



Ziegel 2.0: Wiederverwendbare Ziegelfertigteile und ihre Simulation in der Bauphysik

Severin Kysela¹, Hans Hafellner²

¹ TU Graz, Österreich, E-Mail: severin.kysela@tugraz.at

² TU Graz, Österreich, E-Mail: hafellner@tugraz.at

Kurzfassung

Bei dem Forschungsprojekt Ziegelwand Reuse werden wiederverwendbare Fertigteile aus Hochlochziegeln mit und ohne integrierter Wärmedämmung entwickelt. Die Grundlage des Systems bilden vorgefertigte Ziegelelemente, die für eine maximal mögliche Vorfertigung und Wiederverwendung modifiziert werden sollen. Ein zentrales Problem ist die Füge-technik zwischen den Elementen in Kombination mit bautechnisch umsetzbaren Lösungen. Die Verbindungstechnik muss zerstörungsfrei lösbar und wiederverwendbar sein und gleichzeitig den Anforderungen der Tragfähigkeit, Bauphysik und visuellen Ansprüchen entsprechen.

Der Fokus des Beitrags liegt auf den bauphysikalischen Simulationen zur Füge-technik, die eindimensional und zweidimensional stationär und instationär durchgeführt wurden.

Einleitung

Die dringende Notwendigkeit, Klimaziele zu erreichen, erfordert innovative Lösungen aller am CO₂ Ausstoß beteiligten Industrien. Der Bausektor ist maßgeblich daran beteiligt, laut dem UN Global Status Report von 2020 fallen 38% der Treibhausgase auf die Errichtung von Bauwerken und deren Nutzung zurück. Allein 10% der gesamten CO₂-Emissionen entstehen bei der Herstellung von Baustoffen. [1] Ein von der Technischen Universität Graz und dem Ziegelhersteller Wienerberger in Entwicklung befindliches Ziegelfertigteil-System soll das Wiederverwenden von Ziegeln im Hochbau revolutionieren und somit endliche Ressourcen schonen, Emissionen einsparen und gleichzeitig durch die Standardisierung und Werksfertigung der Fertigteile, Arbeitszeit reduziert und dem allzeithohen Fachkräftemangel entgegengewirkt werden. [2]

Über einen Forschungszeitraum von 2 Jahren sollen bereits erprobte Ziegelfertigteile technisch so modifiziert werden, dass sie in der Praxis nach Ende der Gebäudelebensdauer in einem

anderen Gebäude wiederverwendet werden können. Zunächst ist geplant, das System für Verbrauchermärkte zu entwickeln, da diese ein standardisiertes Gebäudekonzept und eine geringe Nutzungsdauer im Vergleich zu Ziegel aufweisen, somit kann das Bausystem bei anderen Gebäuden wiederverwendet werden. [3]

Zielsetzung

Folgende Punkte sollen im Rahmen des Forschungsprojekts umgesetzt werden:

1. Erstellung eines vollumfänglichen Anforderungsprofils für das System
2. Entwicklung von zerstörungsfreien, lösbaren Verbindungstechniken
3. Entwicklung eines Systems mit größtmöglichem Vorfertigungsgrad
4. Konzipierung von schadensvermeidenden Konstruktionen durch Simulationen
5. Verbindungstechniken im Labormaßstab erproben
6. Demonstrator-Gebäude mit dem Bausystem errichten

