



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
FAKULTÄT FÜR BAUINGENIEUR- UND VERMESSUNGSWESEN

LEHRSTUHL FÜR BAUKONSTRUKTION

# AUSTROCKNUNGSVERHALTEN HOCHDÄMMENDER MAUERSTEINE

DIPLOMARBEIT

DANIEL ZIRKELBACH

ANGEFERTIGT AM FRAUNHOFER INSTITUT FÜR BAUPHYSIK  
HOLZKIRCHEN

BETREUER:  
DIPL-PHYS. A. HOLM  
DIPL.-PHYS. K. SEDLBAUER

EINGEREICHT IM JUNI 2001

---

<b>1</b>	<b>Problemstellung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Feuchtehaushalt in porösen mineralischen Baustoffen</b>	<b>6</b>
2.1	Feuchtespeicherung	6
2.1.1	Sorptionsfeuchtebereich oder hygroskopischer Bereich	7
2.1.2	Kapillarwasserbereich	7
2.1.3	Übersättigungsbereich	8
2.1.4	Feuchtespeicherfunktion	8
2.2	Feuchtetransport	9
2.2.1	Wasserdampfdiffusion	9
2.2.2	Oberflächendiffusion	10
2.2.3	Kapillarleitung	11
2.3	Besonderheiten beim Feuchtetransport über Materialgrenzen	12
2.3.1	Perfekter hygrischer Kontakt	12
2.3.2	Natürlicher Kontakt	12
2.3.3	Schlechter hygrischer Kontakt infolge Ausbildung einer Luftschicht	13
2.4	Das Berechnungsmodell von WUFI	13
2.5	Für die WUFI-Berechnung benötigte Kennwerte	15
2.5.1	Feuchtespeicherfunktion	15
2.5.2	Transportkoeffizienten	16
<b>3</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse</b>	<b>19</b>
3.1	Untersuchte Baustoffe	19
3.2	Bestimmung der Kennwerte für die WUFI-Berechnung	20
3.2.1	Feuchtespeicherfunktion	20
3.2.2	Transportkoeffizienten	21
3.3	Untersuchungen der verputzten Kombiproben	27
3.3.1	Saugversuch	27
3.3.2	Trocknungsversuch	28

Austrocknungsverhalten hochdämmender Mauersteine	3
<b>4 Rechnerische Untersuchungen und Ergebnisse</b>	<b>30</b>
4.1 Nachrechnung von Saug- und Trocknungsversuchen der Kombiprobe	30
4.2 Übertragung der Erkenntnisse auf praktische Fälle	32
<b>5 Auswertung der Untersuchungen und Konsequenzen</b>	<b>36</b>
<b>6 Tabellen und Bilder</b>	<b>38</b>
<b>7 Literatur</b>	<b>73</b>

## 1 Problemstellung

Gesetzgeber und Bauherren, insbesondere in Mittel- und Nordeuropa legen, aufgrund ökologischer und ökonomischer Gesichtspunkte, immer größeren Wert auf eine leistungsfähige Wärmedämmung. Um die gesetzlich geforderten Mindestwerte zu erreichen bzw. zu übertreffen, kommen alternativ mehrschalige Wände mit getrennten tragenden und dämmenden Schichten, oder einschalige Wände aus Materialien, die beide Eigenschaften zu verbinden suchen, zum Einsatz. Der letzteren Gruppe und den mit ihrer Anwendung verbundenen, möglichen Schwierigkeiten gilt diese Arbeit.

Wärmedämmung erfolgt in den meisten Fällen mittels Einschlüssen von Luft. Dabei ist der Wärmeübergang vom Material in bewegte Luft deutlich größer als der in unbewegte. Luftbewegung entsteht bei Wärmetransport allerdings zwangsläufig, da die warme Luft aufsteigt, die kalte dagegen absinkt. Daraus entsteht die sogenannte Konvektionsströmung. Je kleiner ein in sich abgeschlossener Luftraum ist, desto geringer bleibt dieser Effekt. Der Weg zu besseren Dämmeigenschaften von Mauersteinen führt demzufolge über Lufteinschlüsse in das Material. Eine einfache Möglichkeit besteht im Einbau von Luftkammern in den Stein, eine weitere in der Verwendung von porösen Materialien. Meist werden beide Möglichkeiten miteinander kombiniert.

Ein Problem der hochdämmenden Mauersteine könnte deren Trocknungsverhalten darstellen. In mineralischen porösen Baustoffen mit monolithischer Struktur funktioniert der Feuchtetransport normalerweise in beiden Richtungen gut, d. h. das Material wird bei Kontakt mit Wasser feucht und trocknet bei entsprechenden klimatischen Bedingungen auch wieder aus. Beim Einbau wird der Stein sowohl durch Flüssigkeit, die er dem Mörtel entzieht, als auch durch kaum zu vermeidende Witterungseinflüsse feucht. Die fertiggestellte Mauer muss anschließend, teils noch in der Bauphase, teils bereits während der Nutzung, nach innen und außen trocknen. Der Nachteil von Luftkammern und Porosierung besteht nun darin, dass die Feuchtigkeit auf Ihrem Weg aus dem Stein die Lufteinschlüsse „umgehen“ muss. Bereits anhand eines Hochlochsteins [Abbildung 4] lässt sich leicht erkennen, dass

sich die Weglänge um ein Vielfaches erhöht, wenn die Flüssigkeit, anstatt geradlinig, entlang der Stege aus dem Stein „wandern“ muss. Eine entsprechend größere Wirkung zeigt die feine Porosierung des Materials. Dazu kommt noch, dass möglicherweise auf der Außenseite wasserabweisende Putze verwendet werden, die ein Austrocknen zusätzlich erschweren.

Ein hoher Wassergehalt des Steines vermindert dessen Wärmedämmeigenschaften. Wenn die Austrocknung des Steins nun aufgrund der o. g. Schwierigkeiten deutlich verlangsamt wird, kann diese Verminderung durchaus in wirtschaftlich relevantem Bereich liegen. Das Austrocknungsverhalten exemplarischer Mauersteine und damit wie stark und über welchen Zeitraum infolge der Baufeuchte die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit von den Herstellerangaben abweicht, soll im folgenden untersucht werden.

Ausgewählt werden typische Vertreter hochdämmender Mauersteine verschiedener Materialkategorien. Dabei wird zunächst das Material bzw. der Stein als solcher und anschließend der Stein zusammen mit einer marktüblichen Kombination aus Grund- und Oberputz untersucht. Die Versuche dienen zum einen der Bestimmung der wichtigsten Materialkennwerte, die als Eingangsdaten für die Berechnungen benötigt werden. Gleichzeitig können die Messdaten dazu verwendet werden, die Rechnungen zu validieren, um diese anschließend zur computergestützten Simulation realer Bedingungen zu verwenden, die in Versuchen nicht, oder nur sehr aufwendig zu erreichen wären.

## **2 Feuchtehaushalt in porösen mineralischen Baustoffen**

Ein Großteil der bei uns eingesetzten Baustoffe sind porös und mineralisch. Solche Materialien sind hygroskopisch, d. h. in der Lage, Feuchte aufzunehmen und zu speichern. Mit Feuchte wird hierbei Wasser in den drei physikalischen Zuständen: gasförmig, flüssig und fest bezeichnet, da eine genaue Differenzierung des Zustands innerhalb des Baustoffs nicht immer möglich ist. Nicht hygroskopische Stoffe bleiben bei Kontakt mit feuchter Luft trocken, d. h. sie enthalten kein oder nur chemisch gebundenes Wasser.

Die geometrische Beschaffenheit des Porenraums der Materialien ist von großer Bedeutung für deren Feuchtehaushalt, da Transport und Speicherung innerhalb der Poren stattfinden. Der Porenraum mineralischer Stoffe ist allerdings in keiner Weise homogen. Die einzelnen Poren unterscheiden sich in Durchmesser, Form und Position sowie darin, ob es sich um isolierte Poren oder solche mit offener Verbindung zur Stoffoberfläche handelt [Gertis, Werner]. Bisher wurden häufig Porenraummodelle verwendet, die auf der Annahme unverzweigter zylinderförmiger Einzelporen gründen. Mikroskopische Untersuchungen von [Künzel] und [Krus] haben jedoch gezeigt, dass diese Vorstellung äußerst unzulänglich ist [Abbildung 2]. Allerdings ist es auch kaum möglich, ein anderes Modell zu entwickeln, das eine exakte Widergabe des Porenraums gewährleistet. Es erscheint daher sinnvoller, Modelle zur direkten Beschreibung der feuchtetechnischen Eigenschaften der Materialien zu verwenden, ohne ein Porenraummodell aufzustellen. Soweit in dieser Arbeit dennoch Porenraummodelle verwendet werden, dienen sie zur anschaulichen Beschreibung der jeweiligen Transport- oder Speichervorgänge.

### **2.1 Feuchtespeicherung**

Für poröse mineralische Stoffe lässt sich der Wassergehalt in drei spezifische Bereiche, den Sorptionsfeuchtebereich, den Kapillarwasserbereich und den Übersättigungsbereich, unterteilen.

### 2.1.1 Sorptionsfeuchtebereich oder hygroskopischer Bereich

Als Sorption bezeichnet man die Anlagerung von Wasser aus der umgebenden feuchten Luft in das Material bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustands (auch als Ausgleichsfeuchte bezeichnet). Bei konstanter Temperatur wird der Zusammenhang zwischen eingelagerter Wassermenge und relativer Luftfeuchte durch die Sorptionsisotherme beschrieben. Für hygroskopische poröse Stoffe haben die Sorptionsisotherme einen s-förmigen Verlauf. Dabei tritt ein Hystereseeffekt zwischen Fechteaufnahme und -abgabe auf [Abbildung 1], der sich hauptsächlich durch die unterschiedlichen Benetzungseigenschaften bei Adsorption und Desorption erklärt. Der hygroskopische Bereich kann noch einmal untergliedert werden [Abbildung 1]: Im sogenannten monomolekularen Bereich bildet sich bei niedriger relativer Luftfeuchte auf den Poreninnenoberflächen eine Wasserschicht mit der Dicke eines einzelnen Wassermoleküls. Im multimolekularen Bereich wird diese Schicht dicker und bildet einen Film zahlreicher übereinanderliegender Wassermoleküle. Der Bereich der Kapillarkondensation beginnt bei etwa 70 % r. F. und ist durch einen deutlichen Anstieg der Sorptionsisotherme gekennzeichnet. Dieser Anstieg beruht darauf, dass sich in kleineren Poren bereits Wasserinseln bilden, über deren konkav gekrümmten seitlichen Oberflächen der Sättigungsdampfdruck entsprechend dem Kelvin-Thomson-Gesetz erniedrigt ist [Krus].

### 2.1.2 Kapillarwasserbereich

Ein weiterer, sehr deutlicher Anstieg der Sorptionsisotherme erfolgt bei einer relativen Luftfeuchte von über 95 %. Hier beginnt der Kapillarwasserbereich. Kapillaraktives Material, das mit Wasser in Kontakt gebracht wird, saugt dieses bis zum Erreichen der freien Wassersättigung auf. Unter der freien Wassersättigung  $u_f$  versteht man denjenigen Wassergehalt, der unter Normaldruck und ohne Einwirken äußerer Kräfte durch freies Saugen erreicht werden kann.

Wie bereits in Ziffer 2 erläutert ist die Verwendung des Zylinderkapillarmodells zur Berechnung des Kapillardrucks nicht sinnvoll. Der

Kapillardruck wird daher direkt mit Hilfe der Kelvin-Beziehung bestimmt [Krus]. Diese gibt den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte über der gekrümmten Wasseroberfläche und dem Kapillardruck wieder.

$$\varphi = \exp\left[\frac{-p_k}{\rho_w \cdot R_D \cdot T}\right] \quad \text{Gleichung 1}$$

mit:

$\varphi$	[-]	Relative Luftfeuchte
$p_k$	[bar]	Kapillardruck
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte von Wasser
$R_D$	[J/kg·K]	Gaskonstante für Wasserdampf

### 2.1.3 Übersättigungsbereich

Die freie Wassersättigung liegt bei kapillarporösen Materialien immer unterhalb des, durch den offenen Porenraum möglichen, maximalen Wassergehalts. In einigen Poren verbleiben Lufteinschlüsse, die nur durch Aufbringen äußerer Kräfte oder durch sehr lange Lagerung in Wasser, bei der sich die eingeschlossene Luft im Wasser löst, entfernt werden können [Krus].

Diese Poren tragen zum Kapillartransport nicht bei. Wassergehalte in diesem Bereich treten in der Praxis lediglich bei Dampfdiffusion im Temperaturgefälle auf [Künzel]. Ansonsten ist dieser Bereich für die Bauphysik von vernachlässigbarer Bedeutung.

### 2.1.4 Feuchtespeicherfunktion

Die Beziehung von Wassergehalt zu relativer Luftfeuchte über die zuvor beschriebenen drei Bereiche wird mit der Feuchtespeicherfunktion [Abbildung 1] erfasst.

Bis zu einer relativen Luftfeuchte von 95 % ist die Bestimmung der Sorptionsisotherme über die Messung des Wassergehalts bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen im Labor möglich. Zahlreiche



Baustoffe wie Beton oder Holz erreichen in diesem Bereich bereits eine so hohe Sorptionsfeuchte, dass die Feuchtespeicherfunktion bei vernachlässigbarem Genauigkeitsverlust auf den Bereich von über 95 % r. F. extrapoliert werden kann. Für andere, insbesondere eher grobporige Baustoffe wie Ziegel, ist es notwendig, die Feuchtespeicherfunktion für den Bereich über 95 % r. F. explizit zu bestimmen. Da relative Luftfeuchten von über 95 % weder genau messbar noch in der Klimakammer ohne Tauwasserbildung herstellbar sind, hat [Krus] die sog. Saugspannungsmessung zur Bestimmung des Wassergehalts in diesem Bereich entwickelt. Dabei werden die Proben zunächst frei gesättigt und das Wasser anschließend mittels mehrerer Druckstufen bis max. 100 bar wieder entfernt. Bei jeder dieser Druckstufen stellt sich, bei messbarem Wassergehalt, ein Gleichgewicht zwischen Außendruck und Kapillardruck der größten gerade noch gefüllten Poren ein. Dem jeweiligen Druck kann über das Gesetz der kapillaren Steighöhe genau ein Porenradius und diesem wiederum über das Kelvin-Thomson-Gesetz die entsprechende relative Luftfeuchte zugeordnet werden. Dieser überhygroskopische Teil der Feuchtespeicherfunktion schließt sich nahtlos an die Sorptionsisotherme an.

## 2.2 Feuchtetransport

[Bild] zeigt die möglichen Varianten des Feuchtetransports sowie deren Ursachen in den jeweiligen Aggregatzuständen. Unter bauphysikalischen Bedingungen treten in porösen mineralischen Materialien, u. a. nach [Kießl] und [Krus], nur drei maßgebliche Feuchtetransportvorgänge auf: die Wasserdampfdiffusion, die Oberflächendiffusion und die Kapillarleitung.

### 2.2.1 Wasserdampfdiffusion

Als Wasserdampfdiffusion bezeichnet man den Transport von Wasserdampf entlang des Partialdruckgefälles. Wird der Transport der Wassermoleküle durch Stöße mit der Porenwand bestimmt, spricht man von Effusion. Sie tritt in Mikroporen auf, deren Durchmesser kleiner als die mittlere freie Weglänge eines Wassermoleküls ist. Als reine Diffusion bezeichnet man dagegen den Transport, der im Wesentlichen durch einen Impulsaustausch der

Wassermoleküle untereinander bestimmt ist und in den größeren Poren stattfindet. Aufgrund des breiten Porenraumspektrums der meisten Baustoffe ist eine exakte Unterscheidung zwischen reiner Diffusion und Effusion nicht möglich, nach [Künzel] allerdings auch nicht notwendig. Für die praktischen Belange der Bauphysik kann der Mischtransport aus Diffusion und Effusion hinreichend genau mit folgendem Ansatz beschrieben werden:

$$\dot{m} = -\frac{D_D}{\mu \cdot R_D \cdot T} \cdot \nabla p = -\frac{\delta}{\mu} \cdot \nabla p \quad \text{Gleichung 2}$$

mit:

$\dot{m}$	[kg/m <sup>2</sup> ·s]	Dampfdiffusionsstromdichte
$D_D$	[m <sup>2</sup> /s]	Dampfdiffusionskoeffizient in Luft
$R_D$	[J/kg·K]	Gaskonstante für Wasserdampf
$p$	[Pa]	Wasserdampfpartialdruck
$\mu$	[-]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
$\delta$	[kg/m·s·Pa]	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft

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

$$D_D = 2.3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{p_0}{p_L} \left( \frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit:

$p_0$	[bar]	Normdruck
$p_L$	[bar]	Umgebungsluftdruck

### 2.2.2 Oberflächendiffusion

Bei steigender relativer Luftfeuchte steigt auch die Zahl der, durch Sorption an den Porenwänden angelagerten Wassermoleküle, so dass sich ein,

entsprechend der Zunahme der Luftfeuchte dicker werdender sog. Sorbatfilm bildet [Brunauer] [Künzel]. Ab etwa 60 % r. F. werden die Wassermoleküle im Sorbatfilm soweit beweglich, dass ein Transport in Richtung des dünner werdenden Films, d. h. in Richtung der niedrigeren relativen Luftfeuchte einsetzt. Dieser Transportmechanismus ist in porösen Baustoffen bei hohen relativen Luftfeuchten deutlich leistungsfähiger als die reine Dampfdiffusion. Unter der Annahme, dass der Massenstrom bei der Oberflächendiffusion proportional dem Schichtdickengefälle und damit dem Konzentrationsgefälle ist, lässt sich dieser Transport in den Diffusionsansatz für den Flüssigkeitstransport einbeziehen [Krus].

### 2.2.3 Kapillarleitung

Die Kapillarleitung, ihre Ursachen und Gesetzmäßigkeiten werden unter anderen von [Schubert], [Wolf] oder [Bakker] ausführlich erläutert. Eine exakte theoretische Beschreibung der Kapillarleitung in porösen mineralischen Baustoffen ist, wie bereits unter Ziffer 2 beschrieben, aufgrund deren komplexer Porenraumbeschaffenheit nicht möglich. Da die Voraussetzung für Kapillarleitung eine vollständig mit Wasser gefüllte Pore ist, tritt diese nur bei relativ hohem Wassergehalt auf, der entweder durch Ansammlung von Sorptionsfeuchte ab relativen Feuchten von über 95 % oder durch direkten Kontakt mit Wasser erreicht wird. Der Feuchtestrom dauert solange an, bis sich die Wassermasse in einem mechanischen Gleichgewicht befindet. Für die Beschreibung des Flüssigtransports ist nach [Grunewald], [Kießl] oder [Künzel] folgender Diffusionsansatz gebräuchlich:

$$\dot{m}_{\text{Fl}} = -D_{\text{W}}(u) \cdot \nabla_{\text{W}} \frac{dw}{dx} \quad \text{Gleichung 4}$$

mit:

$\dot{m}_{\text{Fl}}$	[kg/m <sup>2</sup> ·s]	Flüssigstromdichte
$D_{\text{W}}$	[m <sup>2</sup> /s]	Flüssigtransportkoeffizient
$u$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt

## **2.3 Besonderheiten beim Feuchtetransport über Materialgrenzen**

In der Praxis besteht Mauerwerk normalerweise immer aus mehreren Schichten. Der ideale Transport wie unter 3.2 beschrieben setzt jedoch zunächst eine monolithische Struktur voraus. [Holm] beschäftigt sich mit dem Feuchtetransport über Schichtgrenzen hinweg. Dabei unterscheidet er drei verschiedene Kontaktkonfigurationen zwischen den Materialien: den perfekten hygrischen Kontakt, den natürlichen Kontakt und den „schlechten“ Kontakt infolge der Ausbildung einer Luftschicht.

### **2.3.1 Perfekter hygrischer Kontakt**

Perfekter hygrischer Kontakt ist nur bei Materialien möglich, die nahezu identische Feuchtetransporteigenschaften, insbesondere bezüglich der Kapillarleitung, haben. Die Porenstruktur beider Materialien muss dabei ideal miteinander verbunden sein, so dass die kapillaren Zugkräfte nicht unterbrochen werden. Dies ist im Labor durch eine Verbindung zweier Materialien mit dünnflüssigem Kaolinton möglich, in der Praxis dagegen tritt der perfekte hygrische Kontakt nicht auf.

### **2.3.2 Natürlicher Kontakt**

Der natürliche Kontakt zweier Materialien tritt in der Praxis am häufigsten auf: Die Kontaktflächen sind zwar perfekt aneinander angepasst, die Porenstruktur der beiden Materialien ist jedoch unterschiedlich, beispielsweise bei verputztem Ziegelmauerwerk. Der Kapillare Zug zwischen den Materialien ist unterbrochen. [Holm] stellt dabei fest, dass es insbesondere bei der Aufbringung von Putz auf Mauerwerk zu einem besonderen Phänomen kommt. Während des Aushärtungsprozesses kristallisieren Bestandteile des Putzes aus und verstopfen die Poren des Mauersteins an der Kontaktfläche, wodurch der Feuchtetransport stark behindert wird. Über Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop wird von [Holm] belegt, dass diese „Verstopfung“ der Poren nur in unmittelbarer Nähe (maximal 1 mm Abstand) der Schichtgrenze auftritt. Dieser Bereich wird als Grenzschicht oder Widerstandsschicht bezeichnet und kann die Feuchtetransportkoeffizienten

um bis zu Faktor 2000 verringern. Bei zementgebunden Putzen wird zudem beobachtet, dass das Material bei lang andauerndem Kontakt mit Wasser quillt und sich die Poren dadurch verengen, was eine zusätzliche Behinderung des Feuchtetransports zur Folge hat.

Die beschriebenen Widerstandsschichten treten nicht bei allen Putzen in gleicher Intensität auf. [Bednar] stellt beispielsweise fest, dass Gipsputze, auf Ziegel aufgebracht, überhaupt keine messbare Widerstandsschicht haben.

### **2.3.3 Schlechter hygrischer Kontakt infolge Ausbildung einer Luftschicht**

Wenn sich zwischen den in Kontakt stehenden Materialien eine Luftschicht ausbildet, ist die Kapillarleitung vollständig unterbrochen. Eine solche Luftschicht kann sich beispielsweise durch Lösen der Schichten voneinander infolge Setzungsverformungen einstellen. Der Weitertransport der Feuchte ist dann nur noch über Wasserdampfdiffusion möglich.

## **2.4 Das Berechnungsmodell von WUFI**

WUFI [Künzel] ist ein Programm, das eine Berechnung des instationären hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen unter realen klimatischen Bedingungen ermöglicht. Dabei stützt es sich auf die neuesten Erkenntnisse bezüglich Dampfdiffusion und Flüssigtransport in Baustoffen und ist bereits umfassend validiert. Es eignet sich insbesondere zur Beurteilung von Tauwassergefahr, Austrocknungsdauer von Baufeuchten, Problemen infolge Niederschlagseinwirkung auf Außenbauteile sowie Schwierigkeiten bei Umnutzung oder Sanierungsvorhaben.

Das Programm setzt idealen thermischen und hygrischen Kontakt an den Materialgrenzen voraus. Zur Berechnung werden folgende Bilanzgleichungen für Wärme und Feuchte verwendet [Künzel]:

Wärmebilanz:

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \Delta(\lambda \cdot \Delta \vartheta) + h_v \cdot \Delta \left( \frac{\delta}{\mu} \cdot \Delta(\varphi \cdot p_s) \right) \quad \text{Gleichung 5}$$

Feuchtebilanz:

$$\frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla \left( D_\varphi \cdot \nabla \varphi + \frac{\delta}{\mu} \cdot \nabla(\varphi \cdot p_s) \right) \quad \text{Gleichung 6}$$

mit:

$\partial H / \partial \vartheta$	[J/m <sup>3</sup> ·K]	Wärmespeicherfähigk. d. feuchten Baustoffs
$\partial H / \partial \varphi$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Feuchtespeicherfähigkeit des Baustoffs
$\lambda$	[W/m·K]	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs
$D_\varphi$	[kg/m·s]	Flüssigleitkoeffizient des Baustoffs
$\delta$	[kg/m·s·Pa]	Dampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
$h_v$	[J/kg]	Verdunstungsenthalpie des Wassers
$p_s$	[Pa]	Wasserdampfsättigungsdruck
$\vartheta$	[°C]	Temperatur
$\varphi$	[-]	Relative Feuchte

Die Gleichungen enthalten links die Speicherterme, rechts die Transportterme. Die Wärmespeicherung setzt sich aus der Wärmekapazität des trockenen Baustoffs und der des darin enthaltenen Wassers zusammen. Der Wärmetransport basiert auf der Wärmeleitung und dem Dampfenthalpiestrom. Die Feuchtespeicherung wird durch die Ableitung der Feuchtespeicherfunktion beschrieben. Beim Feuchtetransport zeigen Oberflächendiffusion und Kapillarleitung nur eine geringe Abhängigkeit von der Temperatur. Die Dampfdiffusion dagegen ist stark von der Temperatur beeinflusst, da der Sättigungsdampfdruck exponentiell zur Temperatur steigt. Die Lösung der Gleichungen erfolgt iterativ mittels Diskretisierung in einem

impliziten Finite-Volumen-Verfahren. Die Genauigkeit der Lösung hängt dabei von der Gitterweite für die Finiten Volumen und der Größe der Zeitschritte ab.

