

ILA Bauen & Wohnen Ökologische Produkte
und Bausysteme Vertriebsges. mbH

Entwicklung und ökologische Bewertung eines für die Passivhaus-Bauweise tauglichen, einschaligen massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 23652 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
Dipl.-Ing. Frank Essmann
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Gänßmantel

Juli 2011

Entwicklung und ökologische Bewertung eines für die Passivhaus-Bauweise tauglichen, einschaligen, massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

DBU-AZ- 23652-23
Zwischenbericht zu Projektphase 2



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Prof. Dr.-Ing. H. Garrecht
Petersenstr. 12
64287 Darmstadt

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Forschungsvorhabens	1
2	Vorgehensweise an der TUD	2
3	Bestimmung der Materialkennwerte des Holzbetons	3
3.1	Trockenrohddichte	3
3.2	Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	4
3.3	Porosität unter Atmosphärendruck	5
3.4	Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient	5
3.5	Wärmeleitfähigkeit.....	7
3.6	Weitere Materialkennwerte	8
4	Untersuchung ökologischer Dämmmaterialien.....	9
5	Entwicklung mineralisch gebundener Dämmungen	19
5.1	Materialauswahl	19
5.2	Beurteilungskriterien zur Eignung der Materialien	23
5.2.1	Verarbeitbarkeit	24
5.2.2	Festigkeit und Verbund.....	26
5.2.3	Wärmeleitfähigkeit	29
5.3	Optimierung der Dämmungen.....	32
6	Bestimmung der Materialkennwerte der Dämmungen	36
6.1	Trockenrohddichte	36
6.2	Wärmeleitfähigkeit.....	37
6.3	Spezifische Wärmekapazität.....	38
6.4	Wasserdampf-Diffusionswiderstand	38
6.5	Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	39
6.6	Sorptionsisotherme	40
6.7	Offene Porosität	43
6.8	Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient	43
7	Simulation des hygrothermischen Bauteilverhaltens.....	45
8	Fazit	52
	Literaturverzeichnis	54

1 Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Weiterentwicklung des bestehenden Wandsystems der Firma ILA Bauen und Wohnen, welches aus massiven Holzbetonsteinen besteht. Das Wandsystem soll dahingehend optimiert werden, dass es in Passivhausbauweisen Anwendung finden kann ohne dabei seinen ökologisch-nachhaltigen Charakter zu verlieren.

Das bestehende, einschalige Wandsystem basiert auf der monolithischen Mauerwerksbauweise, wobei die eingesetzten Holzbetonsteine keine lastabtragende Funktion übernehmen. Die Lastabtragung erfolgt über ein Stahlbeton-Skelett, welches durch in den Eckbereichen angeordnete und mit den Filigrandecken in einem Arbeitsschritt verfüllten Schalungssteinen realisiert wird. Damit besteht das Wandsystem aus zwei verschiedenen Steintypen: massive Holzbetonsteine zur Errichtung der nicht-tragenden Wände und Schalungssteine für Eckbereiche sowie längere Wandbereiche, mit Aussparungen in den Abmessungen der zu betonierenden Stützen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen sowohl die beiden Steintypen hinsichtlich ihrer wärmedämmenden Eigenschaften verbessert werden, als auch das komplette Wandsystem, bestehend aus Holzbetonsteinen, Mörtel- und Putzsystemen dahingehend optimiert werden, dass ein Einsatz zur Errichtung von Passivhäusern möglich wird.

Die Verbesserung der eingesetzten Steintypen beinhaltet den Entwurf einer neuen Steingeometrie, die es ermöglichen soll, die hohen bauphysikalischen Anforderungen zu erfüllen. Dazu werden die zuvor massiven Holzbetonsteine mit einer Hohlraumgeometrie versehen, die zum einen ausreichend Stabilität für die Verarbeitung und die Aufnahme des Eigengewichts der Wand sicherstellt, zum anderen aber eine möglichst effektive Wärmedämmung ermöglicht. Auch die Schalungssteine werden mit einer verbesserten Anordnung der Hohlräume versehen, insbesondere um den negativen Einfluss der Wärmebrückenbildung aufgrund der Betonfüllung sowie der Eckgeometrie auszugleichen. Die Verfüllung der Hohlräume beider Steintypen erfolgt mit ökologischen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, wobei diese die günstigen bauphysikalischen Eigenschaften des Holzbetons möglichst unterstützen sollten.

Auch die weiteren Systemkomponenten, bestehend aus Beton, Mörtel und Putzen, müssen neben einer ökologischen Unbedenklichkeit das Wandbausystem hinsichtlich baustofflicher und bauphysikalischer Sicht unterstützen und werden im Rahmen des Forschungsvorhabens dahingehend optimiert.

In einem abschließenden Feldversuch gilt es, das entwickelte Wandsystem hinsichtlich seiner Realisierbarkeit sowie zur Validierung der im Modell gewonnenen Daten zu untersuchen und zu bewerten. Dazu wird das Modellgebäude einem umfassenden Bauteil- und Bauwerksmonitoring zur Erfassung des wärme- und feuchtetechnischen Bauteilverhaltens der einzelnen Systemkomponenten unterzogen.

2 Vorgehensweise an der TUD

Die einzelnen Arbeitspakete des Forschungsvorhabens wurden in drei Phasen untergliedert, wobei ein Meilenstein am Ende der einzelnen Phasen jeweils verbindliche Kriterien für die Weiterführung des Vorhabens festlegt. Von allen Kooperationspartnern wird nach Abschluss jeder Phase ein Zwischenbericht erstellt.

Ein Hauptaspekt der Phase 2, die Gegenstand dieses Berichts ist, an der TU Darmstadt bestand in der Materialfestlegung, sowohl hinsichtlich des Holzbetonmaterials für die Steine als auch bezüglich des Dämmmaterials als Füllung für die Hohlräume.

Obwohl die wichtigsten bauphysikalischen Kennwerte des Holzbetons, welche im Zusammenhang der Bewertung der Erreichbarkeit des Passivhausstandards erforderlich waren, bereits im Zwischenbericht zu Phase 1 vom 10.07.2009 festgestellt worden sind, wurde das Material erneut in den Optimierungsprozess mit einbezogen. Hintergrund dieser Überlegung war insbesondere die Tatsache, dass neben der Dämmung auch der Holzbeton einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den U-Wert des Wandsystems hat. Das gilt insbesondere in Anbetracht der Tatsache, dass die Stege im Wandsystem aus Holzbeton bestehen und diese Stege immer eine materialbedingte Wärmebrücke darstellen, deren Einfluss sich entsprechend durch eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit des Materials verringern lässt.

Neben der geometrischen Anordnung der Hohlräume und der Beschaffenheit der Holzbetonchalungssteine fällt insbesondere der Wahl des Dämmmaterials eine Schlüsselrolle hinsichtlich der Erreichung des angestrebten U-Werts für das Wandsystem zu. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden insgesamt 17 handelsübliche Dämmstoffe auf ihre Verwendbarkeit als Füllmaterial der Holzbetonsteine untersucht. Ein Hauptkriterium war neben Verfügbarkeit, Wärmeleitfähigkeit und Verarbeitbarkeit vor allem die ökologische Unbedenklichkeit, da sich nur in diesem Fall alle Einzelkomponenten zu einem umweltfreundlichen und nachhaltigen Gesamtsystem zusammenfügen.

Als Alternative zu marktüblichen Dämmstoffen wurden an der TUD zwei mineralisch gebundene Dämmsysteme entwickelt, deren Vorteile hauptsächlich darin liegen, dass sich deren Einbringung in den Produktionsprozess der Steinherstellung integrieren und sich somit der Arbeitsschritt der händischen Einbringung des Dämmmaterials einsparen lässt. Zur Charakterisierung der mineralisch gebundenen Dämmsysteme wurden diese einer eingehenden Untersuchung der stofflichen und bauphysikalischen Eigenschaften unterzogen.

Im Zusammenhang mit der Beurteilung des im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelten Wandsystems ist eine detaillierte Einschätzung des Zusammenwirkens aller Einzelkomponenten notwendig. Um die langfristigen Vorgänge innerhalb der Konstruktion und deren Wechselwirkungen mit der Umgebung bewerten zu können, wurden numerische Simulationen zum gekoppelten Wärme- und Feuchteverhalten des Wandsystems mit dem Programm DELPHIN durchgeführt. Die Simulationsergebnisse liefern wichtige Indikationen für die letztendliche Wahl des Dämmmaterials.

3 Bestimmung der Materialkennwerte des Holzbetons

Neben der Steingeometrie und der Wahl des Dämmmaterials war die Eigenschaft des Holzbetons Gegenstand kontinuierlicher Verbesserung. Bezüglich der Holzbetoneigenschaften wurde versucht, eine möglichst geringe Materialrohddichte und damit eine verringerte Wärmeleitfähigkeit zu realisieren, ohne die Steine jedoch hinsichtlich ihrer Transport und Verarbeitungseigenschaften unnötig zu schwächen. Das Holzbetonmaterial (Typ 4) mit einer Rohddichte von 490 kg/m^3 , das zukünftig zur Produktion der Steine eingesetzt werden soll und auch Gegenstand der folgenden Untersuchungen ist, liegt der TUD seit dem 13.07.2010 vor. Das Material weist eine deutlich geringere Rohddichte als das Holzbetonmaterial (Typ 1) auf, welches im Zwischenbericht eingehend untersucht wurde und für das eine durchschnittliche Rohddichte von 705 kg/m^3 festgestellt wurde.

3.1 Trockenrohddichte

Die Trockenrohddichte wurde nach EN 992 [1] an 18 Probekörpern als Verhältnis zwischen der Masse des Holzbetons nach dem Trocknen bis zur Massekonstanz und seinem Volumen bestimmt. Als Probekörper wurden Platten verwendet, welche aus bestehenden Schalungssteinen gesägt wurden.

Tabelle 1: Bestimmung der Trockenrohddichte

Probe	Abmessungen			$V_{\text{HB}} [\text{m}^3]$	$m_{\text{HB}} [\text{g}]$	$\rho [\text{kg/m}^3]$
	l [cm]	b [cm]	h [cm]			
HB _{Typ4,01}	15,83	24,72	3,56	0,001393	755,8	543
HB _{Typ4,02}	15,91	24,73	3,30	0,001298	617,0	475
HB _{Typ4,03}	15,90	23,29	3,71	0,001374	652,4	475
HB _{Typ4,04}	16,20	23,50	3,12	0,001188	630,8	531
HB _{Typ4,05}	16,15	24,70	3,25	0,001296	630,4	486
HB _{Typ4,06}	16,12	24,71	3,87	0,001542	639,0	415
HB _{Typ4,07}	16,10	24,70	3,63	0,001444	752,4	521
HB _{Typ4,08}	16,10	23,21	3,58	0,001338	632,8	473
HB _{Typ4,09}	16,19	23,40	3,31	0,001254	579,0	462
HB _{Typ4,10}	16,10	23,31	3,30	0,001238	565,6	457
HB _{Typ4,11}	15,91	23,49	3,63	0,001357	696,4	513
HB _{Typ4,12}	16,08	24,71	3,60	0,001430	749,4	524
HB _{Typ4,13}	15,90	24,70	3,50	0,001375	740,6	539
HB _{Typ4,14}	16,10	24,72	3,60	0,001433	768,8	537
HB _{Typ4,15}	15,87	24,70	3,80	0,001490	604,0	405
HB _{Typ4,16}	16,12	24,70	3,91	0,001557	625,6	402
HB _{Typ4,17}	16,08	23,54	3,18	0,001204	654,8	544
HB _{Typ4,18}	16,71	23,61	3,73	0,001472	677,4	460
						487

V_{HB} Volumen des Probekörpers

m_{HB} Masse des Probekörpers

ρ Trockenrohddichte

$$\rho = \frac{m_{HB}}{V_{HB}}$$

Formel 1: Trockenrohddichte

Die Versuche ergaben eine mittlere Trockenrohddichte von $\rho = 487 \text{ kg/m}^3$, wobei eine relativ hohe Schwankungsbreite der Ergebnisse aufgrund der Inhomogenität des Materials auffällig ist.

3.2 Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Die Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck wurde in Anlehnung an DIN 52103 [2] durchgeführt. Getestet wurden 5 Probekörper aus Holzbeton jeweils mit ungefähren Abmessungen von 160 x 240 x 35 [mm]. Zum Entlüften der Porenräume wurden die Proben während der Unterwasserlagerung mehrfach gewendet.

Tabelle 2: Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Probe	Abmessungen			m_{tr} [g]	$m_{w,a}$ [g]	W_a [g]	$W_{m,a}$ [%]
	l [cm]	b [cm]	h [cm]				
HB _{Typ4,02}	15,91	24,73	3,30	617,0	980,9	363,9	59,0
HB _{Typ4,03}	15,90	23,29	3,71	652,4	1.041,8	389,4	59,7
HB _{Typ4,04}	16,20	23,50	3,12	630,8	1.005,0	374,2	59,3
HB _{Typ4,05}	16,15	24,70	3,25	630,4	1.048,2	417,8	66,3
HB _{Typ4,17}	16,08	23,54	3,18	654,8	1.045,1	390,3	59,6
							60,8

m_{tr} Trockenmasse der Probe nach Trocknung bis zur Gewichtskonstanz

$m_{w,a}$ Masse der wassergelagerten Probe

W_a Wasseraufnahme der Probe unter Atmosphärendruck

$W_{m,a}$ Massebezogener Wasseraufnahmegrad der Probe

$$W_{m,a} = \frac{W_a}{m_{tr}} \cdot 100$$

Formel 2: Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme des Holzbetons beträgt im Mittel 60,8 Prozent bezogen auf die Ausgangsmasse.

3.3 Porosität unter Atmosphärendruck

Die Bestimmung der Porosität unter Atmosphärendruck fand in Anlehnung an DIN EN 1936 [3] statt. Es wurden 5 bis zur Massekonstanz getrocknete Probekörper aus Holzbeton mit ungefähren Abmessungen von 160 x 240 x 35 [mm] für die Prüfung verwendet.

Tabelle 3: Bestimmung der Porosität unter Atmosphärendruck

Probe	m_{tr} [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	p [%]
HB _{Typ4,02}	617,0	980,9	227,8	48,3
HB _{Typ4,03}	652,4	1.041,8	245,0	48,9
HB _{Typ4,04}	630,8	1.005,0	225,7	48,0
HB _{Typ4,05}	630,4	1.048,2	236,5	51,5
HB _{Typ4,17}	654,8	1.045,1	225,3	47,6
				48,9

m_{tr} Trockenmasse der Probe nach Trocknung bis zur Gewichtskonstanz

m_1 Masse der oberflächenfeuchten Probe

m_2 Masse der Probe unter Wasser

p Porosität

$$p = \frac{m_1 - m_{tr}}{m_1 - m_2} \cdot 100$$

Formel 3: Porosität

Die Porosität unter Atmosphärendruck beträgt für die untersuchten Probekörper im Mittel 48,9 Prozent.

3.4 Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient

Der Transport flüssigen Wassers erfolgt in porösen, benetzbaren Baustoffen in erster Linie durch Kapillarkräfte. Wenn die Baustoffe mit Wasser in Kontakt kommen, zieht der an den Menisken erzeugte Kapillardruck das Wasser in die Poren. Dabei wird mit zunehmender Eindringtiefe der viskose Fließwiderstand des Wassers immer größer. Eine Aufzeichnung der gravimetrisch ermittelten Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Quadratwurzel der Zeit ergibt eine Gerade, deren Steigung dem Wasseraufnahmekoeffizienten entspricht.

$$W = w \cdot \sqrt{t}$$

Formel 4: Flächenbezogene Wasseraufnahme

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten wurde in Anlehnung an DIN 52617 [4] mit insgesamt 5 Probekörpern mit ungefähren Abmessungen von 160 x 240 x 35 [mm] durchgeführt. An den Proben wurde die flächenbezogene Wasseraufnahme beim Benetzen der

Grundfläche aus der zeitabhängigen Massezunahme der Proben und der Größe der Saugfläche ermittelt.

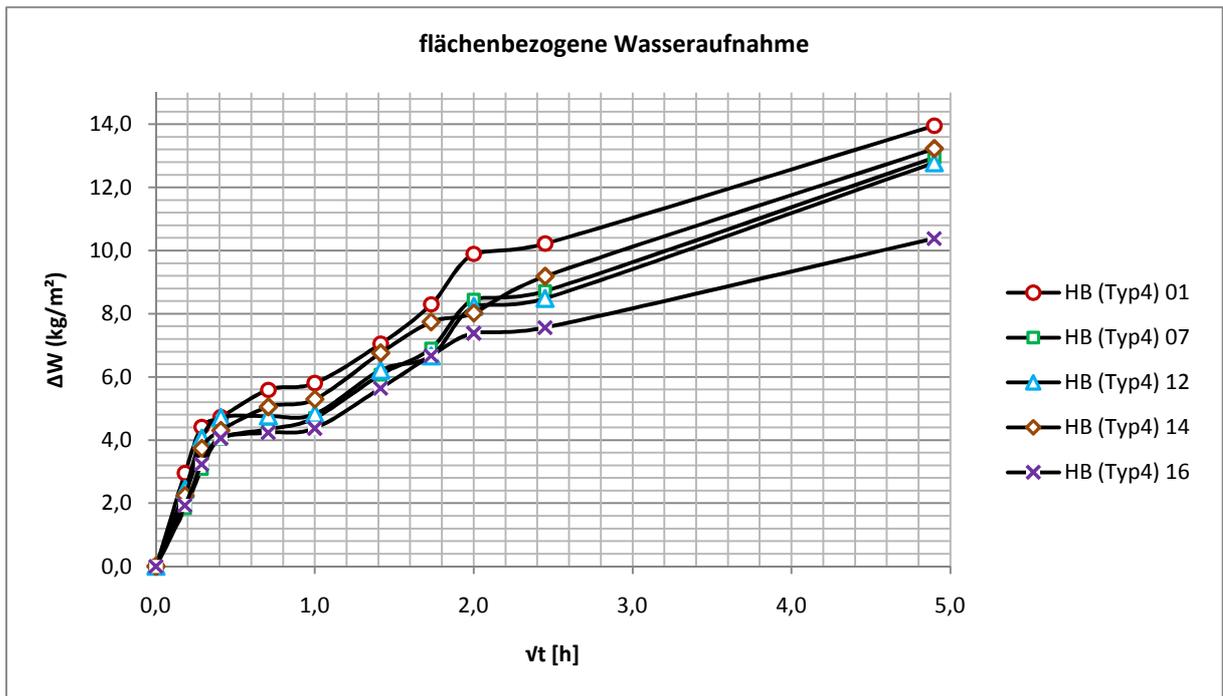


Abbildung 1: Bestimmung der flächenbezogenen Wasseraufnahme

Abbildung 1 zeigt den Verlauf der flächenbezogenen Wasseraufnahme der 5 Einzelproben über die Wurzel der Zeit. Abgesehen vom Anfangsverlauf kann die Abhängigkeit zwischen der flächenbezogenen Wasseraufnahme W und der Quadratwurzel der Zeit t als annähernd linear beschrieben werden. Der Wasseraufnahmekoeffizient ergibt sich somit nach DIN 52617 aus der Steigung der Geraden:

$$w_t = \frac{\Delta W_t}{\Delta \sqrt{t}}$$

Formel 5: Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient

Für die getesteten Holzbetonproben stellen sich die kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten wie folgt dar:

Tabelle 4: Kapillare Wasseraufnahmekoeffizienten der getesteten Proben

Probe	w_t
HB _{Typ4,01}	2,00
HB _{Typ4,07}	2,05
HB _{Typ4,12}	1,91
HB _{Typ4,14}	1,95
HB _{Typ4,16}	1,50
	1,88

Die Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten w wird dazu herangezogen, die Baustoffe entsprechend ihrer kapillaren Saugfähigkeit zu klassifizieren.

Tabelle 5: Klassifizierung nach DIN 4108 [5]

stark saugend	2,0	<	w			$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
wasserhemmend	0,5	<	w	\leq	2,0	$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
wasserabweisend	0,001	<	w	\leq	0,5	$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
wasserdicht			w	\leq	0,001	$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$

Gemäß Tabelle liegt der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient für die untersuchten Holzbetone bei $w = 1,88$ womit das Material gemäß DIN 4108 als wasserhemmend zu charakterisieren ist.

3.5 Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an 3 Probekörpern mit einem Plattengerät gemäß EN 1946-2. Die quadratischen Probekörper mit einer Kantenlänge von 150 mm wurden in Anlehnung an EN 12667 bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und nach dem Abkühlen mit einer dünnen, wasserdampfdichten Hülle ummantelt. Es war der Einsatz von zwei Ausgleichmatten mit einer bekannten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,067 \text{ W/mK}$ und einer Dicke von insgesamt 4 mm erforderlich.

Die λ_{10} Messung erfolgte bei einer Messtemperatur von 10°C und einer Temperaturdifferenz von 15°C. Es ergaben sich folgende Messwerte für die getesteten Holzbetonprobekörper:

Tabelle 6: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Probe	l [mm]	b [mm]	d_{Probe} [mm]	$R_{10,\text{ges}}$ [$\text{m}^2\text{K/W}$]	d_{AM} [mm]	$\lambda_{10,\text{AM}}$ [W/mK]	$\lambda_{10,\text{Probe}}$ [W/mK]
HB _{Typ4,19}	150,0	150,0	33,3	0,3813	4,0	0,067	0,1034
HB _{Typ4,20}	150,0	150,0	32,0	0,3537	4,0	0,067	0,1088
HB _{Typ4,21}	150,0	150,0	31,5	0,3601	4,0	0,067	0,1049

d_{Probe} Dicke der Probe

$R_{10,\text{ges}}$ gemessener Wärmedurchlasswiderstand der Probe

d_{AM} Dicke der Ausgleichmatten

$\lambda_{10,\text{AM}}$ Wärmeleitfähigkeit der Ausgleichmatten

$\lambda_{10,\text{Probe}}$ Wärmeleitfähigkeit der Probe

$$\lambda_{10,Probe} = \frac{d_{Probe}}{R_{10,ges} - \frac{d_{AM}}{\lambda_{10,AM}}}$$

Formel 6: Wärmeleitfähigkeit

Die untersuchten Probekörper wiesen damit im Mittel eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{10} = 0,106 \text{ W/mK}$ auf.

3.6 Weitere Materialkennwerte

Das Holzbetonmaterial (Typ 4) mit einer Rohdichte von 490 kg/m^3 war bis zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts nur in Plattenform in den Abmessungen $160 \times 240 \times 35 \text{ [mm]}$ verfügbar. Aufgrund dieser Probengeometrie ist eine Bestimmung von Druck- und Zugfestigkeiten nicht zielführend, da sowohl die Haufwerksporigkeit aber auch die Inhomogenität des Materials bei einer maximalen Materialstärke von 35 mm zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen führen würde.

Die Untersuchungen zum Sorptions- und Desorptionsverhalten finden derzeit an 100 Probekörpern mit den Abmessungen $55 \times 25 \times 25 \text{ mm}$ statt. Da die Sorptionsprozesse, insbesondere aber die Desorptionsprozesse sehr langsam ablaufen, wird ein Zeitraum von mehreren Monaten bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte veranschlagt. Es wird erwartet, dass die Ergebnisse vom Material Typ 4 nicht wesentlich von den im ersten Zwischenbericht bestimmten Sorptionskennwerten für den Holzbeton Typ 1 abweichen.

4 Untersuchung ökologischer Dämmmaterialien

Eine Möglichkeit der Verfüllung der Hohlräume besteht darin, bestehende Dämmmaterialien (insbesondere Plattendämmstoffe) in die Holzbetonsteine einzubringen. Dazu muss die Dämmung entsprechend der Hohlraumabmessungen zugeschnitten werden und in einem gesonderten Arbeitsgang nach der Steinproduktion manuell in die Steine integriert werden. Sofern das Dämmmaterial komprimierbar ist, ist das Einbringen in die Steine problemlos zu realisieren. Durch die extrem raue Oberfläche der haufwerksporig ausgeführten Holzbetonsteine ist zudem ein guter Verbund von Stein und Dämmmaterial gewährleistet. Ein möglicher Nachteil dieses Systems ergibt sich allerdings für den Fall, in dem keine ganzen Steine verarbeitet werden, sondern das Material auf Maß gesägt werden muss. Aufgrund der unterschiedlichen Struktur von Stein und Dämmmaterial ist kein Zuschnitt in einem Arbeitsgang möglich. Vielmehr muss zunächst die Dämmung aus dem Stein entfernt werden und der Stein entsprechend der Vorgaben gesägt werden. In einem weiteren Arbeitsschritt ist dann das Dämmmaterial zu schneiden und der Zuschnitt wieder im Holzbetonstein einzubringen, wobei sich bei diesem nachträglichen Einbringen aufgrund des geschnittenen Holzbetonsteins kein optimaler Verbund zwischen Stein und Dämmung einstellen wird. Außerdem besitzen manche Dämmstoffe keine oder nur eine eingeschränkte Witterungsbeständigkeit, bei Beregnung besteht die Gefahr einer Verminderung der Dämmwirkung. Dämmstoffe, bei denen keine Belastung auf Druck möglich ist, können beim Aufbringen des Mauermörtel, bzw. Dünnbettklebers, in sich zusammensacken.

Da mit der Verwendung von handelsüblichen Dämmmaterialien, verglichen mit mineralisch gebundenen Dämmstoffen, jedoch der Vorteil einer deutlich verringerten Wärmeleitfähigkeit einhergeht, wurden im Folgenden verschiedene Materialien auf ihre mögliche Verwendung in dem zu entwickelnden Wandsystem untersucht.

Baumwolle

Baumwolle ist ein faserartiges Material, das sehr gute Wärme- und Schallschutzeigenschaften besitzt, jedoch von Natur aus brennbar ist. Um die Eigenschaften bezüglich des Brandschutzes zu verbessern, wird Baumwolle mit einer Borsalzlösung imprägniert. Daneben verleiht Borsalz dem Dämmstoff insekten-, nagetier- und pilzabweisende Eigenschaften. Trockene Baumwolle ist von Natur aus, durch die vorhandene Wachsschicht auf der Faser, resistent gegen Fäulnis und Verrottung. Baumwolle wird in Form von Vliesen hergestellt, die übereinander gelegt und miteinander vernadelt entsprechende Dämmplatten bilden. Baumwolldämmplatten weisen eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$ bei einer Rohdichte zwischen $25 \text{ und } 60 \text{ kg/m}^3$ auf.

Tabelle 7: Bauphysikalische Kennwerte von Baumwolle [6]

Bauphysikalische Kennwerte Baumwolle:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,040
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	840
Rohdichte ρ [kg/m ³]	25 – 60

Aus ökologischer Sicht ist im Allgemeinen lediglich die Gewinnung des Rohstoffes kritisch zu betrachten, beispielsweise durch den Einsatz von Pestiziden oder durch den zusätzlichen Flächenverbrauch für den Anbau von Baumwolle. Wird bei der Herstellung auf problematische Zusatzstoffe verzichtet, sind keinerlei ökotoxologische Risiken zu erwarten. Gebrauchte, saubere Baumwollmatten können erneut verbaut oder dem Herstellungsprozess zugeführt werden.

Flachs

Dämmstoffe aus Flachsfasern werden aus den Kurzfasern der Flachspflanze gewonnen, welche als Nebenprodukt bei der Gewinnung der Langfasern, dem Ausgangsstoff für den Leinen, entstehen. Flachs ist eine robuste Faser, die lokal angebaut werden kann. Wie alle Dämmstoffe pflanzlichen Ursprungs ist die Flachsfaser brennbar. Das Brandverhalten wird durch die Zugabe von Borsalz, Wasserglas oder Ammoniumsulfat verbessert. Darüber hinaus wirken die brandhemmenden Zusatzstoffe Insekten-, Nagetier- und Pilzabweisend. Um die Flachsfaser in Plattenform zu halten wird zwischen dem Einsatz von Kartoffelstärke und Borsalzen, mit denen das Vlies besprüht wird, und der Vernadelung mit Polyesterfasern unterschieden. Die Wärmeleitfähigkeit von plattenförmigen Flachsdämmstoffen liegt zwischen 0,040 und 0,050 W/mK bei einer Rohdichte von 20 bis 50 kg/m³.

Tabelle 8: Bauphysikalische Kennwerte von Flachs [6]

Bauphysikalische Kennwerte Flachs:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,040 – 0,050
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1500
Rohdichte ρ [kg/m ³]	20 – 50

Bei der Herstellung von Flachsdämmstoffen entstehen nur geringe Umweltbelastungen, da bei der Erzeugung dieses Dämmstoffes ein natürliches Nebenprodukt der Leinengewinnung einer sinnvollen Verwendung zukommt. Für gebrauchte, saubere Flachsplatten gibt es die Möglichkeit diese erneut zu verbauen, ebenso ist es möglich sie erneut dem Herstellungsprozess zuzuführen.

Künstliche Mineralfaser - Glaswolle

Glaswolle weist eine faserige Struktur auf und gehört zur Gruppe der Mineralwollendämmstoffe. Das Material besitzt sehr gute Wärmedämmwerte, bei geringer Wärmespeicherfähigkeit. Zudem bietet Glaswolle einen guten Schall- und Brandschutz. Glaswolle kann keine Feuchtigkeit aufnehmen. Der Dämmstoff ist widerstandsfähig gegen Ungeziefer, Schimmel und Fäulnis. Zur Herstellung kommen als Ausgangsstoffe Quarzsand, Sodaasche und kalkhaltige Gesteine zum Einsatz. Zusätzlich wird bis zu 70% Altglas zugefügt. Als weitere Beimengungen können Öle, die den Staubanteil verringern und wasserabweisende Stoffe enthalten sein. Um Formstabilität zu gewährleisten sind Bindemittel (Kunstharze) zugesetzt. Die Rohstoffe werden gemischt, gemeinsam bei 1350°C eingeschmolzen und anschließend zu Fasern geschleudert. Zum Aushärten des Kunstharzes führt man das Rohprodukt einem Tunnelofen zu, in welchen sich auch die flüchtigen Bestandteile wie Formaldehyd und Phenol entfernen. Die Wärmeleitfähigkeit von Glaswolleprodukten liegt zwischen 0,035 und 0,050 W/mK bei Rohdichten von 20 bis 150 kg/m³.

Tabelle 9: Bauphysikalische Kennwerte von Glaswolle [6]

Bauphysikalische Kennwerte Glaswolle:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,035 – 0,050
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	840
Rohdichte ρ [kg/m ³]	20 – 150
Dauerdruckfestigkeit [N/mm ²]	0,005 – 0,014
10 % - Druckfestigkeit [N/mm ²]	0,018 – 0,1
Abreißfestigkeit [N/mm ²]	0,001 – 0,08

Der Energiebedarf für die Herstellung wird durch den Einsatz von Altglas als Recyclingprodukten gesenkt, wobei er im Vergleich zu anderen Dämmmaterialien dennoch sehr energieintensiv ist. Als Ausgleich dazu sind die sehr kurzen Transportwege, Altglas ist überall und in praktisch unbegrenzten Mengen vorhanden, und eine sinnvolle Verwertung von Abfall zu sehen. Gebrauchte Glaswolle voll recyclingfähig, sie kann rückstandslos den Herstellungsprozess zugeführt werden. Um den Einschmelzprozess nicht zu stören, darf sie keinerlei Verschmutzungen aufweisen. Es ist darauf zu achten, dass Glasfasern zum Wohnraum hin einen staubdichten Verschluss erhalten, so ist mit keiner gesundheitlichen Beeinträchtigung während der Nutzung zu rechnen [7].

Gras

Als Rohstoff kommen unterschiedliche Arten von Gras zum Einsatz, welche von extensiv bewirtschafteten Wiesen stammen. Ein spezielles Verfahren erlaubt es, neben der Gewinnung von Dämmmaterial, aus dem Rohstoff Gras gleichzeitig auch Proteine für Viehfutter herzustellen. Hinsichtlich des Brandschutzes lässt sich Grasdämmung als schwerentflammbar einstufen, da Borate

zugesetzt werden, die auch vor Schädlinge und biologischer Zersetzung schützen. Grasdämmplatten erreichen eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$ bei einer Rohdichte zwischen 35 und 65 kg/m^3 .

Tabelle 10: Bauphysikalische Kennwerte von Grasdämmung [8]

Bauphysikalische Kennwerte Gras:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,040
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	2196
Rohdichte ρ [kg/m ³]	35 – 65

Gras als Dämmstoff birgt ein hohes ökologisches Potential. Dies liegt vor allem daran, dass aus diesem Rohstoff parallel zur Dämmstofffertigung, weitere Produkte und Energie gewonnen werden kann. Darüber hinaus ist es möglich, das Rohmaterial lokal zu beziehen, ohne dass es zuvor für den Transport weite Strecken zurücklegen musste. Einzig der Brandschutzzusatz, bestehend aus Borat, ist ökotoxologisch kritisch zu bewerten, wobei dieser geringer als bei vergleichbaren Dämmstoffen ausfällt. Da Gras biologisch abbaubar ist, ist eine Verwertung von Abfällen, bzw. ausgebaute Dämmung, z.B. auch durch Kompostierung, gegeben [9].

Hanffaser

Rohstoff für die Herstellung von Hanfdämmstoffen bilden Fasern, welche aus der Hanfpflanze gewonnen werden. Da das Hauptvorkommen des äußerst beständigen Rohstoffgewächses den gemäßigten Breiten zuzuordnen ist, ist es möglich die Bestandteile des Dämmstoffes (aus Sicht des deutschen Dämmstoffmarktes) sehr lokal zu gewinnen. Hanfdämmung weist einen hohen Wärmeschutz auf, mit brandhemmenden Stoffen behandelt ist auch ein gewisser Brandschutz zu erzielen, der allerdings nicht für erhöhte Brandschutzanforderungen ausreicht. Die Dämmung ist resistent gegen Fäulnis, Schimmelpilzeinwirkung und Befall von Ungeziefer. Zur Herstellung von Dämmstoffmatten oder –platten ist ein Zusatz von textilen Stützfasern erforderlich, um eine Formbeständigkeit zu gewährleisten. Die Wärmeleitfähigkeit von Hanffaserprodukten liegt zwischen $0,040$ und $0,050 \text{ W/mK}$ bei Rohdichten von 20 bis 40 kg/m^3 .

Tabelle 11: Bauphysikalische Kennwerte von Hanffaser [6]

Bauphysikalische Kennwerte Hanffaser:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,040 – 0,050
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1500
Rohdichte ρ [kg/m ³]	20 – 40

Ausschlaggebend zur Beurteilung der Ökologie des Dämmstoffes Hanf ist dessen Rohstoffgewinnung. Dort kann der überwiegende Teil der Belastungen für die Umwelt durch den Einsatz von Dünger und die aufwendige Ernte entstehen. Die Produktion der Dämmelemente verläuft hingegen relativ schadstoffarm. Ausgebautes Material sowie Verschnitt kann problemlos recycelt werden durch erneute Verarbeitung zu Dämmstoffen.

Holzfaser

Die Herstellung von Holzfaserdämmplatten geschieht ohne den Zusatz von Bindemitteln. Im Vergleich zu anderen Dämmstoffen weisen sie eine mittelmäßige bis sehr gute Dämmung und die höchste Wärmespeicherkapazität auf. Holzfaserplatten sind diffusionsoffen und dabei gleichzeitig winddicht, daneben wirken sie feuchtigkeitsregulierend. Für Konstruktionen mit erhöhtem Brandschutz sind Holzfaserdämmplatten ungeeignet, da ihnen keine brandhemmende Mittel zugesetzt werden. Holzfaserplatten werden fast ausschließlich aus Restholz, das als Nebenprodukt aus Sägewerksbetrieben oder bei Durchforstungsarbeiten anfällt, hergestellt. Als Hackschnitzel wird das Holz mit Wasser vermischt, thermisch-mechanisch zersetzert und anschließend nachgemahlen. Nach der eventuellen Beimengung von Zusatzstoffen, wird die Rohmasse unter Druck und bei Temperaturen von zirka 380 °C gepresst. Die Bindung der Dämmplatten entsteht dank Verfilzung und Verklebung der Fasern durch holzeigene Inhaltsstoffe. Klebstoffe kommen somit nicht zum Einsatz. Bei Rohdichten zwischen 30 und 250 kg/m³ weisen Holzfaserplatten Wärmeleitfähigkeiten von 0,040 bis 0,060 W/mK auf.

Tabelle 12: Bauphysikalische Kennwerte von Holzfaser [6]

Bauphysikalische Kennwerte Holzfaser:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,040 – 0,060
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	5/10
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1600 – 2100
Rohdichte ρ [kg/m ³]	30 – 250
10 % - Druckfestigkeit [N/mm ²]	0,069

Naturbelassene Holzfaserplatten zählen zu den ökologisch wertvollsten Dämmmaterialien, von ihnen geht zu keiner Zeit eine ökotoxische Wirkung aus. Sie sind komplett kompostierbar oder lassen sich alternativ der Wiederverwertung zuführen.

Kokosfaser

Die Kokosfaser ist eine kurze und sehr robuste Faser, die aus der faserigen Hülle der Kokosnuss gewonnen wird. Um die Brennbarkeit herabzusetzen werden Imprägnierungen mit Borsalz, Wasserglas oder Ammoniumsulfat durchgeführt. Die Kokosfaser ist eine der resistentesten Naturfasern. Der hohe Anteil an natürlichen Gerbstoffen wirkt insektenabweisend und fäulnishemmend. Unterstützt werden diese Eigenschaften durch die Zugabe von brandhemmenden Imprägnierungen. Kokosfaser ist ein Nebenprodukt, welches bei der Ernte und Gewinnung von Kokosmark anfällt. Die Nüsse werden in der Regel in Handarbeit von ihrer faserigen Hülle befreit, welche dann in einer flachen Meeresbucht oder in einem Sumpfbecken 6 – 12 Monate zwischenlagern. Dieser Vorgang, Rösten genannt, führt zur Verrottung aller fäulnisanfälligen Stoffe der Faser. Anschließend ist es notwendig, die angerotteten Substanzen von der eigentlichen Faser mechanisch zu trennen. Nach Wasch-, Trocknungs- und Auflockerungsvorgängen ist eine Verarbeitung zu Platten und Filzen möglich. Dazu werden die Fasern vernadelt, gepresst und bei Bedarf mit strukturstützenden Stoffen behandelt. Die Wärmeleitfähigkeit von Kokosfasern liegt zwischen 0,045 und 0,050 W/mK bei Rohdichten von 70 bis 110 kg/m³.

Tabelle 13: Bauphysikalische Kennwerte von Kokosfaser [6]

Bauphysikalische Kennwerte Kokosfaser:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,045 – 0,050
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1500
Rohdichte ρ [kg/m ³]	70 – 110
Dauerdruckfestigkeit [N/mm ²]	0,001

Hinsichtlich ökologischer Aspekte kann die bessere Ausnutzung des Rohstoffes Kokosnuss als Vorteil genannt werden. Nachteilig wirken sich die langen Transportwege des Rohstoffes sowie die hohe Arbeitsintensität zur Fasergewinnung aus. Saubere und intakte Kokosprodukte können erneut verbaut werden. Des Weiteren sind Dämmmaterialien aus reiner Kokosfaser als Kompostauflockerungsmaterial einsetzbar.

Kork

Zur Herstellung von Dämmstoffen aus Kork dient die Rinde der Korkeiche, deren Vorkommen zum größten Teil auf den Mittelmeerraum entfällt, wobei Portugal 50% des Produktionsanteils stellt. Kork als Dämmstoff besitzt eine hohe Rohdichte bei gleichzeitig poröser Struktur, die diesem Baustoff neben relativ guten Schall- und Wärmedämmeigenschaften, ein erhöhtes Maß an Wärmespeichervermögen verleiht. Kork ist ein sehr beständiger Baustoff. Naturgemäß im Kork gebundene Bestandteile (Phlobaphene) bewirken einen wirksamen Verrottungsschutz, weshalb für die

Zugabe von fäulnishemmenden Substanzen keine Notwendigkeit besteht. Kork als nachwachsender Rohstoff kann durch schonendes Abtrennen vom Baum so geerntet werden, dass die bis zu 250 Jahre alten Bäume die Ernte schadlos überstehen. Die von Hand geschälte Rinde ist anschließend in einer Mühle zu zerschroten und durch Siebvorgänge von Holzanteilen zu reinigen. Das so gewonnene Korkschrot erfährt in einem Druckkessel bei einer Temperatur von 370°C eine Expansion von bis zu 30% ihres ursprünglichen Volumens. Dieser Kochvorgang setzt Harzanteile frei, die nach dem kontrollierten Abkühlen des Korksutes als natürliches Bindemittel wirken und Korkblöcke erzeugen. Die Wärmeleitfähigkeit von Kork liegt zwischen 0,040 und 0,055 W/mK bei Rohdichten von 65 bis 160 kg/m³.

Tabelle 14: Bauphysikalische Kennwerte von Kork [6]

Bauphysikalische Kennwerte Kork:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,040 – 0,055
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	2/8 – 5/10
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1600 – 1800
Rohdichte ρ [kg/m ³]	65 – 160
10 % - Druckfestigkeit [N/mm ²]	0,10 – 0,20

Da es sich bei Kork um einen nachwachsenden Rohstoff handelt und zum Teil Recyclingprodukte verwendet werden (Flaschenkork), besitzt er ein hohes ökologisches Potential. Bei der Fertigung von Dämmplatten geht der größte Teil der Umweltbelastung von der Bereitstellung der Herstellenergie aus. Die größte ökotoxische Belastung erzeugt jedoch der Transport aus den Rohstoffländern zum Einsatzort dieses Produktes. Da ein zerstörungsfreier Rückbau schwer zu realisieren ist, können ausgebaute Korkdämmplatten nicht erneut Einsatz finden. Allerdings lassen sie sich zu Granulat weiterverarbeiten und so wiederum als Dämmbaustoff verwenden.

Schafwolle

Dämmstoff aus Schafwolle ist ein sehr weicher und formbarer, in seiner Struktur faseriger Baustoff, der als Vlies oder Stopfwolle erhältlich ist. Schafwolle zeigt, neben guten Wärmedämmeigenschaften, ein stark hygroskopisches Verhalten und kann bis zu einem Drittel des Eigengewichts an Feuchtigkeit aufnehmen und wieder abgeben, ohne dabei die Eigenschaften als Wärmedämmer zu verlieren. Eine Tatsache, die sich vorteilhaft auf das Raumklima auswirken kann. Schafwolle ist ein begehrter Nährstoff für Motten und andere keratinverdauende Insektenlarven. Dem wird entgegengewirkt durch die Zugabe von Mitin, welches allerdings als gesundheitsschädlich eingestuft ist. Aus diesem Grund erzeugen manche Hersteller einen ausreichenden Insektenschutz durch eine sehr gründliche Spezialimprägnierung mit Borsalz. Schafwolle ist sehr resistent gegenüber Nagetieren. Die gereinigte Schafwolle wird zu feinen Vliesen verarbeitet, aus welchen sich durch Überlagerung und

Vernadelung Dämmstoffmatten erzeugen lassen. Bei Rohdichten zwischen 20 und 80 kg/m³ weist Schafwolle Wärmeleitfähigkeiten von 0,040 bis 0,045 W/mK auf.

Tabelle 15: Bauphysikalische Kennwerte von Schafwolle [6]

Bauphysikalische Kennwerte Schafwolle:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,040 – 0,045
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1000
Rohdichte ρ [kg/m ³]	20 – 80

Bei Dämmstoffen aus Schafwolle handelt es sich zum einen um einen natürlichen und nachwachsenden Rohstoff, zum anderen um die sinnvolle Verwendung eines Abfallproduktes der Fleischproduktion. Die Erzeugung von Dämmstoffen aus dem Rohmaterial benötigt einen vergleichsweise niedrigen Energieeinsatz, darüber hinaus fallen bei der Verwendung entsprechender Zusatzmaterialien keine ökotoxisch bedenklichen Stoffe an.

Schaumglas

Schaumglas ist ein silikatischer Dämmstoff, der durch Zugabe eines Treibmittels das Glas aufschäumen lässt. Das porige Gefüge ist gas-, dampf- und wasserundurchlässig, so wie feuerunempfindlich. Schaumglas vereint als besondere Eigenschaft eine für Dämmstoffe hohe Druckstabilität, mit guten wärmedämmenden Werten. Er ist ein sehr dauerhafter Baustoff, der weder Insekten, Nagetiere oder Pilzkulturen eine Lebensgrundlage bildet. Darüber hinaus ist eine hohe Resistenz gegen chemische Angriffe gegeben. Hauptrohstoffe sind Quarzsand und Feldspat, darüber hinaus stellt Recyclingglas einen Teil der Gesamtmasse der Ausgangsstoffe. Die Herstellung erfolgt zunächst durch das Aufschmelzen der Rohstoffe, die danach zu Glaspulver zermahlen werden. Anschließend ist es notwendig, ein Treibmittel, meist Kohlenstoff, zuzugeben. Dieses setzt bei der Oxidation (Prozesswärme ca. 900°C) Gas frei, welches die Schmelze bis auf das zwanzigfache ihres Ausgangsvolumens aufschäumt. Diese ergibt nach einem kontrollierten Abkühlvorgang das Dämmmaterial Schaumglas. Bei Rohdichten zwischen 105 und 165 kg/m³ weist Schaumglas Wärmeleitfähigkeiten von 0,040 bis 0,055 W/mK auf.

Tabelle 16: Bauphysikalische Kennwerte von Schaumglas [6]

Bauphysikalische Kennwerte Schaumglas:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,040 – 0,055
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	∞
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	840
Rohdichte ρ [kg/m ³]	105 – 165
Dauerdruckfestigkeit [N/mm ²]	0,48
10 % - Druckfestigkeit [N/mm ²]	0,70 – 1,70

Bislang wurde der größte Teil der Rohstoffe dieses Dämmstoffes bergmännisch gewonnen, wobei ein gewisser Anteil (ca. 40 %) an Altglas beigemischt ist. Die Hersteller gehen dazu über, diesen Anteil sukzessive zu erhöhen, was nicht nur die ökologischen Eigenschaften dieses Materials, durch die sinnvolle Weiterverwendung eines Abfallproduktes, verbessert. Auch der Primärenergiebedarf sinkt durch den vergleichsweise niedrigeren Schmelzpunkt von Altglas. Bislang ist ein Recycling dieses Dämmstoffs nicht möglich, da er meist mit Bitumen verarbeitet wird. Dieses erschwert bzw. verhindert eine sortenreine Trennung und dadurch eine Rückgewinnung dieses Materials.

Künstliche Mineralfaser - Steinwolle

Steinwolle zählt zu den Mineralfaserdämmstoffen und besitzt eine faserige Struktur. Sie weist vergleichsweise gute Dämmeigenschaften auf, außerdem ist sie mit einem Schmelzpunkt von über 1.000°C nicht brennbar. Dies erlaubt auch einen Einsatz bei hohen Anforderungen an den Brandschutz. Steinwolle ist form- und alterungsbeständig, resistent gegen Schimmelpilze, Säuren und schwachen Alkalien. Das Grundmaterial für Steinwolle bilden Sediment- oder magmatische Gesteine wie zum Beispiel Diabas, Basalt oder Dolomit, welche im Tagebau gewonnen werden. Zur Herstellung muss man das Gestein in einem Kupolofen bei einer Temperatur von zirka 1500° Celsius einschmelzen. Anschließend fließt die Gesteinsschmelze auf schnell rotierende Scheiben, was eine Zerfaserung zur Folge hat. Dabei werden die Fasern mit Binde- und Imprägniermittel versehen, welche zum einen die Faserstäube binden sollen und zum anderen als Feuchtigkeitsschutz dienen. Die Wärmeleitfähigkeit von Steinwolle liegt zwischen 0,035 und 0,050 W/mK bei Rohdichten von 25 bis 220 kg/m³.

Tabelle 17: Bauphysikalische Kennwerte von Steinwolle [6]

Bauphysikalische Kennwerte Steinwolle:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,035 – 0,050
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	840
Rohdichte ρ [kg/m ³]	25 – 220
Dauerdruckfestigkeit [N/mm ²]	0,005 – 0,014
10 % - Druckfestigkeit [N/mm ²]	0,018 – 0,1
Abreißfestigkeit [N/mm ²]	0,001 – 0,08

Nach der Herstellung von Steinwolle entweichen Phenol und Formaldehyd, im Regelfall aber in unbedenklichen Mengen. Die Rohstoffgewinnung im Tagebau verursacht eine teilweise Zerstörung der Umwelt, außerdem erzeugt der Strombedarf eine relativ hohe Umweltbelastung. Reste bei der Verarbeitung von Steinwolle, bzw. ausgebautes Dämmmaterial lassen sich im sauberen Zustand wiederverwerten, diese können in den Herstellungsprozess problemlos eingegliedert werden.

5 Entwicklung mineralisch gebundener Dämmungen

Die im vorigen Kapitel aufgezeigten Dämmmaterialien weisen fast durchgängig sehr gute Wärmedämmeigenschaften bei unterschiedlicher ökologischer Unbedenklichkeit auf. Allen Materialien ist dabei gemeinsam, dass sie in Platten- oder Mattenform verfügbar sind und vor einer manuellen Einbringung in die Holzbetonsteine einen entsprechenden Zuschnitt erfahren müssten.

Als mögliche Alternative bietet sich die Verwendung von mineralisch gebundenen Dämmstoffen aus ökologischen Rohstoffen an. Dieses Material spiegelt nicht nur sehr gut den Charakter des Holzbetons wieder, sondern ist auch mit zahlreichen produktionstechnischen, bauphysikalischen und verarbeitungstechnischen Vorteilen verbunden.

Die Verfüllung der Hohlräume mit mineralisch gebundenem Dämmmaterial lässt sich sehr gut in den Prozess der Steinherstellung integrieren und entsprechend automatisieren. Ein nachträglicher Arbeitsgang zum Einbringen der Dämmung entfällt damit komplett.

Zur Verarbeitung von Mauersteinen ist ein Sägen einzelner Steine meist unerlässlich. Ein starker innerer Zusammenhalt des Dämmmaterials sowie ein fester Verbund mit der Mauersteininnenseite sorgen dafür, dass sich ebenso wie die Steinlaibungen auch die Dämmung durchtrennen lässt und dabei fest mit dem Stein verbunden bleibt. Bei der Verwendung eines herkömmlichen Plattendämmstoffes wie zum Beispiel künstliche Mineralfasern oder Holzfaser ist dies nicht möglich.

Ein weiterer Vorteil, der mit einer mineralisch gebundenen Dämmung einhergeht, ist die hohe Widerstandsfähigkeit des Materials gegen Witterungseinflüsse und Schädlinge. Im Gegensatz zu konventionellen Plattendämmstoffen müssen dazu keine weiteren Zusätze wie Borate, o.ä. eingesetzt werden.

Nachteilig auswirken wird sich hingegen, bei einer mineralisch gebundenen Dämmung aus ökologischen Rohstoffen, die erhöhte Materialrohddichte aufgrund des zusätzlichen Bindemittelanteils. Diese höhere Materialrohddichte führt zu einem gesteigerten Gesamtgewicht der einzelnen Steine aber auch zu einer größeren Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials.

5.1 Materialauswahl

Als Dämmstoffe für die Dämmfüllung sollten ausschließlich ökologische Materialien zum Einsatz kommen. Zur Eignung als Verfüllmaterial müssen die Materialien notwendigerweise in Kombination mit einem Bindemittel ein anwendbares Produkt ergeben. Faserige Dämmstoffe verlieren im Gegensatz zu Spanmaterial durch die Zugabe von Wasser an innerer Steifigkeit und fallen in sich zusammen, was es erschwert bis unmöglich macht, bei der Herstellung der Dämmfüllung ein haufwerksporiges Gefüge zu erzeugen, welche zur Erzielung guter Wärmedämmeigenschaften als notwendig erachtet wurde. Wichtig ist eine niedrige Wärmeleitfähigkeit des Materials, außerdem sollte das Material möglichst ein regionales Rohstoffvorkommen haben, um lange Transportwege zu

vermeiden. Eine gewisse Druckfestigkeit des Dämmmaterials begünstigt das Auftragen von Mauermörtel bzw. -kleber und verhindert ein Einsinken der Dämmung.

Mögliche Materialien für die mineralisch gebundene Dämmung werden in Folgenden vorgestellt und anschließend bewertet.

Blähglas

Der rein mineralische Rohstoff für die Herstellung von Blähglas besteht aus rezykliertem Altglas. Bei der Produktion von Blähglas werden gleichmäßige und feinporig strukturierte Körner mit weitgehend geschlossener Oberfläche erzeugt. Diese weisen druckfeste und formstabile Eigenschaften auf. Im Falle einer Verwendung als Schüttung sind sie als diffusionsoffen anzusehen. Der mineralische Rohstoff Glas sorgt für eine Beständigkeit gegen Säuren, Laugen und organischen Lösungsmitteln. Blähglas ist nicht brennbar und bis zu einer Temperatur von zirka 700°C formstabil. Der Durchmesser von Blähglas variiert zwischen 0,04mm und 16mm. Mit dem Einsatz hydraulischer Bindemittel wie z.B. Zement lassen sich aus dem Granulat auch Mauersteine oder Wandelemente mit verbesserten Wärmedämmeigenschaften herstellen. Das zur Herstellung benötigte Altglas wird sortiert, gesäubert und zu Glasmehl gemahlen. Dies erhält anschließend eine Zugabe von Blähmittel, Wasser und Bindemittel. Das gebundene Gemisch wird granuliert und getrocknet. Im Anschluss daran wird es einem Drehofen zugeführt, in dem eine Temperatur von 800°C bis 900°C vorherrscht. Dabei bläht sich das Granulat auf und eine Versinterung der Oberfläche entsteht. Nach dem Abkühlen finden eine Separierung nach den verschiedenen Korngrößen sowie eine Verpackung dieser statt. Die Wärmeleitfähigkeit von Blähglas liegt zwischen 0,060 und 0,070 W/mK bei Schüttdichten von 120 bis 390 kg/m³.

Tabelle 18: Bauphysikalische Kennwerte von Blähglas

Bauphysikalische Kennwerte Blähglas:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,060 – 0,070
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	800
Schüttdichte ρ [kg/m ³]	120 - 390
Korndruckfestigkeit [N/mm ²]	0,8 – 2,1

Im Vergleich zu anderen mineralischen Dämmstoffen ist der Verbrauch an Herstellenergie für Blähglas, trotz der hohen Wärmeerzeugung, relativ niedrig. Aufgrund des regionalen Vorkommens von Altglas ist der Energieaufwand für Transport ebenfalls vergleichsweise gering. Darüber hinaus vermindert die Blähglasherstellung das Müllaufkommen, da Altglas recycelt wird.

Blähton

Blähton ist ein aus Tonmineralien bestehendes kugelförmiges Schüttgut. Er besitzt im Vergleich zu anderen Dämmstoffen eine relativ hohe Rohdichte, die sich positiv auf den Schallschutz und die Wärmespeicherefähigkeit auswirkt. Die größere Dichte bedingt allerdings auch eine höhere Wärmeleitfähigkeit, was sich negativ mit Blick auf die Wärmedämmwirkung verhält. Pilzbefall, Verrottung oder Zersetzung durch Chemikalien sind bei seinem Einsatz nicht zu befürchten. Hergestellt wird der Blähton, indem im Übertagebau gewonnener Ton nach einem Aufbereitungsverfahren in einem Drehrohrofen unter Zugabe von Blähmitteln gebrannt wird. Die durch den rotierenden Brennvorgang geformten Kugeln werden nach dem Abkühlen durch Brech- und Siebverfahren in Körnungsgruppen unterteilt und gelagert. Die Wärmeleitfähigkeit von Blähton liegt über 0,080 für Schüttdichten zwischen 300 bis 800 kg/m³.

Tabelle 19: Bauphysikalische Kennwerte von Blähton

Bauphysikalische Kennwerte Blähton:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,080
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	2 – 8
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1100
Schüttdichte ρ [kg/m ³]	300 - 800
Korndruckfestigkeit [N/mm ²]	1,5 – 6,5

Die überwiegenden ökologischen Belastungen dieses Dämmstoffs erzeugt dessen Herstellung, durch den energieintensiven Brennvorgang. Der Einsatz von regenerativen Energiequellen kann hier zu Verbesserungen in Hinblick auf die Ökologie sorgen.

Der Einsatz von Blähton wurde bei der Entwicklung einer mineralisch gebundenen Dämmung nicht weiter verfolgt, da das Material verglichen mit Blähglas deutlich schlechtere Wärmedämmeigenschaften aufweist.

Gras

Für die mineralisch gebundene Dämmung wurde Gras als potentieller Zuschlag eingesetzt. Die Materialkennwerte wurden im vorigen Kapitel beschrieben.

Hanfschäben

Hanfschäben sind sehr grobkörnig konfektioniert, sie enthalten Bestandteile bis zu 5 cm Länge. Die Schäben sind der holzige Bestandteil des Stängels der Hanfpflanze. Hanfschäben fallen als Nebenprodukt bei der Erzeugung von Hanffasern an. In einer mechanischen Faseraufschlussanlage

findet eine Trennung der gerösteten und getrockneten Pflanzenstängel (Stroh) in Fasern und Schäben statt. Die Hanfschäben entstehen indem der verholzte Innenteil des Strohs gebrochen wird. Die Wärmeleitfähigkeit von Hanfschäben liegt zwischen 0,060 und 0,080 W/mK.

Tabelle 20: Bauphysikalische Kennwerte von Hanfschäben

Bauphysikalische Kennwerte Hanfschäben	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,060 – 0,080
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	1 – 2
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1500
Rohdichte ρ [kg/m ³]	1500

Da Hanfschäben als Nebenprodukt des Herstellprozesses von Fasern anfallen, ist der Primärenergieeinsatz vergleichsweise gering. Rund zwei Drittel des Energieeinsatzes entfällt bei der Produktion von Hanfrohstoffen auf den Hanfanbau. Das Material ist nach dem Ausbau problemlos kompostier- als auch recycelbar.

Holzspäne

Prinzipiell können sowohl Holz- und Hobelspäne als Abfallprodukt regionaler Sägereien oder auch die Produkte von Herstellern von Holzschnitzel verwendet werden. Zum Einsatz sind Späne aus Weichhölzern aufgrund der niedrigen Wärmeleiteigenschaften besser geeignet. Holzspäne als Dämmstoff weisen relativ gute Wärmedämmeigenschaften auf, sie sind sorptionsfähig und feuchteausgleichend. Der Ressourcen- und Energieverbrauch ist bei der Erzeugung von Hobel- und Holzspandämmung sehr gering, da dieses Material als Nebenprodukt anfällt. Die Produktion von Holzschnitzeln benötigt eine bestimmte Menge an Energie zu deren Erzeugung. Die Produkte lassen sich ohne weitere Aufbereitung wiederverwenden. Sie können auch problemlos thermisch verwertet oder natürlich kompostiert werden.

Perlite

Perlite ist ein unter thermischen Einfluss aufgeblähtes Vulkangestein, es zählt zur Gruppe der anorganischen Dämmstoffe, genauer zu den mineralischen Schaumdämmstoffen. Das Material ist unverrottbar, schädlings- und chemikalienbeständig. Der Rohstoff Perlitgestein, mit einem Hauptvorkommen in Ungarn und Griechenland, ist ein glasartiges Gestein, aus unterseeischer Vulkanaktivität. Das Rohmaterial wird mechanisch zerkleinert und anschließend auf Temperaturen von mehr als 1000°C erhitzt. Dabei expandiert das im Stein enthaltene Wasser und bläht diesen bis

auf das zwanzigfache seines ursprünglichen Volumens auf. Es entsteht ein weißes Granulat mit Korngrößen von 0 - 6 mm. Je nach Anwendungsfall kann das Granulat eine chemische Nachbehandlung erhalten. Dazu wird es mit Latexemulsion hydrophobiert oder bituminiert, um eine Imprägnierung, des in reinen Zustand feuchtempfindlichen Materials, zu garantieren. Die Wärmeleitfähigkeit von Perlite liegt zwischen 0,045 und 0,080 für Schüttdichten von 60 bis 180 kg/m³.

Tabelle 21: Bauphysikalische Kennwerte von Perlite [6]

Bauphysikalische Kennwerte Perlite:	
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(mK)]	0,045 – 0,080
Wasserdampfdiffusions – Widerstandszahl μ [-]	2 – 5
Spezifische Wärmekapazität c [J/(kgK)]	1000
Schüttdichte ρ [kg/m ³]	60 – 180
Dauerdruckfestigkeit [N/mm ²]	0,40 – 1,00
10 % - Druckfestigkeit [N/mm ²]	0,15 – 0,31

Perlite ist ein umweltfreundlicher Dämmstoff, der in unbehandelter Form vollständig wieder verwendbar ist. Lediglich der hohe Energieaufwand auf Grund langer Transportwege verschlechtert die Ökobilanz dieses Dämmstoffes.

