalk-Gips-Putzes in der Rechnung verwendet. Die Berechnung berücksichtigt eine Widerstandsschicht gemäß Kapitel 4.2.2. Der Diffusionswiderstand der Putzschicht und des Farbanstriches wird zu $\mu = 34,56$ im Labor ermittelt. Die fehlenden Transportkoeffizienten des Kalk-Gips-Putzes sind annäherungsweise aus der Datenbank von WUFI für Rotkalkputz übernommen. Tabelle 5 zeigt die verwendeten Eingangsgrößen für die Nachberechnung der verputzten Steine Serie DEF bei Übernahme des ursprünglichen Datensatzes und der nach dem Schema in Kapitel 4.2.2 angepassten Widerstandsschicht.

Tabelle 5: Übersicht der verwendeten Eingangsgrößen für die Nachberechnung der Steine DEF

	Stein D Thermoplan MZ7			Stein E Poroton T8 Perlit			Stein F Poroton T8 MW		
	Stein	Widerstands- schicht	Putz	Stein	Widerstands- schicht	Putz	Stein	Widerstands- schicht	Putz
U_{80} [kg/m ³]	2,5		10,6	7,3		10,6	3,0		10,6
μ -Wert [-]	4,76	190,4	34,56	6,9	276	34,56	4,19	167,6	34,56
D_{ww} , 80 % r.F.	2E-14	2E-16	2,2E-10	4E-13	4E-15	2,2E-10	2E-13	2E-15	2,2E-10
D_{ww} , 90 % r.F.				2,7E-12	2,7E-14				
D_{ww} , 97 % r.F.							2E-10	2E-12	
D_{ww} , 98 % r.F.				8,8E-6	8,8E-8				
D_{ww} , 99,4 % r.F.	2E-7	2E-9							
D_{ww} , 100 % r.F.	2,2E-6	2,2E-8	2,7E-9	8,8E-4	8,8E-6	2,7E-9	8,0E-4	8,0E-6	2,7E-9

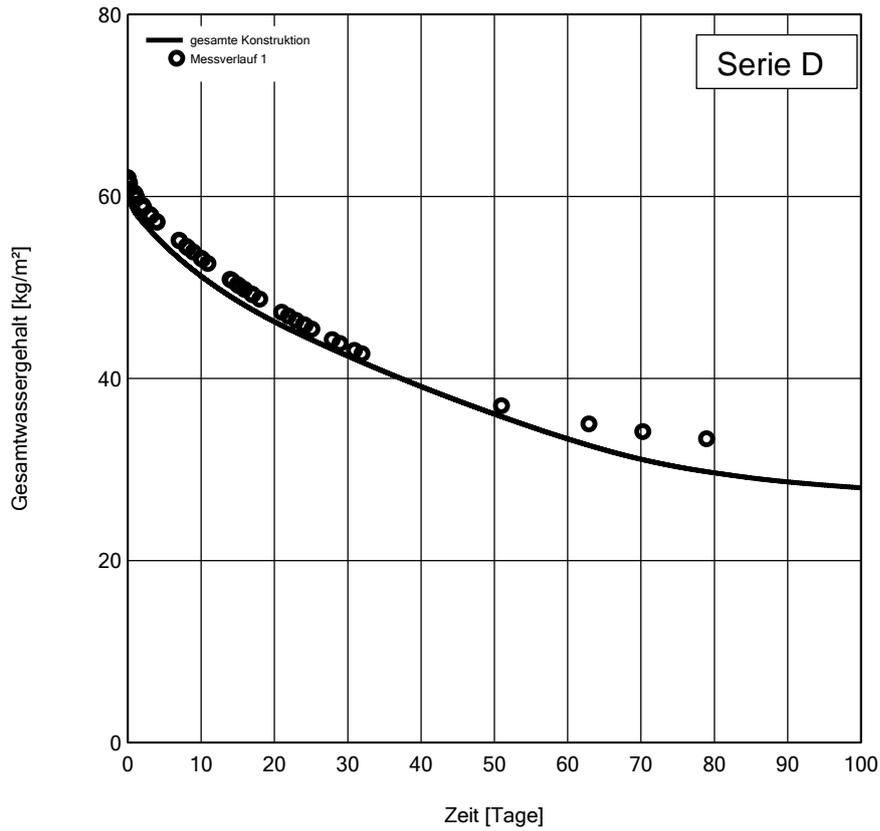


Abbildung 19: Nachberechnung Serie D Thermoplan MZ7 verputzt

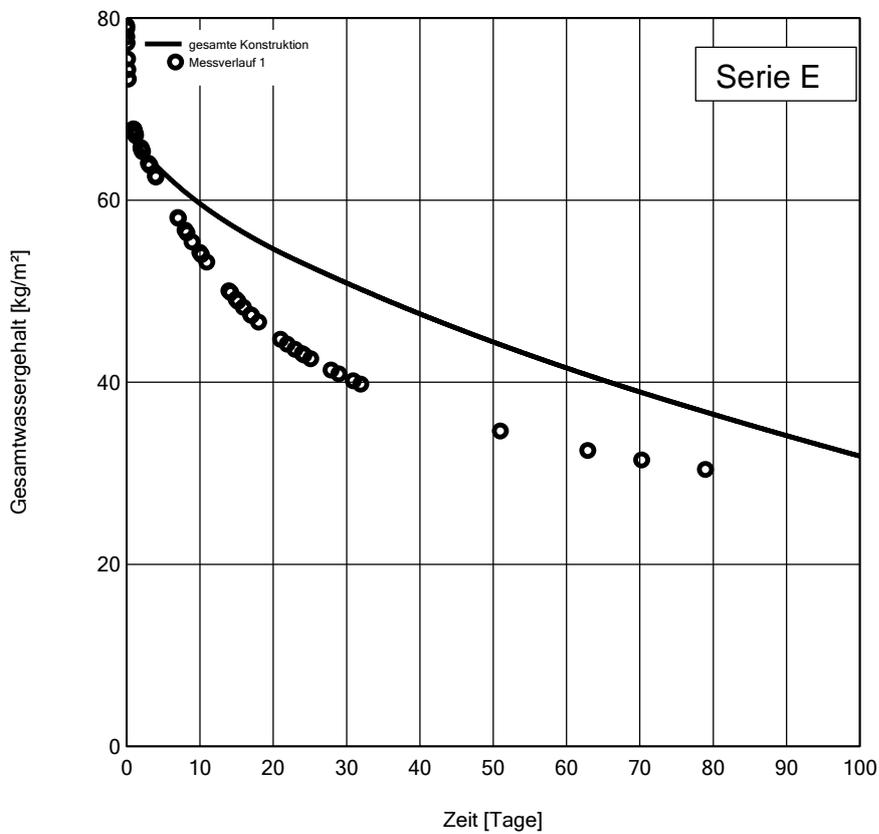


Abbildung 20: Nachberechnung Serie E Poroton T8 Perlit verputzt

Die Abweichungen zwischen Rechnung und Messung sind durch folgende Punkte zu erklären:

- 1.) Da die genauen Materialkennwerte und die Transportkoeffizienten des verwendeten Kalk-Gips-Putzes nicht bekannt sind, werden in der Serie DEF (verputzte Oberfläche) die Daten für Rotkalkputz aus der WUFI Datenbank verwendet. Dieser Putz zeigt die höchste Übereinstimmung mit dem verwendeten Kalk-Gips-Putz. Der Diffusionswiderstand der Putzschicht inklusive Farbanstrich wird jedoch anhand einer Putzprobe des verwendeten Kalk-Gips-Putzes ermittelt und in der Berechnung berücksichtigt.
- 2.) Die Unterschiede in der Geometrie der Steine sind auf das Halbieren der Steine zurückzuführen. Hierbei wurden die Steine in der Mitte des mittleren Steges durchgeschnitten. Durch diesen Arbeitsschritt kam es teilweise zu Absplitterungen des geschnittenen Steges.

4.2.4 Nachberechnung der Versuche im Klimaschrank bei 40 °C und 65 % r.F.

Um den Datensatz der Serie ABC unverputzt (Ausgangsdatensatz) auch bei anderen Randbedingungen als den gemessenen mit 23 °C und 65 % r.F. auf Plausibilität zu testen, wird ein Trocknungsversuch der Serie ABC unverputzt in einem Klimaschrank bei 40 °C und 65 % r.F. gewählt. Die Eingangsgrößen zur Berechnung der Trocknungsverläufe bei 40 °C und 65 % r.F. entsprechen dem Datensatz der Serie ABC. Diese sind in Tabelle 2 zu finden. Erwartungsgemäß verläuft der Trocknungsverlauf der Steine schneller als beim Versuch mit 23 °C und 65 % r.F.. Dies liegt daran, dass bei steigender Temperatur der Wasserdampfgehalt in der Luft ebenfalls steigt. Ein Raum bei 23 °C/ 65 % r.F. kann somit maximal 11,5 g/kg Luft aufnehmen. Die Wichte von Luft entspricht 1,19 kg/m³. Somit ist es möglich 13,685 g/m³ Feuchte aufzunehmen. Ein Raum bei 40 °C/ 65 % r.F. kann maximal 29,0 g/kg Luft aufnehmen. Folglich können 34,51 g/m³ Feuchte aufgenommen werden. Berechnet man das „Trocknungspotential“ bei den unterschiedlichen Temperaturen, ergibt sich ein Faktor von 2,5. Die Trocknung verläuft entlang des Partialdampfdruckgefälles. Multipliziert man die relative Feuchte mit dem Wasserdampf-sättigungsdruck erhält man den Partialdampfdruck. Der Wasserdampf-sättigungsdruck wiederum ist abhängig von der

Temperatur und kann aus Tabellenwerken abgelesen werden. Die Konzentration der absoluten Feuchte in kg/m^3 in der Luft lässt sich bestimmen indem der Partialdampfdruck durch die Temperatur in Kelvin multipliziert mit der Gaskonstante für Wasserdampf = $0,462 \text{ kJ}/(\text{kg K})$ dividiert wird.

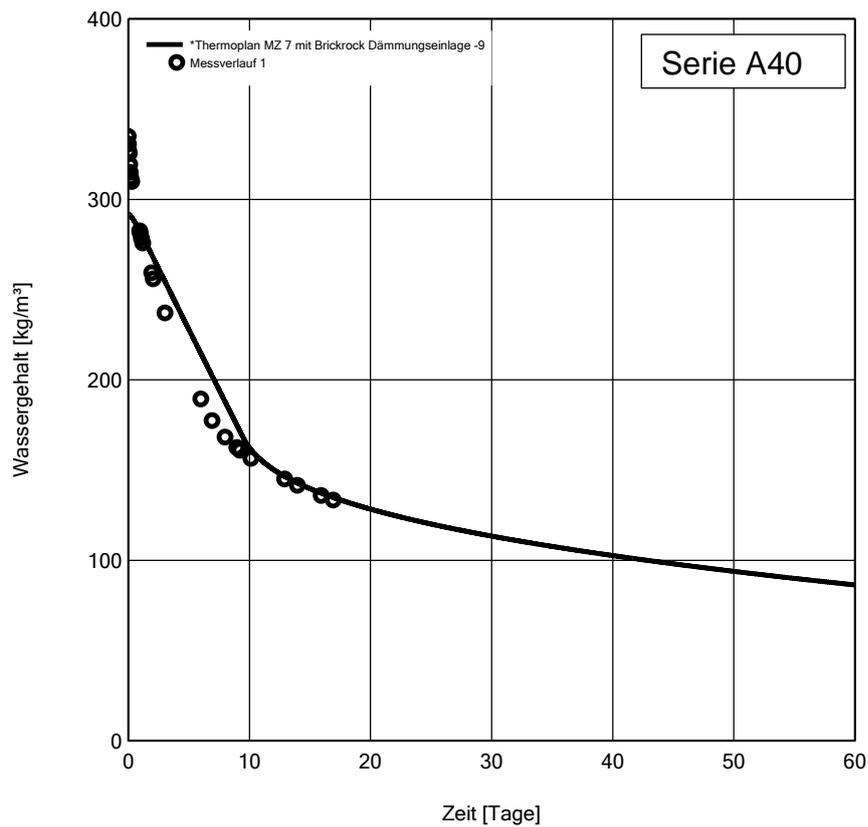


Abbildung 21: Nachberechnung 40 °C Serie A Thermoplan MZ7 unverputzt

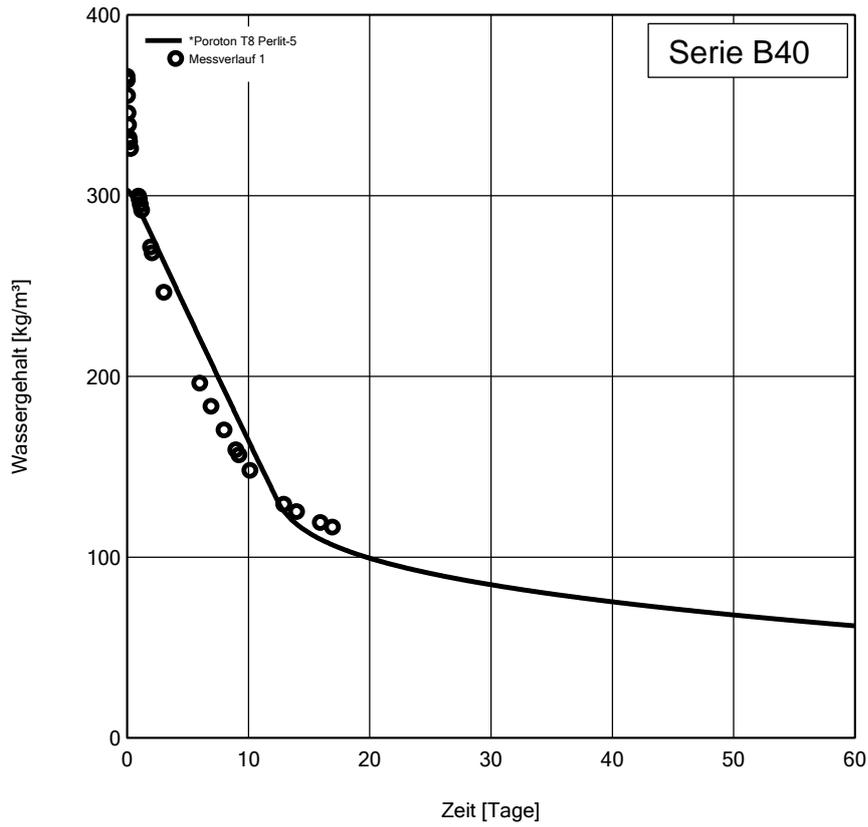


Abbildung 22: Nachberechnung 40 °C Serie B Poroton T8 Perlit unverputzt

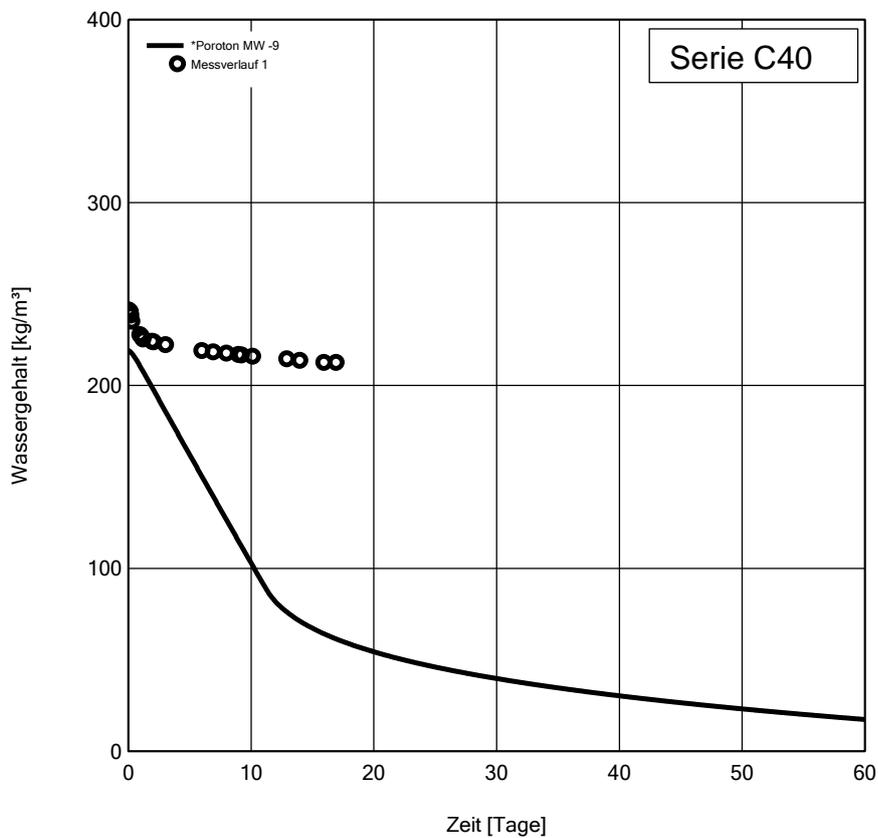


Abbildung 23: Nachberechnung 40 °C Serie C Poroton T8 Mineralwolle unverputzt

Abbildung 23 zeigt den Trocknungsverlauf eines Steines der Serie C, Poroton T8 mit Mineralwolle. Der Stein verliert im Verlauf der ersten 20 Tage im Trockenschrank bei 40 °C und 65 % r.F. nahezu keine Feuchte. Er zeigt sich auch auffällig durch seine deutlich geringere Wasseraufnahme in der freien Wassersättigung. Dieser Stein liefert ebenfalls bei der Nachberechnung der verputzten Steine ein unbefriedigendes Ergebnis. Die beiden Berechnungsverläufe der Steine A, Thermoplan MZ7, und B, Poroton T8 Perlit, zeigen eine für die Bemessung auf der sicheren Seite ausreichend gute Übereinstimmung mit den Messverläufen. Der Versuch im Klimaschrank wird mit einem Umlaufventilator durchgeführt. Somit herrscht im Klimaschrank ein anderer Wärmeübergangskoeffizient als in der Klimakammer. Durch das Verwenden der ermittelten Datensätze der Serie ABC wird bei der Nachberechnung des Trocknungsverlaufes im Klimaschrank bei 40 °C der Wärmeübergangskoeffizient der Klimakammer übernommen. Trotz Übernahme der ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten aus der Klimakammer für die Berechnungen der Trocknungsverläufe im Klimaschrank ist keine Abweichung bei der Nachberechnung des Trocknungsverlaufes im Anfangsbereich zu erkennen.

4.2.5 Vergleich der Trocknungsverläufe hochgedämmter Mauerwerksteine mit Dämmeinlage und bereits untersuchten Mauerwerksteinen

Bedingt durch die höheren Anforderungen der heutigen Energieeinsparverordnung (EnEV) sind Bauteile mit dicker Wärmedämmung nötig. Speziell die in dieser Arbeit untersuchten hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage sollen im Folgenden mit hochdämmenden Mauerwerksteinen ohne Dämmeinlage hinsichtlich des Trocknungsverhaltens verglichen werden. Dabei geht es um die Frage, ob bei Wasserschäden der Rücktrocknungsprozess von hochgedämmten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage langsamer verläuft als bei herkömmlichen, porosierten Hochlochziegeln, welche als hochgedämmte Mauerwerksteine ohne Dämmeinlage gelten. In so einem Fall müssten die Versicherungen überlegen, ob höhere Prämien bei Wasserschäden gerechtfertigt wären.

Es werden die Trocknungsverläufe von folgenden Steinen verglichen:

- | | |
|---|-------------------------|
| • Serie A Thermoplan MZ7 mit Mineralwollfüllung | $\lambda = 0,07$ [W/mK] |
| • Serie B Poroton T8 mit Perlitfüllung | $\lambda = 0,08$ [W/mK] |
| • Serie C Poroton T8 mit Mineralwollfüllung | $\lambda = 0,08$ [W/mK] |
| • Porenbeton | $\lambda = 0,14$ [W/mK] |
| • Bimsbeton | $\lambda = 0,14$ [W/mK] |
| • Blähton | $\lambda = 0,13$ [W/mK] |
| • Porosierter Hochlochziegel 650 | $\lambda = 0,13$ [W/mK] |

Die im Rahmen der Arbeit ermittelten Datensätze der Serie A, B und C werden bei den Vergleichsrechnungen verwendet. Die Trocknungsverläufe für die Steine Porenbeton, Bimsbeton, Blähton und dem porosierten Hochlochziegel werden mit bereits vorhandenen Datensätzen aus WUFI berechnet.