## 2.5 Für die WUFI-Berechnung benötigte Kennwerte

In der Materialdatenbank des Programms sind bereits zahlreiche Baustoffe enthalten, auf die man bei den Berechnungen zurückgreifen kann. Es ist aber auch möglich, neue Baustoffe in das Programm zu implementieren. Dazu bietet WUFI Approximationen für die Feuchtespeicherfunktion und die Transportkoeffizienten an, für die nur die Kenntnis weniger Stoffkennwerte erforderlich ist. Die gebräuchlicheren dieser Kennwerte wie Wasseraufnahmekoeffizient, Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl oder Rohdichte können meist den Herstellerangaben entnommen werden. Werte für Bezugsfeuchte- und Sättigungswassergehalt sowie für die Transportkoeffizienten bei verschiedenen Feuchtegehalten müssen dagegen in eigenen Versuchen bestimmt werden.

### 2.5.1 Feuchtespeicherfunktion

[Künzel] schlägt eine Approximation der Feuchtespeicherfunktion entsprechend folgender Formel vor:

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

mit:

$u$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt bei $\varphi$
$u_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Freie Wassersättigung
$b$	[-]	Approximationsfaktor
$\varphi$	[-]	Relative Luftfeuchte

Für die Approximation ist es notwendig, den Sättigungswassergehalt im Labor zu bestimmen. Weiterhin kann der Approximationsfaktor  $b$  bei Kenntnis eines weiteren Wassergehalts bei vorgegebenem  $\varphi$  leicht berechnet werden. Im Programm wird hierbei der Bezugsfeuchtegehalt  $u_{80}$  verwendet. [Künzel]

schlägt vor, diese Approximation der Feuchtespeicherfunktion nur für abschätzende Berechnungen zu verwenden. Die Validierung ist inzwischen aber für so viele Materialien erfolgt, dass die Eignung für poröse mineralische Baustoffe vorausgesetzt werden kann.

## 2.5.2 Transportkoeffizienten

Für die Berechnung des Feuchtetransports benötigt WUFI den Feuchtetransportkoeffizienten  $D_{w0}$  bei 80 % relativer Luftfeuchte, den Kapillartransportkoeffizienten  $D_{ws}$  bei freier Sättigung und direktem Kontakt des Baustoffs mit Wasser (Saugen) sowie den Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung  $D_{ww}$ , ebenfalls bei freier Wassersättigung jedoch ohne direkten Wasserkontakt.

### Ermittlung des Kapillartransportkoeffizienten $D_{ws}$ aus dem w-Wert

Die exakte Bestimmung des wassergehaltsabhängigen Kapillartransportkoeffizienten  $D_{ws}$  eines Materials ist nur über eine Messung der Wassergehaltsverteilung im Baustoff, beispielsweise mittels kernmagnetischer Resonanz oder  $\gamma$ -Durchstrahlung, möglich. Derartige Messungen sind mit großem zeitlichen und finanziellem Aufwand verbunden, und daher in der Praxis häufig nicht relevant.

[Krus, Holm, Schmidt] zeigen, dass es alternativ möglich ist, den Kapillartransportkoeffizienten aus den leicht zu ermittelnden Stoffkennwerten Freie Wassersättigung  $u_f$ , Bezugsfeuchtegehalt  $u_{80}$  und Wasseraufnahmekoeffizient  $w$  hinreichend genau zu bestimmen. Dabei wird aus der Gleichung für den Wasseraufnahmekoeffizienten nach [DIN 52 617], dem Diffusionsansatz nach [Krischer] sowie dem 2. Fick'schen Gesetz eine Beziehung zwischen Kapillartransportkoeffizienten  $D_{ws}$  und w-Wert hergestellt, die für konstante, d. h. feuchteunabhängige Transportkoeffizienten gültig ist.

Eine gute Approximation der Kapillartransportkoeffizienten ist mittels einer Exponentialfunktion möglich. Um die Abhängigkeit des Transportkoeffizienten



von der Feuchte zu berücksichtigen wird ein Korrekturfaktor  $K$  eingeführt, der abhängig ist vom Verhältnis des Kapillartransportkoeffizienten bei freier Wassersättigung ( $D_{ws}$ ) zum Kapillartransportkoeffizienten bei 80 % relativer Feuchte ( $D_{w0}$ ). Untersuchungen haben gezeigt, dass man für viele mineralische Stoffe, bei verhältnismäßig geringen Abweichungen, von  $D_{w0} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  ausgehen kann.

Mit dieser Annahme für  $D_{w0}$  ergibt sich folgende Gleichung zur Bestimmung von  $D_{wf}$  bei den o. g. bekannten Eingangswerten:

$$\frac{4 \cdot (D_{ws} - D_{w0})}{\pi \cdot K \cdot \ln\left(\frac{D_{ws}}{D_{w0}}\right)} = \frac{w^2}{u_f \cdot (u_f - u_{80})} \quad \text{Gleichung 8}$$

mit:

$D_{ws}$	[m <sup>2</sup> /s]	Kapillartransportkoeffizient bei freier Wassersättigung
$D_{w0}$	[m <sup>2</sup> /s]	Kapillartransportkoeffizient im Sorptionsfeuchtebereich
$w$	[kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup> ]	Wasseraufnahmekoeffizient
$u_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt bei freier Sättigung
$u_{80}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Wassergehalt bei 80 % r. F.
$K$	[-]	Korrekturfunktion (empirisch)

### **Ermittlung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung $D_{ww}$ aus Trocknungsversuchen**

Auch wenn ein kapillaraktives Material nicht mehr direkt mit Wasser in Berührung ist, findet ein Weitertransport des Wassers in den Poren statt. Dieser Weitertransport beruht darauf, dass Poren mit kleinen Radien zwar eine höhere Saugspannung entwickeln als Poren mit größeren Radien, gleichzeitig aber der eindringenden Flüssigkeit einen größeren Strömungswiderstand entgegensetzen. Während des Saugvorgangs füllen sich daher die großen Poren schneller mit Wasser, als dieses von den kleinen Poren weiterbefördert werden kann. Wenn der Kontakt zum Wasser

unterbrochen wird, beginnen die kleineren Poren mit Ihrer höheren Saugspannung die größeren Poren leer zu saugen.

Dieser Weitertransport verläuft mit geringerer Geschwindigkeit und muss daher mit einem eigenen Transportkoeffizienten für die Weiterleitung  $D_{ww}$  berücksichtigt werden. Bisher konnte für den Koeffizienten der Weiterverteilung keine ähnlich vereinfachende Abschätzungsmethode aus Standardstoffkennwerten wie für den Saugvorgang ermittelt werden. [Holm, Krus] zeigen jedoch, dass es möglich ist, diesen verbliebenen unbekanntem Stoffparameter aus Trocknungsversuchen und einer rechnerischen Anpassung mit WUFI an die Messwerte zu bestimmen.

Am Anfang des Trocknungsversuchs ist die Verdunstungsgeschwindigkeit vom Material unabhängig, da an der Oberfläche ausreichend Verdunstungswasser zur Verfügung steht. Maßgeblich ist hier der Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$ , der von der genauen Position der Probe in der Klimakammer und der dort vorhandenen Luftbewegung bestimmt wird. Mit dem Ergebnis für  $D_{ws}$  und mit einem Startwert von  $D_{ww} = D_{ws}$  wird daher zunächst der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  ausgehend von  $8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  solange erhöht, bis die Berechnung der Messung entspricht. Diese Bestimmung ist im anfänglich geradlinigen Bereich leicht möglich. Bei der Anpassung des restlichen Verlaufs der Rechnung an die Messkurve wird jetzt  $D_{ww}$  solange reduziert bis auch die weitere Übereinstimmung zufriedenstellend ist.

Sollte die Anpassung auf diesem Weg nicht gelingen, z. B. bei Materialien, die entweder einen sehr hohen oder sehr niedrigen  $w$ -Wert, infolge eines entsprechenden Porengefüges, aufweisen, ist ggf. eine Korrektur von  $D_{w0}$  erforderlich. Aus den Verläufen von Rechnung und Messung bei Saugen und Trocknen ist relativ leicht zu erkennen, ob im eher trockenen Material die Steigung der Rechenkurve gegenüber der Messung zu groß oder zu klein ist -  $D_{w0}$  also erhöht oder erniedrigt werden muss. Da man sich dem Ziel so nur iterativ nähern kann und dabei immer beide Verläufe, Trocknung und Saugen, zu berücksichtigen sind, ist die Anpassung auf diesem Weg etwas aufwendiger.

### **3 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse**

#### **3.1 Untersuchte Baustoffe**

In dieser Arbeit werden vier Steintypen untersucht: Ziegel, Porenbeton, Blähton und Bimsbeton. Gemeinsames Auswahlkriterium ist ein möglichst niedriger Wärmeleitkoeffizient  $\lambda$ . In Ziffer 1 wurde bereits auf die Möglichkeit der Verbesserung der Wärmedämmeigenschaften von Mauersteinen mittels Luftkammern oder Porosierung hingewiesen. Die verwendeten Steine setzen meist eine Kombination aus beiden Möglichkeiten ein, wobei die Porosierung auf sehr unterschiedliche Weise erreicht wird.

Ziegel bestanden früher üblicherweise aus der kompakten Ziegelmasse, die bei der Produktion in Formen gepresst und mit Luftkammern versehen wurde. Die Kammern haben jedoch den Nachteil, dass der eingeschlossene Luftraum relativ groß, und dementsprechend die Wärmedämmung über auftretende Konvektionsströmung beeinträchtigt ist. Auch wenn die Kammern in Form und Größe weiter optimiert werden, sind doch produktionstechnisch und statisch bedingte Grenzen gesetzt. Daher hat man parallel zum Einbau von Luftkammern begonnen, die Ziegelmasse selbst zu porosieren. Dies geschieht über Zugabe von Porosierungsmitteln wie Sägemehl, Polystyrol oder Papierfangstoffen, die während des Brennvorgangs verbrennen und Lufteinschlüsse im Material hinterlassen. [Abbildung 4] bis [Abbildung 6] zeigen Fotos der drei untersuchten Ziegel.

Porenbeton oder auch Gasbeton ist von den untersuchten Mauersteinen der einzige, der aufgrund seiner sehr hohen Materialporosierung auf Luftkammern ganz verzichtet. Bei der Produktion wird der Ausgangsmasse aus Sand, Kalk, Zement und Wasser ein Treibmittel beigefügt, welches bei der Dampfhärtung in Autoklaven die Ausbildung zahlreicher Poren bewirkt [Abbildung 8].

Bei der Herstellung von Blähton wird ein spezieller Rohton verwendet, der zunächst aufbereitet und in Drehöfen in Form kleiner Kügelchen getrocknet wird. Beim anschließenden Brennvorgang „blähen“ sich die Kügelchen auf und es entstehen im Inneren zahlreiche Poren, während das Material außen eine deutlich dichtere, gesinterte Oberfläche ausbildet. Die einzelnen

Tonkügelchen werden mit Zement als Bindemittel zu Mauersteinen mit haufwerksporigem Gefüge verarbeitet [Abbildung 7].

Die Herstellung von Bimsbeton ist der von Blähton vergleichbar. Allerdings werden keine geblähten Tonkügelchen verwendet sondern Bimskörner aus vulkanisch entstandenem Naturbims, der bei Abbau und Aufbereitung in eine, für die Weiterverarbeitung geeignete Korngröße gebracht wird [Abbildung 9].

Neben den Mauersteinen werden zwei Kalk-Zement-Putze verschiedener Hersteller, ein Grundputz und ein Oberputz, untersucht. Beide Putze sind laut Deklaration für ihren jeweiligen Einsatzbereich geeignet, wobei der Oberputz als „wasserabweisend“ bezeichnet wird. Die Herstellung der Putze erfolgt entsprechend der Anweisung, mit der in der Praxis üblichen Genauigkeit.

[Tabelle 1] zeigt einen Überblick über die Kenndaten der untersuchten Mauersteine und Putze. Die verschiedenen Mauersteine werden senkrecht zur Einbaudicke halbiert. Die Messung der ganzen Probe mit 36 cm Dicke würde sehr lange Messzeiträume erfordern. Außerdem entspricht die Halbierung den symmetrischen Verhältnissen der Wand. Aus den Putzen werden der Norm entsprechend runde Proben mit 20 cm Durchmesser und 2 cm Dicke erstellt. An diesen Proben werden die, für die Implementierung in WUFI erforderlichen, Kennwerte bestimmt.

## **3.2 Bestimmung der Kennwerte für die WUFI-Berechnung**

### **3.2.1 Feuchtespeicherfunktion**

Wie unter Ziffer 2.5.1 dargestellt, ist eine Approximation der Feuchtespeicherfunktion in WUFI bei Kenntnis der Stoffkennwerte Freie Wassersättigung  $u_f$  und Bezugsfeuchtegehalt  $u_{80}$  möglich.

Für die Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts  $u_{80}$  bei 80 % r. F. werden die Einzelproben im Ofen, entsprechend den Bestimmungen von [DIN EN ISO 12570], getrocknet und anschließend in der Klimakammer bei 23° C und 80 % r. F. bis zur Massenkonstanz gelagert. Massenkonstanz ist

dabei als eine Gewichtsveränderung von kleiner 0,1 % in 24 Stunden definiert.

Die typischerweise niedrigsten Werte für  $u_{80}$  mit gut  $10 \text{ kg/m}^3$  weisen die Ziegel auf. Der hydrophobierte Oberputz und der Blähton liegen hier knapp über den Ziegeln, während Grundputz, Porenbeton und insbesondere der Bimsbeton mit 20 bzw.  $28 \text{ kg/m}^3$  deutlich höhere Sorptionsfeuchten erreichen.

Unter der freien Wassersättigung versteht man, wie unter Ziffer 2.1.3 beschrieben, denjenigen Wassergehalt, der sich durch freies Saugen ohne Druck bei Lagerung unter Wasser einstellt. Maßgeblich ist auch hier, wie bei  $u_{80}$  die Massenkonstanz.

Den niedrigsten Sättigungswassergehalt hat der Blähton mit  $97 \text{ kg/m}^3$ . Dies entspricht nur in etwa dem fünffachen des Ausgleichswassergehalts. Die Ziegelproben erreichen Werte von etwa 170 bis  $200 \text{ kg/m}^3$ . Noch mal um das doppelte darüber liegen Putze und Porenbeton mit bis zu  $427 \text{ kg/m}^3$ . Auffallend ist der relativ hohe Sättigungswassergehalt des Bimsbetons, der mit  $292 \text{ kg/m}^3$  deutlich über den Ziegeln liegt und den Wert des, in der Herstellung sehr ähnlichen Blähtons sogar um mehr als das dreifache übersteigt. Insgesamt liegen alle Werte

Alle ermittelten Werte für  $u_{80}$  und  $u_f$  liegen in den aus der Praxis für die jeweiligen Materialien bekannten Größenordnungen. Einen Überblick über die Ergebnisse als Mittelwerte der untersuchten Proben gibt [Tabelle 1].

### **3.2.2 Transportkoeffizienten**

Die Transportkoeffizienten werden entsprechend der Beschreibung in Ziffer 2.5.2 ermittelt. Dazu werden je ein Saug- und ein Trocknungsversuch durchgeführt.

#### **Saugversuch**

Der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) wird gemäß [DIN 52 617] über einen Aufsaugversuch bestimmt. Die Proben werden, um eindimensionale

Bedingungen zu erreichen, seitlich mit Metallfolie abgedichtet und dann mit der offenen Fläche einige mm tief in langsam fließendes Wasser gestellt, so dass die Fläche konstant ohne Druck mit Wasser benetzt ist. Gemessen wird die Gewichtszunahme der Probe, d. h. die Wasseraufnahme mittels Saugen, über die Wurzel der Zeit.

$$w_t = \frac{\Delta W_t}{\Delta \sqrt{t}} \quad \text{Gleichung 9}$$

Mit:

$w_t$	[kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup> ]	Wasseraufnahmekoeffizient
$W_t$	[kg/m <sup>2</sup> ]	Flächenbezogener Wassergehalt
$T$	[h]	Zeit in Stunden

Ist der Verlauf der Wasseraufnahme, abgesehen von der Anfangsphase, linear, so entspricht der  $w$ -Wert der Steigung dieser Geraden. Kann dagegen kein linearer Verlauf festgestellt werden, wird über den Wassergehalt nach 24 Stunden der  $w_{24}$ -Wert bestimmt. Er entspricht der Steigung der Geraden vom Nullpunkt zum 24-Stunden-Wassergehalt.

Die Bestimmung des  $w$ -Werts gestaltet sich bei den Ziegel- und Porenbetonproben als unproblematisch. Beide Materialien saugen stark und haben einen linearen Verlauf über die Wurzel der Zeit. Fast alle Proben zeigen, trotz einer Höhe von etwa 150 mm, bereits nach weniger als 24 Stunden erste Anzeichen einer Durchfeuchtung, allerdings nur an einzelnen Stellen der Rückseite und ohne dass die Geradlinigkeit der Kurve beeinträchtigt wäre. Die beiden stärker porosierten Ziegel 650 und 600 sowie der Porenbeton haben einen  $w$ -Wert von gut 5 kg/m<sup>2</sup>·h<sup>0,5</sup>, der Ziegel 800 erreicht dagegen über 9 kg/m<sup>2</sup>·h<sup>0,5</sup>. Die  $w$ - und  $w_{24}$ -Werte der Proben sind praktisch identisch. Die Messverläufe sind in [Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 14] dargestellt.

Bei Blähton und Bimsbeton sind die Messergebnisse weniger eindeutig nach dem Wurzel-Zeit-Prinzip auswertbar. Das liegt daran, dass die Proben an der Oberfläche sehr grobe, haufwerkartige Poren haben. Diese füllen sich rasch und dem Anschein nach bis in größere Tiefe (einige cm) mit Wasser. Dieses

läuft dann während der Wägung zu einem Teil wieder heraus. Dadurch ergibt sich, insbesondere am Anfang der Messung, ein sehr unruhiges Bild. Beim Blähton ist anhand der scheinbar konfusen Verteilung der Messwerte auch nach etwa 30 Minuten eine Tendenz nur grob abzuschätzen [Abbildung 13]. Der Bimsbeton liefert dagegen nach etwa einer Stunde, wenn das Bindemittel an der Oberfläche gut durchfeuchtet ist und das Wasser infolgedessen besser haftet, auswertbare Messwerte [Abbildung 15]. Nach 24 Stunden sind keinerlei Anzeichen für eine Durchfeuchtung erkennbar, daher wird entsprechend der Norm der  $w_{24}$ -Wert bestimmt. Dieser ist, mit  $1,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  beim Blähton und  $2,8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  beim Bimsbeton, bei beiden Proben durch die rasche Wasseraufnahme am Anfang, gegenüber den  $w$ -Werten im zweiten geradlinigeren Abschnitt mit  $0,3$  und  $1,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  deutlich erhöht.

Der Verlauf bei den beiden Putzen ist in der Anfangsphase annähernd geradlinig. Dabei wird, aufgrund der, entsprechend der Norm geringen Probendicke von 2 cm, sehr schnell die Durchfeuchtung erreicht [Abbildung 16, Abbildung 17]. Beim Oberputz ist dies bereits nach etwa einer Stunde der Fall. Berücksichtigt man die Steigung der Gerade bis zur Durchfeuchtung, so ergibt sich hier ein  $w$ -Wert von ca.  $4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ . Dieser Wert übersteigt die Herstellerangabe für den als „wasserabweisend“ bezeichneten Putz um das achtfache. Lediglich der  $w_{24}$ -Wert kommt in die Nähe der angegebenen maximalen  $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ , ist in diesem Fall aber eigentlich nicht repräsentativ, da die Norm für den Fall einer Durchfeuchtung vor 24 Stunden, nur die Auswertung des Bereichs bis zur Durchfeuchtung zulässt. Für den Grundputz wird ein  $w$ -Wert von  $1,6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  gemessen. Da auch hier eine Durchfeuchtung bereits nach einigen Stunden auftritt, ist der  $w_{24}$ -Wert nicht maßgeblich. Einen Überblick über die Ergebnisse aller Proben gibt [Tabelle 1].

Mit den Werten für  $u_f$  und  $u_{80}$  aus Ziffer 3.2.1 sowie  $D_{w0} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  kann  $D_{ws}$  mit Gleichung 8 für alle Materialien bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in [Tabelle 3] dargestellt. Mit den bisher bestimmten Kennwerten ist daher bereits eine Nachrechnung der Saugversuche in WUFI möglich.

Der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messwerten zeigt bei den Ziegeln [Abbildung 10] bis [Abbildung 12], Porenbeton [Abbildung 14] und Putzen [Abbildung 16, Abbildung 17] jeweils eine gute Übereinstimmung. Die

Qualität der Rechnung wird dabei in erster Linie durch die Steigung der Kurven bestimmt. Eventuelle Abweichungen der Rechnung zur Messung im Anfangsbereich sind dabei ohne größere Bedeutung. Unterschiedliche Messergebnisse beim Start sind bekannt und auch in der Norm beschrieben, können allerdings in der rechnerischen Simulation nicht abgebildet werden.

Der Feuchtetransportgleichung in WUFI liegt die Annahme eines linearen Verlaufs der Wasseraufnahme über die Wurzel der Zeit zugrunde. Die Messwerte bei Blähton und Bimsbeton sind jedoch, wie oben beschrieben, von einer raschen Wasseraufnahme zu Beginn und einem starken Abflachen im weiteren Verlauf bestimmt. Bei Eingabe einer monolithischen Saugprobe ist die Berechnung eines solchen Verlaufs mit WUFI nicht möglich. Wenn man jedoch die groben Poren an der Oberfläche des Steins durch eine eigene Schicht, die bei sonst gleichen Kennwerten einen deutlich erhöhten  $w$ -Wert aufweist, simuliert, ist zumindest eine Annäherung an den Messverlauf zu erreichen. Die Schicht wird, entsprechend dem optischen Eindruck für die Tiefe der offenen Poren, jeweils 2 cm dick gewählt und beim Blähton mit einem  $w$ -Wert von  $60 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  charakterisiert. Beim Bimsbeton stellen sich für den  $w$ -Wert  $30 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  als ausreichend heraus. Wenn man davon ausgeht, dass das Wasser in die nach außen offenen, großen Poren sofort eindringen kann, lässt sich diese Höhe des  $w$ -Werts leicht rechtfertigen. Die Ergebnisse der Berechnung sind in [Abbildung 13] dargestellt.

### **Trocknungsversuch**

Für den Trocknungsversuch werden die Proben bis auf eine Seite vollständig mit Metallfolie abgedichtet und in der Klimakammer bei konstant 60 % r. F. und 23° C gelagert. Die Bestimmung der Verdunstungsmasse erfolgt über Wägung in größer werdenden Abständen, anfänglich alle 10 Minuten über stündlich und täglich bis hin zu wöchentlichen Intervallen.

Die drei von [Krischer] beschriebenen Trocknungsabschnitte für hygroskopische kapillarporöse Materialien mit ihrem typischen s-förmigen Verlauf sind bei allen Einzelproben mehr oder weniger deutlich zu erkennen [Abbildung 10] bis [Abbildung 17]. Die Messkurve wechselt dabei von konkaver zu konvexer Krümmung und wieder zurück.



Die drei Ziegelproben zeigen bei unterschiedlichem Sättigungswassergehalt ein nahezu identisches Austrocknungsverhalten. Die Trocknungskurve ist deutlich s-förmig und die einzelnen Trocknungsabschnitte sind gut zu erkennen [Abbildung 10, Abbildung 11, Abbildung 12]. Bereits nach etwa vier Tagen ist gut 30 % der Sättigungsfeuchte ausgetrocknet, nach Abschluss der zehnwöchigen Messung verbleiben noch knapp 20 %, das entspricht in etwa dem dreifachen Ausgleichsfeuchtegehalt, in den Proben. Der Verlauf beim Porenbeton ist den Ziegeln vergleichbar, allerdings insgesamt im Verhältnis zur Sättigungswassermasse deutlich langsamer. So ist nach vier Tagen knapp 20 % der Sättigungswassermasse verdunstet und am Ende der Messung noch gut 30 % vorhanden [Abbildung 14]. Letzteres entspricht immerhin noch dem sechsfachen Ausgleichsfeuchtegehalt.

Beim Bimsbeton und noch mehr bei den Blähtonproben sind Verlauf der Trocknungskurve und Ausbildung der einzelnen Trocknungsabschnitte weniger deutlich, der Verlauf erscheint vielmehr fast geradlinig. Infolge der niedrigen  $w$ -Werte der beiden Materialien ist insbesondere der erste Trocknungsabschnitt sehr kurz, der zweite dagegen so lang, dass der Übergang zum dritten Abschnitt während der Messperiode noch nicht erfolgt ist [Abbildung 13, Abbildung 15]. Trotzdem verläuft die Austrocknung insgesamt so rasch, dass nach 10 Wochen bei beiden Proben der Wassergehalt nur noch gut das doppelte des Ausgleichswassergehalts beträgt.