5.2 Beurteilungskriterien zur Eignung der Materialien

Die zuvor ausgewählten Materialien wurden auf ihre Verwendbarkeit in einem mineralisch gebundenen Dämmstoffsystem untersucht. Kriterien für die Eignung eines Materials sind:

- a) Verarbeitbarkeit des Dämmstoff-Bindemittelsystems
- b) Festigkeit des ausgehärteten Materials
- c) Verbund zwischen Dämmstoff und Holzbeton
- d) Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs

Als mineralische Bindemittel wurden Kalk und Zement eingesetzt. Gips wurde aufgrund seiner Wasserlöslichkeit von der Auswahl ausgeschlossen. Die in den folgenden Mischungen eingesetzten Bindemittel lassen sich folgender Tabelle entnehmen:

Tabelle 22: Verwendete Bindemittel

Bindemittel	Hersteller / Produkt
Kalk	BCB Tradical PF 70
Zement	HeidelbergCement CEM I 42,5R

5.2.1 Verarbeitbarkeit

Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit und der Anfangsfestigkeit wurden insgesamt 20 Mischungen hergestellt und in Stahlschalungen mit den Abmessungen 100 x 100 x 100 [mm] eingebracht. Nach 2 Tagen wurden die Probekörper ausgeschalt und für 2 weitere Tage bei konstanten klimatischen Bedingungen von 20°C und 60% RLF eingelagert. Ansch ließend wurden die Probekörper hinsichtlich des inneren Zusammenhalts, des Abbindeverhaltens und der Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Belastung bewertet.

Tabelle 23: Mischungen zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit und der Anfangsfestigkeit

Nr	Bestandteil		Menge [g]			Leicht - zuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis	
	Leichtzuschlag	Binde - mittel	Zusc hlag	Binde mittel	Wasser			
1	Blähglas 0,25/0,5	Kalk	800	400	400	2,00	1,00	
2	Blähglas 0,25/0,5	Zement	800	400	400	2,00	1,00	
3	Blähglas 0,25/0,5	Zement	533	400	267	1,33	0,67	
4	Holz Jeluxyl HW 300/500	Zement	150	400	300	0,31	0,75	
5	Holz Jeluxyl HW 300/500	Zement	150	400	300	0,31	0,75	verdichtet
6	Holz Jeluxyl HW 300/500	Kalk	150	400	300	0,31	0,75	
7	Holz Jeluxyl HW 300/500	Kalk	150	400	300	0,31	0,75	verdichtet
8	Gras Agricell	Zement	100	400	300	0,25	0,75	
9	Gras Agricell	Zement	100	400	300	0,25	0,75	verdichtet
10	Gras Agricell	Kalk	100	400	300	0,25	0,75	
11	Gras Agricell	Kalk	100	400	300	0,25	0,75	verdichtet
12	Hanfshäben	Zement	175	400	300	0,44	0,75	
13	Hanfshäben	Zement	175	400	300	0,44	0,75	verdichtet
14	Hanfshäben	Zement	100	400	300	0,25	0,75	
15	Hanfshäben	Kalk	125	400	300	0,31	0,75	
16	Hanfshäben	Kalk	125	400	300	0,31	0,75	verdichtet
17	Blähglas 2/4	Zement	350	400	300	0,88	0,75	
18	Blähglas 2/4	Kalk	300	400	300	0,75	0,75	
19	Perlite	Zement	175	400	300	0,44	0,75	
20	Perlite	Kalk	175	400	300	0,44	0,75	

Blähglas 0,25 – 0,5 mm

Die Mischungen 1 bis 3 aus Blähglas der Korngröße 0,25 mm bis 0,5 mm ließen sich bei gutem Materialverbund sehr gut verarbeiten. Ein Verdichten war aufgrund der geringen Frischbetonrohichte sowie der weichen Konsistenz nicht möglich. Alle drei Probekörper wiesen einen starken inneren Zusammenhalt auf, sie waren widerstandsfähig gegen mechanische Belastung und zeigten sich druckfest. Zusätzlich hatten alle gemein, dass die Oberfläche relativ leicht absandete.

Blähglas 2 – 4 mm

Die Mischungen 17 und 18 wiesen eine gute Verarbeitbarkeit auf, ließen sich problemlos in die Schalungen einbringen und verdichten. Die Probekörper zeigten einen starken inneren Zusammenhalt, waren sehr widerstandsfähig gegen mechanische Belastung und waren sehr druckfest. Bei beiden kam es jedoch zu einer Entmischung von Zuschlag und Bindemittel, welche auf die unterschiedlichen Dichten der Materialien zurückzuführen ist.

Holzspäne

Die Mischungen 4 bis 7 wurden mit Holzspänen als Leichtzuschlag hergestellt. Die Konsistenz der Mischung war im steifen Bereich, wobei sich das Material gut in die Schalungen einbringen ließ. Ein verdichten durch Rütteln war nicht möglich, jedoch ließ sich das Material durch Stampfen kompaktieren. Die zwei durch Stampfen verdichteten Mischungen wiesen ein sehr dichtes Gefüge und eine sehr starke Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Belastung auf. Die nur durch leichtes Verdichten eingebrachten Mischungen besaßen, wie zu erwarten, ein haufwerksporiges Gefüge mit einem schwächeren inneren Zusammenhalt und weniger Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Belastung. Um einen festeren inneren Zusammenhalt zu erzeugen, ist ein höherer Bindemittelanteil notwendig.

Gras

Für die Mischungen eines Dämmstoffes mit Graszusatz wurden für die Mischung 8 und die Mischung 9 als Bindemittel Zement verwendet, für die Mischung 10 und Mischung 11 Kalk. Die Mischungen wiesen eine sehr steife Konsistenz auf. Das Einbringen in die Probekörper verlief unproblematisch, durch Rütteln war es nicht möglich, die Mischung zu verdichten. Die ausgeschalteten Probekörper, insbesondere Mischung 8 und Mischung 9 (beide mit Zementanteil), waren sehr feucht. Bei Mischung 9 trat bei dem Aufbringen von Druck an der Oberfläche Wasser aus. Zum anderen wiesen die Oberflächen wenig Widerstand gegenüber mechanische Belastung auf und zerfielen bereits bei Berührung. Aufgrund der schlechten Eigenschaften der Probekörper wurde Gras von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Hanfschäben

Die Mischungen 12 bis 16 wurden mit Hanfschäben als Zuschlag hergestellt. Während die Mischungen 12 und 13 eine sehr steife Konsistenz aufwiesen, ließen sich die restlichen Mischungen gut verarbeiten und in die Schalungen einbringen. Der Widerstand gegenüber mechanischer Belastung war bei den ersten beiden Mischungen zu gering, bei den drei folgenden Mischungen mit höherem Bindemittelgehalt ist er jedoch als gut zu bezeichnen.

Perlite

Als Dämmmaterial kamen für die Mischung 19 und Mischung 20 Perlite zum Einsatz, wobei erstgenannte mit Zement und zweitgenannte mit Kalk hergestellt wurde. Der Leichtzuschlag neigte zum Aufschwimmen und es war ein verlängerter Mischvorgang erforderlich, um eine homogene Verteilung der Komponenten sicherzustellen. Zur Herstellung der Probekörper ließen sich die Mischungen ohne Schwierigkeiten in die Schalungen einbringen und es war eine Verdichtung durch Rütteln möglich. Die ausgeschalteten Probekörper zeigten eine sehr dichte und widerstandsfähige Oberfläche. Es entstand ein starker innerer Zusammenhalt mit einer sehr druckfesten Struktur.

Fazit

Zur Erzielung eines haufwerksporigen Gefüges mit ausreichendem innerem Zusammenhalt ist eine leichte Verdichtung der Mischungen erforderlich. Hinsichtlich der Verarbeitbarkeit wiesen die Mischungen mit Kalk als Bindemittel bessere Eigenschaften auf, als die Mischungen mit Zement. Bezüglich der verwendeten Dämmstoffe war festzustellen, dass der Zusatz von Blähglas und Holz die besten Ergebnisse erzielte. Mit beiden ließ sich eine gute Verarbeitbarkeit der Mischung realisieren. Außerdem zeigten die ausgeschalteten Probekörper gute mechanische Eigenschaften.

5.2.2 Festigkeit und Verbund

Zur Beurteilung des Verbunds zwischen Dämmmaterial und Schalungsstein sowie zur Abschätzung der Materialfestigkeit der Dämmungen wurden 10 weitere Mischungen erstellt und in Schalungssteine gefüllt. Als Schalungssteine wurden Leichtbeton-Mauersteine verwendet, welche verglichen mit Holzbetonsteinen eine deutlich glattere Oberflächenausprägung aufweisen. Die auf diese Weise ermittelten Ergebnisse lassen sich damit problemlos auf Holzbetonsteine übertragen.

Tabelle 24: Mischungen zur Untersuchung von Festigkeit und Verbund

Nr.	Bestandteil		Menge [g]			Leicht zuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Leichtzuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
30	Blähglas 0,25/0,5	Kalk	840	400	467	2,10	1,17
31	Blähglas 0,25/0,5	Zement	840	400	600	2,10	1,50
32	Blähglas 2/4	Kalk	400	400	300	1,00	0,75
33	Blähglas 2/4	Zement	400	400	300	1,00	0,75
34	Perlite	Kalk	217	400	500	0,54	1,25
35	Perlite	Zement	217	400	433	0,54	1,08
36	Holz Jeluxyl HW	Kalk	175	400	400	0,44	1,00
37	Holz Jeluxyl HW	Zement	175	400	400	0,44	1,00
38	Hanfshäben	Kalk	125	400	400	0,31	1,00
39	Hanfshäben	Zement	125	400	400	0,31	1,00

Nach leichtem Vornässen der Mauersteine wurden die Mischungen in die Hohlräume eingebracht und 10 Tage bei 20°C und 60% RLF eingelagert, um anschließend gesägt zu werden. Für alle getesteten Proben ließ sich das Sägen problemlos durchführen, ohne dass sich die Dämmung aus dem Schalungsstein ablöste.



Abbildung 2: Mit Dämmung verfüllte Mauersteine



Abbildung 3: Durchtrennte Mauersteine (Dämmmischungen mit Kalk als Bindemittel)



Abbildung 4: Durchtrennte Mauersteine (Dämmmischungen mit Zement als Bindemittel)

Bei der Untersuchung der Verbundwirkung zwischen Dämmung und Schalungsstein wie auch bei der Festigkeitsbeurteilung zeigten Mischungen mit mineralischen Leichtzuschlägen bessere Resultate als Mischungen mit organischem Zusatz.

Tabelle 25: Beurteilung von Verbundverhalten und Festigkeit

	Verbund zwischen Dämmfüllung und Steg	Innerer Zusammenhalt der Dämmfüllung
Mischung 30	++	++
Mischung 31	++	++
Mischung 32	o	++
Mischung 33	+	++
Mischung 34	+	++
Mischung 35	+	++
Mischung 36	+	o
Mischung 37	+	o
Mischung 38	-	-
Mischung 39	-	-

Die Ergebnisse von Blähglas und von Perlite waren als etwa gleichwertig einzustufen, wobei die Mischung mit feinkörnigen Blähglas die insgesamt besten Eigenschaften entwickelte. Die Ergebnisse der organischen Leichtzuschläge präsentierten sich unterschiedlich, Hanf entwickelte deutlich schlechtere Eigenschaften als Holzzuschlag. Bei der Mischung mit einem Zuschlag aus Hanfschäben entstand weder eine gute Klebewirkung noch ein starker innerer Zusammenhalt.

Im Vergleich der Bindemittel erzielten die zementgebundenen Dämmstoffe tendenziell bessere Eigenschaften als die kalkgebundenen Materialien. Sowohl hinsichtlich des Verbundverhaltens zum Schalungsstein als auch bezüglich der Festigkeit war Zement als Bindemittel leicht überlegen.

5.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der mineralisch gebundenen Dämmmaterialien wurden 16 Mischungen erstellt und in Schalungen mit den Abmessungen 150 x 150 x 80 [mm] eingebracht. Die Probekörper wurden nach 2 Tagen ausgeschalt und anschließend bei 20°C und 60% RLF eingelagert. Vor der Prüfung der Wärmeleitfähigkeit wurden die Probekörper bis zur Massekonstanz getrocknet.

Blähglas

Es wurden, hinsichtlich der Korngröße, verschiedene Mischungen mit Blähglas als Leichtzuschlag angefertigt.

Tabelle 26: Blähglasmischungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Nr.	Bestandteil		Menge [g]			Leicht zuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Zuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
21	Blähglas 0,25/0,5	Kalk	880	400	400	2,20	1,00
22	Blähglas 2/4	Kalk	375	400	300	0,94	0,75
23	Blähglas 0,25/0,5		115			0,29	
	Blähglas 1/2		115			0,29	
	Blähglas 2/4	Kalk	400	400	400	1,00	1,00
24	Blähglas 0,25/0,5	Zement	880	400	467	2,20	1,17

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit ergab nachstehende Werte:

Tabelle 27: Wärmeleitfähigkeit der Blähglasmischungen

Nr.	Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte
21	$\lambda = 0,091 \text{ W/mK}$	$\rho = 427 \text{ kg/m}^3$
22	$\lambda = 0,118 \text{ W/mK}$	$\rho = 467 \text{ kg/m}^3$
23	$\lambda = 0,106 \text{ W/mK}$	$\rho = 401 \text{ kg/m}^3$
24	$\lambda = 0,106 \text{ W/mK}$	$\rho = 494 \text{ kg/m}^3$

Mit $\lambda = 0,091 \text{ W/mK}$ und einer Rohdichte von $\rho = 427 \text{ kg/m}^3$ wies die Mischung mit den Zuschlägen aus Blähglas in der Größe 0,25/0,5 die geringste Wärmeleitfähigkeit auf, allerdings verbunden mit dem Nachteil eines starken Absandens der Oberfläche und der Kanten des Probequaders.

Perlite

Hinsichtlich der Mischungen mit Perlite als Leichtzuschlag wurden Bindemittelart und Bindemittelgehalt variiert.

Tabelle 28: Perlitemischungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Nr.	Bestandteil		Menge [g]			Leichtzuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Leichtzuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
25	Perlite	Kalk	217	400	433	0,54	1,08
42	Perlite	Kalk	250	400	500	0,63	1,25
43	Perlite	Zement	217	400	433	0,54	1,08
44	Perlite	Kalk	283	400	533	0,71	1,33

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit ergab nachstehende Werte:

Tabelle 29: Wärmeleitfähigkeit der Perlitemischungen

Nr.	Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte
25	$\lambda = 0,138\text{W/mK}$	$\rho = 537\text{kg/m}^3$
42	$\lambda = 0,103\text{W/mK}$	$\rho = 438\text{kg/m}^3$
43	$\lambda = 0,107\text{ W/mK}$	$\rho = 477\text{kg/m}^3$
44	$\lambda = 0,096\text{ W/mK}$	$\rho = 339\text{kg/m}^3$

Erwartungsgemäß sank mit steigendem Perlite Anteil die Wärmeleitfähigkeit, wobei die Werte der Blähglasmischungen jedoch nicht übertroffen wurden.

Holzspäne

Mit 3 verschiedenen Holzspantypen als Leichtzuschlag wurden 5 Mischungen angefertigt und hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit untersucht.

Tabelle 30: Holzspanmischungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Nr	Bestandteil		Menge [g]			Leichtzuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Leichtzuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
26	Holz Jeluxyl HW 300/500	Kalk	175	400	400	0,44	1,00
27	Holz Jeluxyl HW 300/500		125			0,31	
	Holz Jeluxyl HAHO 1600	Kalk	75	400	400	0,19	1,00
28	Holz Jeluxyl HW 300/500	Zement	175	400	400	0,44	1,00
40	Holz Jeluxyl HAHO 1600	Kalk	300	400	650	0,75	1,63
41	Holz JRS Lignocel FS 14	Kalk	200	400	450	0,50	1,13

Tabelle 31: Wärmeleitfähigkeit der Holzspanmischungen

Nr.	Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte
26	$\lambda = 0,109\text{W/mK}$	$\rho = 433\text{kg/m}^3$
27	$\lambda = 0,082\text{W/mK}$	$\rho = 406\text{kg/m}^3$
28	$\lambda = 0,080\text{W/mK}$	$\rho = 417\text{kg/m}^3$
40	$\lambda = 0,083\text{W/mK}$	$\rho = 554\text{kg/m}^3$
41	$\lambda = 0,137\text{W/mK}$	$\rho = 596\text{kg/m}^3$

Die Mischungen 27, 28 und 40 wiesen verhältnismäßig schlechte Wärmeleitfähigkeiten auf. Da der Probekörper 27 eine sehr geringe Festigkeit aufwies und bei Probe 40 eine starke

Abbindeverzögerung festzustellen war, wurde die Holzspäne des Typs Holz Jeluxyl HW 300/500 aus Mischung 28 als am geeignetsten ausgewählt.

Hanfschäben

Die Mischungen mit Hanfschäben als Zuschlag wurden in Hinblick auf Bindemittelart und Bindemittelgehalt variiert.

Tabelle 32: Hanfmischungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Nr	Bestandteil		Menge [g]			Leichtzuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Leichtzuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
29	Hanfschäben	Kalk	125	400	300	0,31	0,75
45	Hanfschäben	Zement	175	400	500	0,44	1,25
48	Hanfschäben	Kalk	175	400	450	0,44	1,13

Tabelle 33: Wärmeleitfähigkeit der Hanfmischungen

Nr.	Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte
29	$\lambda = 0,125 \text{ W/mK}$	$\rho = 485 \text{ kg/m}^3$
45	$\lambda = 0,129 \text{ W/mK}$	$\rho = 511 \text{ kg/m}^3$
48	$\lambda = 0,091 \text{ W/mK}$	$\rho = 437 \text{ kg/m}^3$

Mischung 48 erziele vergleichbare Ergebnisse zu Mischung 28 mit Holzspänen als Zuschlag, ließ sich jedoch deutlich schlechter verarbeiten und wies geringere Festigkeiten auf.

5.3 Optimierung der Dämmungen

Für weitere Untersuchungen und zur Optimierung der Mischungszusammensetzung wurden ein mineralischer und ein nachwachsender Leichtzuschlag ausgewählt. Die Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit von Blähglas ließ sich durchgängig als gut bezeichnen, so dass dieses Material für weitere Untersuchungen eingesetzt werden sollte. Bei den organischen Zuschlägen wiesen Holzspäne verglichen mit Hanfschäben bei allen drei Kriterien bessere Eigenschaften auf und wurden ebenfalls optimiert. Hinsichtlich der Bindemittel fiel die Entscheidung zugunsten des Kalks, da Kalk sowohl im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit, als auch bezüglich der Wärmedämmeigenschaften tendenziell besser abschnitt als Zement.

Blähglas

Der Leichtzuschlag Blähglas wurde bisher ausschließlich in engen Korngruppen angemischt und getestet. Zusammen mit einem reduzierten Bindemittelgehalt lässt sich auf diese Weise ein haufwerksporiges Gesamtgefüge realisieren, das wiederum aufgrund der porigen Struktur hohe Wärmedämmwerte ermöglicht. Aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit der Blähglaszuschläge wurden die Proben im Folgenden gefügedicht ausgeführt, wobei das gesamte Gefüge mit abgestuften Zuschlagskörnern ausgefüllt sein sollte. Dazu war eine möglichst hohe Packungsdichte des Leichtzuschlags zu erzeugen, wozu eine Sieblinie zur Ermittlung des Betonzuschlags herangezogen wurde. Der geringste Hohlraumgehalt lässt sich mit der Idealsieblinie nach Fuller, oder auch Fuller-Parabel genannt, bewirken. Es ist möglich die Fuller-Parabel mit verschiedenen Exponenten n mathematisch zu beschreiben. Dabei zeigt $n = 0,4$ die größte Packungsdichte. Die Sieblinien nach DIN 1045-2 bauen auf den Überlegungen von Fuller auf. Wobei Sieblinie B8, für Zuschläge bis 8 mm, dem Exponenten $n = 0,35$ der mathematischen Gleichung der Fuller-Parabel gleich kommt und somit das hohlraumärmste Korngemenge der Sieblinien nach DIN ergibt [10]. Im Folgenden kam diese zur Ermittlung der einzelnen Zuschlagsmengen zum Einsatz.

Tabelle 34: Optimierte Blähglasmischungen

Nr.	Bestandteil		Menge [g]			Leichtzuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Leichtzuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
49	Blähglas 0,25/0,5	Kalk	933	400	400	2,33	1,00
50	Blähglas 0,25/0,5	Kalk	880	400	400	2,2	1,00
51	Blähglas 0 /0,25		176			0,44	
	Blähglas 0,25/0,5		190,4			0,48	
	Blähglas 0,5/1		183,6			0,46	
	Blähglas 1/2		138			0,35	
	Blähglas 2/4		129,2			0,32	
	Blähglas 4/8	Kalk	187,2	400	500	0,47	1,25
52	Blähglas 0 /0,25		234,7			0,59	
	Blähglas 0,25/0,5		253,9			0,63	
	Blähglas 0,5/1		244,8			0,61	
	Blähglas 1/2		184			0,46	
	Blähglas 2/4		172,3			0,43	
	Blähglas 4/8	Kalk	249,6	400	533	0,62	1,33

Tabelle 35: Wärmeleitfähigkeit der optimierten Mischungen

Nr.	Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte
49	$\lambda = 0,098\text{W/mK}$	$\rho = 417\text{kg/m}^3$
50	$\lambda = 0,094\text{W/mK}$	$\rho = 404\text{kg/m}^3$
51	$\lambda = 0,112\text{W/mK}$	$\rho = 436\text{kg/m}^3$
52	$\lambda = 0,090\text{W/mK}$	$\rho = 379\text{kg/m}^3$

Aufgrund des höheren Bindemittelanteils fiel das Ergebnis von Probekörper 51 verhältnismäßig schlechter als die Vergleichsgruppen aus. Die Mischungen mit optimierter Packungsdichte (Mischung 51 und 52) neigten nach dem Ausschalen weniger zum Absanden, als die Mischungen mit enger Korngruppe. Die Versuchsergebnisse führten zu der Erkenntnis, dass der Bindemittelgehalt bei Mischungen mit abgestufter Korngrößenverteilung weiter reduziert werden kann.

Tabelle 36: Mischungsrezeptur für Blähglas

Nr.	Bestandteil		Menge [g]			Leichtzuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Leichtzuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
57	Blähglas 0 /0,25		251,4			0,63	
	Blähglas 0,25/0,5		272,6			0,68	
	Blähglas 0,5/1		262,3			0,66	
	Blähglas 1/2		197,1			0,49	
	Blähglas 2/4		184,6			0,46	
	Blähglas 4/8	Kalk	267,4	400	571	0,67	

Holzspäne

Die Mischungen mit Holzspanzuschlag wurden zum einen dahingehend optimiert, dass der Holzanteil weiter erhöht wurde, zum anderen wurde versucht, durch den Einsatz von Holzspänen in unterschiedlichen Partikelgrößen ebenfalls eine Abstufung der Korngrößen zu realisieren.

Tabelle 37: Optimierte Holzspanmischungen

Nr	Bestandteil		Menge [g]			Leicht zuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Leichtzuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
53	Holz Jeluxyl HW 300/500	Kalk	175	400	400	0,44	1,61
54	Holz Jeluxyl HW 300/500	Kalk	200	400	400	0,50	1,00
55	Holz Jeluxyl HW 300/500		100			0,25	
	Holz JRS Lignocel S 8/15	Kalk	100	400	450	0,25	1,13
56	Holz JRS Lignocel FS 14		200			0,50	
	Holz JRS Lignocel S 8/15	Kalk	75	400	450	0,19	1,13

Tabelle 38: Wärmeleitfähigkeit der optimierten Mischungen

Nr.	Wärmeleitfähigkeit	Rohdichte
53	$\lambda = 0,114\text{W/mK}$	$\rho = 489\text{kg/m}^3$
54	$\lambda = 0,078\text{W/mK}$	$\rho = 365\text{kg/m}^3$
55	$\lambda = 0,113\text{W/mK}$	$\rho = 420\text{kg/m}^3$
56	$\lambda = 0,087\text{W/mK}$	$\rho = 371\text{kg/m}^3$

Neben einer guten Verarbeitbarkeit und einer guten Festigkeit wies Mischung 54 auch eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit auf. Die Mischungen mit abgestufter Korngröße wiesen höhere Werte für die Wärmeleitfähigkeit bei zusätzlich schlechten Festigkeitseigenschaften auf und wurden daher verworfen.

Tabelle 39: Mischungsrezeptur für Holzspäne

Nr	Bestandteil		Menge [g]			Leicht zuschlag / Bindemittel - Verhältnis	Wasser / Bindemittel - Verhältnis
	Leichtzuschlag	Bindemittel	Zuschlag	Bindemittel	Wasser		
54	Holz Jeluxyl HW 300/500	Kalk	200	400	400	0,50	1,00

6 Bestimmung der Materialkennwerte der Dämmungen

Im Gegensatz zu konventionellen Plattendämmstoffen sind für die beiden mineralisch gebundenen Dämmungen keine bauphysikalischen Kenngrößen bekannt. Die Werte werden benötigt, um eine Vergleichbarkeit der Dämmmaterialien untereinander herzustellen, dienen als Grundlage der hygrothermische Bauteilsimulation und sind notwendig zur allgemeinen Bewertung der Materialeigenschaften.

6.1 Trockenrohddichte

Die Versuche zur Ermittlung der Trockenrohddichte wurden in Anlehnung an DIN EN 1602 [12] durchgeführt. Es wurden jeweils 5 Probekörper bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend untersucht.

Tabelle 40: Bestimmung der Trockenrohddichte

Probe	Abmessungen			V_{HB} [m ³]	m_{HB} [g]	ρ [kg/m ³]
	l [cm]	b [cm]	h [cm]			
Blähglas 01	10,063	10,010	10,017	0,0010090	430,83	427
Blähglas 02	10,022	10,042	10,002	0,0010066	418,56	416
Blähglas 03	10,003	10,096	9,991	0,0010090	423,34	420
Blähglas 04	10,018	10,103	10,020	0,0010141	432,48	426
Blähglas 05	10,090	10,013	10,004	0,0010107	429,00	424
						423
Holzspan 01	9,938	9,948	9,889	0,0009777	380,37	389
Holzspan 02	9,944	9,911	9,857	0,0009715	405,69	418
Holzspan 03	9,935	9,923	9,864	0,0009724	381,72	393
Holzspan 04	9,938	9,947	9,910	0,0009796	395,68	404
Holzspan 05	9,945	9,926	9,897	0,0009770	407,71	417
						404

V_{HB} Volumen des Probekörpers

m_{HB} Masse des Probekörpers

ρ Trockenrohddichte

$$\rho = \frac{m_{HB}}{V_{HB}}$$

Formel 7: Trockenrohddichte

Mit Trockenrohddichten von 423 kg/m³ für das Dämmmaterial aus Blähglas und 404 kg/m³ für Holzspäne liegen die mineralisch gebundenen Dämmstoffe deutlich über den Werten von herkömmlichen Dämmungen.

6.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgte an jeweils 3 Probekörpern mit einem Plattengerät gemäß EN 1946-2 [13]. Die quadratischen Probekörper mit einer Kantenlänge von 150 mm wurden in Anlehnung an DIN 52612 [14] bei 105°C bis zur Masse Konstanz getrocknet und nach dem Abkühlen mit einer dünnen, wasserdampfdichten Hülle ummantelt. Es war der Einsatz von zwei Ausgleichmatten mit einer bekannten Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,067$ W/mK und einer Dicke von insgesamt 4 mm erforderlich.

Tabelle 41: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Probe	l [mm]	b [mm]	d _{Probe} [mm]	R _{10,ges} [m ² K/W]	d _{AM} [mm]	$\lambda_{10,AM}$ [W/mK]	$\lambda_{10,Probe}$ [W/mK]
Blähglas 06	150	150	82,1	0,8564	4	0,103	0,103
Blähglas 07	150	150	82,0	0,8921	4	0,099	0,099
Blähglas 08	150	150	82,4	0,8477	4	0,105	0,105
							0,102
Holzspan 06	150	150	80,0	1,1057	4		0,076
Holzspan 07	150	150	80,0	1,0773	4	0,067	0,079
Holzspan 08	150	150	80,1	1,1383	4	0,067	0,074
							0,076

d_{Probe} Dicke der Probe

R_{10,ges} gemessener Wärmedurchlasswiderstand der Probe

d_{AM} Dicke der Ausgleichmatten

$\lambda_{10,AM}$ Wärmeleitfähigkeit der Ausgleichmatten

$\lambda_{10,Probe}$ Wärmeleitfähigkeit der Probe

$$\lambda_{10,Probe} = \frac{d_{Probe}}{R_{10,ges} - \frac{d_{AM}}{\lambda_{10,AM}}}$$

Formel 8: Wärmeleitfähigkeit

Konventionelle Plattendämmstoffe weisen eine Wärmeleitfähigkeit auf, die meist zwischen 0,035 W/mK und 0,050 W/mK liegt. Dies wird von keinem der beiden mineralisch gebundenen

Wärmedämmsystemen erreicht, die Werte liegen bei beiden Materialien mit 0,76 W/mK bzw. 0,102 W/mK deutlich höher.

6.3 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifischen Wärmekapazitäten der mineralisch gebundenen Dämmungen wurden rechnerisch ermittelt.

Tabelle 42: Spezifische Wärmekapazität der Blähglasdämmung

Bestandteil	Menge	Menge	Spezifische Wärmekapazität einzelner Bestandteil	Spezifische Wärmekapazität anteilig
	[g]	[%]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]
Blähglas	1435,4	78,21	1000	782
Kalk	400,0	21,79	850	185
				967

Tabelle 43: Spezifische Wärmekapazität der Holzspandämmung

Bestandteil	Menge	Menge	Spezifische Wärmekapazität Einzelner Bestandteil	Spezifische Wärmekapazität anteilig
	[g]	[%]	[J/(kgK)]	[J/(kgK)]
Holz	400,0	66,67	1500	1000
Kalk	200,0	33,33	850	283
				1283

Das Dämmsystem mit Blähglaszuschlag erreicht eine spezifische Wärmekapazität von 967J/kgK, das Dämmsystem mit Holzzuschlag 1283J/kgK.

6.4 Wasserdampf-Diffusionswiderstand

Um die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ zu ermitteln wird laut DIN EN 12086 [15] die Versuchsanordnung zur Messung der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl, oder auch Schälchenmethode genannt, herangezogen. Hierbei ist von dem zu testenden Material eine runde Scheibe mit bekannter Fläche herzustellen. Die Messapparatur ist so gestaltet, dass die Materialprobe an beiden Seiten mit unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten in Berührung kommt. Dazu wird ein mit Salzlösung gefülltes Schälchen durch Auflegen der Materialscheibe verschlossen. In dem Schälchen wird eine bestimmte Luftfeuchtigkeit erzeugt. Diesen Aufbau ist eine zylinderähnliche Haube übergestülpt oder er wird in eine Kammer eingebracht, in welcher die niedrigere Luftfeuchtigkeit

vorherrscht. Durch die über die komplette Versuchsanordnung konstante Temperatur entstehen unterschiedliche Dampfdrücke auf beiden Seiten des Probematerials. Es stellt sich ein Dampfdruckgefälle zur Haube bzw. Kammer hin ein, das den Wasserdampf aus den Schälchen in diese Richtung wandern lässt [11].

Der Versuch wurde an einer runden, 20mm starken Probenscheibe mit einem Durchmesser von 88mm durchgeführt. Der Versuchsaufbau fand in Anlehnung an DIN EN 12086 statt. Als Material für die Schälchen diente Polymethylmethacrylat (Plexiglas®); in diese wurde Kaliumnitrat (KNO_3) eingebracht um auf der einen Seite der Probenscheibe eine relative Luftfeuchte von $93\% \pm 3\%$ zu erzeugen. Die Schälchen erhielten mit der Materialprobe einen Verschluss, der Verbund wurde mit Silikon erzeugt. Die Schälchen mit der eingebauten Materialprobe wurden in eine Klimakammer mit einer relativen Luftfeuchte von $50\% \pm 3\%$ eingebracht. Die Lagerung des Versuchsaufbaus geschah bei zirka $23^\circ C$.



Abbildung 5: Schälchen mit eingebauten Probekörper und Salzlösung

Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 12086. Für das Dämmsystem mit Blähglaszusatz wurde eine Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl von 118 festgestellt, für das Dämmsystem mit Holzzusatz wurde 70 als Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl ermittelt.

6.5 Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Die Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck wurde in Anlehnung an DIN 52103 [2] durchgeführt. Getestet wurden jeweils 4 Probekörper, mit Abmessungen von $100 \times 100 \times 100$ [mm]. Zum Entlüften der Porenräume wurden die Proben während der 28-tägigen Unterwasserlagerung mehrfach gewendet.

Tabelle 44: Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Probe	Abmessungen			m_{tr} [g]	$m_{w,a}$ [g]	W_a [g]	$W_{m,a}$ [%]
	l [cm]	b [cm]	h [cm]				
Blähglas 14	10,02	10,02	10,05	411,24	830,17	418,93	101,9
Blähglas 15	10,03	10,05	10,01	406,06	820,15	414,09	102,0
Blähglas 16	10,06	10,04	10,03	411,47	829,68	418,21	101,6
Blähglas 17	10,11	10,00	10,01	415,05	813,84	398,79	96,1
							100,4
Holz 14	9,93	9,98	9,87	404,66	772,52	367,86	90,9
Holz 15	9,94	9,92	9,94	370,91	711,29	340,38	91,8
Holz 16	9,98	9,94	9,93	401,73	771,94	370,21	92,2
Holz 17	9,92	9,95	9,92	382,65	734,92	352,27	92,1
							91,7

m_{tr} Trockenmasse der Probe nach Trocknung bis zur Gewichtskonstanz

$m_{w,a}$ Masse der wassergelagerten Probe

W_a Wasseraufnahme der Probe unter Atmosphärendruck

$W_{m,a}$ Massebezogener Wasseraufnahmegrad der Probe

$$W_{m,a} = \frac{W_a}{m_{tr}} \cdot 100$$

Formel 2: Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme der Dämmung mit Blähglaszuschlag beträgt im Mittel 100,4 Prozent bezogen auf die Ausgangsmasse, für die Dämmung mit Holzspanzuschlag wurde eine Wasseraufnahme von 91,7 Prozent festgestellt.

6.6 Sorptionsisotherme

Die Untersuchungen zum Sorptionsverhalten fanden in Anlehnung an DIN EN ISO 12571 [16] an Probekörpern mit den Abmessungen 25 x 25 x 10 mm über einen Zeitraum von mehreren Monaten statt. Als Klimakammern wurden dampfdichte Behälter verwendet. In einer, den Bodenbereich der Klimakammer ausfüllenden Schale befand sich eine entsprechende wässrige Lösung gemäß DIN 50008. Die Proben wurden auf einem Edstahlgitter oberhalb der Lösung angeordnet und für eine ausreichende Luftumwälzung wurde mittels langsam drehender, geregelter Ventilatoren gesorgt. Die Klimakammern wurden bei 20°C Umgebungstemperatur aufgestellt und die Schalen darin mit gesättigten Salzlösungen gefüllt, so dass sich Konstantklimare einstellen konnten.

Tabelle 45: Verwendete Lösungen

RLF	Gesättigte Lösung	Chem. Formel
12%	Litiumchlorid	LiCl
22%	Kaliumacetat	KC ₂ H ₃ O ₂
43%	Kaliumcarbonat	K ₂ CO ₃
53%	Magnesiumnitrat	Mg(NO ₃) ₂
65%	Natriumnitrit	NaNO ₂
75%	Natriumchlorid	NaCl
85%	Kaliumchlorid	KCl
99%	Destilliertes Wasser	H ₂ O

Aus den gemittelten massebezogenen Feuchtegehalten der Probekörper nach Erreichen der Massekonstanz wurde in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte die Sorptionsisotherme gebildet.

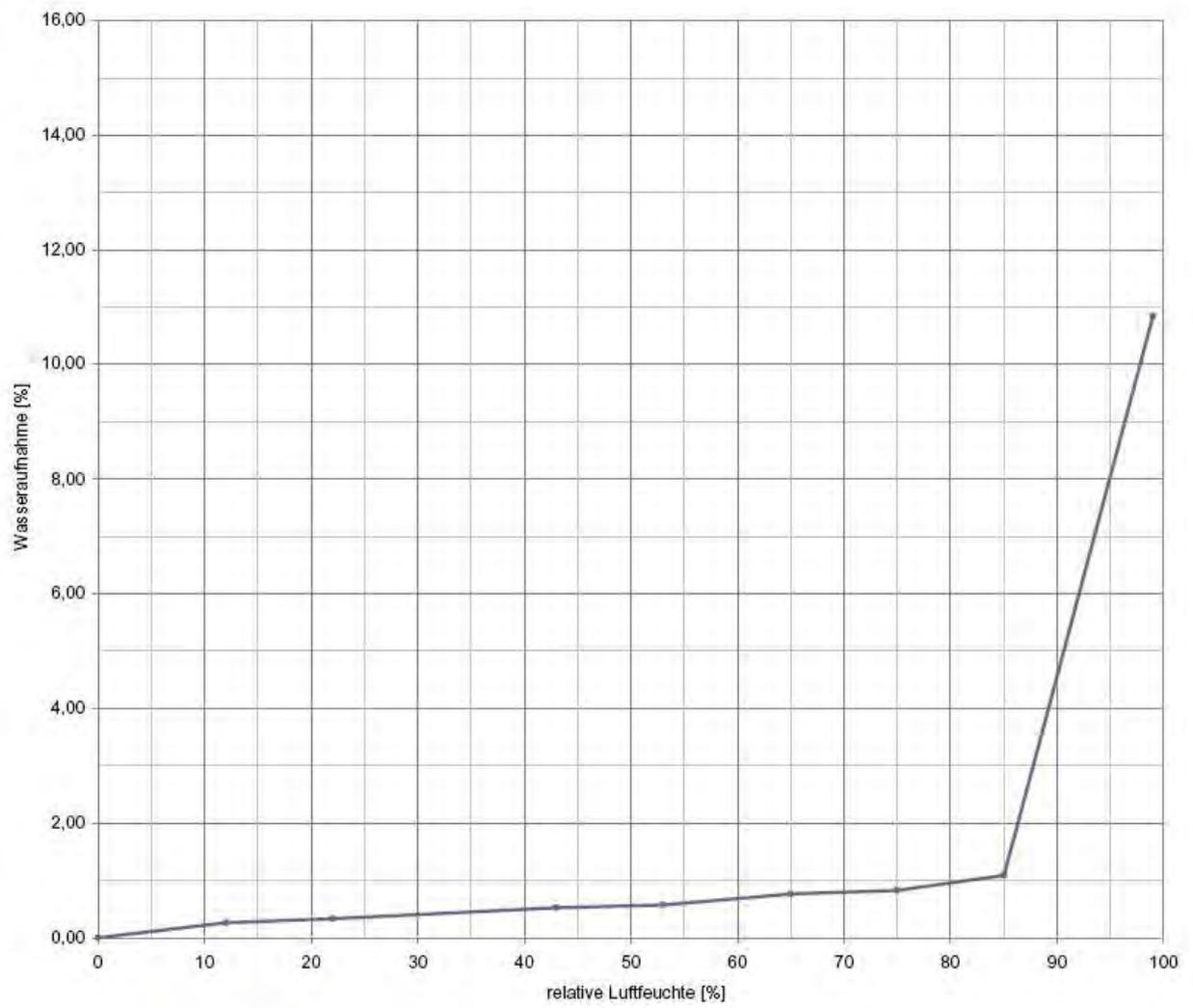


Abbildung 6: Sorptionsisotherme des Dämmsystems mit Blähglas

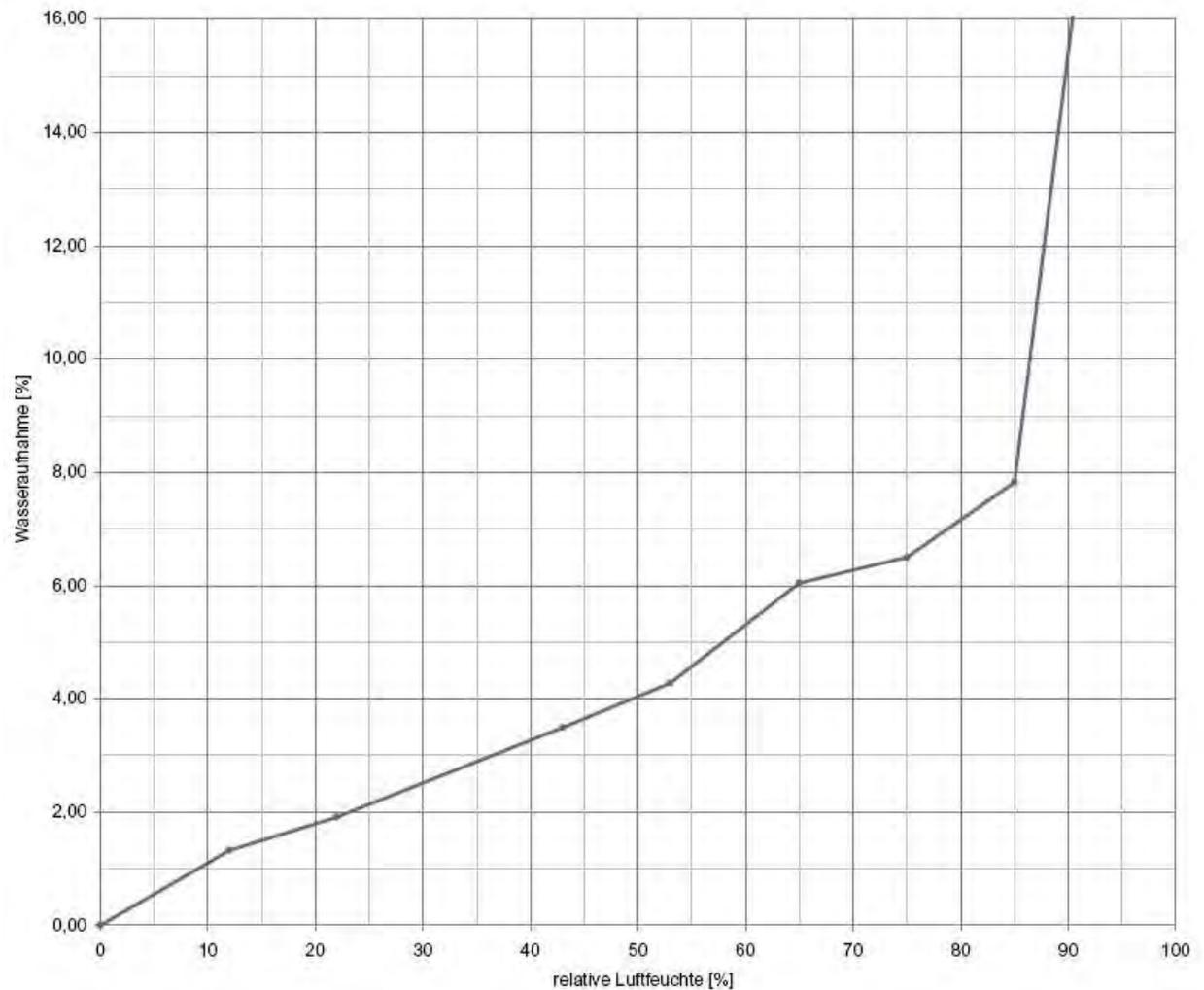


Abbildung 7: Sorptionsisotherme des Dämmsystems mit Holzspänen

6.7 Offene Porosität

Die Bestimmung der Porosität unter Atmosphärendruck fand in Anlehnung an DIN EN 1936 [3] statt. Es wurden jeweils 5 bis zur Massekonstanz getrocknete Probekörper mit den Abmessungen von 100 x 100 x 100 [mm] für die Prüfung verwendet.

Die offene Porosität beträgt für die untersuchten Probekörper mit Blähglaszuschlag im Mittel 54,5 Prozent, für die Probekörper mit Holzspanzuschlag wurde eine offene Porosität von 70,7 Prozent ermittelt.

6.8 Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten wurde in Anlehnung an DIN 52617 [4] mit jeweils 3 Probekörpern mit Abmessungen von 100 x 100 x 100 [mm] durchgeführt.

An den Proben wurde die flächenbezogene Wasseraufnahme beim Benetzen der Grundfläche aus der zeitabhängigen Massezunahme der Proben und der Größe der Saugfläche ermittelt.

Für die getesteten Probekörper stellen sich die kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten wie folgt dar:

Tabelle 46: Kapillare Wasseraufnahmekoeffizienten der getesteten Proben

Probe	w_t
Blähglas 31	0,39
Blähglas 32	0,52
Blähglas 33	0,59
	0,50
Holz 31	0,40
Holz 32	0,66
Holz 33	0,59
	0,55

Die Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten w wird dazu herangezogen, die Baustoffe entsprechend ihrer kapillaren Saugfähigkeit zu klassifizieren.

Tabelle 47: Klassifizierung nach DIN 4108 [5]

stark saugend	2,0	<	w			$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
wasserhemmend	0,5	<	w	\leq	2,0	$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
wasserabweisend	0,001	<	w	\leq	0,5	$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$
wasserdicht			w	\leq	0,001	$\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$

Gemäß Tabelle liegt der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient für die untersuchten Proben mit Blähglaszuschlag bei $w = 0,50$, für die Proben mit Holzspanzuschlag bei $w = 0,55$, womit beide Materialien gemäß DIN 4108 als wasserhemmend zu charakterisieren sind.

7 Simulation des hygrothermischen Bauteilverhaltens

Das thermische und feuchtetechnische Verhalten der eingesetzten Materialien ist eine wesentliche Komponente für Funktion und Nachhaltigkeit des entwickelten Wandsystems. Um beurteilen zu können, ob die ausgewählten Systemkomponenten eine dauerhafte und energieeffiziente Bauweise gewährleisten, muss mittels Simulation eine Vorhersage über die langfristigen Vorgänge in der Materialkomposition getroffen werden.

Die Anwendung des Simulationstools DELPHIN erlaubt die Simulation von Wärme- und Feuchtespeicherung sowie –transport unter instationären Bedingungen, wobei alle Speicherungs- und Umwandlungsvorgänge von Feuchte einbezogen werden. Als Randbedingungen wurden instationäre Klimabedingungen gewählt, so dass die Konstruktion mit wechselnden Außenklimata, einschließlich Regen und Strahlungsaustausch, beaufschlagt werden kann.

Im Rahmen dieser Untersuchung kommt die Version 5.6.5 zum Einsatz. Mit der Simulation des hygrothermischen Bauteilverhaltens sollte der ungünstigste Fall betrachtet werden. Deshalb fand die Simulation der Außenwandkonstruktion an einer Gebäudeecke statt, an der sich die negativen Einflüsse der Wärmebrückenbildung aufgrund der Betonfüllung sowie der Eckgeometrie summieren.

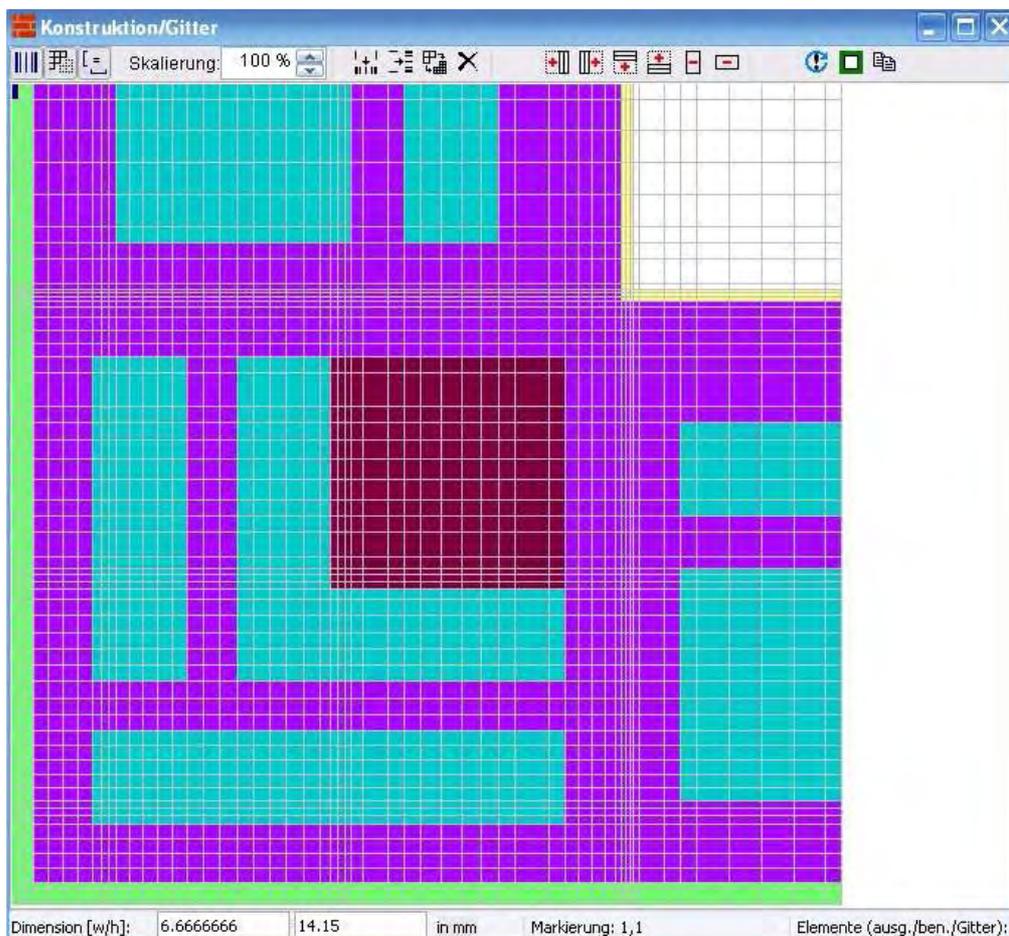


Abbildung 8: Unverzerrtes diskretisiertes Modell der Gebäudeecke

Im der folgenden Simulation wurden vier ausgewählte Dämmmaterialien einer detaillierten Untersuchung hinsichtlich ihrer hygrothermischen Eigenschaften im Gesamtsystem unterzogen. Zum einen die mineralisch gebundenen Dämmsysteme mit Blähglas- bzw. Holzzusatz und zum anderen Holzfaserdämmstoff. Außerdem wurde Polyurethan-Hartschaum als Vergleichsmaterial herangezogen, da dieses Dämmprodukt mit $\lambda = 0,028 \text{ W/mK}$ die niedrigste Wärmeleitfähigkeit besitzt.

Im Simulationsprogramm DELPHIN sind Klimadaten für verschiedene Städte weltweit verfügbar. Da von einem Standort des Gebäudes innerhalb Deutschlands ausgegangen wird, kamen für die vorliegende Arbeit die Daten über den Jahresgang für die Stadt München zum Einsatz. Diese zeigen im Winter Kälteperioden bis zu -15°C und im Sommer Temperaturen von bis zu $+30^\circ\text{C}$. Für das Raumklima wurden die Standarddaten von DELPHIN verwendet. Dies bedeutet eine Temperatur von 23°C und eine relative Luftfeuchte von 50%. Anfänglich wurde mit einem Betrachtungszeitraum über fünf Jahre simuliert. Hierbei zeigte sich jedoch, dass sich die Bauteile bereits im zweiten Jahr im eingeschwungenen Zustand befanden. So fand die weitere Betrachtung der Materialien über einen Simulationszeitraum von zwei Jahren statt. Das zweite Jahr wurde zur Ergebnisauswertung herangezogen. Die Ausgabe und Auswertung der Ergebnisse fand zum einen über die komplette Außenwandkonstruktion und zum anderen über einen Einzelwert, als Punkt 1 bezeichnet, statt. Dieser befindet sich genau in der Innenecke des Bauteilaufbaus auf der zweiten Elementreihe.

Mineralisch gebundene Holzspäne

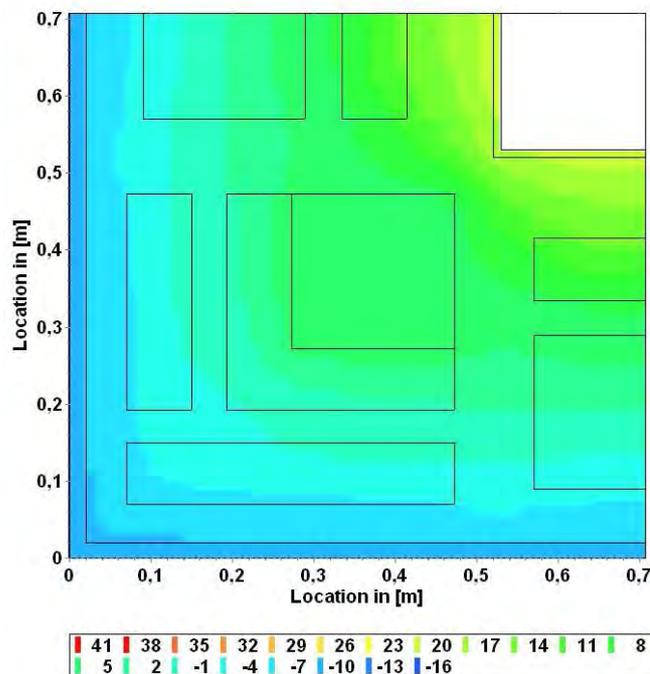


Abbildung 9: Temperaturfeld bei niedrigster Jahrestemperatur

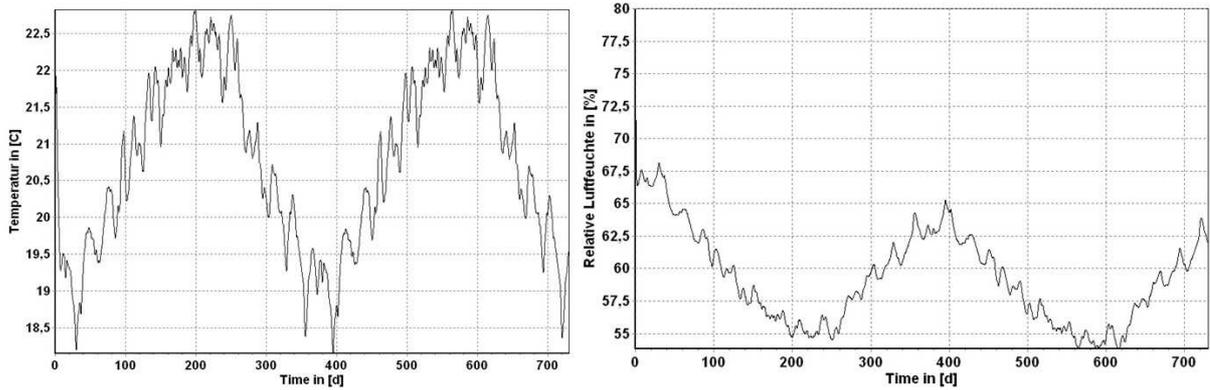


Abbildung 10: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte während der zweijährigen Berechnung im Punkt 1 (Innenecke)

Mineralisch gebundenes Blähglas

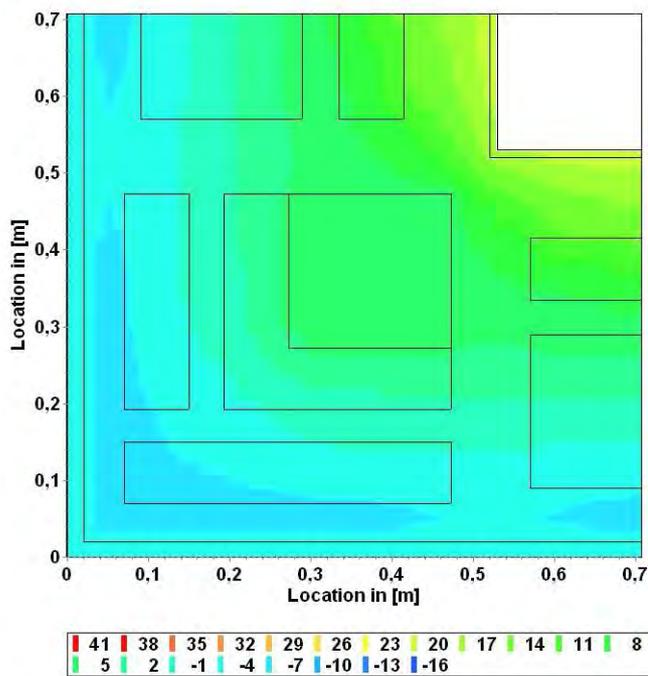


Abbildung 11: Temperaturfeld bei niedrigster Jahrestemperatur

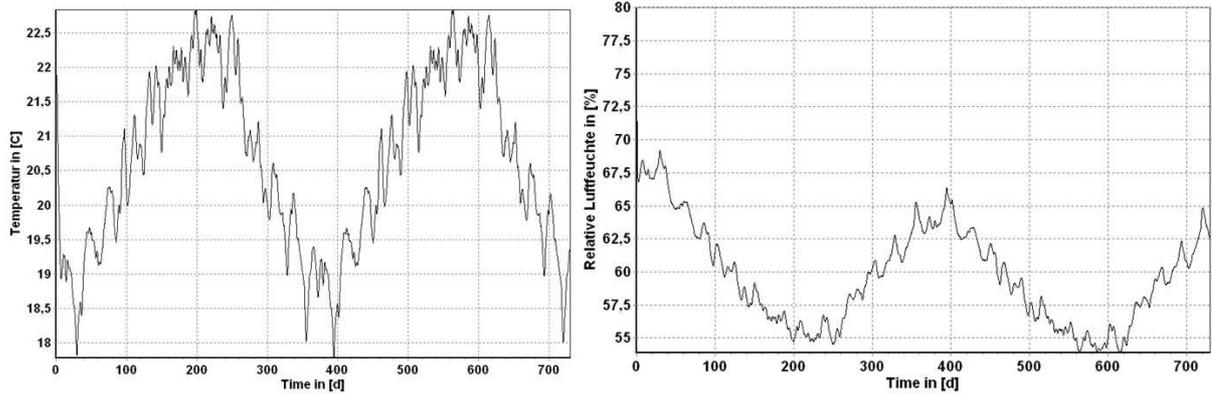


Abbildung 12: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte während der zweijährigen Berechnung im Punkt 1 (Innenecke)

Holzfaserdämmmatten

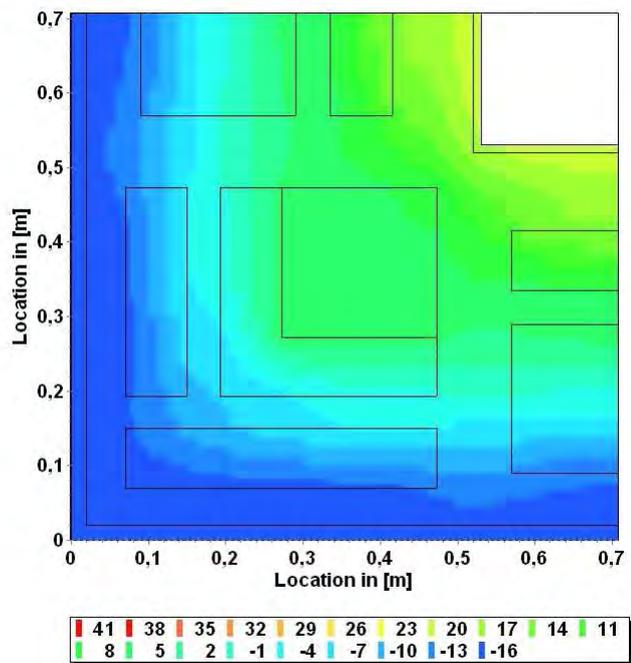


Abbildung 13: Temperaturfeld bei niedrigster Jahrestemperatur

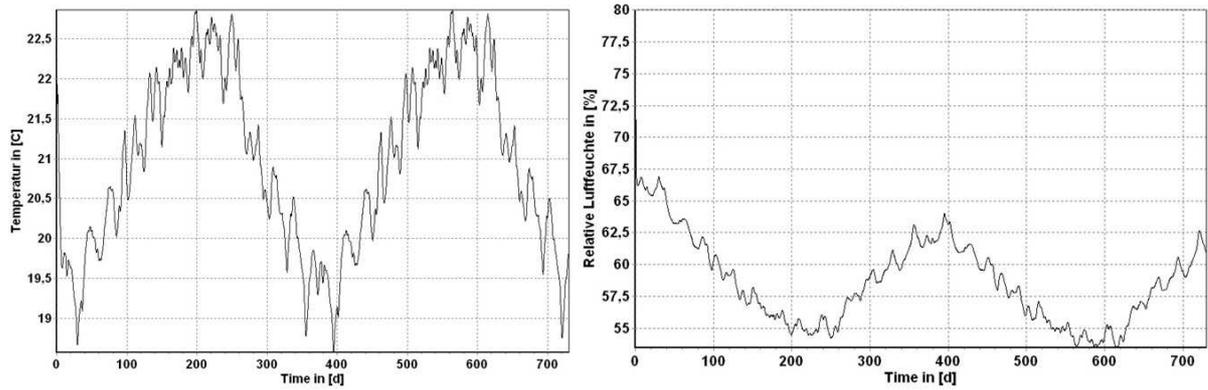


Abbildung 14: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte während der zweijährigen Berechnung im Punkt 1 (Innenecke)

Polyurethan-Hartschaumdämmung

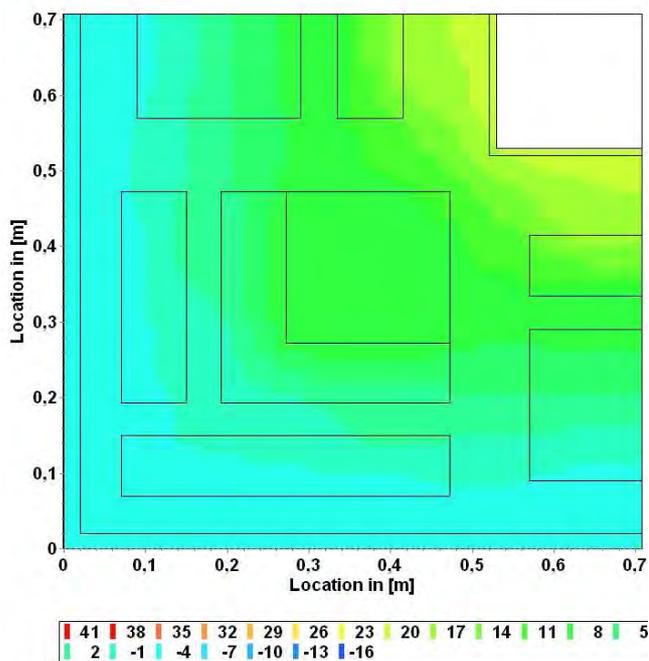


Abbildung 15: Temperaturfeld bei niedrigster Jahrestemperatur

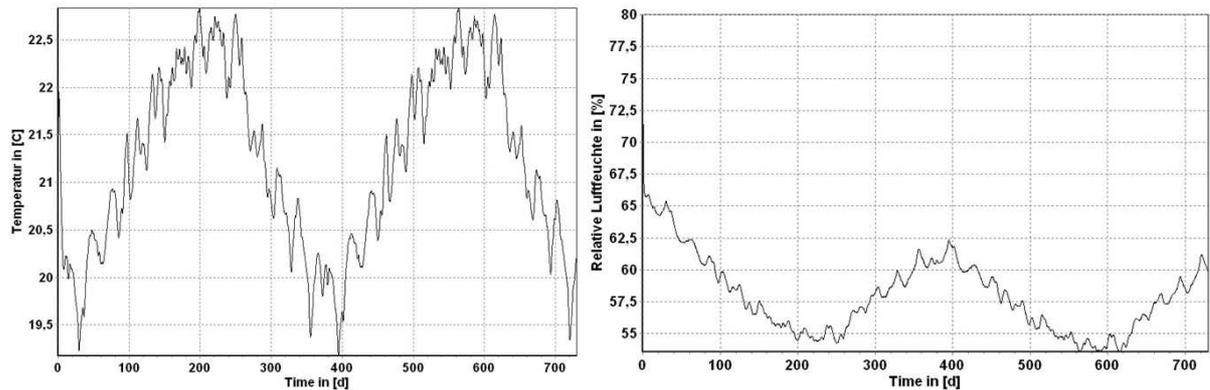


Abbildung 16: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte während der zweijährigen Berechnung im Punkt 1 (Innenecke)

Vergleich der Dämmsysteme

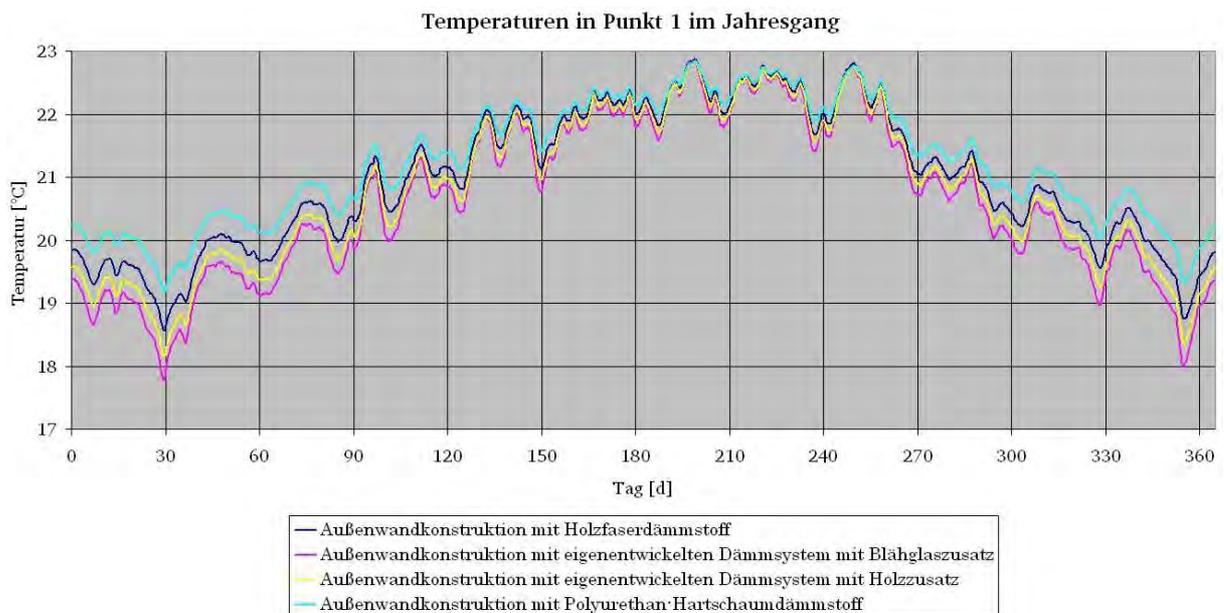


Abbildung 17: Vergleich der Temperaturen an Punkt 1 im Jahresgang

Es lässt sich durch den Vergleich feststellen, dass sich die unterschiedlichen Werte der Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Dämmmaterialien nur mäßig auf die Oberflächentemperatur der Innenecke auswirken. Der Polyurethan-Hartschaumdämmstoff besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von $0,028 \text{ W/mK}$, das mineralisch gebundene Dämmsystem mit Blähglaszusatz erreicht eine Wärmeleitfähigkeit von $0,102 \text{ W/mK}$. Die niedrigsten Temperaturen innerhalb eines Jahres betragen bei der Polyurethandämmung $19,2^\circ\text{C}$, beim Dämmsystem mit Blähglaszusatz $17,9^\circ\text{C}$.