Den Vergleichsberechnungen sind folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

- 36,5 cm Mauerwerkstärke bei allen Steintypen als Außenwand ohne Verputz.
- Die Steine sind wassergesättigt. Temperatur und Feuchte sind zum Start der Berechnung im gesamten Bauteil konstant.
- Orientierung: 90 ° Nord.
- Kein Regen.
- Außenklima Holzkirchen.
- Wärmeübergangswiderstand 0,1 [m²K/W].
- Innentemperatur 20 °C, 50 % r.F..

Für den Vergleich der Trocknungsverläufe des Mauerwerks werden zwei Kriterien untersucht: Zum einen der Zeitpunkt, an dem die gemittelte Feuchte in der ganzen Außenwand auf 80 % r.F. abgenommen hat. Zum anderen der Zeitpunkt, an dem die relative Feuchte an der inneren Oberfläche der Außenwand 70 % r.F. unterschreitet. Ab dem Zeitpunkt ist eine Gefahr von Schimmelpilzbildung auch im Sommer sicher ausgeschlossen.

4.2.5.1 Ermittlung des Zeitpunktes, an dem die gemittelte Feuchte in der Außenwand 80 % r.F. unterschreitet

Mit dem ermittelten Datensatz der Steine der Serie A, B und C lässt sich nun folgender rechnerischer Vergleich anstellen: Eine mittlere relative Feuchte von 80 % im Stein wird

bei jedem Baustoff individuell in Abhängigkeit seiner Feuchtespeicherfunktion, des Diffusionswiderstandes, der Flüssigkeitstransportkoeffizienten und der Anfangsfeuchte erreicht. Jedes der unter Abbildung 24 dargestellten Materialien weist bei einer relativen Feuchte von 80 % einen anderen Wassergehalt auf. Diese sind in Tabelle 6 aufgeführt. In Tabelle 6 ist außerdem abzulesen, dass der Thermoplanstein bei einem Wassergehalt von $2,5 \text{ kg/m}^3$ den Bezugsfeuchtegehalt von 80% mittlerer relativer Feuchte erreicht. Abbildung 24 zeigt den Trocknungsverlauf der untersuchten Steine in kg/m^3 in Abhängigkeit der Zeit in Monaten. Betrachtet man die dünne, grün durchgezogene Linie des Thermoplansteines, so kann man beim Erreichen des Wertes von $2,5 \text{ kg/m}^3$ auf der y-Achse eine Zeit von ca. 34 Monaten auf der x-Achse ablesen. Der Vergleich zwischen den verschiedenen Steinen zeigt, dass keine bedeutenden Unterschiede zwischen hochgedämmten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage und porierten Hochlochziegeln im Trocknungsverlauf hinsichtlich der Trocknungsgeschwindigkeit zu erkennen sind.

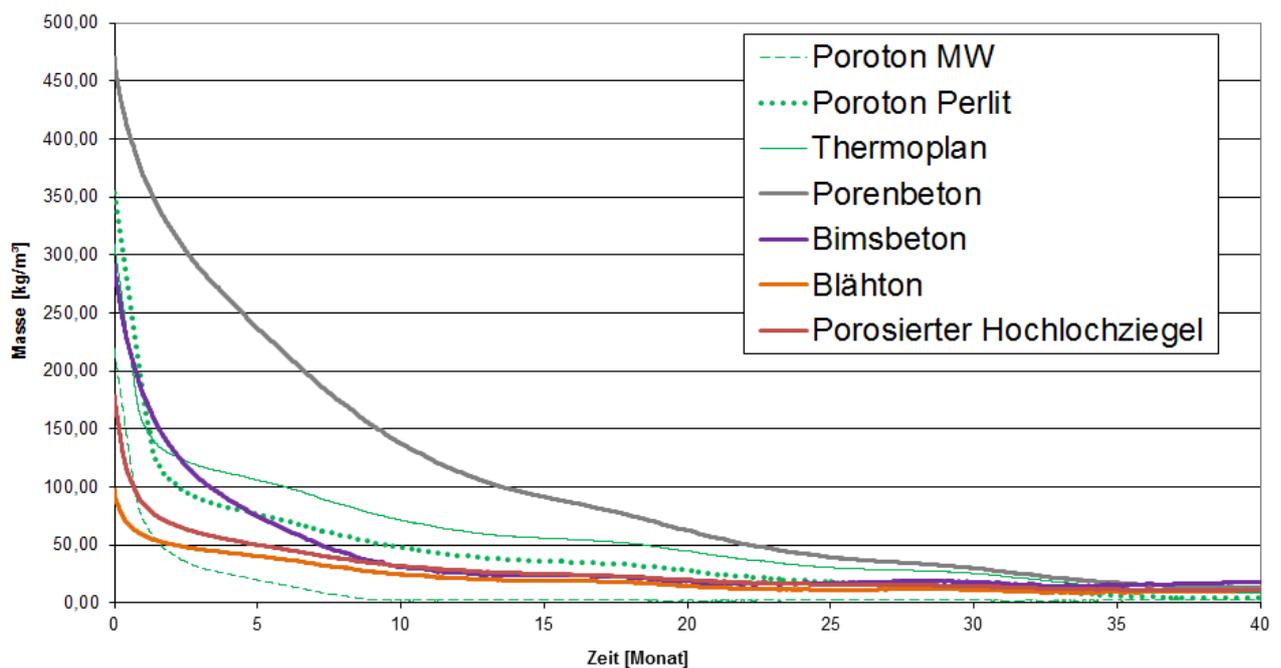


Abbildung 24: Vergleich des Trocknungsverhaltens der untersuchten Steine mit herkömmlichen Steine

Tabelle 6: Darstellung der Bezugsfeuchtegehalte und der verglichenen Baustoffe

		U₈₀		70 % r.F.
		kg/m ³	Jahre bis zu U ₈₀	in Monaten
A	Thermoplan MZ7	2,50	2,8	0,9
B	Poroton T8 Perlit	7,30	2,7	1,4
C	Poroton T8 MW	3,00	1	0,8
	Porosierter Hochlochziegel	15,00	2,5	0,4
	Blähton	17,00	1,6	0,1
	Bimsbeton	28,00	1,4	0,7
	Porenbeton	10,70	2,6	0,5

In Tabelle 6 sind die Wassergehalte bei Erreichung von 80 % r.F. und die dazugehörige Trocknungszeit dargestellt. In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, dass die Feuchtespeicherfunktionen vom Verfasser ausschließlich bei den Steinen A, B und C in der Klimakammer genau ermittelt wurden. Die Werte der anderen Steine wurden aus der Datenbank von WUFI übernommen.

4.2.5.2 Ermittlung des Zeitpunktes, an dem eine relative Feuchte von 70% an der inneren Oberfläche der Außenwand unterschritten wird

Das Unterschreiten der relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % an der Innenoberfläche ist hinsichtlich des Schimmelwachstums interessant. Die in Abbildung 25 dargestellten Feuchteverläufe zeigen, dass die in dieser Arbeit untersuchten Steine Thermoplan MZ7, Poroton T8 Perlit und Poroton T8 MW einen verzögerten Feuchteabfall im Vergleich zu den anderen Steinen aufweisen. Dies liegt daran, dass die ermittelten Feuchtespeicherfunktionen erst im hohen Feuchtebereich von ca. 98 % r.F. steil ansteigen. Obwohl die Verdunstungsmasse bei allen Steinen gleich groß ist, ist die Abnahme der relativen Feuchte somit nur gering. Durch die Dämmeinlagen in den Kammern ist genügend Feuchte gespeichert, um über den kapillaren Nachtransport für lang andauernde, hohe Feuchte an der Oberfläche zu sorgen. Sobald der Flüssigtransport nicht mehr ausreichend Feuchte an die Oberfläche transportiert, ist ein starker Abfall der Kurve zu erkennen. Ab diesem Zeitpunkt sinkt die relative Feuchte. Die Oberflächenfeuchte von 70 % wird somit bei den hochgedämm-

ten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage nach ungefähr einem Monat unterschritten. Die restlichen untersuchten Steine benötigen nur ca. einen halben Monat.

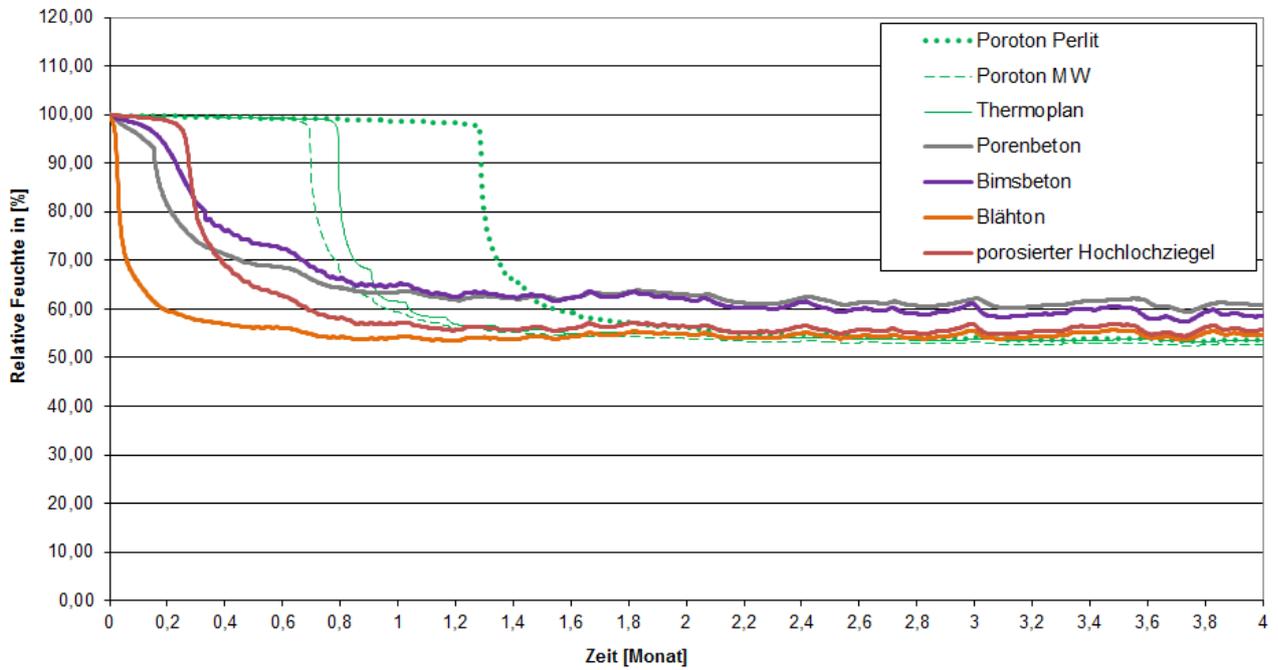


Abbildung 25: Vergleich unterschiedlicher Steinarten bis zur Unterschreitung von 70 % r.F. an der Oberfläche

5 Ansatz zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die herkömmliche Methode zur Beschleunigung der Rücktrocknung von verputzten Wänden nach einem Wasserschaden ist das Abschlagen der Putzschicht. Nach vollständiger Trocknung wird diese wieder aufgebracht und gestrichen. Dieser Prozess ist mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden.

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, entsteht durch das Aufbringen einer Putzschicht eine Widerstandsschicht. Diese bleibt trotz Entfernen der Putzschicht bestehen und hat einen erheblichen Einfluss auf den Trocknungsverlauf. Somit stellt sich die Frage, unter welchen Umständen das Putzabschlagen eventuell unterbleiben kann und welcher finanziellen Mehraufwand für die Trocknung damit verbunden wäre? Die folgende Beispielbetrachtung erfolgt in zwei Schritten:

- 1. Schritt:** Ermittlung von Randbedingungen, die eine Rücktrocknung bei Erhaltung der Putzschicht berücksichtigen. Hierbei ist das Ziel, dass die Trocknung mit Putz oder abgeschlagenem Putz zeitlich gleichschnell verlaufen soll.
- 2. Schritt:** Berechnung der Kosten für die Erstellung der nötigen Randbedingungen wie in Kapitel 5.1 ermittelt. Bedingt durch die Schwankungen der Energiepreise sieht sich der Verfasser dieser Arbeit nicht in der Lage, eine belastbare Berechnung anzustellen. Der Energieverbrauch kann mit Hilfe einer Raumsimulation bestimmt werden.

5.1 Iterative Ermittlung von Randbedingungen

Im Folgenden werden durch einen iterativen Prozess die Randbedingungen wie die relative Luftfeuchte und die Temperatur angepasst, bis eine nahezu gleiche Trocknungsgeschwindigkeit im Wasserschadenfall von Fall 1 „Mauerwerksteine mit abgeschlagenem Putz“ verglichen mit Fall 2 „Mauerwerksteine verputzt“ auftritt. Da die Ergebnisse der nachberechneten Trocknungsversuche mit den Steinen der Serie E Poroton T8 Perlit „verputzt“ die höchste Korrelation zum gemessenen Trocknungsverlauf ergeben hat, wird der

Datensatz dieses Steines in den folgenden Rechnungen exemplarisch verwendet. Folgende Materialdaten werden verwendet:

Konstruktion:

- 1.) Außenputz: Zementputz 1,5 cm
- 2.) Mauerwerk: T8 Poroton Perlit 36,5 cm
- 3.) Innenputz: Kalk-Gips-Putz 1,0 cm

Klimarandbedingungen:

Innenklima: 20 °C, 50 % r.F. konstant

Außenklima: Holzkirchen stündliche Messdaten

Zur Modellierung der Konstruktion für Fall 1 „Mauerwerksteine mit abgeschlagenem Putz“ werden die in Kapitel 4 ermittelten Werte verwendet:

Tabelle 7: Datensatz Serie E Poroton Perlit

	Stein E Poroton Perlit	
	Stein	Widerstandsschicht
U_{80} [kg/m ³]	7,3	
μ -Wert [-]	6,9	276
$D_{ww, 80\% \text{ r.F.}}$	4E-13	4E-15
$D_{ww, 90\% \text{ r.F.}}$	2,7E-12	2,7E-14
$D_{ww, 98\% \text{ r.F.}}$	8,8E-6	8,8E-8
$D_{ww, 100\% \text{ r.F.}}$	8,8E-4	8,8E-6

Um eine Übereinstimmung der Trocknungszeiten von Fall 1 und Fall 2 zu erhalten, werden in den Iterationsschritten die Randbedingungen Temperatur und relative Luftfeuchte bei der Trocknungsberechnung für Fall 2 „Mauerwerksteine verputzt“ wie folgt angepasst:

- Ausgangsfall: 20 °C, 50 % r.F.
- 1. Iteration: 28 °C, 65 % r.F.
- 2. Iteration: 28 °C, 35 % r.F.

3. Iteration: 28 °C, 20 % r.F.

4. Iteration: 24 °C, 20 % r.F.

Es ist zu erwähnen, dass der hier durchgeführte Vergleich ausschließlich als Rechnungsbeispiel und als Basis für weitere Untersuchungen dient. Ein Raumklima nach Iteration 3 mit 28 °C, 20 % r.F. ist nicht für Wohnzwecke geeignet. Nach Iteration 4 mit 24 °C und 20 % r.F. wäre eine Wohnnutzung möglich.

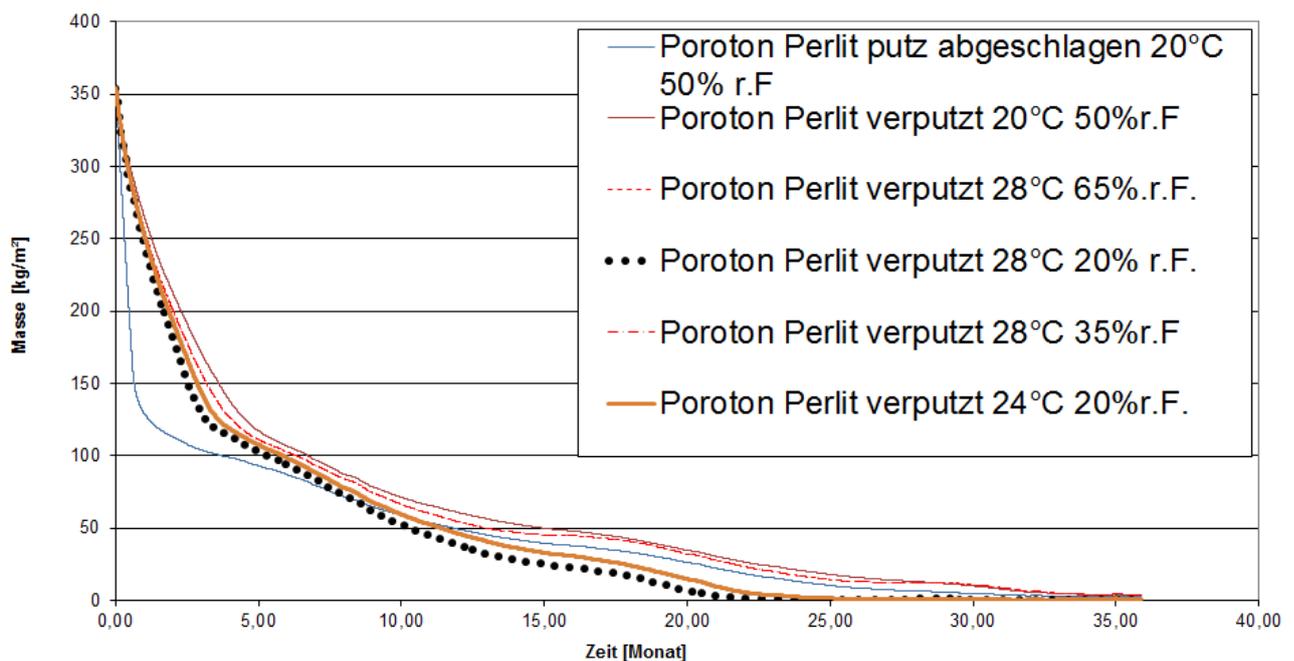


Abbildung 26: Vergleich Trocknungsverlauf Verputz mit abgeschlagenen Putz für Poroton T8 Perlit

Die Berechnungen zeigen, dass bei den Randbedingungen von 28 °C und einer Luftfeuchte von 20 % über einen Zeitraum von ca. 1,5 Jahren auf das Abschlagen des Putzes verzichtet werden könnte. In diesem Zeitraum wäre aber eine Nutzung der Wohnung nicht möglich. Nach Iteration 4 mit 24 °C und 20 % r.F. wäre eine Wohnnutzung über den Trocknungszeitraum denkbar. Die Gleichgewichtsfeuchte von 80 % im verputzten Bauteil wird bei oben genannten Randbedingungen ca. fünf Monate früher erreicht als bei 20 °C, 50 % r.F. und abgeschlagenem Putz. Es wäre somit möglich, unter der Berücksichtigung von niedriger Luftfeuchte (Trocknungsgeräten) und höherer Temperatur (mehr Heizen), eine Trocknung, ohne Abschlagen des Putzes, zu erzielen.

Fazit der Berechnung:

Stellt man einen Vergleich hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit an, macht es durchaus Sinn, auf das Abschlagen der Oberfläche zu verzichten. Ein Nachteil beim Belassen des Innenputzes ist jedoch die Beeinträchtigung der Nutzung der Räume. Durch erhöhte Temperaturen und geringere Luftfeuchte (trockene Luft) wird das Wohlbefinden des Nutzers für eine Zeit von ca. 1,5 Jahren beeinträchtigt. Somit stellt sich die Frage, ob das Rücktrocknen des gesamten Mauerwerks auf einen Feuchtegehalt von 80 % r.F. nötig ist, oder eventuell schon das Unterschreiten von 70 % r.F. an der Oberfläche der Wandinnenseite ausreicht, um den Wohnraum bereits früher wieder zu nutzen.