Detailentwicklung

Aus Bauvorschriften, Normen und Richtlinien wurde ein umfangreicher Anforderungskatalog für die vorgefertigten Bauteile erstellt. Auf Basis dieses Katalogs wurden zahlreiche gängige Anschluss-Details modifiziert, um allen Anforderungen des Reuse-Systems gerecht zu werden. Der Fokus des Beitrags liegt auf den bauphysikalischen Simulationen, speziell auf der Fuge beim Sockelbereich von Bodenplatte zu Fertigteil, hier entsteht durch die Abdichtungsebene an der Außenseite ein Diffusionsproblem. In Abbildung 1 dargestellt ist ein konventioneller Wandanschluss auf einer Bodenplatte, hier entsteht durch zahlreiche Arbeitsschritte vor Ort ein funktionierender Bauteilanschluss. Beim konventionellen Bauteil ist eine sortenreine Trennung der Baustoffe unter anderem durch den notwendigen Hochzug

gemäß ÖNORM B 3692 im Spritzwasserbereich auf Grund der vollflächigen Verklebung nicht möglich. [4] In Abbildung 2 ist der gleiche Detailbereich mit dem Reuse-System ausgeführt, hier wird ein fertiges Bauteil über den Fugenschluss verbunden.

Schicht	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wasserdampfdiffusionsw. [-]
Sockelputz	1,5	0,8	30
XPS-P	14	0,035	150
Bituminöse Abdichtung	0,8	0,2	50000
Porotherm 25 EFH	25	0,26	10
Innenputz	1,5	0,7	30
Dispersionsfarbe	0,1	0,2	1800

Tabelle 1: konventioneller Bauteilaufbau Sockelbereich

In Tabelle 1 ist eine konventionelle Schichtenfolge für einen Wandanschluss im Sockelbereich von außen nach innen aufgelistet (Schnitt A-A in Abbildung 1). Die bituminöse Abdichtungsebene liegt auf der bauphysikalischen Innenseite, da die Dämmung weiter außen liegt. Im Bodenbereich soll die Wand der Nassabriebsklasse 1 gemäß DIN EN 13300 entsprechen, deshalb wird an der Innenseite eine Dispersionsfarbe verwendet. [5]

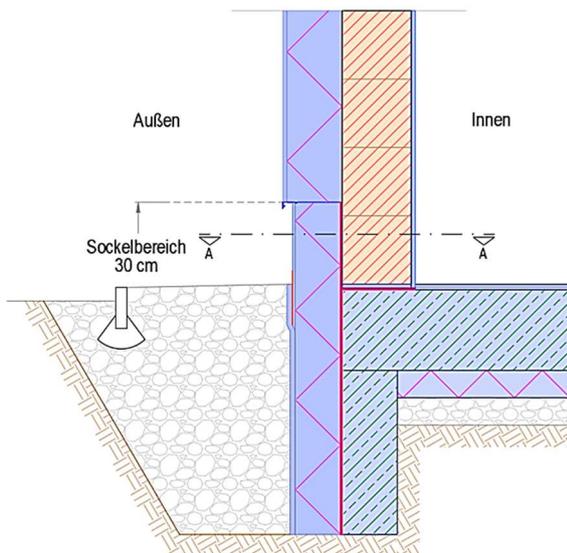


Abbildung 1: konventioneller Sockelanschluss

In Tabelle 2 ist die Reuse-Schichtfolge des Wandanschlusses im Sockelbereich von außen nach innen aufgelistet (Schnitt A-A in Abbildung 2). Das System soll symmetrisch aufgebaut sein,

eine denkbare Schichtenfolge ist Kalkzementputz für den Außenbereich, Wienerberger Porotherm 44 W.i. und Kalkzementputz für den Innenbereich.

Schicht	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Wasserdampfdiffusionsw. [-]
Kalkzementputz	1,5	0,8	30
MB 2K	0,3	0,2	1755
Porotherm 44 W.i.	44	0,064	10
Kalkzementputz	1,5	0,7	30
Dispersionsfarbe	0,1	0,2	1800

Tabelle 2: Reuse-Bauteilaufbau im Sockelbereich

Dieser Aufbau wurde im Sockelbereich außen um eine mineralische Dichtschlämme gemäß Verarbeitungsrichtlinie Sockel [6] in Kombination mit einer Bitumenbeschichtung auf der Ziegelaußenseite und innen um eine Dispersionsfarbe der Nassabriebsklasse 1 nach DIN EN 13300 ergänzt. [5]