Allen vier verglichenen Wandsysteme gemeinsam ist die Tatsache, dass die Wassertransport- und Wasserspeichervorgänge zum überwiegenden Teil über die Stege des Mauersteins geschehen. Die Dämmung bzw. der Stahlbeton ist von diesen Vorgängen nur geringfügig betroffen, was sich sehr



positiv auf deren wärmedämmenden Eigenschaften auswirkt, da Wasser eine höhere Wärmeleitfähigkeit als die hier verwendeten Dämmstoffe aufweist, würde mit zunehmendem Feuchtegehalt der Dämmung deren Dämmeigenschaft sinken. Der Grund für die größere Wassertransport- und Wasserspeicherungsfähigkeit von Holzbeton ist in dessen deutlich höheren Wasseraufnahmekoeffizienten zu sehen.

8 Fazit

Aufgrund der Tatsache, dass sich die Stegfläche in dem zu entwickelnden Wandsystem zwar minimieren, nicht aber vermeiden lässt, fällt dem gewählten Stegmaterial eine nicht zu unterschätzende Bedeutung zu. Wird das Stegmaterial, hier der Holzbeton, hinsichtlich seiner Wärmeleitfähigkeit optimiert, so reduziert sich die materialbedingte Wärmebrücke der Stege und der U-Wert des gesamten Wandsystems verbessert sich entsprechend. Im Vergleich zu dem ursprünglichen verwendeten Holzbetonmaterial (Typ 1) für die Mauersteine weist das optimierte Material (Typ 4) eine mit 490 kg/m^3 um etwa 30 Prozent verringerte Trockenrohichte auf, welche mit einer entsprechend niedrigen Wärmeleitfähigkeit von $0,106 \text{ W/mK}$ einhergeht. Vorbehaltlich noch durchzuführender Untersuchungen bezüglich der Druckfestigkeit, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Transport- und Verarbeitungseigenschaften, aber auch auf die Standfestigkeit der Mauersteine hat, wird empfohlen, das in diesem Bericht untersuchte Holzbetonmaterial (Typ 4) für die Mantelsteine zu verwenden.

Hinsichtlich der Erreichung des angestrebten U-Werts für das Wandsystem fällt insbesondere der Wahl des Dämmmaterials eine zentrale Rolle zu. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden lose Dämmstoffe bzw. Dämmstoffmatten auf ihre Verwendbarkeit als Füllmaterial der Holzbetonsteine untersucht. Ein Auswahlkriterium war neben den bauphysikalischen Eigenschaften vor allem die ökologische Unbedenklichkeit des Dämmmaterials, die letztendlich ein Zusammenfügen aller Einzelkomponenten zu einem umweltfreundlichen und nachhaltigen Gesamtsystem ermöglicht. Als besonders geeignet erwiesen sich im Rahmen der Untersuchung Holzfaserdämmplatten, die neben sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeiten von bis zu $0,040 \text{ W/mK}$ auch eine materialtechnologische Nähe zu den Holzbetonschalungssteinen aufweisen.

Als Alternative zu marktüblichen Dämmstoffen wurden an der TUD verschiedene mineralisch gebundene Dämmsysteme entwickelt und optimiert. Das im Rahmen des Forschungsprojekts optimale Dämmsystem ist dabei ein Material aus mineralisch gebundenen Holzspänen, welches Wärmeleitfähigkeiten von bis zu $0,076 \text{ W/mK}$ bei Trockenrohichten von 405 kg/m^3 aufweist und sich ebenfalls sehr gut in den Materialcharakter des Gesamtsystems integriert.

Die Vorteile von mineralisch gebundenen Dämmsystemen liegen insbesondere im produktions- und verarbeitungstechnischen Bereich. Die Verfüllung der Hohlräume der Holzbetonmantelsteine mit mineralisch gebundenem Dämmmaterial lässt sich sehr gut in den Prozess der Steinherstellung integrieren und entsprechend automatisieren. Ein weiterer zusätzlicher Arbeitsgang zum Einbringen der Dämmung entfällt damit komplett. Auch im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit weisen Mauersteine mit mineralischer Füllung deutliche Vorteile auf, da sich durch den festen Verbund der Materialien die Steine beliebig zuschneiden lassen, ohne dass sich die Dämmung aus den Mantelsteinen löst. Eine mineralisch gebundene Dämmung ist zudem sehr formstabil und garantiert somit eine vollständige Ausfüllung des Mantelsteins, wohingegen sich nachträglich eingebrachte Dämmplatten während des Transport- und Produktionsprozesses lösen bzw. deformieren können.



Allerdings gleichen die oben benannten Vorteile, welche mit der Verwendung einer mineralisch gebundenen Dämmung verbunden sind, nicht die deutlich verringerte Wärmeleitfähigkeit von Holzfaserdämmplatten aus. Um einen im Rahmen einer Passivhaus-Bauweise erforderlichen U-Wert erreichen zu können wird daher empfohlen, Holzfaserdämmplatten als Füllung der Holzbetonmantelsteine einzusetzen.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 992:1995; Bestimmung der Trockenrohddichte von haufwerksporigem Leichtbeton
- [2] DIN 52103:1988; Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert
- [3] DIN EN 1936:1999; Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität
- [4] DIN 52617:1987; Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen
- [5] DIN 4108:1981; Wärmeschutz im Hochbau
- [6] Cziesielski, Erich (Hrsg.) (2004): Bauphysik Kalender 2004. 1. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn.
- [7] IBO – Österreichisches Institut für Baubiologie und –ökologie; Donau-Universität Krems, Zentrum für Bauen und Umwelt (Hrsg.) (2000): Ökologie der Dämmstoffe. 1. Aufl. Wien: Springer.
- [8] Dämmstoff von der Wiese, In: ausbau+fassade, Sonderheft „Chance Energie“ 2008, S. 46-48.
- [9] Vetter, Heidi (2002): „Raffinierter Rohstoff Gras“. In: Fraunhofer IRB (Hrsg.): Bauthema. Naturdämmstoffe. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. S. 77-80.
- [10] Meyer, Lars: Zum Einfluss der Kontaktzone bei der Modellierung des Elastizitätsmoduls von Beton. Dissertation. Technische Hochschule Aachen, Aachen 2007.
- [11] Fischer, Heinz-Martin; et al. (2008): Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand - Klima. 6. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [12] DIN EN 1602:1997; Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Rohdichte
- [13] EN 1946-2:1999; Wärmetechnisches Verhalten von Bauprodukten und Bauteilen - Technische Kriterien zur Begutachtung von Laboratorien bei der Durchführung der Messungen von Wärmeübertragungseigenschaften - Teil 2: Messung nach Verfahren mit dem Plattengerät
- [14] Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät
- [15] DIN EN 12086:1997; Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- [16] DIN EN ISO 12571:2000; Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften



Silcherstr. 9
D-72358 Dormettingen/Zollernalb
Mail: buero@gaenssmantel.de
Internet: www.gaenssmantel.com
Tel.: +49.7427.914.746
Fax: +49.7427.914.964
Mobil: +49.170.5575229

Niederlassung Spanien/Sucursal España:
C/ Saturno nº 16, C-44
E-07609 Bahía Azul / Mallorca
Mail: buero@gaenssmantel.de
Internet: www.el-perito.info
Mobil: +34.652.059327

Ökologische Bewertung eines einschaligen, hochwärmedämmenden, massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

- Projekt:** Entwicklung und ökologische Bewertung eines für die Passivhaus-Bauweise tauglichen, einschaligen, massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen
- Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt – DBU - AZ- 23652-23
- Auftraggeber:** ILA Bauen + Wohnen
Fuldaweg 21/23
- D – 74172 Neckarsulm-Amorbach
- Bearbeitung:** Dipl.-Ing. (FH)
Jürgen Gänßmantel
- Umfang:** 39 Seiten Bericht
10 Seiten Anhang
- Anhang:** 10 Seite(n) Berechnung Passivhausstein
- Verteilung:** Fa. ILA, Herr Groschup
TU Darmstadt, Herr Prof. Dr. Garrecht
tha Ingenieurbüro Eßmann, Herr Eßmann
- Datum:** 31.01.2011

Inhaltsverzeichnis

1. Ziel des Forschungsvorhabens 3

2. Projektbearbeitung durch Ingenieurbüro Gänßmantel 4

3. Status Quo der ökologischen Betrachtung 4

4. Vorgehensweise zur ökologischen Bewertung 5

 4.1 Methodik 5

 4.2 Bezugseinheiten 6

 4.3 Darstellung 6

 4.4 Zeitraum und geographischer Bezug 6

 4.5 Systemgrenzen 6

 4.6 Vorgehensweise 6

 4.7 Untersuchte Umweltfaktoren 7

 4.8 Datenquellen, Datenerhebung, Datenstruktur und -qualität 10

5. Basisdaten des Herstell- und Verarbeitungsprozesses 11

 5.1 Der ILA-Stein 11

 5.2 Rezeptur für die Steinherstellung 12

 5.3 Betrachteter Prozess der Steinherstellung 16

 5.4 Betrachtete Mauer- und Putzmörtel 18

6. Berechnungsergebnisse Stein – Standard 19

 6.1 Standard-Normalstein (Rohstoffe und innerbetriebliche Energien) 19

 6.2 Einfluss der Randbedingungen - Szenarienbetrachtung 25

7. Berechnungsergebnisse Wand – Standard 26

 7.1 Standardsystem 27

 7.2 Einfluss der Randbedingungen - Szenarienbetrachtung 28

 7.3 Abfälle 29

8. Berechnungsergebnisse Stein – optimiert („Passivhaustein“) 30

9. Vorbereitung einer Umweltproduktdeklaration (EPD) 31

10. Empfehlungen und Ausblick 35

11. Literaturverzeichnis 37

Anhang

10 Seite(n) tabellarische Berechnung der Umweltwirkungen für ILA-Passivhaussteine

1. Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Weiterentwicklung des bestehenden Wandsystems der Firma ILA Bauen und Wohnen, das aus massiven Holzbetonsteinen besteht. Das Wandsystem soll so optimiert werden, dass es in Passivhausbauweisen Anwendung finden kann ohne dabei seinen ökologisch-nachhaltigen Charakter zu verlieren.

Das bestehende, einschalige Wandsystem basiert auf der monolithischen Mauerwerksbauweise, wobei die eingesetzten Holzbetonsteine keine lastabtragende Funktion übernehmen. Die Lastabtragung erfolgt über ein Stahlbeton-Skelett, welches durch in den Eckbereichen angeordnete und mit den Filigrandecken in einem Arbeitsschritt verfüllten Schalungssteinen realisiert wird. Damit besteht das Wandsystem aus zwei verschiedenen Steintypen: massive Holzbetonsteine zur Errichtung der nicht-tragenden Wände und Schalungssteine für Eckbereiche sowie längere Wandbereiche, mit Aussparungen in den Abmessungen der zu betonierenden Stützen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollen sowohl die beiden Steintypen hinsichtlich ihrer wärmedämmenden Eigenschaften verbessert werden, als auch das komplette Wandsystem, bestehend aus Holzbetonsteinen, Mörtel- und Putzsystemen so weit optimiert werden, dass ein Einsatz zur Errichtung von Passivhäusern möglich wird. Die Verbesserung beinhaltet den Entwurf einer neuen Steingeometrie, die es ermöglichen soll, die hohen bauphysikalischen Anforderungen zu erfüllen. Dazu werden die ursprünglich massiven Steintypen mit einer Hohlraumgeometrie versehen, die sowohl eine ausreichende Stabilität für die Verarbeitung und die Aufnahme des Eigengewichts der Wand sicherstellt als auch eine möglichst effektive Wärmedämmung ermöglicht.

Die Verfüllung der Hohlräume beider Steintypen erfolgt mit ökologischen Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen, wobei diese die günstigen bauphysikalischen Eigenschaften des Holzbetons möglichst unterstützen sollten. Auch die weiteren Systemkomponenten, bestehend aus Beton, Mörtel und Putzen, müssen neben einer ökologischen Unbedenklichkeit das Wandbausystem hinsichtlich baustofflicher und bauphysikalischer Sicht unterstützen und werden im Rahmen des Forschungsvorhabens dahingehend optimiert.

In einem abschließenden Feldversuch gilt es, das entwickelte Wandsystem hinsichtlich seiner Realisierbarkeit sowie zur Validierung der im Modell gewonnenen Daten zu untersuchen und zu bewerten. Dazu wird das Modellgebäude einem umfassenden Bauteil- und Bauwerksmonitoring zur Erfassung des wärme- und feuchtetechnischen Bauteilverhaltens der einzelnen Systemkomponenten

2. Projektbearbeitung durch Ingenieurbüro Gänßmantel

Die einzelnen Arbeitspakete des Forschungsvorhabens wurden in drei Phasen untergliedert, wobei ein Meilenstein am Ende der einzelnen Phasen jeweils verbindliche Kriterien für die Weiterführung des Vorhabens festlegt. Von allen Kooperationspartnern wird nach Abschluss jeder Phase ein Zwischenbericht erstellt.

Ein Hauptaspekt der Phase 2, die Gegenstand dieses Berichts ist, bei der Projektbearbeitung durch das Ingenieurbüro Gänßmantel bestand in der ökologischen Bewertung der optimierten Steintypen. Dazu sollten zunächst die verfügbaren Bewertungsmöglichkeiten überprüft und darauf aufbauend eine möglichst den gesamten Lebenszyklus umfassende Betrachtung der ökologischen Performance der weiter entwickelten Steine entwickelt werden. Auf der Basis einer der Ökobilanz ähnlichen Beurteilung sollten die Stoff- und Energieströme erfasst und die Umweltwirkungen ermittelt werden. Ziel ist es, ökologische Kennwerte zu ermitteln und diese mit anderen Mauerwerksbildner zu vergleichen. Außerdem soll das Ergebnis die Daten für eine Umweltproduktdeklaration nach DIN ISO 14025 (Environmental Product Declaration, kurz EPD) liefern, um die Steintypen später deklarieren zu können.

3. Status Quo der ökologischen Betrachtung

Ökologische Betrachtungen gibt es schon seit einigen Jahrzehnten. Anfangs wurden ökologische Betrachtungsweisen über die Beziehung des Lebewesens zu seiner Umwelt im natürlichen Lebensraum erstellt. Im Laufe der Zeit wurde der natürliche Lebensraum auf den menschlich erschafften Raum erweitert. Es gibt heute viele Werkzeuge zur Abschätzung der Umwelteinflüsse.

Jede Methode zur Untersuchung eines Produktes, eines Produktionsprozesses bzw. eines Produktionsstandortes bezüglich der ökologischen Eigenschaften hat unterschiedliche Ziele. In einigen Fällen müssen sogar verschiedene Methoden kombiniert werden, um eine aussagekräftige ökologische Einstufung und ggf. eine Verbesserung von Produkten und deren Herstellung zu bekommen. Der bekannteste Vertreter dieser Werkzeuge ist die Ökobilanz, die nach DIN EN ISO 14040 einheitlich geregelt ist. Doch zur eigentlichen Bewertung von Ökobilanzen konnte man sich bisher nicht auf eine einheitliche Vorgehensweise einigen. So entstand eine Methodenvielfalt mit zahlreichen parallel laufenden Anwendungen. Das Problem dabei ist, dass so bei qualitativen Bewertungsverfahren automatisch ein großer subjektiver Bewertungsspielraum gegeben ist, da jede Methode ihren Schwerpunkt selbst definiert.¹

¹ Vgl. dazu Haase, C., Umweltrelevante Schwachstellenanalyse von Produktionsprozessen zur Offenlegung von Wertschöpfungspotenzialen, 2002, S. 41-45

Bei der Ökobilanz werden alle potenziellen Umweltwirkungen und Umweltaspekte untersucht, welche ein Produkt von der Rohstoffgewinnung, Zulieferung, Herstellung und Anwendung bis hin zur Abfallbehandlung bzw. dem Recycling auf die Umwelt hat. Aber auch der Ressourcenverbrauch wird mit einbezogen. Zur Fertigung einer Ökobilanz ist die Erstellung einer Input-/Output-Analyse notwendig. Hierbei werden in einer Bilanz auf der einen Seite, alle Stoff- und Energieströme, die dem Produkt und dessen Herstellung, Vertrieb etc. zugeführt werden, festgehalten. Auf der anderen Seite werden alle Ströme, die aus der Herstellung des Produktes und dessen Vertrieb etc. abgeführt werden, festgehalten. Die Input-Ströme entstehen meist aus Rohstoffen und Energien, während die Output-Ströme aus Abfällen, Abwässern und Emissionen entstehen. Der genaue Umfang einer Ökobilanz wird durch den Rahmen der Ökobilanz abgesteckt.²

4. Vorgehensweise zur ökologischen Bewertung

4.1 Methodik

Bei der in der Projektphase 2 durchgeführten ökologischen Bewertung wurde keine eigentliche Ökobilanz für die beiden optimierten Steintypen erstellt. Dazu sind in der Regel umfangreiche und komplexe Berechnungswerkzeuge/Spezialsoftware erforderlich. Da das Ziel eine ökologische Bewertung der Steingeometrie und die Vorbereitung einer Umweltproduktdeklaration nach DIN EN ISO 14025 ist, wurde eine Methode angewendet, die auch schon bei anderen Baustoffen zum Einsatz gekommen ist. Da die Zusammensetzung der Steine relativ einfach und unkompliziert ist und die einzelnen Rohstoffe bereits mehrfach untersucht wurden - durch Produktdeklarationen und Ökobilanzen von Produkten, in denen diese Rohstoffe Anwendung finden - erschien es logisch, die zu den Produkten bereits vorhandenen Produktdeklarationen mit einzubeziehen.

Daher wurden bei der ökologischen Bewertung der optimierten ILA-Steintypen die bereits vorliegenden Einzelergebnisse der jeweiligen Produktkomponenten aus vorliegenden Datensätzen entnommen, auf die für die Steinherstellung benötigte Masse hochgerechnet und summiert. Es wurde somit auf Grundlage bereits erstellter Deklarationen der jeweiligen Rohstoffe bzw. Produkte mit Hilfe einer speziell auf die Steingeometrie und die Herstellrezepturen angepassten Tabellenkalkulation eine Berechnung der Umweltwirkungen in Anlehnung an übliche Umweltproduktdeklarationen erstellt.

Zusätzlich wurden noch Szenarien zur Prüfung entwickelt, wie sich bestimmte Änderungen im Herstellprozess, bei den Transporten oder im Wandsystem auf das Gesamtergebnis (= Umweltwirkungen) auswirken. Aus diesen Ergebnissen und deren Abschätzung lassen sich verschiedene Fragen wie ökologisch optimierter Produktionsstandort, Einfluss von Rohstoff- und Baustellenentfernungen, Verwendung alternativer Materialien, usw. beantworten. Diese Methode entspricht grundsätzlich den

² Vgl. dazu DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN ISO 14040: 2009-11, S. 4-6

selben Vorgehensweise wie bei einer Ökobilanz; es wurde ein neues Werkzeug, d.h. eine neue, vereinfachte Methode angewendet. Diese Methode wird auch zur Erstellung von neuer EPDs angewandt und als sog- „Zweit-EPD“ bezeichnet.³

4.2 Bezugseinheiten

Die Berechnung erfolgt in vier Abschnitten mit jeweils eigener Bezugseinheit.

Herstellung des Rohsteines (nur Rohstoffe ohne Inlay)

Einheit: 1,0 m³ Holzspanbeton

Weiterverarbeitung zum Fertigprodukt (Rohstoffe mit Inlay)

Einheit: 1,0 m³ Stein (ohne Energieaufwand)

Endprodukt (Stein inkl. betrieblicher Energien)

Einheit: 1 m³ produzierter Stein

Verbautes Produkt (Betonkern, Bewehrung, Mörtel, Putze, inkl. prod. Stein)

Einheit: 1 m² Wand

4.3 Darstellung

Sämtliche Daten der Berechnung stammen aus veröffentlichten Berichten/Deklarationen. Die veröffentlichten Daten beziehen sich auf Durchschnittswerte.

4.4 Zeitraum und geographischer Bezug

Der Erscheinungszeitraum beinhaltet die Daten der jeweiligen Veröffentlichung der Datenquellen und erstreckt sich über den Zeitraum von August 2007 bis Dezember 2009. Der Bezugsraum ist Deutschland.

4.5 Systemgrenzen

Es wird zwischen zwei Systemgrenzen unterschieden. Zum einen die Erzeugung des Fertigsteines inklusive aller Vorketten und Transporte bis hin zum Werkstor (*cradle to gate*). Zum anderen wird als Zusatz das vor Ort verbaute Wandsystem betrachtet. Dieses umfasst den Stein, den Mauermörtel und das Putzsystem, sowie den Säulenbeton und die dafür notwendige Bewehrung.

4.6 Vorgehensweise

Für jeden Inputstrom werden speziell veröffentlichte Werte, die umweltrelevant sind, herangezogen. Die umweltrelevanten Werte werden zunächst auf einen Einheitswert gerechnet, z.B. für 1 kg oder 1

³ Institut Bauen und Umwelt (IBU), Königswinter. Im Internet unter www.bau-umwelt.com

m³ des Produktes. Dies ergibt den Basiswert, also umweltrelevanter Wert pro Einheit eines bestimmten Stoffstromes. Der Basiswert wird anhand der Angabe aus der Rezeptur, anschließend mit der Menge des Stoffes multipliziert. Das Ergebnis ist eine Umweltrelevanz bezogen auf die angegebene Rezepturmenge je Stoffstrom. Die Einzelergebnisse jedes umweltrelevanten Wertes werden aus allen Stoffströmen summiert und ergeben somit die Größe eines umweltrelevanten Wertes aller Stoffströme. Untersucht wurden die wesentlichen und bekanntesten Faktoren, die auch in EPD's üblich sind.

4.7 Untersuchte Umweltfaktoren

Die im Folgenden beschriebenen Umweltfaktoren, die untersucht wurden, stammen aus der Beschreibung des Allgemeinen Leitfadens für Produktdeklarationsregeln (PCR) vom Institut Bauen und Umwelt e. V. (IBU). Daher erfolgt für die jeweiligen Erklärungen keine separate Quellenangabe.⁴

Primärenergie, nicht erneuerbar

Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar, beschreibt den Energiebedarf aus nicht regenerierbaren Ressourcen, welcher für die Herstellung bzw. Gewinnung eines Produktes inkl. seiner ggf. vorhandenen Vorketten benötigt wird. Gemessen wird dieser Faktor in MJ je Einheit. Zum Einsatz kommen die Energieträger Steinkohle, Braunkohle, Mineralöl, Erdgas, und Uran.

Primärenergie, erneuerbar

Primärenergiebedarf, erneuerbar, beschreibt den Energiebedarf aus regenerierbaren Ressourcen, der benötigt wird für die Herstellung bzw. Gewinnung eines Produktes inkl. seiner ggf. vorhandenen Vorketten. Gemessen wird dieser Faktor in MJ je Einheit. Zum Einsatz kommen die Energieträger Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie und Biomasse.

Treibhauspotential (GWP 100)

Das Treibhauspotential mit der englischen Abkürzung GWP (*Global Warming Potential*), teilt sich auf in einen natürlichen und einen künstlich erzeugten Treibhauseffekt. Der natürliche Effekt beschreibt den Treibhauseffekt der entsteht, wenn kurzweilige Sonnenstrahlung auf die Erdoberfläche trifft. Ein Teil der Strahlung wird absorbiert, dies führt zu einer direkten Erwärmung, der andere Teil wird als Infrarotstrahlung reflektiert und anschließend in der Troposphäre durch Treibhausgase absorbiert und richtungsunabhängig wieder abgestrahlt. Dadurch kann also ein Teil wieder zur Erde zurückgestrahlt werden, was eine weitere Erwärmung zur Folge hat. Der künstliche Effekt entsteht durch menschliche Aktivitäten, indem Treibhausgase wie Kohlendioxid, Methan und Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) freigesetzt werden.

Das Treibhauspotential wird in kg Kohlendioxid - Äquivalent (CO₂-Äq.) ausgedrückt. Dieser Wert sagt aus, dass alle Emissionen in Bezug auf ihren potentiellen Treibhauseffekt zu CO₂ ins Verhältnis ge-

⁴ Vgl. dazu IBU, Institut Bauen und Umwelt e. V., Allgemeiner Leitfaden, 2006, S. 13-15

setzt werden. Aufgrund der Verweildauer der Gase in der Atmosphäre muss der für die Abschätzung betrachtete Zeitraum stets mit angegeben werden. Im Regelfall liegt der Bezug bei 100 Jahren.

Ozonabbaupotenzial in der Stratosphäre (ODP)

ODP ist die englische Abkürzung für *Ozone Depletion Potential* und beschreibt den Abbau der Ozonschicht, auch bekannt unter dem Namen Ozonloch. Zu den Hauptverursachern der Ozonschichtzerstörer zählen die durch den Menschen erzeugten Fluorchlorkohlenwasserstoffe, auch bekannt als FCKWs und die Stickoxide (NO_x). Das Ozon absorbiert die kurzwellige UV-Strahlung und gibt sie mit größeren Wellenlängen und richtungsunabhängig wieder ab, was für das Leben auf der Erde wichtig ist, denn zu hohe UV-Strahlung verursacht Krankheiten wie zum Beispiel Hautkrebs und Grauer Star. Die ultraviolette Strahlung ist aber auch in geringen Maßen gesund für den Menschen, da sie verschiedene lebenswichtige Vitamine im menschlichen Körper erzeugt. Die Ozonschicht selbst entsteht durch die Bestrahlung von Sauerstoff-Molekülen mit kurzwelligem UV-Licht in der Stratosphäre, die sich in 15-20 km Höhe befindet. Ca. 10 % des entstehenden Ozons gelangen durch Vermischungsvorgänge in die Troposphäre, welche die Schicht von der Erdoberfläche bis zur Obergrenze der höchsten Wolken beschreibt.

Das Ozonabbaupotenzial soll die globalen, langfristigen und zum Teil bleibenden Auswirkungen berücksichtigen. Ergebnisse aus unterschiedlichen ozonrelevanten Stoffen von Modellrechnungen ergeben das in kg R 11-Äquivalent ausgedrückte *Ozone Depletion Potential*.

Versauerungspotenzial (AP)

Das Versauerungspotenzial ist die deutsche Übersetzung des englischen *Acidification Potential*, kurz AP genannt. Durch die Versauerung wird der pH-Wert von Regenwasser und Nebel von 5,6 auf 4 herabgestuft; eine der bekanntesten Folgen ist das sog. Waldsterben. Hierbei entstehen durch den sauren Regen direkte Schädigungen und indirekte Schädigungen des Ökosystems wie z.B. die Nährstoffauswaschung im Boden. Auch Bauwerke sind hiervon betroffen, z.B. verstärkte Korrosion und Zersetzung von Metallen und Natursteinen. Vom Menschen freigesetzte Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxide (NO_x) werden durch Umwandlung zu Schwefelsäure (H_2SO_4) und Salpetersäure (HNO_3), welche den pH-Wert von Regen und Nebel herabsetzen. Als Versauerungspotenzial beschreibt man die Wirksamkeit bestimmter Stoffe H^+ Ionen zu bilden und abzugeben. AP wird in kg Schwefeldioxid-Äquivalent (SO_2 -Äq.) angegeben. Die Versauerung ist zwar ein globales Problem, die Auswirkungen können jedoch regional sehr unterschiedlich sein.

Eutrophierungspotenzial (EP)

Das Eutrophierungspotenzial (engl. *Eutrication Potential*, EP), auch bekannt als Nährstoffeintrag, beschreibt die Anreicherung von Nährstoffen an bestimmten Standorten. Eutrophierung entsteht in Abwässern der landwirtschaftlichen Düngung und durch menschlich verursachte Luftschadstoffe. In

Gewässern hat dies zur Folge, dass es zu einem verstärkten Algenwachstum kommt, wodurch die Photosynthese geschmälert wird und somit eine geringere Sauerstoffkonzentration im Wasser geschaffen wird. Dies führt zu Fischsterben und zu einer sauerstofflosen Zersetzung (anaerobe Zersetzung). In Böden bewirkt die Eutrophierung eine erhöhte Anfälligkeit für Krankheiten und Schädlinge, sowie eine Festigkeitsschwächung im Gewebe bei Pflanzen. Durch einen zu hohen Nährstoffeintrag kann es über die Auswaschung zu einem erhöhten Nitratgehalt im Grundwasser und somit auch im Trinkwasser kommen. Nitrat selbst ist in geringen Mengen für den Menschen unbedenklich, jedoch aber nicht das daraus resultierende Reaktionsprodukt Nitrit, was toxisch auf den Menschen wirkt, z. B. Verringerung des Sauerstofftransportes im Blut. Auch beim Eutrophierungspotenzial gilt, dass die Auswirkungen regional sehr unterschiedlich sein können. In die Bilanz geht das Eutrophierungspotenzial als kg Phosphat-Äquivalent ($\text{PO}_4\text{-Äq.}$) ein.

Sommersmogpotenzial (POCP)

Der Begriff Sommersmogpotenzial steht eigentlich für das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial (engl. *Photochemical Ozone Creation Potential*, POCP). In der Stratosphäre dient das Ozon als Schutz vor der aggressiven UV-Strahlung, siehe ODP. Jedoch ist das Ozon in der Troposphäre als Spurengas einzuordnen. Diese photochemische bodennahe Ozonbildung steht im Verdacht, Schäden an Material und in der Pflanzenwelt zu verursachen. Ozon ist das wichtigste Reaktionsprodukt, welches entsteht, wenn durch Sonneneinstrahlung Stickoxid und Kohlenwasserstoffemissionen in komplexen Reaktionen zu aggressiven Reaktionsprodukten werden. Kohlenwasserstoffemissionen entstehen beim Umgang mit Lösemitteln oder bei der unvollständigen Verbrennung von Ottokraftstoffen. Hohe Konzentrationen dieses Ozons entstehen bei hoher Temperatur, geringer Luftfeuchte, wenig Luftaustausch und hohen Kohlenwasserstoffkonzentration. Interessanterweise kommen jedoch die höchsten Ozonkonzentrationen nicht in direkter Umgebung der Emissionsquelle vor, sondern eher in Reinluftgebieten, wie Wäldern. Dies liegt daran, dass in Wäldern meist wenig CO vorhanden ist, welches das entstehende Ozon zu CO_2 und O_2 verringert. Im Verkehr ist jedoch meist viel CO vorhanden. POCP wird üblicherweise in kg Ethen-Äquivalent ($\text{C}_2\text{H}_4\text{-Äq.}$) angegeben. Beachtet werden muss allerdings, dass die Ozonkonzentration witterungsabhängig ist und dass der lokale Charakter der Ozonbildung integriert wird.

Wassernutzung

Manche Produkte benötigen zur Herstellung Wasser. Teilweise wird dieses Wasser im Produkt chemisch gebunden, als Wasserdampf wieder an die Umgebung abgegeben, als Produktionsabwasser aufbereitet und der Produktion erneut zugeführt oder erst bei der Verwertung wieder abgegeben. Im betrachteten Fall wird für die Holzbetonmischung als Grundlage für den herzustellenden Stein Wasser benötigt.

Sekundärbrennstoffe

Sekundärbrennstoffe sind Abfallstoffe wie Altöl, Reifen, Tiermehl, Müll usw., die zur Verbrennung eingesetzt werden. Gerade beim Zement, bei dem Klinker gebrannt werden muss, finden Sekundärbrennstoffe Anwendung. Sie verringern zwar den Primärenergiebedarf, erhöhen jedoch gleichzeitig die Schadstoffemissionen. Sekundärbrennstoffe, auch Ersatzbrennstoffe genannt, werden in MJ je Produktmasse angegeben.

Abraum / Haldengüter

Abraum und Haldengüter sind in den Abfallgrößen zu finden. Mit ihnen bezeichnet man alle zu beseitigenden Materialien, die zur Rohstoffgewinnung notwendig sind. Aber auch das taube Gestein, Schlacke und Rotschlämme, die bei der Erzaufbereitung entstehen. Sie werden in kg je Produktmasse angegeben.

Siedlungsabfälle

Sie sind auch bekannt als hausmüllähnlicher Gewerbeabfall und werden in der Ökobilanz in kg je Produktmasse belegt. Die genauen Werte dieses Faktors sind in der technischen Anleitung für Siedlungsabfälle der 3. Abfallverwaltungsvorschrift (3. AbfVwV TA SiedlABf) zusammengefasst.

Sonderabfälle

In die Kategorie der Sonderabfälle zählen Stoffe, die zu Ihrer Entsorgung, der Sondermüllverbrennung oder Sondermülldeponierung gegeben werden müssen. Hierzu zählen Lackschlämme, Filterstäube, oder auch radioaktiver Müll aus der Erzeugung von Kernstrom oder der Herstellung von Brennelementen. Die Größe wird in kg je Produktmasse denunziert.

4.8 Datenquellen, Datenerhebung, Datenstruktur und -qualität

Fast alle in der Berechnung angegebenen Daten bzw. Werte stammen aus veröffentlichten Umweltproduktdeklarationen (EPDs) bzw. der Ökobau.dat Datenbank des BMVBS⁵, oder aus veröffentlichten Projektberichten z. B. aus dem Netzwerk Lebenszyklusdaten⁶ oder dem Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB). Lediglich die Aufwandswerte für Antriebsenergie, Transportenergie und Verbrennungsenergie stammen aus einem nicht veröffentlichten Bericht, dem Seibersdorfer Report OEFZS-A-4194. In diesem Bericht wurde eine Ökobilanz für Österreichische Holzspan-Mantelsteine und Holzspan-Dämmplatten erstellt; die darin angegebenen Werte werden zum Teil (besonders im Bereich der betrieblichen Energien) als Basiswerte angenommen.

⁵ Siehe <http://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/oekobaudat.html>

⁶ Siehe <http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/cms/content/site/lca/Home>

5. Basisdaten des Herstell- und Verarbeitungsprozesses

5.1 Der ILA-Stein

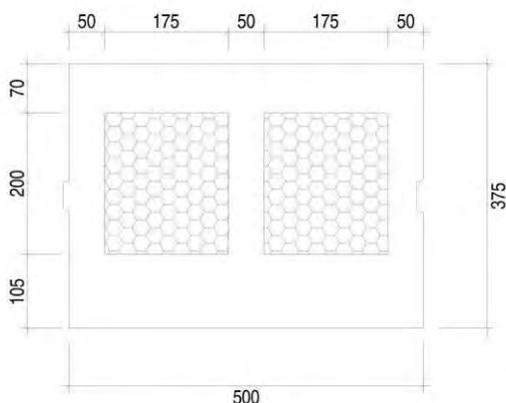
Für die ökologische Betrachtung wurden zunächst drei optimierte Modelle des hoch Wärme dämmenden ILA-Steines zugrunde gelegt, die in der 1. Projektphase hinsichtlich der Steingeometrie und der damit erzielbaren U-Werte optimiert wurden. Unterschieden wird hierbei zwischen den folgenden Modellen:

- Der Normalstein (I 37,5 N/20)
- Der Außeneckstein (S 37,5 A)
- Der Inneneckstein (S 37,5 I)

Die Außenecksteine besitzen einen ca. zwanzig auf zwanzig Zentimeter großen Hohlraum, der später bewehrt und mit Beton ausgegossen wird und somit die statischen Anforderungen des Systems erfüllt. Dieser Stein wird jedoch nicht nur in den Ecken eingebaut, sondern auch ca. alle drei laufende Meter Wandfläche, um die statischen Anforderungen zu erreichen. Die beiden Ecksteine sind baugleich und unterscheiden sich nur in der Ausrichtung der Isolierschicht um den Kernbeton. Zwischen den Ecken und den Wandsäulen wird der Normalstein eingebaut. Er hat zwei Kammern die jedoch nicht mit Beton ausgegossen werden, sondern die vom Werk aus mit einem Dämmmaterial bestückt werden.

Alle drei Steine haben Abmessungen von ca. 50,0 x 37,5 x 25 cm (Wanddicke 37,5 cm). Für die drei Modelle wurde vom Institut für Bautechnik eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erteilt unter der Zulassungsnummer Z-17.1-885.⁷

I 37,5 N/20



S 37,5 A

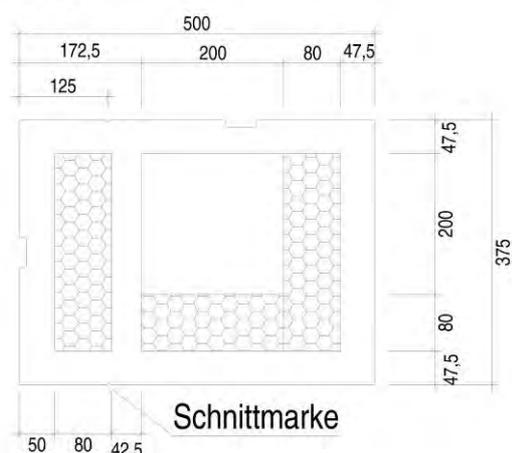


Abbildung 1: Steingeometrie für Normalstein (links) und Eckstein (rechts) gemäß abZ Z-17.1-885 (alle Angaben in [mm]) zur ökologischen Betrachtung der Steine, des damit hergestellten Außenwandsystems und verschiedener Szenarien im Herstell- und Verarbeitungsprozess (Standardberechnung)

⁷ Vgl. dazu Deutsches Institut für Bautechnik, Zulassung Z-17.1-885

Die Geometrie dieser Steine wurde zur Berechnung der Stoffströme und der Umweltwirkungen der Steine und des damit hergestellten Außenwandsystems (als Ausgangszustand) sowie für die Bewertung verschiedener Szenarien im Herstell- und Verarbeitungsprozess zugrunde gelegt.

Im Laufe des Forschungsprojektes wurden weitere Optimierungsschritte durchgeführt. Die aktuelle Steingeometrie (Wanddicke 50,0 cm) wurde für die Berechnung der Stoffströme und der Umweltwirkungen der Steine zur Vorbereitung der Erstellung einer Umweltproduktdeklaration verwendet.

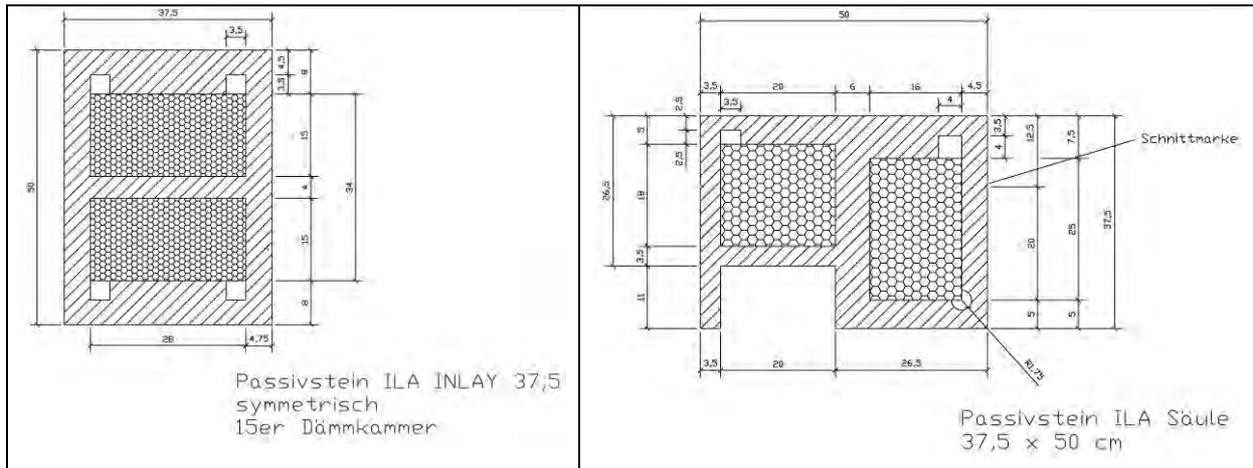


Abbildung 2: Steingeometrie für Normalstein (links) und Eckstein (rechts) gemäß Optimierung „Passivhaus-Stein“⁸ (alle Angaben in [cm]) für die abschließende ökologische Betrachtung der Steine

5.2 Rezeptur für die Steinherstellung

Die Hauptkomponenten des Steines sind Holzspäne, Zement, Wasser und Hilfsmittel. Als Inlay wird eine Holzfaserdämmplatte zugrunde gelegt. Auf die verdichtete Trockenmasse bezogen, ergeben sich folgende, ungefähre Mengenanteile:⁹

Holzspäne	30 – 50 M-%
Zement	35 – 45 M-%
Wasser	5 – 15 M-%
Hilfsmittel	0,5 – 1,5 M-%

Die zulässige Schwankungsbreite der wichtigen bauphysikalischen Daten wird durch unterschiedliche Mengenanteile der Hauptkomponenten ermöglicht. In jedem Fall ergibt die Zusammensetzung der Mischung 100 M-%.

⁸ Vgl hierzu Bericht Nr. 15106-x vom 18.12.2010 (Verf.: Frank Eßmann, tha Ingenieurbüro Eßmann, Mölln)

⁹ Für die ökologische Bewertung wurden die exakten Mengenangaben der hinterlegten Produktionsrezepturen zugrunde gelegt.

Holzspäne

Die Holzspäne oder auch Hobelspäne sind ein Sekundärprodukt, welches als Koppelprodukt bei der Holzverarbeitung anfällt. Dieses Koppelprodukt entsteht zwangsläufig und wird meistens als Abfallprodukt zur Verbrennung verwendet. Eine sinnvolle Anwendung findet es daher als einer der Hauptrohstoffe bei der Produktion des ILA Inlay Bausystems.

Bäume entnehmen im Laufe ihres Wachstums durch Photosynthese viel Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Form von CO₂ auf und speichern diesen bis zur endgültigen Verbrennung oder natürlichen Zersetzung. Die Kohlenstoffbindung in Holz senkt also somit vorübergehend die Bildung von Treibhausgasen. Aber nicht nur die Kohlenstoffspeicherung und die daraus resultierende Verlängerung des natürlichen Kohlenstoffkreislaufes wirkt sich bei den Holzspänen positiv auf dessen Umweltsrelevanz aus, sondern auch der so genannte Substitutionseffekt. Hier haben die Späne eine Doppelfunktion. Zum einen ersetzen sie Produkte, deren Herstellung höhere CO₂-Emissionen verursachen, zum anderen können Produkte aus Holz bzw. Holzspänen am Ende ihres Lebenszyklus energetisch genutzt werden, z.B. durch Verbrennung und substituieren somit fossile Brennstoffe.

Grundvoraussetzung für die genannten, positiven ökologischen Auswirkungen der Holzspäne ist jedoch, dass das Holz, aus dem die Späne gewonnen werden, aus einheimischer und nachhaltiger Forstwirtschaft stammt.¹⁰

Bei der Produktion des ILA Inlay Bausystems werden Holzspäne aus Resthölzern, wie Abschnitte, alten Paletten von Holz verarbeitenden Betrieben aus der Standortregion verwendet. Zur Einhaltung der Produktqualität werden ausnahmslos nur Späne aus gesundem Tannen- und Fichtenholz verarbeitet. Für die Standardberechnung wird eine durchschnittliche Transportentfernung von den Verarbeitungsbetrieben zum Herstellwerk von 30 km angenommen und berücksichtigt; für die Szenarionbetra- chung wurden 100 km zugrunde gelegt.

Zement

Zement ist der Rohstoff mit dem größten Mengenanteil. Es handelt sich im betrachteten Standardfall um einen Zement der Hauptzementart Portlandkompositzement (CEM II/A) mit einem Mengenanteil von 80-94% Portlandzementklinker (Hauptbestandteil K) und einer Zumahlung einer Hauptbestandteilkomponente von 6-20%. Als Zumahlung wird Hüttensand (Hauptbestandteil S) verwendet. Für die Druckfestigkeit kann eine Normfestigkeit von 32,5 MPa oder wahlweise von 42,5 MPa gewählt werden, jedoch muss eine hohe Anfangsfestigkeit (R) vorhanden sein. Daher findet in der betrachteten Produktion des ILA Inlay Bausystems also nur ein CEM II/A-S 32,5 R oder ein CEM II/A-S 42,5, nach DIN EN 197-01:08-2004 Anwendung.¹¹

¹⁰ Vgl. dazu <http://www.holzundklima.de/hintergrund.html>

¹¹ Vgl. dazu DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 197-01:08-2004 S.13-15

Dieser Zement besitzt zwei positive Eigenschaften in Bezug auf seine Umweltrelevanz. Zum einen tragen CEM II Zemente aufgrund ihres geringeren Klinkeranteils zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei, zum anderen ist der zugemahlene Hüttensand ein Reststoff der Stahlindustrie und wirkt somit als Sekundärrohstoff. Für die Standardberechnung wird als durchschnittliche Transportentfernung zwischen Rohstofflieferant und Herstellwerk eine Strecke von 30 km angenommen und berücksichtigt; für die Szenarionbetrachtung wurden 100 km zugrunde gelegt. Als Datengrundlage dient in diesem Fall die Ergebnisse des CEM II/A-S aus dem Projektbericht „Datenprojekt Zement“ vom Netzwerk Lebenszyklusdaten.¹²

Wasser

Der größte Anteil des Wasserverbrauches ist das Anmachwasser beim Mischvorgang für die Rohmasse, welches für die hydraulische Abbindung des Zements notwendig ist. Reinigungswasser für den Mischer wird wiederholt als Anmachwasser zugesetzt und verbleibt somit im Kreislauf. Ein deutlich geringerer Wasserverbrauch entsteht beim Planfräsen des Steines. Das Fräsen erfolgt als Nassfräsen. Das benötigte Wasser zur Staubvermeidung wird dem Fräskreislauf wieder erneut zugesetzt. Daher besteht hier nur ein sehr geringer Wasserverlust. Da Wasser jedoch nur geringe Auswirkungen auf die untersuchten Umweltfaktoren hat, wurde es in dieser Betrachtung nur bzgl. der Massenermittlung berücksichtigt, nicht aber bei der eigentlichen Berechnung umweltrelevanter Faktoren.

Hilfsmittel

Es werden nur zwei Hilfsmittel eingesetzt, wobei nur eines der Produkte einem wirklichen Hilfsmittel entspricht. Dieses dient als Mineralisierungshilfe. Das andere Produkt dient lediglich als Farbstoff und ist ein natürliches Eisenoxid-Pulver. Die beigemischten Mengen beider Produkte sind jeweils sehr gering, Mineralisierungshilfe (0,005 M. %) und Eisenoxid (0,007 M. %) und liegen daher jeweils unter der Systemgrenze von 1 M. %. Daher werden die Hilfsmittel in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Inlay

Ein wichtiger Faktor in Bezug auf die Wärmedämmung spielt das Inlay. Da das ILA Inlay System nicht nur hoch Wärme dämmende Eigenschaften haben soll, sondern auch für die Passivhaus-Bauweise geeignet sein soll, wurde ein Dämmkern gewählt, der diese Eigenschaften kompromisslos erfüllt und dabei noch sehr umweltfreundlich in seiner Herstellung ist.

Herkömmliche Mauerwerkssysteme besitzen meist eine Dämmung aus expandiertem Polystyrolhartschäum (EPS) wie „Styropor“ oder aus Mineralwolle wie Glaswolle und Steinwolle. Beide Materialien benötigen zur Herstellung Primärenergie aus nicht erneuerbaren Primärenergieträgern und lediglich einen geringen Anteil aus erneuerbaren Primärenergieträgern. Mineralwolle kann nach dem Rückbau als Zuschlagstoff für die Herstellung von Ziegeln oder Fliesen verwendet werden. EPS aus Baupro-

¹² Vgl. dazu Forschungszentrum Karlsruhe, Datenprojekt Zement im Netzwerk Lebenszyklusdaten, 2007 S. 21-22, 35-36

dukten findet hingegen höchstens Anwendung als Aussparungskörper im Betonbau und wird sonst in Abfallverbrennungsanlagen thermisch verwertet. Das Abfallprodukt aus dem Verbrennungsvorgang muss dann als Sonderabfall deponiert werden.¹³

Aufgrund der Einhaltung der vorgegebenen ökologischen Randbedingungen, einen Stein aus nachwachsenden Rohstoffen zu produzieren, hat man sich beim ILA Inlay System für einen Dämmkern aus Holzfaserdämmplatten entschieden. Bei dieser Bewertung für das ILA Inlay System wurde eine Holzfaserdämmung des Herstellers Kronoply, EPD-KRO-2009211-D, angenommen, da dieser Hersteller eine EPD vorweisen kann.¹⁴

Dieser Dämmstoff hat verschiedene positive Eigenschaften. Den Grundrohstoff zur Herstellung dieser Holzfaserdämmplatte bildet eine Holzmasse, die aus Zerfasern von Hackschnitzeln gewonnen wird. Laut Hersteller stammen diese Hackschnitzel ausschließlich aus Durchforstungsmaßnahmen von regionalen Wäldern, in einer Umgebung von maximal hundertfünfzig Kilometern, die nachhaltig bewirtschaftet werden. Somit zählt der Grundrohstoff Holz als regenerierbare Ressource. Auch die Herstellung erfolgt umweltschonend, indem zum Beispiel das produktionsbedingt anfallende Abwasser als Prozesswasser der Herstellung erneut zugeführt wird.¹⁵

Der Hersteller verwendet die in der Produktion anfallenden Abfälle als thermische Energieträger im firmeneigenen Biomassekraftwerk, um so Energie (Dampf, Wärme, Strom) für die Produktion zu erzeugen. Gleichzeitig wird zudem der fossile Energieträger Gas durch die Biomasse ersetzt, was zu einer deutlichen CO₂ Reduzierung führt. Zudem trägt die Holzfaserdämmung zu einem behaglichen Wohnklima bei, bedingt durch das Sorptionsvermögen der natürlichen Holzfasern. Trotz der Eigenschaft, große Feuchtigkeitsmengen auf- und zu einem späteren Zeitpunkt wieder abzugeben, hat dieses Produkt eine hervorragende Dämmeigenschaft.

Für die Standardbetrachtung wurde ein Dämmkern aus hardboard 100 Holzfaserdämmplatten sowohl beim Normalstein (I 37,5 N/20) als auch bei den beiden Ecksteinen (S 37,5 A und S 37,5 I) berücksichtigt, da es sich dabei um eine druckfeste Holzweichfaserdämmung handelt, deren Handhabung im Produktionsprozess Vorteile bietet (Formstabilität beim Zuschneiden, Einbau in die Steinkammern, Lagestabilität usw.). Für die abschließende Betrachtung des optimierten „Passivhaus-Steins“ wurde eine flexible Holzweichfaserdämmung zugrunde gelegt.

¹³ Vgl. dazu <http://www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Alle> (Polystyrol EPS, Glaswolle, Steinwolle)

¹⁴ Vgl. dazu IBU, Institut Bauen und Umwelt e. V. Umweltproduktdeklaration, Kronotherm Holzfaserdämmung

¹⁵ Vgl. dazu IBU, Institut Bauen und Umwelt e. V. Umweltproduktdeklaration, Kronotherm Holzfaserdämmung S. 7-8

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu geeigneten ökologischen Dämmstoffen an der TU Darmstadt wurden bei der ökologischen Betrachtung nicht berücksichtigt, da für diese Materialien keine Ökodatensätze bzw. EPDs vorliegen.¹⁶

5.3 Betrachteter Prozess der Steinherstellung

Die Rohstoffe werden zusammengeführt und solange durchgemengt, bis eine homogene Masse entsteht. Die Masse wird in die Formen eines Steinfertigers eingebracht, zugeformt und verdichtet. Der Rohstein ist produziert. Restmengen und Reinigungswasser werden dem Produktionskreislauf erneut zugeführt und werden daher nicht extra in der Bilanz erfasst.

Nach der vordefinierten Ansteifungszeit wird der Stein durch Planfräsen nachbehandelt. Das Wasser für das Fräsen befindet sich in einem eigenen Kreislauf und wird nicht zusätzlich bilanziert. Anschließend wird der Stein mit dem Dämmkern (Inlay) bestückt. Auch hier werden Restmengen der Bestückung erneut zugeführt. Nun wird vom Fertigprodukt gesprochen.

Es folgt anschließend noch die Palettierung und Verpackung des Fertigproduktes mittels Polyethylenschumpffolie. Nach diesem Vorgang ist man beim Endprodukt angelangt, was nun bis zum Erreichen der Endfestigkeit zwischengelagert wird. Achtundzwanzig Tage nach der Herstellung ist das Produkt ab Werkstor auslieferungsbereit.

Ausschussware und Bruchware wird so aufbereitet, dass sie je nach Zustand in einen der Abschnitte wieder zugeführt werden kann.

Die folgende Abbildung stellt den Herstellungsvorgang (*cradle to gate*) des ILA-Inlay Steines dar, der für die ökologische Betrachtung in die Tabellenkalkulation umgesetzt wurde.

¹⁶ Vgl. dazu Zwischenbericht TUD zur 2. Projektphase

Ökologische Bewertung eines einschaligen, hochwärmedämmenden, massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

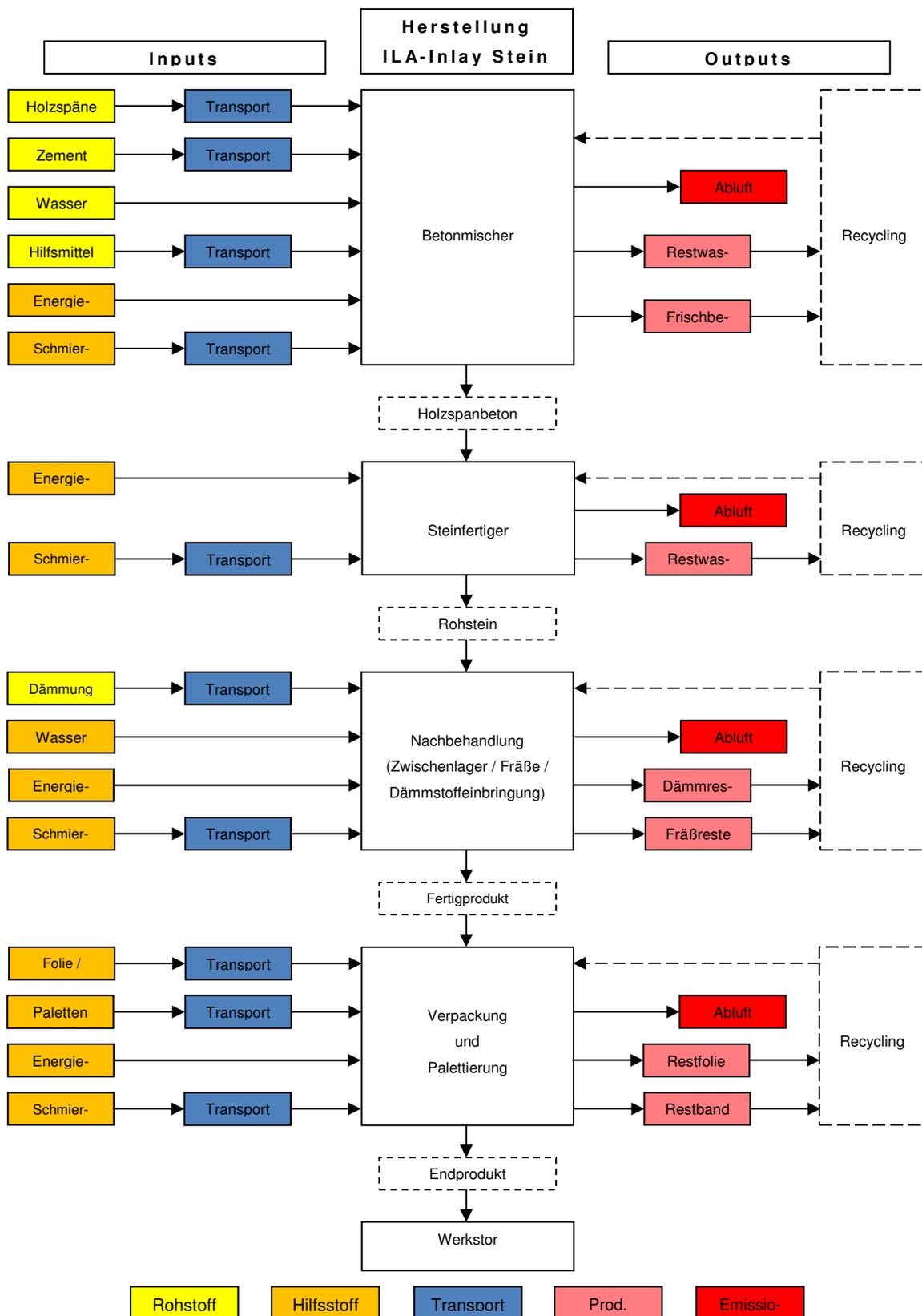


Abbildung 3: Herstellungsprozess ILA-Inlay Stein

5.4 Betrachtete Mauer- und Putzmörtel

Im Folgenden wird beim Mörtel zwischen zwei Kategorien entschieden. Zum einen der Klebemörtel (Mauermörtel-Dünnbettmörtel) zwischen den Steinreihen und zum anderen der Putzmörtel für den Innen- und Außenputz.