Für die Sanierung bestehen also folgende Alternativen:

Szenario 1: Das Gebäude wird durch Abschlagen des Innenputzes und durch mechanische Trocknungsgeräte entfeuchtet. Im Anschluss werden die Wände neu verputzt. Der Wohnraumnutzer wird in diesem Zeitraum von ca. vier Monaten in einer Ersatzwohnung (evtl. Hotel) auf Kosten der Versicherung untergebracht. Diese Variante ermöglicht eine zeitnahe Renovierung, die jedoch sehr kostenintensiv ist.

Szenario 2: Das Gebäude wird durch überdurchschnittliches Heizen und Lüften, sowie durch das Aufstellen von Trocknungsgeräten entfeuchtet. Auf das Abschlagen des Putzes wird verzichtet. Aufgrund der Berechnung würde diese Variante ca. fünf Monate mehr Zeit zur Trocknung beanspruchen als jene in Szenario 1. Allerdings kann Zeit eingespart werden, da diverse Baumaßnahmen entfallen. Zum Ausgleich müsste der Eigentümer für die höheren Energiekosten und die Unannehmlichkeiten finanziell von der Versicherung entschädigt werden.

Szenario 3: Als Trocknungskriterium wird ausschließlich das Unterschreiten von 70 % r.F. an der Oberfläche der Wandinnenseite gesehen. Somit wäre die Gefahr von Schimmelpilzwachstum ausgeschlossen. Das restliche Austrocknen des Steines erfolgt durch die Wohnnutzung. In diesem Fall wäre mit deutlich kürzeren Trocknungszeiten zu rechnen. Die Ergebnisse der Berechnungen sind jedoch durch weitere Versuche zu überprüfen.

6 Auswertung der Untersuchungen und Diskussion der Ergebnisse

Diese Arbeit ist in drei Teile gegliedert. Im ersten Abschnitt werden die Materialkennwerte der untersuchten, hochgedämmten Mauerwerksteine ermittelt. Im zweiten Teil werden mit Hilfe dieser Materialkennwerte und dem Softwareprogramm WUFI die Transportkoeffizienten festgelegt und somit ein Datensatz für die drei untersuchten, hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage der Serie ABC bestimmt. Dieser Datensatz wird bei der Nachberechnung der Trocknungsverläufe der Steine der Serie DEF „verputzt“ und der Serie GHI „abgeschlagener Putz“ weiter verwendet und validiert. Die Anpassung der Oberflächenschicht bei den Steinen mit „verputzter Oberfläche“ bzw. „abgeschlagenem Putz“ wird mit Hilfe einer Widerstandsschicht modelliert. Diese wird systematisiert. Im dritten Teil werden mit den ermittelten Datensätzen Vergleichsrechnungen angestellt, um das Trocknungsverhalten hochgedämmter Mauerwerksteine mit Dämmeinlage mit dem Trocknungsverhalten von bereits erprobten Baustoffen wie porosiertem Hochlochziegel, Bimsbeton, Blähton oder Porenbeton, zu vergleichen. Außerdem wird über ein iteratives Verfahren ermittelt, welche Randbedingungen erfüllt sein müssten, um auf das herkömmliche Abschlagen der Putzschicht nach einem Wasserschaden verzichten zu können.

Bei der Bestimmung der Materialkennwerte werden im ersten Schritt die w -Werte der drei Steine Serie ABC in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung ermittelt. Hierbei lässt sich erkennen, dass bei den Steinen der Serie ABC „unverputzt“, der Stein C Poroton T8 mit Mineralwollfüllung mit einem w -Wert von ca. $7,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ nach einer Stunde, und nach 24 Stunden mit einem w -Wert von ca. $5,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{-0,5}$ den geringsten w -Wert aufweist. Die w -Werte der Steine A Thermoplan MZ7 und B Poroton T8 Perlit sind jeweils um ca. 25 % größer.

Die unverputzten Steine und die Steine mit abgeschlagenem Putz zeigen einen starken Anstieg der Wasseraufnahme in den ersten 45 Minuten bis zu einem Wassergehalt von ca. 8 kg/m^2 . Die w -Wert-Kurven der Steine mit abgeschlagenem Putz verlaufen bis zum Knick etwas flacher. Danach flacht der Verlauf bis zum Erreichen des 24-Stunden-Wertes linear ab. Bei den w -Wert-Versuchen mit verputzter Oberfläche ist ein gegenteiliger Ver-

lauf zu erkennen. Hier zeigt sich nahezu keine Wasseraufnahme in den ersten 45 Minuten. Ab dann steigt die Wasseraufnahme bis zu 25 kg/m² nach 24 Stunden an.

Im Anschluss werden die Steine durch die freie Wassersättigung bis zum Sättigungswassergehalt gebracht. Hier zeigt sich der Stein C, Poroton T8 mit Mineralwolldämmung, auffällig. Er erreicht ausschließlich einen Sättigungswassergehalt von ca. 25 Vol. %. Der Stein A, Thermoplan MZ 7, erzielt ca. 30 Vol. %. Der Stein B, Poroton T8 Perlit, erfährt mit ca. 42 Vol. % die höchste Wassereinlagerung. Der unterschiedliche Wassersättigungsgehalt macht sich somit auch bei der Rücktrocknung bemerkbar. Der Stein C, Poroton T8 Mineralwolle zeigt einen schnelleren Rücktrocknungsprozess und erreicht dadurch die Ausgleichsfeuchte schneller als die Steine A und B. Bei der Ermittlung der Feuchtespeicherfunktion können im Sorptionsfeuchtebereich keine erheblichen Unterschiede der Steine festgestellt werden. Eine deutliche Zunahme des Wassergehaltes ist erst ab ca. 95 % r.F. zu registrieren.

Die Diffusionswiderstandsmessungen ergeben einen erkennbaren Unterschied zwischen dem Stein A, Thermoplan MZ7 mit μ ca.10, und den Steinen B, Poroton T8 Perlit, und C, Poroton T8 Mineralwolle, mit μ ca. 15. Diese Werte beziehen sich aber ausschließlich auf die Scherben. Bei den Diffusionsmessungen am halben Stein inklusive Dämmeinlage weist der Stein B mit Perlit-Füllung mit $\mu = 6,9$ den größten Diffusionswiderstand auf. Die Steine A und C mit Mineralwolleinlage zeigen geringere Diffusionswiderstände von μ ca. 4,5.

Im zweiten Teil werden mit Hilfe der ermittelten Materialkennwerte und dem Softwareprogramm WUFI die Transportkoeffizienten bestimmt und somit ein Datensatz für die drei untersuchten Steintypen der Serie ABC gewonnen. Bei der ersten Nachberechnungsvariante der Steine ABC „unverputzt“ werden die Datensätze zur Nachberechnung individuell für jeden Stein bestimmt. Somit werden die Feuchtespeicherfunktion, die Materialkennwerte, die Wärmeübergangskoeffizienten und die Transportkoeffizienten angepasst. Die verwendeten Transportkoeffizienten sind in Kapitel 4.2.1 zu finden. Alle drei Steintypen der Serie ABC weisen den gleichen Trocknungsverlauf auf. In den ersten 20 Tagen verläuft der Trocknungsprozess ausschließlich über den Flüssigtransport. Im Anschluss ist ein Knick zu erkennen. Die weitere Trocknung erfolgt dann ausschließlich über Diffusion. Die Steine der Serie C, Poroton T8 mit Mineralwolldämmung, zeigen, bedingt durch den geringeren Anfangswassergehalt, nach der freien Sättigung von nur 24 Vol. % eine etwas schnellere Unterschreitung des Gleichgewichtswassergehaltes, als die Steine der Serien A und B.

Die Nachberechnung des Trocknungsverlaufes der Steine der Serie GHI „abgeschlagener Putz“ wird in zwei Versionen vollzogen. In der ersten Version wird eine möglichst genaue Nachberechnung angestrebt. Hierzu werden die Datensätze individuell für den Stein und die Widerstandsschicht, welche durch den ehemals aufgetragenen Putz entstanden ist, angepasst. Somit kann eine gute Korrelation erreicht werden. Diese individuelle Anpassung kann jedoch in der Realität nie angetroffen werden. In der zweiten Version wird der Ausgangsdatsatz der Steine ABC übernommen und die Widerstandsschicht von 5 mm modelliert. In der Widerstandsschicht werden die Transportkoeffizienten um das 200-fache verkleinert und der Diffusionswiderstand um den Faktor 40 vergrößert. Mit Hilfe dieser schematischen Anpassung ist eine pauschale Nachberechnung mit ausreichender Genauigkeit möglich. Die zweite Version ist plausibel und kann in der Praxis verwendet werden.

Die Nachberechnung des Trocknungsverlaufes der verputzten Steine DEF wird ebenfalls in zwei Versionen durchgeführt. Die erste Version berücksichtigt eine individuelle Anpassung der Transportkoeffizienten, sowohl im Stein als auch in der Widerstandsschicht. Diese individuelle Anpassung kann jedoch in der Realität nie angetroffen werden. Die Materialkennwerte des verwendeten Kalk-Gips-Putzes wurden nicht ermittelt. Somit ergibt sich selbst bei individueller Anpassung kein besseres Ergebnis als bei der Modellierung der verputzten Steine mit dem Ausgangsdatsatz.

Im dritten Teil dieser Arbeit werden mit den ermittelten Ausgangsdatsätzen der Serie ABC Vergleichsrechnungen angestellt. Die Randbedingungen, auf denen die Berechnungen beruhen, sind dem Kapitel 4.2.5 zu entnehmen. In der ersten Vergleichsrechnung wird der Trocknungsverlauf vom Sättigungswassergehalt bis zum Erreichen eines Gleichgewichtswassergehaltes von 80 % r.F. im Bauteil bestimmt. Es ist zu erkennen, dass die hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage keine deutlich längeren Trocknungszeiten aufweisen als die bereits erprobten Steine wie Bimsbeton, Blähton oder der porosierete Hochlochziegel. Ausschließlich der Porenbetonstein trocknet erwartungsgemäß deutlich langsamer als die anderen Steintypen. Bei einem weiteren Vergleich wird der Zeitpunkt der Unterschreitung der Oberflächenfeuchte von 70 % r.F. untersucht. Hier zeigt sich deutlich, dass die hochgedämmten Mauerwerksteine mit Dämmeinlage einen Übersättigungsbereich von ca. 0,8 Monaten beibehalten. Ab dann fällt der Feuchtegehalt schlagartig auf ca. 60% ab. Die anderen Steine zeigen bereits nach 0,2 Monaten einen Abfall der relativen Feuchte an der Oberfläche auf 60 % r.F..

Zum Abschluss der Arbeit wird eine Berechnung angestellt, die beweist, dass im Wasserschadensfall der Arbeitsaufwand für das Abschlagen des Putzes vermeidbar ist. Es wird über ein iteratives Verfahren bestimmt, welche Randbedingungen hierzu nötig wären. Bei Annahme einer Außenwand aus hochgedämmten Mauerwerksteinen mit Dämmeinlage, einem Zementputz auf der Außenseite und einem abgeschlagenen Putz auf der Innenseite, sowie der Annahme eines Innenklimas von 20 °C und 50 % r.F. und einem Außenklima mit dem Datensatz für Holzkirchen, ist ein nahezu ähnliches Trocknungsverhalten bei Belassen des Innenputzes zu erkennen, wenn die Innentemperatur auf 24 °C angehoben und die relative Feuchte auf 20 % gesenkt werden würde. Dies würde einen höheren Energieaufwand für Heizung und mechanische Trocknungsgeräte bedeuten.

7 **Ausblick**

Um die Ergebnisse zu untermauern wären noch weitere Untersuchungen sinnvoll. Die Ermittlung der korrekten Materialkennwerte des verwendeten Kalk-Gips-Putzes wäre von Interesse. Um den Trocknungsverlauf nicht nur für einzelne Steine, sondern für komplette Wände zu untersuchen, wäre ein Versuchsaufbau sinnvoll, bei dem der Gesamtwassergehalt gemessen werden kann. Dies wäre möglich, indem eine komplette, wassergesättigte Wand auf eine Konstruktion mit Kraftmessdosen gestellt wird. Somit könnte über den Verlust des Gesamtwassergehaltes die Nachberechnung ebenfalls validiert werden. Außerdem sind deutlich längere Versuchsverläufe zu planen, bei denen die Steine in der Klimakammer von der freien Wassersättigung bis zum Erreichen eines Feuchtgehaltes von 80 % r.F. verweilen. Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche beziehen sich auf einen gemessenen Trocknungsverlauf von ca. 3 Monaten. Bei einer weiteren Beobachtung des Trocknungsverlaufes in der Klimakammer, könnten eventuell die Transportkoeffizienten des Ausgangsdatensatzes erneut angepasst werden. Um die optimalen Trocknungsverfahren zu entwickeln, müssten weitere Trocknungsversuche durchgeführt werden. Das Ziel wäre es schließlich zu erkennen, ob teure und aufwändige mechanische Trocknungsverfahren von professionellen Bautrocknungsfirmen nötig sind, oder eventuell ein angepasstes Nutzerverhalten den Wasser-/ Feuchteschaden ebenfalls beheben kann. Dies könnte beispielsweise durch regelmäßiges und richtiges Stoßlüften in Kombination mit einer Erhöhung der Raumtemperatur erreicht werden. Zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit einer solchen Methode wäre eine Raumsimulation nötig.

8 Literaturverzeichnis

E DIN EN ISO, Juli 2012: E DIN EN ISO 12571 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften.

DIN 52617, Mai 1987: DIN 52617 Bestimmungen des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen.

DIN EN 12078:06, Juni 2003: DIN EN 12078:06.2007 Bestimmung der Wasseraufnahme bei langzeitigem Eintauchen; Deutsche Fassung EN 12087:2013.

DIN EN ISO 15148, März 2003: DIN EN ISO 15148:03.2003 Bestimmungen des Wasseraufnahmekoeffizienten durch teilweises Eintauchen.

Bakker, G. (1926): Kapillarität und Oberflächenspannung. Handbuch der Experimentalphysik, Band 6. In: *Akademische Verlagsgesellschaft Leipzig*.

Bednar, T. (2000): Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden. Dissertation. Technische Universität, Wien.

Chang, S. C., Hutcheon, N.B.: Dependence of Water Vapour Permeability on Temperature and Humidity. In: *ASHRE Journal* 1956 (H3), S. S.149-155.

Grunewald, J. (1996): Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation. Dresden, Technische Universität.

Hensberger, H.; Kautsch, P.; Schreiber, H. (2014): Vermeidung von Schadstofffreisetzungen im Zuge und nach der technischen Trocknung von Wasserschäden sowie deren technische und wirtschaftliche Optimierung. 36. Aufl. Hg. v. Ernst & Sohn Verlag für Architekten und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG. Technische Universität Graz, Institut für Hochfrequenztechnik. Berlin (Heft 6).

Holm, A. (1996): Bestimmung des Feuchteausstausches zwischen Putz und Mauerwerk. Diplomarbeit. Technische Universität, München.

Holm, A.; Krus, M. (1998): Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung. In: *Sonderdruck aus Bauinstandsetzung* (1), S. 33–52.

- Kießl, K. (1995): Feuchteprobleme in Gebäuden. Vorlesungsmanuskript. Universität, Stuttgart.
- Klopfer, H. (1974): Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. In: *Bauverlag GmbH Wiesbaden*.
- Krischer, O., Kast, W. (Hg.) (1978): Die wissenschaftliche Grundlage der Trocknungstechnik. 3. Aufl.: Springer Verlag.
- Krus, M. (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Dissertation. Universität, Stuttgart.
- Krus, M., Holm, A., Schmidt, T.: Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten aus dem w-Wert. In: *Sonderdruck aus Bauinstandsetzung* 1997 (1), S. 219–234.
- Künzel, H.: Zusammenhang zwischen der Feuchtigkeit von Außenbauteilen in der Praxis und den Sorptionseigenschaften der Baustoffe. *Bauphysik* 4 1994 (H. 3), S.101-107.
- Künzel, H. M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. Universität, Stuttgart.
- Roos, H., Niesel, K., Hoffmann, D.: Über Phänomene des Feuchtigkeitstransports in Ziegeln und Mauerwerk. 1988 H.5. In: *GIT Fachzeitschrift, Lab.32*, S. S.16-21.
- Schubert, H. (1982): Kapillarität in porösen Feststoffsystemen. In: *Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York*.
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser (2006). *Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre*. Vorlesungsskript Bauphysik Grundmodul. Technische Universität, München.
- Zirkelbach, D. (2001): Austrocknungsverhalten hochdämmender Mauersteine. Diplomarbeit. Technische Universität, München. Fraunhofer Institut für Bauphysik.

Erklärung zur Masterthesis

Ich versichere hiermit, die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Quellen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Die Arbeit wurde noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt.

München, den 25.03.2015

.....

(Unterschrift)

Anhang

- Anhang 1 Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Bestimmung von Materialkennwerten
 - Anhang 1.1 w-Wert
 - Anhang 1.2 Freie Wassersättigung
 - Anhang 1.3 Trocknungsverlauf
 - Anhang 1.4 Sorption
 - Anhang 1.5 Diffusionsmessungen

- Anhang 2 Übersicht aller durchgeführten Versuche mit Versuchsdauer und Ergebnissen
 - Anhang 2.1 Sorption
 - Anhang 2.2 w-Wert
 - Anhang 2.3 Freie Wassersättigung
 - Anhang 2.4 Diffusionswiderstand μ -Wert

- Anhang 3 Weitere Vergleiche und Berechnungen

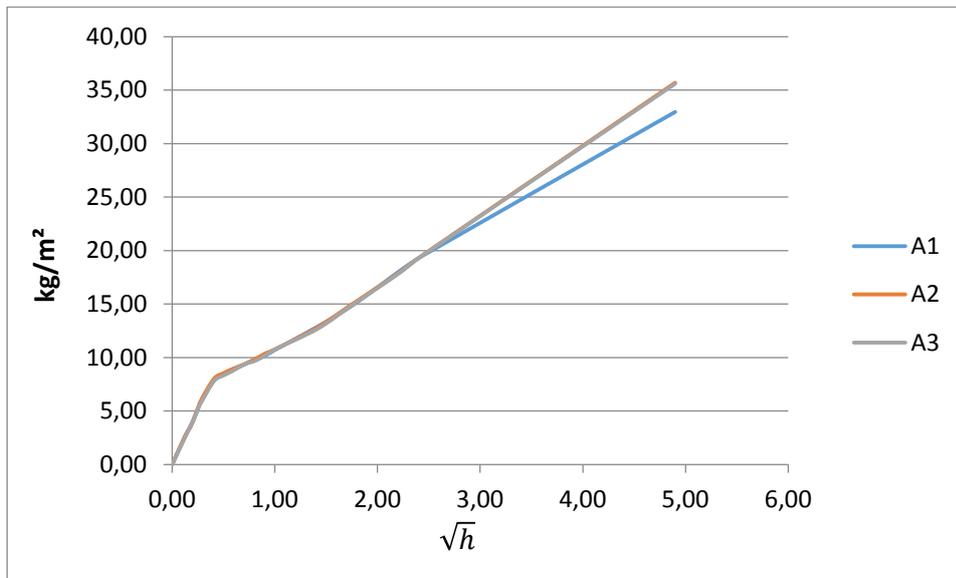
- Anhang 4 Liste aller durchgeführten Versuche