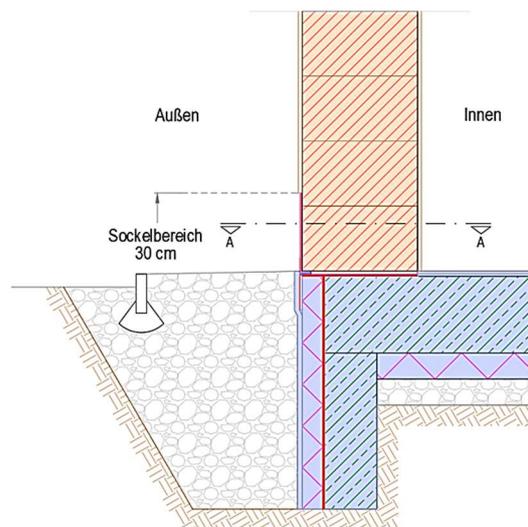


Abbildung 2: Reuse-System Sockelanschluss

Bauphysikalisch entsteht rechts ein Problem, da im Gegensatz zum konventionellen System, die wärmedämmende Schicht (Porotherm 44 W.i.), auf der bauphysikalischen Innenseite liegt (die Abdichtungsebene wird nicht gedämmt und liegt somit an der kalten Seite).

In den vertikalen Schnitten wurden die Bauteilschichten, die im Werk automatisiert hergestellt werden, orange hinterlegt, die bauseitig geschaffenen blau und Abdichtungsebene in Rot dargestellt. Es wird angestrebt, dass das umlaufende Gelände auf Grund von Barrierefreiheit (Türen, Rampen, etc.) mit der fertigen Fußbodenoberkante in einer

Ebene liegt. Alternativen zu dieser Ausführung finden sich in der Ausarbeitung der Masterarbeit Ziegelwand Reuse. [7]

Simulationssoftware

Die Aufbauten wurden eindimensional stationär mit GEQ [8], zweidimensional stationär mit HTflux [9] und ein- und zweidimensional instationär mit WUFI Pro 6.7 und WUFI 2D [10] simuliert und analysiert, dabei verwendet GEQ das Berechnungsverfahren nach ÖNORM B 8110-2 (2003) [11] bzw. ÖNORM EN ISO 13788. [12] HTflux verwendet eine speziell entwickelte Glaser-2D-Methode, die nicht nur den Bauteilaufbau, sondern den gesamten zweidimensionalen Detailbereich abbildet.

Wufi Pro 6.7 und Wufi 2D simuliert das Materialverhalten, die klimatischen Randbedingungen und die hygrothermischen Prozesse im Bauteil im Vergleich zur stationären Berechnung wesentlich genauer. Beispielsweise wird die Feuchtespeicherfunktion in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit oder die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Wassergehalt berücksichtigt.

Um eine detaillierte Übersicht der berücksichtigten physikalischen Prozesse zu erhalten, wird auf die ÖNORM EN 15026, ÖNORM 8110-2 (2020) sowie das WTA-Merkblatt 6-2 verwiesen. [13–15]

Nur für wenige Materialien ist eine kombinierte abhängige Wärmeleitfähigkeit von Feuchte und Temperatur als Datensatz vorhanden.

In WUFI wird die temperatur- und feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit (siehe Formel 1 und 2) durch die folgenden linearisierten Beziehungen berücksichtigt.