Mauermörtel / Dünnbettmörtel

Da das ILA-Inlay System ein Plansteinsystem ist, bei dem es um hohe Maßgenauigkeit und Ebenheit geht, Höhenabweichung +/- 1mm, kommt als Bindemörtel nur ein Dünnbettmörtel in Frage. Dieser wird mithilfe eines Mörtelschlittens oder durch das Tauchverfahren aufgebracht. In dieser Betrachtung wird eine Auftragsdicke von zwei Millimetern angenommen. Dies entspricht dem Mittelwert nach DIN 1053-1:1996-11.¹⁷

Bei der ökologischen Betrachtung wurden stellvertretend die Daten für den Dünnbettmörtel aus der EPD des Herstellers Baunit GmbH der Kategorie Sondermauermörtel angenommen.¹⁸ Diese EPD wurde auf der Basis einer Muster-EPD des Industrieverbandes Werkmörtel erstellt und stellt somit eine Durchschnitts-EPD dar.

Putzmörtel

Der vorliegenden Berechnung wurde zugrunde gelegt, dass das Mauerwerk sowohl von außen als auch von innen verputzt wird.

Innen wird ein Innenleichtputz in einer Putzdicke von 15 mm auf das ILA Inlay System aufgetragen Außen wird ein Außenleichtputz in einer Dicke von 20 mm auf das Mauerwerk aufgebracht. Als Szenario wurde ein Dämmputz mit einer Dicke von 50 mm und eine abschließende Lage Normalputz mit einer Dicke von 5 mm betrachtet. Für diese Produkte wurden folgende Annahmen getroffen und EPDs¹⁹ zugrunde gelegt:

- Leichtputz des Herstellers Baunit GmbH; EPD-BMT-2009231-D²⁰
- Dämmputz des Herstellers quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG; EPD-QMX-2009231-D²¹
- Normalputz des Herstellers Baunit GmbH; EPD-BMT-2009211-D²²

¹⁷ Vgl. dazu DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 1053-1:1996-11 S.24

¹⁸ Vgl. dazu IBU, Institut Bauen und Umwelt e. V. Umweltproduktdeklaration, Mineralische Werkmörtel, Mauermörtel, Sondermauermörtel S 3

¹⁹ EPDs auf der Basis der Muster-EPDs des Industrieverbandes Werkmörtel IWM, daher als Durchschnitts-EPD zu betrachten

²⁰ Vgl. dazu IBU, Institut Bauen und Umwelt e. V. Umweltproduktdeklaration, Mineralische Werkmörtel, Putzmörtel Leichtputz

²¹ Vgl. dazu IBU, Institut Bauen und Umwelt e. V. Umweltproduktdeklaration, Mineralische Werkmörtel, Putzmörtel-Dämmputze

²² Vgl. dazu IBU, Institut Bauen und Umwelt e. V. Umweltproduktdeklaration, Mineralische Werkmörtel, Putzmörtel, Normalputz

6. Berechnungsergebnisse Stein – Standard

6.1 Standard-Normalstein (Rohstoffe und innerbetriebliche Energien)

Für die Berechnung der Umweltwirkungen wurde ein Standardsystem für beide Steintypen (Normalstein und Eckstein) festgelegt, welches als Datenbasis dient (siehe Abbildung 1). Diese Grunddatenbasis wurde um die jeweiligen Randbedingungen und Szenarien erweitert und modifiziert. Die Berechnung des jeweiligen Standardsteins bezieht sich auf die Herstellung des Steines. Sie beinhaltet die Rohstoffe inklusive ihrer Gewinnung und Vorketten (Holzspäne ausgenommen), den Vorgang der Herstellung selbst, sowie die Verpackung und den innerbetrieblichen Transport bis zum Werkstor. Aufgrund der geringen Auswirkungen bzw. des zu geringen Anteils wurden die Umweltauswirkungen der Rohstoffe Wasser und Hilfsmittel nicht berücksichtigt.

In den Berechnungen wurde die Beheizung einer kaufmännischen und technischen Verwaltung nicht mitbetrachtet. Ebenso wurden keine Rückvergütungen (Gutschriften) aus so genannten End-of-Life – Betrachtungen (Recycling bzw. energetische oder thermische Verwertung nach Ende der Nutzungsphase) berücksichtigt. Bei dem Standardsystem wurde für den Transport der Holzspäne, des Zements und des Inlays jeweils eine durchschnittliche Entfernung von 30 km angenommen und zugrunde gelegt.

Normalstein

Die umweltrelevanten Faktoren für die Rohstoffe inkl. deren Vorketten (mit Ausnahme der Holzspäne) und der darin enthaltenen Transportanteile pro Kubikmeter des fertigen Normalsteins (I 37,5 N/20) sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Darin wurden die Energien für elektrische Antriebe (Mischer, Fördereinrichtungen, Verpackung usw.), innerbetriebliche Transporte und Beheizung der Produktionshalle nicht berücksichtigt.

Umweltauswirkung pro m ³						
	Rohstoffe			Transport		
	Holzspän	Zement	Inlay	Holzspäne	Zement	Inlay
PE, nicht erneuerbar (in MJ)	3,62E+02	7,48E+02	2,14E+03	2,47E+00	5,26E+00	1,60E+00
PE, erneuerbar (in MJ)	5,01E+00	1,81E+01	1,59E+03	2,68E-03	5,70E-03	1,56E-03
GWP 100 Jahre (in kg CO ₂ -Äqv.)	9,23E+00	1,41E+02	3,92E+00	1,76E-01	3,75E-01	1,03E-01
ODP (in kg R11-Äqv.)	1,31E-06	3,11E-06	1,85E-06	2,92E-10	6,22E-10	1,70E-10
AP (in kg SO ₂ -Äqv.)	1,99E-02	2,42E-01	2,87E-01	1,03E-03	2,19E-03	5,99E-04
EP (in kg Phosphat-Äqv.)	2,73E-03	3,22E-02	3,90E-02	1,78E-04	3,78E-04	1,04E-04
POCP (in kg Ethen-Äqv.)	2,40E-03	3,22E-02	2,89E-02	7,78E-05	1,66E-04	4,54E-05

Tabelle 1: Umweltauswirkungen (Rohstoffe+Transport) pro m³ ILA-Inlay Normalstein Standard

Ökologische Bewertung eines einschaligen, hochwärmedämmenden, massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

Der Transportanteil an den Umweltwirkungen ist sehr gering (< 1 %). Das Inlay aus Hardboard-Holzweichfaserplatte beeinflusst mit ca. = 66 % das Ergebnis deutlich. Dies ist auf die erhöhten Bindemittelanteile zum Erzielen der Druckfestigkeit und den dafür erforderlichen Primärenergieaufwand zurückzuführen.

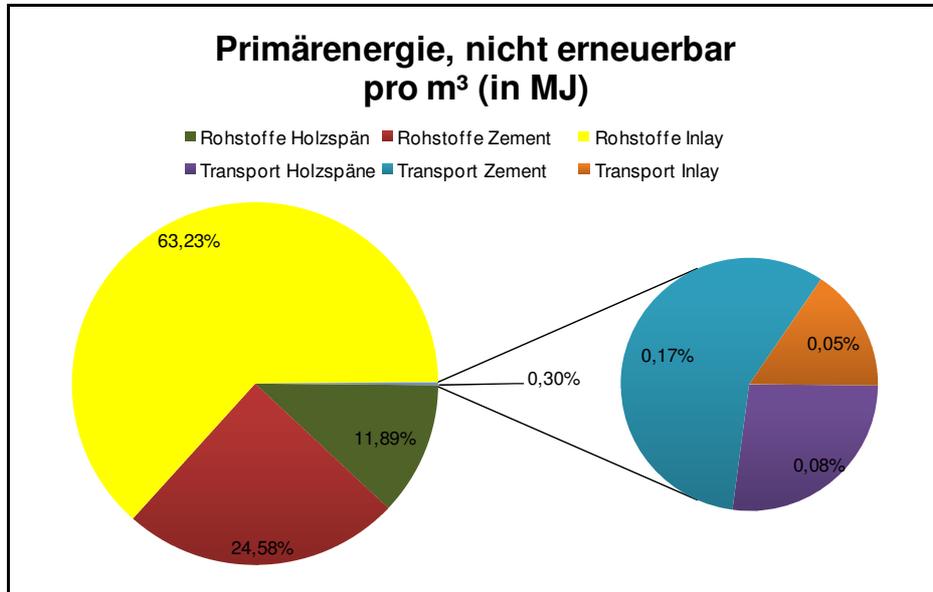


Abbildung 4: Primärenergie, nicht erneuerbar (Rohstoffe+Transport) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Auch der Primärenergieverbrauch aus erneuerbarer Ressourcen des Inlays dominiert.

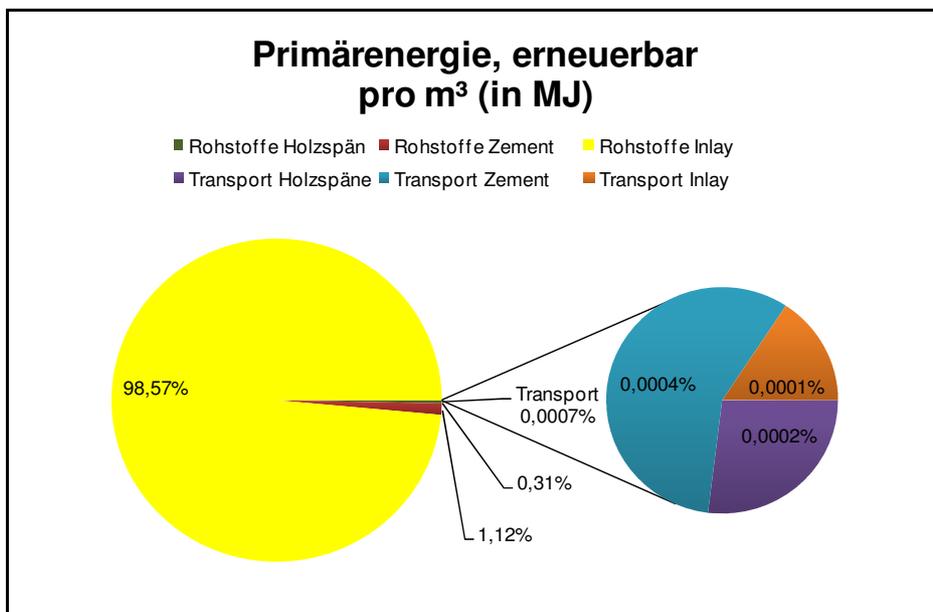


Abbildung 5: Primärenergie, erneuerbar (Rohstoffe+Transport) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Bei der Betrachtung des Treibhauspotenzials (GWP 100) wird festgestellt, dass hier der Rohstoff Zement mit 91 % der Hauptverursacher des Treibhauspotenziales ist. Eine deutlich geringere Auswir-

kung haben die Holzspäne (= 6 %), das Inlay (= 2,5 %) und der Transport (= 0,5 %). Der hohe Anteil beim Rohstoff Zement wird durch den Brennvorgang des Zementklinkers verursacht, bei dem fossile Energieträger und Sekundärbrennstoffe eingesetzt werden. Durch den gezielten Einsatz von Sekundärbrennstoffen bei der Zementherstellung werden der Bedarf an Primärenergie und damit die CO₂-Emissionen deutlich verringert. Jedoch entstehen bei deren Verbrennung ebenso relevante Treibhausgase, die bei der GWP Betrachtung wiederum berücksichtigt werden mussten. Je höher der Zementklinkeranteil ist, desto höher ist das Treibhauspotenzial.

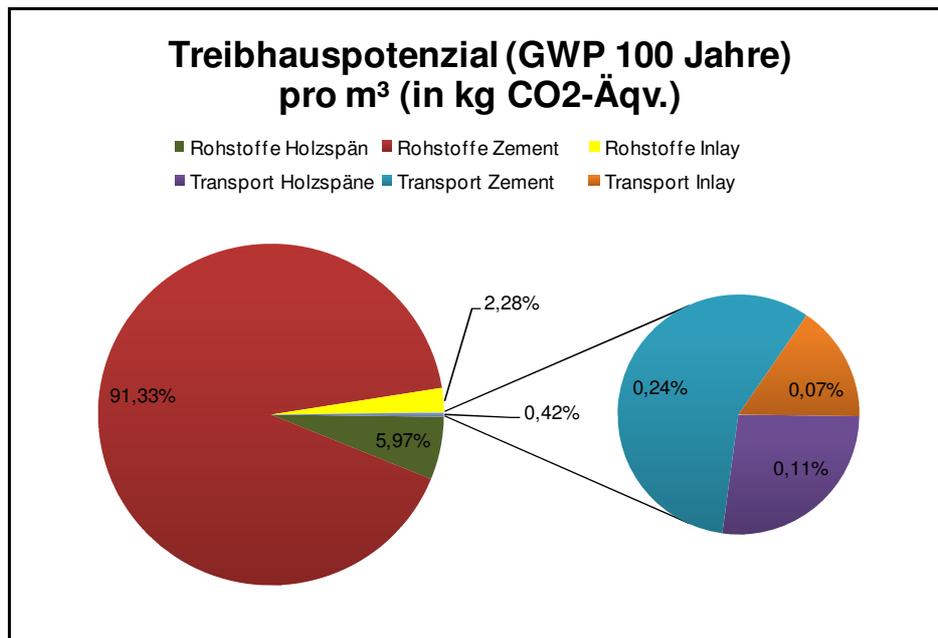


Abbildung 6: GWP 100 (Rohstoffe+Transport) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Beim Ozonabbaupotenzial sind die Gewichtungen gleichmäßiger verteilt. Hier nimmt der Zement die Hälfte (= 50 %) der Gesamtbelastung ein; das Inlay und die Holzspäne liefern jeweils etwa ein Viertel. Bei den Spänen und dem Inlay entstehen die Ozon abbauenden Luftschadstoffe überwiegend durch den Einsatz schwerer Geräte zur Holzernte, aber auch durch gegebenenfalls verwendeten Dünger.

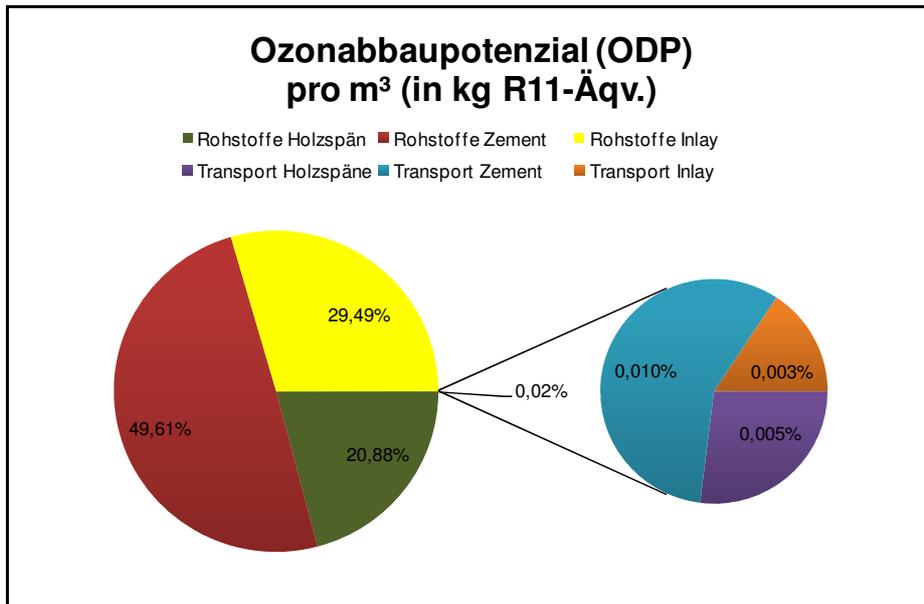


Abbildung 7: ODP (Rohstoffe+Transport) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Der Rohstoffanteil vom Inlay macht bei der Versauerung und der Eutrophierung etwas über die Hälfte aus. Etwas weniger bringt der Zement mit 44 % mit sich. Deutlich geringer ist der Anteil der Holzspäne mit ca. 4 %.

Der hohe Einfluss des Inlays auf das Gesamtergebnis bei den untersuchten Faktoren wird u.a. dadurch verursacht, dass nur die EPD-Daten der Produktion des Inlays angewendet wurden (bis zum Werkstor). In den zugrunde gelegten EPDs sind jedoch auch Betrachtungen zum Lebenszyklusende dokumentiert, die mit entsprechenden Gutschriften für die Verwertung (*End of Life*) des Produktes z.B. thermisch berücksichtigt wurden. Diese Daten konnten in der ökologischen Betrachtung aufgrund der festgelegten Bilanzgrenzen nicht verwendet werden.

Außerdem basieren die Daten der Holzspäne aus Ableitung der Ergebnisse der Schnittholzproduktion und beinhalten nicht die Vorketten der forstlichen Produktion und Transport des Holzes. Bei den Ergebnissen des Inlays wurde dies mit eingerechnet. Dies gilt es auch für die weiteren untersuchten Umweltfaktoren zu beachten.

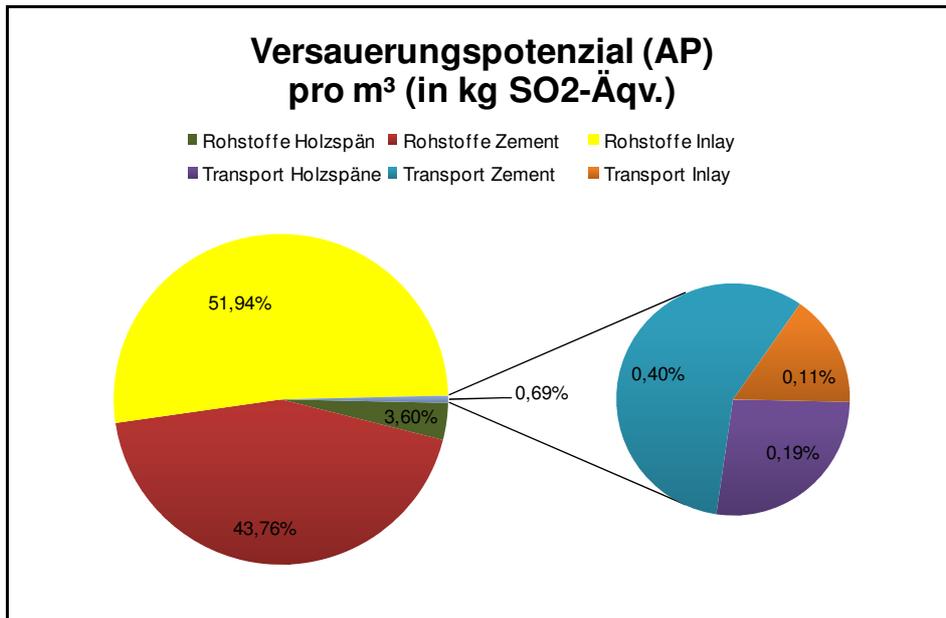


Abbildung 8: AP(Rohstoffe+Transport) - ILA-Inlay Normalstein Standard

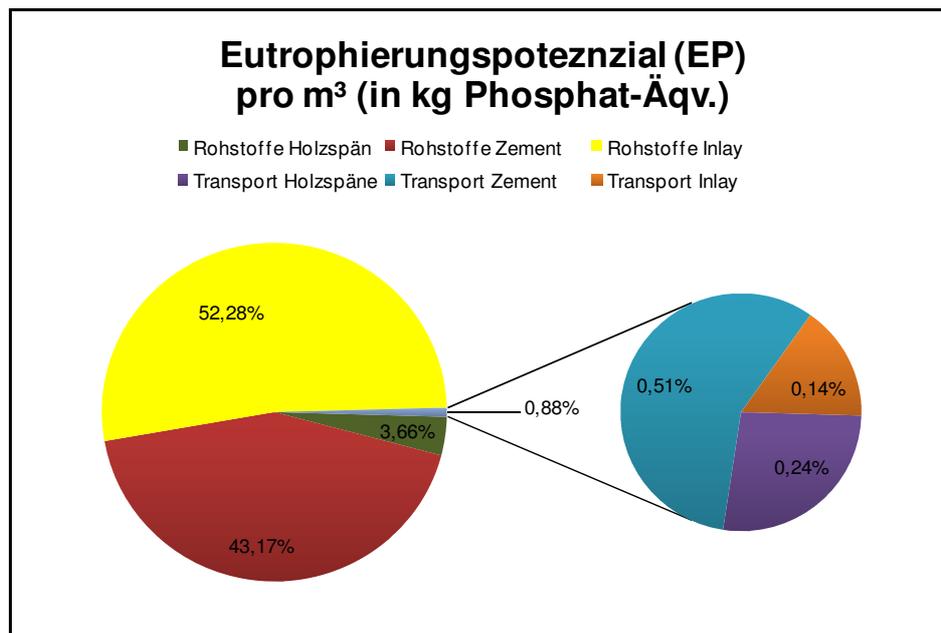


Abbildung 9: EP (Rohstoffe+Transport) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Beim Sommersmogpotenzial macht der Rohstoffanteil des Zements rund die Hälfte aus. Etwas weniger bringt das Inlay mit 45 % mit sich. Deutlich geringer ist wieder der Anteil der Holzspäne mit ca. 4 %

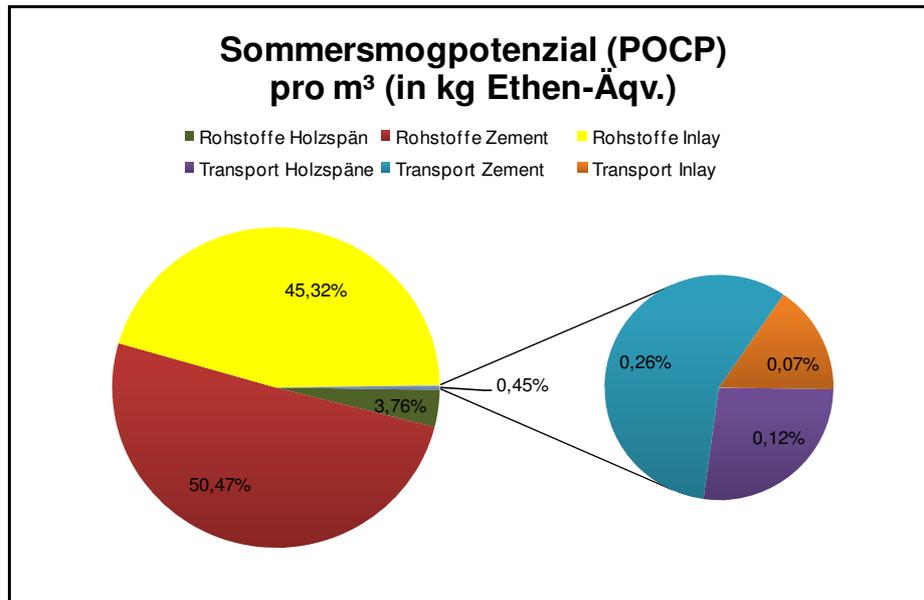


Abbildung 10: POCP(Rohstoffe+Transport) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die Holzspäne auf die Umweltwirkungen den geringsten Einfluss haben. Die Parameter des hydraulischen Bindemittels - Art des Zementes und Bindemittelanteil pro m³ Stein – sind für die ökologischen Eigenschaften von größerer Bedeutung. Die Art des verwendeten Inlays spielt für die Gesamtbetrachtung die dominanteste Rolle.

Eckstein

Da für das Wandbausystem sowohl der Normalstein als auch die Ecksteine notwendig sind, wurden auch diese untersucht. Da die Symmetrie der Ecksteine identisch ist, wurde hier nicht unterschieden zwischen Innen- oder Außeneckstein. In der Herstellung unterscheiden sich die Ecksteine zum Normalstein nur geringfügig. Die Umweltauswirkungen beim Eckstein liegen zwischen zwei und zehn Prozent höher gegenüber dem Normalstein.

Innerbetriebliche Energien

Zu den Ergebnissen aus den Rohstoffen kommen nun noch die Umweltauswirkungen aus den Werten der benötigten Energien hinzu. Es wird unterschieden zwischen der Transportenergie für innerbetrieblichen Transport (Stapler, Radlader, etc.), Verbrennungsenergie für die Beheizung der Produktionshalle und evtl. der Rohstoffe (Ölheizung) und der elektrischen Antriebsenergie für die Mischanlage, den Fertiger, Palettierung und Verpackung, sowie Allgemeinstrom für Beleuchtung.

Da noch keine exakten Werte für die Herstellung vorliegen, wurden für die Energiewerte Literaturangaben einer österreichischen, nicht veröffentlichten Ökobilanz für Holzspan-Mantelsteine angenommen. Die Literaturwerte beziehen sich auf eine Tonne Holzspanmantelsteine. Diese Berechnung er-

folgt allerdings für einen Kubikmeter Fertigsteine. Für die Umrechnung der Energiewerte von Tonne auf Kubikmeter wurde jeweils das Gesamtgewicht für den reinen Holzspanbeton pro Kubikmeter angenommen. Das Gewicht des Inlays wurde nicht berücksichtigt.

6.2 Einfluss der Randbedingungen - Szenarienbetrachtung

Bestimmte Parameter sind in der Standardbetrachtung des Normalsteins und der Ecksteine variabel. Daher wurden verschiedene Szenarien zum Herstell- und Verarbeitungsprozess betrachtet und weitere Berechnungen mit veränderten Parametern erstellt. Die veränderten Randbedingungen wurden zur Vereinfachung nur auf den Normalstein angewendet, da dieser den größeren Anteil im System ausmacht.

Variable Zementart

Als Alternative beim Zement wurden die beiden Zementarten CEM II / A-LL und CEM II / B-S in Betracht gezogen (Transportentfernungen blieben unberücksichtigt).

Beim A-LL Zement wird kein Hüttensand zugemahlen, sondern Kalkstein. In bestimmten Regionen gibt es z.B. keine Hüttenwerke, sodass Hüttensand mit langen Transportstrecken betrachtet werden müsste.

Beim CEM II / B-S wird wie beim Standardzement Hüttensand zugemahlen, allerdings nicht mit einem Anteil von 6-20 % sondern von 21-35 %. Durch den höheren Anteil an Hüttensand wird entsprechend weniger Portlandzementklinker benötigt, nämlich nur 65-79 %. Für die Betrachtung wurde für beide Zementarten mit einem Mittelwert für die Zumahlmenge gerechnet.

Die Ergebnisse dieses Szenarios zeigen, dass durch den Einsatz von Kalksandstein statt Hüttensand, die Ergebnisse der Umweltauswirkungen verbessert werden. Noch deutlicher wird es beim B-S Zement: durch den deutlich geringeren Anteil an Portlandzementklinker ist der Primärenergiebedarf deutlich geringer und somit sind die Werte der restlichen Umweltauswirkungen ebenfalls deutlich niedriger.

Prinzipiell lässt sich feststellen, dass die Umweltauswirkungen durchschnittlich rund sechs Prozent günstiger sind beim B-S Zement, gegenüber den Werten des A-S Zementes. Vorausgesetzt wurde bei dieser Szenariobetrachtung, dass die Zementmenge pro m³ Stein sich beim Einsatz dieses Zementes nicht erhöht.

Variable Transportentfernungen

Bei dieser Untersuchung wurde jeweils abwechselnd für die Rohstoffe Holzspäne und Zement eine Transportentfernung von 100 km angenommen, wobei bei dem jeweils anderen Rohstoff die Standardentfernung von 30 km beibehalten wurde. Das Inlay wurde nicht betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Transportentfernung eine sehr geringe Auswirkung auf die Umwelteigenschaften hat (< 1 %).

Variable Inlay

Das Ziel, einen Stein aus nachwachsenden Rohstoffen zu produzieren, widerspricht eigentlich der folgenden Betrachtung, da hierfür statt der Holzweichfaserdämmplatte als Inlay ein Dämmkern aus expandiertem Polystyrol (EPS). Der bekannteste Vertreter für das EPS ist unter dem Markennamen Styropor des Herstellers BASF auf dem Markt vertreten. Da das Material aber regional überall verfügbar ist und gute Dämmeigenschaften hat, wurde es dennoch zum Vergleich herangezogen.

Als weitere ökologische Alternative wurde eine flexible Holzweichfaserdämmung des Herstellers Komotherm zugrunde gelegt. Beim Vergleich wurden keine Transportstecken für die verschiedenen Rohstoffe einberechnet.

Anhand des Vergleichs des Primärenergiebedarfs wird deutlich, dass der Inlaystein mit einer druckfesten Holzweichfaserplatte hardboard 100 die höchsten Umweltwirkungen aufweist. Beim EPS sieht man deutlich, dass fast ausschließlich nicht erneuerbare Primärenergie zum Einsatz kommt. Bezogen auf die nicht erneuerbaren Primärenergieträger ist eine flexible Holzweichfaserdämmung am besten.

Auch die anderen Umweltwirkungen sind bei dieser Variante besser, am Beispiel der CO₂-Emissionen deutlich zu erkennen.

Zusammenfassung der Szenariobetrachtung:

- **Ein Zement mit geringerem Klinkeranteil wirkt sich günstiger auf die Umweltwirkungen aus.**
- **Die Transportentfernungen Rohstoff-Herstellwerk spielen nur eine untergeordnete Rolle.**
- **Für das Inlay sollte ein Dämmstoff aus nachwachsenden Rohstoffen mit geringem Bindemittelanteil verwendet werden.**

7. Berechnungsergebnisse Wand – Standard

Im Anschluss wurden die umweltrelevanten Auswirkungen, die beim Verbau des Systems zusätzlich zur Produktion entstehen, betrachtet. Hierzu gehören z.B. die Umweltauswirkungen durch den Mörtel, den Putz und die Bewehrung bzw. den Beton, welcher in die Ecksteine eingebracht wird. Auch hier geht man wieder von einem Standardsystem aus, das ebenfalls mit verschiedenen Szenarien modifiziert wird, welche die Umwelteigenschaften nochmals deutlich beeinflussen können.

Ökologische Bewertung eines einschaligen, hochwärmedämmenden, massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

Nicht berücksichtigt wurde der Energieaufwand für Geräte, Transporte etc. Es wurden nur die Komponenten selbst betrachtet. Aufgrund der geringen Abweichung zwischen dem Normalstein und den Ecksteinen wurde zur Vereinfachung nur der Normalstein angenommen. Das Standardsystem bezieht sich auf einen Quadratmeter Wand des Normalsteins. Zwischen den Steinen wird Dünnbettmörtel aufgebracht. Anschließend wird von innen und außen ein Putzsystem appliziert.

Beim Eckstein kommen zusätzlich noch die Bewehrung und der Ortbeton hinzu. Da nur der Normalstein betrachtet wurde, aber in einem Quadratmeter Wand dennoch ein gewisser Anteil an Beton und Bewehrung für die Säulen der Ecksteine vorhanden ist, wurden die Ergebnisse für diese beiden Komponenten nach dem durchschnittlichen Anteil angenommen. Statt der Anteile der Produktionsergebnisse der Ecksteine wurden die des Normalsteines zugrunde gelegt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die hier errechneten und angenommenen Werte etwas höher sind als die tatsächlichen. Daher ist man mit diesem Ergebnis auf der sicheren Seite.

7.1 Standardsystem

Im Standardsystem kommen pro Quadratmeter Wand zu den Umwelteigenschaften des Steines noch die Ergebnisse des Dünnbettmörtels, des Außen- und Innenputzes und für den durchschnittlichen Säulenanteil die Ergebnisse des Ortbetons C20/25 und der notwendigen Bewehrung. Das Putzsystem besteht insgesamt aus drei Lagen. Innen wird eine Lage Leichtputz aufgebracht. Außen kommt auf die Steinwand ein zweilagiges Leichtputzsystem.

Umweltauswirkungen pro m² Wand im Vergleich			
	ILA Inlay Bausystem (Normalstein)		
	Stein	Aufbau	Gesamt
PE, nicht erneuerbar pro m ² (in MJ)	7,37E+02	1,40E+02	8,76E+02
PE, erneuerbar pro m ² (in MJ)	3,61E+02	1,04E+01	3,72E+02
GWP 100 Jahre pro m ² (in kg CO ₂ -Äqv.)	3,84E+01	1,16E+01	5,00E+01
ODP pro m ² (in kg R11-Äqv.)	1,65E-06	5,60E-07	2,21E-06
AP pro m ² (in kg SO ₂ -Äqv.)	1,37E-01	3,05E-02	1,68E-01
EP pro m ² (in kg Phosphat-Äqv.)	1,89E-02	5,38E-03	2,43E-02
POCP pro m ² (in kg Ethen-Äqv.)	1,57E-02	3,73E-03	1,94E-02

Tabelle 2: Übersicht Umweltauswirkungen (Stein-Aufbau) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Die Auswertung zeigt dass der Aufbau (Mörtel, Putz, Kernbeton und Bewehrung) deutlich geringere Umweltauswirkungen hat als die eigentlich Steinproduktion, bezogen auf einen Quadratmeter fertige Wand.

Beim Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Ressourcen benötigt die Steinproduktion rund 80% der Gesamtenergie. Beim Energiebedarf aus erneuerbaren Ressourcen liegt der Anteil der Steinproduktion bei über 97%.

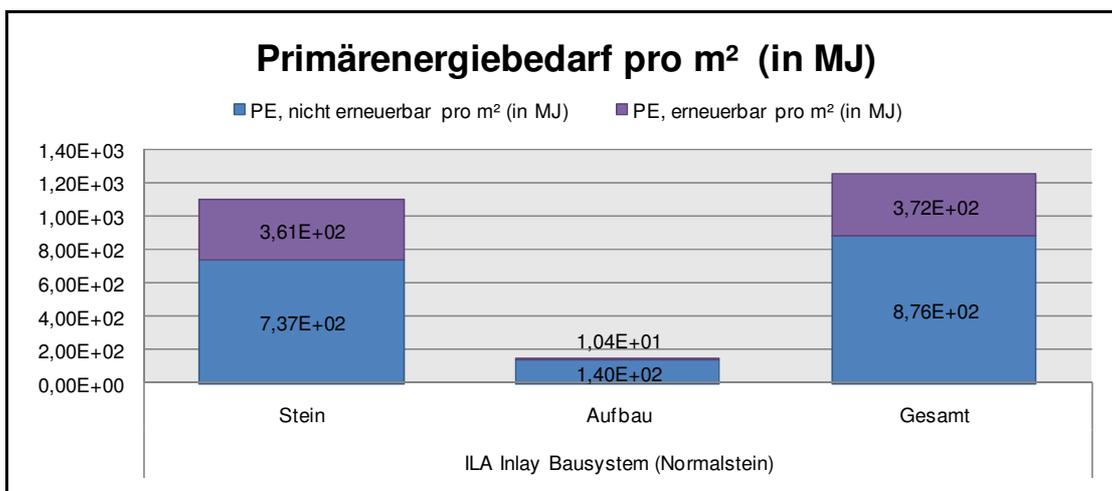


Abbildung 11: Primärenergiebedarf (Stein-Aufbau) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Bei den restlichen untersuchten umweltrelevanten Faktoren hat die Steinproduktion mit rund 70-80 % den größeren Anteil gegenüber dem Systemaufbau.

7.2 Einfluss der Randbedingungen - Szenarienbetrachtung

Bestimmte Parameter sind in der Standardbetrachtung des Wandsystems variabel. Daher wurden verschiedene Szenarien betrachtet und weitere Berechnungen mit veränderten Parametern erstellt.

Variable Leichtbeton

Im Standardsystem wurde als Beton in den Ecksteinen ein Ortbeton C 20/25 angenommen. Im folgenden Szenario, wird dieser Beton durch einen Leichtbeton ersetzt.

Es zeigt sich, dass Leichtbeton die Umweltauswirkungen der Wand nur marginal verbessert. Da damit jedoch der Gesamt-U-Wert des Wandaufbaus infolge der reduzierten Betonrohddichte und der verbesserte Wärmeleitfähigkeit optimiert werden kann, sollte daher in der Praxis der Aufbau der Säulen nach Möglichkeit mit Leichtbeton erfolgen.

Szenario Dämmputz

Zur Verbesserung des Gesamt-U-Wertes der Wand wurde die Verwendung eines Dämmputzes WLG 070 anstatt des Außenleichtputzes betrachtet. Die Putzdicke wurde mit 5 cm angenommen.

Umweltauswirkungen pro m ² Wand im Vergleich			
	Putzsystem		
	Leichtputz	Dämmputz	Differenz
PE, nicht erneuerbar pro m ² (in MJ)	8,76E+02	1,17E+03	2,95E+02
PE, erneuerbar pro m ² (in MJ)	3,72E+02	3,71E+02	-1,66E-01
GWP 100 Jahre pro m ² (in kg CO ₂ -Äqv.)	5,00E+01	6,42E+01	1,42E+01
ODP pro m ² (in kg R11-Äqv.)	2,21E-06	2,51E-06	2,95E-07
AP pro m ² (in kg SO ₂ -Äqv.)	1,68E-01	1,89E-01	2,09E-02
EP pro m ² (in kg Phosphat-Äqv.)	2,43E-02	2,63E-02	2,05E-03
POCP pro m ² (in kg Ethen-Äqv.)	1,94E-02	2,27E-02	3,30E-03

Tabelle 3: Umwelteigenschaften (Szenario Dämmputz) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Beim Dämmputz-System lässt sich feststellen, dass der Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Energien rund 25 % höher ist als beim Leichtputz. Dabei muss berücksichtigt werden, dass man durch den Dämmputz einen besseren Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) im Vergleich zum Standardwandaufbau erhält. Dadurch benötigt man in der Nutzungsphase mit einem Dämmputz-Wandaufbau weniger Primärenergie als bei einem Haus mit Standardwandaufbau.

Die Verbesserung des U-Wertes durch den Dämmputz und die ökologische Amortisation des erhöhten Primärenergiebedarfs und der CO₂-Emissionen im Vergleich zur Einsparung während der Nutzungszeit wurden nicht betrachtet.

Bei den übrigen umweltrelevanten Faktoren liegt das Dämmputz System 7-22 % höher als das Leichtputzsystem.

7.3 Abfälle

Die bisher untersuchten Umweltauswirkungen bezogen sich nur auf Emissionen. Meist fallen aber bei der Produktion (von Produkten) auch noch Abfälle an. Hierzu gehören die Wassernutzung, Sekundärbrennstoffe, Abraum, Siedlungsabfälle und Sondermüll inkl. radioaktiven Mülls. Zur Vereinfachung wurde hier nur der Normalstein untersucht mit den Normalbedingungen.

Abfälle pro m ² im Vergleich			
	Abfälle		
	Stein	Aufbau	Gesamt
Wassernutzung pro m ² (in kg)	4,33E+00	5,02E+01	5,45E+01
Sekundärbrennstoffe pro m ² (in MJ)	6,59E+01	1,41E+01	8,00E+01
Abraum / Haldegüter pro m ² (in kg)	1,53E+02	8,25E+01	2,36E+02
Siedlungsabfälle pro m ² (in kg)	1,91E-03	9,65E-02	9,84E-02
Sondermüll pro m ² (in kg)	1,43E-01	3,27E-02	1,76E-01

Tabelle 4: Übersicht Abfälle (Stein-Aufbau) - ILA-Inlay Normalstein Standard

Bei den Abfällen ist die Gewichtung zwischen Stein und Aufbau je nach Abfallgröße sehr unterschiedlich.

8. Berechnungsergebnisse Stein – optimiert („Passivhaustein“)

Für die Berechnung der Umweltwirkungen des optimierten Steines auf der Basis der für den Standardstein verwendeten Tabellenkalkulation wurde ein Wandsystem für beide Steintypen (Normalstein und Eckstein) festgelegt, welches als Datenbasis dient (siehe Abbildung 2). Die Berechnung wurde analog zu Kapitel 6 durchgeführt. Eine Auswertung für den Wandaufbau wurde nicht mehr durchgeführt.

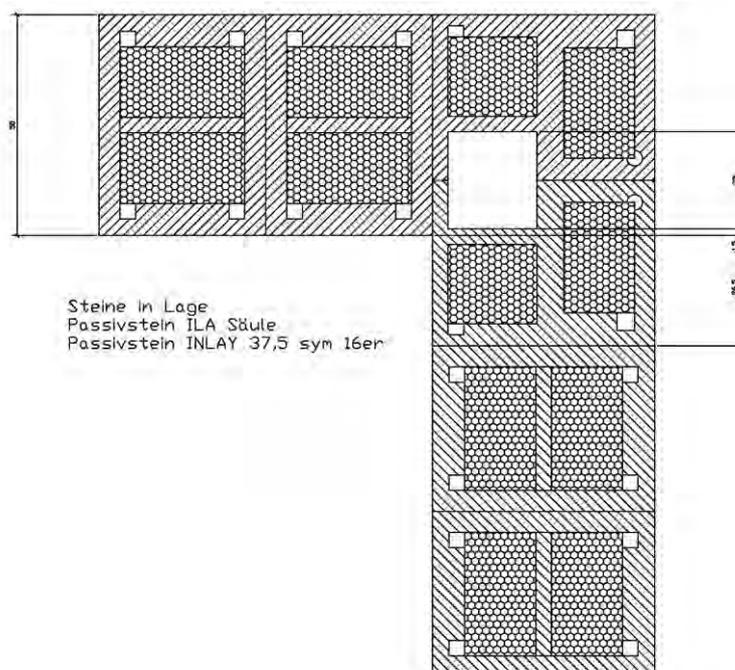


Abbildung 12: Wandaufbau ILA-Inlay „Passivhausstein“

Ökologische Bewertung eines einschaligen, hochwärmedämmenden, massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

Die umweltrelevanten Faktoren für die Rohstoffe inkl. deren Vorketten (mit Ausnahme der Holzspäne) und der darin enthaltenen Transportanteile pro Kubikmeter des fertigen Normalsteins und des fertigen Ecksteins sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Darin wurden die Energien für elektrische Antriebe (Mischer, Fördereinrichtungen, Verpackung usw.), innerbetriebliche Transporte und Beheizung der Produktionshalle mit berücksichtigt.

Auswertgröße	Ergebnis Normalstein	Ergebnis Eckstein	Zum Vergleich	Zum Vergleich
Umweltwirkungen	1 m³ ILA-Inlaystein	1 m³ ILA-Inlaystein	1 m³ Leichtbetonstein ¹	1 m³ Porenbeton ²
Primärenergie, nicht erneuerbar	1,15E+03	1,01E+03	7,53E+02	1,68E+03
Primärenergie, erneuerbar	4,60E+02	4,15E+02	5,80E+01	7,60E+01
Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre)	8,28E+01	7,17E+01	8,47E+01	2,17E+02
Ozonabbaupotenzial (ODP)	3,44E-06	3,01E-06	2,27E-08	1,09E-05
Versauerungspotenzial (AP)	2,44E-01	2,15E-01	3,10E-01	2,85E-01
Eutrophierungspotenzial (EP)	3,18E-02	2,80E-02	3,00E-02	4,90E-02
Sommersmogpotenzial (POCP)	2,84E-02	2,50E-02	3,00E-02	4,20E-02

¹ EPD-BVL-2008111-D

² AUB-XEL-11005-D

Bei dem Vergleich ist zu berücksichtigen, dass für die Holzspäne keine EPD vorliegt und daher die aktuellen Ökodaten aus der Holzspanproduktion zugrunde gelegt wurden. Bei Verwendung von Holzspänen als Abstoffe aus der Holzproduktion werden die aufgeführten Umweltwirkungen deutlich verringert werden (siehe auch Kapitel 10). Der Wert für das Treibhauspotenzial ist jedoch jetzt schon günstiger als bei anderen Wandbildnern.

9. Vorbereitung einer Umweltproduktdeklaration (EPD)

Nach der ausführlichen Dokumentation der Bewertung der Umwelteigenschaften aus den Kapiteln 6-8 stehen die Ergebnisse für einen Kubikmeter des ILA-Inlay Normalsteins und ILA-Inlay Passivhaussteins fest. Diese Daten können direkt als Ergebnisdaten in einer Umweltproduktdeklaration nach DIN EN ISO 14025 verwendet werden.

Darüber hinaus bezieht sich eine Umweltproduktdeklaration jedoch nicht nur auf die errechneten Wirkungskategorien, sondern auch auf allgemeine Punkte, die Umwelteinflüsse haben können. Hintergrund ist die Transparenz sämtlicher Schritte im Lebenszyklus eines Baustoffes.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die nach DIN EN ISO üblicher Weise berücksichtigten Kriterien und können zur Vorbereitung einer EPD direkt verwendet werden.

Produktherstellung

Gesundheitsschutz Herstellung Mit Feinstaubbelastung der Wohnraumlufte ist nicht zu rechnen, Es gilt das Regelwerk der Berufsgenossenschaft. Während des gesamten Herstellungsprozesses können folgende Maßnahmen zum Gesundheitsschutz aufgeführt werden.

- Entstaubungsanlage beim Zement- und Holzspänesilo
- Absauganlage bei der Dämmstoffeinbringung
- Tragen von Staubmasken bei der Dämmstoffeinbringung
- Pflastern oder Asphaltieren der Lagerplätze und Transportwege bzw. Beregnung

Umweltschutz Herstellung Der Produktionsprozess der Steinherstellung ohne Vorketten verläuft abwasserfrei. Die bei der Herstellung und Anlagenreinigung anfallenden Wässer werden in Abwasserbehandlungsanlagen auf dem Werksgelände mechanisch geklärt und wieder im Produktionsprozess eingesetzt. Entstehende Stäube werden in Filteranlagen aufgefangen und teilweise wiederverwertet. Die Emissionen liegen deutlich unter den Grenzwerten der TA Luft.

Produktverarbeitung

Arbeitsschutz Bei der Herstellung der ILA-Inlay Steine sind die üblichen Arbeitsschutzmaßnahmen der Berufsgenossenschaften zum Schutz der Gesundheit zu treffen. Der bei der Verarbeitung von ILA-Inlay Steinen eingesetzte Dünnbettmörtel ist ein mineralische Mörtel und enthalten außer Methylcellulose kaum organische Stoffe.

Umweltschutz Während der Verarbeitung des Bauproduktes sind keine besonderen Maßnahmen zum Schutz der Umwelt zu treffen. Bei der Auswahl konstruktiv notwendiger Zusatzprodukte ist darauf zu achten, dass diese die beschriebenen Eigenschaften der Umweltverträglichkeit der genannten Bauprodukte nicht nachteilig beeinflussen.

Restmaterial Auf der Baustelle anfallende Verpackungen, Paletten und ILA- Inlay-Reste sind getrennt zu sammeln.

Die Polyethylen-Schrumpffolien sind recycelbar. Nicht verschmutzte PE Folien (auf sortenreine Erfassung ist zu achten) und die Mehrwegpaletten aus Holz bzw. Kunststoff werden vom Hersteller direkt oder durch den Baustoffhandel zurückgenommen und an den Hersteller weitergeleitet (Mehrwegpaletten gegen Rückvergütung im Pfandsystem). Dieser leitet die Folien an die Folienhersteller zum Recyceln weiter. ILA-Inlay-Reste können ebenfalls vom Hersteller zurückgenommen werden und als Rohstoff genutzt oder auf Deponien entsorgt werden.

Falls statt der PE Folie Bio-Folie aus Stärke zum Einsatz kommen sollte, kann diese auf den späteren Grünflächen als Dünger eingebaut werden.

Nutzungszustand

Inhaltsstoffe Die ILA-Inlay Steine bestehen wie bereits beschrieben aus zwei wesentlichen Teilen, dem Holzspanbeton und dem Inlay aus einem Holzfaserdämmstoff. Der Holzspanbeton und das Inlay werden größtenteils aus Holzspänen bzw. Hack-schnitzeln, einem natürlichen und nachwachsenden Rohstoff. Weitere künstliche Zuschläge, wie Farbzusatz und Mineralisierungshilfe sind Zusatzstoffe der ILA-Inlay Steine. Zement als Bindemittel und Wasser sind weitere Hauptbestandteile des Holzspanbetons. Die Rohstoffe sind teilweise lagerungsbedingt erdfeucht oder witterungsbedingt nass.

Beständigkeit ILA-Inlay Steine verändern sich nach Verlassen des Werkes nach den Nutzungs-
Nutzungszustand Verformungskennwerten gemäß DIN 1053-1:1996-11. Bei bestimmungsgemäßer Anwendung sind sie unbegrenzt beständig.

**Wirkungs-
beziehungen** Der Holzspanbeton emittiert keine schädlichen Stoffe wie z. B. VOC. Die natürliche ionisierende Strahlung des Holzspanbetons ist äußerst gering und gesundheitlich unbedenklich.
**Umwelt -
Gesundheit** Bei normaler, dem Verwendungszweck von Holzfaserdämmstoffen entsprechender Nutzung, sind keine gesundheitlichen Schäden zu erwarten. Gefährdungen für Wasser, Luft und Boden sind bei bestimmungsgemäßer Anwendung von Dämmstoffen nicht zu erwarten.

Außergewöhnliche Einwirkungen

Brand	<p>Im Brandfall können beim Holzspanbeton keine toxischen Gase und Dämpfe entstehen.</p> <p>Der Holzspanbeton hat die Euroklasse A2-s1. d0 nach DIN EN 13501-1, welche der Baustoffklasse A2 nach DIN 4102-1 „nichtbrennbar“ entspricht.</p> <p>Die Holzfaserdämmung besitzt die Euroklasse E nach DIN 13501-1 welche der Baustoffklasse B2 nach DIN 4102-1 „normal entflammbar,“ entspricht.</p> <p>Durch Beprobung der Kronotherm flex wurde ermittelt, dass nach DIN 53436 keine Chlorverbindungen und Schwefelverbindungen nachgewiesen werden konnten, jedoch CO, CO₂, Cyanwasserstoff und COHb.</p> <p>Die unter den gewählten Versuchsbedingungen freigesetzten gasförmigen Emissionen entsprechen nicht den Emissionen, die unter gleichen Bedingungen aus Holz freigesetzt werden.</p>
Wasser	<p>Die Außenwände müssen mit einem wirksamen Witterungsschutz auf Basis eines nichtbrennbaren Putzsystems oder nichtbrennbarer Platten bekleidet werden. Die Außenwände aus Holzspanbetonsteinen müssen mind. 30 cm über Erdgleiche liegen. Dies gilt nicht, wenn kein drückendes Wasser entsteht und vor dem Abdichten nach DIN 18195-4 bzw. DIN 18195-5 eine Putzschicht der Mörtelgruppe II oder III aufgebracht wird.</p> <p>Bei der quantitativen Analyse der Holzfaserdämmplatte auf anorganische Spurenstoffe im Material konnten keine Schwermetalle nachgewiesen werden.</p>

Nachnutzungsphase

Wieder- und Weiterverwendung	<p>Holzspanbeton</p> <p>Laut Hersteller, soll der ILA-Inaly Stein vollständig recycelt werden und der Neuproduktion wieder zugeführt werden.</p>
	<p>Dämmstoff</p> <p>Kronotherm Holzfaserdämmstoffe können bei Umbau oder Beendigung der Nutzungsphase eines Gebäudes im Falle eines selektiven Rückbaus, sofern sie unbehandelt und nicht beschädigt sind, problemlos getrennt erfasst und für die gleiche Anwendung wieder verwendet werden.</p>

Wieder – und Weiterverwertung	<p>Holzspanbeton</p> <p>Das recycelte Material soll als Sekundärrohstoff der Neuproduktion zugeführt werden.</p> <p>Dämmstoff</p> <p>Aufgrund des hohen Heizwertes ist eine energetische Verwertung zur Erzeugung von Prozessenergie und Strom (KWKAnlagen) von auf der Baustelle anfallenden Kronotherm Dämmstoff-Resten sowie Kronotherm Dämmstoffen aus Abbruchmaßnahmen empfehlenswert.</p>
Entsorgung	<p>Holzspanbeton</p> <p>Der Stein soll vollständig recycelt werden und als Sekundärrohstoff der Neuproduktion zugeführt werden. Sollte ein Recycling nicht stattfinden, so gelten die landesrechtlichen Abfall-Verwaltungsvorschriften und Deponierordnungen.</p> <p>Dämmstoff</p> <p>Auf der Baustelle anfallende Reste von Kronotherm Dämmstoffen, sowie solche aus Abbruchmaßnahmen dürfen, sofern eine stoffliche Verwertung nicht möglich ist, nicht deponiert werden, sondern müssen aufgrund ihrer rein organischen Bestandteilen (Holz, BiKo, Harze) und deren hohen Heizwertes einer energetischen Verwertung bzw. der Verbrennung in einer MVA zugeführt werden. Abfallschlüssel: EAK Code 030105 nach Europäischem Abfallkatalog.</p>

10. Empfehlungen und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens und der beauftragten ökologischen Bewertung sind Fragestellungen aufgetreten, die Anlass zur weiteren Betrachtung geben.

- Die bei der Bewertung verwendeten Umweltdaten stammen aus Produktdeklarationen, Datenbanken und Projektberichten. Teilweise sind diese Daten eventuell schon einige Jahre alt und entsprechen nicht mehr unbedingt der heutigen Zeit. Daher sollten die Datensätze regelmäßig aktualisiert und angepasst werden, um stets ein möglichst aktuelles Ergebnis über das Produkt zu erhalten.
- Die Datenaktualisierung ist dringend notwendig für die Holzspäne. Hier lag zum Erstellungszeitpunkt des Berichts nur ein Projektbericht vor, in dem die Wirkungskategorien für die Schnittholzproduktion untersucht wurden. Aktuell läuft ein neues Projekt durch die Fachagen-

tur für Nachwachsende Rohstoffe e.V., in dem die Wirkungskategorien für Holz- und Holznebenprodukte wie Späne ermittelt werden. Die Daten hierfür stammen aus holzverarbeitenden Betrieben, wie zum Beispiel Sägewerken. Dazu werden Ist-Daten aus der laufenden Produktion verschiedener Betriebe ermittelt und daraus ein Durchschnittswert gebildet. Das Projekt läuft unter dem Namen FNR-Projekt „ÖkoHolzBauDat“.²³ Für eine genauere Beurteilung des ILA-Steines sollten demnach unbedingt die neuen Ergebnisse dieser Untersuchung eingesetzt werden.

- Aus der Untersuchung der veränderten Randbedingungen ergab sich, dass der Einsatz eines CEM II B-S Zementes anstelle des CEM II A-S Zementes, die Umwelteigenschaften des Endproduktes deutlich verbessern würden. Eine Empfehlung für diesen Zement wurde auch in diesem Bericht ausgesprochen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass der Einsatz des Zementes die technischen Eigenschaften, wie Statik etc. nicht negativ beeinflusst. Für den Einsatz müssen demnach Laborversuche gemacht werden, an denen man die Anforderungen testen kann, damit das Produkt weiter der bauaufsichtlichen Zulassung entspricht.
- Sobald die Produktion für den ILA Inlay Stein angelaufen ist und die erwarteten Ergebnisse liefert, sollten Untersuchungen angestellt werden, in denen die tatsächlichen Energiewerte der Produktion des Steines ermittelt werden, da die in diesem Bericht angenommenen Werte aus anderen, unter Umständen veralteten Anlagen stammen und deutlich schlechter sein dürften, als die Werte einer neu eingerichteten Produktion. Die verwendeten Werte des Verbrauchs für Transportenergie, Verbrennungsenergie und elektrischer Antriebsenergie, sollten durch die tatsächlichen ermittelten Verbrauchswerte der ILA Produktion ersetzt werden.
- Die Kriterien Verwertbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Recycling, Wiederaufbereitung und Entsorgung wurden im vorliegenden Bericht bearbeitet, aber nicht vertieft. Sie sind jedoch Bestandteile einer EPD und müssen daher noch weiter untersucht und ausgearbeitet werden. Dies spielt bei dem Inlay aus Holzfaserdämmung eine große Rolle, da Holz und Holzprodukte zum Beispiel bei der energetischen Verwertung (Verbrennung) teilweise große Gutschriften bei bestimmten Wirkungskategorien erhalten und somit das Endergebnis deutlich verbessern würden. Dies wird deutlich, wenn man die Werte unter *End of Life* in den EPDs betrachtet.
- In der Auswertung wurde auch die Standortbestimmung berücksichtigt. Es darf nicht vernachlässigt werden, dass der Standort der Produktion zusätzlich deutlichen Einfluss auf die Umwelteigenschaften des Produktes haben kann. Neben der Empfehlung zu kurzen Transportstrecken für die Rohstoffe, sollte ebenso auf kurze Transportstrecken des Endprodukts zum

²³ Vgl. dazu <http://www.holzundklima.de/projekte/oekobilanzen-holz/index.html>

Kunden geachtet werden. Hierzu sollten noch weitere Untersuchungen angestellt werden, durch die sich ein optimaler Produktionsstandort ermitteln lässt.

11. Literaturverzeichnis

- (AGEB) AG für Energiebilanzen e. V. „AGEB.“ Vers. 2008 und Satellitenbilanz Erneuerbare Energien 2008. Herausgeber: (DIW) Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. <http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=63> (Zugriff am 26. 10 2010).
- (DIBt) Deutsches Institut für Bautechnik. „Zulassungen für Bauprodukte und Bauarten.“ Herausgeber: Herr Dipl.-Ing Breitschaft. <http://publikationen.dibt.de/service/history/zulhistory.aspx?language=de&zulnr=Z-17.1-885&han=&geg=&ant=&zul=Z-17.1-885&PageIndex=0> (Zugriff am 25. 09 2010).
- (DIN) Deutsches Institut für Normung e.V. *DIN 1053-1:1996-11*. 1996-11. Berlin: Beuth Verlag, 1996.
- *DIN EN 197-01:2004-08*. 2004-08. Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- *DIN EN ISO 14020:2002-02*. 2002-02. Berlin: Beuth Verlag, 2002.
- *DIN EN ISO 14021:2001-12*. Berlin: Beuth Verlag, 2001.
- *DIN EN ISO 14024:2001-02*. Berlin: Beuth Verlag, 2001.
- *DIN EN ISO 14025:2010-08*. 2010-08. Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- *DIN EN ISO 14040:2009-11*. 2009-11. Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- (IBU) Institut Bauen und Umwelt e. V., Königswinter. *Allgemeiner Leitfaden, Leitfaden für die Formulierung der Anforderungen an die Produktkategorien der Umweltdeklaration (Typ III) für Bauprodukte*. Vorläufige Fassung Stand 20.01.2006. Bd. Allgemeiner Leitfaden. Königswinter: Institut Bauen und Umwelt e. V., 2006.
- *Internetseiten des IBU - Institut Bauen und Umwelt e. V.* . <http://bau-umwelt.de/hp1/Startseite.htm> (Zugriff am 17. 07 2010).
- *Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 Kronotherm Holzfaserdämmung Kronoply GmbH*. Königswinter: Institut für Bauen und Umwelt e.V., 2009.
- *Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 Mineralische Werkmörtel, Mauermörtel, Sondermauermörtel Baumit GmbH*. Königswinter: Institut für Bauen und Umwelt e.V., 2009.
- *Weitblickend planen Nachhaltig bauen*. Königswinter: Institut Bauen und Umwelt e. V., 2009.
- (ifu) Institut für Umweltinformatik Hamburg GmbH. „umberto know the flow.“ http://www.umberto.de/export/download/umberto_de/umberto_i_fly_de.pdf (Zugriff am 20. 08 2010).