- Anhang 5 Protokolle der Laborversuche

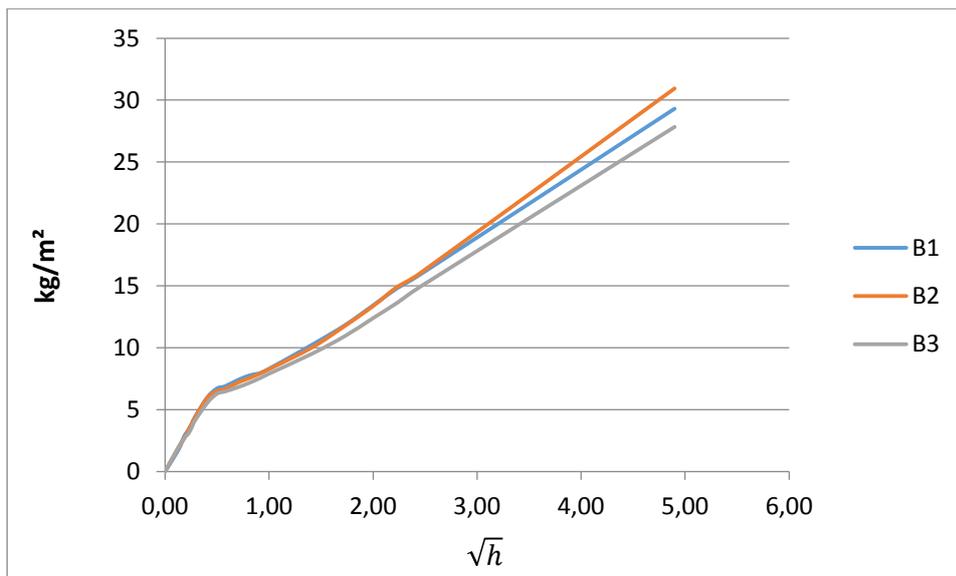
Anhang 1 Ergebnisse der durchgeführten Versuche zur Bestimmung von Materialkennwerten