Der Wertebereich für die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit startet bei -20°C und endet bei 80°C mit einer Differenz von 0,02 [W/mK] für die meisten Materialien. Dabei liegt der Ausgangswert (Für den Porotherm 44 W.i. 0,064 [W/mK]) bei 10°C.

$$\lambda(\vartheta) = \lambda_{10} + a * (\vartheta - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

$\lambda(\vartheta)$ Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/mK]

λ_{10} Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C [W/mK]

a..... temperaturbedingter Zuschlag zur Wärmeleitfähigkeit [W/mK²]

ϑ Temperatur [°C]

$$\lambda(w) = \lambda_{trocken} \cdot (1 + b * w/\rho_s) \quad (2)$$

$\lambda(w)$... Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes [W/mK]

$\lambda_{trocken}$.. Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes [W/mK]

b Feuchtezuschlag zur Wärmeleitfähigkeit [%/M%]

w..... Wassergehalt [kg/m³]

ρ_s Rohdichte des trockenen Baustoffes [kg/m³]

In Abbildung 3 ist die Wärmeleitfähigkeit λ in Abhängigkeit des Wassergehalts dargestellt, die sich aus Formel (2) berechnet. Bei den stationären Simulationen wird der trockene λ -Wert mit 0,064 [W/m²K] angenommen, steigt die Feuchtigkeit im Bauteil, kann sich dieser Wert um ein Vielfaches erhöhen.

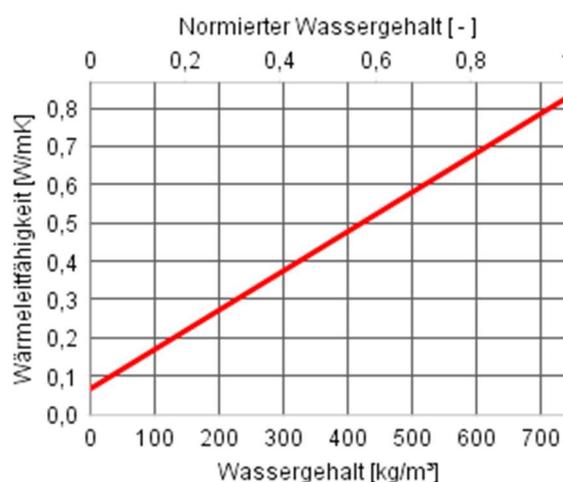


Abbildung 3: feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit des Porotherm Ziegels

Randbedingungen

Bei den stationären Untersuchungen wurden die standortabhängigen, klimatischen Randbedingungen für den Standort Klagenfurt mit einer Seehöhe von 450 m gewählt, da diese gemäß ÖNORM B 8110-2 (2020) für allgemeine Berechnungen für Österreich zu verwenden sind. Zur Ermittlung der mittleren Außentemperatur wurde das Regressionsmodell gemäß ÖNORM B 8110-5 verwendet. Die raumseitige Lufttemperatur (θ_i) wird mit 20°C gemäß ÖNORM B 8110-2 (2003) definiert. Für die Wärmeübergangswiderstände R_{si} wurde 0,25 [m²K/W] gewählt und für R_{se} 0,04 [m²K/W] lt. ÖNORM B 8110-2. [14, 16]

Bei der Berechnung des Kondensats im Bauteilinneren mit HTflux wurde das Blockklima gemäß DIN 4108-3 verwendet. [17]

Für die instationäre Simulation wurde Graz als Standort gewählt, da ähnliche Randbedingungen herrschen und Klagenfurt als Standort für die Software nicht zur Verfügung steht. Das Innenklima wurde nach ÖNORM EN 15026

festgelegt und die relative Feuchte als „Feuchtelast gering“ nach WTA 6-2 definiert. [15]

Nachweise

Für die stationären Betrachtungen können Oberflächenkondensat und Schimmel durch die Berechnung der Temperaturfaktoren f_{Rsi} laut ÖNORM EN ISO 13788 ermittelt werden. Hierbei wird die Differenz zwischen der inneren Oberflächentemperatur Θ_{si} und der Außentemperatur Θ_e im Verhältnis zur Differenz zwischen der operativen Innentemperatur Θ_i und Θ_e berechnet, wobei die Klimarandbedingungen nach ÖNORM B 8110-5 anzupassen sind. [12, 16]