Ein, infolge der vollständig abgeschlossenen Austrocknung optimales Ergebnis liefern die Putze. Bei der geringen Probendicke von 2 cm ist nach einem Tag bereits fast 50 % des Sättigungswassergehalts verdunstet. Nach fünf Wochen entspricht der verbliebene Wassergehalt in etwa der Ausgleichsfeuchte. [Abbildung 16, Abbildung 17]. Der s-förmige Verlauf ist sehr deutlich ausgeprägt, so dass man von einem für mineralische Baustoffe typischen Verlauf sprechen kann.

Mit Hilfe der Trocknungsversuche erfolgt die iterative Bestimmung des noch fehlenden Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung  $D_{ww}$  entsprechend der Beschreibung in Ziffer 2.5. Dazu werden die schon bekannten bzw. bisher ermittelten Kennwerte in WUFI eingegeben. Dann erfolgt zunächst eine

Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  ausgehend von dem empirisch ermittelten Minimalwert bei  $8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , so dass sich eine Übereinstimmung von Berechnung und Messwerten für die ersten Stunden ergibt.

[Abbildung 18] rechts zeigt deutlich am Beispiel des Porenbetons den Einfluss verschiedener Werte für  $\alpha$ . Eine Variation von  $D_{w0}$ ,  $D_{ww}$  oder  $\mu$  zu diesem Zeitpunkt bleibt dagegen ohne jede Wirkung. Die Geschwindigkeit ist also anfänglich, wie bereits in Ziffer 2.5.2 erläutert, praktisch ausschließlich von  $\alpha$ , und damit von Temperatur, Luftfeuchte und Luftbewegung an der Oberfläche der Probe abhängig.

Anschließend wird  $D_{ww}$  ausgehend vom Wert für  $D_{ws}$  solange verringert, bis Rechenkurve und Messwerte für den nächsten Abschnitt übereinstimmen. Der Einfluss von  $D_{ww}$  wird wiederum am Beispiel Porenbeton in [Abbildung 19] links dargestellt. Eine Wirkung von  $D_{ww}$  ist erst ab etwa acht Wurzelstunden feststellbar, wenn das Wasser an der Materialoberfläche soweit verdunstet ist, dass der Nachtransport von Feuchte aus dem Stein zum maßgebenden Begrenzungsfaktor wird.

Maßgeblich bleibt  $D_{ww}$  bis etwa 14 Wurzelstunden. Dann ist der Wassergehalt der Probe bereits so gering, dass der Transportkoeffizient  $D_{w0}$  Einfluss zeigt. Dies ist im gleichen Bild auf der linken Seite zu sehen.

Weiterhin wird in [Abbildung 23] links der Einfluss der Wasserdampf-diffusionswiderstandszahl  $\mu$  dargestellt. Dieser Wert wird vom Hersteller oft nicht angegeben, sein Einfluss ist jedoch relativ gering und macht sich auch erst im bereits relativ trockenen Material bemerkbar.

Die Ergebnisse aller Einzelproben sind unter zusätzlicher Angabe des Verhältnisses von  $D_{ws}$  zu  $D_{ww}$  in [Tabelle 3] angegeben. Beim Blähton ist zu beachten, dass für  $D_{ws}$  der Wert der tieferliegenden Schicht verwendet wurde. Da dieser deutlich kleiner ist als der Wert der Gesamtprobe und zusätzlich kleiner als der Transportkoeffizient bei der Weiterverteilung, ergibt sich hier ein Verhältniswert von kleiner als eins, der also nur bedingt mit denen der anderen Proben vergleichbar ist. Wie in [Abbildung 10] bis [Abbildung 17] jeweils auf der rechten Seite gut zu erkennen ist, kann eine sehr gute

Übereinstimmung von Rechnung und Messung erreicht werden. Die so für WUFI ermittelten Kennwerte werden als Stoffkennwerte der Einzelschichten bei der Berechnung der verputzten Kombiprobe verwendet.

### 3.3 Untersuchungen der verputzten Kombiprobe

Von jedem Stein werden Kombiprobe mit verputzter Außenseite erstellt. Dazu wird zunächst der Grundputz entsprechend der Verpackungsanleitung hergestellt und in einer 15 mm dicken Schicht auf die entsprechend geschalteten Probe aufgebracht. Anschließend müssen die Probe für sieben Tage im Feuchtkasten und dann noch mindestens zwölf Tage bei Normalklima gelagert werden. Danach kann die 5 mm dicke Oberputzschicht aufgebracht werden. Für die zweite Putzschicht erfolgt die gleiche Lagerung wie für die erste, bevor die Untersuchungen an den Gesamtprobe vorgenommen werden können.

#### 3.3.1 Saugversuch

Das Vorgehen beim Saugversuch der Kombiprobe erfolgt analog zu dem der Einzelprobe in Ziffer 3.2.2. Während die Ergebnisse bei den Einzelprobe äußerst unterschiedlich ausfielen, bietet sich bei den Kombiprobe für den Saugversuch ein ausgewogeneres Bild [Abbildung 20] bis [Abbildung 24].

Der Einfluss der verschiedenen Steine, auf die die Putzschicht aufgetragen ist, macht sich nur in geringem Maße bemerkbar. Innerhalb der ersten Stunde liegt die Wasseraufnahme aller Probe bei etwa  $0,8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ . Die anfängliche Wasseraufnahme entspricht dem w-Wert des Oberputzes. Dabei fällt auf, dass der Oberputz als Einzelprobe einen deutlich höheren w-Wert von  $4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  erreicht. Allerdings ist bekannt, dass die Eigenschaften des Untergrundes – insbesondere dessen Saugfähigkeit – großen Einfluss auf das Abbinden des Putzes haben. Im Laborversuch für die Einzelprobe wird der Putz auf einen hydrophoben Kunststoff aufgebracht, während der Untergrund bei den Kombiprobe aus dem Grundputz mit einem w-Wert von etwa  $1,6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  besteht. Dadurch können sich durchaus Abweichungen in der oben beschriebenen Größenordnung ergeben.

Nach etwa sechs Stunden geht die Messkurve langsam in einen geradlinigen Bereich über. Zu diesem Zeitpunkt hat der Kapillartransport vermutlich die Materialgrenze zum Grundputz erreicht und die Sauggeschwindigkeit der Gesamtprobe wird im weiteren Verlauf durch die Geschwindigkeit bestimmt, mit der der Grundputz die Feuchte aus dem Oberputz saugen kann. Die starke Verminderung lässt auf eine Unterbrechung des kapillaren Zugs schließen. Bei den Ziegeln [Abbildung 20, Abbildung 21] liegt die Wasseraufnahme in diesem Bereich bei nur noch etwa  $0,04 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ . Noch flacher fällt die Kurve beim Porenbeton [Abbildung 23], mit einem  $w$ -Wert von  $0,03 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ , etwas höher dagegen bei Blähton und Bimsbeton [Abbildung 22, Abbildung 24] mit  $w$ -Werten von  $0,09$  bzw.  $0,06 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ . Die Größenordnung der Werte aller Proben ist wieder gut vergleichbar.

Um eine bessere Einschätzung der Messwerte zu ermöglichen wird der Saugversuch auf mehrere Wochen ausgedehnt. Dabei zeigt sich jedoch, dass keine weiteren signifikanten Änderungen im Verlauf auftreten. Der Übergang vom Grundputz in den jeweiligen Mauerstein hat daher offensichtlich keinen maßgeblichen Einfluss mehr.

### 3.3.2 Trocknungsversuch

Vor der Trocknung müssen auch die Kombiprobe gesättigt werden, da die Trocknung ausgehend vom Wassergehalt der Sättigung erfolgt. Dabei bildet sich bei Ziegel- und Porenbetonkombiprobe erwartungsgemäß ein Gesamtwassergehalt zwischen den Werten der einzelnen Materialien aus. Der Sättigungswassergehalt  $u_f$  von Porenbeton ist höher als der der Putze und dieser wiederum höher als der der Ziegel. Also liegt der Gesamtwassergehalt der Kombiprobe bei den Ziegeln höher, beim Porenbeton dagegen niedriger als  $u_f$  bei den jeweiligen Einzelproben. Bei den Blähton- und Bimsbetonkombiprobe erniedrigt sich dagegen der Sättigungswassergehalt gegenüber den Einzelproben, obwohl auch hier  $u_f$  der Putze deutlich über  $u_f$  der Steine liegt. Möglicherweise liegt das daran, dass die unter 4.3.1 beschriebenen offenen Porenräume teilweise durch den Putz verschlossen werden, und dementsprechend weniger Wasser aufnehmen. [Tabelle 2] zeigt die Ergebnisse für den Wassergehalt nach der Sättigung im Vergleich zu den Einzelproben.

Die Trocknung der Kombiprobe verläuft insgesamt deutlich langsamer. Im Gegensatz zu den Einzelproben bildet die Messkurve der Kombiprobe nur während der ersten Wurzelstunden andeutungsweise einen s-förmigen Verlauf aus, anschließend geht sie in einen leicht konkav gekrümmten bis annähernd geradlinigen Bereich langsamer Trocknung über. Die Gesamtsteigung der Trocknungskurve aller Kombiprobe ist auf unterschiedlichem Niveau vergleichbar groß. Da jedoch der Sättigungswassergehalt von 20 bis über 50 kg/m<sup>3</sup> reicht, ist die, auf die Sättigungswassermasse bezogene Trocknung bei den verschiedenen Proben sehr unterschiedlich. Nach ca. 60 Tagen hat der Blähton etwa 50 % des Sättigungswassergehalts verdunstet, die Ziegel gute 30 % sowie Poren- und Bimsbeton etwa 20 %.

## **4 Rechnerische Untersuchungen und Ergebnisse**

### **4.1 Nachrechnung von Saug- und Trocknungsversuchen der Kombiprobten**

Bei der Nachrechnung der Saugversuche in WUFI werden für die einzelnen Schichten zunächst die, für die Einzelproben ermittelten Kennwerte verwendet. Bei dieser Vorgehensweise zeigen sich jedoch extreme Abweichungen der Rechnung von den Messwerten: die Proben saugen in der Rechnung um ein vielfaches schneller als im Versuch. Eine Anpassung mit den zuvor bestimmten Kennwerten stellt sich als nicht möglich heraus!

In Ziffer 2.3 wurde auf die Untersuchungen von [Holm] zur Ausbildung von Widerstandsschichten zwischen Putzen und Mauersteinen hingewiesen. Entsprechend diesen Untersuchungen wird in WUFI zunächst eine 1 mm dicke Widerstandsschicht zwischen Stein und Unterputz mit um Faktor 2000 verringerten Transportkoeffizienten eingeführt. In den folgenden Berechnungen wird jedoch schnell deutlich, dass die Wirkung dieser Grenzsicht zu spät zum Tragen kommt. Das anfängliche Saugen ist gegenüber den Versuchen immer noch deutlich zu schnell.

Daher wird eine weitere Widerstandsschicht, mit den gleichen Eigenschaften wie zuvor zwischen Ober- und Unterputz eingeführt. Diese Schicht sollte, zumindest in der Größenordnung, vergleichbare Eigenschaften für alle Kombiprobten haben, da die Ausbildung des Grundputzes durch Aufbringung auf unterschiedlichen Grund zwar in gewissen Grenzen variieren kann, die sonstigen Randbedingungen aber für alle Proben gleich sind. Es stellt sich heraus, dass dabei der Faktor 2.000 für die Verringerung der Transportkoeffizienten deutlich zu niedrig ist. Eine Anpassung an die Messwerte gelingt erst bei vollständigem Ausschalten des Flüssigtransports ( $D_{w0}, D_{ws} = 0$ ) in der ersten Widerstandsschicht.

Wie sich bei einer weiteren Variierung der Kennwerte der zweiten Widerstandsschicht zwischen Unterputz und Ziegel zeigt, hat diese nur einen äußerst geringfügigen Einfluss auf die Ergebnisse der Rechnung und kann infolgedessen beim Saugversuch ganz weggelassen werden.

Insgesamt lassen sich der hohe  $w$ -Wert in den ersten Stunden und der Übergang zu einem dauerhaft langsameren Saugen im weiteren Verlauf durch das beschriebene Vorgehen in WUFI hinreichend genau simulieren. In [Abbildung 20] bis [Abbildung 24] sind die Messpunkte und die Kurven der Berechnung dargestellt. Wie man erkennen kann, knicken die Rechenkurven bei Erreichen der Grenzschicht relativ abrupt ab, während die Messwerte einen eher kontinuierlichen Übergang zeigen. Dieser kontinuierliche Übergang wäre auch in der Rechnung durch Einführen weiterer Widerstandsschichten mit entsprechend abgestuften  $w$ -Werten zu erreichen. Eine solche Genauigkeit wäre bei einem derart niedrigen Niveau der Wasseraufnahme allerdings unnötig.

Die Nachrechnung der Trockenversuche gestaltet sich noch etwas aufwendiger als bei den Saugversuchen. Nach der Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  ergab der Versuch einer Berechnung mit den Kennwerten der Einzelschichten, wie beim Saugen, dass eine Anpassung an die Messwerte so nicht möglich ist. Die Trocknung in der Rechnung erfolgt deutlich zu schnell wie in [Abbildung 25] bis [Abbildung 29] zu sehen ist. Die Vermutung, dass die von [Holm] beschriebenen Widerstandsschichten nicht nur für das Saugen sondern auch für die Trocknung Wirkung zeigen, ist naheliegend. Allerdings führt zunächst auch die Verwendung der Widerstandsschichten mit den aus dem Saugversuch bestimmten Parametern zu keinem guten Ergebnis. Diesmal „knickt“ die Rechenkurve zu früh und zu flach ab.

[Holm] hat bei seinen Untersuchungen bereits festgestellt, dass die Richtung des Flüssigtransports einen bedeutenden Einfluss auf dessen Geschwindigkeit haben kann. So saugt eine Probe Ziegel auf Putz auch nach Erreichen der Widerstandsschicht mit der dreifachen Geschwindigkeit wie eine Probe mit denselben Materialien in umgekehrter Reihenfolge. Im Fall der Kombiprobe wird beim Saugversuch die Feuchte durch den Putz in den Mauerstein transportiert. Bei der Trocknung dagegen ist der Großteil der Feuchte im Stein und muss in entgegengesetzter Richtung über die Widerstandsschicht transportiert werden. Es erscheint also plausibel, für die Trocknung unabhängig vom Saugversuch neue Widerstandsschichten in WUFI einzuführen.

Ausgehend vom Sättigungsgewicht muss man zunächst für den Bereich mit höherem Wassergehalt  $D_{ww}$  und anschließend für den Bereich mit niedrigerem Wassergehalt  $D_{w0}$  anpassen (siehe auch [Abbildung 19]). Dabei sollten sich für alle Proben, wie beim Saugen, vergleichbare Werte für die Widerstandsschicht zwischen Ober- und Grundputz ergeben. Für die Anpassung waren bei allen Proben etwa drei bis zehn Rechenläufe erforderlich. [Tabelle 3] zeigt die Werte der Widerstandsschichten für  $D_{ww}$  und  $D_{w0}$  bei der Trocknung. In [Abbildung 25] bis [Abbildung 29] ist die gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung zu erkennen.

Durch die Widerstandsschicht zwischen den beiden Putzen kann die Oberputzschicht schneller austrocknen als ein Nachtransport der Feuchte aus den tieferliegenden Materialien möglich ist, daraus ergibt sich der anfängliche s-förmige Verlauf. Nach den, in der Messung beobachteten, 24 Stunden ist der Wassergehalt der nur 5 mm dicken Oberputzschicht soweit verringert, dass kaum noch Kapillarleitung auftritt. Die restliche Austrocknung der Probe erfolgt dann weitgehend über Dampfdiffusion.

## 4.2 Übertragung der Erkenntnisse auf praktische Fälle

Mit den in 4.1 gewonnenen und validierten Kennwerten ist es nun möglich, mit WUFI rechnerisch die Trocknung von Mauerwerk unter realen Klimabedingungen zu simulieren.

Dabei wird für die Wände folgender Aufbau gewählt: Der Außenputz entspricht dem Putzaufbau bei den Kombiproben mit 15 mm Grundputz und 5 mm Oberputz. Als Innenputz wird ein 20 mm starker Gipsputz aus der bereits validierten WUFI-Datenbank gewählt, bei dem aus früheren Untersuchungen bekannt ist, dass er keine nennenswerte Widerstandsschicht zu anderen Materialien ausbildet. Die erforderliche Wanddicke und das daraus resultierende Steinformat wird entsprechend den Bestimmungen der neuen [Wärmeschutzverord.] für den U-Wert von Wohngebäuden ( $U \leq 0,45 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) errechnet. Damit ergibt sich für die Ziegel-600-Wand ein Steinformat mit einer Dicke von 24 cm. Für die anderen Steine muss die nächstmögliche Dicke von



30 cm gewählt werden, obwohl auch sie nur knapp über dem Wert des Ziegel 600 liegen.

Als Außenklima kommen die Wetterdaten eines exemplarischen Jahres in Holzkirchen zum Einsatz, für das Innenraumklima die eines Wohnraumes mit normaler Feuchtelast. Der Rechenintervall beträgt eine Stunde. Für den Wärmewiderstand  $1/\alpha$  werden die in WUFI vorgeschlagenen, üblichen Werte  $1/\alpha_{\text{außen}} = 0,056 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$  und  $1/\alpha_{\text{innen}} = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$  verwendet. Die Oberflächen sind jeweils nicht beschichtet und haben eine normale helle Färbung.

Pro Wandtyp werden vier Fälle mit verschiedenen Ausgangswassergehalten entsprechend der Ausgleichsfeuchte bei 80 %, 90 %, 95 % und 97 % r. F. gerechnet. Je nach Material bedeutet dies einen Wassergehalt von etwa 10 bis hin zu  $150 \text{ kg}/\text{m}^3$  Mauerwerk. [Haller] gibt Erfahrungswerte für den Baufeuchtegehalt in Ziegelmauerwerk infolge Mörtelfeuchtigkeit und Witterungseinflüssen von 150 bis  $300 \text{ kg}/\text{m}^3$  an. [Schüle] spricht bei Ziegelmauerwerk von 80 bis  $200 \text{ kg}/\text{m}^3$ , bei zementgebundenen Mauersteinen von 40 bis  $120 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Die in dieser Arbeit untersuchten Mauersteine haben mit ihrem hohen Porosierungsgrad eine geringere Wasseraufnahmekapazität als die von [Haller] und [Schüle] untersuchten Materialien. Mit maximalen Wassergehalten im unteren Bereich der zuvor angegebenen Spanne wird für die Berechnungen eine immer noch niedrige Annahme getroffen. Die Ausgabe des Wassergehalts in der Berechnung erfolgt, gemäß der üblichen Praxis, bei der Gesamtprobe in  $\text{kg}/\text{m}^2$  Austrocknungsfläche. Zusätzlich wird der Wassergehalt des Mauersteins in  $\text{kg}/\text{m}^3$  angegeben. Der Wassergehalt des Steins ist insofern von besonderem Interesse, als hier praktisch die gesamte Wärmedämmung der Wand geleistet werden muss, ein erhöhter Wassergehalt also seine negativste Wirkung zeigt.

Um die z. T. recht zeitaufwendigen Berechnungen durch eine sinnvolle Auswahl der Parameter einzuschränken, werden zu deren Abschätzung zunächst einige Vorberechnungen durchgeführt. Dabei stellt sich, entsprechend den Erwartungen, die Westorientierung als die Kritische heraus. Als maßgeblicher Fall ist die Beurteilung dieser Orientierung bei den weiteren Rechnungen also ausreichend. Weiterhin wird bei Rechnungen über einen Zeitraum von fünf Jahren deutlich, dass die Tendenz, die sich nach einem

Jahr herausbildet, auch für die weiteren Jahre ohne größere Änderungen gültig ist [Abbildung 30]. Eine Berechnung über zwölf Monate erscheint daher angebracht.

Bei den Berechnungen ergibt sich für alle Wände ein qualitativ sehr ähnliches Bild. Bei einer Anfangsfeuchte entsprechend der Ausgleichsfeuchte bei 80 % r. F. erhöht sich der Wassergehalt nach einem Jahr geringfügig, wobei im Frühjahr zunächst eine Austrocknung und gegen Sommer und Herbst dann wieder eine Feuchtezunahme zu verzeichnen ist. Ähnlich geringfügig ist das Absinken des Wassergehalts bei einem Startwert entsprechend 90 % r. F. In [Abbildung 30] ist erkennbar, dass sich der langfristig einstellende Wassergehalt unabhängig vom Anfangswassergehalt in etwa zwischen den Werten der Ausgleichsfeuchte von 80 % und 90 % r. F. einpendelt.

Eine deutlichere aber sehr langsame Trocknung findet bei Startbedingungen mit einem Wassergehalt entsprechend 95 % und 97 % r. F. statt. Dabei trocknen aus den Ziegelwänden und der Blähtonwand während des ersten Jahres in etwa 50 % des anfänglichen Gesamtwassergehalts aus [Abbildung 31, Abbildung 32, Abbildung 33]. Bei der Bimsbetonwand liegt dieser Wert bei 60 % [Abbildung 35], beim Porenbeton dagegen bei nur knapp 40 % [Abbildung 34]. Die Berechnung über fünf Jahre bei der Porenbetonwand zeigt deutlich, dass die Trocknung selbst nach diesem Zeitraum noch nicht abgeschlossen ist [Abbildung 30]. Wie bereits erwähnt, wurden die Ausgangsfeuchten für die Wände am unteren Ende der zu erwartenden Spannen gewählt. Wenn man höhere Ausgangsfeuchten in Betracht zieht, muss man dementsprechend von noch längeren Fristen für die Austrocknung des Mauerwerks ausgehen.

Allgemein ist zu bemerken, dass das Austrocknungspotential in den Frühjahrsmonaten bis etwa Mai am größten ist. Im niederschlagsreichen Sommer- und Herbsthalbjahr sinkt die Austrocknungsgeschwindigkeit teilweise deutlich ab und steigt dann Richtung Jahresende langsam wieder an.

Die Berechnungen wurden zum Vergleich auch ohne die in 4.1 ermittelten Widerstandsschichten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in [Abbildung 31] bis [Abbildung 35] jeweils hellgrau dargestellt. Bei den Ziegel- und

Porenbetonwänden steigt der Wassergehalt innerhalb eines Jahres, unabhängig von den Ausgangsverhältnissen, auf ein Niveau, das noch einmal ca. 20 bis 30 % über dem maximalen Anfangswert liegt und in etwa der halben Wassersättigung entspricht. Beim Blähton pendelt sich der Wassergehalt nach zwölf Monaten auf dem Wert entsprechend 97 % r. F. ein. Lediglich die Blähtonwand verzeichnet beim maximalen Anfangswert nach zwölf Monaten eine leichte Austrocknung. Eine Berechnung ohne Widerstandsschichten hat also eine Beurteilung des Wandaufbaus als völlig untauglich zur Folge, da die rasche Zunahme des Wassergehalts innerhalb kurzer Zeit zu beträchtlichen Feuchteschäden führen würde.

## **5 Auswertung der Untersuchungen und Konsequenzen**

Anstoß für die Arbeit war die Vermutung, dass die hohe Porosierung hochdämmender Mauersteine negativen Einfluss auf deren Trocknungsverhalten und damit indirekt auf deren Wärmedämmeigenschaften haben könnte. Bei der Untersuchung der Stein-Einzelproben stellt sich das Trocknungsverhalten jedoch als durchwegs gut heraus. Der „Umwegfaktor“, d. h. die Verlängerung des Weges, den die Feuchte infolge der Umgehung der Lufteinschlüsse zurücklegen muss, bleibt von geringerer Bedeutung als erwartet. Insbesondere bei den Saugversuchen der Ziegel-Einzelproben ist zwar erkennbar, dass die höhere Porosierung zu einer Verminderung des Kapillartransports führt: Der  $w$ -Wert des Ziegel 800 liegt beinahe doppelt so hoch wie der der beiden anderen, stärker porosierten Ziegel. Trotzdem bleibt der Feuchtetransport aller Proben in einem Geschwindigkeitsbereich, in dem eine, für baupraktische Verhältnisse rasche Trocknung möglich ist. Ebenfalls zufriedenstellend verläuft die Trocknung der Putz-Einzelproben.