Anhang 1.1 w-Wert

w-Wert Stein A Thermoplan MZ7 „unverputzt“

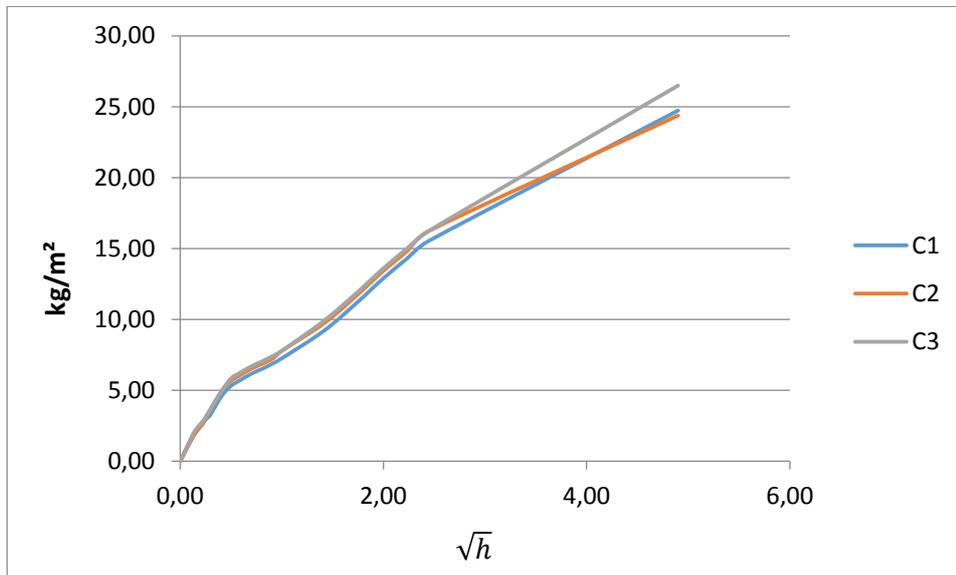


w-Wert Stein B Poroton T8 Perlit „unverputzt“

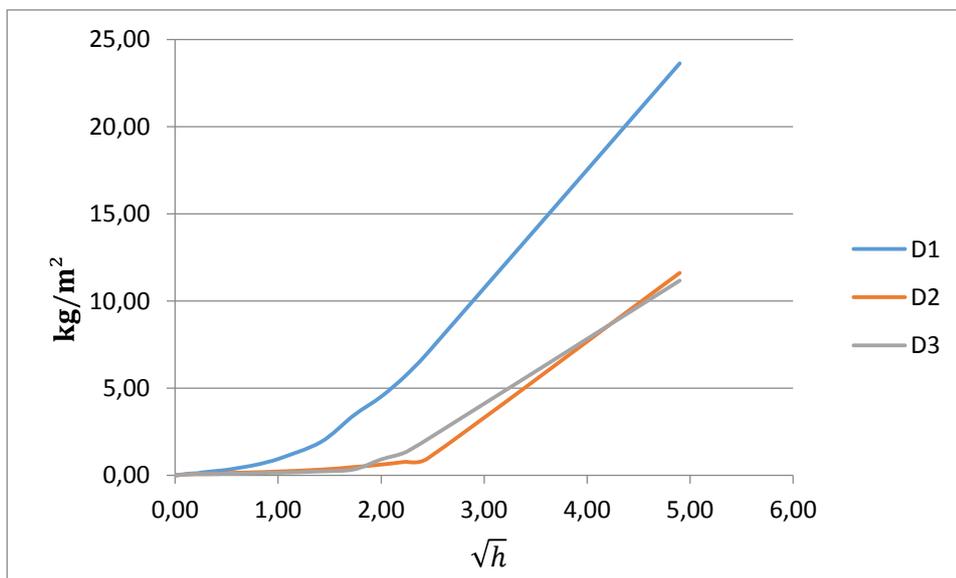


Anhang

w-Wert Stein C Poroton T8 mit Mineralwolle „unverputzt“

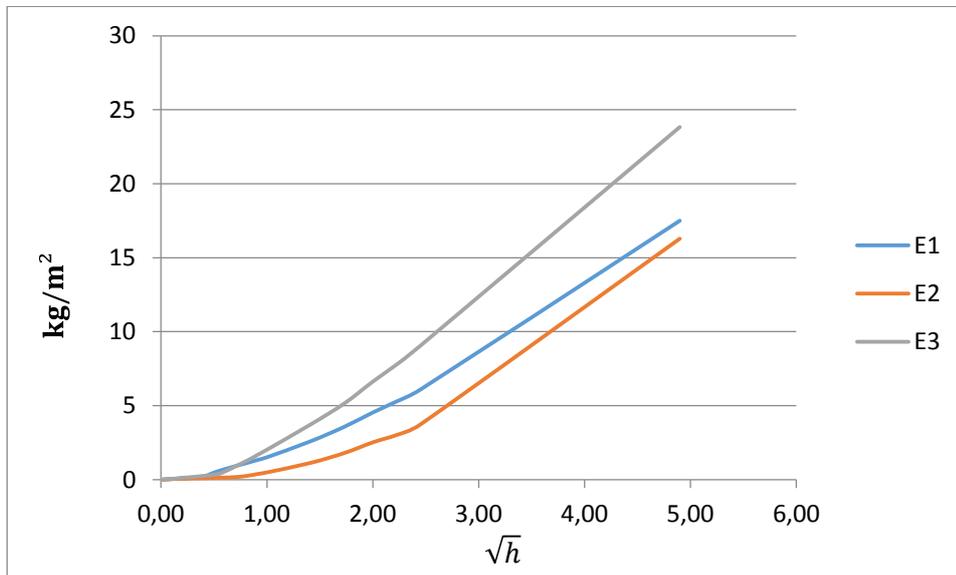


w-Wert Stein D Thermoplan MZ7 „verputzt“

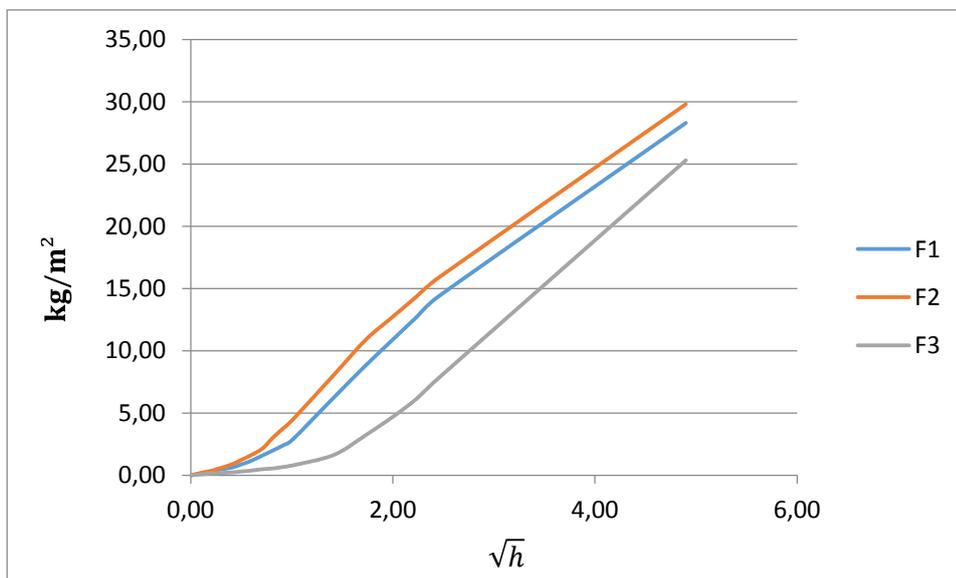


Anhang

w-Wert Stein E Poroton T8 Perlit „verputzt“

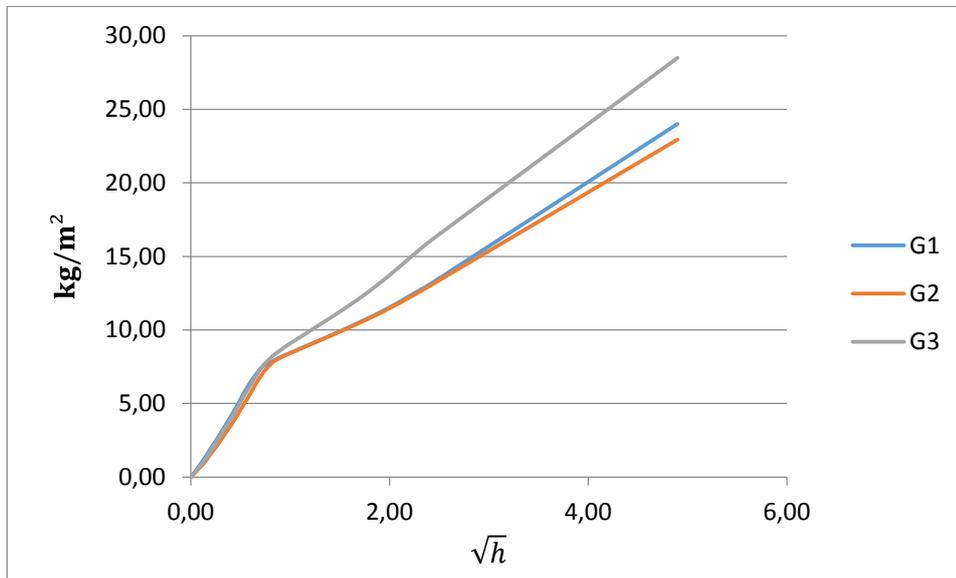


w-Wert Stein F Poroton T8 mit Mineralwolle „verputzt“

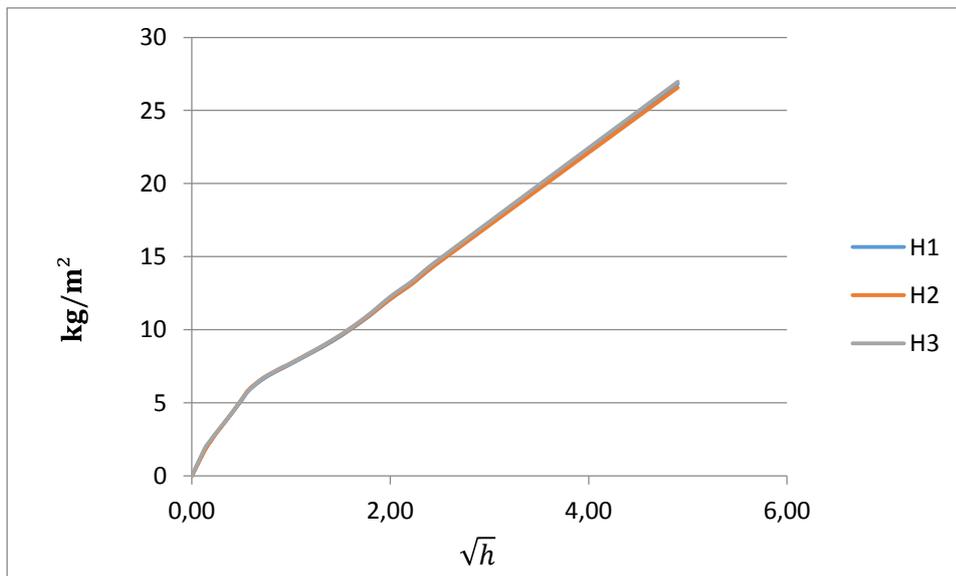


Anhang

w-Wert Stein G Thermoplan MZ7 „verputzt und abgeschlagen“

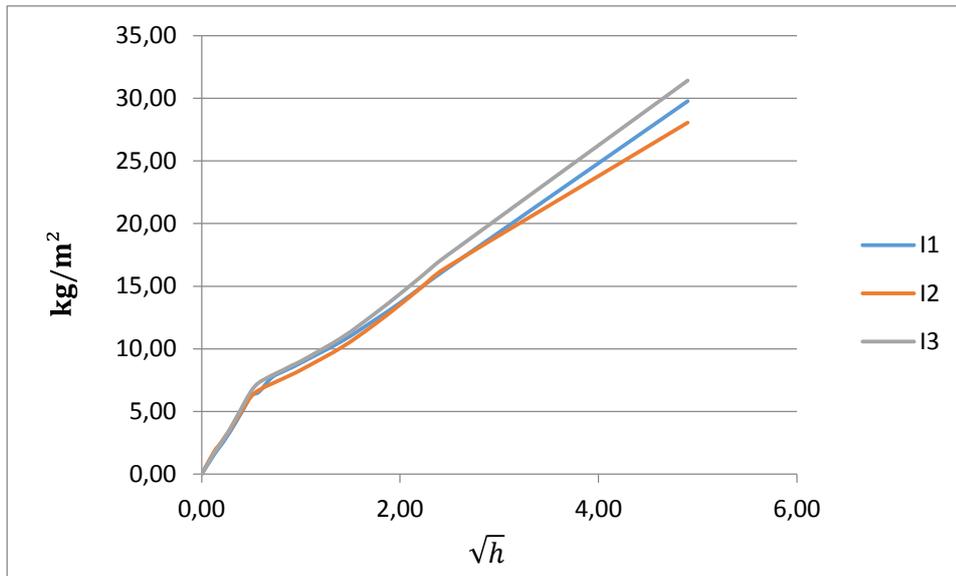


w-Wert Stein H Poroton T8 Perlit „verputzt und abgeschlagen“



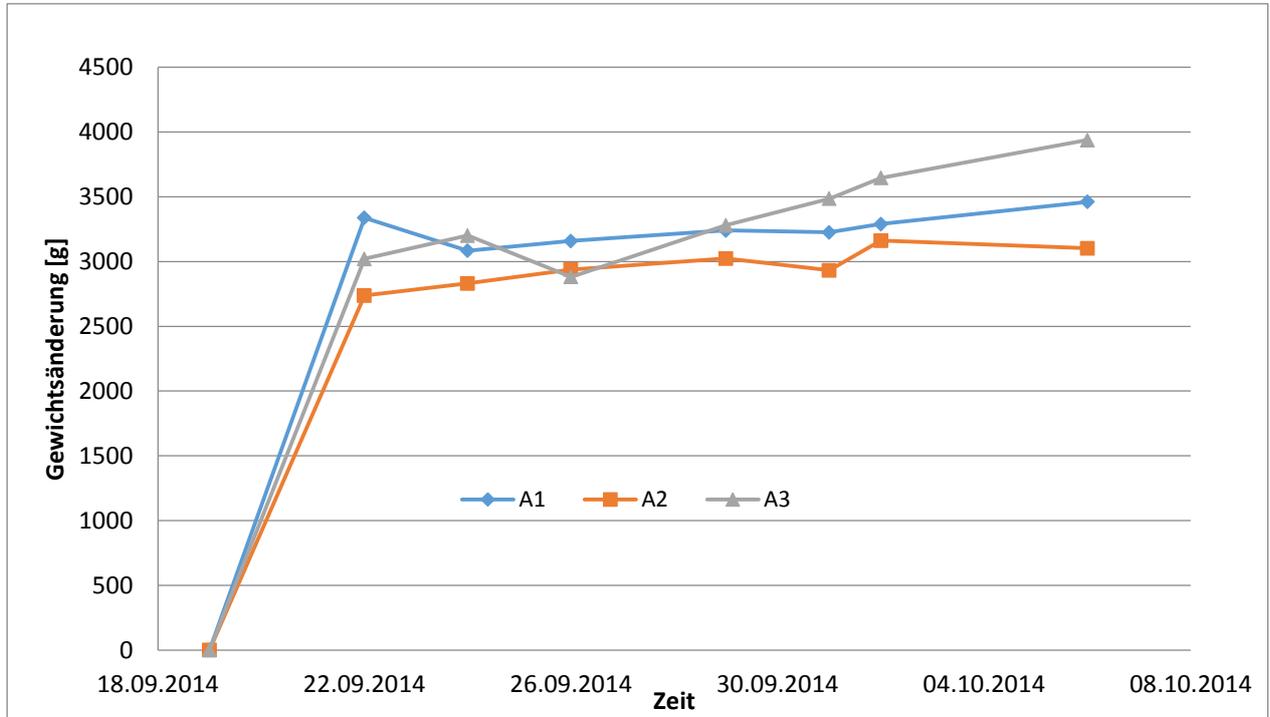
Anhang

w-Wert Stein I Poroton T8 mit Mineralwolle „verputzt und abgeschlagen“

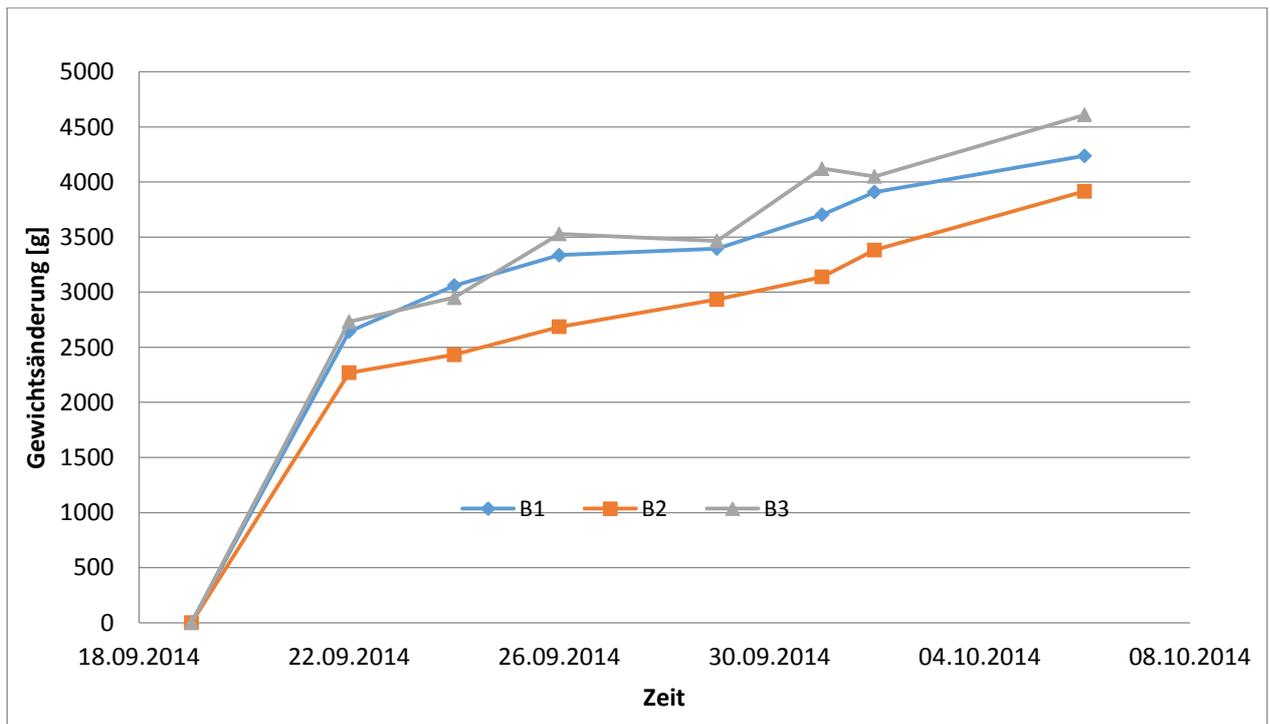


Anhang 1.2 Freie Wassersättigung

Freie Wassersättigung Stein A Thermoplan MZ7 „unverputzt“

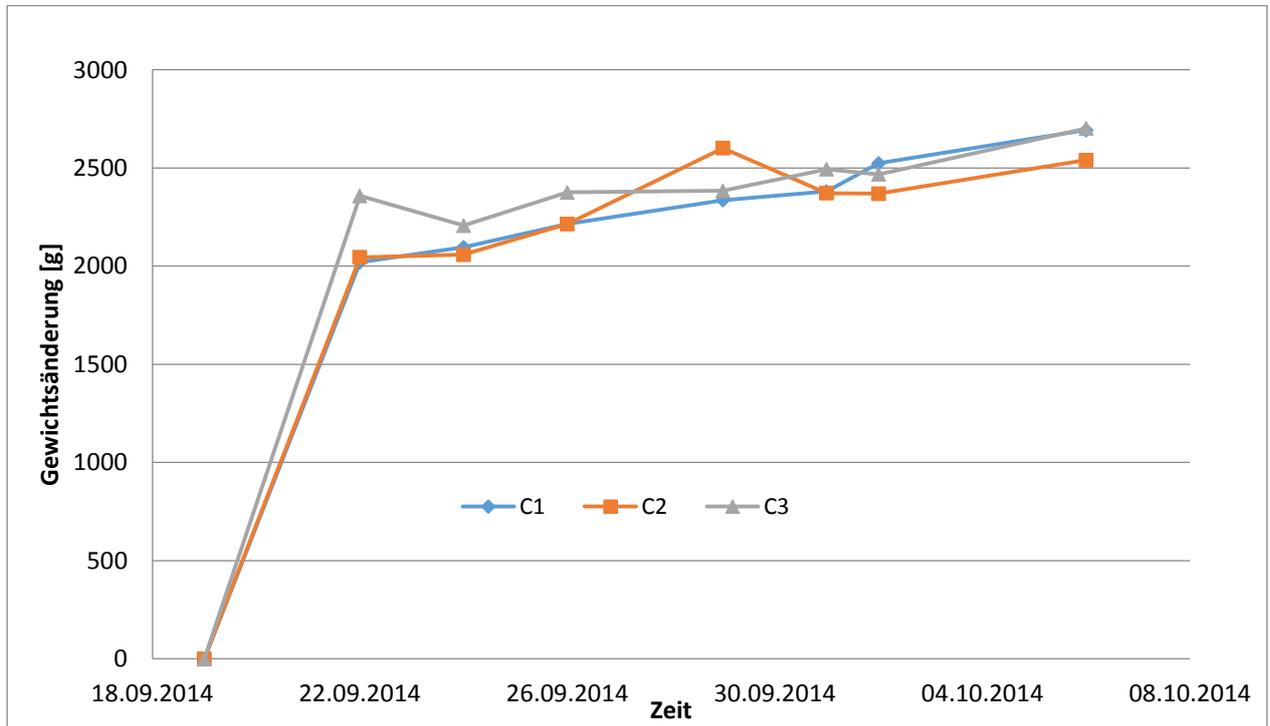


Freie Wassersättigung Stein B Poroton T8 Perlit „unverputzt“

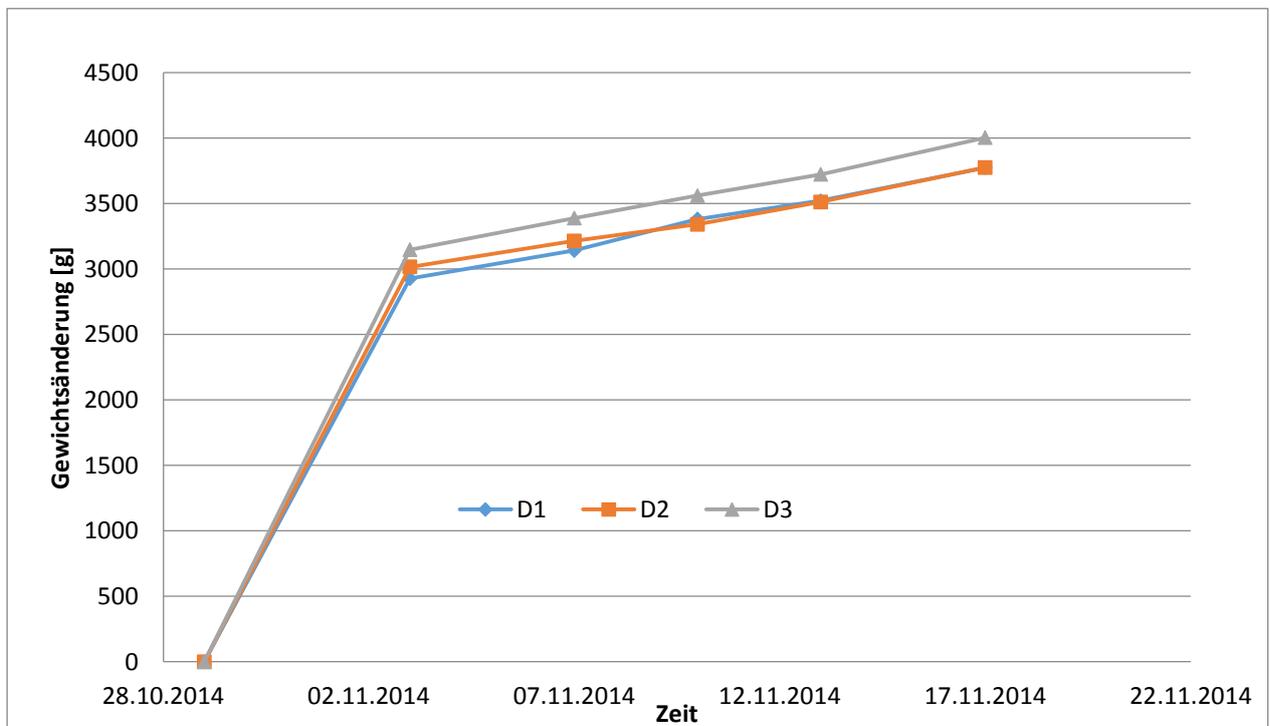


Anhang

Freie Wassersättigung Stein C Poroton T8 mit Mineralwolle „unverputzt“

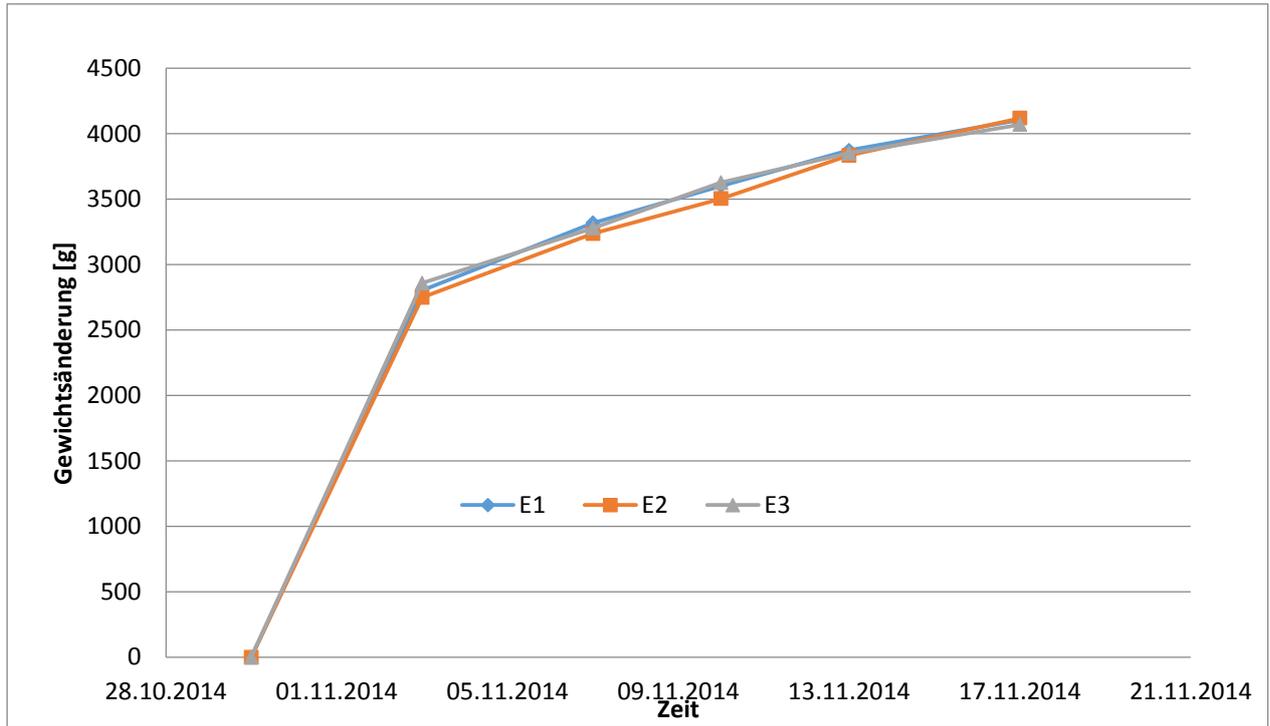


Freie Wassersättigung Stein D Thermoplan MZ7 „verputzt“

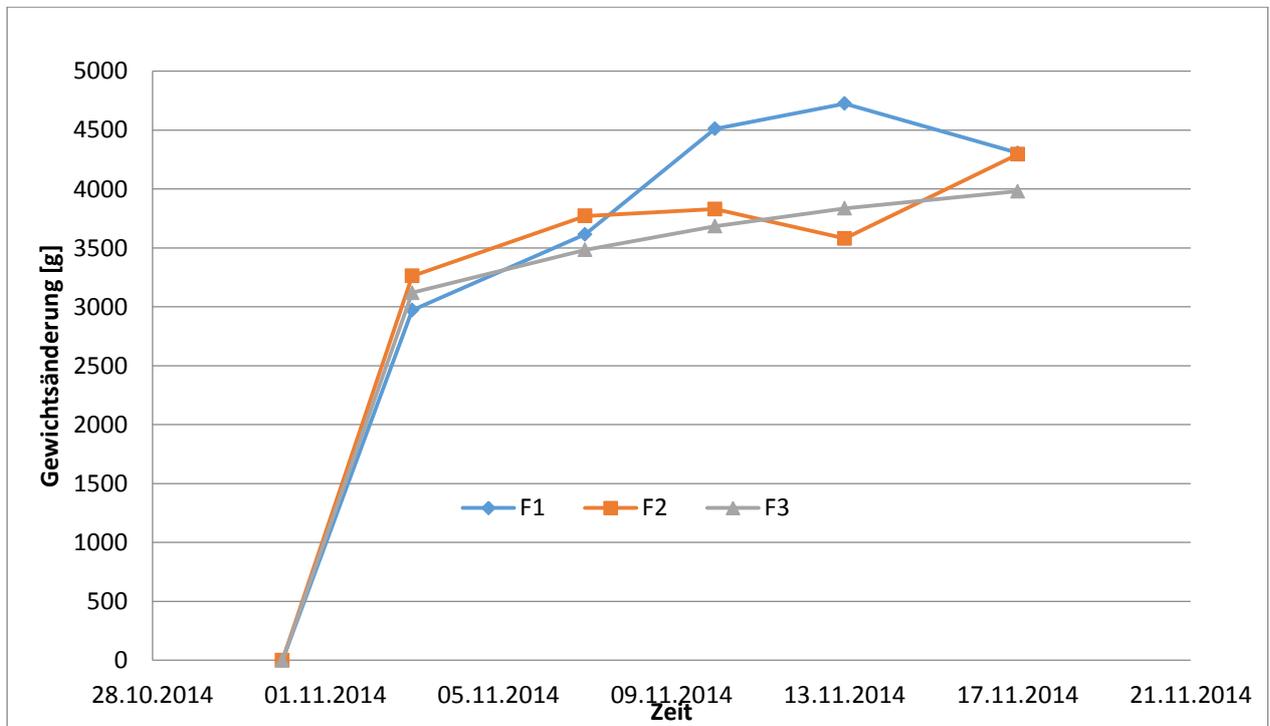


Anhang

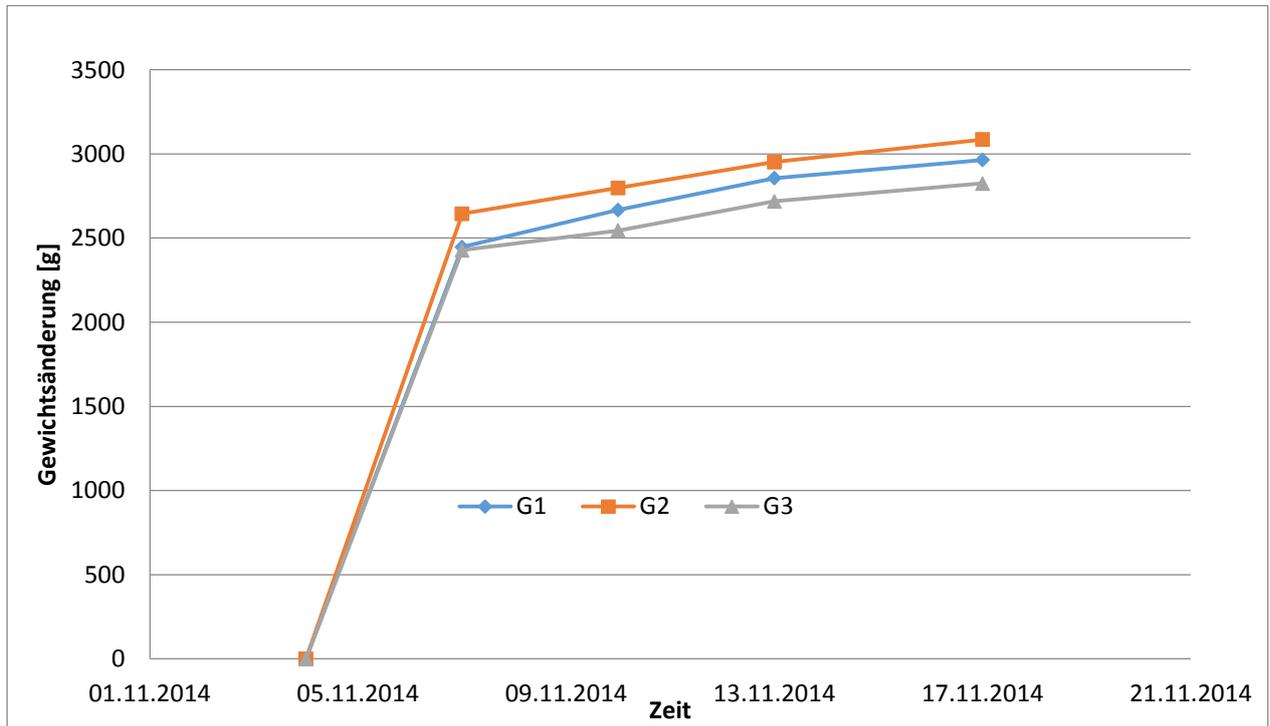
Freie Wassersättigung Stein E Poroton T8 Perlit „verputzt“



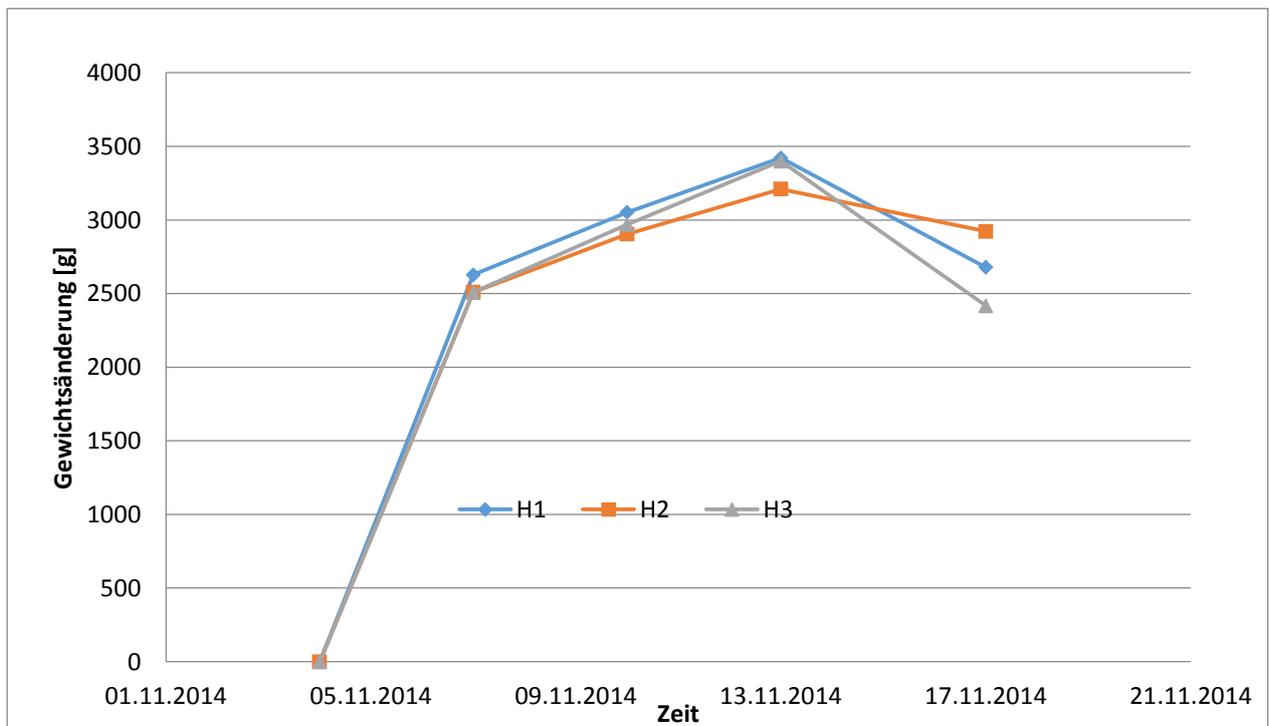
Freie Wassersättigung Stein F Poroton T8 mit Mineralwolle „verputzt“



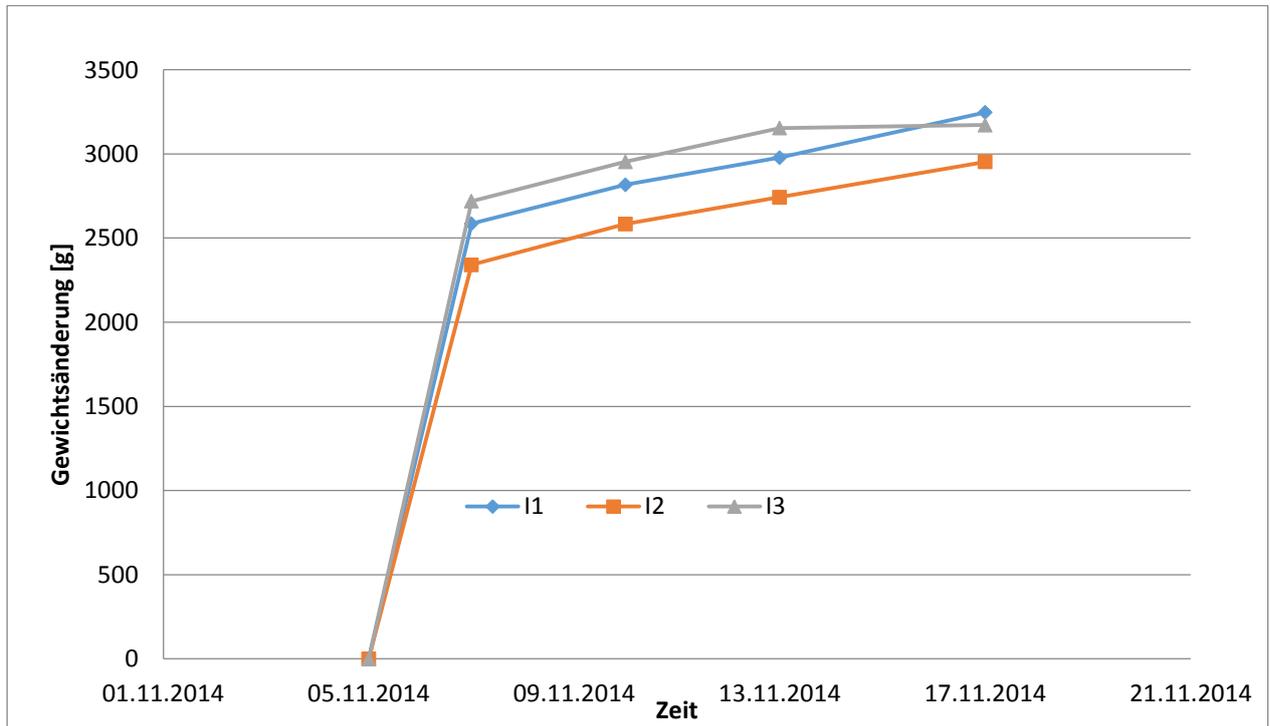
Freie Wassersättigung Stein G Thermoplan MZ7 „verputzt und abgeschlagen“