- (KfW) Kreditanstalt für Wiederaufbau. *Merkblatt Energieeffizient Bauen Programm-Nr. 153*. Bde. Programm-Nr. 153. Frankfurt: KfW Kreditanstalt für Wiederaufbau, 2010.
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. *Leitfaden Nachhaltiges Bauen (nicht Barrierefrei)*. Herausgeber: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2010.
- Bundesverband Leichtbeton e.V. *Bundesverband Leichtbeton e.V.*
<http://www.leichtbeton.de/leichtbeton/definition.html> (Zugriff am 10. 10 2010).
- Gänßmantel, Jürgen, Gerd Geburtig, und Astrid Schau. *Sanierung und Facility Management: Nachhaltiges Bauinstandhalten und Bauinstandsetzen*. Auflage 1. Wiesbaden: Teubner-Verlag / GWV-Fachverlage GmbH, 2005.
- Geschäftsstelle für Nachhaltiges Bauen im Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). „Baustoff- und Gebäudedaten Ökobau.dat.“ *Ökobau.dat*. oekobau.dat 2009. Herausgeber: Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) Bundesministerium für Verkehr. Berlin.
- Haase, Cornelia. „Umweltrelevante Schwachstellenanalyse von Produktionsprozessen zur Offenlegung von Wertschöpfungspotenzialen.“ In *Abwassertechnik in der Produktion*, von Rainer Gräf, Sigurd Lohmeyer und Hans-Ulrich Schwering, 41-45. Augsburg: WEKA Media GmbH, 2002.
- Kolb, Nikolaus. *Forum Nachhaltiges Bauen Informationen, News und Hilfe*. Herausgeber: Nikolaus Kolb. Vers. (Polystyrol EPS; Glaswolle, Steinwolle). 2010. <http://www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Alle> (Zugriff am 20. 09 2010).
- Kronoply GmbH, Heiligengrabe. *KRONOTHERM hardboard 170*. 2008. <http://www.kronoply.de/krono-kronotherm/kronotherm-hardboard170/> (Zugriff am 20. 09 2010).
- Nemuth, Silke PE-International; Kreißig, Johannes PE-International. *Datenprojekt Zement im Netzwerk Lebenszyklusdaten*. Herausgeber: Karlsruhe GmbH Forschungszentrum, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse und Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme. Leinfelden-Echterdingen, Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz Gemeinschaft, 2007.
- Öko-Institut e.V. Geschäftsstelle Freiburg. „GEMIS Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme.“ Herausgeber: Öko-Institut e.V. Geschäftsstelle Freiburg.
<http://www.oeko.de/service/gemis/de/info.htm> (Zugriff am 20. 08 2010).
- Ritthof, Michael, Holger Rohn, und Christa Liedtke. *MIPS Berechnen Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen*. Wuppertal: Wuppertaler nInstitut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen, 2002.

Rüter, Sebastian (vTI) Johann-Heinrich-von-Thünen-Institut Hamburg. „Einbeziehung von Holzprodukten in die Klimapolitik.“ *Holz Zentralblatt*, 25. Juni 2010.

Rüter, Sebastian vom Institut für Holztechnologie und Holzbiologie (HTB). *holz und klima*. Herausgeber: Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Institut für Holztechnologie und Holzbiologie (HTB) (vTI) Johann Heinrich von Thünen-Institut. <http://www.holzundklima.de/projekte/oekobilanzen-holz/index.html> (Zugriff am 15. 09 2010).

—. *holz und klima*. Herausgeber: Wald und Fischerei (vTI) Johann Heinrich von Thünen-Institut Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume. <http://www.holzundklima.de/hintergrund.html> (Zugriff am 20. 09 2010).

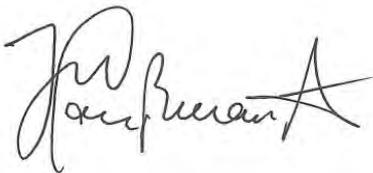
Schmidheiny, Stephan. <http://www.zitate.de/kategorie/Natur/> (Zugriff am 22. August 2010).

Schweizer Zentrum für Ökoinventare. „(BFE) Bundesamt für Energie, Schweiz.“ Herausgeber: Schweizer Zentrum für Ökoinventare. http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_661221132.pdf (Zugriff am 21. 10 2010).

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. *Wuppertaler Institut*. http://www.wupperinst.org/projekte/themen_online/mips/index.html (Zugriff am 24. 08 2010).

Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS-ZTS). *Netzwerk Lebenszyklusdaten*. Herausgeber: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. 03 2009. <http://www.netzwerk-lebenszyklusdaten.de/cms/content/site/lca/Home> (Zugriff am 02. 09 2010).

Dormettingen, den 31. Januar 2011



Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Gänßmantel

Anhang

10 Seite(n) tabellarische Berechnung der Umweltwirkungen für ILA-Passivhaussteine

Grunddaten Stein (Standard)

Massenberechnung

	Masse in kg					Summe
	Holzspäne	Zement	Inlay	Wasser *	Hilfsmittel *	
Gewicht je Mischung (kg)	108,00	230,00	37,80	85,00	6,00	429,00
Gewicht 1 kg fertiger Stein (kg)	108,00	230,00	0,95	85,00	6,00	1,00
Multiplikator (MP) von 1,2 m³ auf 1 kg	Multiplikator = 1,2 m³ / 429 kg					1
				*In Bilanz nicht berechnet		

Variable Faktoren

	Holzspäne	Zement	Inlay	Wasser	Hilfsmittel	
	m³	kg	m³	kg	kg	
Rohdichte (kg/m³)	90	100	45	-	-	
Masse je Stein (kg)	-	-	0,945	-	-	
Anzahl Steine je Mischung (St)	1,2/(0,028*1,135)	40,568	Gerundet:	40,00	Rest:	0,568
Masse lt. Rezeptur	1,20	230,00	0,84	85,00	6,00	
Mischvolumen x (m³)	1,2					
Verdichtungsfaktor	21,4 / 18,67					

Transport

	Holzspäne	Zement	Inlay	Wasser	Hilfsmittel
Transportweg x (km)	0,00	0,00	0,00	-	-

Energiewerte

Umrechnung KWh/t in MJ/m³	Transport	Verbrennung	Antrieb
3,6			
Energiemenge (KWh/t)	35,1	42,1	26,4
Energiemenge (MJ/m³)	54,21	65,02	40,77

Berechnung Stein

	Stein o. Aussp.	Aussp.Däm.	Aussp. Finger.
Breite (m)	0,500	0,150	0,035
Länge (m)	0,375	0,280	0,035
Höhe (m)	0,250	0,250	0,250
Anzahl (St)	1,00	2,00	4,00
Volumen (m³)	0,047	0,021	0,001
Volumen m. Aussp. (m³)	0,025		

Grunddaten Systemaufbau (Standard)

Massenberechnung

	Beton		Stahl (kg)	Mörtel (kg)	Innenputz		Außen Leichtputz		Außen Dämmputz	
	Ortebeton (m³)	Leichtbeton (m³)			LP (kg)	LP (kg)	NP (kg)	DP (kg)	NP (kg)	
Einheit für x m² Wand *	0,01	0,01	2,24	0,003	0,02	0,02	0,00	0,05	0,01	
Verbrauch (kg/m³)	-	-	-	1.666,67	952,38	952,38	1.290,32	222,22	1.290,32	
Einheit für EPD	0,01	0,01	2,24	5,00	14,29	19,05	0,00	11,11	6,45	
x m² Wandfläche	1,00									

* Hinweis: Werte in (m³)

Berechnung Beton

	Betonquerschnitt
Länge (m)	1,00
Breite (m)	0,20
Höhe (m)	0,20
zu teilende Fläche (m²)	3,00
Volumen (m³)	0,01

Berechnung Bewehrung

	Stäbe	Bügel	Summe
Länge (m)	1,00	0,80	
Durchmesser (m)	0,00	0,00	
Gewicht (kg/m)	0,89	0,40	
Anzahl (St)	8,00	20,00	
Achsenabstand	2,00	2,00	
zu teilende Fläche (m²)	3,00	3,00	
Gewicht (kg)	1,18	1,05	2,24

Berechnung Mörtel

	Mörtel
Länge (m)	1,00
Breite (m)	0,38
Höhe (m)	0,00
Lagen (St)	4,00
Volumen (m³)	0,003

Berechnung Außen-Leichtputz System

	LP	NP
Länge (m)	1,00	1,00
Breite (m)	1,00	1,00
Höhe (m)	1,00	1,00
Dicke (m)	0,02	0,00
Volumen (m³)	0,02	0,00

Berechnung Außen-Dämmputz System

	DP	NP
Länge (m)	1,00	1,00
Breite (m)	1,00	1,00
Höhe (m)	1,00	1,00
Dicke (m)	0,050	0,005
Volumen (m³)	0,050	0,005

Berechnung Innenputz

	LP
Länge (m)	1,00
Breite (m)	1,00
Höhe (m)	1,00
Dicke (m)	0,02
Volumen (m³)	0,02

Berechnung Normalstein (Standard)

Auswertgröße	Masse	Beton		Bewehrung		Mörtel		Innenputz	
		Ortbeton C 20/25 (m³)		Stabstahl (kg)		Dünnbettmörtel (kg)		Leichtputz (kg)	
		1,00	0,013	1,00	2,24	1,00	5,00	1,00	14,29
Primärenergie, nicht erneuerbar	in MJ	1,02E+03	1,37E+01	1,24E+01	2,77E+01	1,97E+00	9,87E+00	2,65E+00	3,78E+01
Primärenergie, erneuerbar	in MJ	1,93E+01	2,57E-01	9,85E-01	2,20E+00	8,20E-02	4,10E-01	2,25E-01	3,21E+00
Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre)	in kg CO2-Äqv.	1,96E+02	2,62E+00	8,74E-01	1,96E+00	2,48E-01	1,24E+00	1,75E-01	2,50E+00
Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg R11-Äqv.	5,33E-06	7,11E-08	7,85E-08	1,76E-07	6,28E-09	3,14E-08	8,45E-09	1,21E-07
Versauerungspotenzial (AP)	in kg SO2-Äqv.	3,56E-01	4,75E-03	1,64E-03	3,67E-03	4,90E-04	2,45E-03	5,90E-04	8,43E-03
Eutrophierungspotenzial (EP)	in kg Phosphat-Äqv.	5,01E-02	6,68E-04	1,39E-04	3,11E-04	8,00E-05	4,00E-04	1,20E-04	1,71E-03
Sommersmogpotenzial (POCP)	kg Ethen-Äqv.	3,62E-02	4,83E-04	2,74E-04	6,13E-04	6,00E-05	3,00E-04	7,00E-05	1,00E-03
	Aufbau 1/2								

Auswertgröße	Masse	Außen-Leichtputz-System				2. Ergebnis 1 m² Wand ohne Stein	Endergebnis 1 m² Wand mit Stein
		Leichtputz (kg)		Normalputz (kg)			
		1,00	19,05	1,00	0,00		
Primärenergie, nicht erneuerbar	in MJ	2,65E+00	5,04E+01	1,47E+00	0,00E+00	1,40E+02	4,45E+02
Primärenergie, erneuerbar	in MJ	2,25E-01	4,29E+00	1,15E-01	0,00E+00	1,04E+01	1,33E+02
Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre)	in kg CO2-Äqv.	1,75E-01	3,33E+00	1,98E-01	0,00E+00	1,16E+01	3,37E+01
Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg R11-Äqv.	8,45E-09	1,61E-07	5,39E-09	0,00E+00	5,60E-07	1,48E-06
Versauerungspotenzial (AP)	in kg SO2-Äqv.	5,90E-04	1,12E-02	3,10E-04	0,00E+00	3,05E-02	9,55E-02
Eutrophierungspotenzial (EP)	in kg Phosphat-Äqv.	1,20E-04	2,29E-03	7,00E-05	0,00E+00	5,38E-03	1,38E-02
Sommersmogpotenzial (POCP)	kg Ethen-Äqv.	7,00E-05	1,33E-03	3,00E-05	0,00E+00	3,73E-03	1,13E-02
	Aufbau 2/2						

Grunddaten Stein (Eckstein)

Massenberechnung

	Masse in kg					Summe
	Holzspäne	Zement	Inlay	Wasser *	Hilfsmittel *	
Gewicht je Mischung (kg)	108,00	230,00	49,59	85,00	6,00	429,00
Gewicht 1 kg fertiger Stein (kg)	108,00	230,00	0,86	85,00	6,00	1,00
Multiplikator (MP) von 1,2 m³ auf 1 kg	Multiplikator = 1,2 m³ / 492 kg					1
	*In Bilanz nicht berechnet					

Variable Faktoren

		Holzspäne m³	Zement kg	Inlay m³	Wasser kg	Hilfsmittel kg
Rohdichte (kg/m³)		90	-	45	-	-
Masse je Stein (kg)		-	-	0,855	-	-
Anzahl Steine je Mischung (St)	1,2/(0,028*1,135)	58,76	Gerundet:	58,00	Rest:	0,76
Masse lt. Rezeptur		1,20	230,00	1,10	85,00	6,00
Mischvolumen x (m³)		1,2				
Verdichtungsfaktor	21,4 / 18,67	1,20				

Transport

	Holzspäne	Zement	Inlay	Wasser	Hilfsmittel
Transportweg x (km)	0,00	0,00	0,00	-	-

Energiewerte

Umrechnung KWh/t in MJ/	Transport	Verbrennung	Antrieb
3,6			
Energiemenge (KWh/t)	35,1	42,1	26,4
Energiemenge (MJ/m³)	54,21	65,02	40,77

Berechnung Stein

	Stein o. Aussp.	Aussp.Däm.	Aussp. Kern	Aussp. Finger
Breite (m)	0,500	0,250	0,110	0,040
Länge (m)	0,375	0,160	0,200	0,086
Höhe (m)	0,250	0,200	0,250	0,250
Anzahl (St)	1,00	0,250	1,00	1,000
Volumen (m³)	0,047	0,019	0,006	0,001
Volumen m. Aussp. (m³)	0,022			

Grunddaten Systemaufbau (Eckstein)

Massenberechnung

	Beton		Stahl (kg)	Mörtel (kg)	Innenputz		Außen Leichtputz		Außen Dämmputz	
	Ortebeton (m³)	Leichtbeton (m³)			LP (kg)	LP (kg)	NP (kg)	DP (kg)	NP (kg)	
Einheit für x m² Wand *	0,01	0,01	2,24	0,003	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Verbrauch (kg/m³)	-	-	-	1.666,67	952,38	952,38	1.290,32	222,22	1.290,32	
Einheit für EPD	0,01	0,01	2,24	5,00	14,29	19,05	0,00	0,00	0,00	0,00
x m² Wandfläche	1,00									

* Hinweis: Werte in (m³)

Berechnung Beton

	Betonquerschnitt
Länge (m)	1,00
Breite (m)	0,20
Höhe (m)	0,20
zu teilende Fläche (m²)	3,00
Volumen (m³)	0,01

Berechnung Bewehrung

	Stäbe	Bügel	Summe
Länge (m)	1,00	0,80	
Durchmesser (m)	0,00	0,00	
Gewicht (kg/m)	0,89	0,40	
Anzahl (St)	8,00	20,00	
Achsenabstand	2,00	2,00	
zu teilende Fläche (m²)	3,00	3,00	
Gewicht (kg)	1,18	1,05	2,24

Berechnung Mörtel

	Mörtel
Länge (m)	1,00
Breite (m)	0,38
Höhe (m)	0,00
Lagen (St)	4,00
Volumen (m³)	0,003

Berechnung Außen-Leichtputz System

	LP	NP
Länge (m)	1,00	1,00
Breite (m)	1,00	1,00
Höhe (m)	1,00	1,00
Dicke (m)	0,02	0,00
Volumen (m³)	0,02	0,00

Berechnung Außen-Dämmputz System

	DP	NP
Länge (m)	1,00	1,00
Breite (m)	1,00	1,00
Höhe (m)	1,00	1,00
Dicke (m)	0,00	0,00
Volumen (m³)	0,00	0,00

Berechnung Innenputz

	LP
Länge (m)	1,00
Breite (m)	1,00
Höhe (m)	1,00
Dicke (m)	0,02
Volumen (m³)	0,02

Berechnung Eckstein

Auswertgröße	Masse	Beton		Bewehrung		Mörtel		Innenputz	
		Ortbeton C 20/25 (m³)		Stabstahl (kg)		Dünnbettmörtel (kg)		Leichtputz (kg)	
		1,00	0,013	1,00	2,24	1,00	5,00	1,00	14,29
Primärenergie, nicht erneuerbar	in MJ	1,02E+03	1,37E+01	1,24E+01	2,77E+01	1,97E+00	9,87E+00	2,65E+00	3,78E+01
Primärenergie, erneuerbar	in MJ	1,93E+01	2,57E-01	9,85E-01	2,20E+00	8,20E-02	4,10E-01	2,25E-01	3,21E+00
Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre)	in kg CO2-Äqv.	1,96E+02	2,62E+00	8,74E-01	1,96E+00	2,48E-01	1,24E+00	1,75E-01	2,50E+00
Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg R11-Äqv.	5,33E-06	7,11E-08	7,85E-08	1,76E-07	6,28E-09	3,14E-08	8,45E-09	1,21E-07
Versauerungspotenzial (AP)	in kg SO2-Äqv.	3,56E-01	4,75E-03	1,64E-03	3,67E-03	4,90E-04	2,45E-03	5,90E-04	8,43E-03
Eutrophierungspotenzial (EP)	in kg Phosphat-Äqv.	5,01E-02	6,68E-04	1,39E-04	3,11E-04	8,00E-05	4,00E-04	1,20E-04	1,71E-03
Sommersmogpotenzial (POCP)	kg Ethen-Äqv.	3,62E-02	4,83E-04	2,74E-04	6,13E-04	6,00E-05	3,00E-04	7,00E-05	1,00E-03
	Aufbau 1/2								

Auswertgröße	Masse	Außen-Leichtputz-System				2. Ergebnis 1 m² Wand ohne Stein	Endergebnis 1 m² Wand mit Stein
		Leichtputz (kg)		Normalputz (kg)			
		1,00	19,05	1,00	0,00		
Primärenergie, nicht erneuerbar	in MJ	2,65E+00	5,04E+01	1,47E+00	0,00E+00	1,40E+02	3,74E+02
Primärenergie, erneuerbar	in MJ	2,25E-01	4,29E+00	1,15E-01	0,00E+00	1,04E+01	1,07E+02
Treibhauspotenzial (GWP 100 Jahre)	in kg CO2-Äqv.	1,75E-01	3,33E+00	1,98E-01	0,00E+00	1,16E+01	2,83E+01
Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg R11-Äqv.	8,45E-09	1,61E-07	5,39E-09	0,00E+00	5,60E-07	1,26E-06
Versauerungspotenzial (AP)	in kg SO2-Äqv.	5,90E-04	1,12E-02	3,10E-04	0,00E+00	3,05E-02	8,04E-02
Eutrophierungspotenzial (EP)	in kg Phosphat-Äqv.	1,20E-04	2,29E-03	7,00E-05	0,00E+00	5,38E-03	1,19E-02
Sommersmogpotenzial (POCP)	kg Ethen-Äqv.	7,00E-05	1,33E-03	3,00E-05	0,00E+00	3,73E-03	9,52E-03
	Aufbau 2/2						

Berechnung Abfälle

Auswertgröße	Masse	Beton		Bewehrung		Mörtel		Innenputz	
		Ortbeton C 20/25 (m³)		Stabstahl (kg)		Dünnbettmörtel (kg)		Leichtputz (kg)	
		1,00	0,013	1,00	2,24	1,00	5,00	1,00	14,29
Wassernutzung	in kg	1,12E+03	1,50E+01	5,26E+00	1,18E+01	6,20E-01	3,10E+00	6,10E-01	8,71E+00
Sekundärbrennstoffe	in MJ	3,43E+02	4,57E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,83E-01	1,92E+00	2,29E-01	3,27E+00
Abraum / Haldegüter	in kg	6,87E+02	9,16E+00	3,67E+00	8,21E+00	8,90E-01	4,45E+00	1,82E+00	2,60E+01
Siedlungsabfälle	in kg	2,50E-03	3,33E-05	3,93E-02	8,79E-02	3,70E-05	1,85E-04	2,50E-04	3,57E-03
Sondermüll	in kg	1,35E-01	1,80E-03	5,48E-03	1,23E-02	1,40E-03	7,00E-03	3,50E-04	5,00E-03
	Aufbau 1/2		Rechts						

Auswertgröße	Masse	Außen-Leichtputz-System				2. Ergebnis 1 m² Wand ohne Stein	Endergebnis 1 m² Wand mit Stein
		Leichtputz (kg)		Normalputz (kg)			
		1,00	19,05	1,00	0,00		
Wassernutzung	in kg	6,10E-01	1,16E+01	3,90E-01	0,00E+00	5,02E+01	5,41E+01
Sekundärbrennstoffe	in MJ	2,29E-01	4,36E+00	1,40E-01	0,00E+00	1,41E+01	7,35E+01
Abraum / Haldegüter	in kg	1,82E+00	3,47E+01	1,07E+00	0,00E+00	8,25E+01	2,07E+02
Siedlungsabfälle	in kg	2,50E-04	4,76E-03	5,00E-05	0,00E+00	9,65E-02	9,69E-02
Sondermüll	in kg	3,50E-04	6,67E-03	1,90E-04	0,00E+00	3,27E-02	1,20E-01
	Aufbau 2/2						

Untersuchungen zum feuchtetechnischen Verhalten des Inlay- und Kammersteines / I

- Projekt:** Entwicklung und ökologische Bewertung eines für die Passivhaus-Bauweise tauglichen, einschaligen massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen
- Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt – DBU
AZ. 23652-25
- Auftraggeber:** ILA Bauen&Wohnen
Fuldaweg 21/23
74172 Neckarsulm-Amorbach
- Bericht-Nr.:** 15106-5
- Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Frank Eßmann
- Umfang:** 8 Seiten Bericht
4 Seiten Anhang
- Datum:** 04. September 2009

1	GRUNDLAGEN	3
1.1	VORLIEGENDE UNTERLAGEN	3
1.2	VERWENDETE LITERATUR	3
1.3	DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN	3
2	VERANLASSUNG	4
3	PARAMETER	5
3.1	MATERIALIEN	5
3.2	DEFINITION	5
3.3	AUSFÜHRUNGSVARIANTEN „HOMOGENER STEIN“ (D = 37,5 CM)	6
3.4	AUSFÜHRUNGSVARIANTEN „EINKAMMER-STEIN“ (D = 37,5 CM)	6
3.5	AUSFÜHRUNGSVARIANTEN „ZWEIKAMMER-STEIN“ (D = 50,0 CM)	7
4	ERMITTLUNG DES FEUCHTETECHNISCHEN VERHALTENS	8
 ANHÄNGE		
ANHANG A	ERGEBNISSE FEUCHTETECHNISCHER BERECHNUNGEN	I

1 Grundlagen

1.1 Vorliegende Unterlagen

- [1] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-17.1-885
ILA-Holz-Zementsteine für Ausfachungsmauerwerk in Gebäuden mit rahmenartigen
Stahlbetontragwerk,
Deutsches Institut für Bautechnik, 27.04.2007
- [2] Prüfbericht TGM – VA AB 10773
Über die Wärmeleitfähigkeit von Proben aus Holzspanbeton,
TGM Versuchsanstalt Wien, 28.10.2003
- [3] Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen; Institut für Bauklimatik, TU Dresden;
Zentrum für Umweltbewusstes Bauen, Kassel
MASEA (Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung);
www.masea-ensan.com/masea/; Stand vom 13.07.2007

1.2 Verwendete Literatur

- [11] DIN 4108
Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden
Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Beuth-Verlag GmbH Berlin, Juli 2003
Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Beuth-Verlag GmbH Berlin, Juli 2001
Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte (Vornorm),
Beuth-Verlag GmbH Berlin, Juni 2007
Beiblatt 2: Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele, Beuth-Verlag GmbH Berlin,
März 2006
- [12] DIN EN 12524
Baustoffe und –produkte - Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte
Bemessungswerte –; Beuth-Verlag GmbH Berlin, Juli 2000
- [13] DIN EN ISO 6946
Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient –
Berechnungsverfahren; Beuth-Verlag GmbH Berlin, April 2008
- [14] DIN EN ISO 10211
Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen
Beuth-Verlag GmbH Berlin, April 2008

1.3 Durchgeführte Untersuchungen

- [21] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Voruntersuchungen zum wärmetechnischen Verhalten unterschiedlicher Kammergeometrien
und Steinausführungen
Bericht-Nr. 15106-1a vom 04.07.2008

- [22] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Untersuchungen zum wärmetechnischen Verhalten unterschiedlicher Kammergeometrien / I
Bericht-Nr. 15106-2 vom 15.08.2008
- [23] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Untersuchungen zum wärmetechnischen Verhalten unterschiedlicher Kammergeometrien / II
Bericht-Nr. 15106-3 vom 05.09.2008
- [24] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Detailbetrachtungen der Kammer-Geometrien / I
Bericht-Nr. 15106-4 vom 09.07.2009
- [25] TU Darmstadt
Materialtechnische Kennwerte Holzbeton; Charge HB-A-02
sowie
Zwischenbericht zu Projektphase I vom 24.07.2009
- [26] Fa. maxit
Materialtechnische Kenndaten des Kalkzementleichtputzes
Mail vom 16.01.2009

2 Veranlassung

Aufbauend auf den vorliegenden Untersuchungen wird im Weiteren das feuchtetechnische Verhalten des Inlay- und Kammersteines beurteilt. Die rechentechnischen Untersuchungen werden mit einer hygrothermischen Bauteilsimulation (Programmsystem WUFI des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik) durchgeführt. Die Berechnungen sind zunächst eindimensional durchgeführt worden.

Eingangsparameter für die Materialien sind wie folgt angesetzt worden:

Holzstein	<ul style="list-style-type: none">• Kennwerte aus den Untersuchungen der TU Darmstadt [24].• Abgleich der Daten mit den Angaben der Datenbank masea [3] für „Holzbeton“.• Überprüfung der Daten nach den Unterlagen der in früheren Jahren gemachten Untersuchungen [1], [2].
Außen- und Innenputz	<ul style="list-style-type: none">• Kennwerte nach Angaben der Fa. maxit [25].• Abgleich der Daten mit den Angaben der Datenbank masea [3] für „Mineralischer Kalkzement Leichtputz“.
Holzfaserdämmstoff	<ul style="list-style-type: none">• Daten aus der Datenbank masea [3] für „Holzfaserdämmplatte“.

3 Parameter

3.1 Materialien

Die angesetzten Materialien mit den Kennwerten entsprechen dem Bericht 15106-2 [22].

3.2 Definition

Im Weiteren werden die Begriffe für die Steinmaße wie folgt definiert:

Breite b:	Breite des Steins in Wandrichtung (horizontales Maß)
Dicke d:	Dicke des Steins senkrecht zur Wandrichtung (horizontales Maß)
Höhe h:	Höhe des Steins in vertikaler Ausrichtung

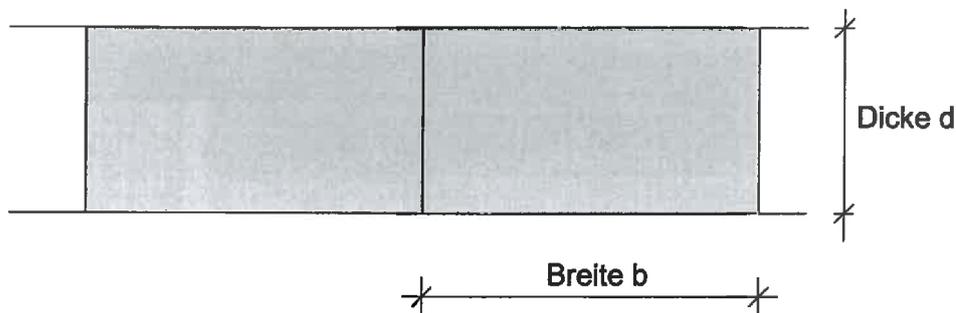


Bild 1 Definition von Steinbreite und -dicke

Eine Steinbezeichnung „37,5 cm / 50 cm“ bezieht sich mit „b / d“ somit auf eine Breite von 37,5 cm und eine Dicke von 50 cm.

3.3 Ausführungsvarianten „Homogener Stein“ (d = 37,5 cm)

Es wurde der homogene Stein in den Ausführungen

- H1: ILA-Holzstein, d = 37,5 cm
- H2: Beton, d = 37,5 cm
- H3: Hochdämmender Ziegel, d = 37,5 cm
- H4: ILA-Holzstein, d = 50,0 cm

miteinander vergleichen.

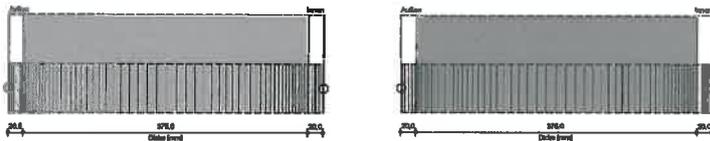


Bild 2 Bauteilaufbauten H1 und H2 der eindimensionalen Berechnungen (homogener Stein)

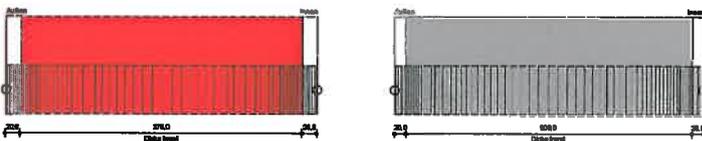


Bild 3 Bauteilaufbauten H3 und H4 der eindimensionalen Berechnungen (homogener Stein)

3.4 Ausführungsvarianten „Einkammer-Stein“ (d = 37,5 cm)

Es wurde der homogene Stein in den Ausführungen

- 1K-1: ILA-Holzstein (homogen), d = 37,5 cm
- 1K-2: ILA-Holzstein, Einkammer-Stein, Inlay mit 20 cm Holzfaserdämmstoff, mittig
- 1K-3: ILA-Holzstein, Einkammer-Stein, Inlay mit 20 cm Polystyrol-Dämmstoff, mittig
- 1K-4: ILA-Holzstein, Einkammer-Stein, Inlay mit 20 cm Holzfaserdämmstoff, nach innen verschoben
- 1K-5: ILA-Holzstein, Einkammer-Stein, Inlay mit 20 cm Holzfaserdämmstoff, nach außen verschoben

miteinander vergleichen.

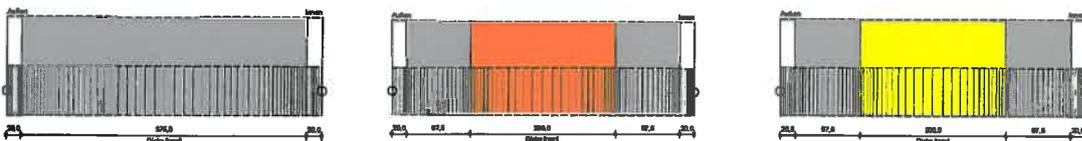


Bild 4 Bauteilaufbauten 1K-1 bis 1K-3 der eindimensionalen Berechnungen (Einkammer-Stein)

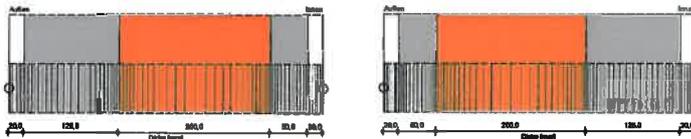


Bild 5 Bauteilaufbauten 1K-4 und 1K-5 der eindimensionalen Berechnungen (Einkammer-Stein)

3.5 Ausführungsvarianten „Zweikammer-Stein“ (d = 50,0 cm)

Es wurde der homogene Stein in den Ausführungen

- 2K-1: ILA-Holzstein (homogen), d = 50,0 cm
- 2K-2: ILA-Holzstein, Zweikammer-Stein, Inlay mit 2*14 cm Holzfaserdämmstoff, mittig
- 2K-3: ILA-Holzstein, Zweikammer-Stein, Inlay mit 2*14 cm Holzfaserdämmstoff, nach innen verschoben
- 2K-4: ILA-Holzstein, Zweikammer-Stein, Inlay mit 2*14 cm Holzfaserdämmstoff, nach außen verschoben

miteinander vergleichen.

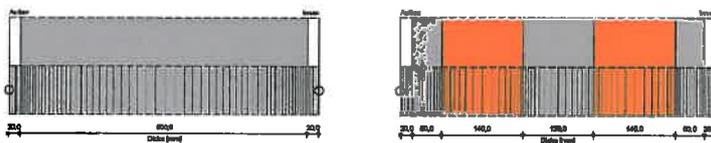


Bild 6 Bauteilaufbauten 2K-1 und 2K-2 der eindimensionalen Berechnungen (Zweikammer-Stein)

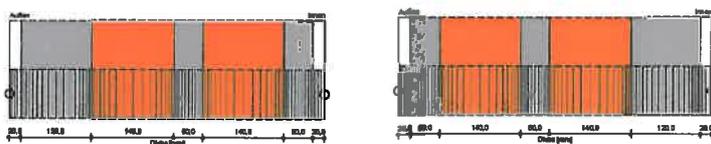


Bild 7 Bauteilaufbauten 2K-3 und 2K-4 der eindimensionalen Berechnungen (Zweikammer-Stein)

4 Ermittlung des feuchtetechnischen Verhaltens

Die Ergebnisse sind im Anhang A dargestellt.

Es zeigte sich zusammenfassend:

- Die Berechnungen mit dem homogenen Stein zeigen bei $d = 375$ bzw. 500 mm kaum Unterschiede (H-1 und H-4).
- Die Variante mit dem Betonstein (H-2) zeigt sich erwartungsgemäß am schlechtesten.
- Die Variante mit dem Hochdämmenden Ziegel (H-3) zeigt sich recht gut.
- Beim 1-Kammerstein ist die Variante mit dem Holzfaser-Inlay (1K-2) deutlich besser als die mit dem PS-Inlay (1K-3).
- Weiterhin zeigt es sich, dass die Verschiebung des Inlays von Innen (1K-4) über die Mitte (1K-2) nach Außen (1K-5) keine gravierenden Unterschiede erbringt.
- Gleichwohl ist zu sehen, dass auf der Innenseite möglichst „viel Fleisch“ (sprich: Holzstein) sein sollte. Dann ergeben sich die besten Werte.
- Dieses ist auch beim 2-Kammerstein zu erkennen. (2K-3 schneidet am besten ab.)
- Aus baupraktischen Erwägungen sollte der Stein aber symmetrisch aufgebaut sein. Die Ergebnisse hierzu sind in Ordnung.

Möln, 04. September 2009

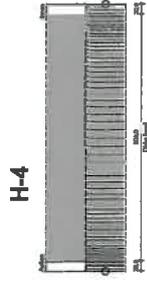
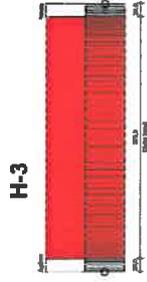
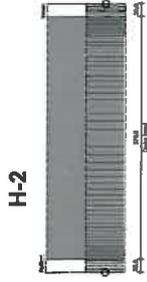
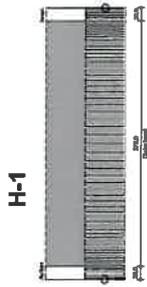

Dipl.-Ing. Frank Eißmann

Entwicklung und ökologische Bewertung eines für die Passivhaus-Bauweise tauglichen,
einschaligen massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

Feuchtetechnisches Verhalten des Inlay- und Kammersteines / I

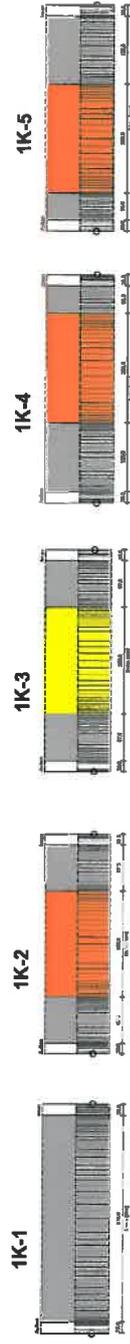
Anhang A Ergebnisse feuchtetechnischer Berechnungen

04.09.2009



Wassergehalt in	ILA-375mm 700		Beton-375mm 2220		Lhz-375mm 600		ILA-500mm 700	
	kg/m ³	M-%	kg/m ³	M-%	kg/m ³	M-%	kg/m ³	M-%
Leichtputz_a 1100	Anfang	29,00	29,00	2,64	29,00	2,64	29,00	2,64
	Ende	35,57	28,96	2,63	34,98	3,18	35,59	3,24
	Differenz	6,57	-0,04	0,00	5,98	0,54	6,59	0,60
	Max	159,20	119,75	10,89	155,93	14,18	158,40	14,40
	Min	14,58	8,68	0,79	13,46	1,22	14,74	1,34
"Stein"	Anfang	40,53	75,00	3,38	11,00	1,83	40,53	5,79
	Ende	34,40	74,12	3,34	8,36	1,39	34,90	4,99
	Differenz	-6,13	-0,88	-0,04	-2,64	-0,44	-5,63	-0,80
	Max	41,73	76,19	3,43	11,93	1,99	41,45	5,92
	Min	33,05	73,47	3,31	6,08	1,01	34,16	4,88
Leichtputz_i 1100	Anfang	29,00	29,00	2,64	29,00	2,64	29,00	2,64
	Ende	10,97	14,77	1,34	11,23	1,02	10,85	0,99
	Differenz	-18,03	-14,23	-1,29	-17,77	-1,62	-18,15	-1,65
	Max	29,00	29,00	2,64	29,00	2,64	29,00	2,64
	Min	5,87	10,01	0,91	6,08	0,55	5,88	0,53
Gesamtwassergehalt	Anfang	16,36	29,29		5,29		21,43	
	Ende	13,83	28,67		4,06		18,38	
	Differenz	-2,53	-0,62	-2,1%	-1,23	-23,3%	-3,05	-14,2%
	Max	18,33	31,18		7,23		23,40	
Min	12,88	28,03		3,39		17,57		
Zeitintegral der Ströme in kg/m ²								
Feuchtströme Außen (links)	-1,95	raus	0,54	rein	-0,51	raus	-1,71	raus
Feuchtströme Innen (rechts)	0,85	raus	1,16	raus	0,72	raus	1,34	raus

Ein-Kammer
04.09.2009



	ILA-375mm 700	ILA-87,5/87,5mm 700 Holzfaser_040 160	ILA-87,5/87,5mm 700 PS_040 30	ILA-125/50mm 700 Holzfaser_040 160	ILA-50/125mm 700 Holzfaser_040 160
Wassergehalt in	kg/m³	M-%	M-%	M-%	M-%
Leichtputz_a 1100	29,00 35,57 6,57 159,20 14,58	2,64 3,23 0,60 14,47 1,33	2,64 3,25 0,61 14,58 1,42	2,64 3,26 0,62 14,48 1,32	2,64 3,26 0,61 14,56 1,40
"Stein_a"	40,53 34,40 -6,13 41,73 33,05	5,79 4,91 -0,88 5,96 4,72	5,79 6,06 0,27 8,51 5,78	5,79 6,22 0,43 7,71 5,77	5,79 6,10 0,31 8,12 5,78
"Inlay"	26,00 16,33 -9,67 26,43 2,01	0,00 0,00 0,00 0,00 0,00	16,25 10,21 -6,04 16,52 2,01	16,25 10,23 -9,64 16,25 2,01	16,25 10,23 -9,59 17,31 2,01
"Stein_i"	40,53 34,40 -6,13 41,73 33,05	5,79 4,91 -0,88 5,96 4,72	5,79 6,06 0,27 8,51 5,78	5,79 6,22 0,43 7,71 5,77	5,79 6,10 0,31 8,12 5,78
Leichtputz_i 1100	29,00 10,97 -18,03 29,00 5,87	2,64 1,00 -1,64 2,64 0,53	2,64 0,99 -1,64 2,64 0,49	2,64 0,98 -1,66 2,64 0,54	2,64 1,00 -1,63 2,64 0,48
Gesamtwassergehalt	16,36 13,83 -2,53 18,33 12,88		8,61 7,42 -1,19 10,64 6,42	13,45 10,96 -2,49 15,45 10,40	13,45 9,88 -3,57 15,47 8,49
Zeitintegral der Ströme in kg/m²					
Feuchteströme Außen (links)	-1,95	raus	-3,57	-3,00	-4,00
Feuchteströme Innen (rechts)	0,85	raus	-0,51	-0,51	-0,42

Zeitintegral der Ströme in kg/m²

Feuchteströme Außen (links)
Feuchteströme Innen (rechts)

Untersuchungen zum feuchtetechnischen Verhalten des Inlay- und Kammersteines / II

- Projekt:** Entwicklung und ökologische Bewertung eines für die Passivhaus-Bauweise tauglichen, einschaligen massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen
- Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt – DBU
AZ. 23652-25
- Auftraggeber:** ILA Bauen&Wohnen
Fuldaweg 21/23
74172 Neckarsulm-Amorbach
- Bericht-Nr.:** 15106-6
- Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Frank Eßmann
- Umfang:** 15 Seiten Bericht
55 Seiten Anhang
- Datum:** 27. Januar 2011

1	GRUNDLAGEN	3
1.1	VORLIEGENDE UNTERLAGEN	3
1.2	VERWENDETE LITERATUR	3
1.3	DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN	4
2	VERANLASSUNG	5
3	WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENT DER EBENEN AUßENWAND	5
4	WÄRME- UND FEUCHTETECHNISCHE BETRACHTUNG DER AUßENWAND	9
4.1	GEWÄHLTE RANDBEDINGUNGEN	9
4.2	EINDIMENSIONALE BERECHNUNGEN	9
4.3	ZWEIDIMENSIONALE BERECHNUNGEN	11
5	ERMITTLUNG DES WÄRMEBRÜCKEN-EINFLUSSES	13
 ANHÄNGE		
ANHANG A	WÄRMETECHNISCHE BERECHNUNGEN NACH DIN EN ISO 6946	I
ANHANG B	ERGEBNISSE DER HYGROTHERMISCHEN BAUTEILSIMULATION (1D)	II
ANHANG C	ERGEBNISSE DER HYGROTHERMISCHEN BAUTEILSIMULATION (2D)	XIII

1 Grundlagen

1.1 Vorliegende Unterlagen

- [1] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-17.1-885
ILA-Holz-Zementsteine für Ausfachungsmauerwerk in Gebäuden mit rahmenartigen Stahlbetontragwerk,
Deutsches Institut für Bautechnik, 27.04.2007
- [2] Prüfbericht A.Nr. U7/063/10
Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg bvfs; 27.05.2010;
Produkt Thermo-Span
- [3] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.15-1417 sowie Übereinstimmungszertifikat 52 9103 07-01 vom 15.03.2007; Produkt holzflex, Fa. Homatherm
- [4] Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen; Institut für Bauklimatik, TU Dresden;
Zentrum für Umweltbewusstes Bauen, Kassel
MASEA (Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung);
www.masea-ensan.com/masea/; Stand vom 13.07.2007

1.2 Verwendete Literatur

- [11] DIN 4108
Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden
Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Beuth-Verlag GmbH Berlin, Juli 2003
Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Beuth-Verlag GmbH Berlin, Juli 2001
Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte (Vornorm),
Beuth-Verlag GmbH Berlin, Juni 2007
Beiblatt 2: Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele, Beuth-Verlag GmbH Berlin,
März 2006
- [12] DIN EN ISO 10456
Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte, Beuth Verlag GmbH Berlin, Mai 2010
- [13] DIN EN ISO 6946
Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren; Beuth-Verlag GmbH Berlin, April 2008
- [14] DIN EN ISO 10211
Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen
Beuth-Verlag GmbH Berlin, April 2008

1.3 Durchgeführte Untersuchungen

- [21] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Voruntersuchungen zum wärmetechnischen Verhalten unterschiedlicher Kammergeometrien
und Steinausführungen
Bericht-Nr. 15106-1a vom 04.07.2008
- [22] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Untersuchungen zum wärmetechnischen Verhalten unterschiedlicher Kammergeometrien / I
Bericht-Nr. 15106-2 vom 15.08.2008
- [23] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Untersuchungen zum wärmetechnischen Verhalten unterschiedlicher Kammergeometrien / II
Bericht-Nr. 15106-3 vom 05.09.2008
- [24] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Detailbetrachtungen der Kammer-Geometrien / I
Bericht-Nr. 15106-4 vom 09.07.2009
- [25] tha - Ingenieurbüro Eßmann
Untersuchungen zum feuchtetechnischen Verhalten des Inlay- und Kammersteins / I
Bericht-Nr. 15106-5 vom 04.09.2009
- [26] TU Darmstadt
Materialtechnische Kennwerte Holzbeton; Charge HB-A-02
sowie
Zwischenbericht zu Projektphase I vom 24.07.2009 und
Zwischenbericht zu Projektphase II vom 08.12.2010 und
Mail vom 11.01.2011
- [27] Fa. Saint-Gobain Weber
Materialtechnische Kenndaten der zu verwendenden Putzsysteme
Mail vom 14.10.2009; ergänzt mit Mail vom 08.12.2010 (Fa. ILA)

2 Veranlassung

Die Ergebnisse der Phase I des Forschungsvorhabens zeigten bereits die positiven Möglichkeiten des untersuchten Wandsystems auf. Es wurde jedoch die Steingeometrie wie auch das Steinmaterial weiter optimiert, sodass Neuberechnungen des U-Wertes, wie auch zum feuchtetechnischen Verhalten des Wandaufbaus erforderlich waren.

Eingangsparameter für die Materialien sind wie folgt angesetzt worden:

Holzstein	<ul style="list-style-type: none">• Aktualisierte Kennwerte aus den Untersuchungen der TU Darmstadt [26].• Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit nach Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg [2].
Außen- und Innenputz	<ul style="list-style-type: none">• Kennwerte nach Angaben der Fa. Saint-Gobain Weber [27].
Holzfaserdämmstoff	<ul style="list-style-type: none">• Kennwerte des Herstellers [3] sowie [4].

Die Daten wurden jeweils mit den Kennwerten der Datenbank masea [4] abgeglichen und auf Unstimmigkeiten überprüft.

3 Wärmedurchgangskoeffizient der ebenen Außenwand

Für die Außenwand wurde der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert in $W/(m^2K)$) nach DIN EN ISO 6946 [13] ermittelt. Da es sich um einen Bauteilaufbau mit nebeneinander liegenden (inhomogenen) Schichten handelt, musste eine Einteilung in Abschnitte und Schichten vorgenommen werden.

Es wurden die U-Werte für den Inlay-Stein und den Kammerstein gemäß Bild 2 bzw. 3 allein ermittelt sowie für einen 3,00 Meter langen Wandabschnitt mit 6 Inlay-Steinen und 2 Kammersteinen gemäß Bild 1. Beim Inlay-Stein wurde der Einfluss der Dicke der Dämmkammern ($2 * 15$ cm bzw. $2 * 16$ cm) verglichen.

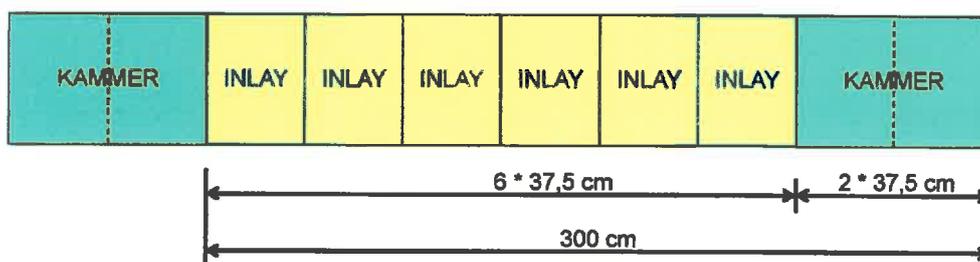
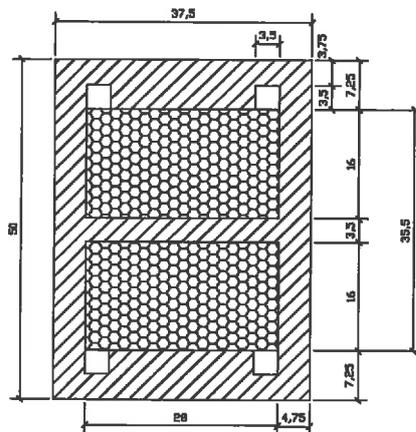


Bild 1 Abschnitt einer ebenen Wand



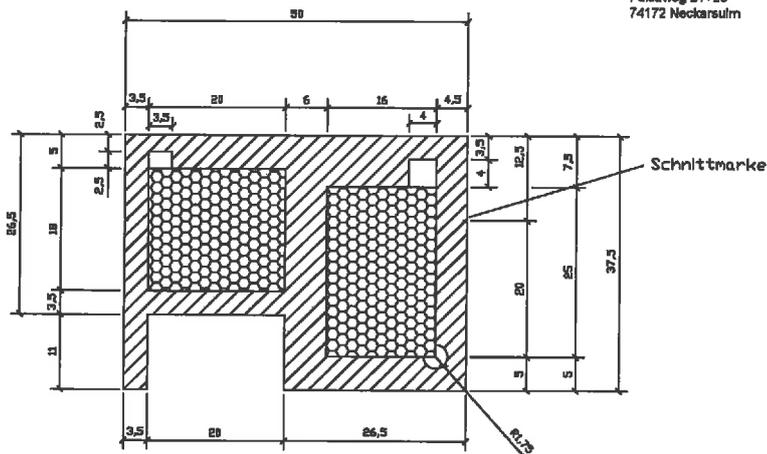
ILA Bauen & Wohnen
Ökologische Produkte und
Bausysteme Vertriebsges. mbH
Fuldaerweg 21+23
74172 Neckarsulm

Passivstein INLAY 37,5
symmetrisch
16er Dämmkammer

Stand: 06.12.2010

Alle Maße in cm
M 1:50

Bild 2 Inlay-Stein; $d_{\text{Stein}} = 50 \text{ cm}$, $d_{\text{Dämmstoff}} = 2 \times 16 \text{ cm}$; Steinbreite 37,5 cm



ILA Bauen & Wohnen
Ökologische Produkte und
Bausysteme Vertriebsges. mbH
Fuldaerweg 21+23
74172 Neckarsulm

Passivstein ILA Säule
37,5 x 50 cm

Stand: 06.12.2010

Alle Maße in cm
M 1:50

Bild 3 Betonkammer-Stein; $d_{\text{Stein}} = 50 \text{ cm}$, Beton-Kern: 20x22 cm; Steinbreite 37,5 cm

Material	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ	Anmerkungen
ILA- Stein aus Holz	0,106 W/(mK) ⁽¹⁾	
Wärmedämmung Inlay	0,040 W/(mK) ⁽²⁾	Alternativ: Material mit $\lambda = 0,035$ W/(m ² K)
Beton	0,68 W/(mK)	Leichtbeton mit Zuschlag Blähton; λ nach DIN V 4108-4 " $\rho = 1600$ kg/m ³ "
Außenputz	0,56 W/(mK)	Nach Angaben Fa. Saint-Gobain Weber [27]
Innenputz	0,70 W/(mK)	Nach Angaben Fa. Saint-Gobain Weber [27]

⁽¹⁾ nach Prüfbericht der Bautechnischen Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg bvfs; A.Nr. U7/063/10 vom 27. Mai 2010

⁽²⁾ Produkt holzflex, Fa. Homatherm; nach Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Z-23.15-1417 sowie Übereinstimmungszertifikat 52 9103 07-01 vom 15.03.2007

Tabelle I. Angesetzte Materialkennwerte

Die detaillierten Berechnungsergebnisse sind in Anhang A dargestellt.

	U-Werte in W/(m ² K)	
	mit Inlay 2 * 15 cm	mit Inlay 2 * 16 cm
Inlay-Stein	0,133	0,130
Kammer-Stein	0,177	0,177
Wandabschnitt ebene Wand	0,150	0,148

Tabelle II. Ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten der ebenen Außenwand
($\lambda_{\text{Inlay}} = 0,040 \text{ W/(mK)}$)

	U-Werte in W/(m ² K)	
	mit Inlay 2 * 15 cm	mit Inlay 2 * 16 cm
Inlay-Stein	0,126	0,123
Kammer-Stein	0,169	0,169
Wandabschnitt ebene Wand	0,143	0,141

Tabelle III. Ermittelte Wärmedurchgangskoeffizienten der ebenen Außenwand
($\lambda_{\text{Inlay}} = 0,035 \text{ W/(mK)}$)

Mit einem Wärmedämm-Inlay der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 040 wird bei der vorliegenden Geometrie ein U-Wert von ca. 0,13 W/(m²K) für den Inlay-Stein erreicht. Für einen gesamten ebenen Wandabschnitt ergibt dieses einen U-Wert von ca. 0,15 W/(m²K).

Wird ein Inlay der Wärmeleitfähigkeitsgruppe 035 eingesetzt, ergeben sich U-Werte von ca. 0,125 W/(m²K) für den Inlay-Stein und ca. 0,14 W/(m²K) für den gesamten ebenen Wandabschnitt.

4 Wärme- und feuchtetechnische Betrachtung der Außenwand

4.1 Gewählte Randbedingungen

Den Betrachtungen zum wärme- und feuchtetechnischen Bauteilverhalten lagen die folgenden Parameter zu Grunde:

- Die Berechnungen wurden mit dem thermisch-hygrischen Bauteilsimulations-Programm WUFI des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (1D sowie 2D) erstellt.
- Als Außenklima wurde ein extremes Klima von Holzkirchen (Datensatz 1991 des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik; Datenbank WUFI) als ungünstige Klimarandbedingungen für Deutschland angesetzt.
- Für Innen wurde ein eingeschwungenes, übliches Klima (Temperatur: $21\text{ °C} \pm 1\text{ K}$; Rel. Feuchte: $50\% \pm 10\%$) angesetzt.
- Es wurden die Außenwände gegen Nord (ohne Schlagregen) bzw. gegen West (mit Schlagregen) als ungünstigste Orientierung berechnet.
- Die Berechnungen wurden in der eindimensionalen Betrachtung für einen Zeitraum von 3 Jahren durchgeführt (01.10.2010-01.10.2013). Bei der zweidimensionalen Berechnung wurde ein Zeitraum von 1,5 Jahren mit zwei Winterperioden (01.10.2010–01.04.2012) gewählt.
- Beschichtungen wurden auf der Innen- und Außenseite nicht berücksichtigt.
- Das Programm sowie die Anwendung basieren auf den Grundlagen der WTA-Merkblätter 6-1-01 und 6-2-01 bzw. der Norm DIN EN 15026.

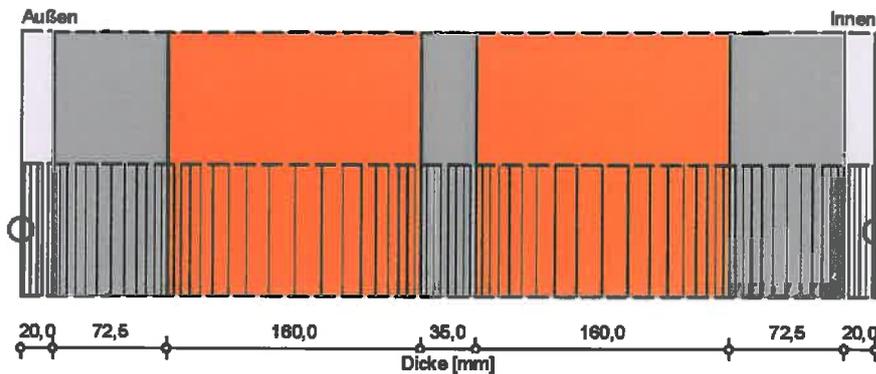
4.2 Eindimensionale Berechnungen

Die eindimensionale Berechnung wurde vergleichend zu den Untersuchungen in Bericht -5 [25] durchgeführt.

Der aktuelle Stein wurde für die folgenden Ausführungen untersucht:

- ILA-Holzstein (homogen), $d = 50\text{ cm}$
- ILA-Holzstein, Inlay mit $2 * 16\text{ cm}$ bzw. $2 * 15\text{ cm}$ Holzfaserdämmstoff

Die Berechnungen wurden ohne und mit Schlagregen durchgeführt. Ergebnisse sind im Anhang B dargestellt.



○ - Monitorpositionen

Materialien :

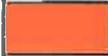
-  - ILA Grundputz Außen
-  - ILA - Stein_aus_Holz
-  - Holzfaserdämmplatte040_MASEA
-  - ILA - Stein_aus_Holz
-  - Holzfaserdämmplatte040_MASEA
-  - ILA - Stein_aus_Holz
-  - ILA Grundputz Innen

Bild 4 Bauteilaufbau und Holzstein mit 2 * 16 cm Inlay

In der Hauptsache sind hier die Berechnungen mit Schlagregen zu beurteilen. Die ermittelten Wassergehalte liegen jeweils im unkritischen Bereich. Dieses gilt insbesondere für den homogenen Wandaufbau. Bei den Steinen mit Wärmedämm-Inlays sind die Wassergehalte für die mittleren und raumseitigen Stege wie zu erwarten war niedriger. Die Wassergehalte der außenliegenden Stege sind einer hohen Feuchtelast ausgesetzt. Hier zeigt sich, dass ein möglichst breiter Steg hinsichtlich der feuchtetechnischen Situation besser ist. Dem Außenputz kommt insbesondere aufgrund des Schlagregenschutzes eine maßgebliche Bedeutung zu.

4.3 Zweidimensionale Berechnungen

Der obige Stein wurde in einer zweidimensionalen Betrachtung in der Situation einer Außenecke (hier mit Kammerstein zur Aufnahme der Leichtbeton-Stütze) untersucht.

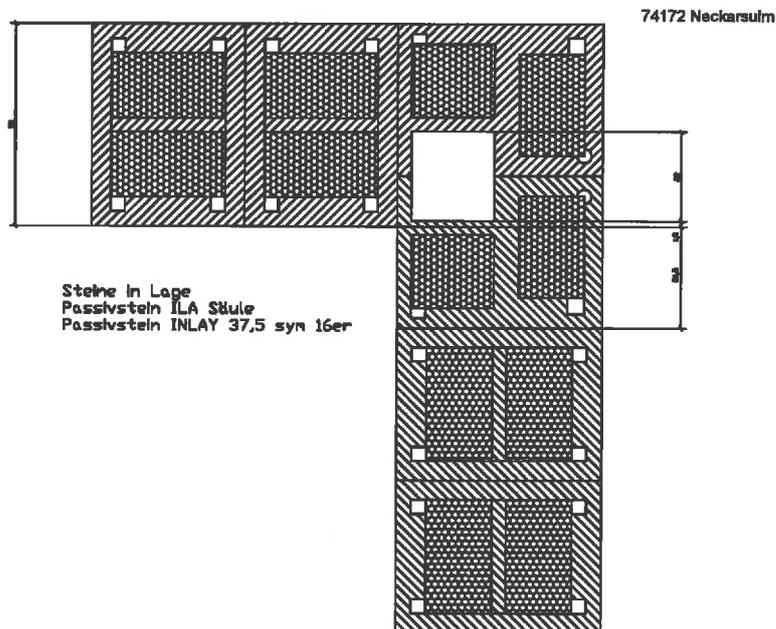


Bild 5 Außenecke, Zeichnung ILA

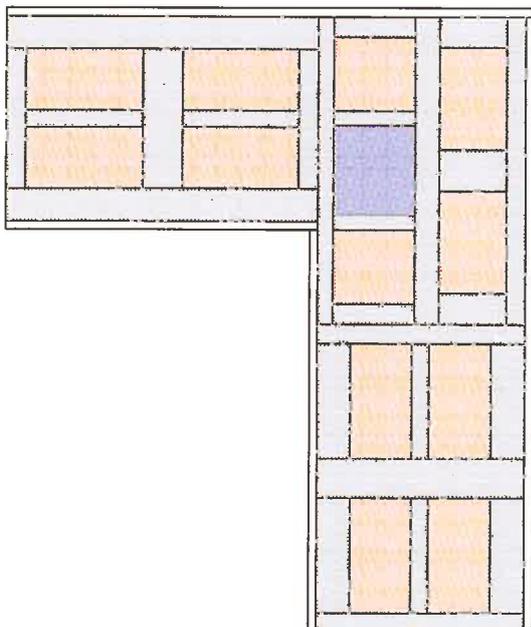


Bild 6 Außenecke, Generiertes Modell WUFI-2D

Die obige Situation der Außenecke wurde mit einem Inlay (Holzfaserdämmstoff, WLG040) betrachtet. Dabei ist die Situation für den Fall mit und ohne Schlagregen berechnet worden. Weiterhin wurden - nur informativ - die Berechnungen mit einer Wärmeleitfähigkeitsgruppe 035, ansonsten mit gleichen Kennwerten untersucht.

Die Ergebnisse sind im Anhang C dargestellt.

Es zeigte sich, dass bei den angesetzten Klimadaten in der Innenecke eine Oberflächentemperatur von etwa 17,5 °C bis 22,0 °C zu verzeichnen war. Dabei schwankte die relative Luftfeuchte zwischen etwa 45 und 62 %.

Die Wassergehalte im ILA-Holzstein wurden in verschiedenen raumseitigen Bereichen untersucht. Die untersuchten Punkte 2 bis 5 sind in Bild 13 des Anhang C dargestellt. Dabei ermittelte sich der Wassergehalt im Maximum etwa bei 5,1 bis 5,3 M-% (Nord-Orientierung, ohne Schlagregen), dieses entspricht einer relativen Porenluftfeuchte von etwa 65 %. Bei den Berechnungen mit Schlagregen (West-Orientierung) liegen die Wassergehalte im Maximum etwa bei 5,5 bis 6,5 M-%, entsprechend etwa 65 bis 75 % relativer Feuchte.

Maßgebliche Unterschiede in den Varianten mit Inlays der WLG 040 und der WLG035 waren bei den untersuchten raumnahen Punkten nicht zu verzeichnen.