Die Trocknungsversuche mit den verputzten Kombiproben zeigen dagegen eine stark verlangsamte Austrocknung. Bei Wänden mit einem üblichem Baufeuchtegehalt infolge Mörtelfeuchte und Witterungseinflüssen kann die Austrocknung bis auf das Niveau der Ausgleichsfeuchte durchaus länger als fünf Jahre dauern. Bei der Ziegel-600-Wand liegt der durchschnittliche Wassergehalt des Steins im ersten Jahr bei etwa  $55 \text{ kg/m}^3$  oder 10 M-%, im vierten Jahr noch bei knapp  $30 \text{ kg/m}^3$  oder 5 M-%. Der Ausgleichswassergehalt bei 80 % r. F. dieses Steins beträgt dagegen  $11 \text{ kg/m}^3$  oder 2 M-%. Der Zuschlag für die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit bei Ziegeln beträgt etwa 10 % pro Masseprozent Wassergehaltszunahme. Daraus ergibt sich, bei einer Differenz von 8 bzw. 3 M-%, eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von 80 % im ersten und immerhin noch 30 % im vierten Jahr! Im Fall der Ziegel-600-Wand wären also die Bedingungen der neuen [Wärmeschutzverord.] mindestens während der ersten vier Jahre nicht eingehalten. Auch bei den anderen Wänden, die, aufgrund der nur diskret wählbaren Steinformate mit einer Steindicke von 30 cm eine deutlich höhere Sicherheit bezüglich des Wärmeschutzes haben, werden die Grenzwerte mindestens während der ersten drei Jahre überschritten. Zudem muss man davon ausgehen, dass ein Großteil der Feuchte nicht über die relativ

dichte Außenputzschicht sondern nach innen austrocknet. Dadurch können Feuchteschäden an der Innenoberfläche und Schimmelwachstum begünstigt werden. Außerdem wird die Wohnqualität insbesondere im Sommer, durch eine zusätzliche Steigerung der Luftfeuchte gemindert.

Maßgeblich beeinflusst werden die langen Trocknungszeiten der Wände allerdings nicht durch die Porosierung der Mauersteine, sondern durch die Widerstandsschichten, die die gewählten Putze untereinander und zum Stein ausbilden. Solche Widerstandsschichten wurden bisher von [Holm] nur für den Saugvorgang beschrieben. In dieser Arbeit wird jedoch deutlich, dass sie auch bei der Trocknung deutliche Auswirkungen zeigen. Eine rechnerische Simulation der Trocknungsversuche ohne Verwendung von Widerstandsschichten erweist sich als nicht möglich. In dieser Arbeit werden die Kennwerte der Widerstandsschichten im Labor unter extremen Bedingungen bestimmt: Das Saugen findet konstant über mehrere Tage bis Wochen statt, während in eingebautem Zustand infolge Regen eine durchschnittliche Benetzungsdauer von vier Stunden erreicht wird. Die Trocknung geht von der Freien Sättigung der Materialien aus, die in der Realität ebenfalls nicht erreicht wird. Eine Überprüfung der Eigenschaften der Widerstandsschichten unter den realen Bedingungen eines Freilandversuchs erscheint daher sehr ratsam. Eventuell wäre es auch sinnvoll, mit Hilfe der noch zu gewinnenden Erkenntnissen aus Freilandversuchen, einen Versuch zu entwickeln, mit dem die Kennwerte der Widerstandsschichten standardisiert ermittelbar sind.

Der als „wasserabweisend“ bezeichnete Oberputz hat nach Herstellerangaben einen  $w$ -Wert  $\leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ . Bei den eigenen Messungen wurde ein  $w$ -Wert von  $4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$  ermittelt. [DIN 52 617] schreibt, bei nicht linearem Verlauf der Messkurve über die Wurzel der Zeit, die Verwendung von  $w_{24}$  vor, sofern nach 24 Stunden noch keine „Durchfeuchtung auf der Probenrückseite erkennbar“ ist. Bei den eigenen Untersuchungen ist die frühe Durchfeuchtung anhand des Verlaufs der Messkurve in [Abbildung 17] links deutlich zu erkennen, obwohl auf der Probenrückseite infolge der hellen, leicht glänzenden Oberfläche keine Anzeichen einer Durchfeuchtung sichtbar sind. Wenn man bei dieser Probe trotzdem den  $w_{24}$ -Wert verwendet, erreicht man die o. a.  $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ , und damit eine Einstufung als „wasserabweisend“ entsprechend den von [Künzel, H.] entwickelten Kriterien.

Gegebenenfalls wäre es sinnvoll, die Einstufung als wasserhemmender bzw. wasserabweisender Putz nicht nur infolge der Bestimmung von Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und Wasseraufnahmekoeffizienten vorzunehmen, sondern zusätzlich den Trocknungsversuch einer Kombiprobe mit einzubeziehen, der die Möglichkeit zur Austrocknung nach außen angemessen berücksichtigt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für einen guten Wärme- und Feuchteschutz weniger die Auswahl der Mauersteine als vielmehr die Auswahl der Putze sowie eine optimale Abstimmung zwischen Putzen untereinander und Mauersteinen maßgeblich ist. Ziel dieser Abstimmung ist ein möglichst gutes Saugspannungsverhältnis zwischen den einzelnen Materialien und das Vermeiden von Widerstandsschichten. Dazu wäre es nötig, weitere Untersuchungen mit verschiedenen Grund- und Oberputzkombinationen durchzuführen.

**6 Tabellen und Bilder**

Tabelle 1: Grundkennwerte der verwendeten Materialien

Steintyp	Format [mm]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleit- koeffizient $\lambda$ [W/m·K]	w-Wert [kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup> ]	w <sub>24</sub> -Wert [kg/m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup> ]	Bezugsfeuchte- gehalt $u_{80}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Freie Wassersättigung $u_f$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Ziegel 650	240/150/250	650	0,13	5,3	5,8	14	180
Ziegel 600	240/180/240	600	0,12	5,6	5,9	11	188
Ziegel 800	370/120/250	800	0,18	9,4	9,6	12	193
Blähton	250/180/240	500	0,13	0,2	1,2	18	97
Porenbeton	250/120/250	600	0,14	5,6	6,2	20	427
Bimsbeton	240/170/240	600	0,14	1,5	2,8	28	292
Grundputz	Ø200/20	1200	0,25	1,6	(0,6)	20	287
Oberputz	Ø200/20	1500	0,87	4,0	(0,9)	16	371

Tabelle 2: Vergleich der Wassersättigung und der Verdunstungsmassen bei Einzel- und Kombiprobe

Steintyp	Flächenbezogener Wassergehalt der Proben nach der Sättigung [kg/m <sup>2</sup> ]		Verdunstungsmasse nach ca. 1600 Stunden [Δkg/m <sup>2</sup> ]	
	Einzelprobe	Kombiprobe	Einzelprobe	Kombiprobe
Ziegel 650	26	32	20	13
Ziegel 600	34	39	25	15
Blähton	17	19	11	8
Porenbeton	51	52	36	10
Bimsbeton	51	45	38	10



Tabelle 3: Transportkoeffizienten der verwendeten Materialien

Steintyp	$D_{w0}$ [m <sup>2</sup> /s]	Flüssigtransportkoeffizienten		Verhältnis $D_{ws} / D_{ww}$
		Saugen $D_{ws}$ [m <sup>2</sup> /s]	Weiterverteilung $D_{ww}$ [m <sup>2</sup> /s]	
Ziegel 650	$1,60 \cdot 10^{-10}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$7,50 \cdot 10^{-7}$	2
Ziegel 600	$2,50 \cdot 10^{-10}$	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-6}$	1
Ziegel 800	$3,50 \cdot 10^{-10}$	$3,40 \cdot 10^{-6}$	$3,50 \cdot 10^{-6}$	1
Blähton*	$4,00 \cdot 10^{-11}$	$6,40 \cdot 10^{-9}$	$1,70 \cdot 10^{-7}$	1/100
Porenbeton	$9,00 \cdot 10^{-11}$	$2,40 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$	2
Bimsbeton*	$1,00 \cdot 10^{-9}$	$1,40 \cdot 10^{-8}$	$2,30 \cdot 10^{-8}$	1/2
Grundputz**	$7,00 \cdot 10^{-10}$	$6,80 \cdot 10^{-8}$	$1,50 \cdot 10^{-9}$	45
Oberputz**	$9,00 \cdot 10^{-10}$	$3,80 \cdot 10^{-7}$	$9,00 \cdot 10^{-9}$	42

\* Die Messwerte von Blähton und Bimsbeton sind sehr inhomogen und haben keinen linearen Verlauf über  $\sqrt{t}$ . Für die Berechnung des Saugversuchs waren daher jeweils zwei verschiedene Transportkoeffizienten für Anfangsphase und Dauerverhalten erforderlich. Der gegenüber dem Wert der Gesamtprobe deutlich erniedrigte Wert für das Dauerverhalten ist in der Tabelle angegeben. Dadurch sinkt der Verhältniswert beim Blähton unter Null, beim Bimsbeton auf etwa 0,5.

\*\* Der Verlauf der Messwerte bei den Putzen ist ebenfalls nicht ganz linear. Hier fällt außerdem das extreme große Verhältnis der Transportkoeffizienten von Saugen und Weiterverteilung auf.

Tabelle 4: Transportkoeffizienten der Widerstandsschichten der Kombiproben bei der Trocknung (WS1: Ober-/Grundputz, WS2: Grundputz/Stein)

Steintyp	Flüssigtransportkoeffizienten			
	Trocknen			
	$D_{w0}$ [m <sup>2</sup> /s]		$D_{ws}$ [m <sup>2</sup> /s]	
	WS1	WS2	WS1	WS2
Ziegel 650	1,50E-11	9,00E-12	1,50E-10	3,00E-11
Ziegel 600	1,50E-11	1,00E-11	1,50E-10	8,00E-11
Blähton	1,50E-11	5,00E-12	3,00E-11	8,00E-11
Porenbeton	1,50E-11	9,00E-12	4,00E-12	3,00E-11
Bimsbeton	1,50E-11	3,00E-11	5,00E-12	8,00E-11

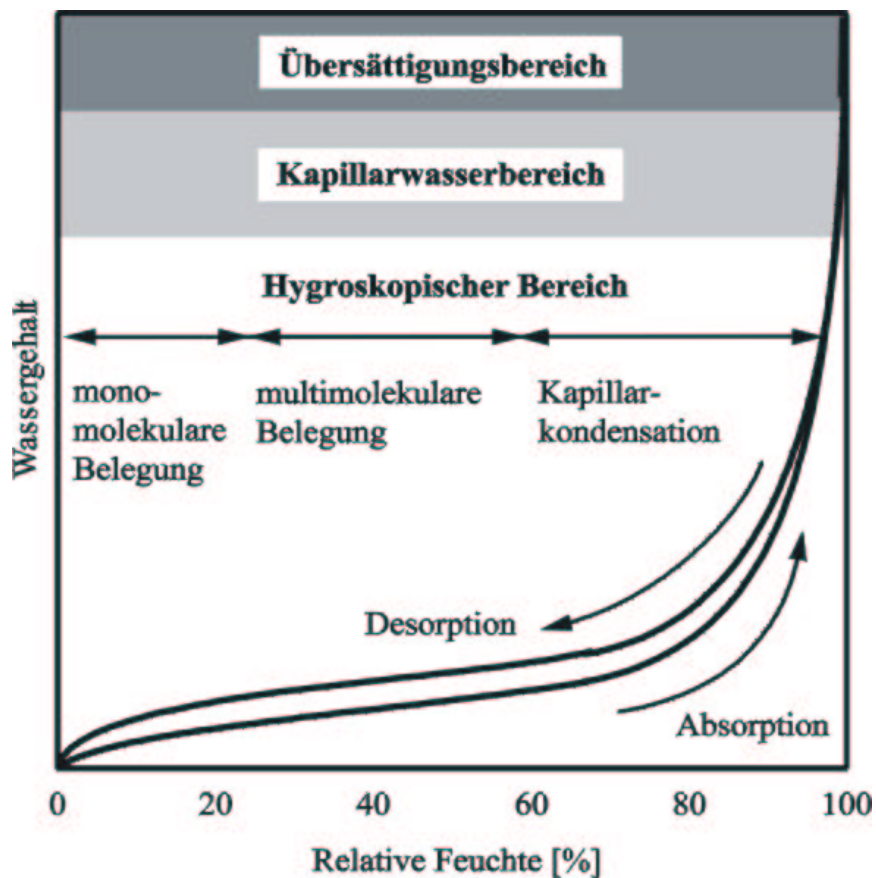


Abbildung 1:  
Schematische Darstellung der Feuchtespeicherung nach [Kießl]  
Hysterese zwischen Desorption und Adsorption beim Feuchtetransport

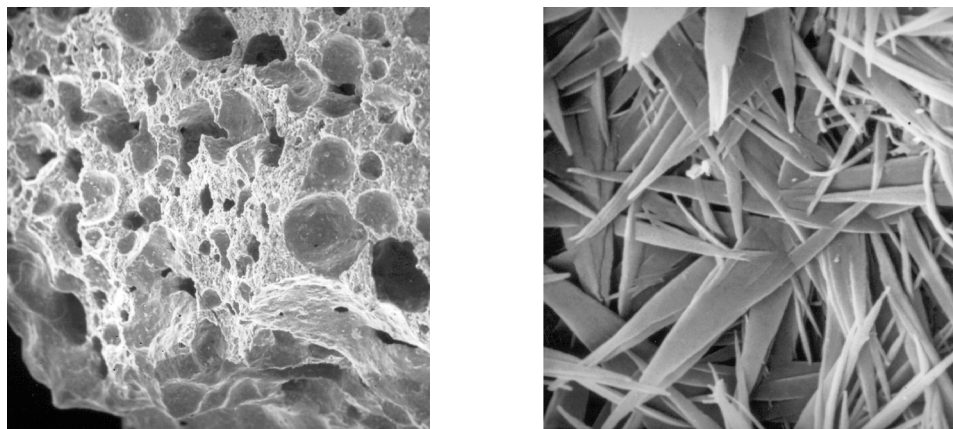


Abbildung 2:  
Porenstruktur mineralischer Baustoffe unter dem Rasterelektronenmikroskop  
links mit 22facher rechts mit 11000facher Vergrößerung

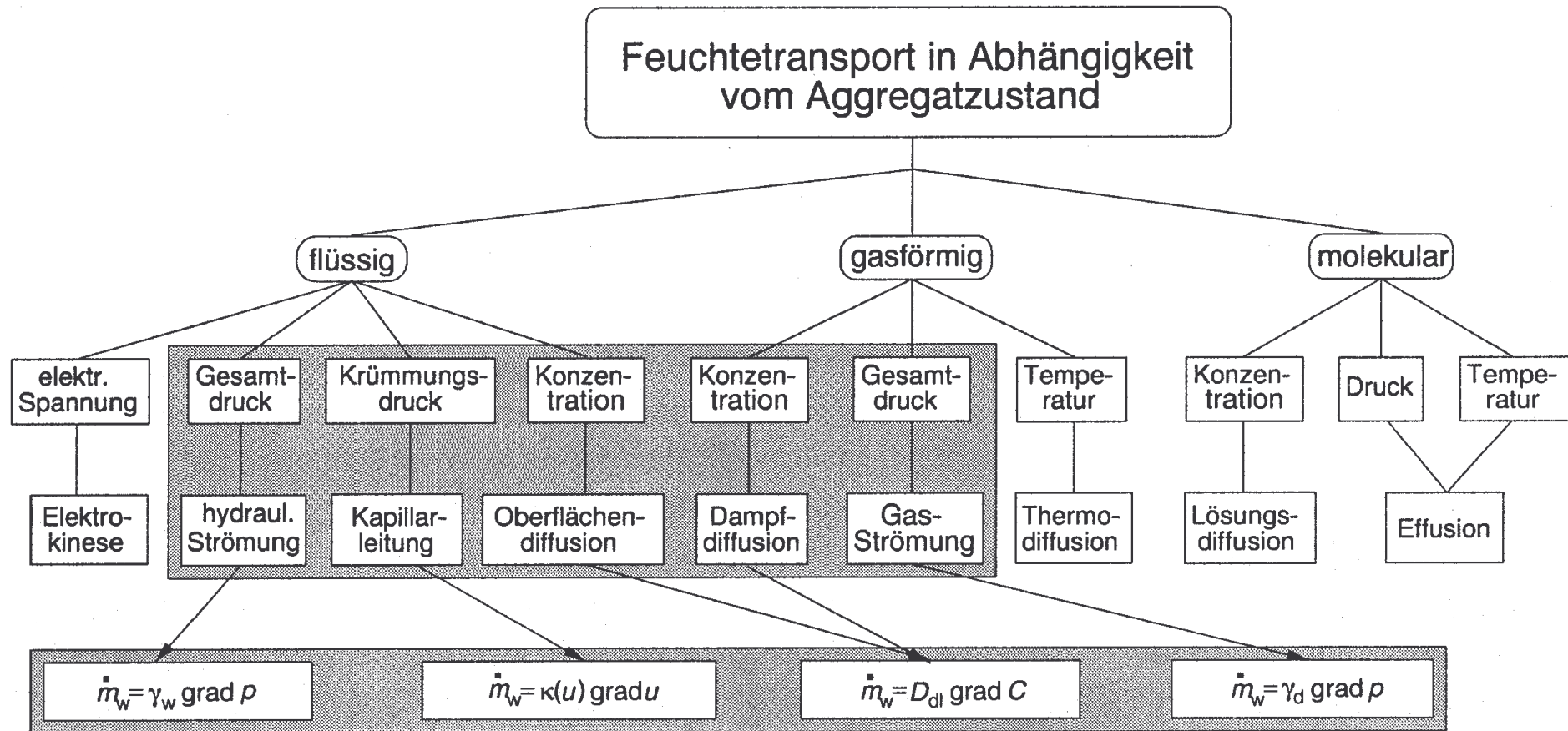


Abbildung 3: Formen des Feuchtetransports

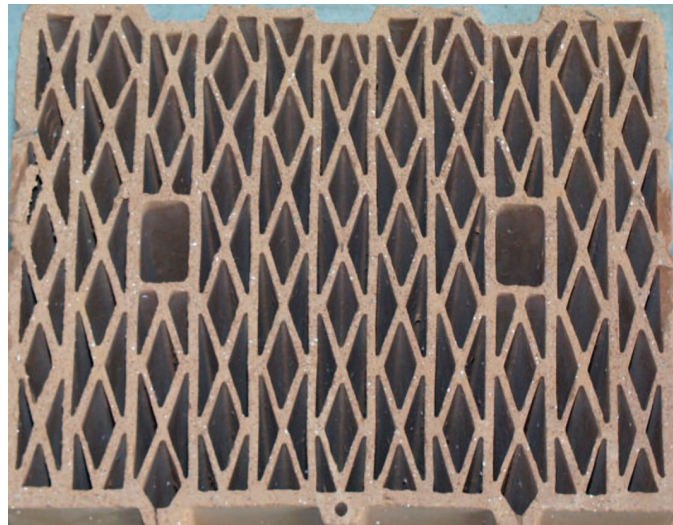


Abbildung 4: Ziegel 650



Abbildung 5: Ziegel 600

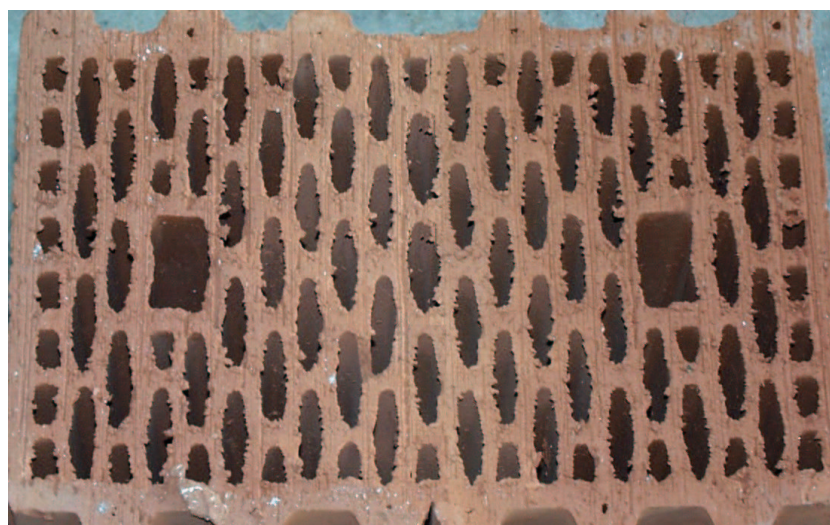


Abbildung 6: Ziegel 850



Abbildung 7: Blähton



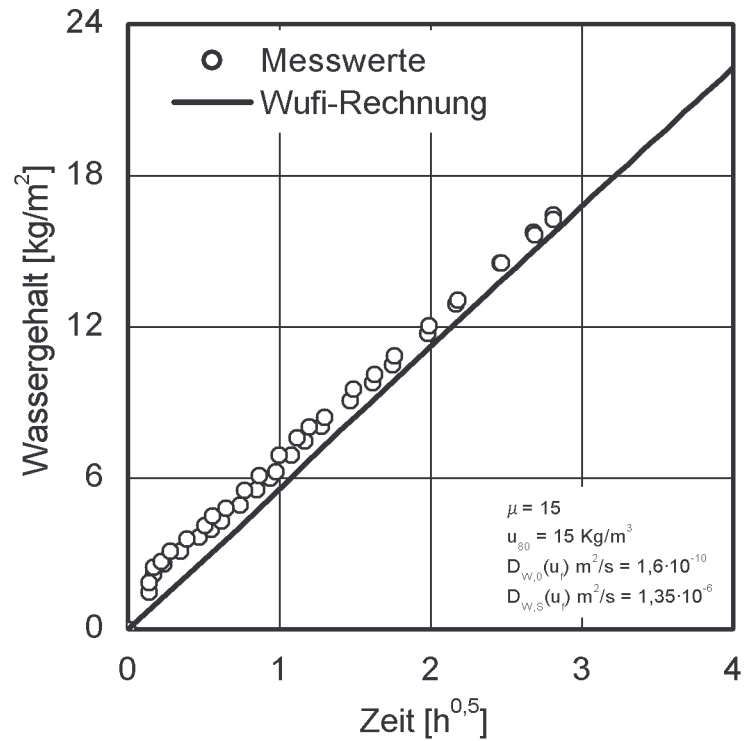
Abbildung 8: Porenbeton



Abbildung 9: Bimsbeton

Ziegel 650

Saugen



Trocknen

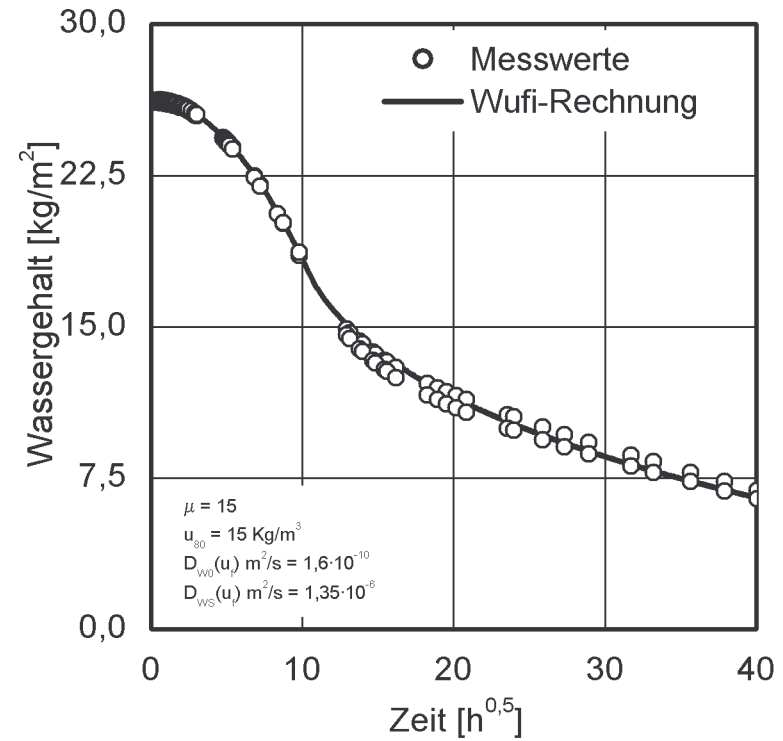


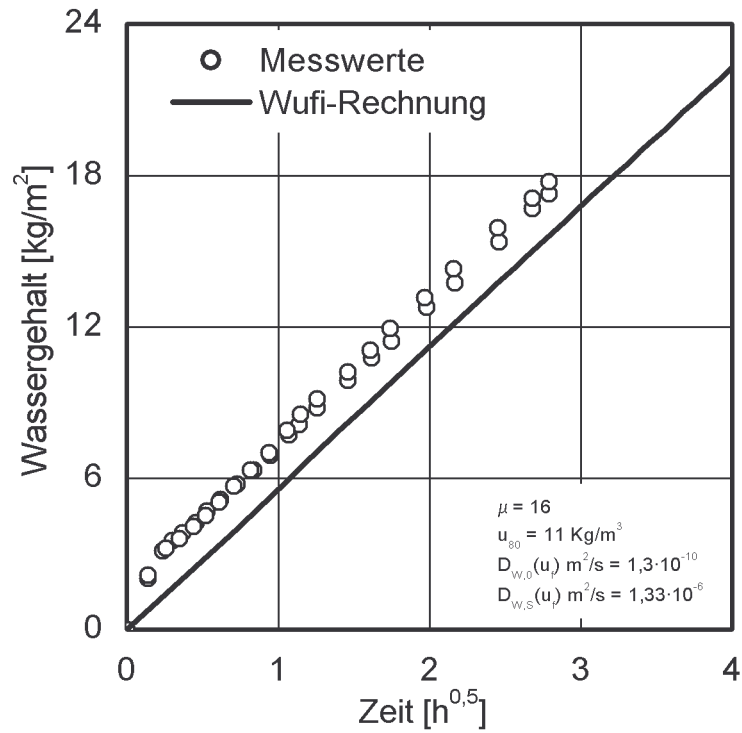
Abbildung 10: Ziegel 650:

Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI



Ziegel 600

Saugen



Trocknen

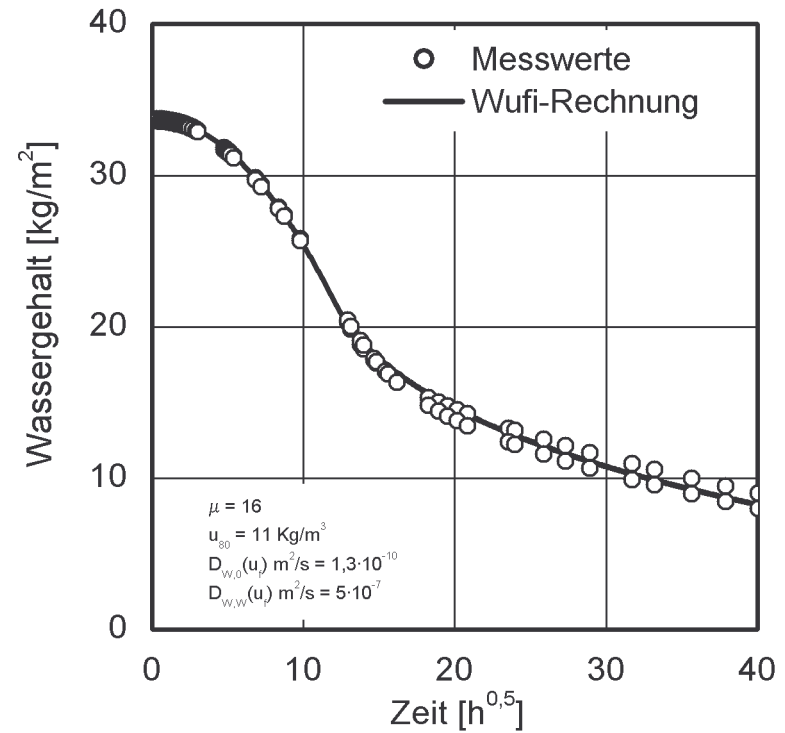


Abbildung 11: Ziegel 600

Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

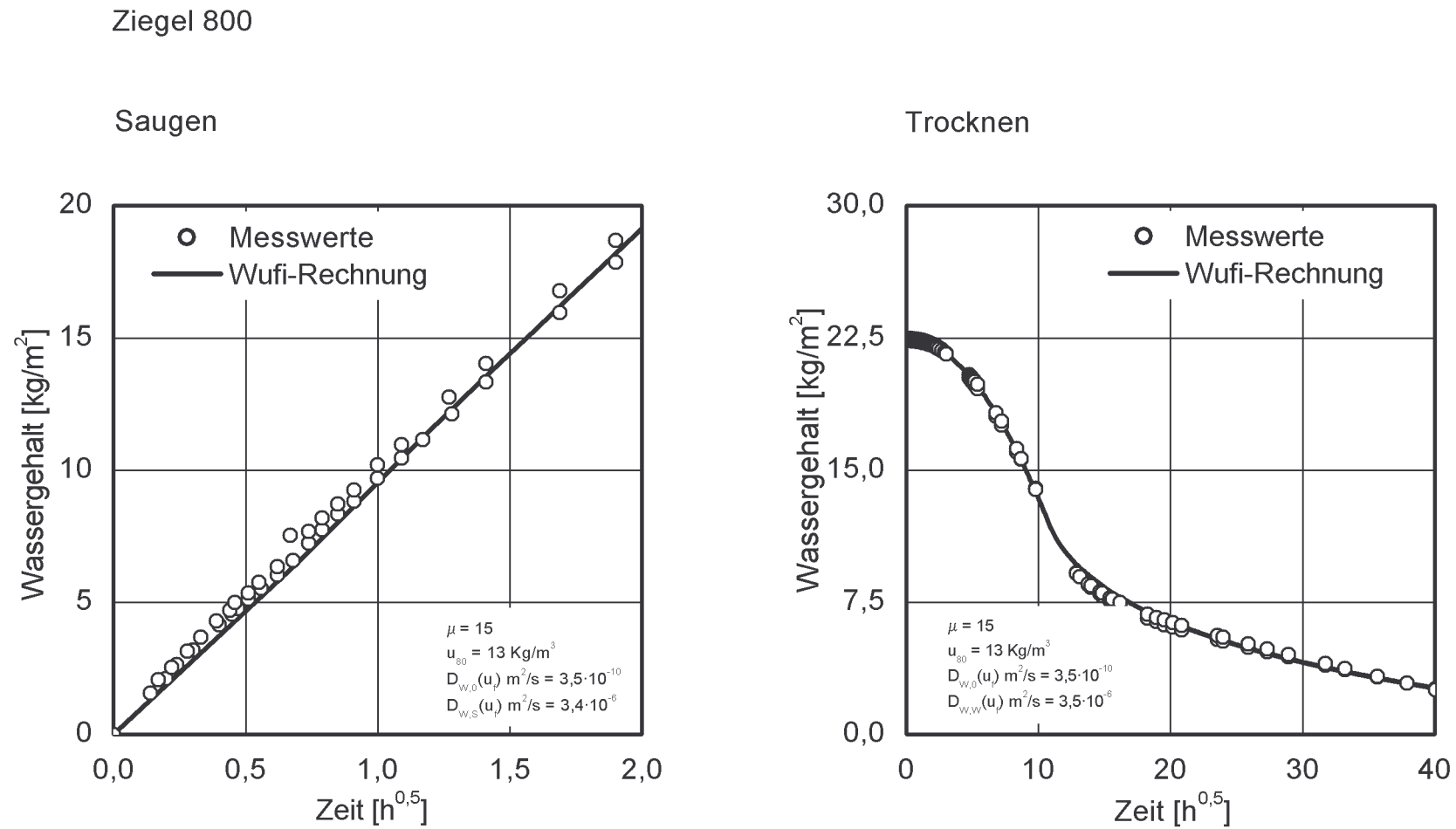


Abbildung 12: Ziegel 850

Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

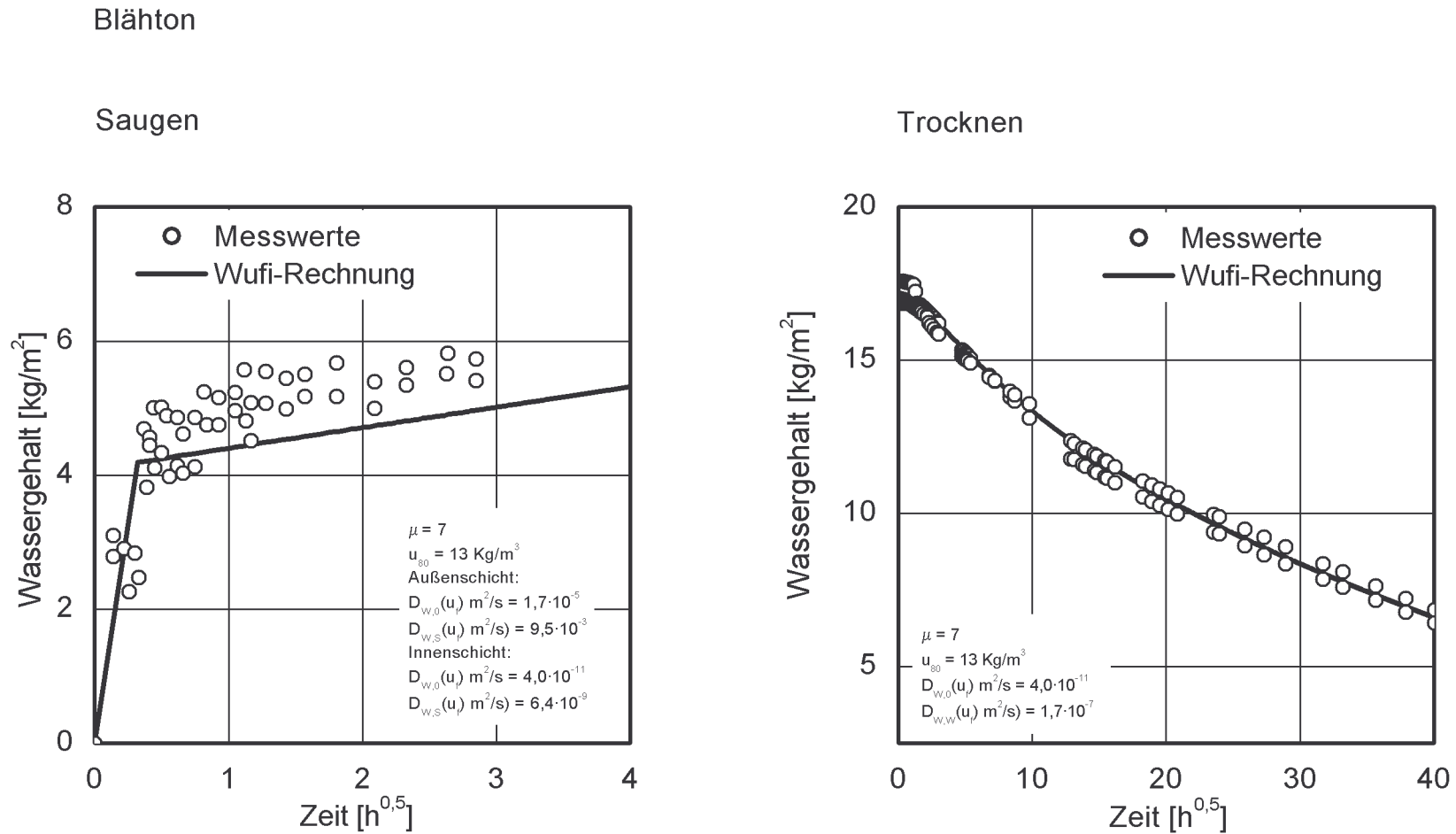
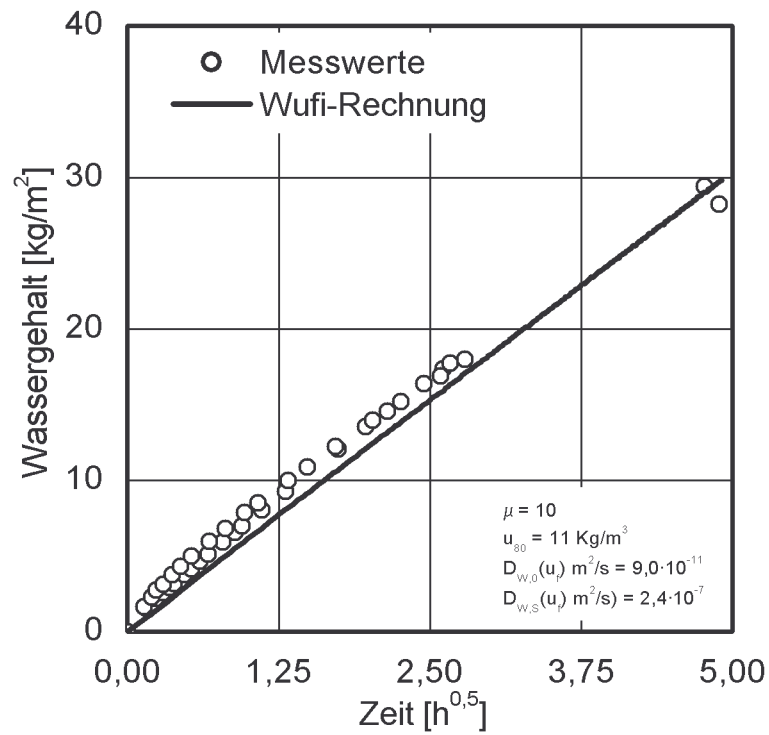


Abbildung 13: Blähton

Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI mit Zwei-Schicht-Aufbau zur Simulation der starken Wasseraufnahme in die offene Porenstruktur der Steinoberfläche

Porenbeton

Saugen



Trocknen

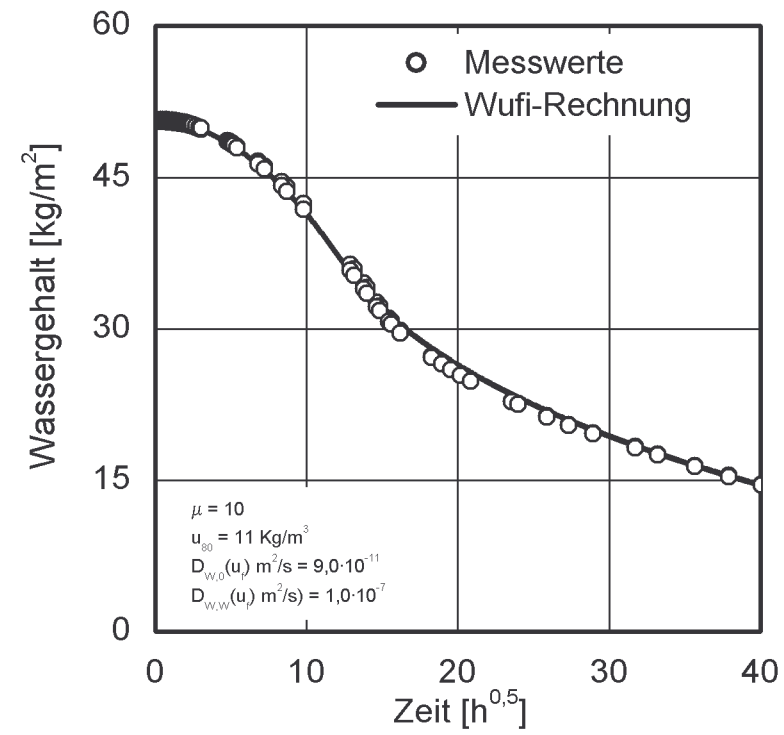


Abbildung 14: Porenbeton

Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

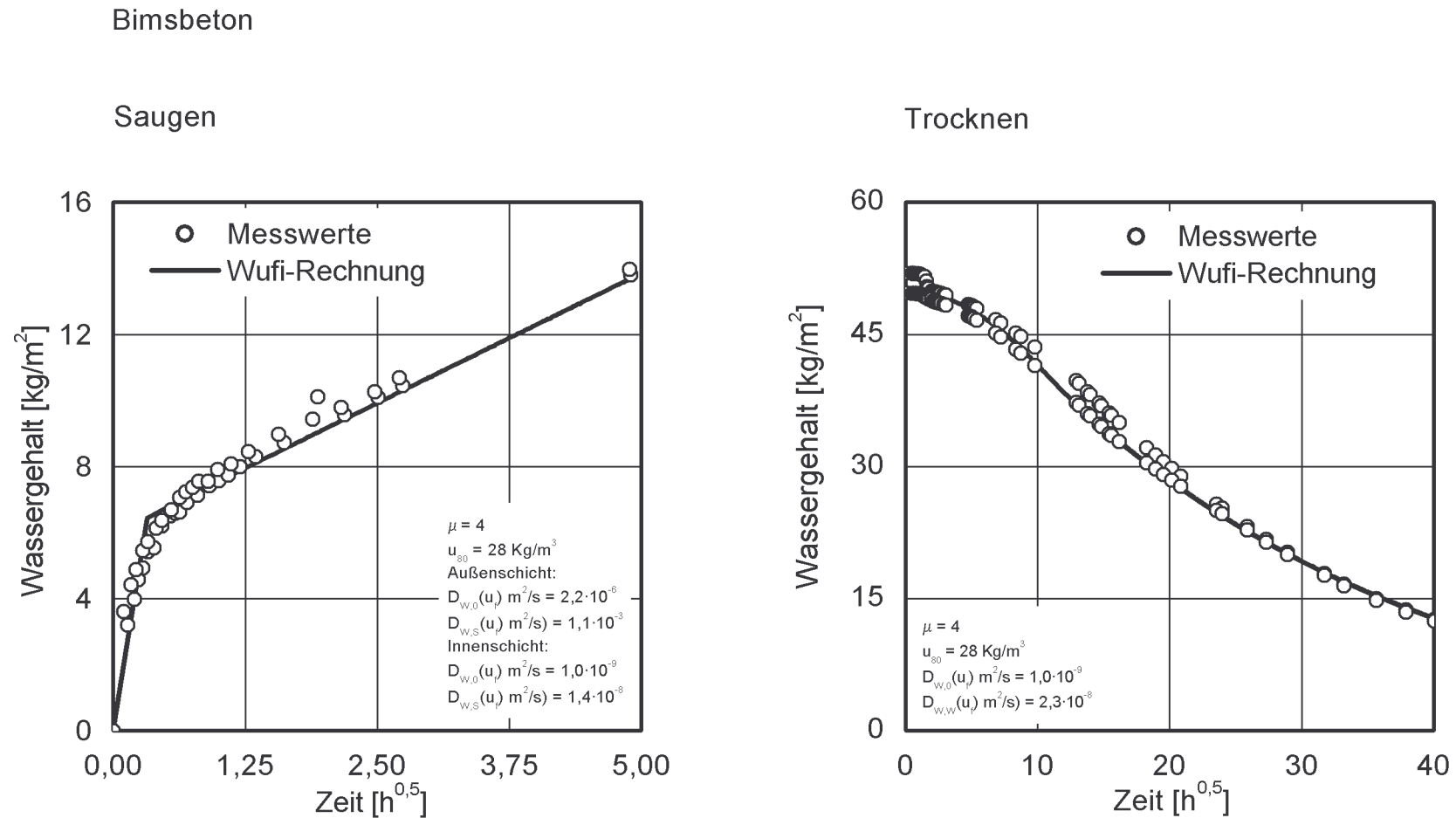
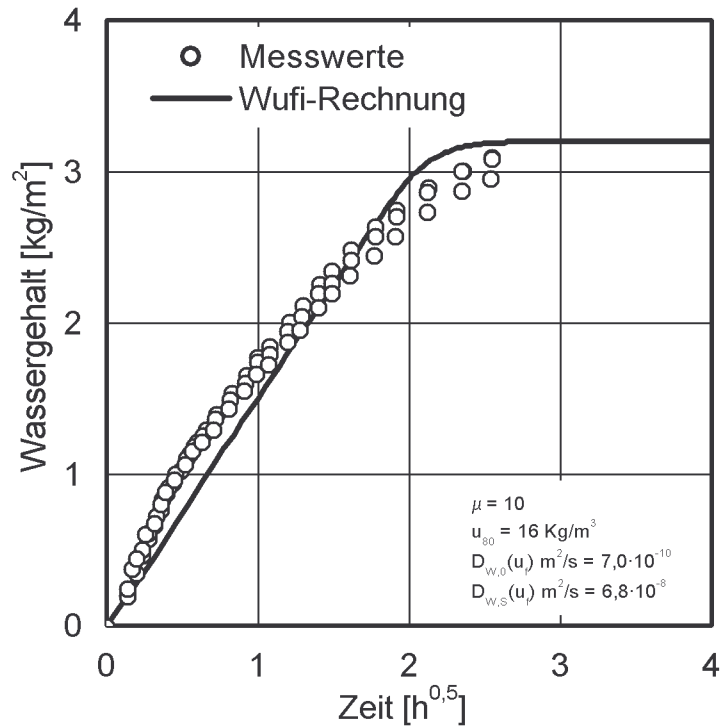


Abbildung 15: Bimsbeton

Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI mit Zwei-Schicht-Aufbau zur Simulation der starken Wasseraufnahme in die offene Porenstruktur der Steinoberfläche

Grundputz

Saugen



Trocknen

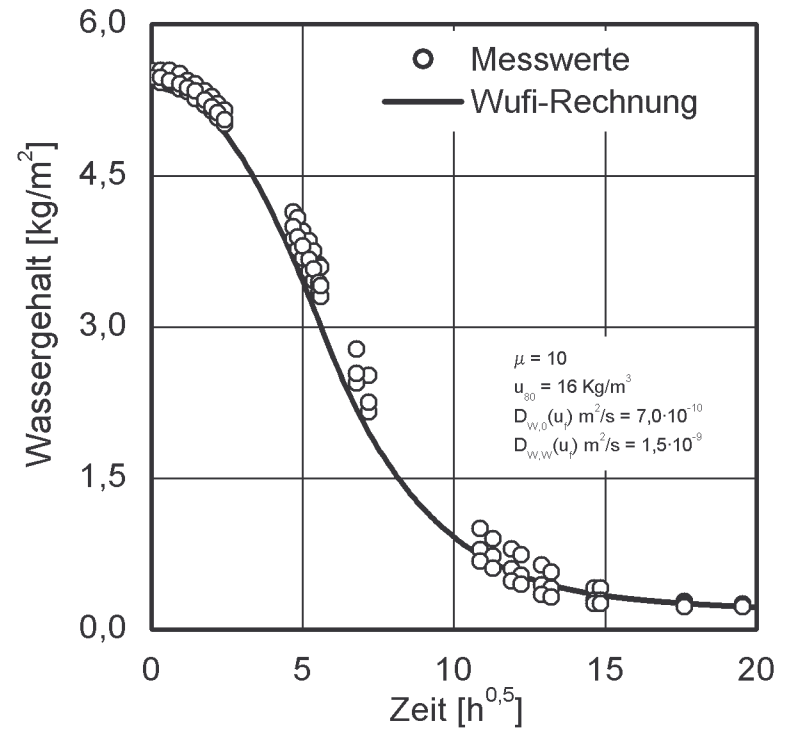


Abbildung 16: Grundputz

Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

Durchfeuchtung nach etwa 2,5 “Wurzelstunden”