Freie Wassersättigung Stein H Poroton T8 Perlit „verputzt und abgeschlagen“

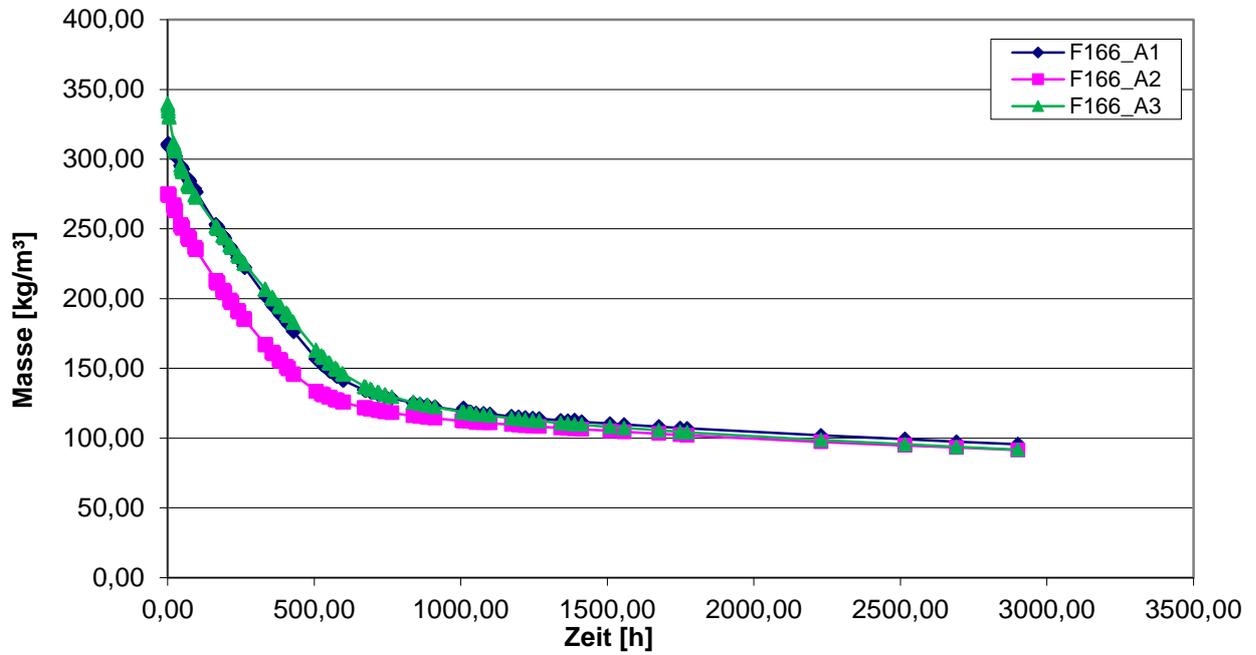


Freie Wassersättigung Stein I Poroton T8 mit Mineralwolle „verputzt und abgeschlagen“

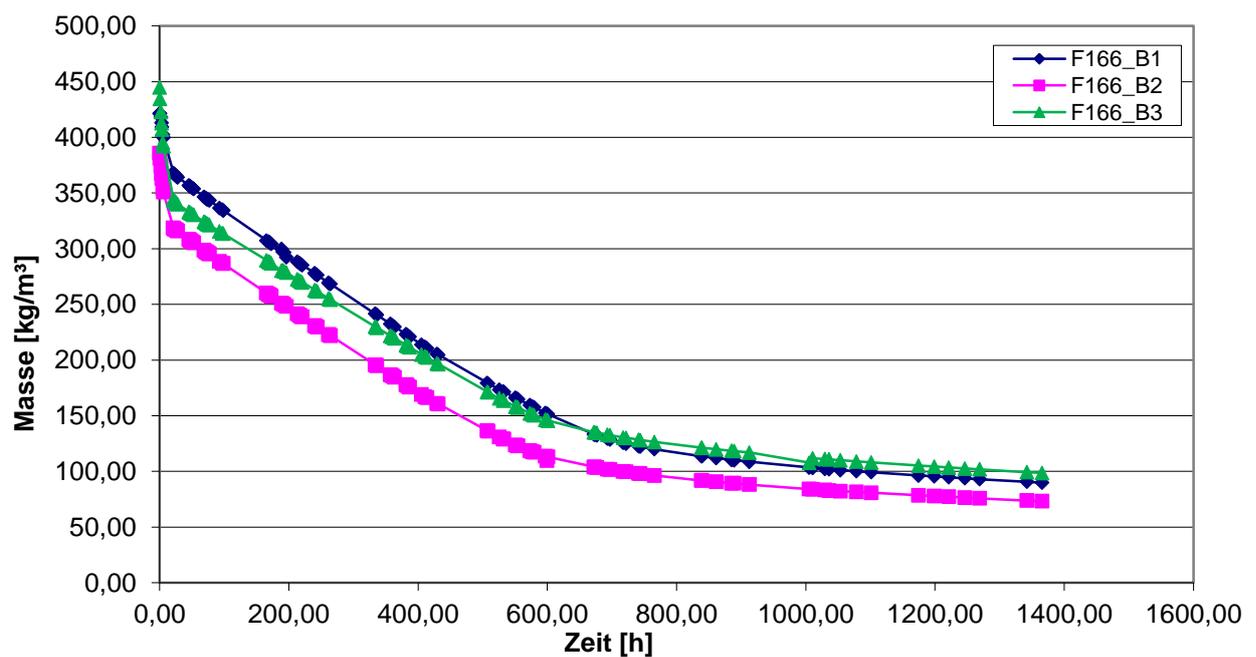


Anhang 1.3 Trocknungsverlauf

Trocknungsverlauf nach Sättigung Stein A Thermoplan MZ7 „unverputzt“

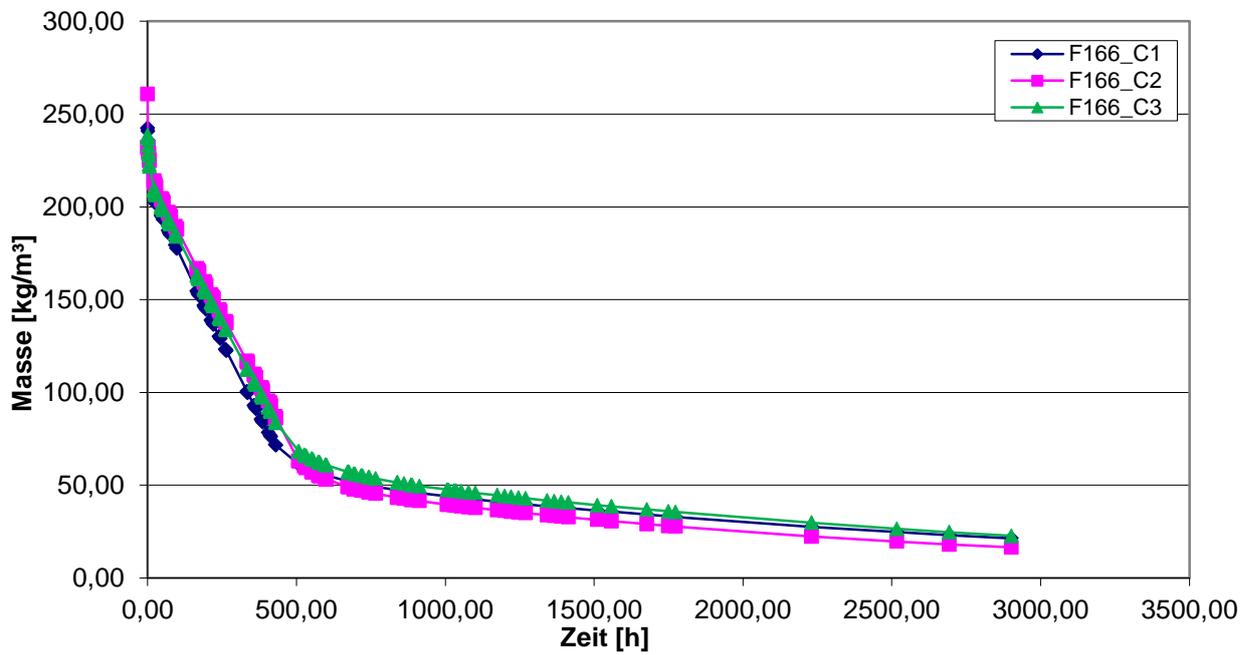


Trocknungsverlauf nach Sättigung Stein B Poroton T8 Perlit „unverputzt“

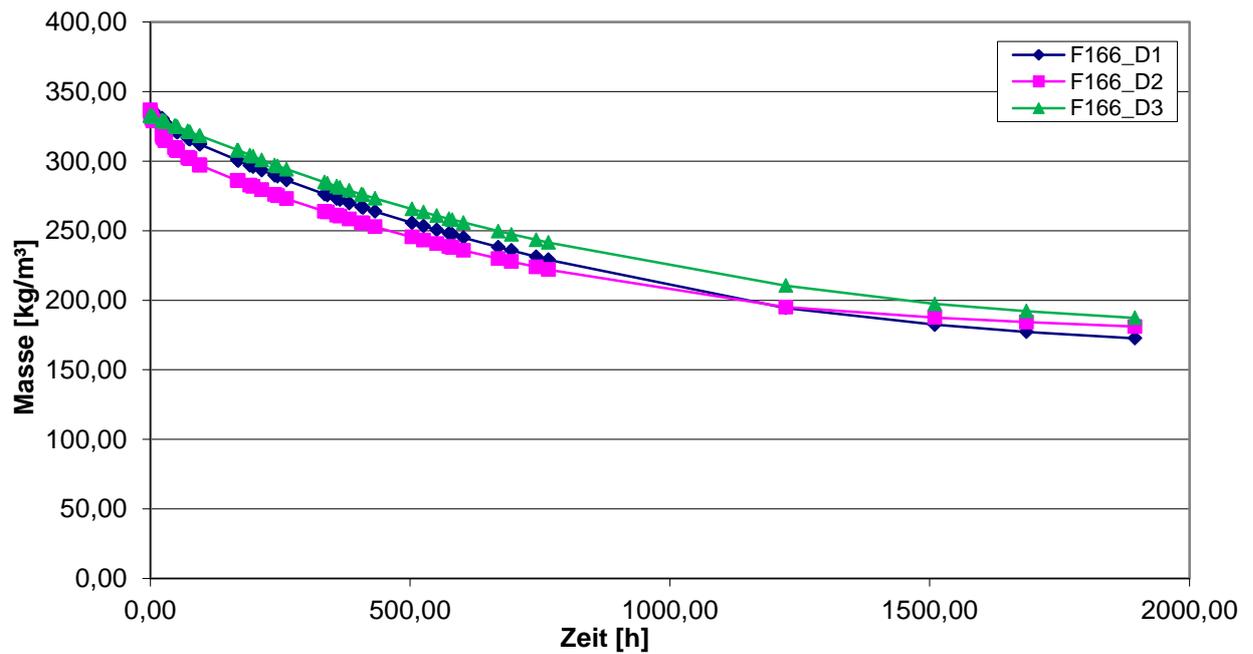


Anhang

Trocknungsverlauf nach Sättigung Stein C Poroton T8 mit Mineralwolle „unverputzt“

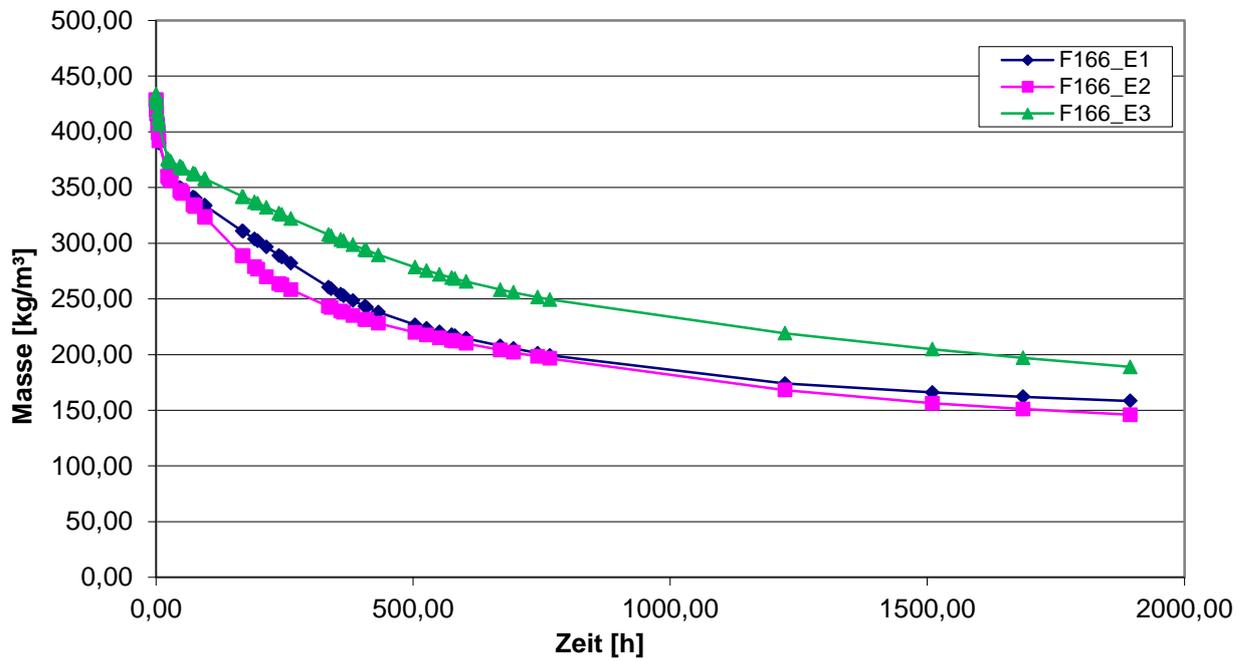


Trocknungsverlauf nach Sättigung Stein D Thermoplan MZ7 „verputzt“

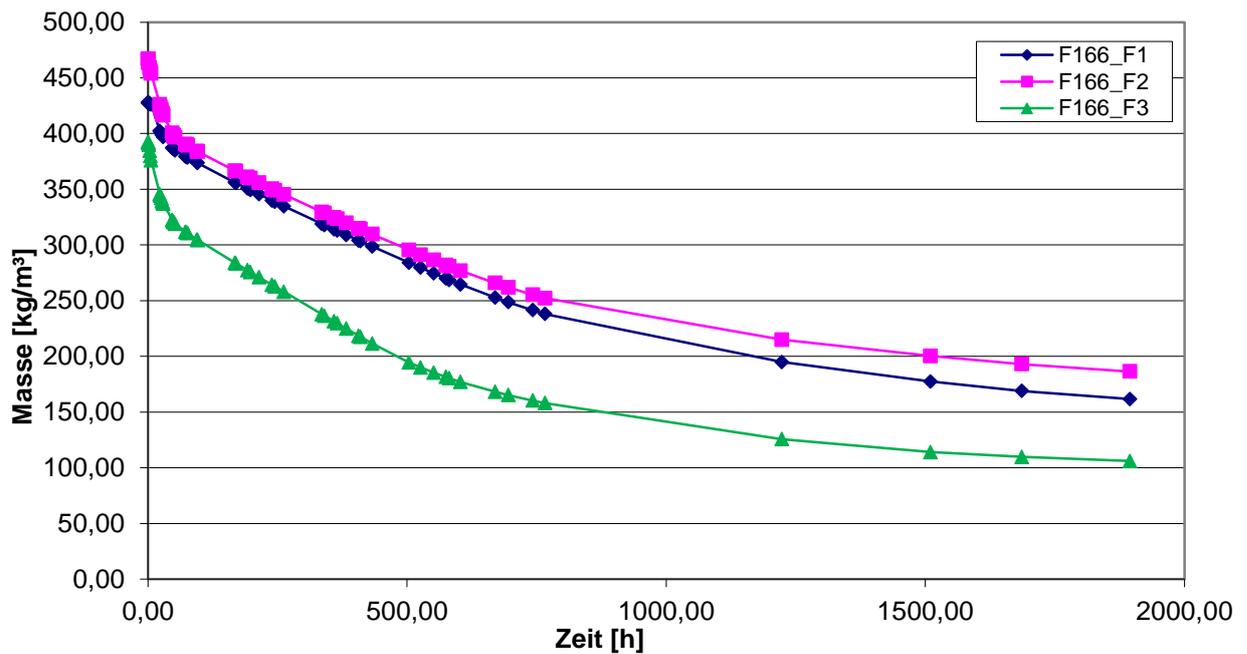


Anhang

Trocknungsverlauf nach Sättigung Stein E Poroton T8 Perlit „verputzt“

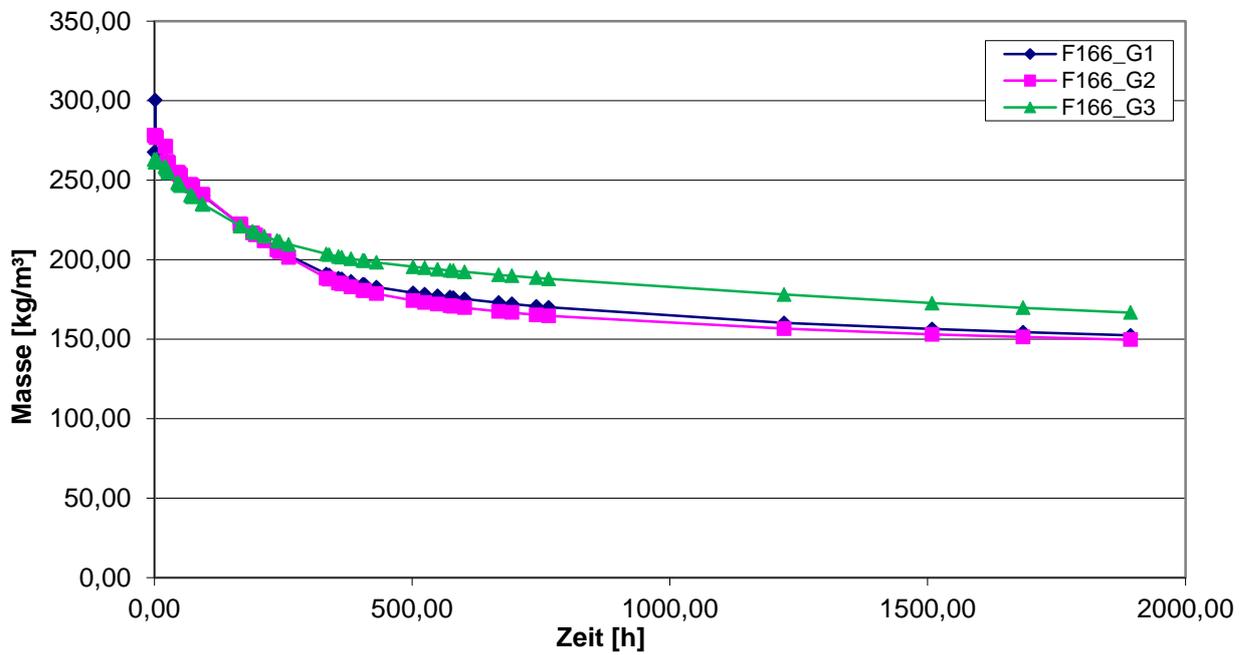


Trocknungsverlauf nach Sättigung F Poroton T8 mit Mineralwolle „verputzt“

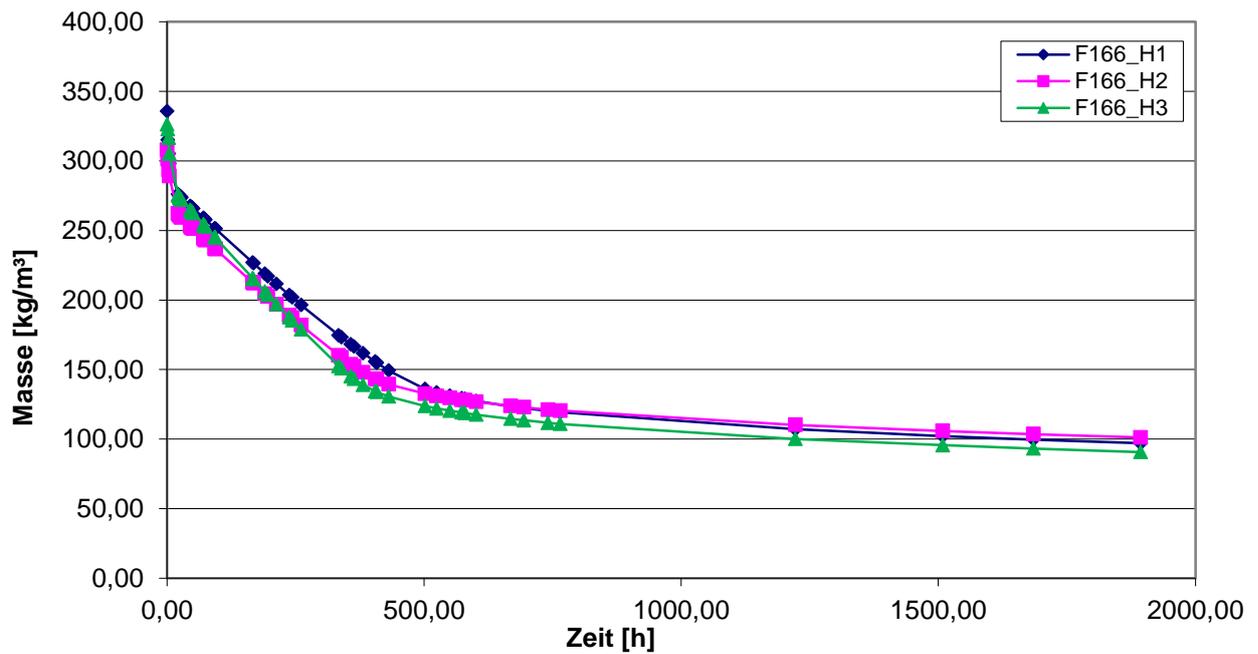


Anhang

Trocknungsverlauf nach Sättigung Stein G Thermoplan MZ7 „verputzt und abgeschlagen“