Die Bildung von Kondensat im Bauteilinneren lässt sich mit ÖNORM B 8110-2, ÖNORM EN ISO 13788 und DIN 4108-3 durch jährliche Simulationszyklen oder einer vereinfachten Blockklima-Berechnung überprüfen. Dabei wird die Kondensation in den kalten Monaten der Austrocknung in den warmen Monaten gegenübergestellt. [17]

Bei instationären Simulationen gilt der Zustand als eingeschwungen, wenn sich der Feuchtigkeitsgehalt bezogen auf das Vorjahr um weniger als 1 % ändert. Des Weiteren darf die Feuchtigkeit weder Schimmel fördern noch darf es an der Außenseite zu Frostschäden kommen. Der mittlere Wärmestrom im Winter (November bis April) darf sich, gemäß ÖNORM B 8110-2, nicht mehr als 10 % erhöhen. An dieser Stelle wird angemerkt, dass weder die Zeitdauer des „Winters“ noch der Ausgangswert, welcher für den Wärmestrom heranzuziehen ist, spezifiziert wird. [14, 12]

Resultate

Bei keiner der vier Berechnungs- bzw. Simulationen bildet sich Kondensat oder Schimmel an der Bauteilinnenoberfläche.

Die Simulationen zeigen jedoch, dass bei der eindimensionalen stationären und zweidimensionalen stationären Simulation Kondensatbildung im Inneren des Bauteils auftritt, das bei der eindimensionalen Betrachtung auch nicht über eine Austrocknungsperiode restlos austrocknen kann. Das Kondensat fällt bei beiden stationären Berechnungsvarianten an der Außenseite des Hochlochziegels beim Übergang zur Abdichtung des Sockelbereiches an. Mit der Software GEQ wurde am Jahresende ein Restkondensat von 240,0 g/m² berechnet, somit ist der Nachweis gemäß ÖNORM B 8110-2 (2003) nicht erfüllt. [11]

Bei der zweidimensionalen stationären Simulation wurde die Kondensatmenge, in Anlehnung an die DIN 4108-3, mittels Blockklima berechnet. [17]

In Abbildung 4 ist die relative Feuchte im Bauteil im kritischen Monat Jänner dargestellt. Es ist ersichtlich, dass das eine Kondensatmenge von 0,818 g/d an der Innenseite der Abdichtung anfällt. Auf ein Flächenmaß umgerechnet und auf die Kondensationsperiode aufsummiert, bilden sich 309 g/m² Kondensat im Bauteilinneren. Während der Verdunstungsperiode können 566 g/m² austrocknen, somit verbleibt kein Kondensat in der Konstruktion. Eine weitere Anforderung ist, dass die flächenbezogene Tauwassermenge 500 g/m² nicht überschreitet. [17]

Diese Menge wird nicht erreicht, somit sind alle Anforderungen erfüllt und die Konstruktion ist diffusionstechnisch zulässig.

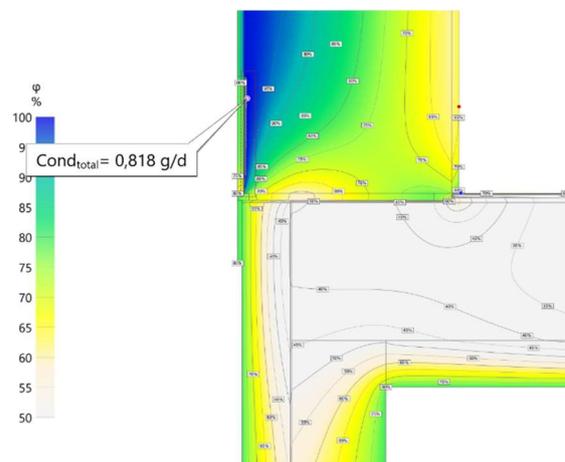


Abbildung 4: HTflux: relative Feuchteverteilung im Bauteil im kritischen Monat Jänner