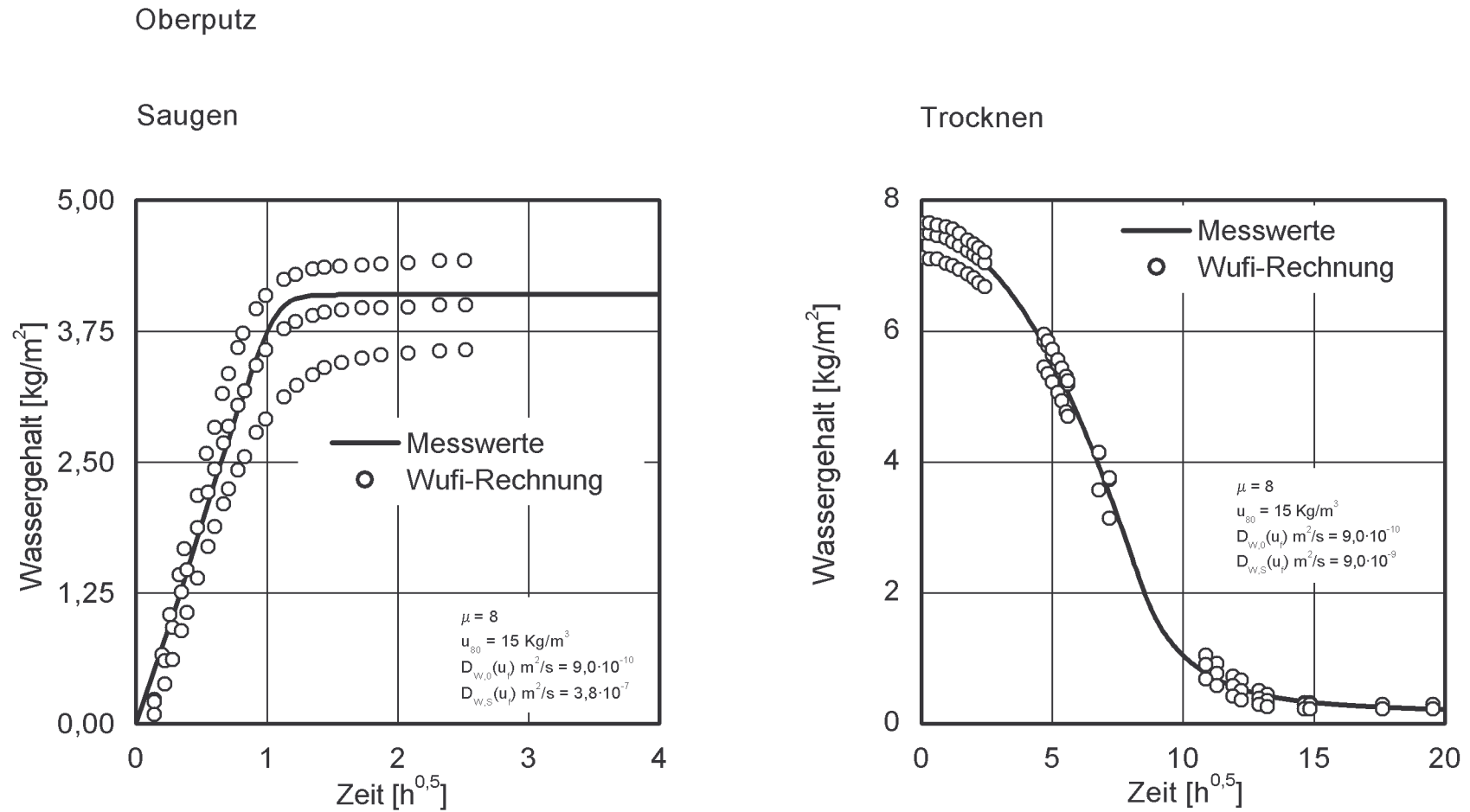


Abbildung 17: Oberputz

Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

Durchfeuchtung nach etwa 1 Stunde

Einfluß der Kennwerte  
Porenbeton

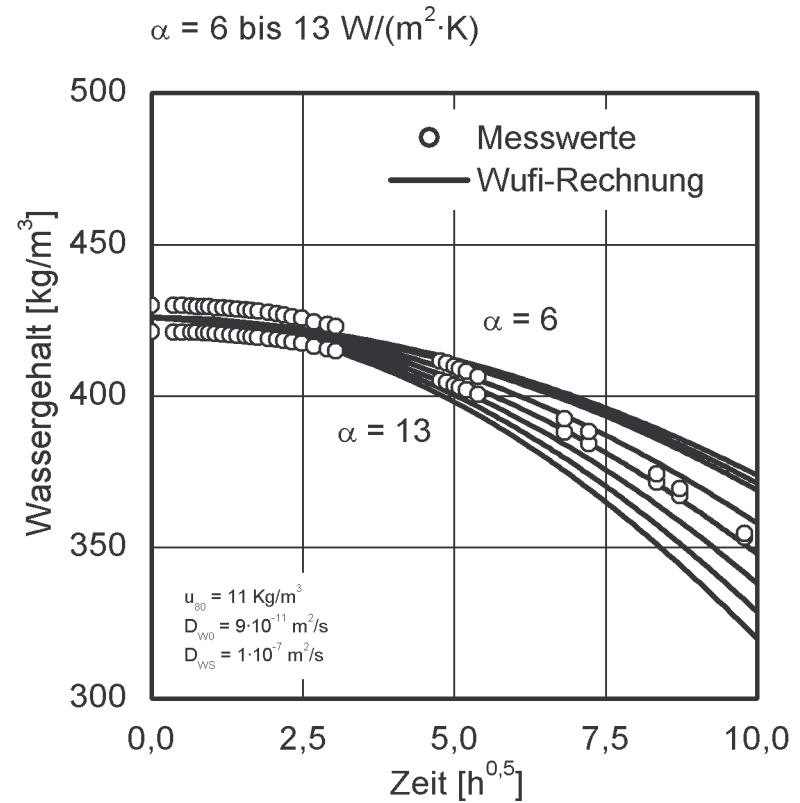
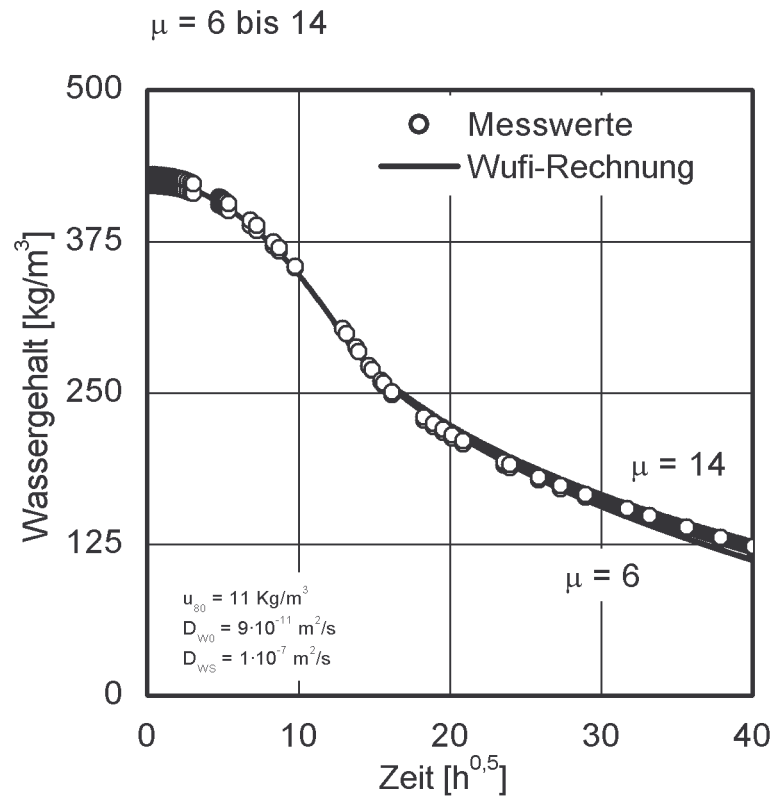


Abbildung 18: Porenbeton

Exemplarische Darstellung der Einflüsse einer Variation der Werte für Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl und Wärmewiderstand auf die WUFI-Berechnung



Einfluß der Transportkoeffizienten  
Porenbeton

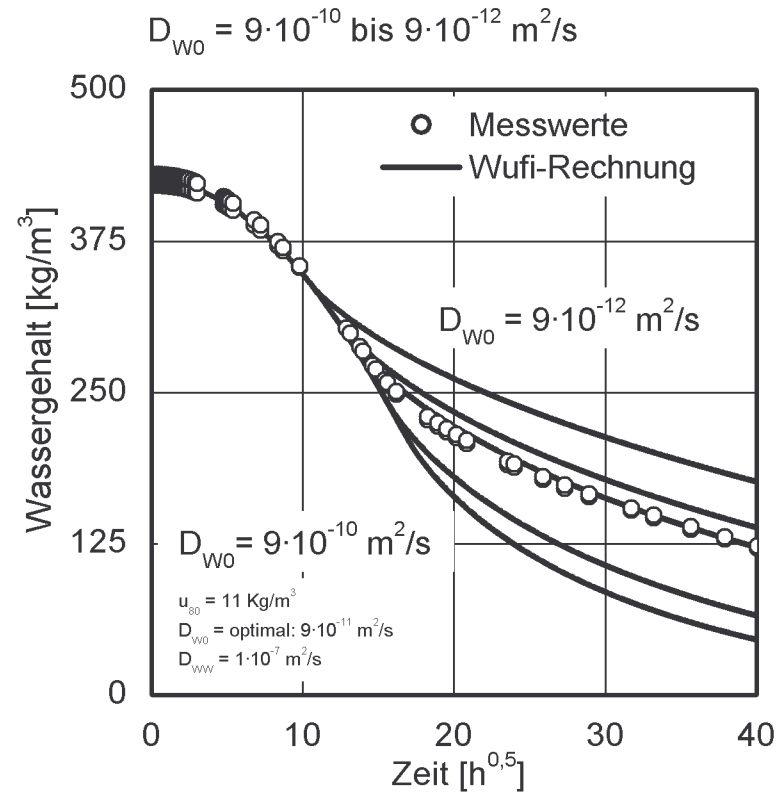
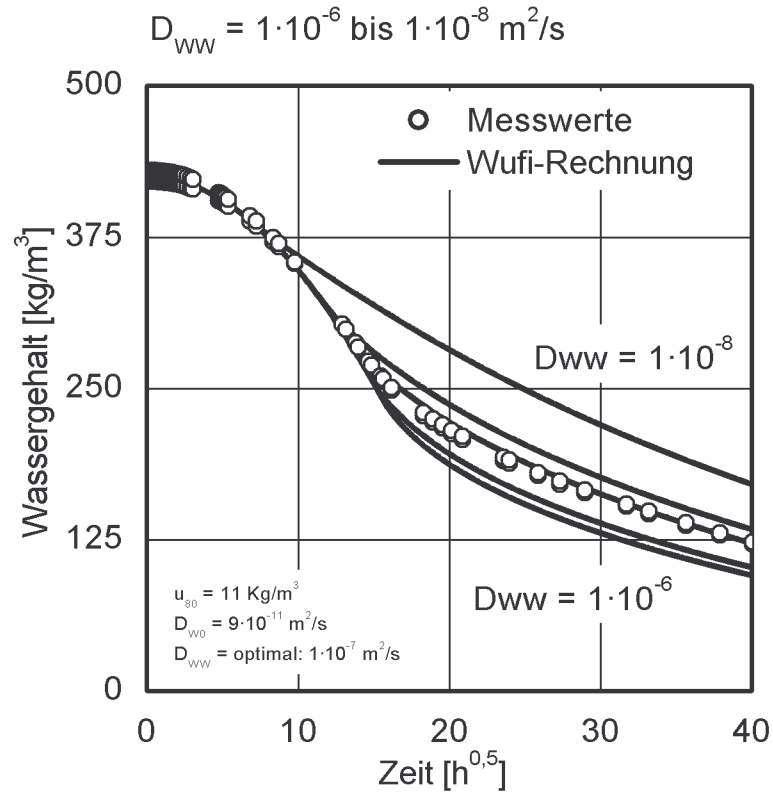


Abbildung 19:

Porenbeton Einzelprobe, Einfluss der Variation der Transportkoeffizienten  $D_{w0}$  und  $D_{ww}$  auf die WUFI-Berechnung

## Ziegel 650 mit Putz

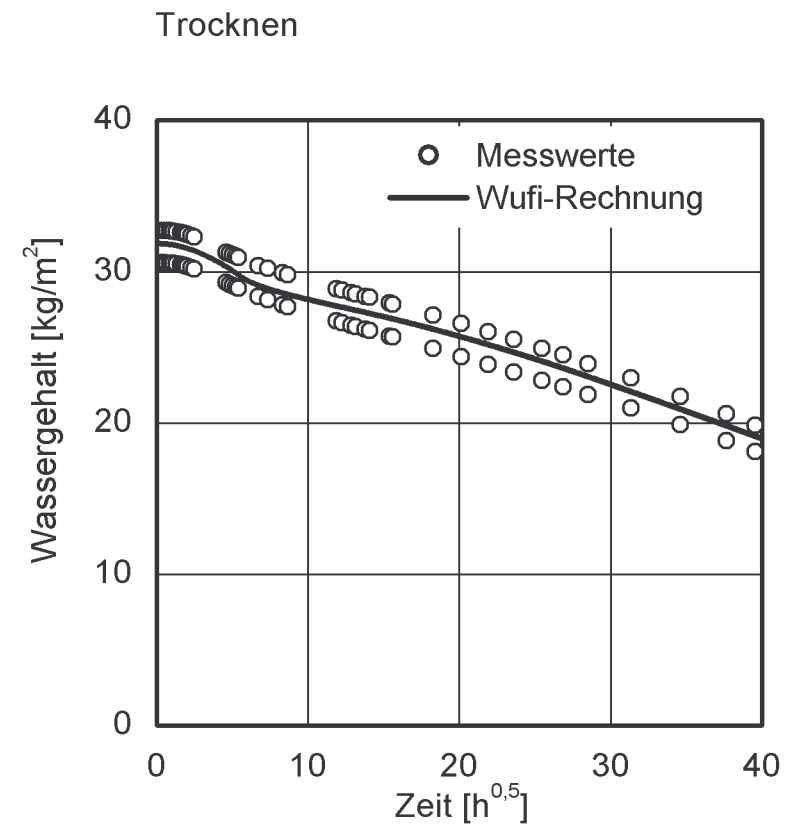
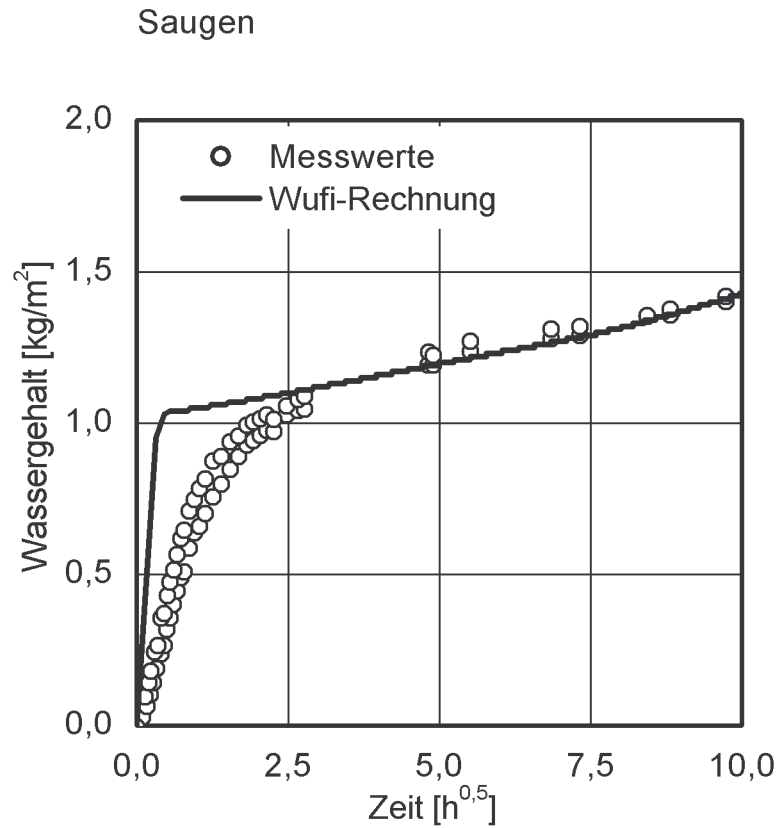
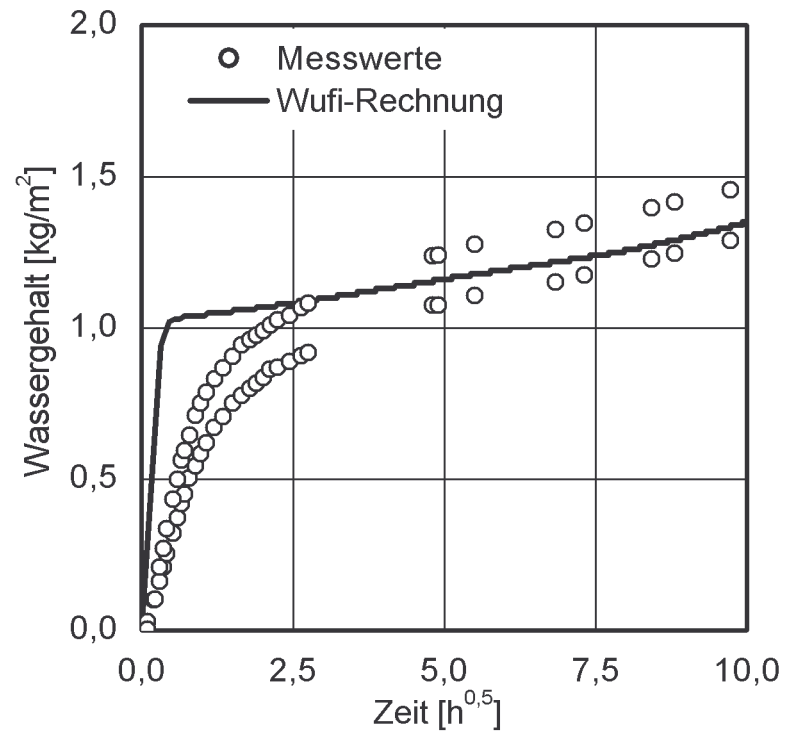


Abbildung 20:

Ziegel 600 mit Putz, Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

## Ziegel 600 mit Putz

## Saugen



## Trocknen

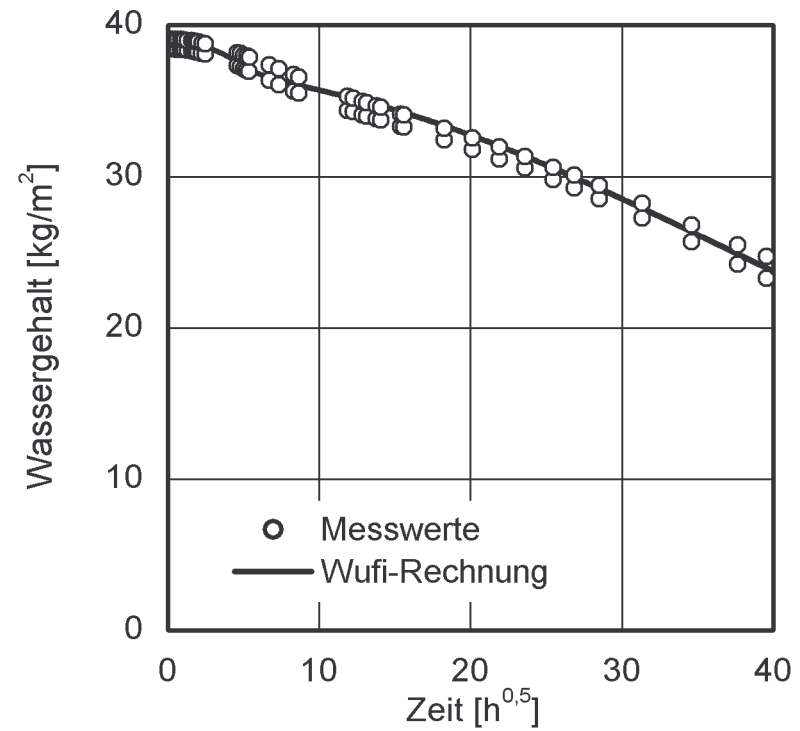


Abbildung 21:

Ziegel 650 mit Putz, Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

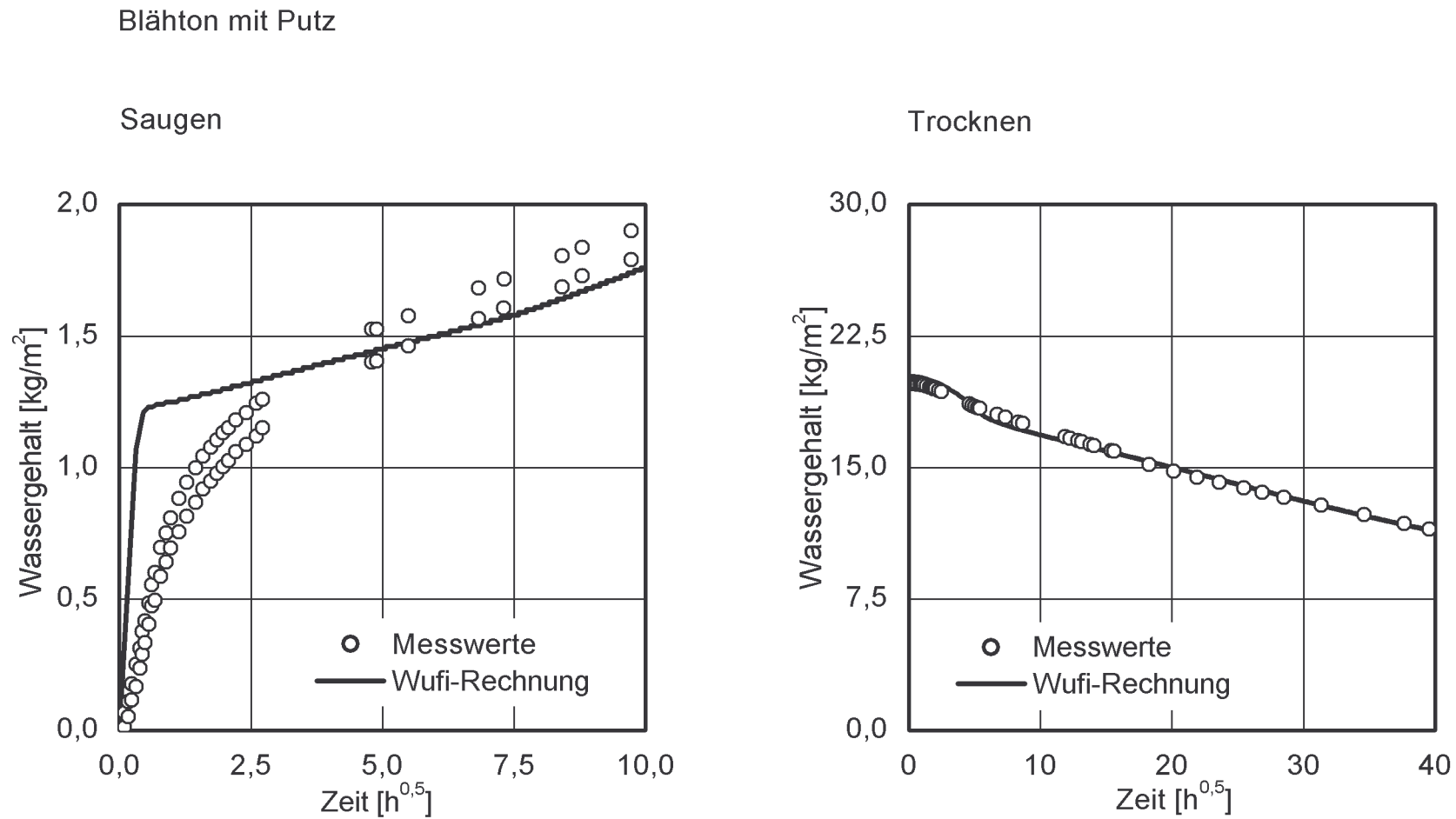


Abbildung 22:

Blähton mit Putz, Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

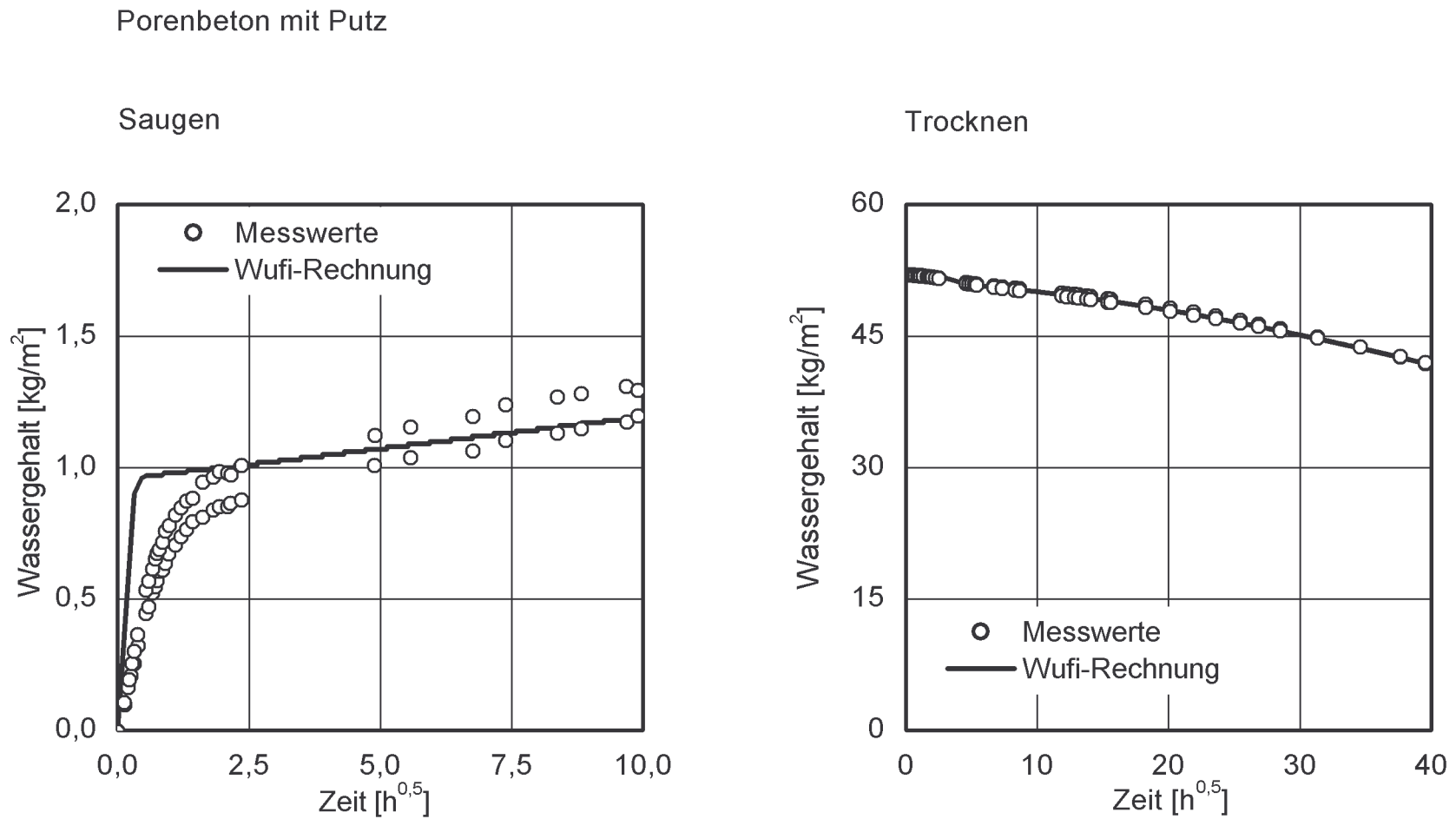
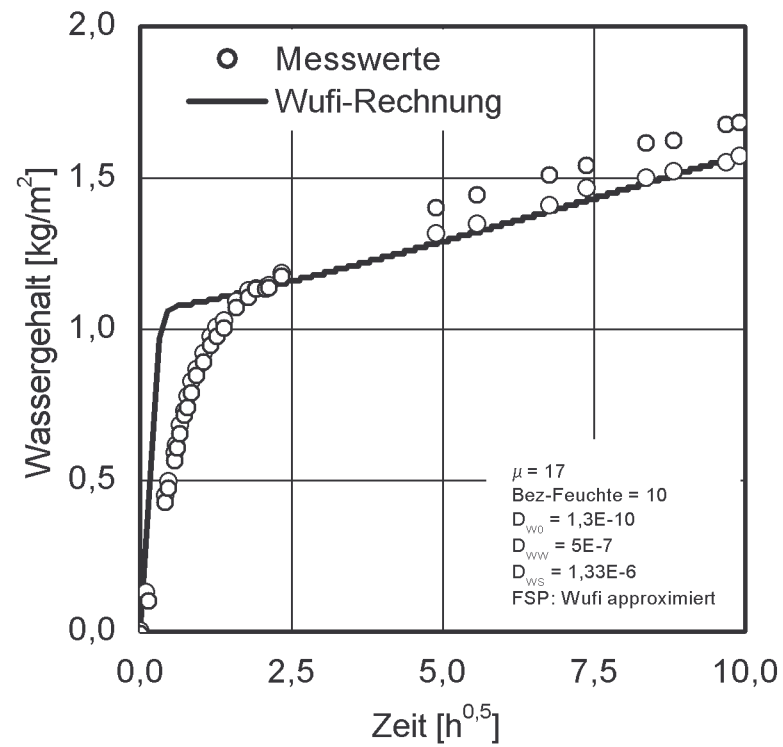