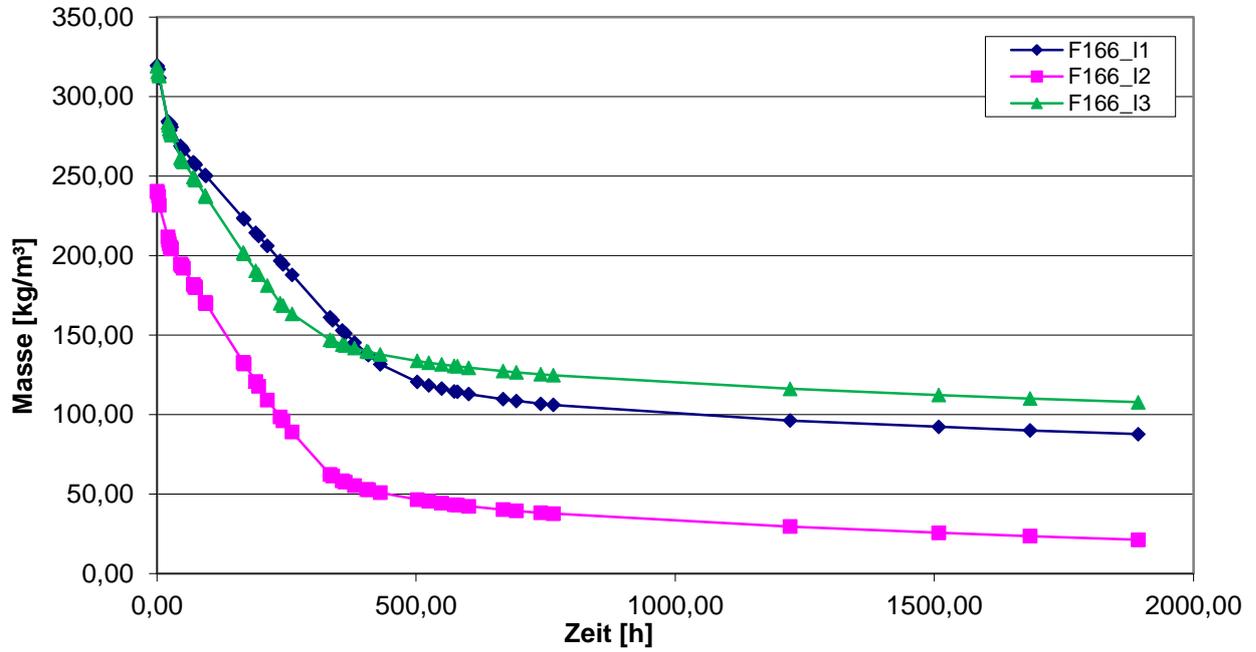


Trocknungsverlauf nach Sättigung Stein H Poroton T8 Perlit „verputzt und abgeschlagen“

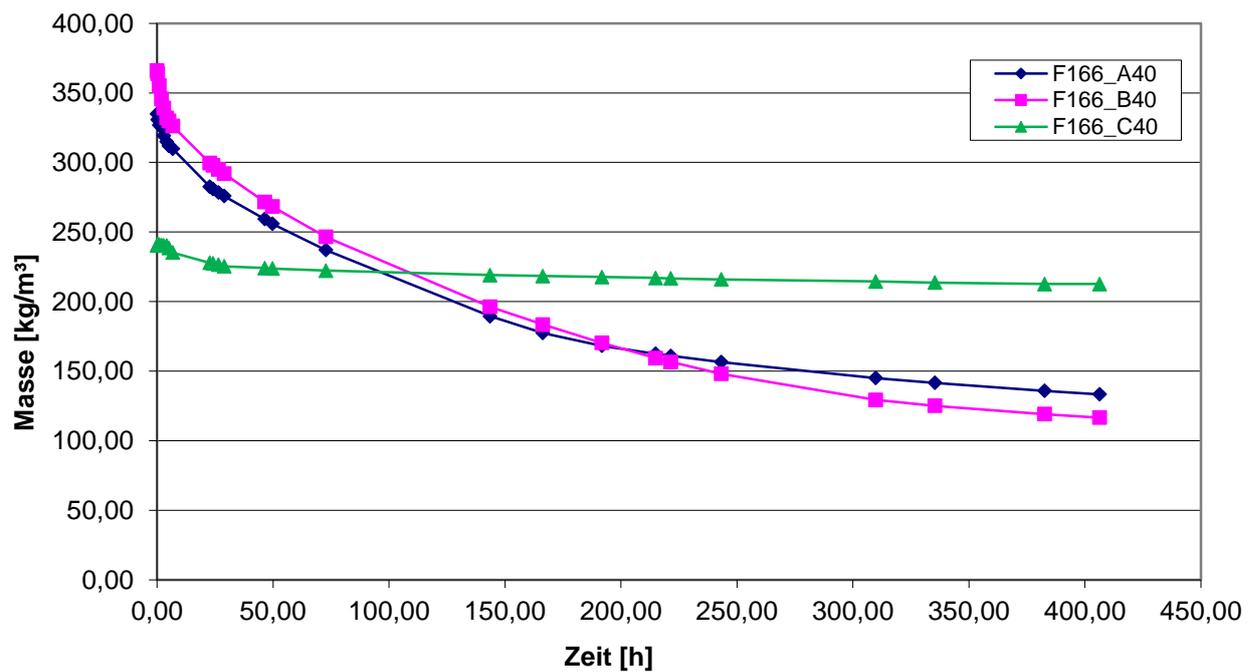


Anhang

Trocknungsverlauf nach Sättigung Stein I Poroton T8 mit Mineralwolle „verputzt und abgeschlagen“



Trocknungsverlauf bei 40 °C der Steine A, B und C nach Sättigung



Anhang

Anhang 1.4 Sorption

Die Daten sind in digitaler Form auf der beiliegenden CD zu finden.

Anhang 1.5 Diffusionsmessungen

Die Daten sind in digitaler Form auf der beiliegenden CD zu finden.

Anhang 2 Übersicht aller durchgeführten Versuche mit Versuchsdauer und Ergebnissen

2.1 Sorption

	Nummer	Art des Steines	Start Sorption	Ende Sorption	Dauer	Start Desorption	Ende Desorption	Dauer	Mittelwert
			Datum	Datum	Tage	Datum	Datum	Tage	[Vol. %]
23°C 50%r.F	F166_A4*	Thermoplan	27.11.2014	07.12.2014	10	07.12.2014	07.01.2015	31	0,12
	F166_A5*	Thermoplan	27.11.2014	07.12.2014	10	07.12.2014	07.01.2015	31	
	F166_A6*	Thermoplan	27.11.2014	07.12.2014	10	07.12.2014	07.01.2015	31	
23°C 65%r.F	F166_A10*	Thermoplan	27.11.2014	08.12.2014	11	08.12.2014	07.01.2015	30	0,22
	F166_A11*	Thermoplan	27.11.2014	08.12.2014	11	08.12.2014	07.01.2015	30	
	F166_A12*	Thermoplan	27.11.2014	08.12.2014	11	08.12.2014	07.01.2015	30	
23°C 80%r.F	F166_A13*	Thermoplan	27.11.2014	18.12.2014	21	18.12.2014	07.01.2015	20	0,25
	F166_A14*	Thermoplan	27.11.2014	18.12.2014	21	18.12.2014	07.01.2015	20	
	F166_A15*	Thermoplan	27.11.2014	18.12.2014	21	18.12.2014	07.01.2015	20	
23°C 93%r.F	F166_A7	Thermoplan	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	1,23
	F166_A8	Thermoplan	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_A9	Thermoplan	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	
23°C 97%r.F	F166_A16	Thermoplan	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	1,49
	F166_A17	Thermoplan	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_A18	Thermoplan	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
23°C 50%r.F	F166_B16	Poroton P	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	0,54
	F166_B17	Poroton P	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_B18	Poroton P	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
23°C 65%r.F	F166_B19	Poroton P	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	0,59
	F166_B20	Poroton P	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_B21	Poroton P	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
23°C 80%r.F	F166_B4	Poroton P	24.09.2014	20.10.2014	26	20.10.2014	31.10.2014	11	0,73
	F166_B5	Poroton P	24.09.2014	20.10.2014	26	20.10.2014	31.10.2014	11	
	F166_B6	Poroton P	24.09.2014	20.10.2014	26	20.10.2014	31.10.2014	11	
23°C 93%r.F	F166_B10	Poroton P	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	1,33
	F166_B11	Poroton P	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_B12	Poroton P	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	
23°C 97%r.F	F166_B22	Poroton P	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	2,68
	F166_B23	Poroton P	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_B24	Poroton P	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	
23°C 50%r.F	F166_C10	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	0,19
	F166_C11	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_C12	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
23°C 65%r.F	F166_C13	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	0,2
	F166_C14	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_C15	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	

Anhang

23°C 80%r.F.	F166_C4	Poroton MW	24.09.2014	20.10.2014	26	20.10.2014	31.10.2014	11	0,35
	F166_C5	Poroton MW	24.09.2014	20.10.2014	26	20.10.2014	31.10.2014	11	
	F166_C6	Poroton MW	24.09.2014	20.10.2014	26	20.10.2014	31.10.2014	11	
23°C 93%r.F.	F166_C7	Poroton MW	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	0,34
	F166_C8	Poroton MW	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_C9	Poroton MW	13.10.2014	31.10.2014	18	31.10.2014	13.11.2014	13	
23°C 97%r.F.	F166_C16	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	0,51
	F166_C17	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	
	F166_C18	Poroton MW	15.10.2014	31.10.2014	16	31.10.2014	13.11.2014	13	

* Diese Versuche wurden wiederholt.

2.2 w-Wert

Beschreibung	Nummer	Art des Steines	Start	Ende	Dauer	W _{1h}	W _{4h}	W _{24h}
			Datum	Datum	Tage	kg/m ² *h ^{0,5}	kg/m ² *h ^{0,5}	kg/m ² *h ^{0,5}
Unverputzte Steine	F166_A1	Thermoplan	03.03.2014	04.03.2014	1	10,71	8,28	6,73
	F166_A2	Thermoplan	04.03.2014	05.03.2014	1	10,76	8,28	7,29
	F166_A3	Thermoplan	05.03.2014	06.03.2014	1	10,76	8,25	7,27
	F166_B1	Poroton P	06.03.2014	07.03.2014	1	8,30	6,68	5,98
	F166_B2	Poroton P	07.03.2014	08.03.2014	1	8,26	6,68	6,32
	F166_B3	Poroton P	08.03.2014	09.03.2014	1	7,90	6,20	5,68
	F166_C1	Poroton MW	09.03.2014	10.03.2014	1	7,24	6,45	5,05
	F166_C2	Poroton MW	10.03.2014	11.03.2014	1	7,77	6,71	4,97
	F166_C3	Poroton MW	11.03.2014	12.03.2014	1	7,77	6,80	5,41
Verputzte Steine	F166_D1	Thermoplan	12.03.2014	13.03.2014	1	0,94	2,26	4,82
	F166_D2	Thermoplan	13.03.2014	14.03.2014	1	0,22	0,31	2,37
	F166_D3	Thermoplan	14.03.2014	15.03.2014	1	0,15	0,45	2,28
	F166_E1	Poroton P	15.03.2014	16.03.2014	1	1,52	2,27	3,57
	F166_E2	Poroton P	16.03.2014	17.03.2014	1	0,49	1,26	3,32
	F166_E3	Poroton P	17.03.2014	18.03.2014	1	2,03	3,31	4,86
	F166_F1	Poroton MW	18.03.2014	19.03.2014	1	2,81	5,45	5,78
	F166_F2	Poroton MW	19.03.2014	20.03.2014	1	4,39	6,37	6,08
	F166_F3	Poroton MW	20.03.2014	21.03.2014	1	0,78	2,35	5,16
Verputzt und abgeschlagene Steine	F166_G1	Thermoplan	21.03.2014	22.03.2014	1	8,44	5,76	4,90
	F166_G2	Thermoplan	22.03.2014	23.03.2014	1	8,42	5,74	4,68
	F166_G3	Thermoplan	23.03.2014	24.03.2014	1	9,09	6,86	5,82
	F166_H1	Poroton P	24.03.2014	25.03.2014	1	7,67	6,04	5,48
	F166_H2	Poroton P	25.03.2014	26.03.2014	1	7,72	6,05	5,42
	F166_H3	Poroton P	26.03.2014	27.03.2014	1	7,72	6,13	5,51
	F166_I1	Poroton MW	27.03.2014	28.03.2014	1	8,88	6,83	6,08
	F166_I2	Poroton MW	28.03.2014	29.03.2014	1	8,31	6,76	5,73
	F166_I3	Poroton MW	29.03.2014	30.03.2014	1	9,02	7,20	6,41

2.3 Freie Wassersättigung

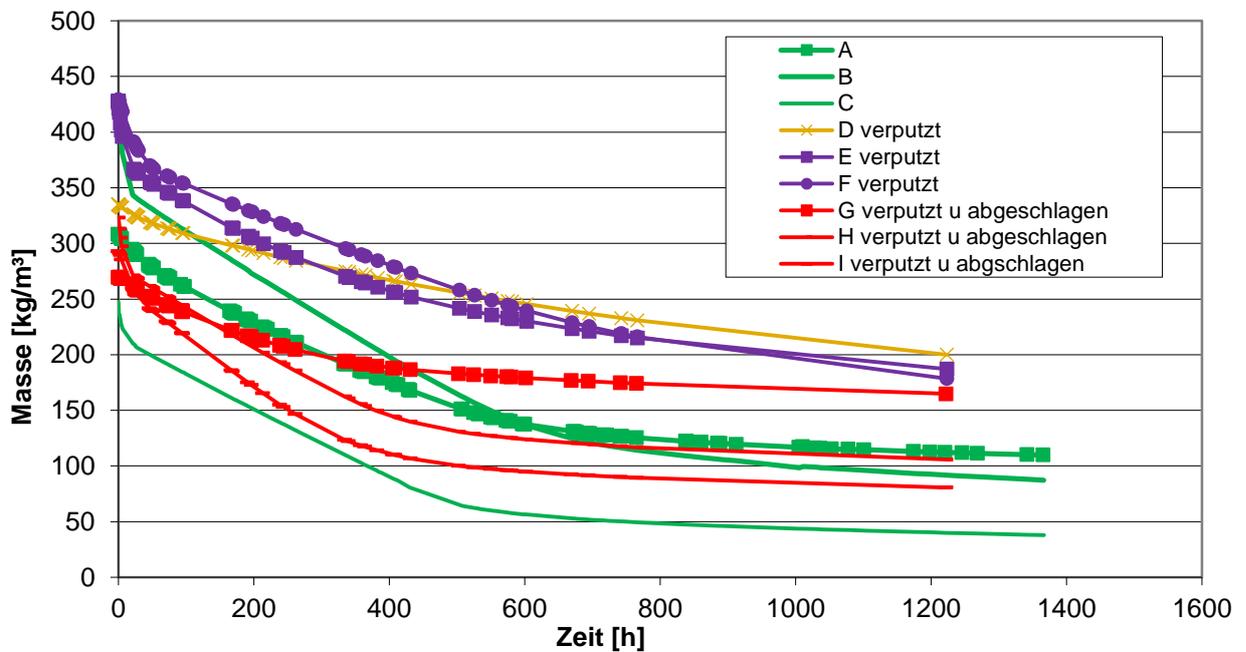
Beschreibung	Nummer	Art des Steines	Start	Ende	Dauer	Wasser- aufnahme	Massen	Volumen
			Datum	Datum	Tage	[g]	[%]	[%]
Unverputzte Steine	F166_A1	Thermoplan	19.09.2014	06.10.2014	17	3469,00	55,06	31,16
	F166_A2	Thermoplan	19.09.2014	06.10.2014	17	3102,00	46,06	27,56
	F166_A3	Thermoplan	19.09.2014	06.10.2014	17	3938,00	59,04	34,99
	F166_B1	Poroton P	19.09.2014	06.10.2014	17	4238,00	65,10	42,27
	F166_B2	Poroton P	19.09.2014	06.10.2014	17	3917,00	61,01	39,07
	F166_B3	Poroton P	19.09.2014	06.10.2014	17	4611,00	70,72	45,99
	F166_C1	Poroton MW	19.09.2014	06.10.2014	17	2693,00	39,26	24,43
	F166_C2	Poroton MW	19.09.2014	06.10.2014	17	2540,00	38,43	23,46
	F166_C3	Poroton MW	19.09.2014	06.10.2014	17	2702,00	37,48	24,24
Verputzte Steine	F166_D1	Thermoplan	29.10.2014	17.11.2014	19	3775,00	55,43	33,68
	F166_D2	Thermoplan	29.10.2014	17.11.2014	19	3776,00	53,15	33,32
	F166_D3	Thermoplan	29.10.2014	17.11.2014	19	4004,00	56,11	35,34
	F166_E1	Poroton P	30.10.2014	17.11.2014	18	4106,00	57,15	38,31
	F166_E2	Poroton P	30.10.2014	17.11.2014	18	4119,00	55,77	40,34
	F166_E3	Poroton P	30.10.2014	17.11.2014	18	4070,00	53,52	38,76
	F166_F1	Poroton MW	31.10.2014	17.11.2014	17	4306,00	59,62	39,06
	F166_F2	Poroton MW	31.10.2014	17.11.2014	17	4295,00	55,42	36,91
	F166_F3	Poroton MW	31.10.2014	17.11.2014	17	3981,00	56,68	36,11
Verputzt und abgeschlagene Steine	F166_G1	Thermoplan	04.11.2014	17.11.2014	13	2964,00	44,79	26,77
	F166_G2	Thermoplan	04.11.2014	17.11.2014	13	3086,00	45,86	27,42
	F166_G3	Thermoplan	04.11.2014	17.11.2014	13	2825,00	43,14	25,95
	F166_H1	Poroton P	04.11.2014	17.11.2014	13	3746,00	54,27	33,57
	F166_H2	Poroton P	04.11.2014	17.11.2014	13	3558,00	51,63	30,77
	F166_H3	Poroton P	04.11.2014	17.11.2014	13	3648,00	52,44	32,19
	F166_I1	Poroton MW	05.11.2014	17.11.2014	12	3247,00	44,72	28,81
	F166_I2	Poroton MW	05.11.2014	17.11.2014	12	2953,00	45,51	27,87
	F166_I3	Poroton MW	05.11.2014	17.11.2014	12	3172,00	42,54	27,69