Bei der eindimensionalen instationären Simulation zeigt sich, dass der Feuchtigkeitsgehalt im Ziegel über das gesamte Bauteil nach 654 Tagen ein eingeschwungener Zustand in allen Bauteilschichten einstellt und bei der 2D-Simulation nach 1122 Tagen. (siehe Abbildung 5, grüner Pfeil). Der unregelmäßige Verlauf resultiert aus den starken Feuchtigkeitsschwankungen aufgrund von Regenereignissen an der Außenseite. Da der Ziegel im Sockelbereich von einer Abdichtungsebene (MB 2K) abgekoppelt wird, sind die Schwankungen durch Regenereignisse weniger ausgeprägt und die Maxima und Minima der Graphen im Sockelbereich sind näher beieinander.

Bei der 2D-Simulation sinkt der Wassergehalt nach der anfänglichen Baufeuchte mit 1,7 Masseprozent auf circa 1,0 Masseprozent, bei der 1D-Simulation steigt das Niveau leicht auf

circa 2,0 Masseprozent. Durch die 2D Geometrie entsteht mehr Austrocknungspotential und somit ist der Feuchtegehalt in 2D niedriger, jedoch bei beiden Simulationen unkritisch.

Die absolute Veränderung der Feuchte ist bei der 2D-Simulation höher, deshalb dauert es länger, bis sich ein eingeschwungener Zustand einstellt, wie in Abbildung 5 ersichtlich ist.

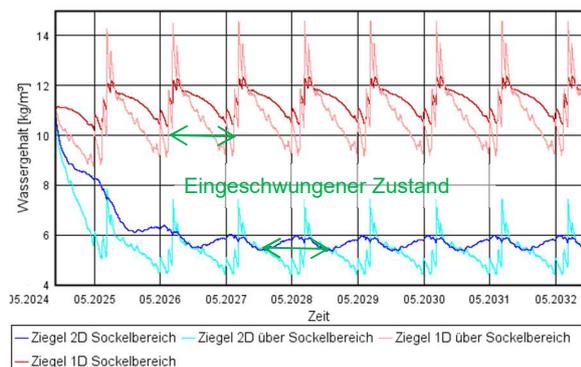


Abbildung 5: Wassergehalt im Ziegel: 1D und 2D

Bei der Berechnung, ob sich der Wärmestrom um 10 % erhöht, wurde für die drei relevanten Schichten (Außen- und Innenputz und Ziegel), die Wärmeleitfähigkeit λ in Abhängigkeit des Wassergehalts und in Abhängigkeit der Temperatur ermittelt. Ab dem Zeitpunkt, an dem ein eingeschwungener Zustand vorliegt, wurden über eine Winterperiode, für jede Schicht, 2 Extremwerte für die abhängige Wärmeleitfähigkeit λ berechnet.

Wie in Abbildung 6 ersichtlich, erhält man die zugehörigen λ -Werte, wenn man den Wassergehalt mit der zugehörigen feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit schneidet. Die strichlierten Linien entspricht den Werten aus der 1D-Wufi Simulation und die durchgezogenen aus der 2D-Wufi Simulation.

Die Unterschiede zwischen 1D und 2D entstehen durch die geometrische Berücksichtigung des diffusionsoffenen Wandbereichs (ab 30 cm über GOK) oberhalb des Sockels.

Wie aus Abbildung 5 zu erwarten ist, sind die Abstände zwischen Minima und Maxima bei der 1D-Simulation größer und die generelle Feuchtigkeit ist ebenso höher. Am wenigsten Unterschied zeigt sich beim Innenputz, da dieser durch das „relativ“ konstante Innenklima bei beiden Simulationen ähnlich ist.