Abbildung 23:

Porenbeton mit Putz, Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

## Bimsbeton mit Putz

## Saugen



## Trocknen

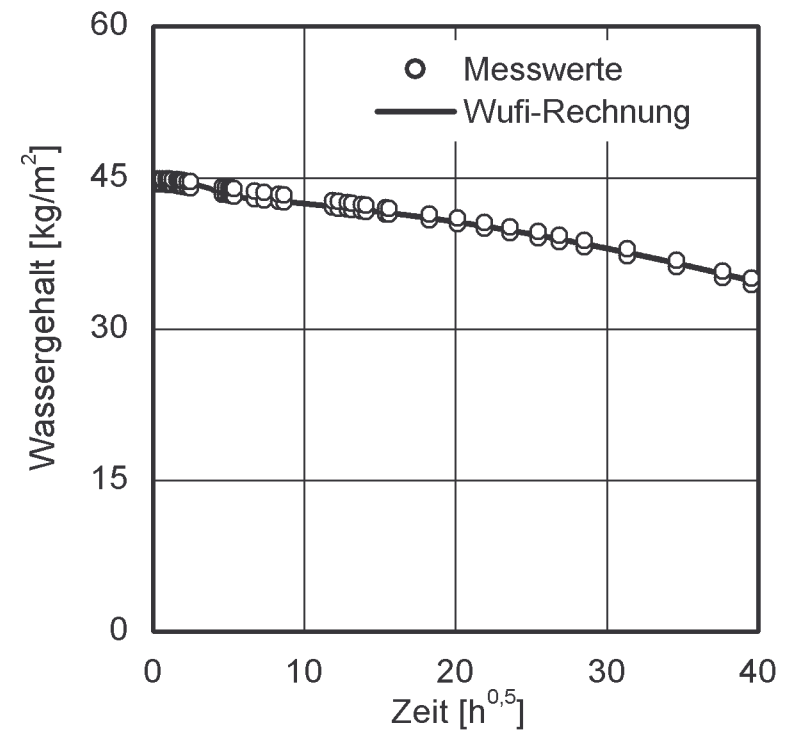


Abbildung 24:

Bimsbeton mit Putz, Messwerte von Saugen und Trocknen, Berechnungskurve aus WUFI

Vergleich Trocknung Ziegel 650

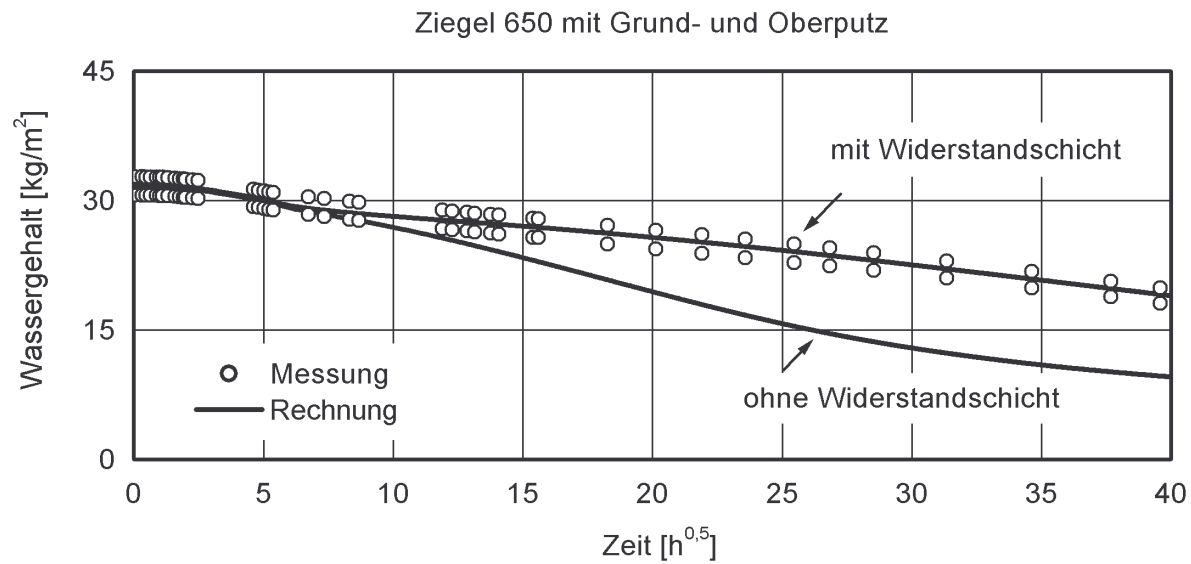
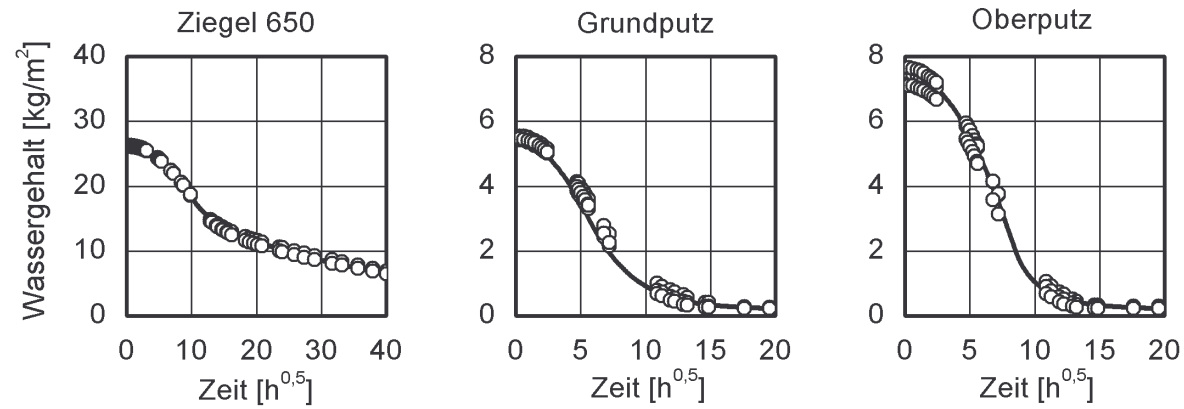


Abbildung 25: Ziegel 650

Vergleich der Austrocknung der verputzten Kombiproben mit den Einzelproben

Einfluss der Einführung von Widerstandsschichten zwischen Material und Putz für die Rechnung.

Vergleich Trocknung Ziegel 600

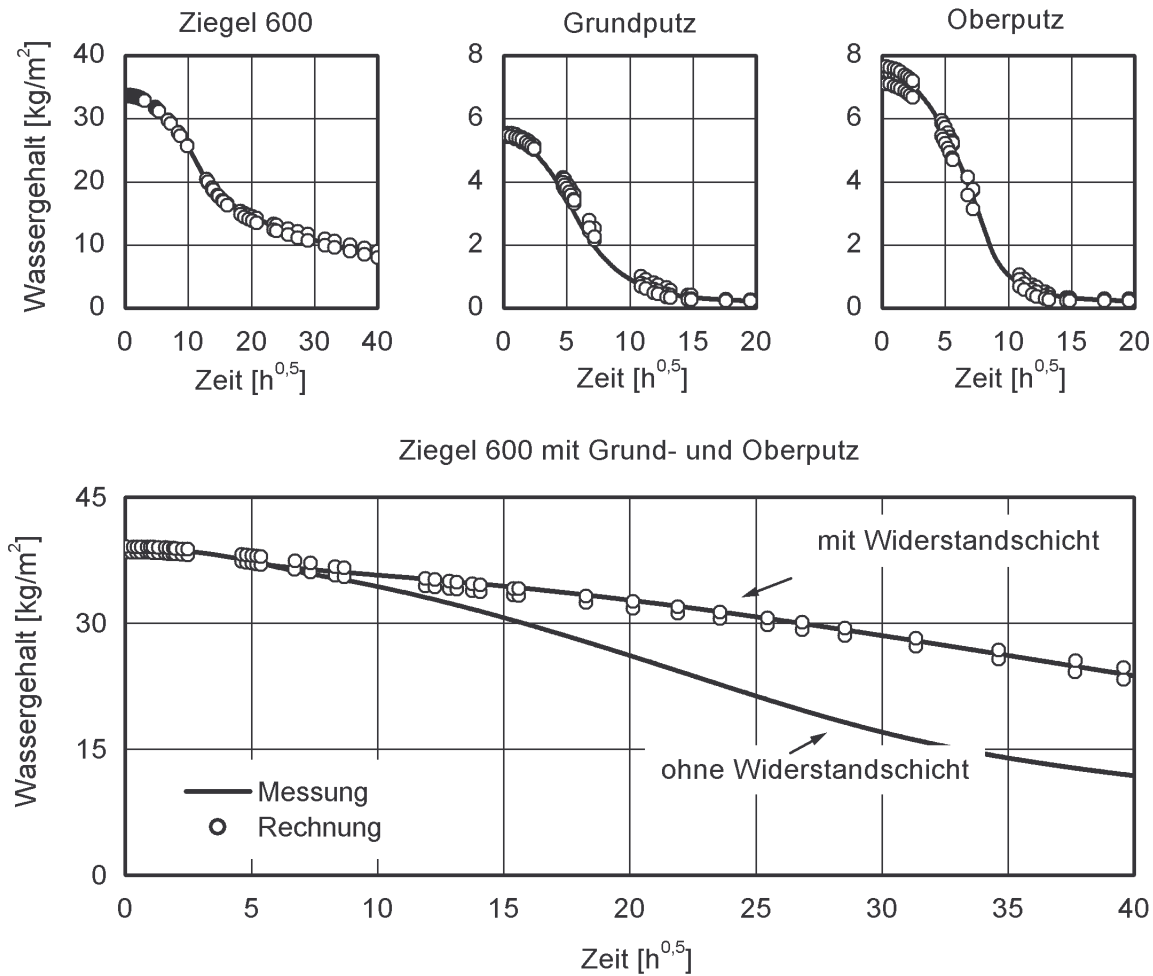


Abbildung 26: Ziegel 600

Vergleich der Austrocknung der verputzten Kombiprobe mit den Einzelproben

Einfluss der Einführung von Widerstandsschichten zwischen Material und Putz für die Rechnung.



## Vergleich Trocknung Blähton

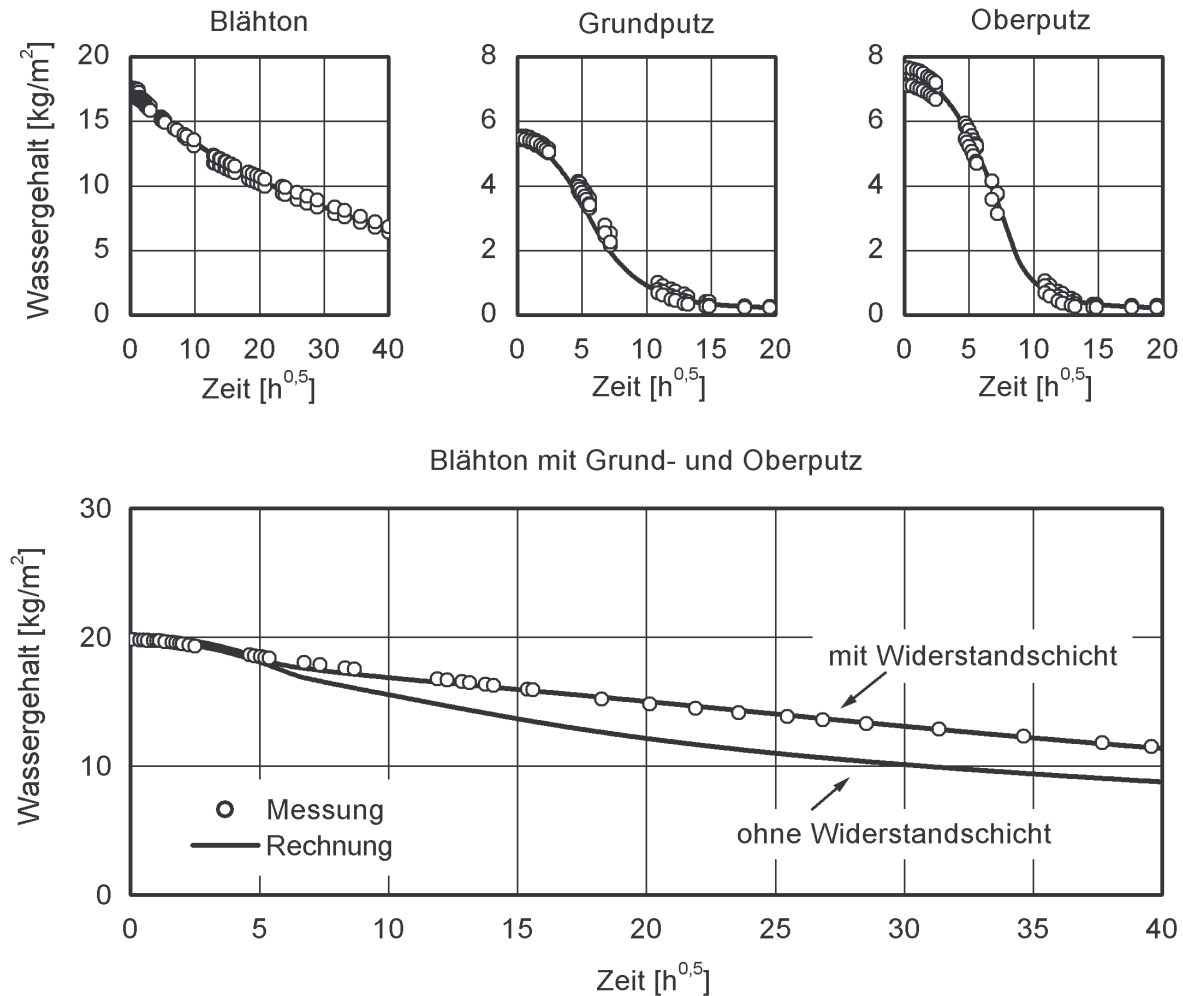


Abbildung 27: Blähton

Vergleich der Austrocknung der verputzten Kombiproben mit den Einzelproben

Einfluss der Einführung von Widerstandsschichten zwischen Material und Putz für die Rechnung.

Vergleich Trocknung Porenbeton

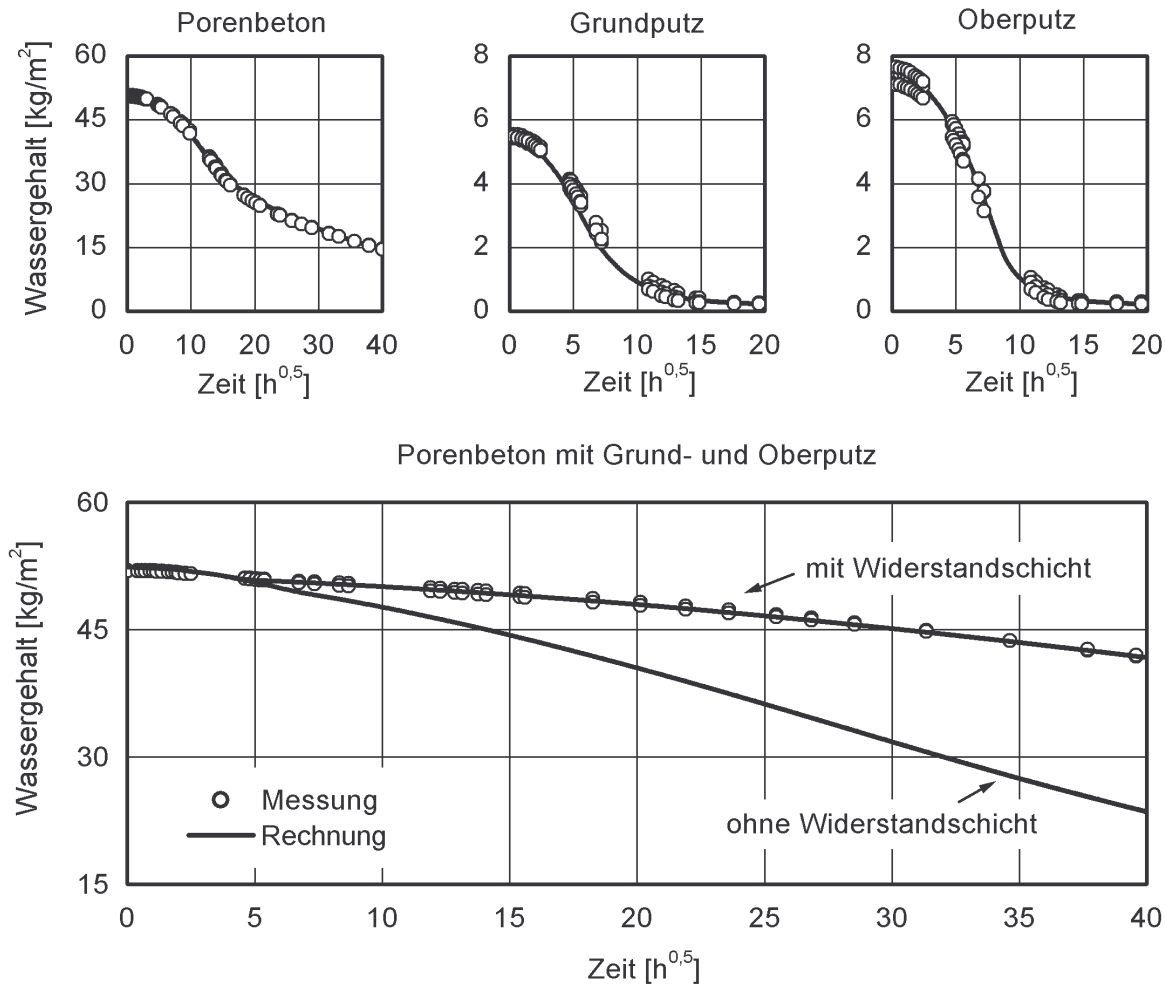


Abbildung 28: Porenbeton

Vergleich der Austrocknung der verputzten Kombiprobe mit den Einzelproben

Einfluss der Einführung von Widerstandsschichten zwischen Material und Putz für die Rechnung.

Vergleich Trocknung Bimsbeton

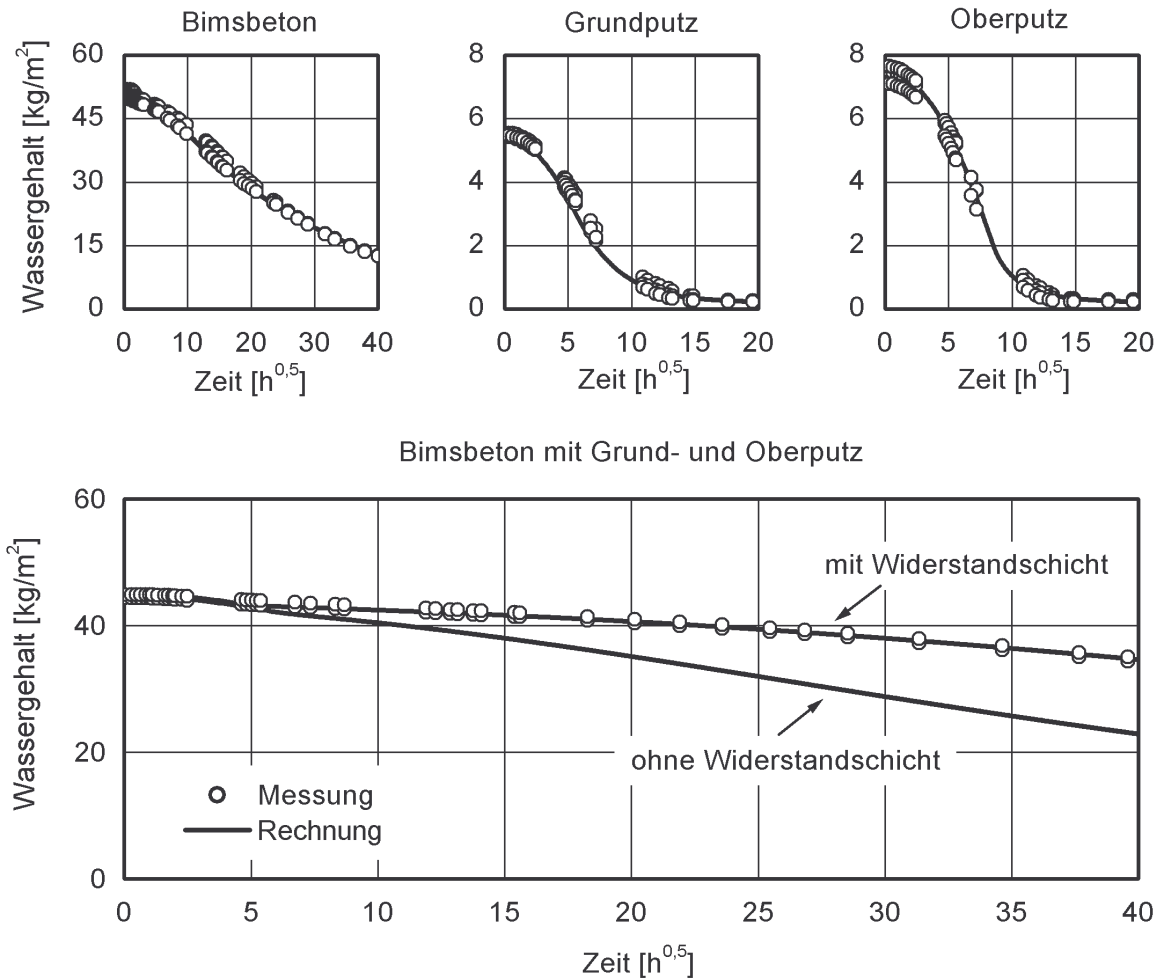


Abbildung 29: Bimsbeton

Vergleich der Austrocknung der verputzten Kombiproben mit den Einzelproben

Einfluss der Einführung von Widerstandsschichten zwischen Material und Putz für die Rechnung.

Wand aus verputztem Porenbeton-Mauerwerk  
Berechnung des Wassergehalts über fünf Jahre mit WUFI  
Ausgangsfeuchten bei 80 %, 90 %, 95 %, 97 % r. F.