2.4 Diffusionswiderstand μ -Wert

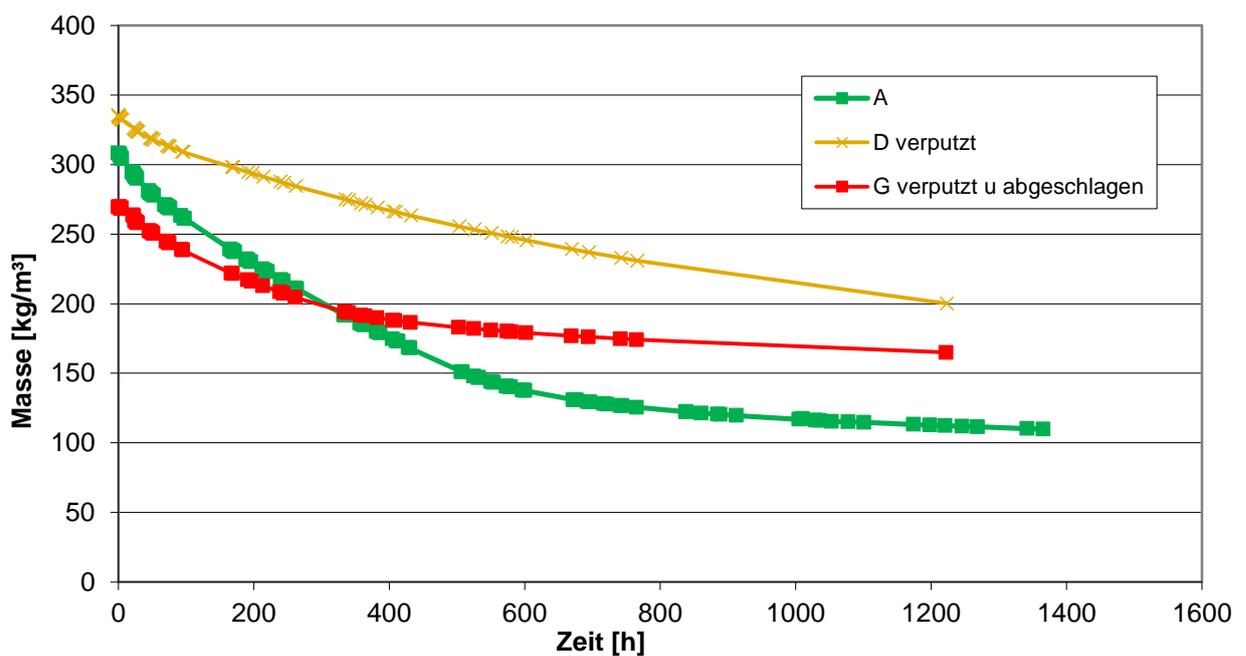
Beschreibung	Art des Steines	Start [Datum]	Ende [Datum]	Dauer Tage	Art des Tests	Probe [%]	μ -Wert [-]	Mittelwert [-]
F166_AÜ1T	Thermoplan	10.10.2014	05.11.2014	26	dry-cup	Stein	4,76	4,76
F166_A2üT	Thermoplan	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	9,7	9,65
F166_A3üT	Thermoplan	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	10,22	
F166_A4üT	Thermoplan	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	9,04	
F166_A2üW	Thermoplan	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	10,15	10,36
F166_A3üW	Thermoplan	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	9,99	
F166_A4üW	Thermoplan	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	10,95	
F166_B1üT	Poroton P	15.10.2014	05.11.2014	21	dry-cup	Stein	6,90	6,9
F166_B2üT	Poroton P	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	17,16	14,07
F166_B3üT	Poroton P	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	12,55	
F166_B4üT	Poroton P	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	12,51	
F166_B2üW	Poroton P	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	17,48	18,49
F166_B3üW	Poroton P	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	15,69	
F166_B4üW	Poroton P	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	22,30	
F166_C1üT	Poroton MW	18.11.2014	09.12.2014	21	dry-cup	Stein	4,31	4,31
F166_C2üT	Poroton MW	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	15,58	15,84
F166_C3üT	Poroton MW	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	15,50	
F166_C4üT	Poroton MW	14.10.2014	20.10.2014	6	dry-cup	Scherbe	16,44	
F166_C2üW	Poroton MW	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	16,56	16,82
F166_C3üW	Poroton MW	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	16,56	
F166_C4üW	Poroton MW	20.10.2014	04.11.2014	15	wet-cup	Scherbe	17,35	
F166_P1	Putz	18.11.2014	24.11.2014	6	dry-cup	Scherbe	5,83	5,67
F166_P2	Putz	18.11.2014	24.11.2014	6	dry-cup	Scherbe	5,73	
F166_P3	Putz	18.11.2014	24.11.2014	6	dry-cup	Scherbe	5,34	
F166_P4	Putz	18.11.2014	24.11.2014	6	dry-cup	Scherbe	5,90	
F166_P5	Putz	18.11.2014	24.11.2014	6	dry-cup	Scherbe	5,67	
F166_P6	Putz	18.11.2014	24.11.2014	6	dry-cup	Scherbe	5,55	
F166_P1W	Putz	24.11.2014	28.11.2014	4	wet-cup	Scherbe	6,3	6,37
F166_P2W	Putz	24.11.2014	28.11.2014	4	wet-cup	Scherbe	6,11	
F166_P3W	Putz	24.11.2014	28.11.2014	4	wet-cup	Scherbe	5,98	
F166_P4W	Putz	24.11.2014	28.11.2014	4	wet-cup	Scherbe	6,87	
F166_P5W	Putz	24.11.2014	28.11.2014	4	wet-cup	Scherbe	6,49	
F166_P6W	Putz	24.11.2014	28.11.2014	4	wet-cup	Scherbe	6,47	
F166_P1TG	Putz gestrichen	01.12.2014	09.12.2014	8	dry-cup	Scherbe	28,22	34,56
F166_P2TG	Putz gestrichen	01.12.2014	09.12.2014	8	dry-cup	Scherbe	33,01	
F166_P3TG	Putz gestrichen	01.12.2014	09.12.2014	8	dry-cup	Scherbe	44,64	
F166_P4TG	Putz gestrichen	01.12.2014	09.12.2014	8	dry-cup	Scherbe	28,16	
F166_P5TG	Putz gestrichen	01.12.2014	09.12.2014	8	dry-cup	Scherbe	33,04	
F166_P6TG	Putz gestrichen	01.12.2014	09.12.2014	8	dry-cup	Scherbe	40,27	

Anhang 3 Weitere Vergleiche und Berechnungen

Übersicht der Trocknungsverläufe nach Sättigung

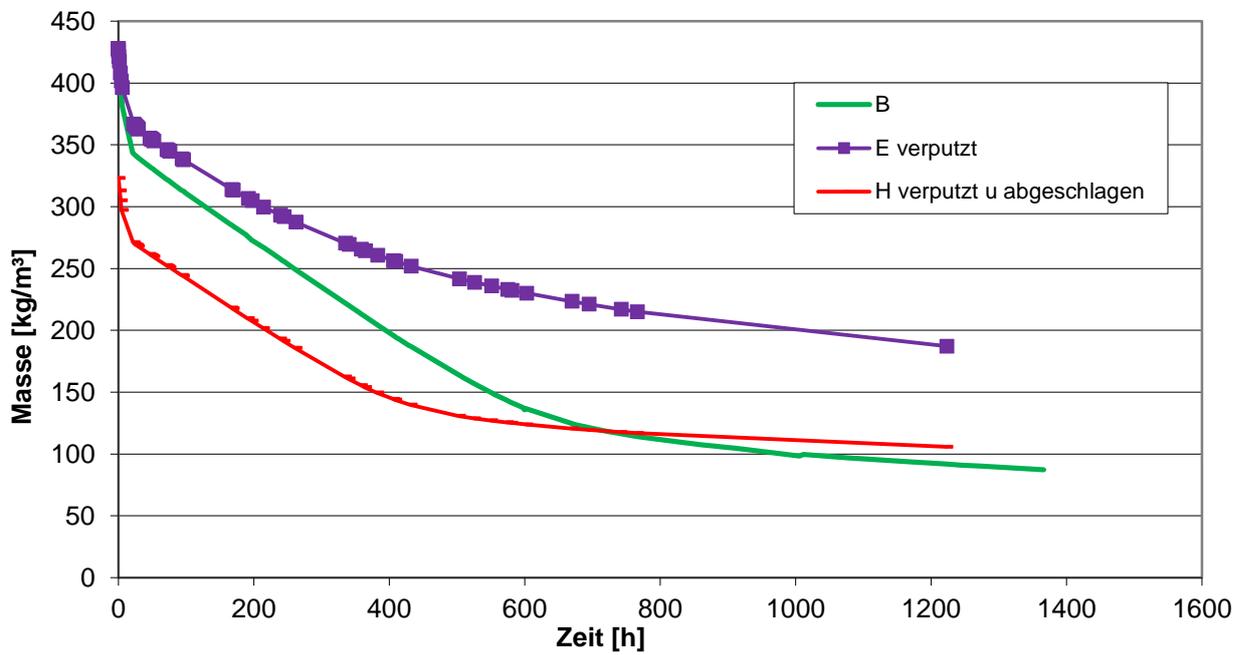


Übersicht der Trocknungsverläufe nach Sättigung Steine Thermoplan MZ7 – A, D, G

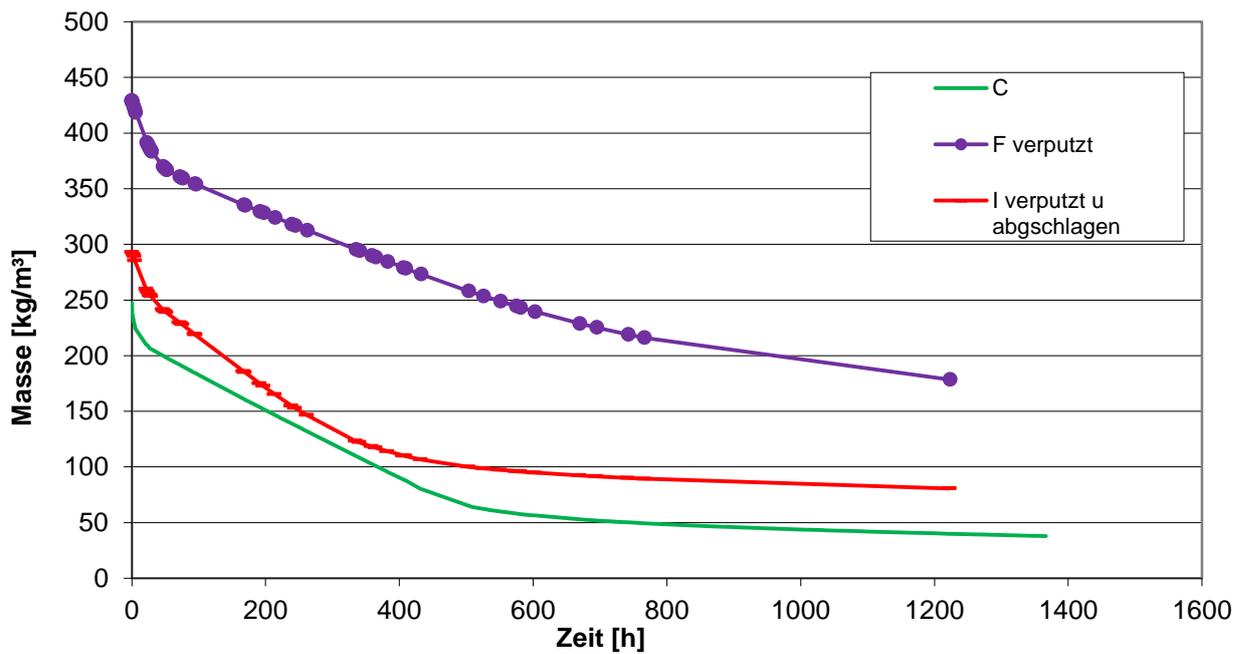


Anhang

Übersicht der Trocknungsverläufe nach Sättigung Steine Poroton T8 Perlit – B, E, H



Übersicht der Trocknungsverläufe nach Sättigung Steine Poroton T8 Mineralwolle – C, F, I



Anhang 4 Übersicht aller durchgeführten Versuche

Stand 20.03.2015

	Bezeichnung	Beschreibung	w-Wert	Freie Wassersättigung	Sorption	Trocknungsverlauf	μ-Wert
Unverputzte Steine w-Wert, Sättigung, Trocknungsverlauf	F166_A1	Thermoplan	X	X		X	
	F166_A2	Thermoplan	X	X		X	
	F166_A3	Thermoplan	X	X		X	
	F166_B1	Poroton P	X	X		X	
	F166_B2	Poroton P	X	X		X	
	F166_B3	Poroton P	X	X		X	
	F166_C1	Poroton MW	X	X		X	
	F166_C2	Poroton MW	X	X		X	
	F166_C3	Poroton MW	X	X		X	
Verputzte Steine w-Wert, Sättigung, Trocknungsverlauf	F166_D1	Thermoplan	X	X		X	
	F166_D2	Thermoplan	X	X		X	
	F166_D3	Thermoplan	X	X		X	
	F166_E1	Poroton P	X	X		X	
	F166_E2	Poroton P	X	X		X	
	F166_E3	Poroton P	X	X		X	
	F166_F1	Poroton MW	X	X		X	
	F166_F2	Poroton MW	X	X		X	
	F166_F3	Poroton MW	X	X		X	
Verputzt und abgeschlagene Steine w-Wert, Sättigung, Trocknungsverlauf	F166_G1	Thermoplan	X	X		X	
	F166_G2	Thermoplan	X	X		X	
	F166_G3	Thermoplan	X	X		X	
	F166_H1	Poroton P	X	X		X	
	F166_H2	Poroton P	X	X		X	
	F166_H3	Poroton P	X	X		X	
	F166_I1	Poroton MW	X	X		X	
	F166_I2	Poroton MW	X	X		X	
	F166_I3	Poroton MW	X	X		X	
Sorption an Scherben bei 80 % r.F.	F166_A4	Thermoplan			X		
	F166_A5	Thermoplan			X		
	F166_A6	Thermoplan			X		
	F166_B4	Poroton P			X		
	F166_B5	Poroton P			X		
	F166_B6	Poroton P			X		
	F166_C4	Poroton MW			X		
	F166_C5	Poroton MW			X		
	F166_C6	Poroton MW			X		
Sorption mit Perlite bei	F166_B7	Perlite			X		
	F166_B8	Perlite			X		

Anhang

80 % r.F.	F166_B9	Perlite			X		
Sorption an Scherben bei 93 % r.F.	F166_A7	Thermoplan			X		
	F166_A8	Thermoplan			X		
	F166_A9	Thermoplan			X		
	F166_B10	Poroton P			X		
	F166_B11	Poroton P			X		
	F166_B12	Poroton P			X		
	F166_C7	Poroton MW			X		
	F166_C8	Poroton MW			X		
Sorption mit Perlite bei 93 % r.F.	F166_C9	Poroton MW			X		
	F166_B13	Perlite			X		
	F166_B14	Perlite			X		
Sorption an Scherben bei 97 % r.F.	F166_B15	Perlite			X		
	F166_A16	Thermoplan			X		
	F166_A17	Thermoplan			X		
	F166_A18	Thermoplan			X		
	F166_B22	Poroton P			X		
	F166_B23	Poroton P			X		
	F166_B24	Poroton P			X		
	F166_C16	Poroton MW			X		
	F166_C17	Poroton MW			X		
F166_C18	Poroton MW			X			
Sorption an Scherben bei 65 % r.F.	F166_A13	Thermoplan			X		
	F166_A14	Thermoplan			X		
	F166_A15	Thermoplan			X		
	F166_B19	Poroton P			X		
	F166_B20	Poroton P			X		
	F166_B21	Poroton P			X		
	F166_C13	Poroton MW			X		
	F166_C14	Poroton MW			X		
	F166_C15	Poroton MW			X		
Sorption an Scherben bei 50 % r.F.	F166_A10	Thermoplan			X		
	F166_A11	Thermoplan			X		
	F166_A12	Thermoplan			X		
	F166_B16	Poroton P			X		
	F166_B17	Poroton P			X		
	F166_B18	Poroton P			X		
	F166_C10	Poroton MW			X		
	F166_C11	Poroton MW			X		
	F166_C12	Poroton MW			X		
μ-Wert am halben Stein unverputzt	F166_Aμ1T	Thermoplan					X
	F166_Bμ1T	Poroton P					X
	F166_Cμ1T	Poroton MW					X
	F166_A2μT	Thermoplan					X
	F166_A3μT	Thermoplan					X

Anhang

μ-Wert dry-cup 3 Scherben pro Stein	F166_A4μT	Thermoplan					X
	F166_B2μT	PorotonP					X
	F166_B3μT	Poroton P					X
	F166_B4μT	Poroton P					X
	F166_C2μT	Poroton MW					X
	F166_C3μT	Poroton MW					X
	F166_C4μT	Poroton MW					X
μ-Wert wet-cup 3 Scherben pro Stein	F166_A2μ W	Thermoplan					X
	F166_A3μ W	Thermoplan					X
	F166_A4μ W	Thermoplan					X
	F166_B2μ W	PorotonP					X
	F166_B3μ W	Poroton P					X
	F166_B4μ W	Poroton P					X
	F166_C2μ W	Poroton MW					X
	F166_C3μ W	Poroton MW					X
	F166_C4μ W	Poroton MW					X
μ-Wert dry-cup Putz ohne Farbe	F166_P1T	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P2T	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P3T	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P4T	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P5T	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P6T	Kalk-Gips-Putz					X
μ-Wert wet-cup Putz ohne Farbe	F166_P1W	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P2W	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P3W	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P4W	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P5W	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P6W	Kalk-Gips-Putz					X
μ-Wert dry-cup Putz mit Farbe	F166_P1FT	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P2FT	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P3FT	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P4FT	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P5FT	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P6FT	Kalk-Gips-Putz					X
	F166_P1F W	Kalk-Gips-Putz / Dis- persionsfarbe					
	F166_P2F W	Kalk-Gips-Putz / Dis- persionsfarbe					

Anhang

μ-Wert dry-cup Putz mit Farbe	F166_P3F W	Kalk-Gips-Putz / Dis- persionsfarbe					
	F166_P4F W	Kalk-Gips-Putz / Dis- persionsfarbe					
	F166_P5F W	Kalk-Gips-Putz / Dis- persionsfarbe					
	F166_P6F W	Kalk-Gips-Putz / Dis- persionsfarbe					
Trocknung bei 40 °C	F166_A 40°C	Thermoplan				X	
	F166_B 40°C	Poroton P				X	
	F166_C 40°C	Poroton MW				X	



Versuch läuft noch

Versuch beendet -

Sorption inkludiert Adsorption und Desorption

Anhang 5 Protokolle der Laborversuche

Die Daten sind in digitaler Form auf der beiliegenden CD zu finden.