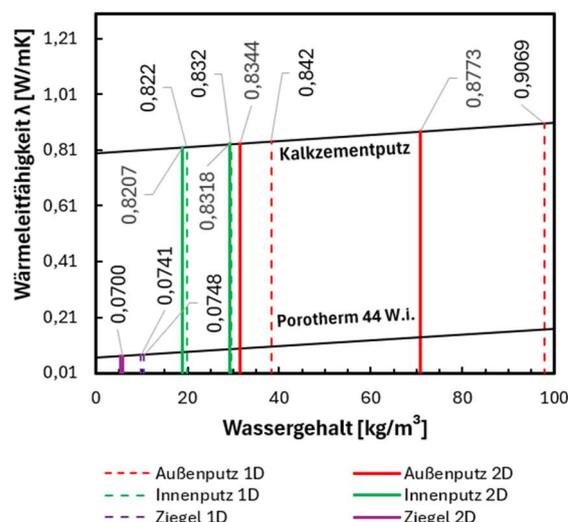


Abbildung 6: Wärmeleitfähigkeit der Schichten in Abhängigkeit der Feuchtigkeit

Analog dazu kann die Wärmeleitfähigkeit λ in Abhängigkeit der Temperatur ausgelesen werden, wie in Abbildung 7 für den Kalkzementputz und Abbildung 8 für die Ziegelschicht dargestellt ist.

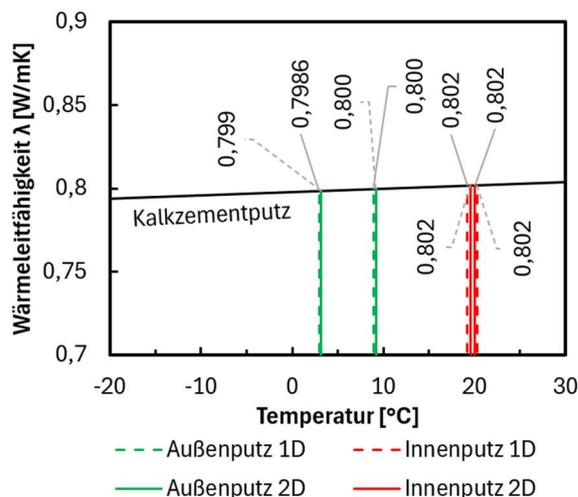


Abbildung 7: Wärmeleitfähigkeit des Kalkzementputzes in Abhängigkeit der Temperatur

Die Temperatur hat auf λ weniger Einfluss als die Feuchtigkeit. Bei den 3 Schichten resultieren der überwiegende Teil der Veränderung der Wärmeleitfähigkeit λ aus der Veränderung des Wassergehalts in den Schichten.

Um $\lambda_{\text{effektiv}}$ zu berechnen, wird die Differenz der berechneten abhängigen λ -Werte zum Ausgangswert addiert. Dabei wird ein vereinfachter Zusammenhang gewählt, da die

wechselseitige Abhängigkeit der Parameter nicht berücksichtigt wird.

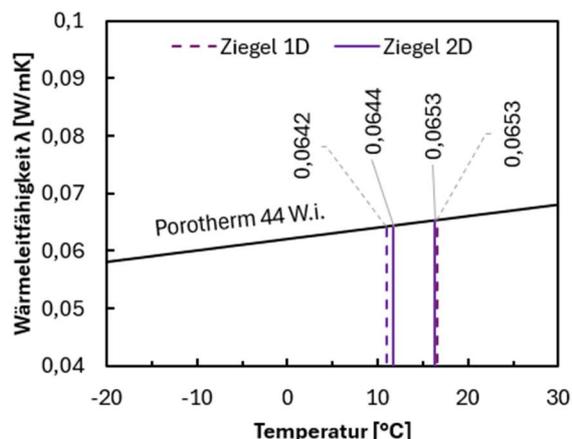


Abbildung 8: Wärmeleitfähigkeit des Porotherm 44 W.i. in Abhängigkeit der Temperatur

Aus den berechneten leffektiv-Werten, können die für den Nachweis erforderlichen U-Werte berechnet werden. Der maximale Wärmestrom bei der 1D-Simulation ist circa 2,2 % höher als der minimale und 1,1% höher als der mittlere Wärmestrom, sowie in Tabelle 3 ersichtlich. Bei der 2D-Simulation weicht der maximale um 0,8 % zum mittleren Wärmestrom ab. Somit verändert sich der Wärmestrom im Winter um weniger als 10% und der Nachweis ist erfüllt.