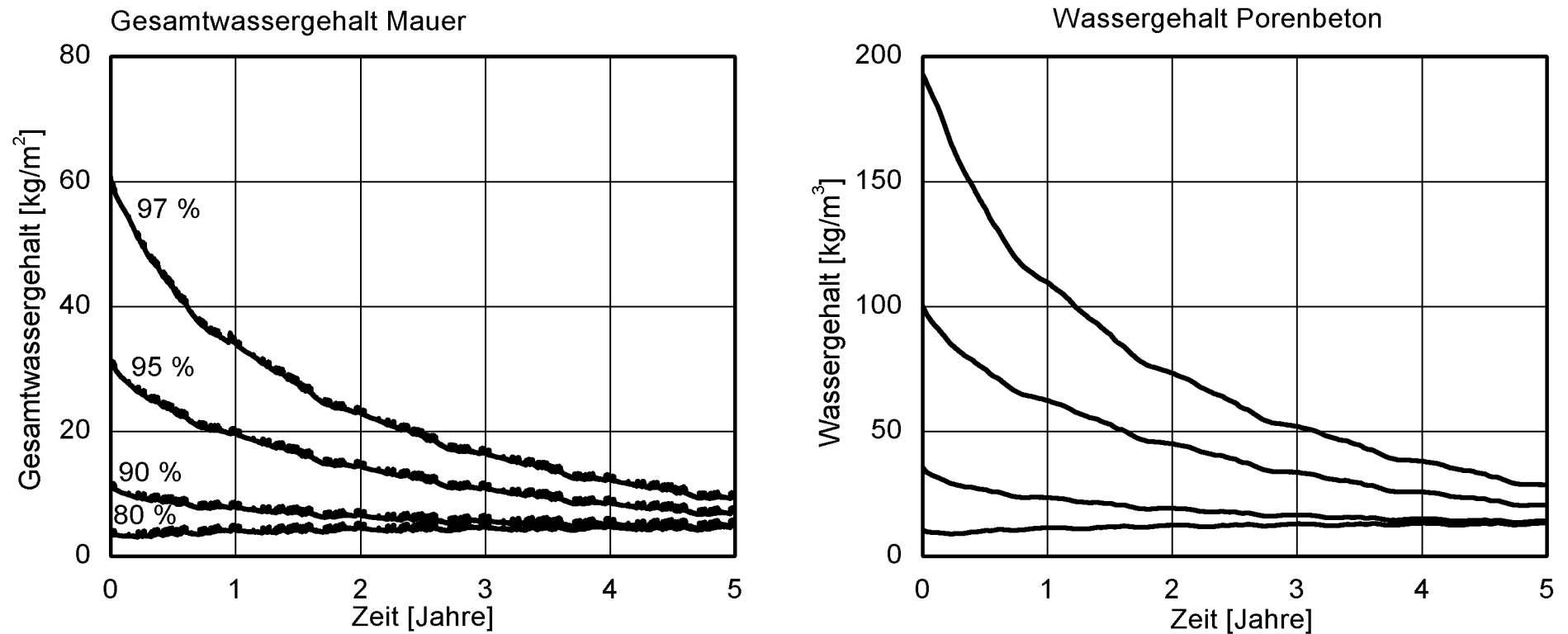


Abbildung 30:

Wand aus verputztem Porenbeton, rechnerische Trocknung über 5 Jahre

Wand aus verputztem Ziegel-650-Mauerwerk  
Berechnung des Wassergehalts über ein Jahr mit WUFI  
Ausgangsfeuchten bei 80 %, 90 %, 95 %, 97 % r. F.

— Rechnung mit WS  
— Rechnung ohne WS  
(WS: Widerstandsschicht)

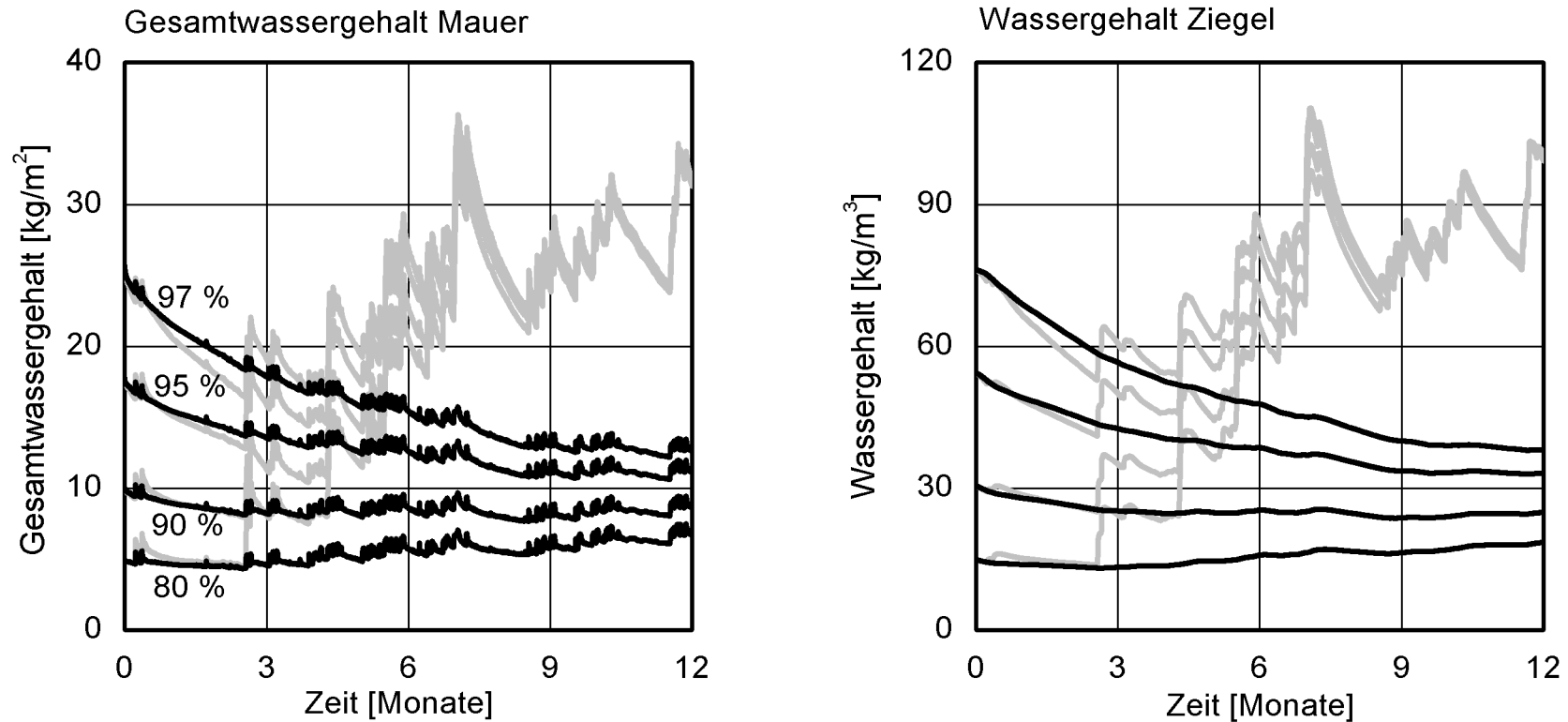


Abbildung 31:

Wand aus verputztem Ziegel 650, rechnerische Trocknung über 1 Jahr, Vergleich mit und ohne Widerstandsschicht

Wand aus verputztem Ziegel-600-Mauerwerk  
Berechnung des Wassergehalts über ein Jahr mit WUFI  
Ausgangsfeuchten bei 80 %, 90 %, 95 %, 97 % r. F.

— Rechnung mit WS  
— Rechnung ohne WS  
(WS: Widerstandsschicht)

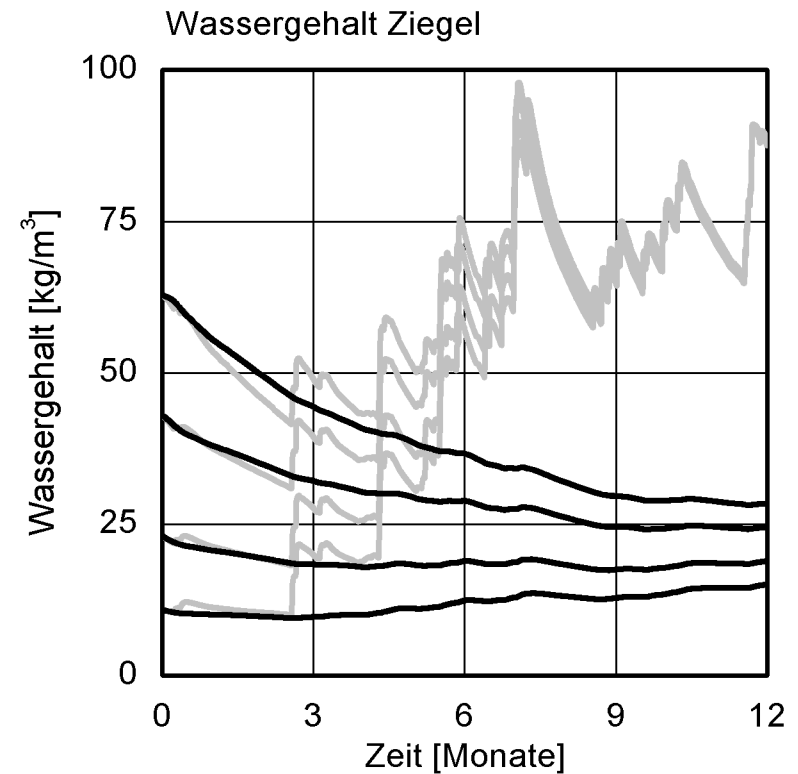
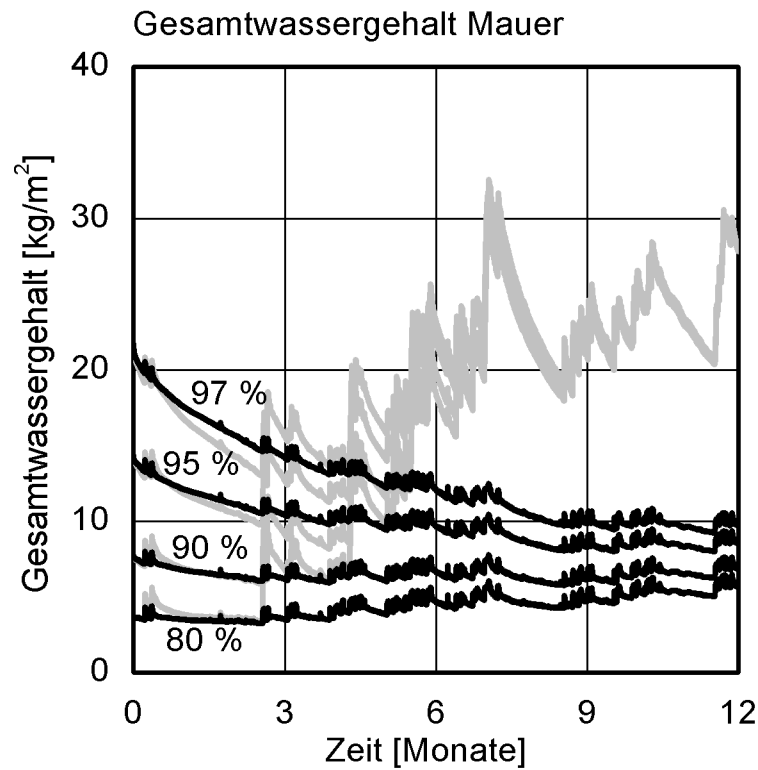


Abbildung 32:

Wand aus verputztem Ziegel 600, rechnerische Trocknung über 1 Jahr, Vergleich mit und ohne Widerstandsschicht

Wand aus verputztem Blähton-Mauerwerk  
 Berechnung des Wassergehalts über ein Jahr mit WUFI  
 Ausgangsfeuchten bei 80 %, 90 %, 95 %, 97 % r. F.

— Rechnung mit WS  
 — Rechnung ohne WS  
 (WS: Widerstandsschicht)

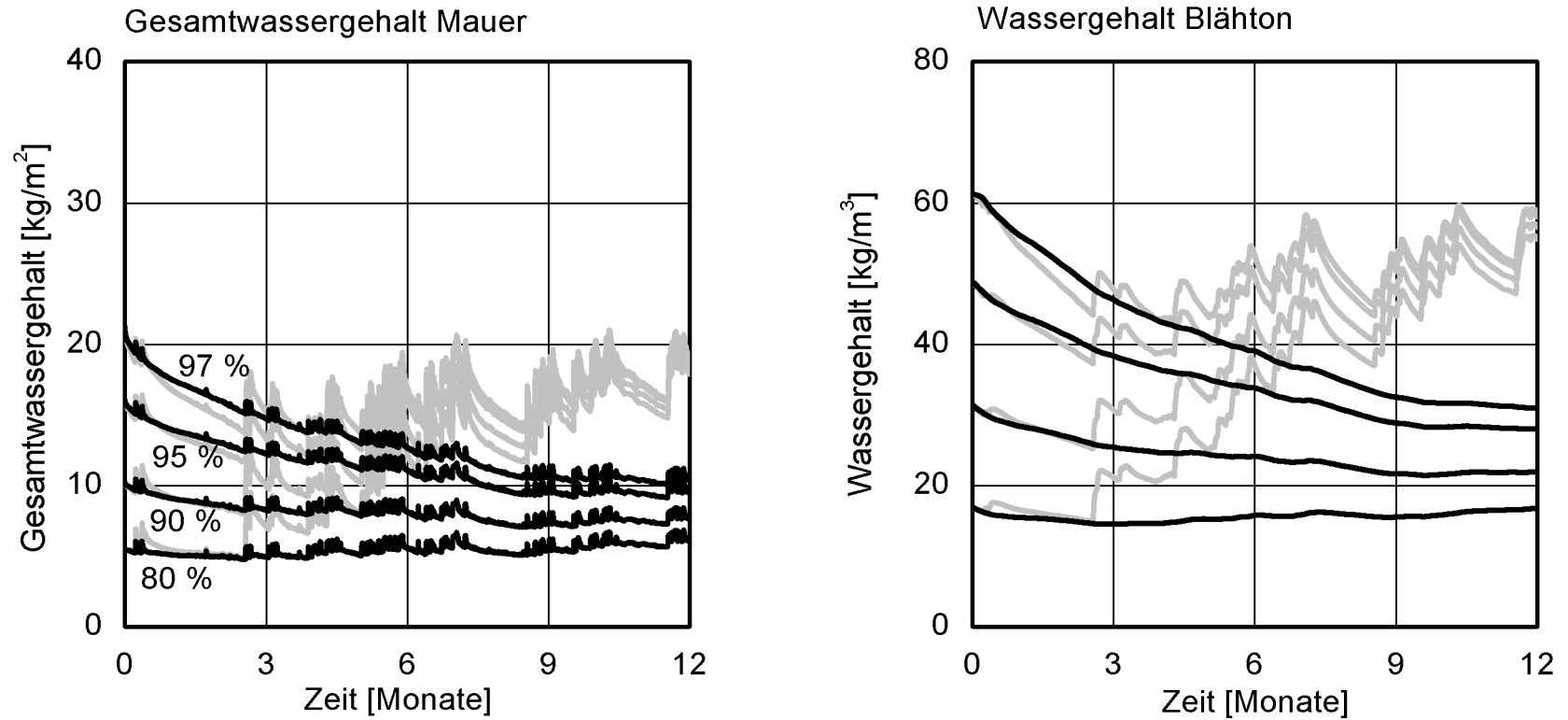


Abbildung 33:  
 Wand aus verputztem Blähton, rechnerische Trocknung über 1 Jahr, Vergleich mit und ohne Widerstandsschicht

Wand aus verputztem Porenbeton-Mauerwerk  
Berechnung des Wassergehalts über ein Jahr mit WUFI  
Ausgangsfeuchten bei 80 %, 90 %, 95 %, 97 % r. F.

— Rechnung mit WS  
— Rechnung ohne WS  
(WS: Widerstandsschicht)

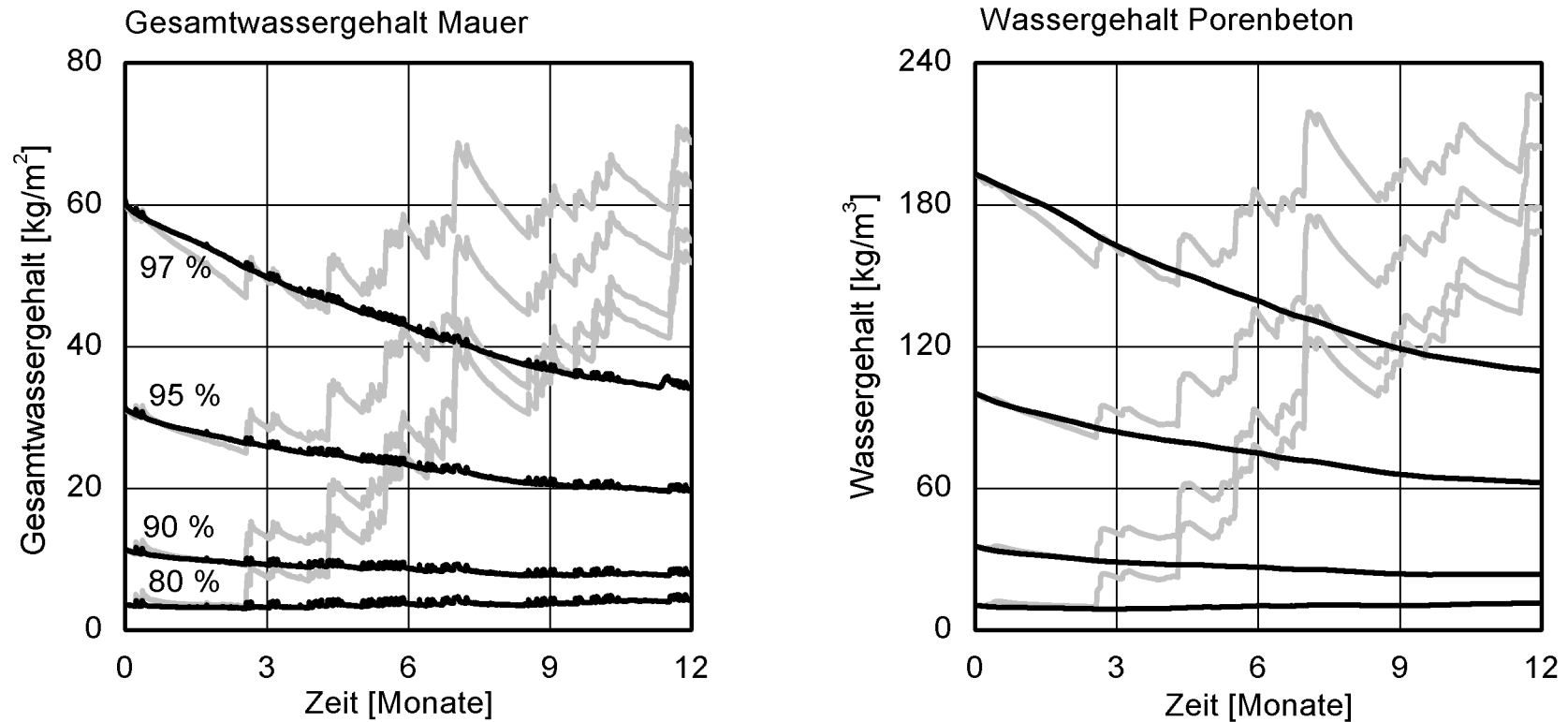


Abbildung 34:

Wand aus verputztem Porenbeton, rechnerische Trocknung über 1 Jahr, Vergleich mit und ohne Widerstandsschicht



Wand aus verputztem Bimsbeton-Mauerwerk  
 Berechnung des Wassergehalts über ein Jahr mit WUFI  
 Ausgangsfeuchten bei 80 %, 90 %, 95 %, 97 % r. F.

— Rechnung mit WS  
 — Rechnung ohne WS  
 (WS: Widerstandsschicht)

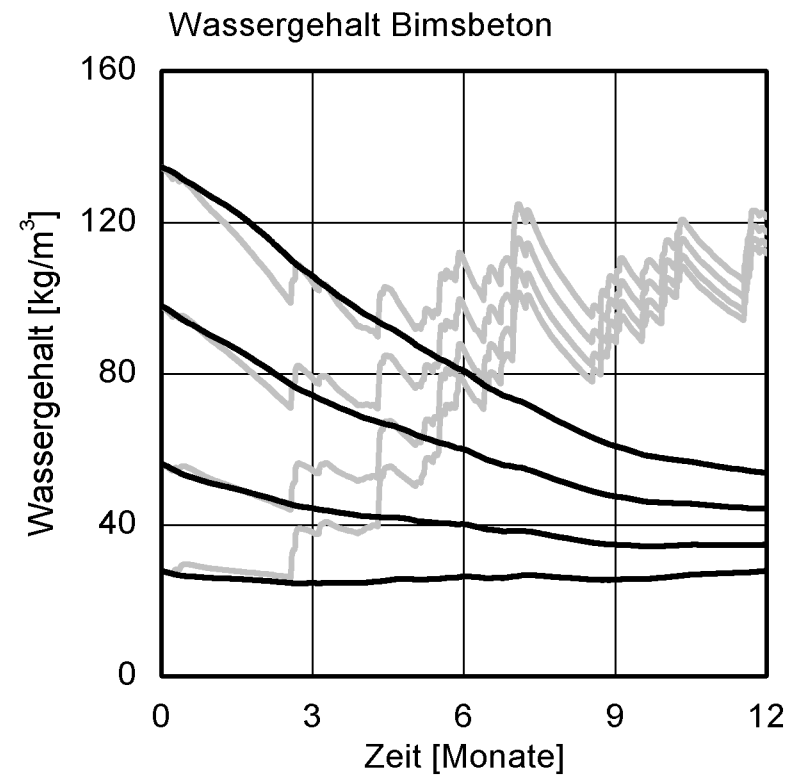
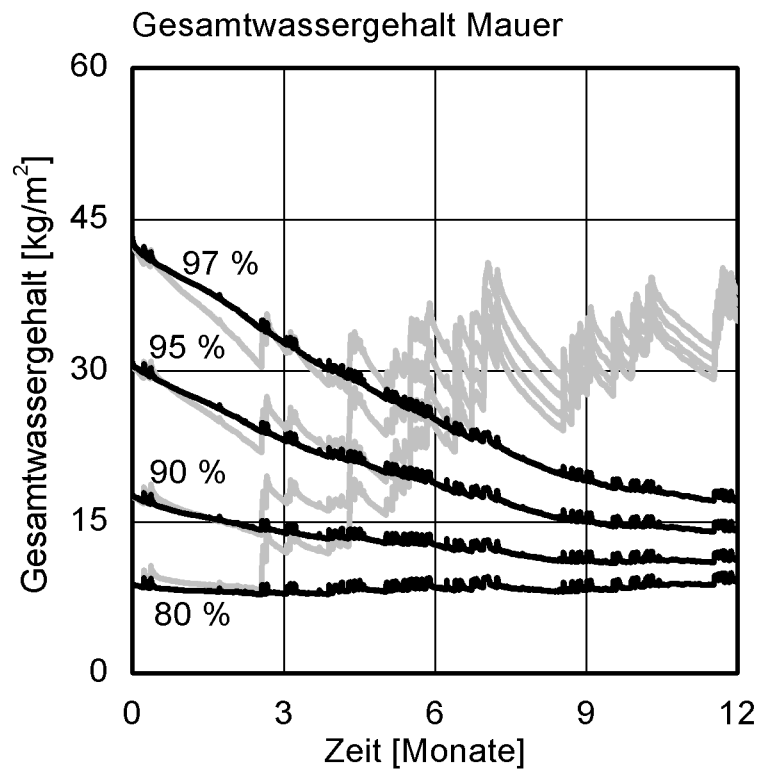


Abbildung 35:

Wand aus verputztem Bimsbeton, rechnerische Trocknung über 1 Jahr, Vergleich mit und ohne Widerstandsschicht

## 7 Literatur

- [Bakker] Bakker, G.: Kapillarität und Oberflächen-spannung. Handbuch der Experimentalphysik, Band 6, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1926
- [Bednar] Bednar, Th.: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden. Dissertation Technische Universität Wien, 2000
- [Brunauer] Brunauer, S., Emmett, P.H. und Teller, E.: Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journ. Amer. Chem. Soc. 60 (1938), H.2, S. 309-319
- [Gertis, Werner] Gertis, K. und Werner, H.: Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 258, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1976
- [DIN 52 617] DIN 52 617, Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. Mai 1987
- [DIN EN ISO 12570] DIN EN ISO 12570, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten. April 2000
- [Grunewald] Grunewald, J.: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation Technische Universität Dresden, 1996
- [Haller] Haller, P.: Der Austrocknungsvorgang von Baustoffen. Diskussionsbericht Nr. 139 der EMPA, Zürich 1942

- [Holm] Holm, A.: Bestimmung des Feuchteaustausches zwischen Putz und Mauerwerk. Diplomarbeit, Technische Universität München, 1996
- [Holm, Krus] Holm, A., Krus, M.: Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerische Anpassung. Bauinstandsetzen 4, 1998, H. 1, S. 33-52
- [Krus] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Dissertation Universität Stuttgart, 1995
- [Krus, Holm, Schmidt] Krus, M., Holm, A., Schmidt, Th.: Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert. Bauinstandsetzen 3, 1997, H. 1, S. 219-234
- [Krischer] Krischer O., Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Springer-Verlag, 3. Auflage, 1978
- [Kießl] Kießl, K.: Vorlesungsmanuskript zur Vorlesung Feuchteprobleme in Gebäuden. Universität Stuttgart, 1995
- [Künzel] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart, 1994
- [Künzel, H.] Künzel, H.: Der Regenschutz von Außenwänden. Mauerwerk-Kalender 1986, S. 735-751

- [Schubert] Schubert, H.: Kapillarität in porösen Feststoffsystemen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York 1982
- [Schüle] Schüle, W.: Untersuchungen über die Feuchtigkeitsaufnahme von Ziegelwänden und Wänden aus Ziegelsplitt-Schüttbeton bei Beregnung. Die Ziegelindustrie, Heft 8, 1954
- [Wärmeschutzverord.] Verordnung über energiesparenden Wärme-schutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Referentenentwurf-Fortschreibung, November 2000