5 Ermittlung des Wärmebrücken-Einflusses

Der Wärmebrücken-Einfluss bei der Außenecke wurde im Vergleich zu den vorherigen Untersuchungen betrachtet.

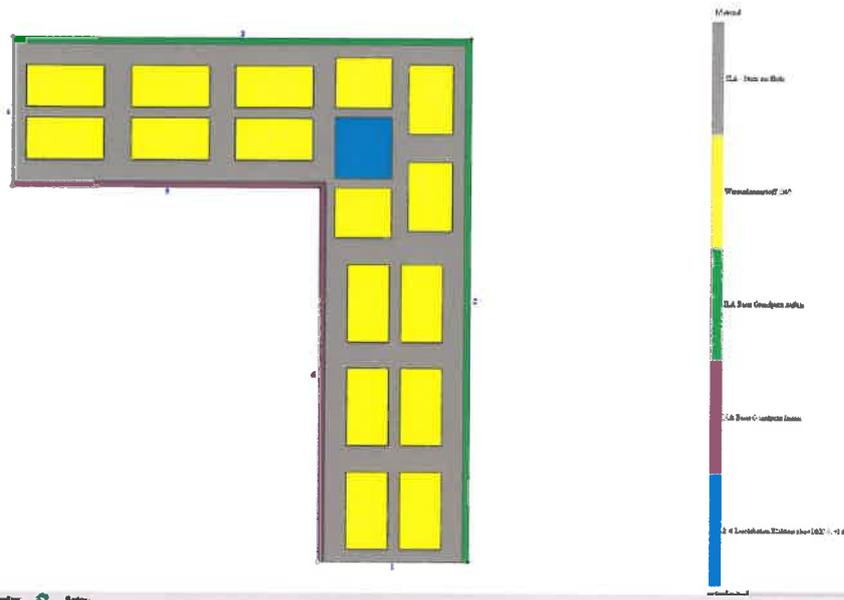


Bild 7 Außenecke, Materialbild (hier: 2 * 15 cm Inlay, WLG040)

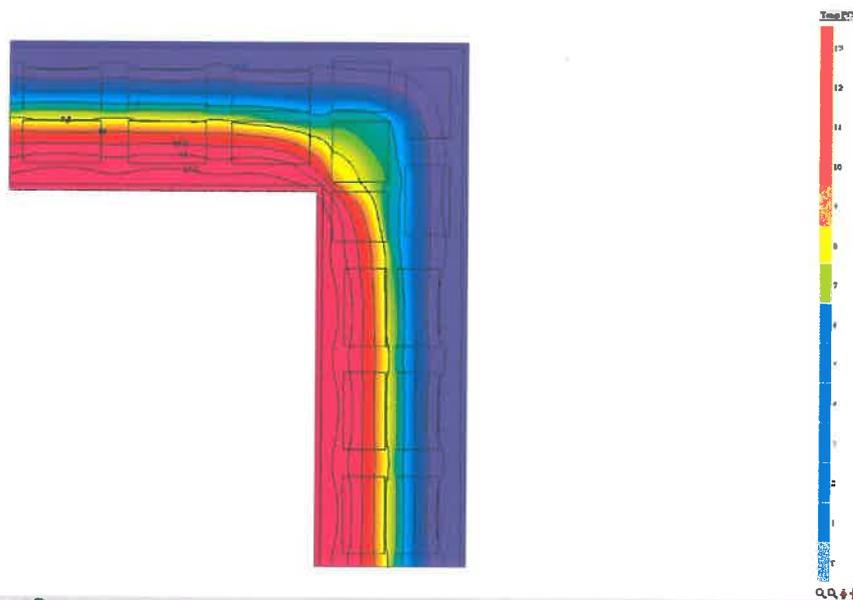


Bild 8 Außenecke, Temperaturbild (hier: 2 * 15 cm Inlay, WLG040)

AECKE2D_ (Wandecke)	f_{Rsi}	θ_{Si} in °C	ψ (e) in W/(mK)
_2*15cm Inlay WLG040	0,882	17,05	-0,0780
_2*16cm Inlay WLG040	0,882	17,05	-0,0737
_2*15cm Inlay WLG035	0,885	17,12	-0,0727
_2*16cm Inlay WLG035	0,885	17,12	-0,0686

Tabelle IV. Ermittelte Kennwerte bei thermischen Modellberechnungen der Außenecke

AECKE2D_ (ebener Bereich)	f_{Rsi}	θ_{Si} in °C
_2*15cm Inlay WLG040	0,970	19,24
_2*16cm Inlay WLG040	0,970	19,26
_2*15cm Inlay WLG035	0,972	19,29
_2*16cm Inlay WLG035	0,972	19,31

Tabelle V. Ermittelte Kennwerte bei thermischen Modellberechnungen im ebenen Bauteilbereich (Bereich Inlay)

In den untersuchten Varianten mit dem 15 cm- und dem 16 cm- Inlay sind kaum Unterschiede in der minimalen raumseitigen Oberflächentemperatur zu erkennen. Dieses ist darin begründet, dass der Kammerstein in der Außenecke in beiden Varianten identisch ist. Lediglich bei Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Inlays ändert sich die Situation geringfügig.

Für den ebenen Wandbereich wurden die unterschiedlichen Varianten ebenfalls untersucht. In den betrachteten Varianten wich die raumseitige Oberflächentemperatur um lediglich 0,07 Kelvin ab. Dieses stellt keine maßgebliche Differenz dar.

Möln, 27. Januar 2011



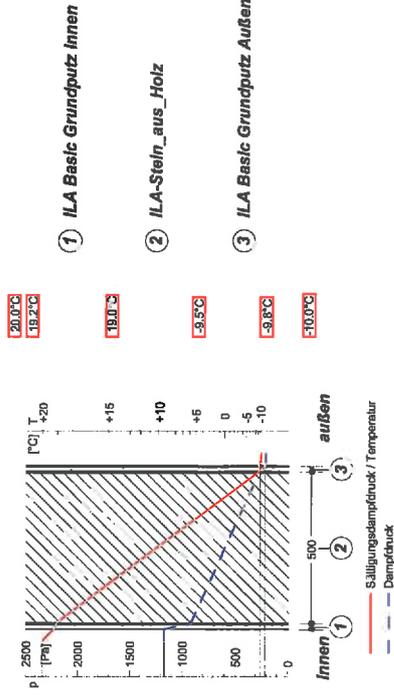
Dipl.-Ing. Frank Eißmann

Entwicklung und ökologische Bewertung eines für die Passivhaus-Bauweise tauglichen,
einschaligen massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

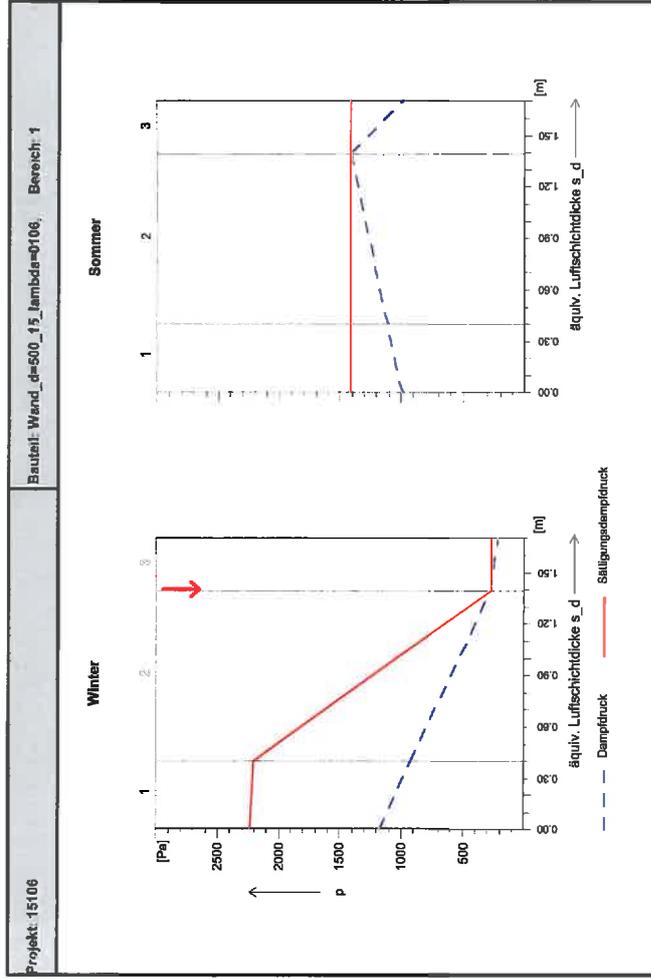
Feuchtetechnisches Verhalten des Inlay- und Kammersteines / II

Anhang A Wärmetechnische Berechnungen nach DIN EN ISO 6946

ILA	Fuldweg 21+23	74172 Neckarau	HT
Projekt-Bauteil	Wand d=500 15 lambda=010	U-Wert	0,150
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft	Fläche	0,00
		(F _x =1,00)	0,00
			0,00
Gesamte Gebäudefläche	19,00 %	min. R = 1,200	← vorh. R = 6,478 m ² K/W
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt!			



Sp	Nr	Schicht	d [mm]	Fl.masse [kg/m ²]	λ [W/(m·K)]	R _i /R _T [m ² ·K/W]	μ	s _d [m]	θ [°C]	p [Pa]	p _s [Pa]
-	-	Wärmeübergang Innen	-	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,169
1	1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	19,2	2,227	1,169
2	2	ILA-Stein_aus_Holz	500,0	240,0	0,106	4,717	2	1,00	19,0	2,203	912
3	3	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	-9,5	271	271
-	-	Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	-9,8	266	208
-	-	(Summe Bauteil)	540,0	291,2	-	4,951	-	1,70	-10,0	260	208
U = 0,202 W/m ² K										Taufwasserfall: 0,415 kg/m ²	
Mindestwärmeschutz: min. R _i vorh. R = 1,200 / 4,781 m ² K/W										Verdunstungsmenge: 2,455 kg/m ²	
Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.											



Projekt: 15106	Bauteil: Wand_d=500_15 lambda=0106, Bereich: 1
$m_{w,T} = 0,415 \text{ kg/m}^2$ Taufwasserfall in einem Taupunkt	
$g_i = \frac{p_i - p_{iw}}{Z_i} = \frac{1169 - 271}{2,10 \cdot 10^5}$ $g_o = \frac{p_{ow} - p_o}{Z_o} = \frac{271 - 208}{0,45 \cdot 10^5}$ $m_{w,T} = t_v \cdot (g_i - g_o)$ $= 1440 \cdot (0,428 - 0,139) \cdot 10^{-3} = 0,415 \text{ kg/m}^2$	
$g_i = \frac{p_{iw} - p_i}{Z_i} = \frac{1404 - 963}{2,10 \cdot 10^5}$ $g_o = \frac{p_{ow} - p_o}{Z_o} = \frac{1404 - 983}{0,45 \cdot 10^5}$ $m_{w,v} = t_v \cdot (g_i + g_o)$ $= 2160 \cdot (0,201 + 0,936) \cdot 10^{-3} = 2,455 \text{ kg/m}^2$	

Grenzwerte für Tauwasserausfall

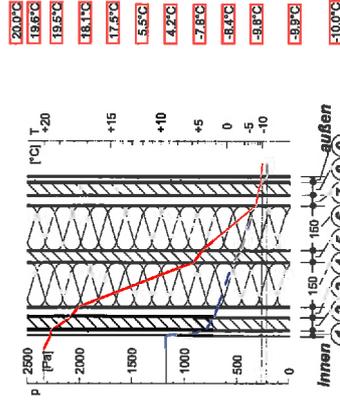
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19.2\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 95\%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 17.7\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 87\%$

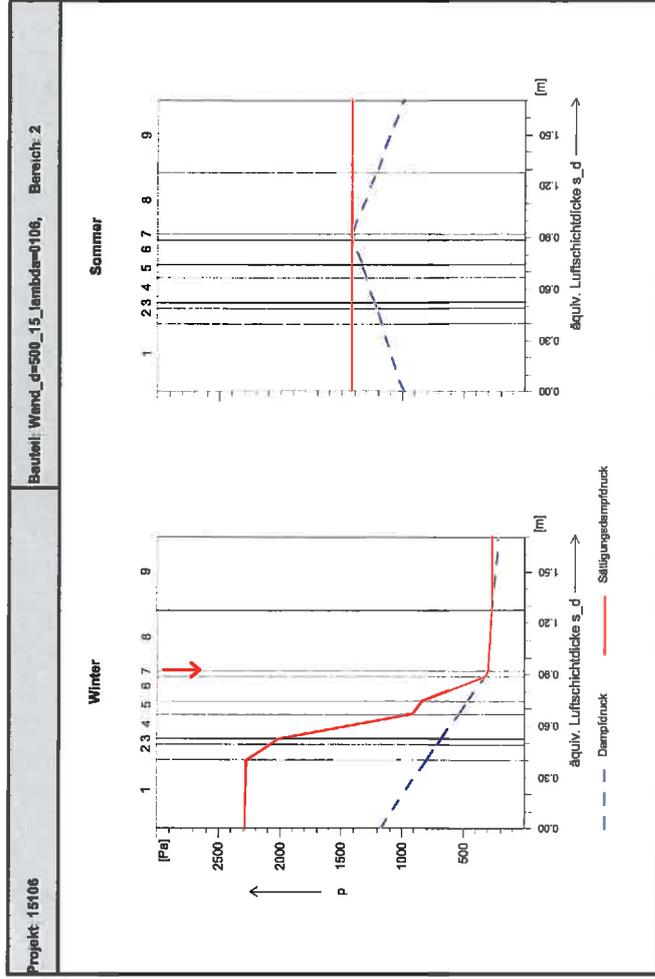
$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E} : \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{s,i})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{s,i} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldweg 21+23	74172 Neckarsulm	HT
Projekt-Bauittel	Wand d=500_15_lambda=010		
Außenwand	U-Wert	Fläche	[W/K]
	0,150	0,00	(F=1,00) 0,00
Gesamte Gebäudefläche	0,107	0,00	(F=1,00) 0,00
	Bereich 2 von 11	100,00	0,18
	Normal_inlay_Griff	14,00 %	100,00
	Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt		
	min R = 1,200 <= vorh R = 6,478 m²K/W		



- 1 ILA Basic Grundputz Innen
- 2 ILA-Stein_aus_Holz
- 3 Luftschicht, ruhend, horizontal
- 4 Wärmedämmstoff_040
- 5 ILA-Stein_aus_Holz
- 6 Wärmedämmstoff_040
- 7 Luftschicht, ruhend, horizontal
- 8 ILA-Stein_aus_Holz
- 9 ILA Basic Grundputz Innen

Sp	Nr	Schicht	Wärmeschutz				Taubeschutz									
			d [mm]	FI Masse [kg/m ²]	λ [W/(m·K)]	R/R _L T [m ² ·KW]	μ	s _d [m]	θ [°C]	P _s [Pa]	P [Pa]					
		Wärmeübergang innen				0,130										
1		ILA-Stein-Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	20,0	2,338	1,169					
2		ILA-Stein-aus-Holz	45,0	21,6	0,106	0,425	2	0,09	19,6	2,278	1,169					
3		Luftschicht, ruhend, horizontal	35,0	0,0	0,194	0,180	1	0,04	18,1	2,080	706					
4		Wärmedämmstoff_D40	190,0	0,0	0,040	3,750	1	0,15	17,5	2,006	673					
5		ILA-Stein-aus-Holz	40,0	19,2	0,106	0,377	2	0,08	5,5	902	532					
6		Wärmedämmstoff_D40	150,0	0,0	0,040	3,750	1	0,15	4,2	828	456					
7		Luftschicht, ruhend, horizontal	35,0	0,0	0,194	0,180	1	0,04	-7,8	315	315					
8		ILA-Stein-aus-Holz	45,0	21,6	0,106	0,425	8	0,36	-8,4	299	299					
9		ILA-Stein-Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	-9,8	265	256					
		Wärmeübergang außen							-9,9	263	208					
		Summe Bauteil	540,00	117,7		9,314		1,70	-10,0	260	208					
U = 0,107 W/m ² K			Taubeschutz				Taubeschutz				Taubeschutz					
			Verdunstungsmenge: 0,791 kg/m ²				Verdunstungsmenge: 1,437 kg/m ²				Verdunstungsmenge: 1,437 kg/m ²					
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 9,144 m ² K/W													Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.			



Tauwassermergen $m_{w,T} = 0,791 \text{ kg/m}^2$

Verdunstungsmenge $m_{w,V} = 1,437 \text{ kg/m}^2$

Tauwasseranfall in einem Bereich

$$g_i = \frac{p_i - p_{w,i}}{Z_i} = \frac{1169 - 315}{1,36 \cdot 10^8}$$

$$g_n = \frac{p_{w,n} - p_n}{Z_n} = \frac{299 - 208}{1,14 \cdot 10^8}$$

$$m_{w,T} = (g_i - g_n) = 1440 \cdot (0,630 - 0,080) \cdot 10^{-3} = 0,791 \text{ kg/m}^2$$

$$g_i = \frac{p_{w,i} - p_i}{Z_i + 0,5 \cdot Z_n} = \frac{1404 - 983}{1,38 \cdot 10^8}$$

$$g_n = \frac{p_{w,n} - p_n}{Z_n + 0,5 \cdot Z_i} = \frac{1404 - 983}{1,17 \cdot 10^8}$$

$$m_{w,V} = (g_i + g_n) = 2160 \cdot (0,304 + 0,361) \cdot 10^{-3} = 1,437 \text{ kg/m}^2$$

Grenzwerte für Tauwasserausfall

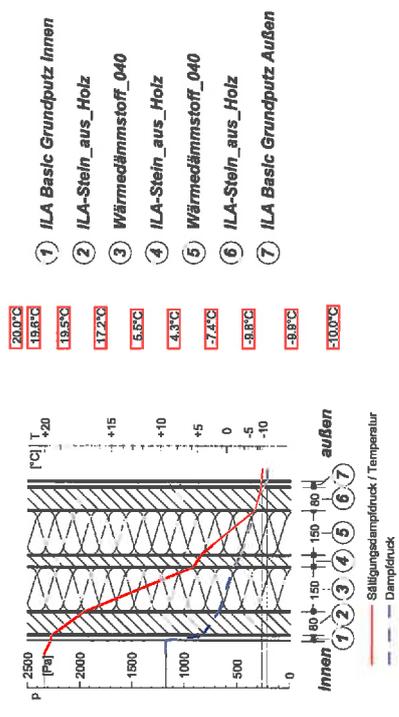
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19.6\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 97\%$

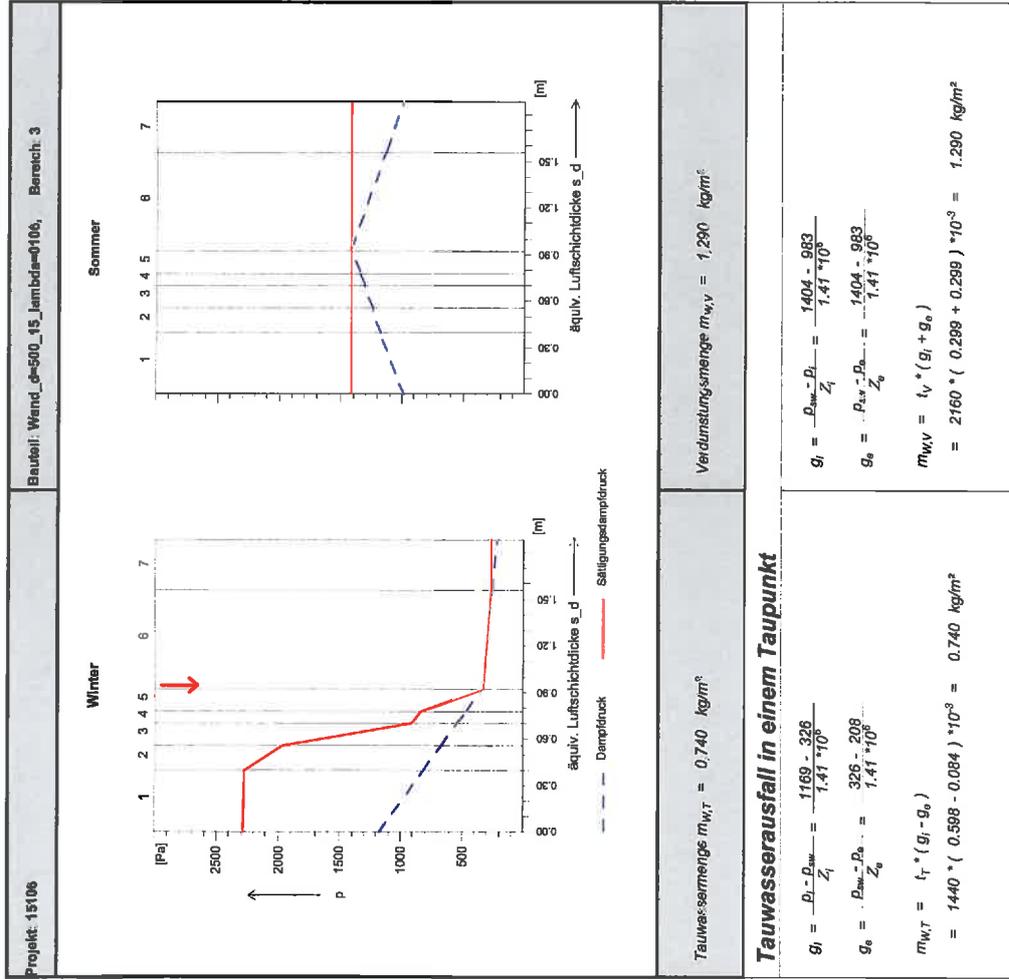
Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 18.8\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 93\%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E} : \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{e,i})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{e,i} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldaweg 21+23	74172 Neckarraum
Projekt-Bauteil	Wand d=500_15_lambda=010	Fläche
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft	[m ²]
		0,00
		HT
		[W/K]
		(F=1,00) 0,00
		[%]
		0,00
Gesamte Gebäudefläche		0,00
		(F=1,00) 0,00
		[%]
		100,00
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt!		min R = 1,200 <= vorh R = 6,478 m ² K/W
		U-Wert
		[W/m ² K]
		0,150
		Normal Inlay
		Bereich 3 von 11
		42,00 %



Bauteil		Wärmeschutz				Tauwasserschutz				
		Temperaturperiode = 1.640 h				T _{in} = 20 °C, T _{out} = -10 °C, P _{in} / P _{out} = 80 % / 50 %				
		Verdunstungsperiode = 3.160 h				T _{in} = 12 °C, T _{out} = 12 °C, P _{in} / P _{out} = 70 % / 70 %				
		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C								
Sp	Nr	Schicht	d [mm]	ρ [kg/m ³]	R [m ² K/W]	R _s [m ² K/W]	s [m]	g [Pa]	p _s [Pa]	p [Pa]
-	-	Wärmeübergang innen	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,169
1	1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,8	0,700	0,029	20	19,6	2,280	1,169
2	2	ILA-Stein_aus_Holz	80,0	38,4	0,106	0,755	2	19,5	2,268	810
3	3	Wärmedämmstoff_040	150,0	0,0	0,040	3,750	1	17,2	1,957	667
4	4	ILA-Stein_aus_Holz	40,0	19,2	0,106	0,377	2	5,5	902	533
5	5	Wärmedämmstoff_040	150,0	0,0	0,040	3,750	1	4,3	830	461
6	6	ILA-Stein_aus_Holz	80,0	38,4	0,106	0,755	8	-7,4	326	326
7	7	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,036	0,036	15	-9,8	265	246
-	-	Wärmeübergang außen	-	-	0,040	-	-	-9,9	263	208
-	-	Summe Bauteil	540,00	147,2	-	9,621	-	-10,0	260	208
		U = 0,104 W/m ² K				Tauwassermenge:		0,740 kg/m ²		
						Verdunstungsmenge:		1,290 kg/m ²		
		Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 9,451 m ² K/W				Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.				



Grenzwerte für Tauwassererregung

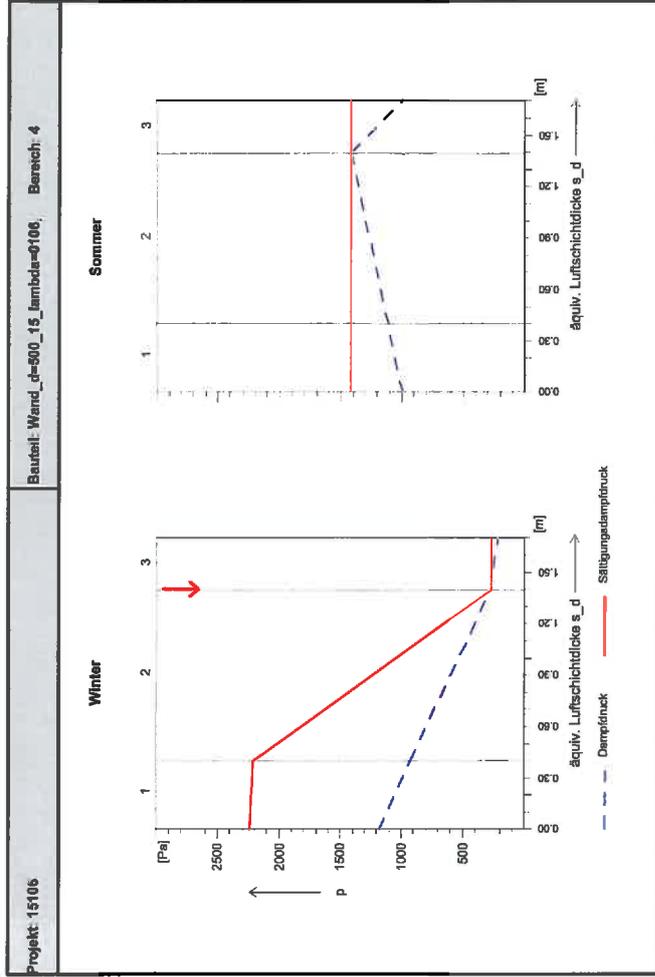
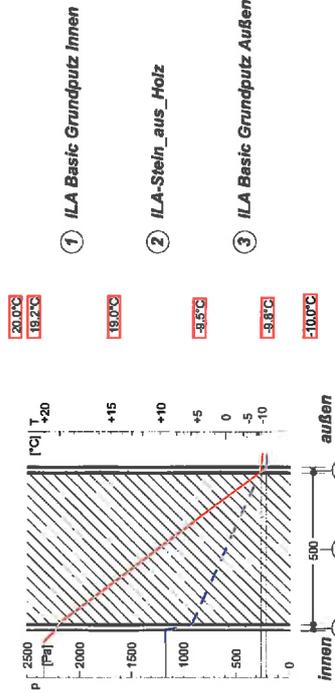
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwassererregung an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19,6 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 98 \%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 93 \%$

Formel für Ecktemperatur $\theta_{i,E}$: $\theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si} \quad [^\circ\text{C}]$

ILA	Fußweg 21+23		74172 Neckarsulm		
Projekt-Bauteil	Wand d=500_15_lambda=010		U-Wert		
Außenwand	Abgrenzung zur Außenluft		0,150		
Gesamte Gebäudefläche	Kammer_Rand		Bereich 4 von 11		
Anforderung nach DIN 4108-2	Tab 3 ist erfüllt!		1,67 %		
min. R = 1,200		vorh. R = 6,478 m²K/W			
Fläche		[m²]		HT	
0,00		0,00		[W/K]	
0,00		0,00		(Fx=1,00) 0,00	
0,00		0,00		0,00	
100,00		0,18		100,00	



Projekt: 15106	Bauteil: Wand_d=500_15_lambda=0106, Bereich: 4
$m_{w,T} = 0,415 \text{ kg/m}^2$ $m_{w,V} = 2,455 \text{ kg/m}^2$	
Tauwasserfall in einem Taupunkt $g_1 = \frac{p_1 - p_{s1}}{Z_1} = \frac{1169 - 271}{2,10 \cdot 10^6}$ $g_6 = \frac{p_{s6} - p_6}{Z_6} = \frac{271 - 208}{0,45 \cdot 10^6}$ $m_{w,T} = (g_1 - g_6) = 1440 \cdot (0,428 - 0,139) \cdot 10^{-3} = 0,415 \text{ kg/m}^2$ $g_1 = \frac{p_{s1} - p_1}{Z_1} = \frac{1404 - 983}{2,10 \cdot 10^6}$ $g_6 = \frac{p_{s6} - p_6}{Z_6} = \frac{1404 - 983}{0,45 \cdot 10^6}$ $m_{w,V} = (g_1 + g_6) = 2160 \cdot (0,201 + 0,936) \cdot 10^{-3} = 2,455 \text{ kg/m}^2$	

Sp	Nr	Schicht	d [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/(m·K)]	R [R/T] [m²K/W]	μ	a_d [m]	θ [°C]	p_s [Pa]	p [Pa]	Taufwasserschutz	
												τ _{max} [h]	τ _{min} [h]
		Wärmeübergang innen	-	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,169		
	1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	19,2	2,227	1,169		
	2	ILA-Stein_aus_Holz	500,0	240,0	0,105	4,717	2	1,00	-9,5	271	271		
	3	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	-9,8	266	208		
		Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	-10,0	260	208		
		Summe Bauteil	540,00	281,2	-	4,951	-	1,70					
U = 0,202 W/m²K											Taufwassermenge: 0,415 kg/m²		
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 4,761 m²K/W											Verdunstungsmenge: 2,455 kg/m²		

Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.

Grenzwerte für Tauwasserausfall

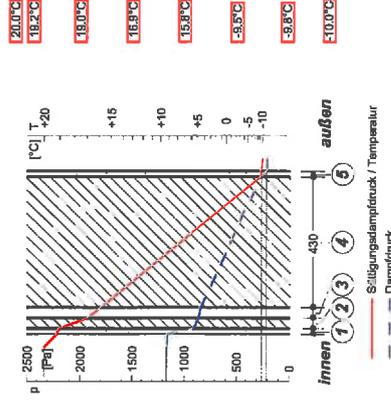
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19.2\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 95\%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 17.7\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 87\%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E}: \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldweg 21+23	74172 Neckarsulm
Projekt-Bauteil	Wand d=500_15_lambda=010	Fläche [m²]
Außenwand	Abgrenzung zu: Außenluft	0,00
	U-Wert [W/m²K]	0,150
	Kammer_Rand_Griff1	
	Bereich 5 von 11	0,67 %
Gesamte Gebäudefläche		0,208
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt	min R = 1,200 <=	vorh R = 6,478 m²K/W
		HT
		[W/K]
		(F=1,00) 0,00
		[%]
		0,00
		(F=1,00) 0,00
		[%]
		100,00
		0,16
		100,00

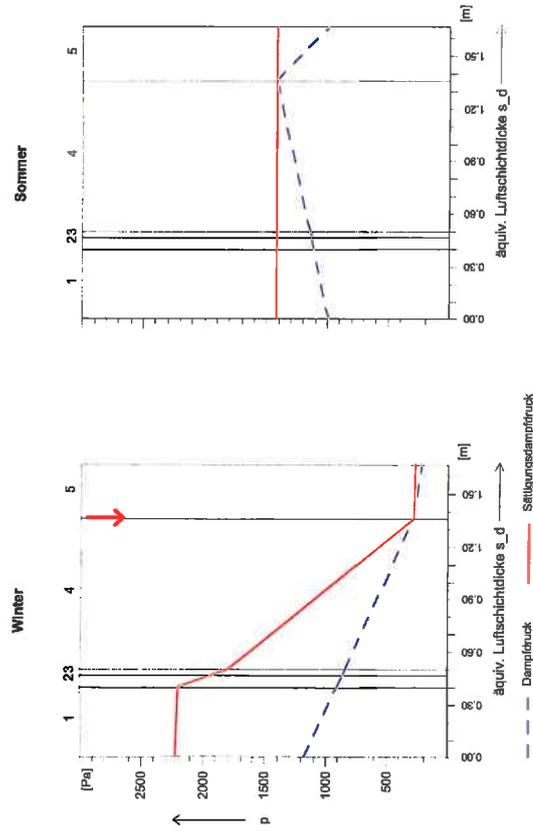


- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein_aus_Holz
- ③ Luftschicht, ruhend, horizontal
- ④ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑤ ILA Basic Grundputz Außen

20,0°C
18,2°C
18,0°C
16,9°C
15,8°C
-3,5°C
-8,8°C
-10,0°C

innen 430 4 5 außen
— Sättigungsdampfdruck / Temperatur
--- Dampfdruck

Bauteil		Wärmeschutz		Tauwasserschutz	
Randbedingungen nach DIN 4108-3		Tauerperiode = 1.440 h		Tauerperiode = 1.440 h	
		Verdunstungsperiode = 3.160 h		Verdunstungsperiode = 3.160 h	
		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C	
		Temperatur der Oberfläche innen = 20 °C		Temperatur der Oberfläche innen = 20 °C	
Sp	Nr	Schicht	d [mm]	λ [W/(m·K)]	R [m²K/W]
		1	Wärmeübergang innen	-	0,130
		2	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	0,700
		3	ILA-Stein_aus_Holz	35,0	0,106
		4	Luftschicht, ruhend, horizontal	35,0	0,0
		5	ILA-Stein_aus_Holz	430,0	206,4
		6	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6
		7	Wärmeübergang außen	-	0,040
		8	Summe Bauteil	540,00	274,4
		9	Tauwassermenge:	-	0,430 kg/m²
		10	Verdunstungsmenge:	-	2,466 kg/m²
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 4,631 m²K/W Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.					


 Taupunkttauwasserfall $m_{w,T} = 0,430 \text{ kg/m}^2$

 Verdunstungsmenge $m_{w,V} = 2,466 \text{ kg/m}^2$
Tauwasserfall in einem Taupunkt

$$g_1 = \frac{p_{sw} - p_{s,w}}{Z_1} = \frac{1169 - 271}{2,05 \cdot 10^3}$$

$$g_6 = \frac{p_{sw} - p_{s,e}}{Z_6} = \frac{271 - 208}{0,45 \cdot 10^3}$$

$$m_{w,T} = i_T \cdot (g_1 - g_6)$$

$$= 1440 \cdot (0,439 - 0,140) \cdot 10^{-3} = 0,430 \text{ kg/m}^2$$

$$g_1 = \frac{p_{sw} - p_{s,w}}{Z_1} = \frac{1404 - 983}{2,05 \cdot 10^3}$$

$$g_6 = \frac{p_{sw} - p_{s,e}}{Z_6} = \frac{1404 - 983}{0,45 \cdot 10^3}$$

$$m_{w,V} = i_V \cdot (g_1 + g_6)$$

$$= 2160 \cdot (0,206 + 0,936) \cdot 10^{-3} = 2,466 \text{ kg/m}^2$$

Grenzwerte für Tauwasserfall

Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

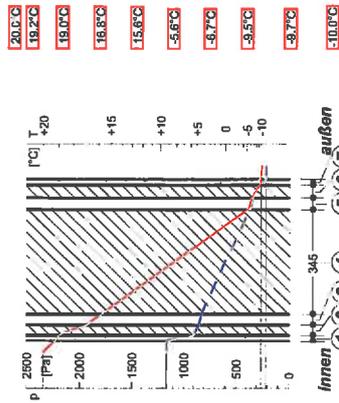
 Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,o} = 19,2 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 95 \%$

 Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,e} = 17,7 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 86 \%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,e} : \theta_{i,e} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} + 3 \cdot R_{si} \quad [^\circ\text{C}]$$

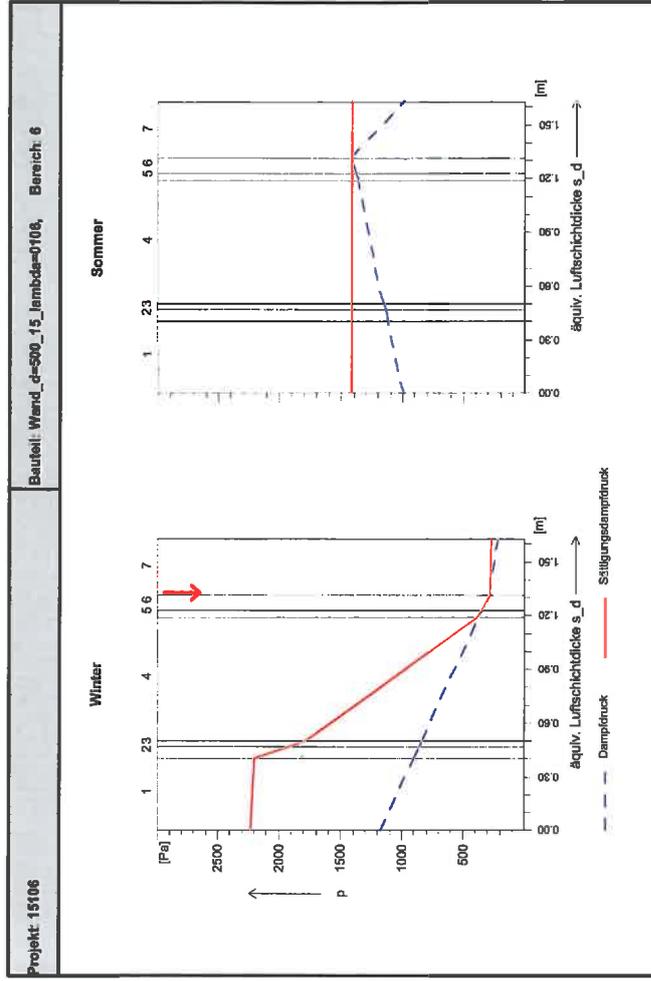
ILA	Fußweg 21+23	74172 Neckarulin
Projekt-Bauteil	Wand d=500_15_lambda=010	
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft	HT
	U-Wert [W/m²K]	[W/K]
	0,150	(Fx=1,00) 0,00
	0,217	(Fx=1,00) 0,00
Gesamte Gebäudehüllfläche	1,00 %	0,18
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt!	min R = 1,200 <= vorh. R = 6,478 m²K/W	100,00
		Kammer_Griffz
		Bereich 6 von 11

- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein_aus_Holz
- ③ Luftschicht, ruhend, horizontal
- ④ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑤ Luftschicht, ruhend, horizontal
- ⑥ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑦ ILA Basic Grundputz Außen



— Stüttdampfdruck / Temperatur
 - - - Dampfdruck

Sp	Nr	Schicht	d [mm]	Flmasse [kg/m²]	λ [W/(m·K)]	R [R/T] [m²K/W]	μ	s_d [m]	Taufwasserschutz		
									g_i [g/m²]	g_e [g/m²]	m _{w,v} [kg/m²]
-	-	Wärmeübergang Innen	-	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,169
1	1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	19,2	2,219	1,169
2	2	ILA-Stein_aus_Holz	35,0	16,8	0,106	0,330	2	0,07	19,0	2,193	898
3	3	Luftschicht, ruhend, horizontal	35,0	0,0	0,194	0,180	1	0,04	16,8	1,916	851
4	4	ILA-Stein_aus_Holz	345,0	185,6	0,106	3,255	2	0,69	15,8	1,778	827
5	5	Luftschicht, ruhend, horizontal	40,0	0,1	0,222	0,180	1	0,04	-5,5	383	380
6	6	ILA-Stein_aus_Holz	45,0	21,6	0,106	0,425	2	0,08	-6,7	346	332
7	7	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	-9,5	271	271
-	-	Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	-9,7	266	208
-	-	Summe Bauteil	540,00	255,3	-	4,604	-	-	-10,0	260	208
U = 0,217 W/m²K									Taufwassermenge: 0,447 kg/m²		
Verdunstungsmenge: 2,479 kg/m²									Verdunstungsmenge: 2,479 kg/m²		
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 4,434 m²K/W Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.											



Projekt: 15106	Bauteil: Wand_d=500_15_lambda=0106, Bereich: 6
Taufwassermenge m _{w,T} = 0,447 kg/m²	
Verdunstungsmenge m _{w,v} = 2,479 kg/m²	
Taufwasserausfall in einem Taupunkt	
$g_i = \frac{P_i - P_{sw}}{Z_i} = \frac{1169 - 271}{1,99 \cdot 10^6}$	$g_i = \frac{P_{sw} - P_e}{Z_i} = \frac{1404 - 983}{1,99 \cdot 10^6}$
$g_e = \frac{P_{sw} - P_e}{Z_e} = \frac{271 - 208}{0,45 \cdot 10^6}$	$g_e = \frac{1404 - 983}{0,45 \cdot 10^6}$
$m_{w,T} = i_v \cdot (g_i - g_e)$	$m_{w,v} = i_v \cdot (g_i + g_e)$
$= 1440 \cdot (0,462 - 0,141) \cdot 10^{-3} = 0,447 \text{ kg/m}^2$	$= 2180 \cdot (0,212 + 0,936) \cdot 10^{-3} = 2,479 \text{ kg/m}^2$

Grenzwerte für Tauwasserausfall

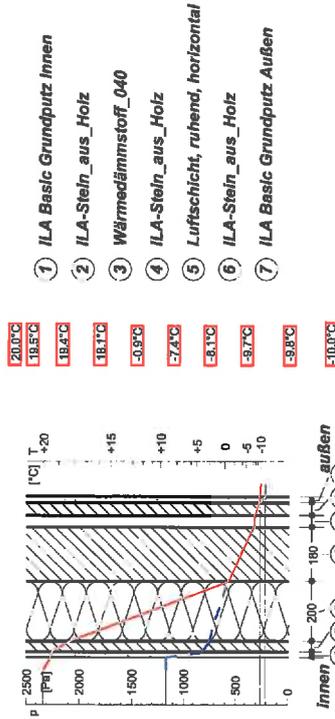
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19.2\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 95\%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 17.6\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 86\%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E} : \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldweg 21+33	74172 Neckarsum
Projekt-Bauteil	Wand d=500_15_lambda=010	
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft	Fläche [m²] 0,00
		U-Wert [W/m²K] 0,150
		HT [W/K] --
		(Fs=1,00) 0,00
		[%] 0,00
		[%] 0,00
Gesamte Gebäudeluftfläche	Bereich 7 von 11: 1,67 %	0,00
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab 3 ist erfüllt!	min. R = 1,200 <= vorth. R = 6,478 m²K/W	100,00
		0,19
		100,00



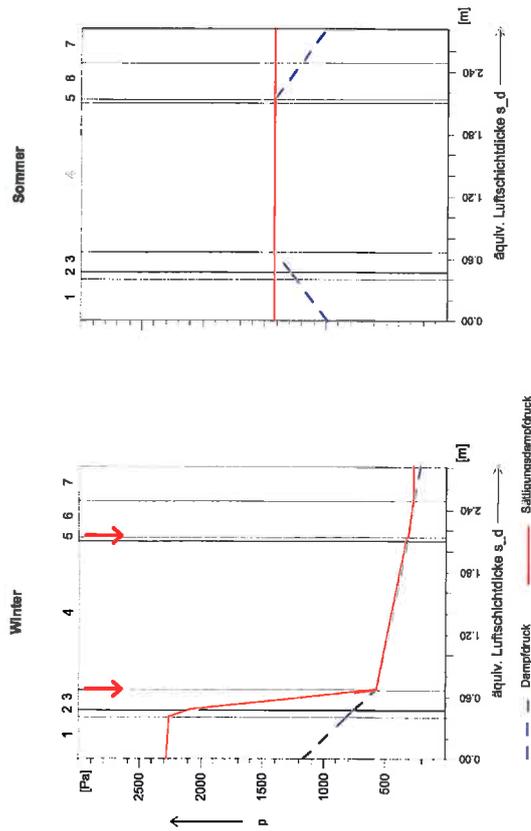
- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein_aus_Holz
- ③ Wärmedämmstoff_040
- ④ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑤ Luftschicht, ruhend, horizontal
- ⑥ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑦ ILA Basic Grundputz Außen

- 20,0°C
- 19,5°C
- 18,4°C
- 18,1°C
- 0,9°C
- 7,2°C
- 8,1°C
- 8,7°C
- 9,9°C
- 10,0°C

Nr	Schicht	d [mm]	Fl. Masse [kg/m²]	R [m²K/W]	R/R_T	s_d [m]	Taufwasserschutz		p [Pa]	p_s [Pa]
							Thats.e/Thats.i = 10 °C / 30 °C	Thats.e/Thats.i = 12 °C / 12 °C		
Randbedingungen nach DIN 4108-3										
Taufperiode = 1,440 h										
Verdunstungsperiode = 2,160 h										
Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C										
1	Wärmeübergang Innen	-	-	0,130	-	-	7(2,6)	20,0	2,338	1,169
2	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	19,5	2,268	1,169
3	ILA-Stein_aus_Holz	35,0	16,8	0,106	0,330	2	0,07	19,4	2,252	809
4	Wärmedämmstoff_040	200,0	0,0	0,040	5,000	1	0,20	18,1	2,082	747
5	ILA-Stein_aus_Holz	180,0	86,4	0,106	1,898	8	1,44	-0,9	567	567
6	Luftschicht, ruhend, horizontal	40,0	0,1	0,222	0,180	1	0,04	-7,4	326	314
7	ILA-Stein_aus_Holz	45,0	21,6	0,106	0,425	8	0,36	-8,1	307	307
8	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	-9,7	267	259
9	Wärmeübergang außen	-	-	0,040	-	-	-	-10,0	260	208
10	Summe Bauteil	540,00	176,1	-	7,867	-	2,81	-	-	-
U = 0,127 W/m²K										
Taufwassermenge: 0,718 kg/m²										
Verdunstungsmenge: 1,205 kg/m²										
Mindestwärmeschutz: min. R / vorth. R = 1,200 / 7,697 m²K/W										
Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.										

Projekt: 18108

Bauteil: Wand_d=500_15_lambdai=0106, Bereich: 7



Tauwasserernte $m_{W,T} = 0.718 \text{ kg/m}^2$

Verdunstungsmenge $m_{W,V} = 1.205 \text{ kg/m}^2$

Tauwasserernte in zwei Taupunkten

$$g_1 = \frac{p_1 - p_{s,1}}{Z_1} = \frac{1169 - 567}{1,00 \cdot 10^6}$$

$$g_2 = \frac{p_{s,1} - p_{s,2}}{Z_2} = \frac{567 - 307}{2,22 \cdot 10^6}$$

$$g_3 = \frac{p_{s,2} - p_{s,3}}{Z_3} = \frac{307 - 208}{0,99 \cdot 10^6}$$

$$m_{W,T1} = f_T \cdot (g_1 - g_2)$$

$$= 1440 \cdot (0.599 - 0.117) \cdot 10^{-1} = 0.695 \text{ kg/m}^2$$

$$m_{W,T2} = f_T \cdot (g_2 - g_3)$$

$$= 1440 \cdot (0.117 - 0.101) \cdot 10^{-3} = 0.023 \text{ kg/m}^2$$

$$g_1 = \frac{p_{s,1} - p_1}{Z_1} = \frac{1404 - 983}{1,00 \cdot 10^6}$$

$$g_{Zus} = \frac{p_{s,3} - p_{s,4}}{Z_4} = \frac{1404 - 983}{3,21 \cdot 10^6}$$

$$g_6 = \frac{p_{s,3} - p_{s,6}}{Z_6} = \frac{1404 - 983}{0,99 \cdot 10^6}$$

$$m_{W,V} = f_j \cdot g_1 + t_6 \cdot g_6 + t_{Zus} \cdot g_{Zus}$$

$$= (2160 \cdot 0.419 + 55 \cdot 0.425 + 2105 \cdot 0.131) \cdot 10^{-3}$$

$$= 1.205 \text{ kg/m}^2$$

Grenzwerte für Tauwasserernte

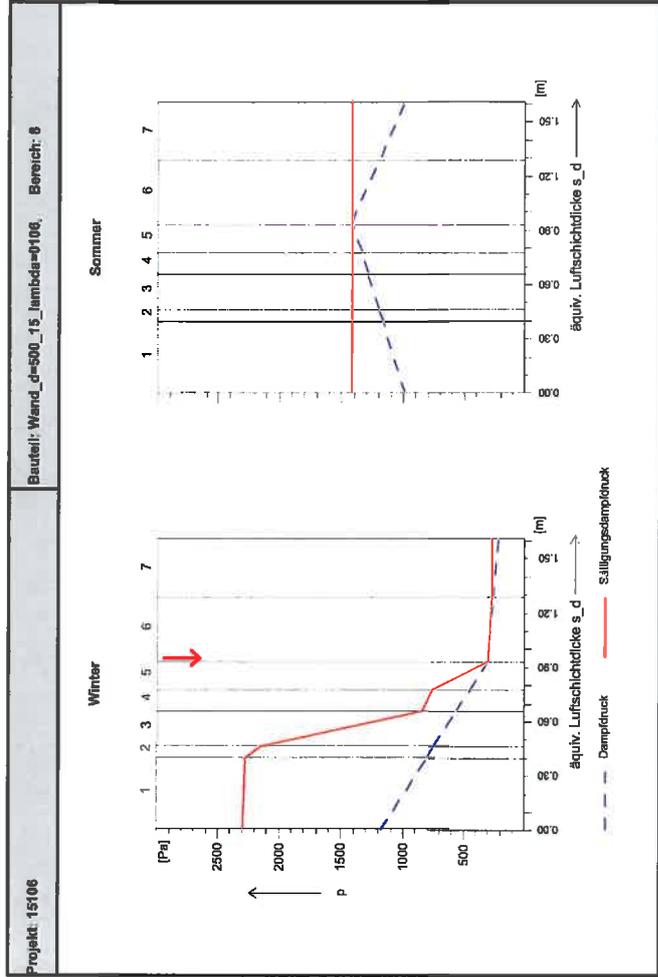
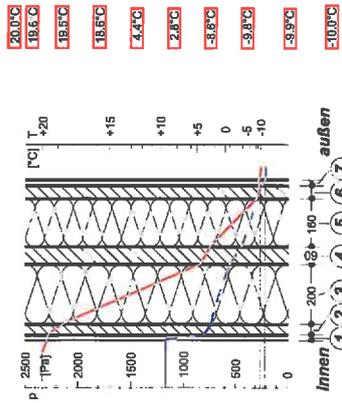
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten Innen, ab denen mit Tauwasserernte an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,O} = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 97 \%$
 Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 18,6 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 91 \%$

Formel für Ecktemperatur $\theta_{i,E}$: $\theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_0) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si}$ [°C]

ILA	Projekt-Bau teil	74172 Neckerstein	Fußweg 21+23	HT
	Außenwand	Wand_d=500_15_lambda=010	U-Wert	HT
		Abgrenzung zu Außenluft	0,150	HT
		Kammer_inlay2	0,095	HT
		Bereich 8 von 11	10,33 %	HT
		Gesamte Gebäudefläche	0,00	HT
		Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt!	min R = 1,200 <= vorh. R = 6,478 m²K/W	HT

- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein_aus_Holz
- ③ Wärmedämmstoff_040
- ④ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑤ Wärmedämmstoff_040
- ⑥ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑦ ILA Basic Grundputz Außen



Sp	Nr	Schicht	d [mm]	λ [W/(m·K)]	R [R,T] [m²K/W]	μ	s_d [m]	ϕ [°C]	Taufwasserschütz					
									g_i	g_e	m_w,T	m_w,V		
		Wärmeübergang innen			0,130			20,0	2,338	1,169				
1		ILA Basic Grundputz Innen	20,0	0,700	0,029	20	0,40	19,6	2,285	1,169				
2		ILA-Stein_aus_Holz	35,0	0,108	0,330	2	0,07	18,5	2,274	801				
3		Wärmedämmstoff_040	200,0	0,040	5,000	1	0,20	18,6	2,145	738				
4		ILA-Stein_aus_Holz	60,0	0,108	0,568	2	0,12	4,4	837	552				
5		Wärmedämmstoff_040	160,0	0,040	4,000	1	0,16	2,8	747	442				
6		ILA-Stein_aus_Holz	45,0	0,108	0,425	8	0,36	-8,6	295	295				
7		ILA Basic Grundputz Außen	20,0	0,560	0,036	15	0,30	-9,8	265	247				
		Wärmeübergang außen			0,040			-9,9	263	208				
		- Summe Bauteil	540,00	118,4	10,555		1,61	-10,0	250	208				
		U = 0,095 W/m²K												
		Taufwasserschütz:												
		Verdunstungsmenge:												
		Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.												

Tauwasserfall in einem Taupunkt

Taufwasserschütz

$T_{\text{Taupunkt}} = -10 \text{ °C} / 20 \text{ °C}$ $\Phi_{\text{max}} / \Phi_{\text{min}} = 60 \text{ \%} / 50 \text{ \%}$
 Verdunstungsperiode = 2,160 h
 Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C

$g_i = \frac{P_{\text{inn}} - P_{\text{Taupunkt}}}{Z_i} = \frac{1169 - 295}{1,43 \cdot 10^5} = 7,33 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$

$g_e = \frac{P_{\text{Taupunkt}} - P_{\text{außen}}}{Z_e} = \frac{295 - 208}{0,99 \cdot 10^5} = 8,79 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2$

$m_{w,T} = t_T \cdot (g_i - g_e) = 1440 \cdot (0,614 - 0,088) \cdot 10^{-3} = 0,758 \text{ kg/m}^2$

$m_{w,V} = t_V \cdot (g_i + g_e) = 2160 \cdot (0,296 + 0,425) \cdot 10^{-3} = 1,557 \text{ kg/m}^2$

Verdunstungsmenge $m_{w,V} = 1,557 \text{ kg/m}^2$

Grenzwerte für Tauwasserausfall

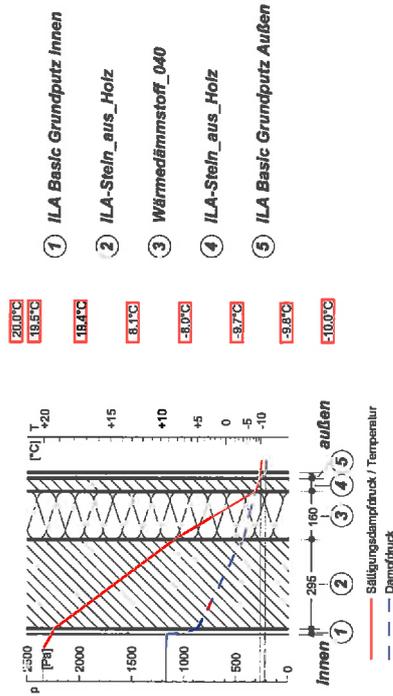
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,o} = 19.6 \text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 98 \%$

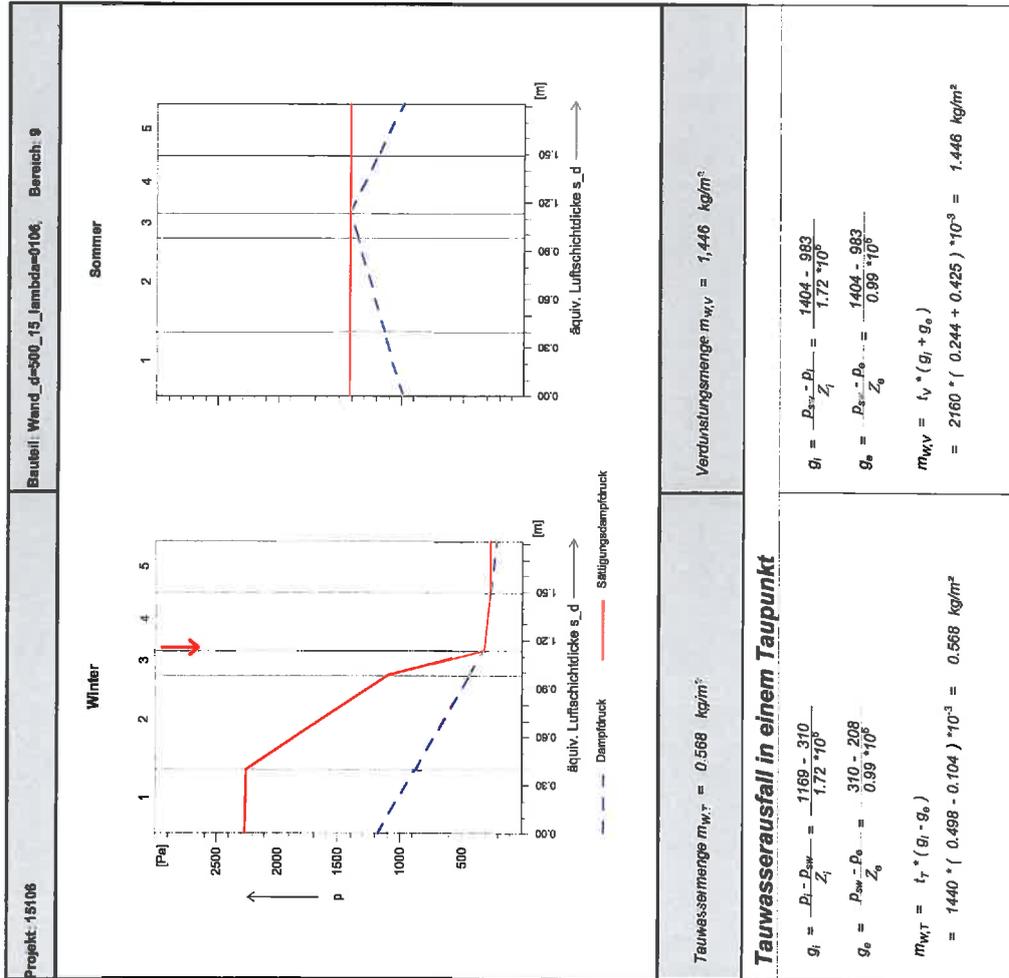
Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,e} = 18.9 \text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 93 \%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,e} : \theta_{i,e} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si} \quad [^\circ\text{C}]$$

ILA	Fuldaweg 21+23		74172 Neckarsulm	
Projekt-Bauteil	Wand d=500 15 lambda=010			
Außenwand	U-Wert	Fläche	HT	
	0,150	0,00	[W/K]	[%]
			(F=1,00)	0,00
Kammer_Inlay1				
Gesamte Gebäudehüllfläche	0,134	0,00	(F=1,00)	0,00
Bereich 9 von 11	2,33 %	0,00	(F=1,00)	0,18
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt min. R = 1,200 <= vorh. R = 6,478 m²K/W				



Sp	Nr	Schicht	d [mm]	λ [W/(m·K)]	R [m²K/W]	μ	s_d [m]	θ [°C]	Taufwasserschutz	
									p_9 [Pa]	p_10 [Pa]
-	-	Wärmeübergang Innen	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,169
1	1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	0,700	0,029	20	0,40	19,5	2,284	1,169
2	2	ILA-Stein_aus_Holz	295,0	141,6	2,783	2	0,59	19,4	2,247	870
3	3	Wärmedämmstoff_040	160,0	0,0	0,040	4,000	1	8,1	1,084	430
4	4	ILA-Stein_aus_Holz	45,0	21,6	0,425	8	0,36	-8,0	310	310
5	5	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	0,560	0,036	15	0,30	-8,7	287	254
-	-	Wärmeübergang außen	-	-	0,040	-	-	-8,8	264	208
-	-	Summe Bauteil	540,00	214,4	-	7,442	-	-10,0	260	208
U = 0,134 W/m²K									Taufwassermenge:	0,568 kg/m²
									Verdunstungsmenge:	1,448 kg/m²
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 7,272 m²K/W Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.										