Wärmestrom:		Wärmedurchgangskoeffizient [W/m ² K]	Veränderung des Wärmestroms [%]
1D	maximal	0,1720	1,1%
	mittlerer	0,1702	-
	minimal	0,1683	1,1%
2D	maximal	0,1611	0,8%
	mittlerer	0,1597	-
	minimal	0,1584	0,8%

Tabelle 3: Berechnung der Wärmeströme im Winter

Schlussfolgerung

Durch genauere Analysen mittels zweidimensionaler stationärer bzw. instationärer Simulationen wurde gezeigt, dass eine eindimensionale Betrachtung mit stationären Randbedingungen zwar auf der sicheren Seite ist, aber dabei oft zu starke Vereinfachungen angewendet werden. Viele bauphysikalische Aspekte werden außer Acht gelassen und hohe Sicherheitsreserven müssen in der Berechnung eingebettet werden. Somit können Bauteile bei hydrothermischen Untersuchungen fälschlicherweise unzulässig sein und kommen nicht zur Ausführung. Ein Problem der instationären Simulationen ergibt sich aus den eingeschränkten Bauteil-Datenbanken. Die manuelle Modifizierung vieler Datensätze birgt Fehlerpotentiale und die Messung der tatsächlich verwendeten Materialien ist notwendig, was

wiederum in der Praxis zu einem Kostenfaktor wird. Die Simulationen ermöglichen eine kostengünstige Ausarbeitung und in weiterer Folge Anwendung der Details für das Ziegelwand Reuse-System.

Literatur

- [1] Ian Hamilton; Oliver Rapf: 2020 Global Status Report for Buildings and Construction.
- [2] Erich Lehner: EY-Studie (2022): Beschäftigung und Fachkräftemangel im österreichischen Mittelstand.
- [3] Hauptverband der allgemein beeideten und gerichtlich zertifizierten Sachverständigen Österreichs, Landesverband Steiermark und Kärnten: Der Nutzungsdauerkatalog: Baulicher Anlagen und Anlageteile.
- [4] OENORM B 3692 (2014): Planung und Ausführung von Bauwerksabdichtungen.
- [5] OENORM EN 13300 (2023): Beschichtungstoffe — Beschichtungstoffe für Wände und Decken im Innenbereich — Einteilung.
- [6] Österreichische Arbeitsgemeinschaft Putz - ÖAP: Verarbeitungsrichtlinien Sockel (2020).
- [7] Severin Kysela: Konstruktion und hydrothermische Untersuchungen zum Bausystem Ziegelwand Reuse.
- [8] Zehentmayer Software GmbH, geq.at [Zugriff am: 29.04.2024].
- [9] Daniel Rüdiger: HTflux (1.1), <https://www.htflux.com/de/> [Zugriff am: 29.04.2024].
- [10] Fraunhofer IPB: Wufi Pro 6.7, wufi.de.
- [11] ÖNORM B 8110-2 (2003): Wärmeschutz im Hochbau Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz.
- [12] ÖNORM EN ISO 13788 (2013): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen — Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren — Berechnungsverfahren.
- [13] OENORM EN 15026 (2023): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- [14] ÖNORM B 8110-2 (2020): Wärmeschutz im Hochbau Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz.
- [15] WTA 6-2 (2014): Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse.
- [16] ÖNORM B 8110-5 (2019): Wärmeschutz im Hochbau Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile.
- [17] DIN 4108-3 (2018): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- [18] WTA Merkblatt 6-5 (2014): Innendämmung nach WTA II.