Grenzwerte für Tauwasserfall

Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\vartheta_{1,0} = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 97 \%$

Ecke: Ist-Temperatur $\vartheta_{1,E} = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 91 \%$

Formel für Ecktemperatur $\vartheta_{1,E}$:
$$\vartheta_{1,E} = \vartheta_1 - (\vartheta_1 - \vartheta_0) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} + 3 \cdot R_{si} \quad [^\circ\text{C}]$$

Grenzwerte für Tauwasserausfall

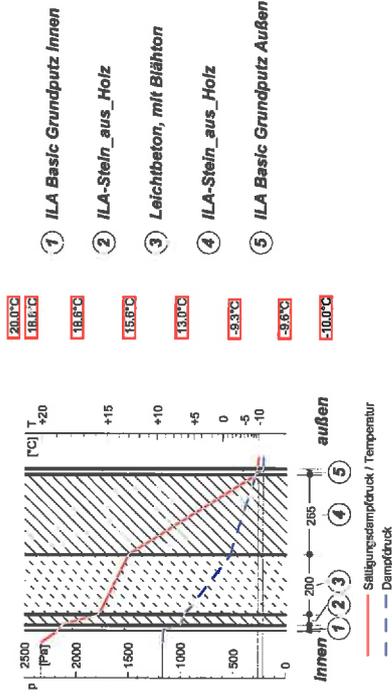
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\vartheta_{i,o} = 19,3 \text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 96 \%$

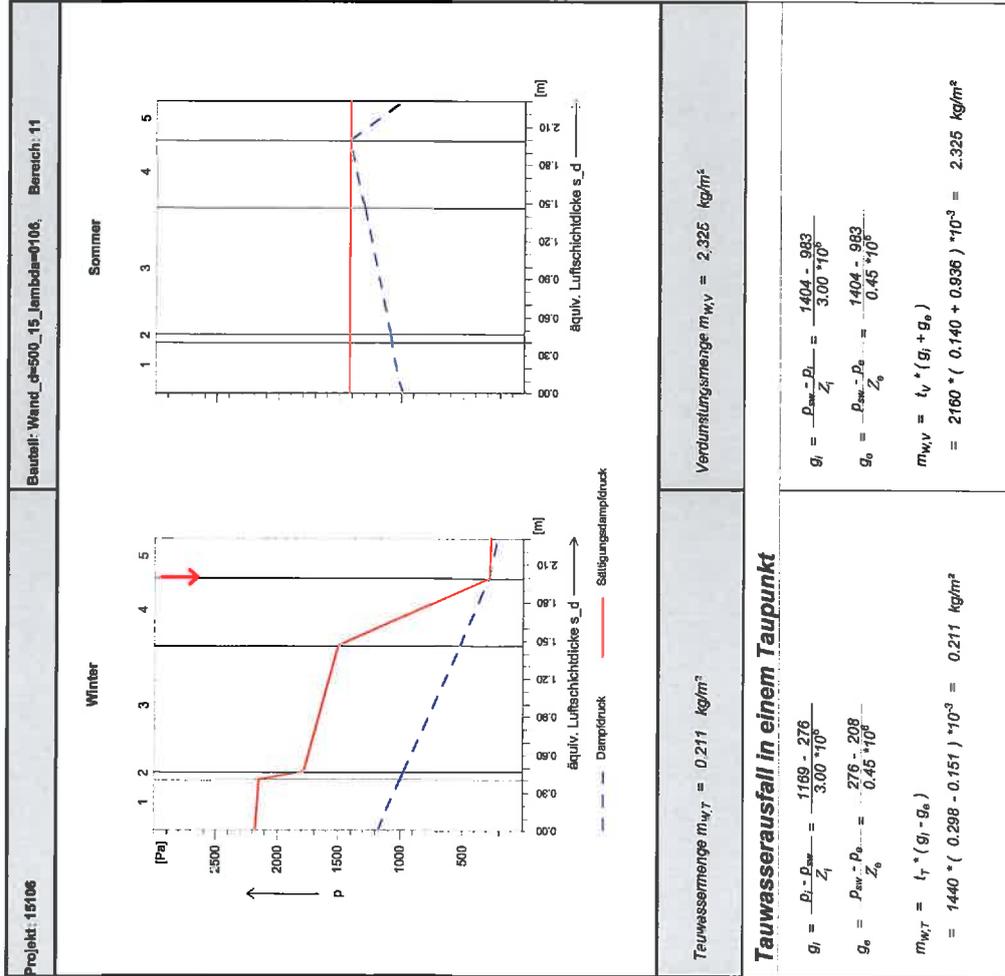
Ecke: Ist-Temperatur $\vartheta_{i,e} = 18,1 \text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 89 \%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \vartheta_{i,e}: \quad \vartheta_{i,e} = \vartheta_i - (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{s,i})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{s,i} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldaweg 21+23	74172 Neckeraufm	HT
Projek-Bauteil	Wand d=500 15 lambda=010		
Außenwand	U-Wert	Fläche	[%]
	0,150	0,00	0,00
		(F=1,00)	0,00
Gesamte Gebäudefläche	0,298	0,00	0,00
Bereich 11 von 11	3,33 %	0,00	100,00
Anforderung nach DIN 4108-3 Tab.3 ist erfüllt!	min. R = 1,200 <= vorh. R = 6,476 m²/KW		



Bauteil	Wärmeschutz			Tauwasserschutz									
	Temperatur ϑ [°C]	Verdunstungsrate μ [kg/m²]	Temperatur der Oberfläche außen $\vartheta_{s,a}$ [°C]	1	2	3	4	5(2-4)	6	7(2-6)	8	9	10
Randbedingungen nach DIN 4108-3													
Sp	2000	1440	18										
Nr	Schicht	d [mm]	R/R,T [m²K/W]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m³]	μ [kg/m²]	μ _{eff} [m²K/W]	ϑ [°C]	ϑ [°C]				
-	Wärmeübergang Innen	-	-	-	-	-	0,130	20,0	20,0	20,0	2,338	1,169	1,169
1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	0,700	0,209	20	0,40		18,8	18,8	2,176	1,169	1,169	1,169
2	ILA-Stein aus Holz	35,0	0,108	0,330	2	0,07		18,6	18,6	2,141	990	990	990
3	Leichtbeton, mit Blähton	200,0	0,680	0,294	5	1,00		15,6	15,6	1,777	969	969	969
4	ILA-Stein aus Holz	285,0	0,108	0,330	2	0,53		13,0	13,0	1,500	513	513	513
5	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	0,580	0,036	15	0,30		-8,3	-8,3	276	276	276	276
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	-	-	0,040	-10,0	-10,0	260	260	260	260
-	Summe Bauteil	540,00	-	-	-	-	3,359	-	-	2,30	-	-	-
U = 0,298 W/m²K												Taufwasseremenge: 0,211 kg/m²	
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 3,183 m²K/W												Verdunstungsmenge: 2,325 kg/m²	
Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.													



Grenzwerte für Tauwasserfall

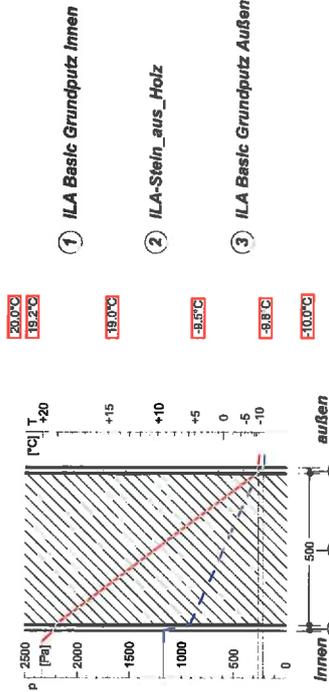
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,O} = 18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 93 \%$

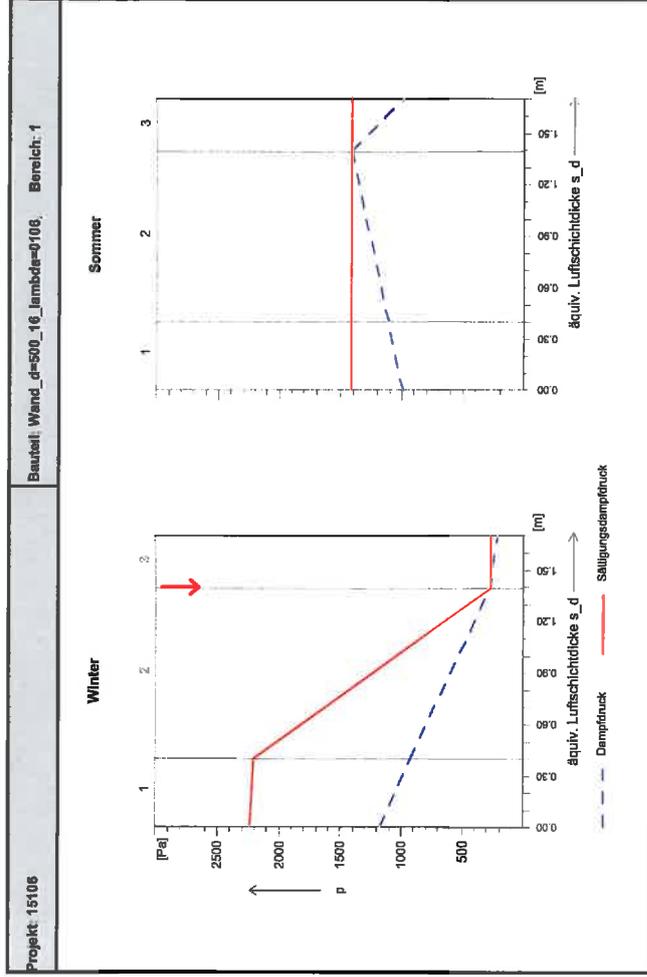
Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 16,7 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 81 \%$

Formel für Ecktemperatur $\theta_{i,E}$: $\theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si} \text{ [}^\circ\text{C]}$

ILA	Fußweg 21+23	74172 Neckarsulm
Projekt-Bauteil	Wand d=500.16 lambda=010	
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft	
	U-Wert	HT
	0,148	[W/K]
	Fläche	[m²]
	0,00	0,00
	(F=1,00)	0,00
	HT	[%]
	0,00	0,00
	(F=1,00)	0,00
	Bereich 1 von 11	19,00 %
	Gesamte Gebäudefläche	0,202
	(F=1,00)	0,00
	Anforderung nach DIN 4108-2 Tab 3 ist erfüllt!	0,18
	min. R = 1,200	vorh. R = 6,572 m²K/W



- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein_aus_Holz
- ③ ILA Basic Grundputz Außen



Tauwasserfall in einem Taupunkt

Tauwasserfallmenge $m_{w,v} = 0,415 \text{ kg/m}^2$

Verdunstungsmenge $m_{w,v} = 2,455 \text{ kg/m}^2$

$$g_i = \frac{D_i - P_{sw}}{Z_i} = \frac{1169 - 271}{2,10 \cdot 10^6} = 0,415 \cdot 10^{-3}$$

$$g_o = \frac{P_{sw} - P_{sa}}{Z_o} = \frac{271 - 208}{0,45 \cdot 10^6} = 0,147 \cdot 10^{-3}$$

$$m_{w,v} = i_v \cdot (g_i - g_o) = 1440 \cdot (0,428 - 0,139) \cdot 10^{-3} = 0,415 \text{ kg/m}^2$$

$$g_i = \frac{P_{sw} - P_i}{Z_i} = \frac{1404 - 983}{2,10 \cdot 10^6} = 0,196 \cdot 10^{-3}$$

$$g_o = \frac{P_{sw} - P_{sa}}{Z_o} = \frac{1404 - 983}{0,45 \cdot 10^6} = 0,936 \cdot 10^{-3}$$

$$m_{w,v} = i_v \cdot (g_i + g_o) = 2160 \cdot (0,201 + 0,936) \cdot 10^{-3} = 2,455 \text{ kg/m}^2$$

Sp	Nr	Schicht	d [mm]	Fl. Masse [kg/m²]	λ [W/(m·K)]	R [m²K/W]	Wärmeschutz		Taufwasserschutz						
							τ [h]	μ	Theta_s/Theta_i [-10°C/20°C]	Theta_s/Theta_i [-12°C/12°C]	s_d [m]	θ [°C]	p_s [Pa]	p [Pa]	
-	-	Wärmeübergang Innen	-	-	-	0,130	-	20,0	2,338	1,169	-	-	-	-	-
1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	20	19,2	2,227	1,169	0,40	912	271	208	208
2	ILA-Stein_aus_Holz	500,0	240,0	0,106	4,717	2	2	19,0	2,203	912	1,00	271	266	208	208
3	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,8	0,560	0,036	15	15	-9,5	271	271	0,30	208	266	208	208
-	-	Wärmeübergang Außen	-	-	-	0,040	-	-10,0	280	280	-	-	-	-	-
-	-	Summe Bauteil	540,0	291,2	-	4,951	-	-	-	-	1,70	-	-	-	-
U = 0,202 W/m²K		Taufwassermenge:		0,415 kg/m²											
Mindestwärmeschutz: min. R = 1,200 / 4,781 m²K/W		Verdunstungsmenge:		2,455 kg/m²											
Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.															

Grenzwerte für Tauwasserausfall

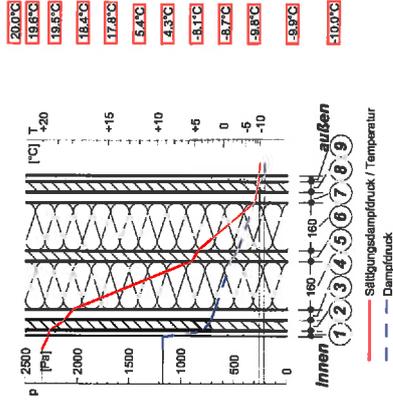
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,o} = 19,2\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 95\%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,e} = 17,7\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 87\%$

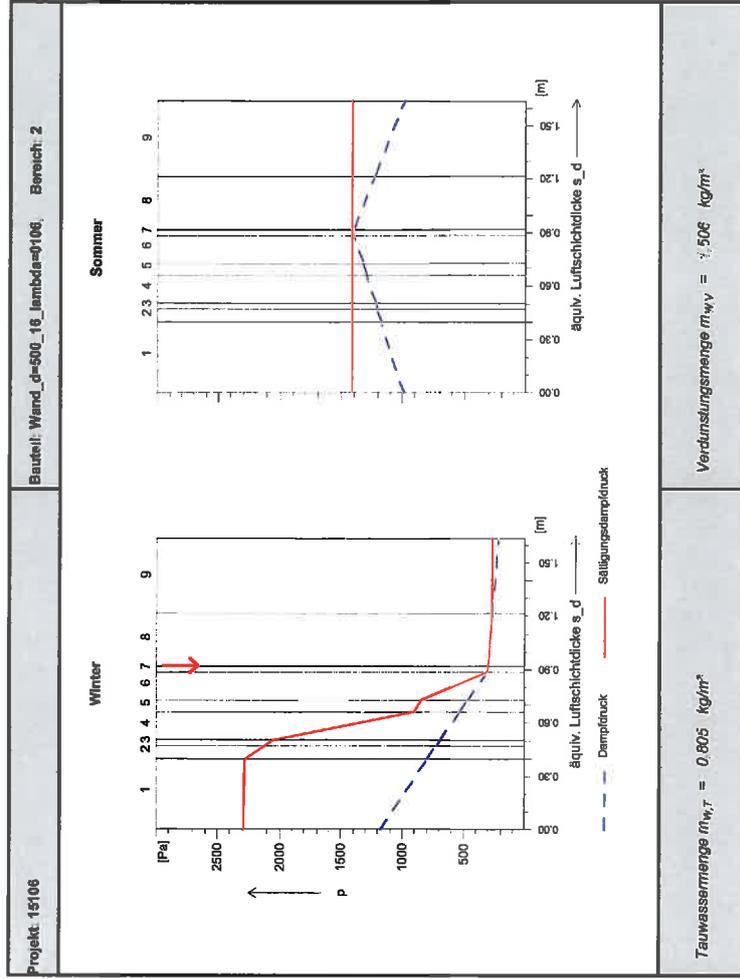
$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,e}: \theta_{i,e} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) * (R + 3 * R_{s,i})^{-1} * 3 * R_{s,i} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fußweg 21+23	74172 Neckaralbm
Projekt-Saubal	Wand d=500_16_lambda=010	
Außenwand	U-Wert	Fläche
	0,148	0,00
	0,104	0,00
	0,00	0,00
	0,00	100,00
	min R = 1,200 <= vorh R = 6,572 m²K/W	
Gesamte Gebäuhüllfläche	Normal_inlay Griff	
	Bereich 2 von 11	14,00 %
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt!		



- 1 ILA Basic Grundputz Innen
- 2 ILA-Stein_aus_Holz
- 3 Luftschicht, ruhend, horizontal
- 4 Wärmedämmstoff_040
- 5 ILA-Stein_aus_Holz
- 6 Wärmedämmstoff_040
- 7 Luftschicht, ruhend, horizontal
- 8 ILA-Stein_aus_Holz
- 9 ILA Basic Grundputz Innen

Bauteil		Wärmeschutz				Taubwasserschutz					
Randbedingungen nach DIN 4108-3		Tauperiode = 1,440 h		Verdunstungsperiode = 2,160 h		Theta _a /Theta _i = -10 °C / 20 °C P _{h,i} / P _{h,e} = 80 % / 50 %					
		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C		Temperatur der Oberfläche innen = 12 °C		Theta _a /Theta _i = 12 °C / 12 °C P _{h,i} / P _{h,e} = 70 % / 70 %					
Sp	Nr	Schicht	d [mm]	Fl _{masse} [kg/m ²]	λ [W/(m·K)]	R [R,T] [m ² ·K/W]	μ	7(2*8)	8	9	10
-	-	Wärmeübergang innen	-	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,169
1	ILA	Basic Grundputz innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	19,6	2,280	1,169
2	ILA	Stein_aus_Holz	37,5	18,0	0,106	0,354	2	0,07	19,5	2,268	768
3		Luftschicht, ruhend, horizontal	35,0	0,0	0,194	0,190	1	0,04	18,4	2,117	714
4		Wärmedämmstoff_040	160,0	0,0	0,040	4,000	1	0,16	17,8	2,044	680
5	ILA	Stein_aus_Holz	35,0	16,8	0,106	0,330	2	0,07	5,4	896	527
6		Wärmedämmstoff_040	160,0	0,0	0,040	4,000	1	0,16	4,3	834	480
7		Luftschicht, ruhend, horizontal	35,0	0,0	0,194	0,180	1	0,04	-8,1	307	307
8	ILA	Stein_aus_Holz	37,5	18,0	0,106	0,354	8	0,30	-8,7	292	292
9	ILA	Basic Grundputz innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	-9,9	263	208
-	-	Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	-10,0	260	208
Summe Bauteil			540,00	108,1	-	9,625	-	1,64	Taubwassermenge: 0,805 kg/m ²		
U = 0,104 W/m ² K		Verdunstungsmenge: 1,506 kg/m ²									
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 9,455 m ² K/W Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.											



Taubwasserausfall in einem Bereich

$$g_i = \frac{p_{i+1} - p_{i+2}}{Z_i} = \frac{1169 - 307}{1,35 \cdot 10^6}$$

$$g_e = \frac{p_{i+2} - p_{i+3}}{Z_e} = \frac{292 - 208}{1,05 \cdot 10^6}$$

$$m_{w,T} = t_T \cdot (g_i - g_e) = 1440 \cdot (0,638 - 0,080) \cdot 10^{-3} = 0,805 \text{ kg/m}^2$$

$$g_i = \frac{p_{i+1} - p_{i+2}}{Z_i + 0,5 \cdot Z_e} = \frac{1404 - 983}{1,38 \cdot 10^6}$$

$$g_e = \frac{p_{i+2} - p_{i+3}}{Z_e} = \frac{1404 - 983}{1,08 \cdot 10^6}$$

$$m_{w,V} = t_V \cdot (g_i + g_e) = 2160 \cdot (0,306 + 0,391) \cdot 10^{-3} = 1,506 \text{ kg/m}^2$$

Grenzwerte für Tauwasserausfall

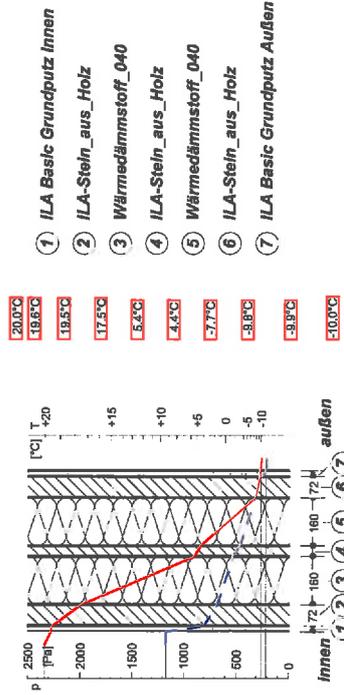
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19.6\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 98\%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 18.8\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_1 = 93\%$

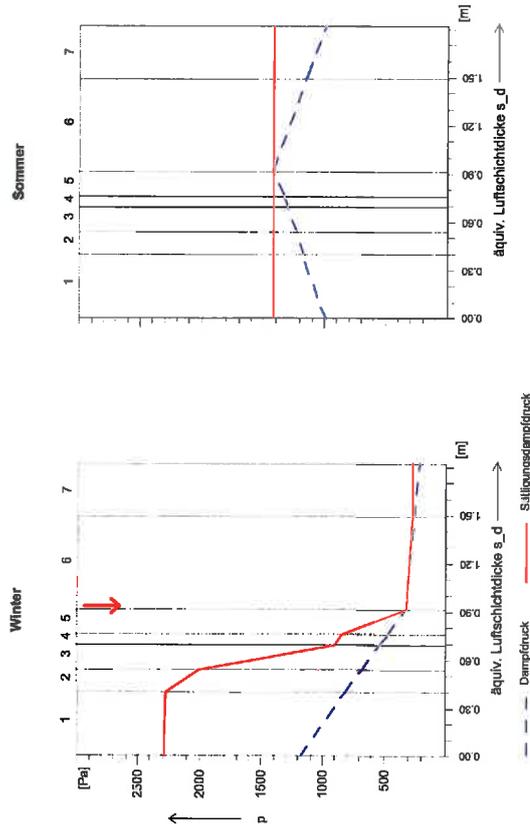
$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E}: \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{i,e})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{i,e} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldweg 21+23	74172 Neckarulm
Projekt-Bauteil	Wand d=500_16_lambda=010	
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft	Fläche [m ²]
		0,00
		U-Wert [W/m ² K]
		0,148
		HT [W/K]
		0,00
		[%]
		0,00
Gesamte Gebäudehüllfläche	Normal_inlay	0,00
	Bereich 3 von 11	0,00
		42,00 %
		0,00
		100,00
		0,10
		100,00
		min R = 1,200 <= vorh R = 6,572 m ² K/W
		Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt!



- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein_aus_Holz
- ③ Wärmedämmstoff_040
- ④ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑤ Wärmedämmstoff_040
- ⑥ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑦ ILA Basic Grundputz Außen

Bauteil		Wärmeschutz		Taubwasserschutz					
Sp	Mr	Schicht	d [mm]	Flmasse [kg/m ²]	R [R/L/T] [m ² K/W]	s_d [m]	ϕ [°C]	p [Pa]	P [Pa]
Randbedingungen nach DIN 4108-3									
Taubperiode = 1,440 h		Taubperiode = 1,440 h		Taubperiode = 1,440 h		Taubperiode = 1,440 h		Taubperiode = 1,440 h	
Verdunstungsperiode = 3,168 h		Verdunstungsperiode = 3,168 h		Verdunstungsperiode = 3,168 h		Verdunstungsperiode = 3,168 h		Verdunstungsperiode = 3,168 h	
Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C	
Theta_a/Theta_i = 0 °C / 20 °C		Theta_a/Theta_i = 0 °C / 20 °C		Theta_a/Theta_i = 0 °C / 20 °C		Theta_a/Theta_i = 0 °C / 20 °C		Theta_a/Theta_i = 0 °C / 20 °C	
Phi_a/Phi_i = 50 % / 50 %		Phi_a/Phi_i = 50 % / 50 %		Phi_a/Phi_i = 50 % / 50 %		Phi_a/Phi_i = 50 % / 50 %		Phi_a/Phi_i = 50 % / 50 %	
Theta_w/Theta_i = 12 °C / 12 °C		Theta_w/Theta_i = 12 °C / 12 °C		Theta_w/Theta_i = 12 °C / 12 °C		Theta_w/Theta_i = 12 °C / 12 °C		Theta_w/Theta_i = 12 °C / 12 °C	
Phi_w/Phi_i = 70 % / 70 %		Phi_w/Phi_i = 70 % / 70 %		Phi_w/Phi_i = 70 % / 70 %		Phi_w/Phi_i = 70 % / 70 %		Phi_w/Phi_i = 70 % / 70 %	
1	ILA Basic Grundputz Innen	Wärmeübergang Innen	-	-	0,130	-	20,0	2,338	1,169
2	ILA-Stein_aus_Holz	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	19,6	2,282	1,169
3	Wärmedämmstoff_040	ILA-Stein_aus_Holz	72,5	34,8	0,106	0,684	19,5	2,270	805
4	ILA-Stein_aus_Holz	Wärmedämmstoff_040	160,0	0,0	0,040	4,000	17,5	1,995	673
5	Wärmedämmstoff_040	ILA-Stein_aus_Holz	35,0	16,8	0,106	0,330	5,4	895	527
6	ILA-Stein_aus_Holz	Wärmedämmstoff_040	160,0	0,0	0,040	4,000	4,4	836	464
7	ILA Basic Grundputz Außen	ILA-Stein_aus_Holz	72,5	34,8	0,106	0,684	-7,7	3,18	318
-	Wärmeübergang außen	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	-9,8	265	245
-	Summe Bauteil	Wärmeübergang außen	-	-	0,040	-	-9,9	263	208
-	Summe Bauteil	Summe Bauteil	540,00	137,6	-	9,932	-10,0	260	208
U = 0,101 W/m ² K		Taubwasseremenge:		Taubwasseremenge:		Taubwasseremenge:		Taubwasseremenge:	
		Verdunstungsmenge:		Verdunstungsmenge:		Verdunstungsmenge:		Verdunstungsmenge:	
		1,339 kg/m ²		1,339 kg/m ²		1,339 kg/m ²		1,339 kg/m ²	
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 9,762 m ² K/W Anforderung nach DIN 4108-3 sind erfüllt.									


 Tauwassermenge $m_{w,T} = 0,754 \text{ kg/m}^2$

 Verdunstungsmenge $m_{w,V} = 1,338 \text{ kg/m}^2$
Tauwasserfall in einem Taupunkt

$$g_i = \frac{D_i \cdot P_{w,i}}{Z_i} = \frac{1169 \cdot 318}{1,40 \cdot 10^6}$$

$$g_o = \frac{P_{w,o} \cdot P_o}{Z_o} = \frac{318 \cdot 208}{1,32 \cdot 10^6}$$

$$m_{w,T} = i_T \cdot (g_i - g_o)$$

$$= 1440 \cdot (0,607 - 0,083) \cdot 10^{-3} = 0,754 \text{ kg/m}^2$$

$$g_i = \frac{P_{w,i} \cdot P_i}{Z_i} = \frac{1404 \cdot 983}{1,40 \cdot 10^6}$$

$$g_o = \frac{P_{w,o} \cdot P_o}{Z_o} = \frac{1404 \cdot 983}{1,32 \cdot 10^6}$$

$$m_{w,V} = i_V \cdot (g_i + g_o)$$

$$= 2160 \cdot (0,300 + 0,319) \cdot 10^{-3} = 1,338 \text{ kg/m}^2$$

Grenzwerte für Tauwasserfall

Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

 Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,O} = 19,6 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 98 \%$

 Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 93 \%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E}: \quad \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_o) \cdot (R + 3 \cdot R_{ef})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{ef} \quad [^\circ\text{C}]$$

Grenzwerte für Tauwasserausfall

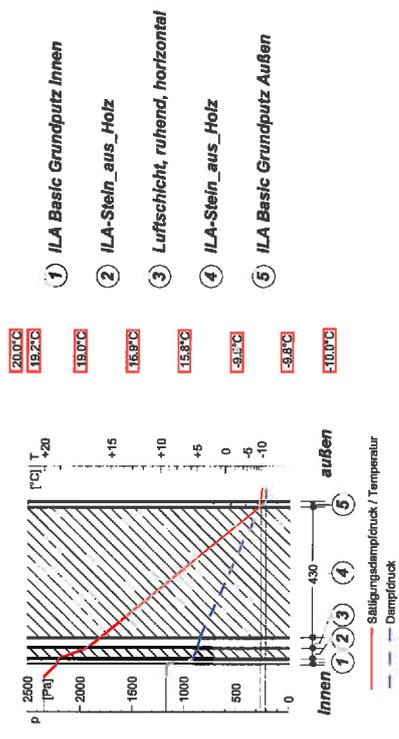
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19.2\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 95\%$

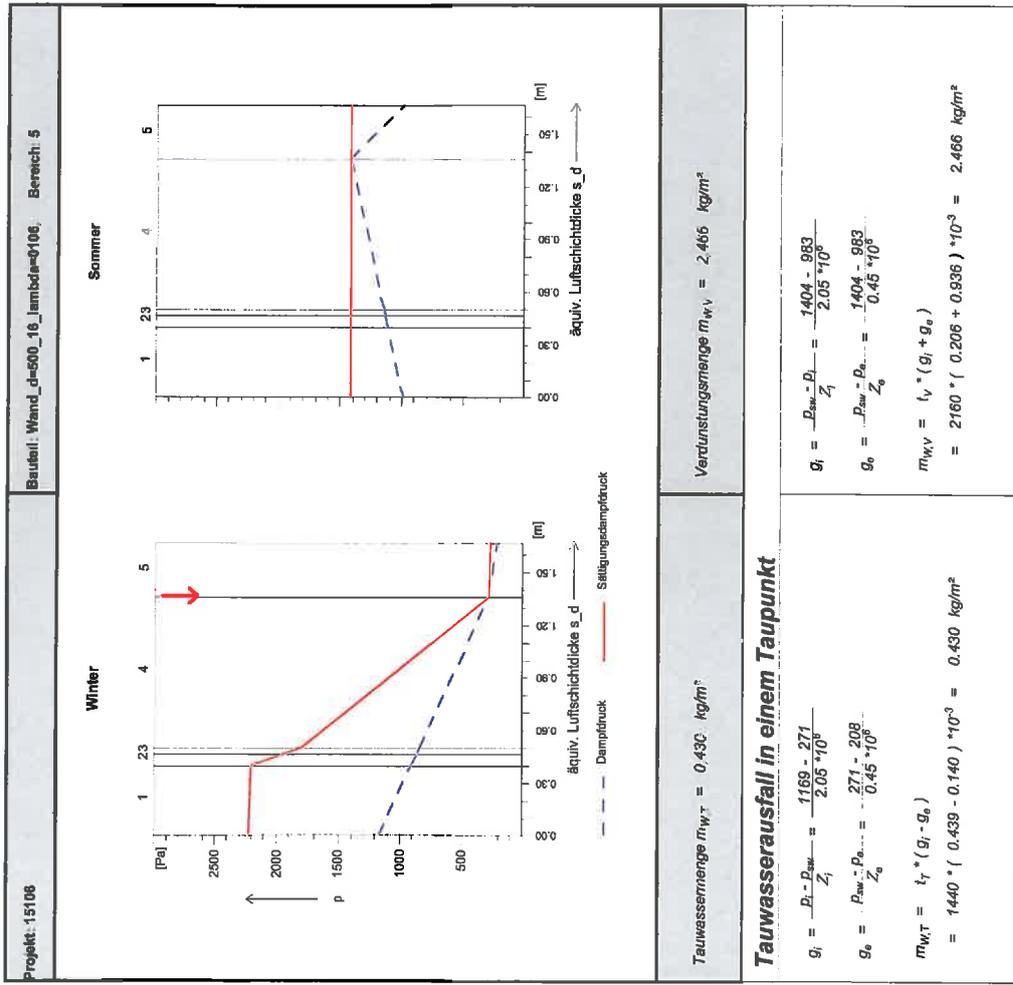
Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 17.7\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 87\%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E} : \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{e,i}) \cdot \phi_i^2 \cdot 3 \cdot R_{e,i} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldawag 21+23	74172 Neckarsulm
Projekt-Bauteil	Wand_d=500_16_lambda=010	
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft	Fläche [m ²]
	0,148	0,00
	U-Wert [W/m ² K]	[%]
	0,208	0,00
		100,00
		min R = 1,200 <= vorh R = 6,572 m ² K/W
Gesamte Gebäudefläche	Kammer_Rand_Griff1	HT
Bereich 5 von 11	0,67 %	[W/K] (Fs=1,00) 0,00
		(Fs=1,00) 0,00
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt!		0,16
		100,00



Bauteil		Wärmeschutz		Tauwasserschutz	
Sp	Nr	d [mm]	FI Masse [W/(m ² K)]	R/R_T [m ² K/W]	s_d [m]
-	-	Wärmeübergang Innen	-	0,130	-
1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,029	20
2	ILA-Stein_aus_Holz	35,0	16,8	0,330	2
3	Luftschicht, ruhend, horizontal	35,0	0,0	0,194	1
4	ILA-Stein_aus_Holz	430,0	206,4	0,106	2
5	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	15
-	-	Wärmeübergang außen	-	0,040	-
-	-	Summe Bauteil	540,0	274,4	1,67
U = 0,208 W/m ² K			Tauwassermenge: 0,430 kg/m ²		
			Verdunstungsmenge: 2,466 kg/m ²		
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 4,631 m ² K/W			Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.		



Grenzwerte für Tauwasserausfall

Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

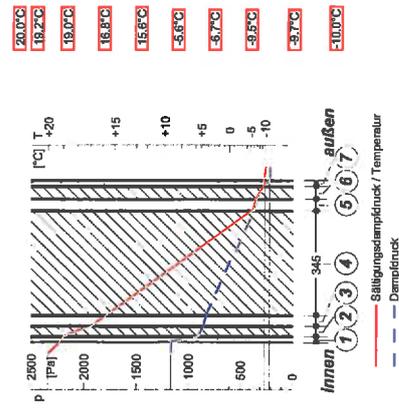
Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19,2 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 95 \%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 17,7 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 86 \%$

Formel für Ecktemperatur $\theta_{i,E}$:
$$\theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{se} \quad [^\circ\text{C}]$$

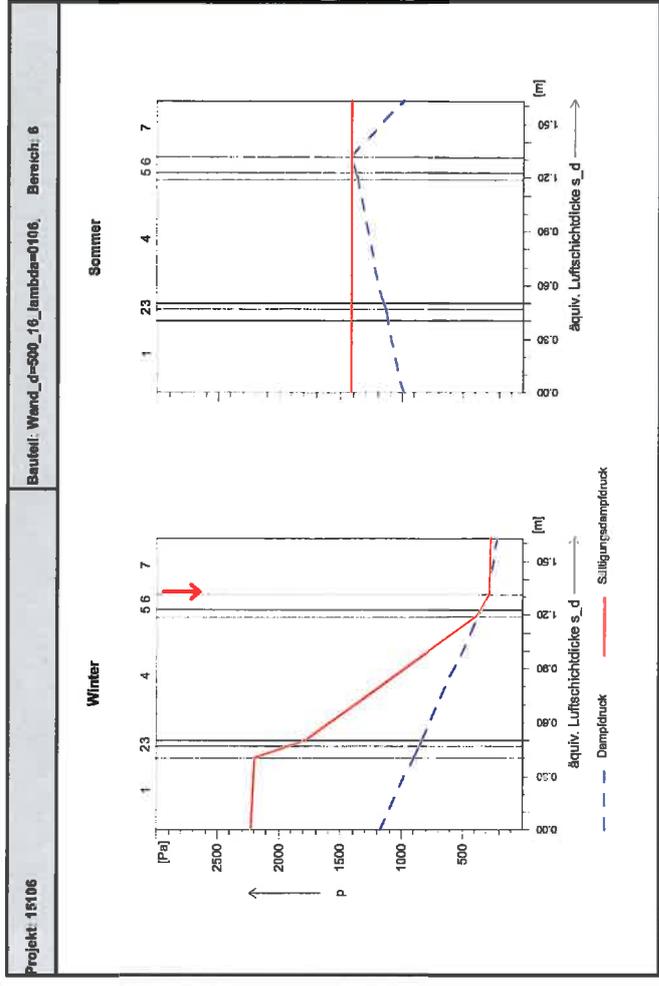
ILA	Fuldaweg 21+23		74172 Neckarsulm	
Projekt-Bauteil	Wand d=500 16 lambda=010			
Außenwand	U-Wert [W/m ² K]	Fläche [m ²]	HT [W/K]	HT [%]
	0,148	0,00	(F _{x=1,00}) 0,00	0,00
	0,217	0,00	(F _{x=1,00}) 0,00	0,00
Gesamte Gebäudefläche	1,00%	0,00	100,00	100,00
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt	min. R = 1,200		vori. R = 6,572 m ² W/W	
Kammer Griffz				

- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein_aus_Holz
- ③ Luftschicht, ruhend, horizontal
- ④ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑤ Luftschicht, ruhend, horizontal
- ⑥ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑦ ILA Basic Grundputz Außen



Sp	Nr	Schicht	d [mm]	Fl. masse [kg/m ²]	λ [W/(m·K)]	R / R _T [m ² ·K/W]	μ	s _d [m]	Taufwassererhalt							
									g _i	g _e	m _{W,V}	g ₀				
		Wärmeübergang innen	-	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,169					
1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	0,40	19,2	2,219	1,169					
2	ILA-Stein_aus_Holz	35,0	16,8	0,106	0,330	2	0,07	0,07	19,0	2,183	898					
3	Luftschicht, ruhend, horizontal	35,0	0,0	0,194	0,180	1	0,04	0,04	16,8	1,916	851					
4	ILA-Stein_aus_Holz	345,0	165,6	0,106	3,255	2	0,89	0,89	15,6	1,778	827					
5	Luftschicht, ruhend, horizontal	40,0	0,1	0,222	0,180	1	0,04	0,04	-5,6	383	380					
6	ILA-Stein_aus_Holz	45,0	21,6	0,106	0,425	2	0,09	0,09	-6,7	346	332					
7	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	0,30	-9,5	271	271					
		Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	-10,0	260	208					
- Summe Bauteil									255,3	-	4,604					
U = 0,217 W/m ² K									Taufwassererhalt:		0,447 kg/m ²					
									Verdunstungsmenge:		2,479 kg/m ²					

Mindestwärmeschutz: min. R / vori. R = 1,200 / 4,484 m²K/W Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.



Tauwassererhalt in einem Taupunkt

Taufwassererhalt $m_{W,V} = 0,447 \text{ kg/m}^2$

Verdunstungsmenge $m_{W,V} = 2,479 \text{ kg/m}^2$

$$g_i = \frac{p_i - p_{s,i}}{Z_i} = \frac{1169 - 271}{1,99 \cdot 10^3}$$

$$g_e = \frac{p_{s,e} - p_e}{Z_e} = \frac{271 - 208}{0,45 \cdot 10^3}$$

$$m_{W,V} = \int_T (g_i - g_e) = 1440 \cdot (0,452 - 0,141) \cdot 10^{-3} = 0,447 \text{ kg/m}^2$$

$$g_i = \frac{p_{s,i} - p_i}{Z_i} = \frac{1404 - 983}{1,99 \cdot 10^3}$$

$$g_e = \frac{p_{s,e} - p_e}{Z_e} = \frac{1404 - 983}{0,45 \cdot 10^3}$$

$$m_{W,V} = \int_T (g_i + g_e) = 2160 \cdot (0,212 + 0,836) \cdot 10^{-3} = 2,479 \text{ kg/m}^2$$

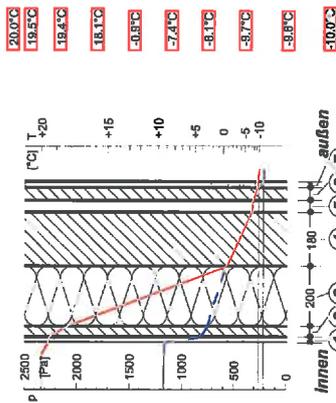
Grenzwerte für Tauwasserausfall

Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19.2\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 95\%$
 Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 17.6\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 86\%$

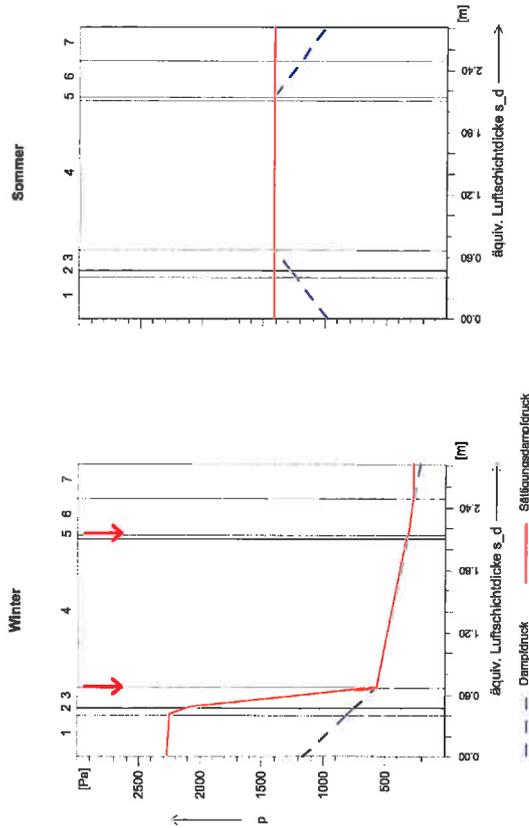
$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E}: \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldweg 21+23	74172 Neckarsulm
Projekt-Bauteil	Wand, d=500 16 lambda=010	
Außenwand	U-Wert [W/m²K]	Fläche [m²]
	0,148	0,00
	0,127	0,00
Gesamte Gebäudenutzfläche	1,67 %	0,00
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab 3 ist erfüllt	min. R = 1,200 <= vorh. R = 8,572 m²K/W	



- 1 ILA Basic Grundputz Innen
- 2 ILA-Stein_aus_Holz
- 3 Wärmedämmstoff_040
- 4 ILA-Stein_aus_Holz
- 5 Luftschicht, ruhend, horizontal
- 6 ILA-Stein_aus_Holz
- 7 ILA Basic Grundputz Außen

Sp	Mr	Schicht	d [mm]	ρ [kg/m³]	λ [W/(m·K)]	R [R/LT]	s_d [m]	Taufwasserschutz			
								g [g/m²]	p [Pa]		
Randbedingungen nach DIN 4108-3											
Tagesperiode = 1,440 h											
Verdunstungsperiode = 3,160 h											
Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C											
Theta_s/Theta_i = 0 °C / 20 °C phi_s / phi_i = 60 % / 95 %											
Theta_s/Theta_i = 12 °C / 12 °C phi_s / phi_i = 70 % / 70 %											
-	-	Wärmeübergang innen	-	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,169
1	-	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	19,5	2,268	1,169
2	-	ILA-Stein_aus_Holz	35,0	16,8	0,106	0,330	2	0,07	19,4	2,252	809
3	-	Wärmedämmstoff_040	200,0	0,0	0,040	5,000	1	0,20	18,1	2,082	747
4	-	ILA-Stein_aus_Holz	180,0	88,4	0,106	1,698	8	1,44	-0,9	567	567
5	-	Luftschicht, ruhend, horizontal	40,0	0,1	0,222	0,180	1	0,04	-7,4	328	314
6	-	ILA-Stein_aus_Holz	45,0	21,6	0,106	0,425	8	0,38	-8,1	307	307
7	-	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	-9,7	267	253
-	-	Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	-9,8	263	208
-	-	Summe Bauteil	540,00	176,1	-	7,867	-	2,81	-10,0	260	208
U = 0,127 W/m²K								Taufwassermenge:		0,718 kg/m²	
								Verdunstungsmenge:		1,205 kg/m²	
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 7,867 m²K/W										Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.	


 Tauwasserneigung $m_{w,T} = 0,718 \text{ kg/m}^2$

 Verdunstungsmenge $m_{w,V} = 1,205 \text{ kg/m}^2$
Tauwasseranfall in zwei Taupunkten

$$g_1 = \frac{D_1 \cdot p_{\text{sat}}}{Z_1} = \frac{1169 \cdot 567}{1,00 \cdot 10^6}$$

$$g_2 = \frac{p_{\text{sat}} \cdot p_{\text{sat}}}{Z_2} = \frac{567 \cdot 307}{2,22 \cdot 10^6}$$

$$g_0 = \frac{p_{\text{sat}} \cdot p_{\text{sat}}}{Z_0} = \frac{307 \cdot 208}{0,99 \cdot 10^6}$$

$$m_{w,T1} = t_T \cdot (g_1 - g_2)$$

$$= 1440 \cdot (0,599 - 0,117) \cdot 10^{-3} = 0,695 \text{ kg/m}^2$$

$$m_{w,T2} = t_T \cdot (g_2 - g_0)$$

$$= 1440 \cdot (0,117 - 0,101) \cdot 10^{-3} = 0,023 \text{ kg/m}^2$$

$$g_1 = \frac{p_{\text{sat}} \cdot p_1}{Z_1} = \frac{1404 \cdot 983}{1,00 \cdot 10^6}$$

$$g_{\text{Zus}} = \frac{p_{\text{sat}} \cdot p_{\text{sat}}}{Z_0} = \frac{1404 \cdot 983}{3,21 \cdot 10^6}$$

$$g_0 = \frac{p_{\text{sat}} \cdot p_{\text{sat}}}{Z_0} = \frac{1404 \cdot 983}{0,99 \cdot 10^6}$$

$$m_{w,V} = t_T \cdot g_1 + t_0 \cdot g_0 + t_{\text{Zus}} \cdot g_{\text{Zus}}$$

$$= (2160 \cdot 0,419 + 55 \cdot 0,425 + 2105 \cdot 0,131) \cdot 10^{-3}$$

$$= 1,205 \text{ kg/m}^2$$

Grenzwerte für Tauwasseranfall

Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasseranfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

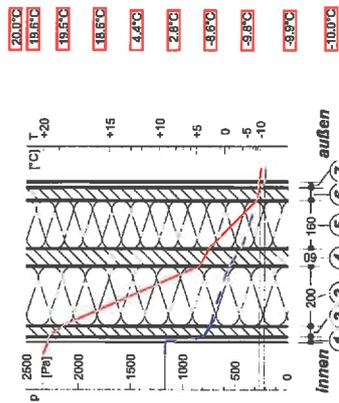
 Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,O} = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 97 \%$

 Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 18,6 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 91 \%$

Formel für Ecktemperatur $\theta_{i,E}$: $\theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_a) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si}$ [°C]

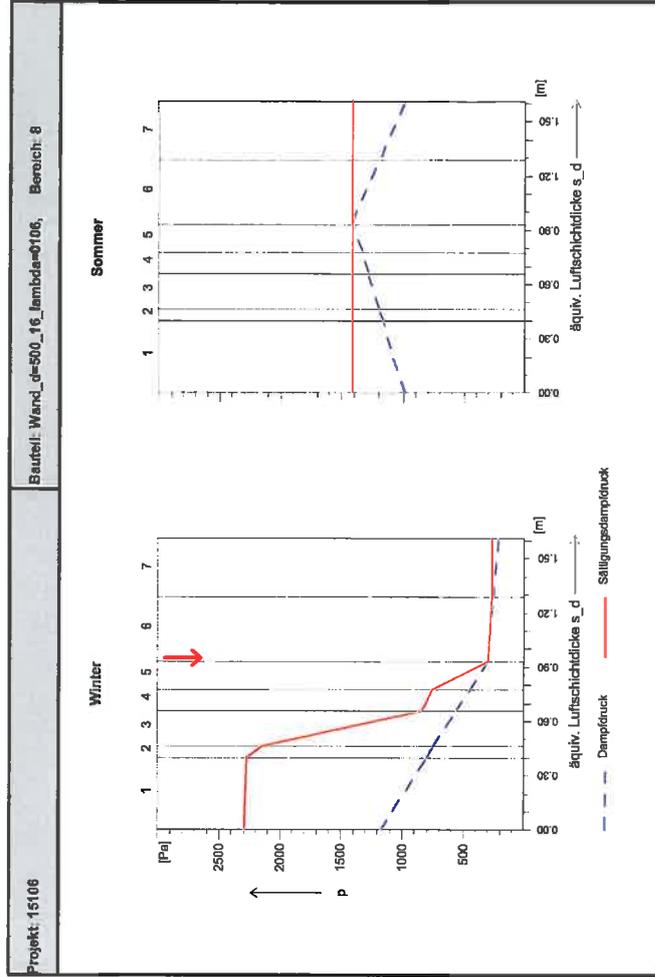
ILA		Fußweg 21+23		74172 Neckarasum	
Projekt-Bauteil	Wand d=500 16 lambda=010		U-Wert	HT	
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft	Fläche [m²]	[W/m²K]	[m²]	[m²K]
		0,00	0,148	0,00	(Fx=1,00) 0,00
Kammer_inlay2					
Bereich 8 von 11		10,33 %	0,095	0,00	(Fx=1,00) 0,00
Gesamte Gebäudefläche				0,00	0,16
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab 3 ist erfüllt!				100,00	100,00
				min. R = 1,200 <= vorh. R = 6,572 m²K/W	

- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein_aus_Holz
- ③ Wärmedämmstoff_040
- ④ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑤ Wärmedämmstoff_040
- ⑥ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑦ ILA Basic Grundputz Außen



Sp	Nr	Schicht	d [mm]	Flmasse [kg/m²]	Wärmeleitfähigkeit		Wärmeleitfähigkeit		Taubwasserfall		
					λ [W/(m·K)]	R [R/T] [m²·K/W]	λ [W/(m·K)]	R [R/T] [m²·K/W]	g _i [kg/m²]	g _e [kg/m²]	
1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	1,169	1,43 · 10 ⁻³	1,169	1,43 · 10 ⁻³
2	ILA-Stein_aus_Holz	35,0	16,8	0,106	0,330	2	0,07	2,285	1,43 · 10 ⁻³	2,285	1,43 · 10 ⁻³
3	Wärmedämmstoff_040	200,0	0,0	0,040	5,000	1	0,20	2,274	1,43 · 10 ⁻³	2,274	1,43 · 10 ⁻³
4	ILA-Stein_aus_Holz	60,0	28,8	0,106	0,566	2	0,12	2,145	1,43 · 10 ⁻³	2,145	1,43 · 10 ⁻³
5	Wärmedämmstoff_040	160,0	0,0	0,040	4,000	1	0,16	837	1,43 · 10 ⁻³	837	1,43 · 10 ⁻³
6	ILA-Stein_aus_Holz	45,0	21,6	0,106	0,425	8	0,36	265	1,43 · 10 ⁻³	265	1,43 · 10 ⁻³
7	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	263	1,43 · 10 ⁻³	263	1,43 · 10 ⁻³
-	Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	260	1,43 · 10 ⁻³	260	1,43 · 10 ⁻³
-	Summe Bauteil	540,00	118,4	-	10,555	-	1,61	-	-	-	-
		U = 0,095 W/m²K		Taubwasserfall:		Verdunstungsmenge:		0,758 kg/m²		1,557 kg/m²	

Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 10,385 m²K/W
Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.



$m_{w,T} = 0,758 \text{ kg/m}^2$ Tauwasserfall in einem Taupunkt	$m_{w,V} = 1,557 \text{ kg/m}^2$ Verdunstungsmenge
$g_i = \frac{D_w - D_{sw}}{Z_i} = \frac{1169 - 295}{1,43 \cdot 10^3} = 0,758 \text{ kg/m}^2$ $g_e = \frac{D_{sw} - D_a}{Z_e} = \frac{295 - 208}{0,99 \cdot 10^3} = 0,088 \text{ kg/m}^2$ $m_{w,T} = \tau_T \cdot (g_i - g_e) = 1440 \cdot (0,614 - 0,088) \cdot 10^{-3} = 0,758 \text{ kg/m}^2$	$g_i = \frac{D_{sw} - D_i}{Z_i} = \frac{1404 - 983}{1,43 \cdot 10^3} = 0,296 \text{ kg/m}^2$ $g_e = \frac{D_{sw} - D_a}{Z_e} = \frac{1404 - 983}{0,99 \cdot 10^3} = 0,425 \text{ kg/m}^2$ $m_{w,V} = \tau_V \cdot (g_i + g_e) = 2160 \cdot (0,296 + 0,425) \cdot 10^{-3} = 1,557 \text{ kg/m}^2$

Grenzwerte für Tauwasserausfall

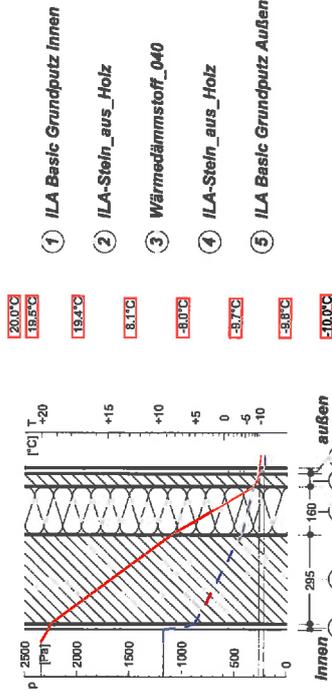
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 19,6\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 98\%$

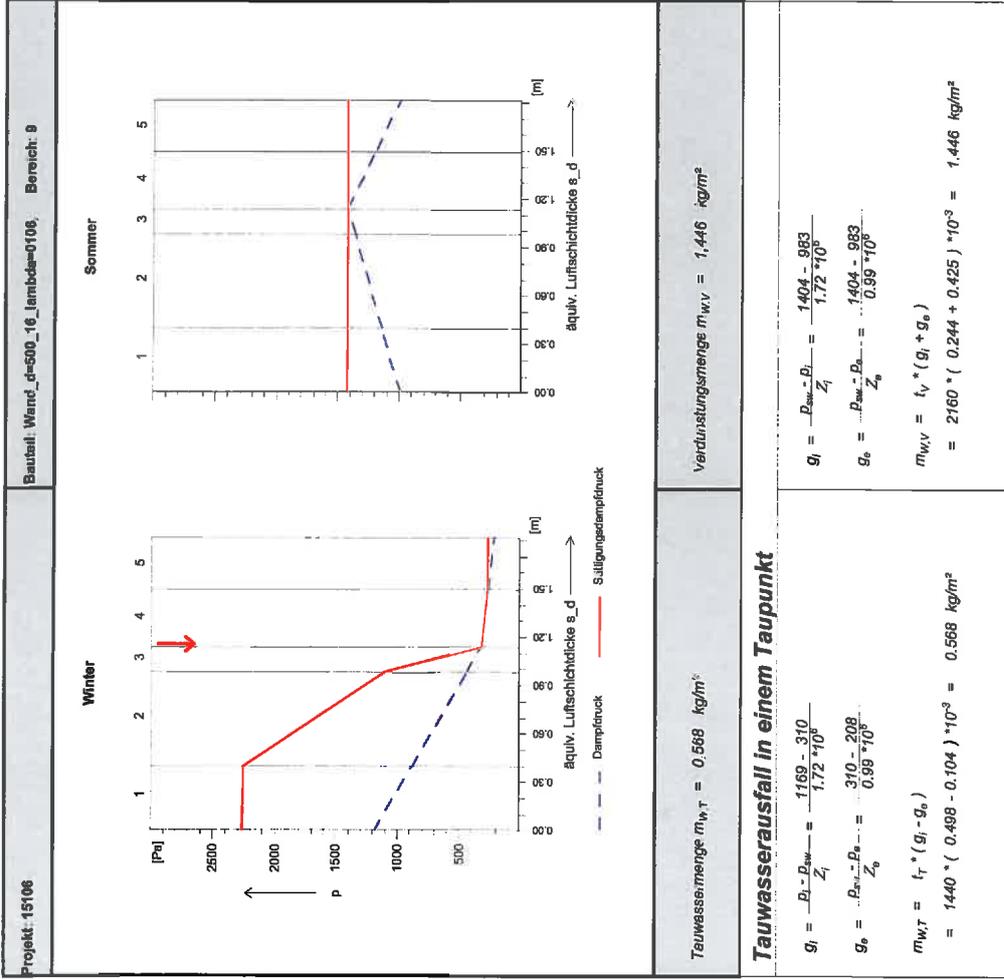
Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 18,9\text{ °C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 93\%$

$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,E}: \theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{di})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{di} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

ILA	Fuldaweg 21+23	74172 Neckarulm
Projekt-Bau teil	Wand d=500 16 lambda da=010	
Außenwand	Abgrenzung zur Außenluft	Fläche [m ²] 0,00
	Kammer Inlay1	HT [W/m ² K] (F _x =1,00) 0,00
	Bereich 9 von 11	U-Wert [W/m ² K] 0,148
	2,33 %	Fläche [m ²] 0,00
Gesamta Gebäu dehe llfläche		HT [W/m ² K] (F _x =1,00) 0,00
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt!	min R = 1,200	vorh R = 6,572 m ² K/W



Bauteil		Wärmeschutz				Tauwasserschutz					
Bauteil		Wärmeschutz				Tauwasserschutz					
Bauteil		Wärmeschutz				Tauwasserschutz					
Randbedingungen nach DIN 4108-3		Tauernode = 1,440 h				Thi _{ext} /T _{ext,i} = -10 °C / 20 °C					
Bauteil		Verdunstungsperiode = 2,160 h				Thi _{ext} /T _{ext,i} = 12 °C / 12 °C					
Bauteil		Temperatur der Oberfläche außen = 12 °C				Phi _{ext} /Phi _{int} = 80 % / 80 %					
Bauteil		Temperatur der Oberfläche innen = 12 °C				Phi _{ext} /Phi _{int} = 70 % / 70 %					
Sp	Nr	Schicht	d [mm]	Fl. Masse [kg/m ²]	lambda [W/(m*K)]	R/R_T [m ² K/W]	mu	s_d [m]	W [Pa]	p [Pa]	
-	-	Wärmeübergang Innen	-	-	-	0,130	-	-	20,0	2,338	1,168
1	ILA Basic Grundputz Innen		20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	19,5	2,264	1,168
2	ILA-Stein aus Holz		285,0	141,6	0,106	2,783	2	0,59	19,4	2,247	870
3	Wärmedämmstoff_040		160,0	0,0	0,040	4,000	1	0,16	8,1	1,084	430
4	ILA-Stein aus Holz		45,0	21,6	0,106	0,425	8	0,36	-8,0	310	310
5	ILA Basic Grundputz Außen		20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	-8,7	267	254
-	-	Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	-10,0	260	208
-	-	Summe Bauteil	540,00	214,4	-	7,442	-	1,81	-	-	-
U = 0,134 W/m ² K		Tauwassermenge:				0,568 kg/m ²					
U = 0,134 W/m ² K		Verdunstungsmenge:				1,446 kg/m ²					
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 7,272 m ² K/W		Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.									



Grenzwerte für Tauwasserausfall

Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

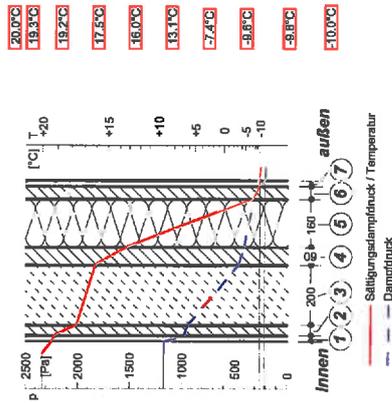
Oberfläche: Ist-Temperatur $\vartheta_{i,0} = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 97 \%$

Ecke: Ist-Temperatur $\vartheta_{i,E} = 18,5 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 91 \%$

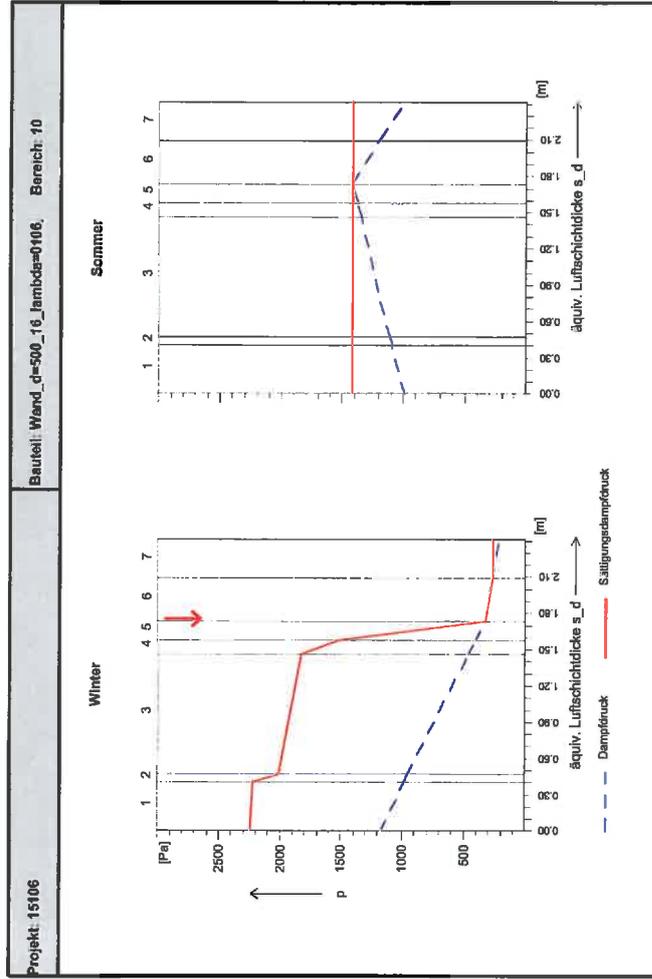
Formel für Ecktemperatur $\vartheta_{i,E}$: $\vartheta_{i,E} = \vartheta_i - (\vartheta_i - \vartheta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si}$ [°C]

ILA	Fußweg 21+23	74/172 Neckerraum							
Projekt-Bauteil	Wand d=500 16 lambda=010		Fläche	[m²]	[W/K]	HT			
Außenwand	Abgrenzung zu Außenluft		0,00	0,00	(F=1,00) 0,00	0,00			
Gesamte Gebäudehüllfläche	Bereich 10 von 11		0,00	0,00	(F=1,00) 0,00	0,00			
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab 3 ist erfüllt	4,00 %		min. R = 1,200 <= vorh. R = 6,572 m²K/W			100,00			

- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Holzstein
- ③ Leichtbeton, mit Blähton
- ④ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑤ Wärmedämmstoff_040
- ⑥ ILA-Stein_aus_Holz
- ⑦ ILA Basic Grundputz Außen



Bauteil		Wärmeschutz		Tauberschutz		Temperatur		Verdunstungsperiode		Temperatur der Oberfläche außen		Tauberschutz	
Sp	Nr	Schicht	d [mm]	Flmasse [kg/m²]	lambda [W/(m·K)]	R [m²K/W]	lambda [W/(m·K)]	u [m]	s_d [m]	theta [°C]	theta [°C]	theta [°C]	theta [°C]
-	-	Wärmeübergang Innen	-	-	-	0,130	-	-	-	20,0	2,338	1,169	1,169
1	1	ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	0,700	20	0,40	19,3	2,243	1,169	1,169
2	2	ILA-Holzstein	35,0	16,8	0,110	0,318	0,110	2	0,07	19,2	2,223	976	976
3	3	Leichtbeton, mit Blähton	200,0	320,0	0,680	0,294	0,680	5	1,00	17,5	2,007	943	943
4	4	ILA-Stein_aus_Holz	60,0	28,8	0,106	0,566	0,106	2	0,12	16,0	1,824	461	461
5	5	Wärmedämmstoff_040	160,0	0,0	0,040	4,000	0,040	1	0,16	13,1	1,512	403	403
6	6	ILA-Stein_aus_Holz	45,0	21,6	0,106	0,425	0,106	8	0,36	-7,4	326	326	326
7	7	ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	0,560	15	0,30	-9,6	269	261	261
-	-	Wärmeübergang außen	-	-	-	0,040	-	-	-	-9,8	265	208	208
-	-	Summe Bauteil	540,00	438,4	-	5,837	-	-	2,41	-10,0	260	208	208
U = 0,171 W/m²K												Taubwassermenge: 0,291 kg/m²	
Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 5,667 m²K/W												Verdunstungsmenge: 1,265 kg/m²	
Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt.													



Taubwassermenge $m_{w,y}$ = 0,291 kg/m²

Verdunstungsmenge $m_{w,y}$ = 1,265 kg/m²

Taubwasserausfall in einem Taupunkt

$$g_i = \frac{D_i - D_{iw}}{Z_i} = \frac{1169 - 326}{2,62 \cdot 10^6}$$

$$g_o = \frac{D_{ow} - D_o}{Z_o} = \frac{326 - 208}{0,99 \cdot 10^6}$$

$$m_{w,y} = i_y \cdot (g_i - g_o)$$

$$= 1440 \cdot (0,321 - 0,119) \cdot 10^{-3} = 0,291 \text{ kg/m}^2$$

$$g_i = \frac{D_{iw} - D_i}{Z_i} = \frac{1404 - 983}{2,62 \cdot 10^6}$$

$$g_o = \frac{D_{ow} - D_o}{Z_o} = \frac{1404 - 983}{0,99 \cdot 10^6}$$

$$m_{w,y} = i_y \cdot (g_i + g_o)$$

$$= 2160 \cdot (0,160 + 0,425) \cdot 10^{-3} = 1,265 \text{ kg/m}^2$$

Grenzwerte für Tauwasserausfall

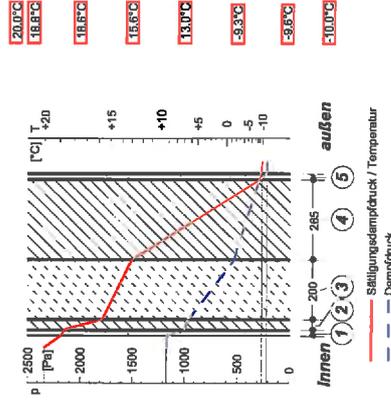
Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwasserausfall an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,o} = 19.3 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 96 \%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,e} = 18.1 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 89 \%$

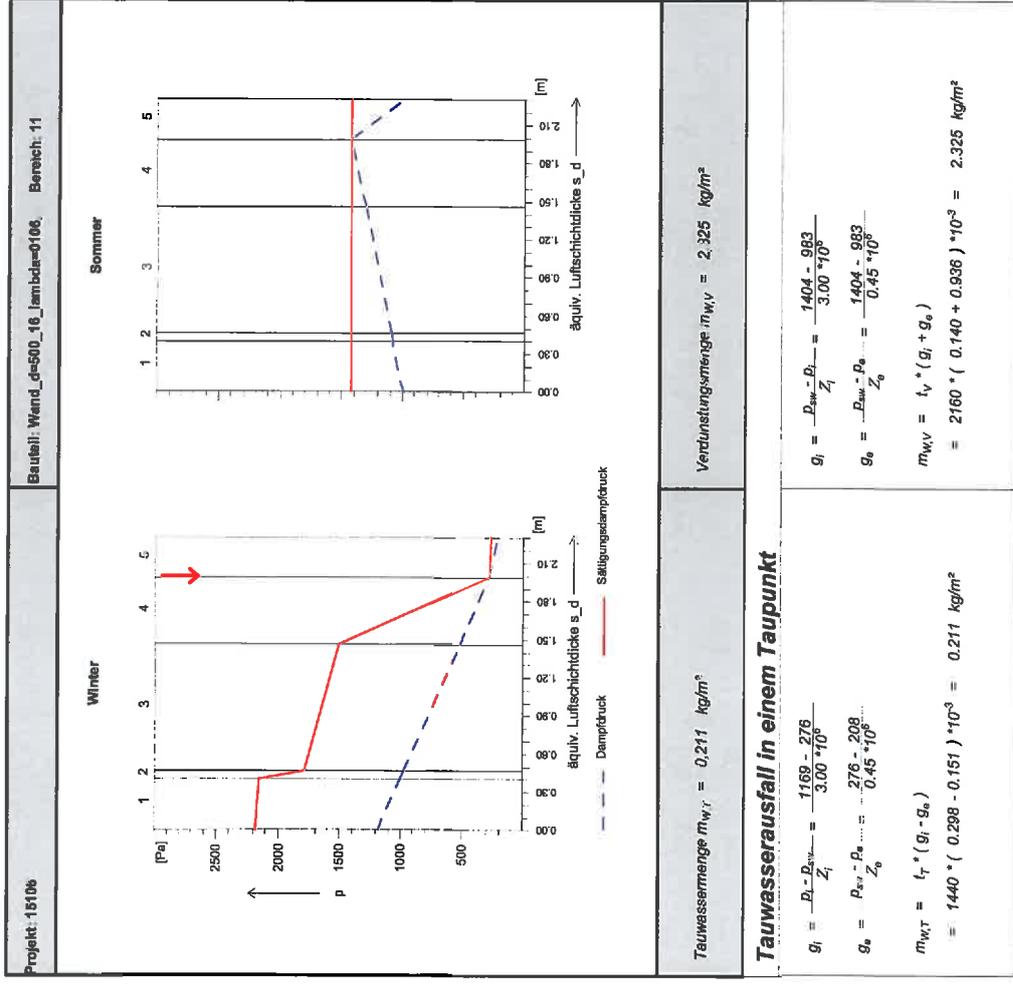
$$\text{Formel für Ecktemperatur } \theta_{i,e}: \theta_{i,e} = \theta_i - (\theta_i - \theta_e) \cdot (R + 3 \cdot R_{ef})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{ef} \quad [^\circ\text{C}]$$

ILA	Fuldweg 21+23	74172 Neckarzulm
Projekt-Bau teil	Wand d=500 16_lambda=010	Fläche
Außenwand	Abgrenzung zur Außenluft	[m²]
	Kammer_LB	U-Wert
	Bereich 11 von 11	[W/m²K]
Gesamte Gebäudefläche	3,33 %	0,148
Anforderung nach DIN 4108-2 Tab.3 ist erfüllt	min R = 1,200 <=	vorh R = 6,572 m²KW
		HT
		[W/K]
		[Fz=1,00] 0,00
		[Fz=1,00] 0,00
		0,18
		100,00



- ① ILA Basic Grundputz Innen
- ② ILA-Stein aus Holz
- ③ Leichtbeton, mit Blähton
- ④ ILA-Stein aus Holz
- ⑤ ILA Basic Grundputz Außen

Bauteil		Wärmeschutz					Tauwasserschutz						
Sp	Nr	Schicht	d [mm]	F [kg/m³]	λ [W/(m·K)]	R [m²K/W]	μ	g [g/m³]	g [Pa]	g [Pa]	g [Pa]	p [Pa]	p [Pa]
		Wärmeübergang Innen				0,130							
1		ILA Basic Grundputz Innen	20,0	27,6	0,700	0,029	20	0,40	20,0	2,338	1,169	1,169	
2		ILA-Stein aus Holz	35,0	16,8	0,106	0,330	2	0,07	18,8	2,176	1,169	980	
3		Leichtbeton, mit Blähton	200,0	320,0	0,680	0,294	5	1,00	16,6	1,777	959		
4		ILA-Stein aus Holz	285,0	127,2	0,106	2,500	2	0,53	13,0	1,500	513		
5		ILA Basic Grundputz Außen	20,0	23,6	0,560	0,036	15	0,30	-9,3	276	276		
		Wärmeübergang außen				0,040			-10,0	280	208		
		Summe Bauteil	540,00	515,2		3,359		2,30					
		U = 0,296 W/m²K								Tauwassermenge: 0,211 kg/m²			
		Mindestwärmeschutz: min. R / vorh. R = 1,200 / 3,188 m²KW								Verdunstungsmenge: 2,325 kg/m²			
		Anforderungen nach DIN 4108-3 sind erfüllt											



Grenzwerte für Tauwassererfassung

Grenzwerte für die relativen Luftfeuchten innen, ab denen mit Tauwassererfassung an Bauteiloberflächen bzw. in Ecken zu rechnen ist.

Oberfläche: Ist-Temperatur $\theta_{i,0} = 18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 93 \%$

Ecke: Ist-Temperatur $\theta_{i,E} = 16,7 \text{ }^\circ\text{C}$ führt zu Grenzwerten für die relative Luftfeuchte $\phi_i = 81 \%$

Formel für Ecktemperatur $\theta_{i,E}$: $\theta_{i,E} = \theta_i - (\theta_i - \theta_0) \cdot (R + 3 \cdot R_{si})^{-1} \cdot 3 \cdot R_{si} \quad [^\circ\text{C}]$

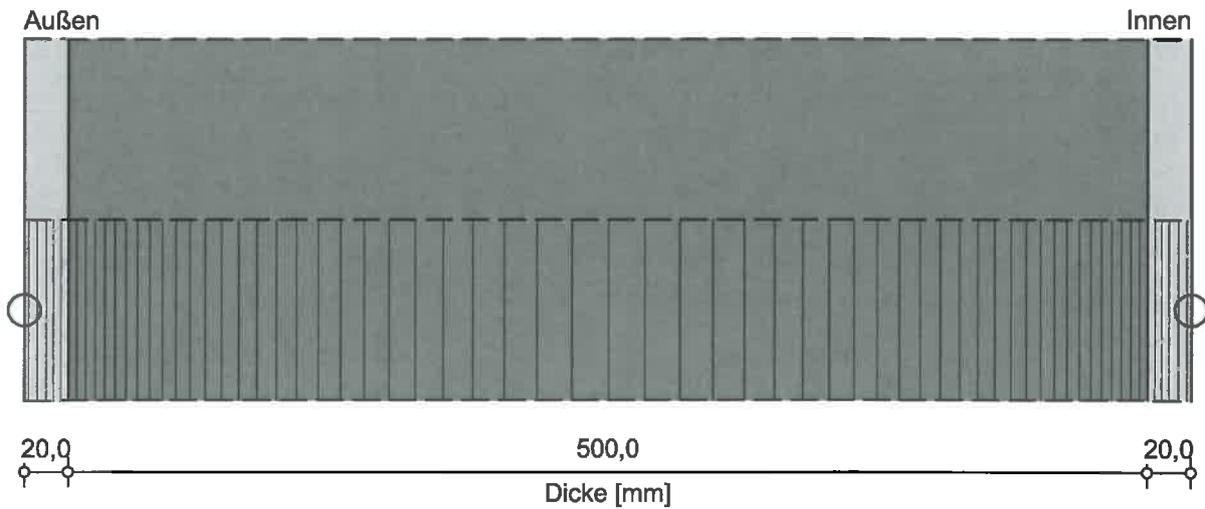
Entwicklung und ökologische Bewertung eines für die Passivhaus-Bauweise tauglichen,
einschaligen massiven Wandbausystems aus nachwachsenden Rohstoffen

Feuchtetechnisches Verhalten des Inlay- und Kammersteines / II

Anhang B Ergebnisse der hygrothermischen Bauteilsimulation (1D)

Bauteilaufbau

Variante: ILA Passivstein 50 cm - massiv (mit Schlagregen)



○ - Monitorpositionen

Materialien :

-  - ILA Grundputz Außen
-  - ILA - Stein_aus_Holz
-  - ILA Grundputz Innen

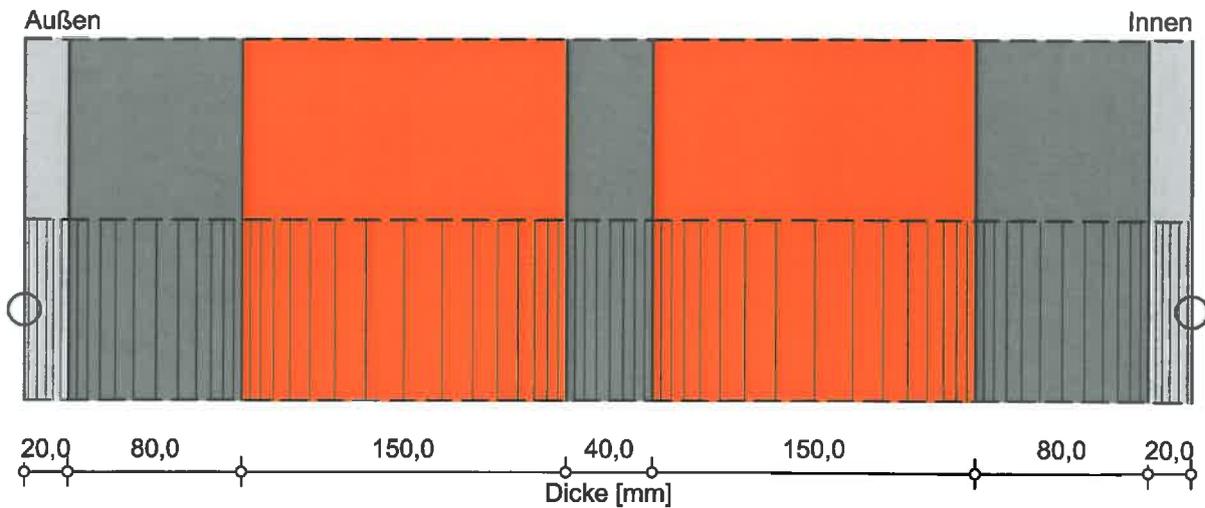
Gesamtdicke: 0,54 m

Wärmedurchlasswiderstand: 4,45 m²K/W

U-Wert: 0,216 W/m²K

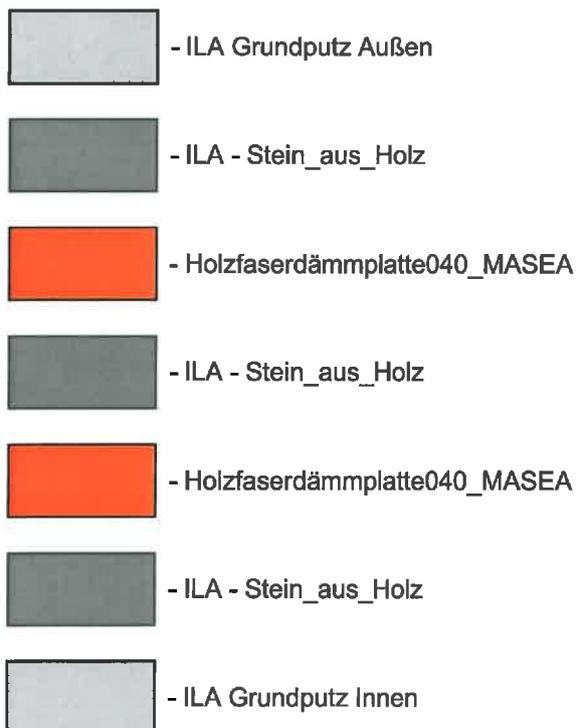
Bauteilaufbau

Variante: ILA Passivstein 50 cm - 2 * 15 cm Inlay (mit Schlagregen)



○ - Monitorpositionen

Materialien :



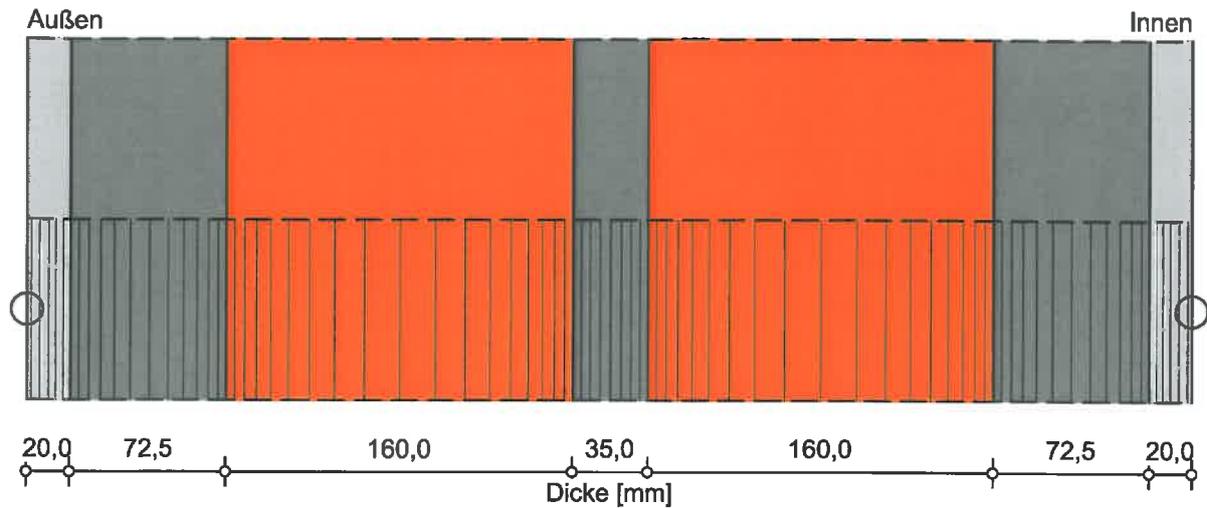
Gesamtdicke: 0,54 m

Wärmedurchlasswiderstand: 9,32 m²K/W

U-Wert: 0,105 W/m²K

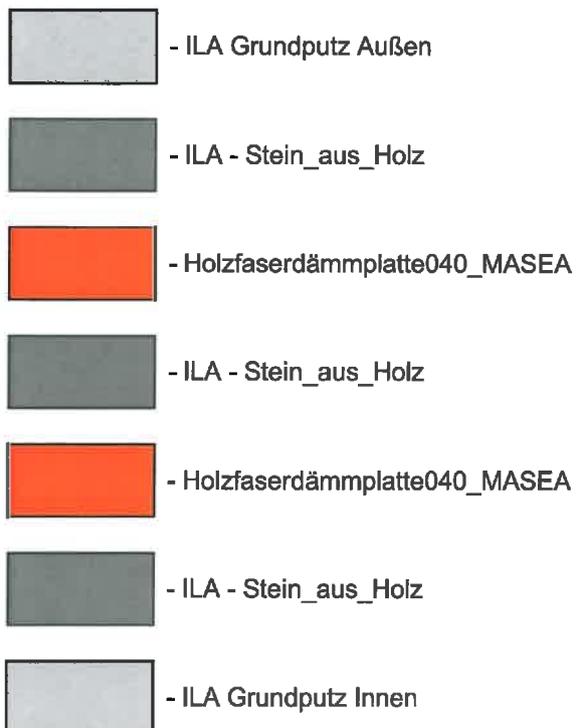
Bauteilaufbau

Variante: ILA Passivstein 50 cm - 2 * 16 cm Inlay (mit Schlagregen)



○ - Monitorpositionen

Materialien :



Gesamtdicke: 0,54 m

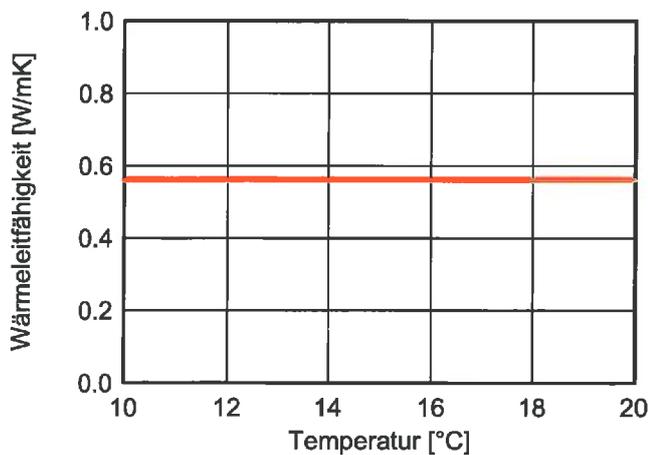
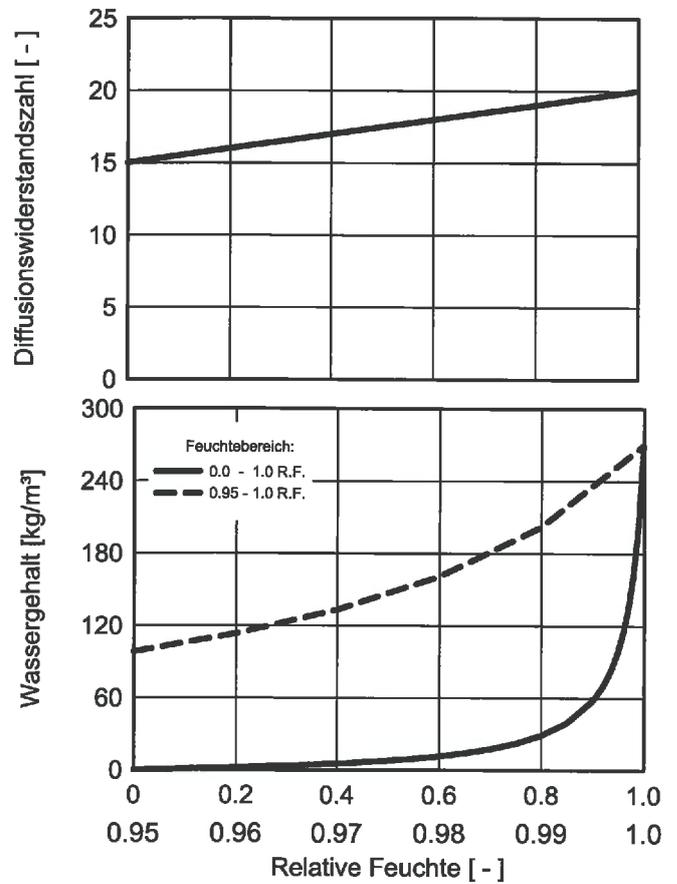
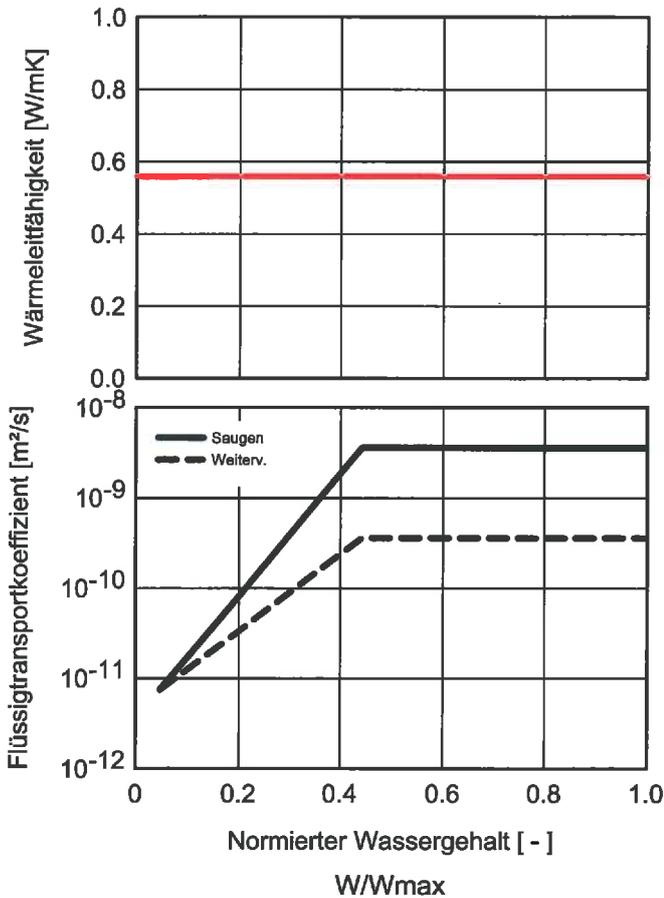
Wärmedurchlasswiderstand: 9,64 m²K/W

U-Wert: 0,102 W/m²K

Material : ILA Grundputz Außen

Zusammenstellung der Rechengrößen

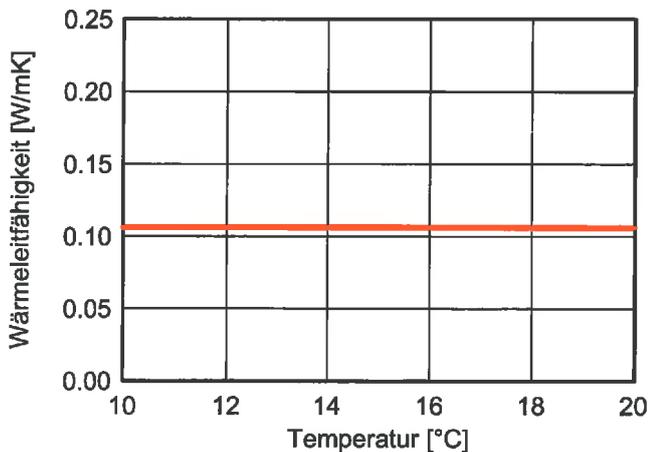
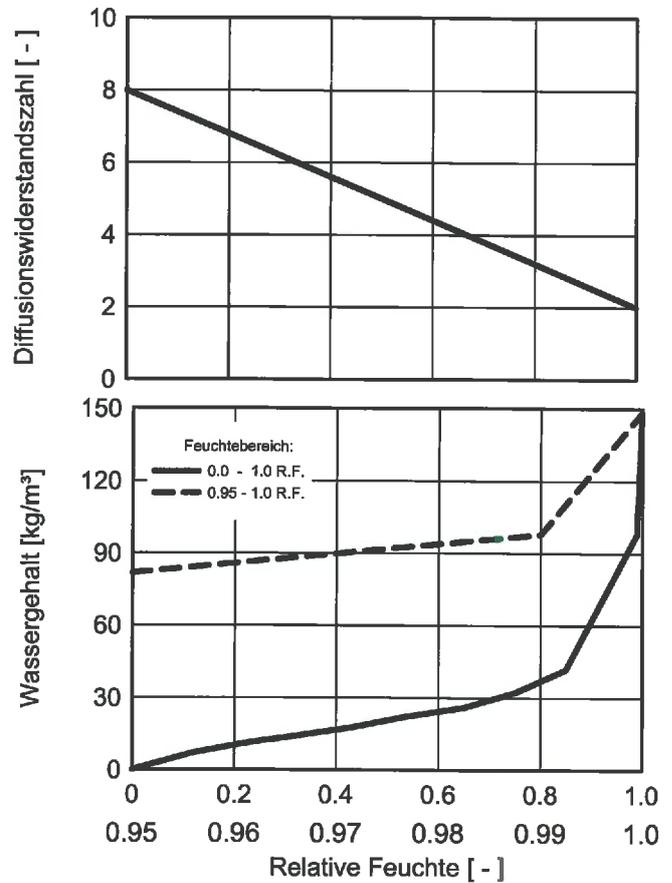
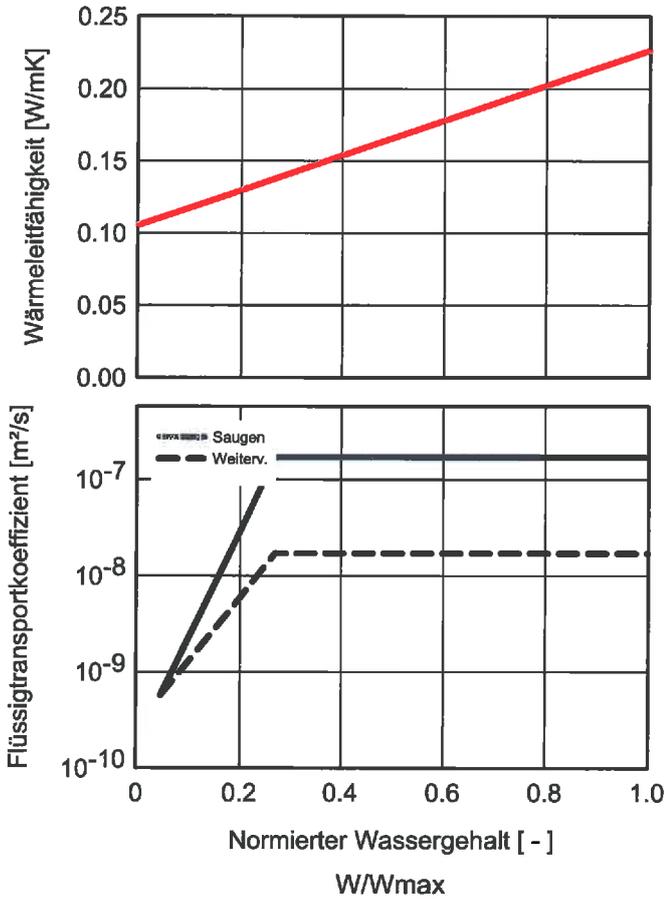
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1180,0
Porosität	[m³/m³]	0,61
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1100,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,56
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	15,0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m³]	29,0
Freie Wassersättigung	[kg/m³]	270,0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m²s ^{0.5}]	0,0083



Material : ILA - Stein_aus_Holz

Zusammenstellung der Rechengrößen

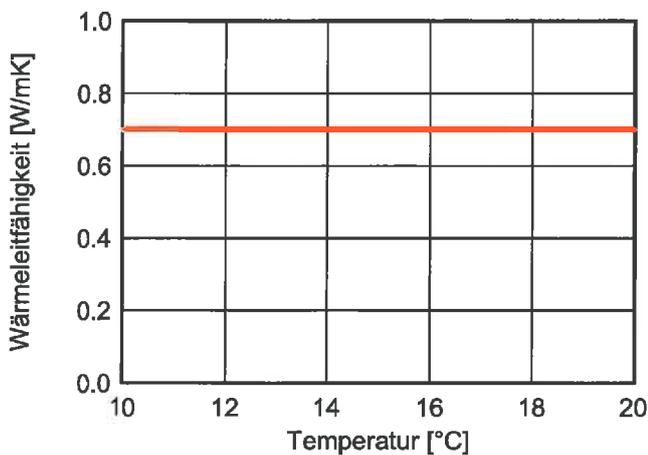
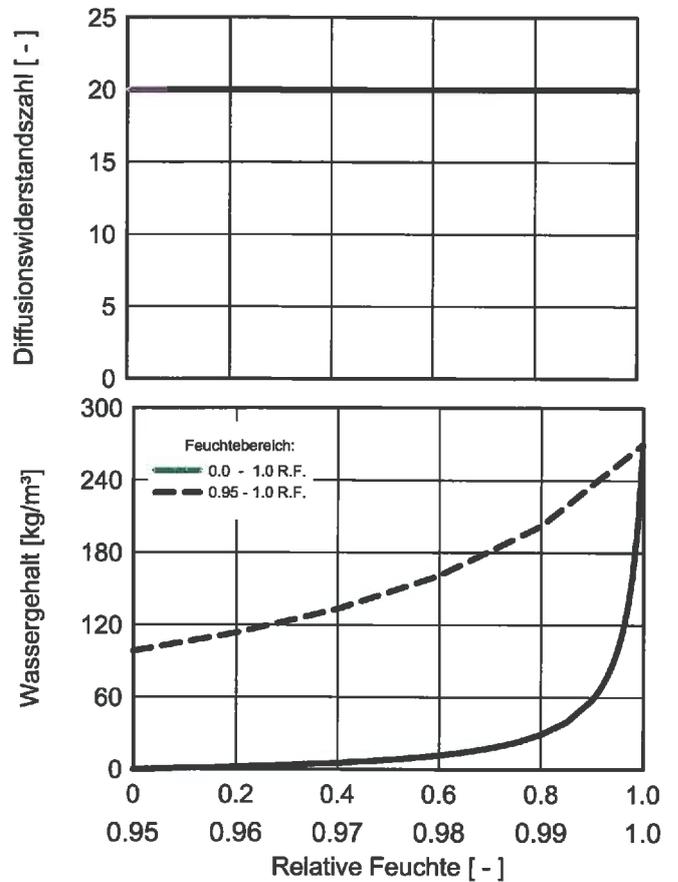
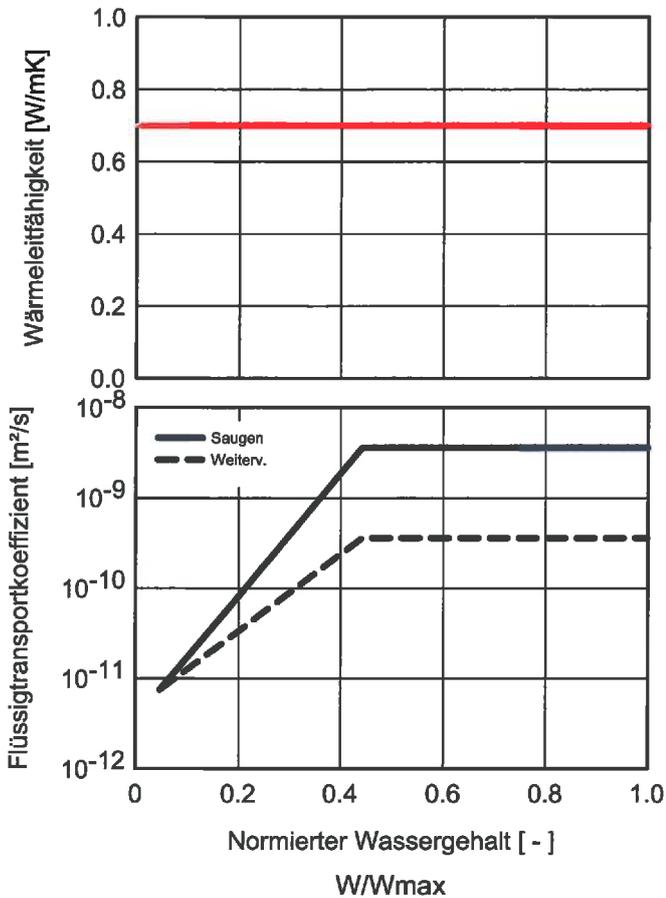
Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	487,0
Porosität	[m³/m³]	0,55
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1500,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,106
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	8,0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m³]	26,1
Freie Wassersättigung	[kg/m³]	148,5
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m²s ^{0.5}]	0,0313
Wärmeleitfähigkeitszuschlag, Feuchte	[%/M.-%]	1,0



Material : ILA Grundputz Innen

Zusammenstellung der Rechengrößen

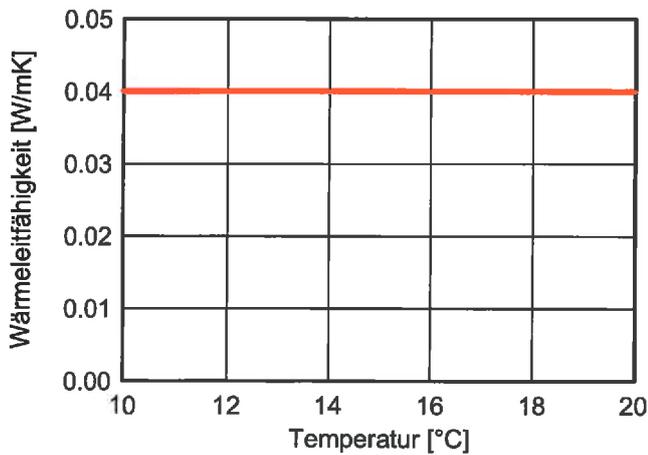
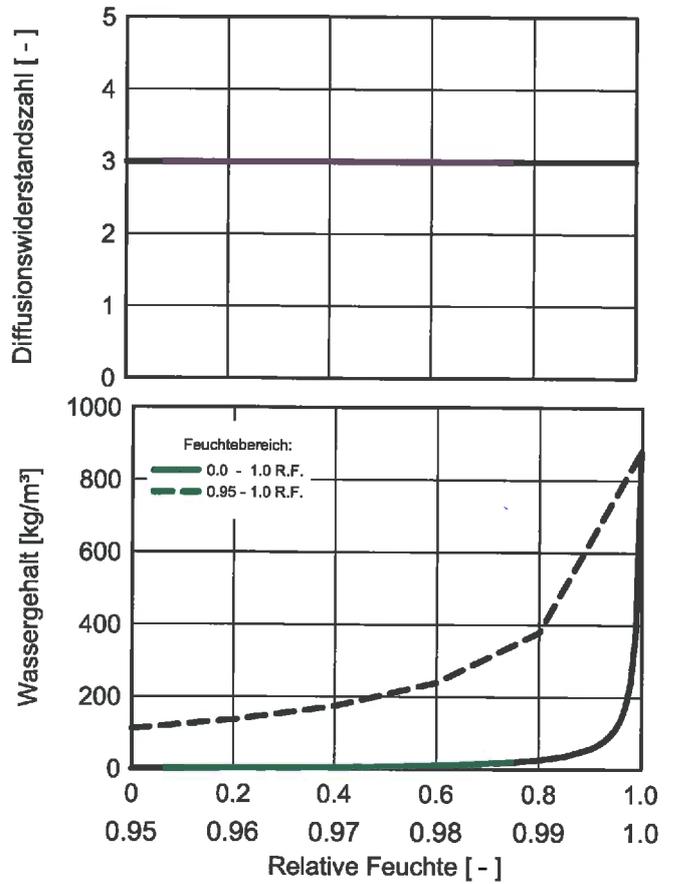
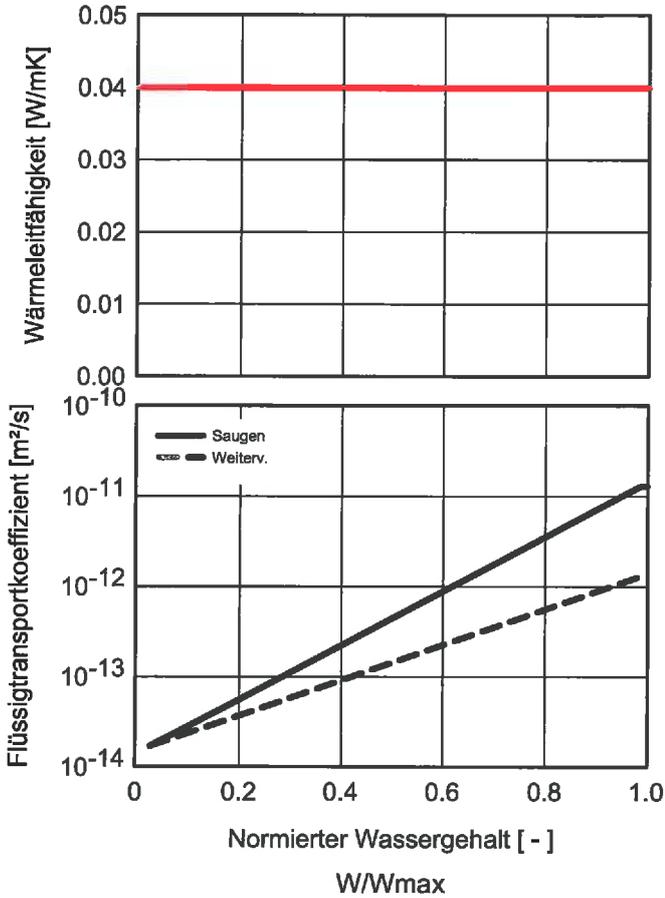
Kenwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	1380,0
Porosität	[m³/m³]	0,61
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1100,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,7
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	20,0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m³]	29,0
Freie Wassersättigung	[kg/m³]	270,0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m²s⁰.5]	0,0083



Material : Holzfaserdämmplatte040_MASEA

Zusammenstellung der Rechengrößen

Kennwert	Einheit	Wert
Rohdichte	[kg/m³]	160,0
Porosität	[m³/m³]	0,89
Wärmekapazität trocken	[J/kgK]	1700,0
Wärmeleitfähigkeit trocken ,10°C	[W/mK]	0,04
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	[-]	3,0
Bezugsfeuchtegehalt	[kg/m³]	26,0
Freie Wassersättigung	[kg/m³]	880,0
Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/m²s ^{0.5}]	0,001665



Randbedingungen

Außen (linke Seite)

Klimaort: Holzkirchen; IBP, Feuchtereferenzjahr
 Orientierung / Neigung: West / 90 °

Innen (rechte Seite)

Innenklima: WTA-Merkblatt 6-2-01/D
 Raumklimabedingungen, normale Feuchtelast

Oberflächenübergangskoeffizienten

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m ² K/W]	0,0588	Außenwand
Sd-Wert	[m]	----	Keine Beschichtung
Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl	[-]	0,4	Putz normal hell
Langwellige Strahlungsemissionszahl	[-]	0,9	Putz normal hell
Anhaftender Anteil des Regens	[-]	0,7	Gemäß Bauteiltyp/Neigung

Innen (rechte Seite)

Bezeichnung	Einheit	Wert	Bemerkung
Wärmeübergangswiderstand	[m ² K/W]	0,125	Außenwand
Sd-Wert	[m]	----	Keine Beschichtung

Explizite Strahlungsbilanz

Außen (linke Seite)

Bezeichnung	Wert
Eingeschaltet	nein

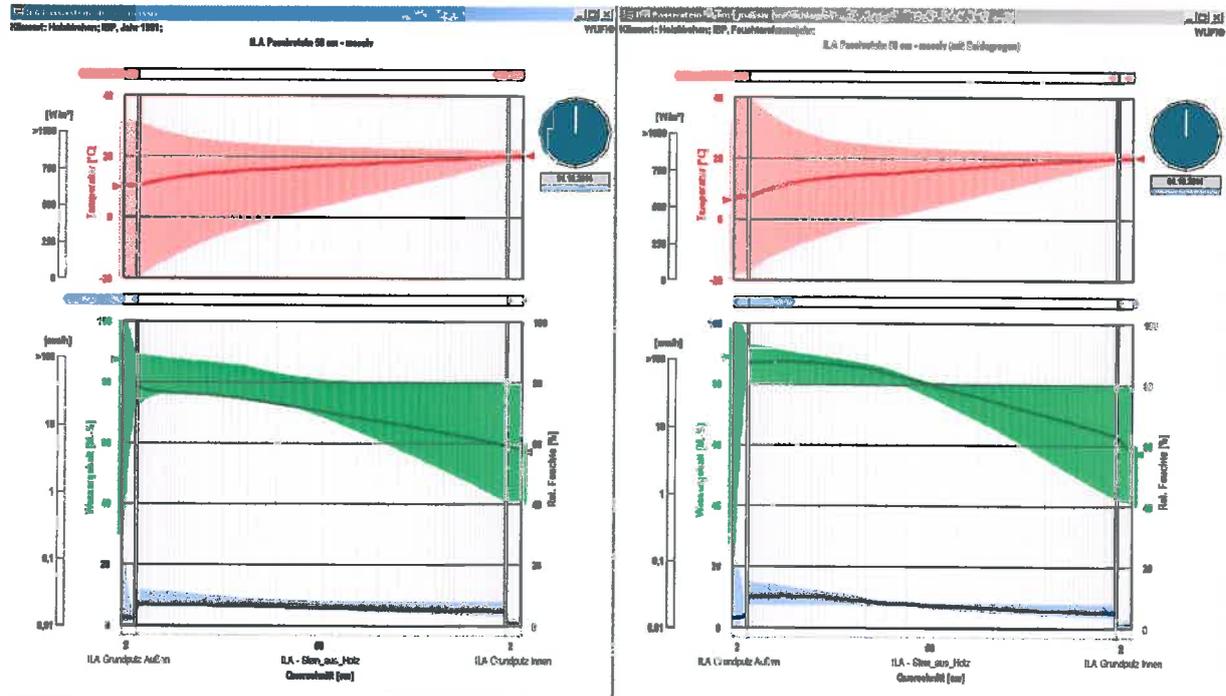


Bild 9 Temperatur- und Feuchteverlauf; ILA-Holstein homogen (ohne und mit Schlagregen)

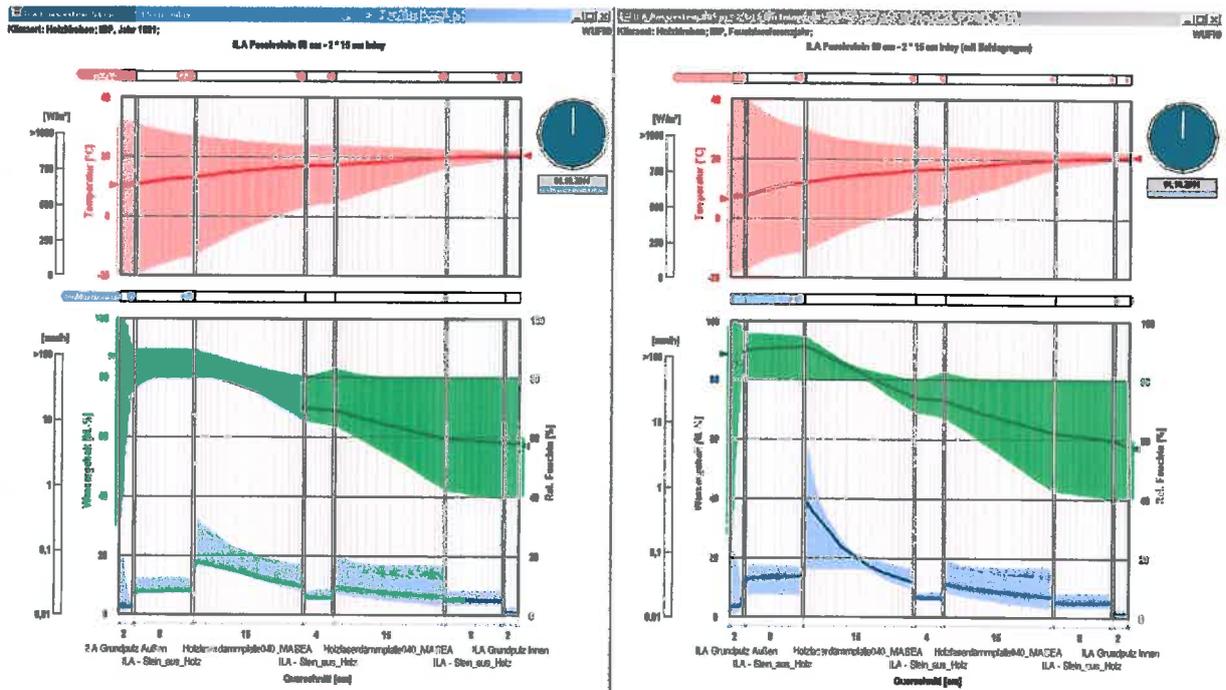


Bild 10 Temperatur- und Feuchteverlauf; ILA-Holstein, Inlay 2 * 15 cm (ohne und mit Schlagregen)

Feuchtetechnisches Verhalten des Inlay- und Kammersteines / II

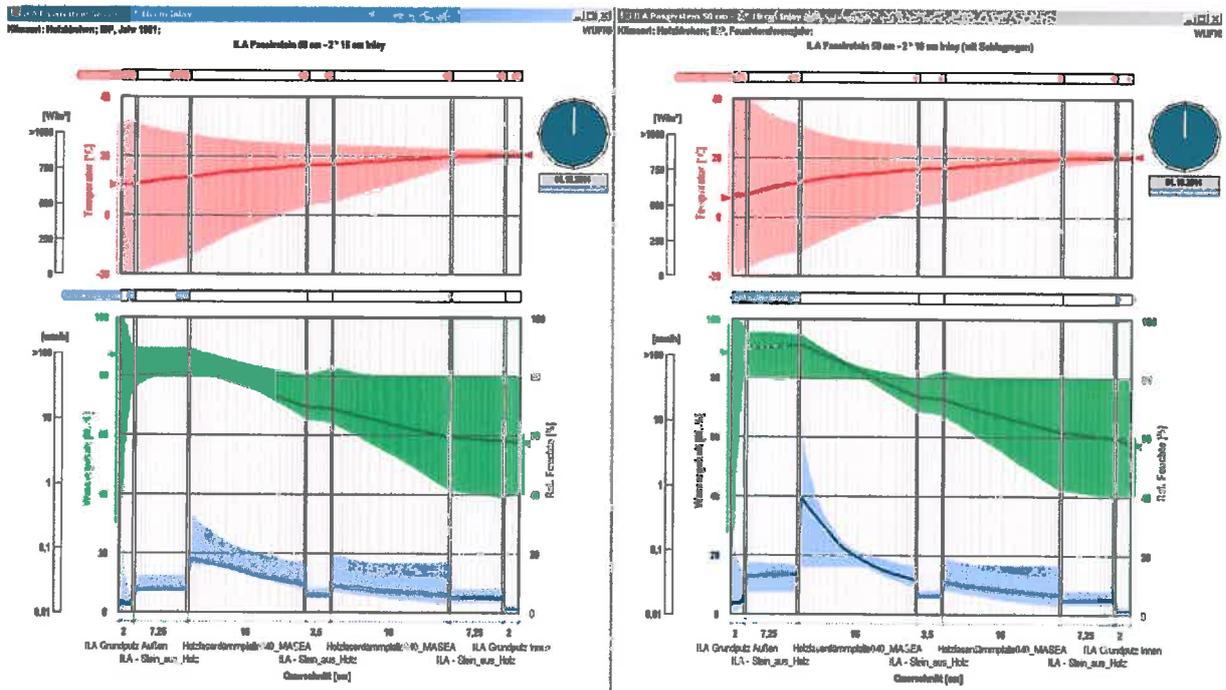


Bild 11 Temperatur- und Feuchteverlauf; ILA-Holstein, Inlay 2 * 16 cm (ohne und mit Schlagregen)

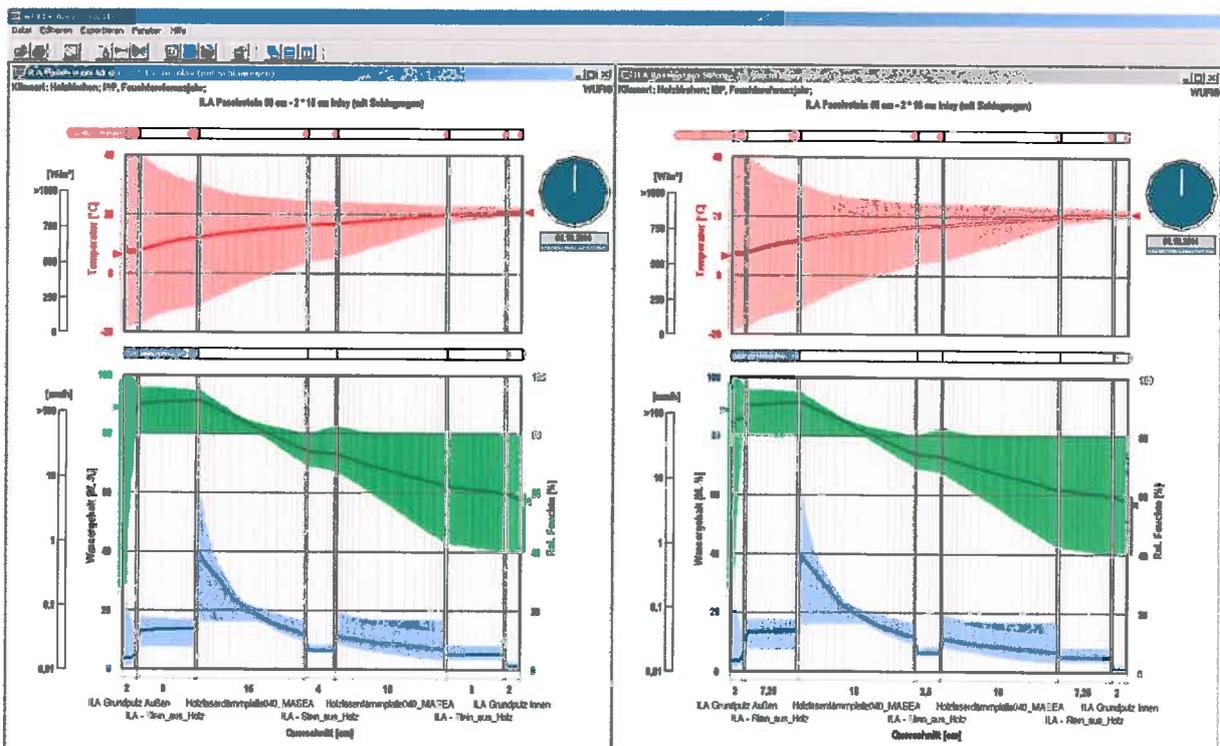


Bild 12 Temperatur- und Feuchteverlauf; ILA-Holstein, Inlay 2 * 15 cm bzw. 2 * 16 cm (mit Schlagregen)

Anhang C Ergebnisse der hygrothermischen Bauteilsimulation (2D)

Auf den nachstehenden Seiten sind die Verläufe der folgenden Parameter dargestellt:

- Temperatur und Relative Luftfeuchte in der Innenecke (Oberfläche Bauteil – Punkt 1) bei
 - Inlay mit WLG 040
 - Inlay mit WLG 040 (mit Schlagregen)
 - Inlay mit WLG 035
 - Inlay mit WLG 035 (mit Schlagregen)
- Wassergehalt des ILA-Holzsteins in verschiedenen Punkten 2 bis 5 (siehe unten) bei
 - Inlay mit WLG 040
 - Inlay mit WLG 040 (mit Schlagregen)
 - Inlay mit WLG 035
 - Inlay mit WLG 035 (mit Schlagregen)

Die Punkte, für die der Wassergehalt ermittelt wurde, sind in Bild 13 dargestellt.

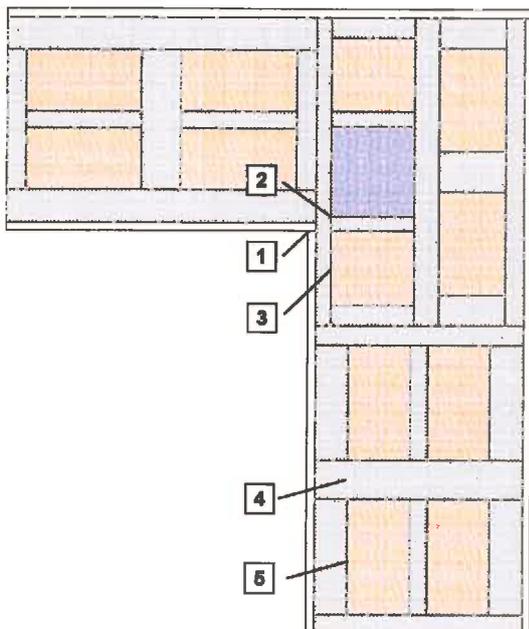
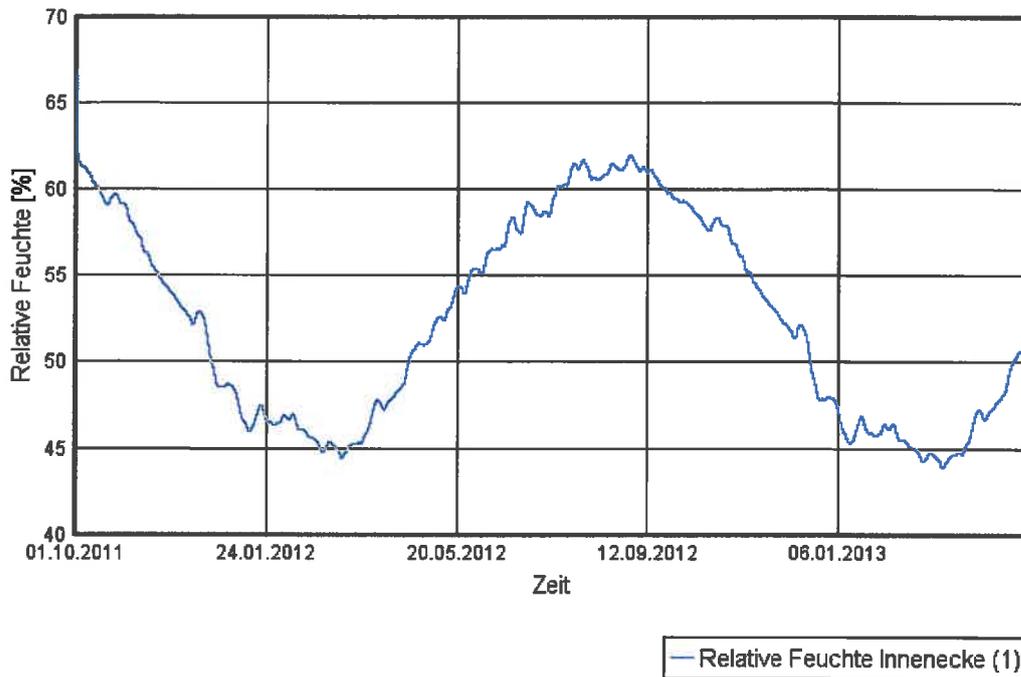
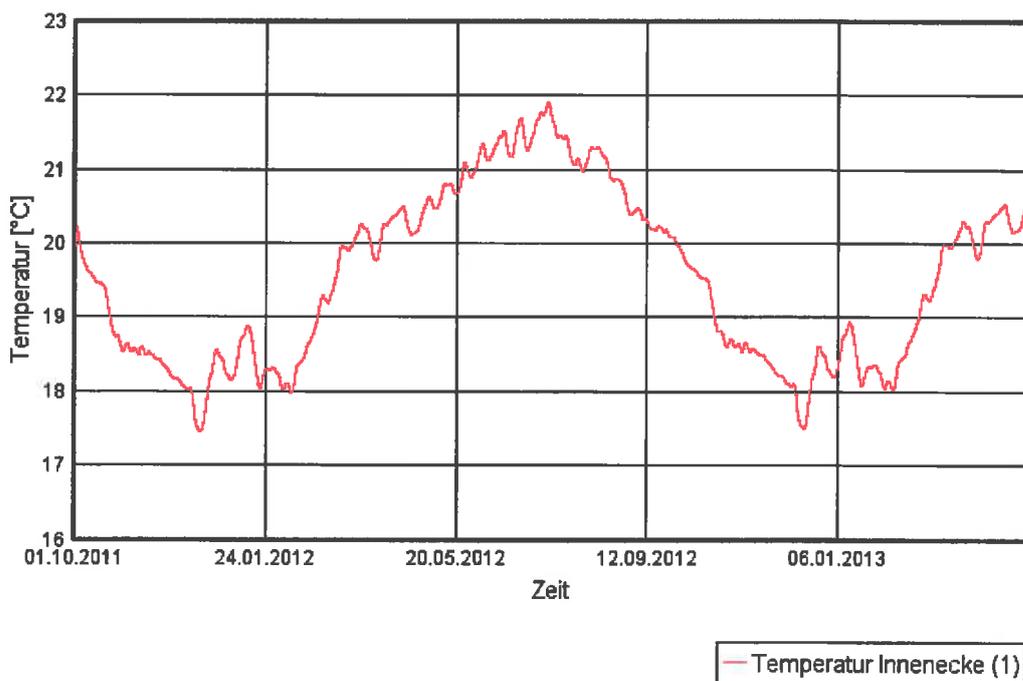


Bild 13 Außenecke, Generiertes Modell WUFI-2D

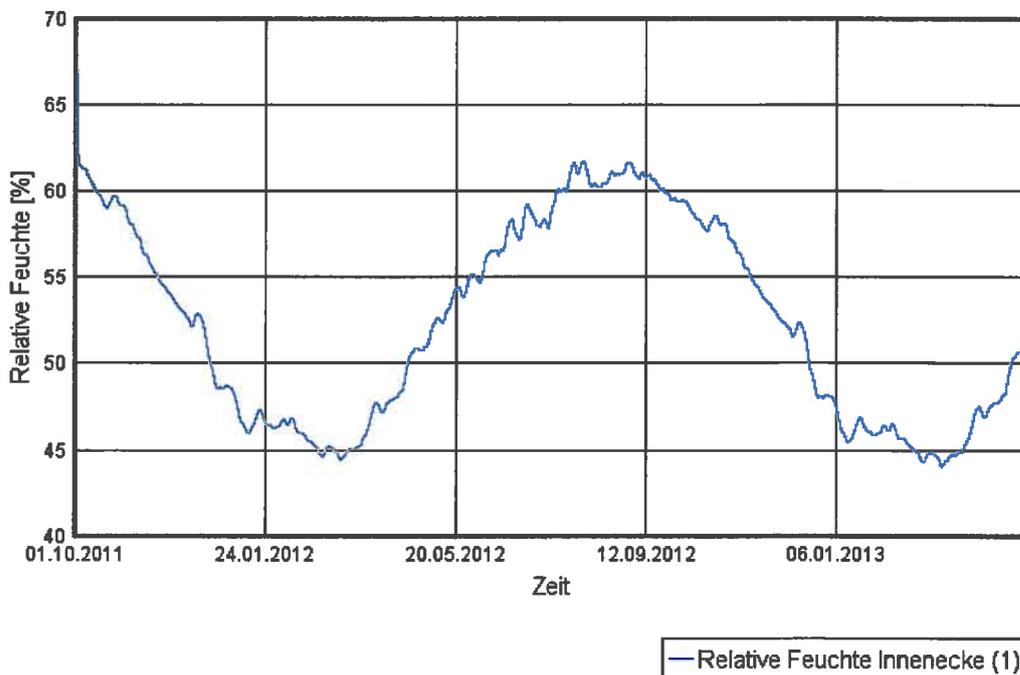
ILA - Stein aus Holz WLG040



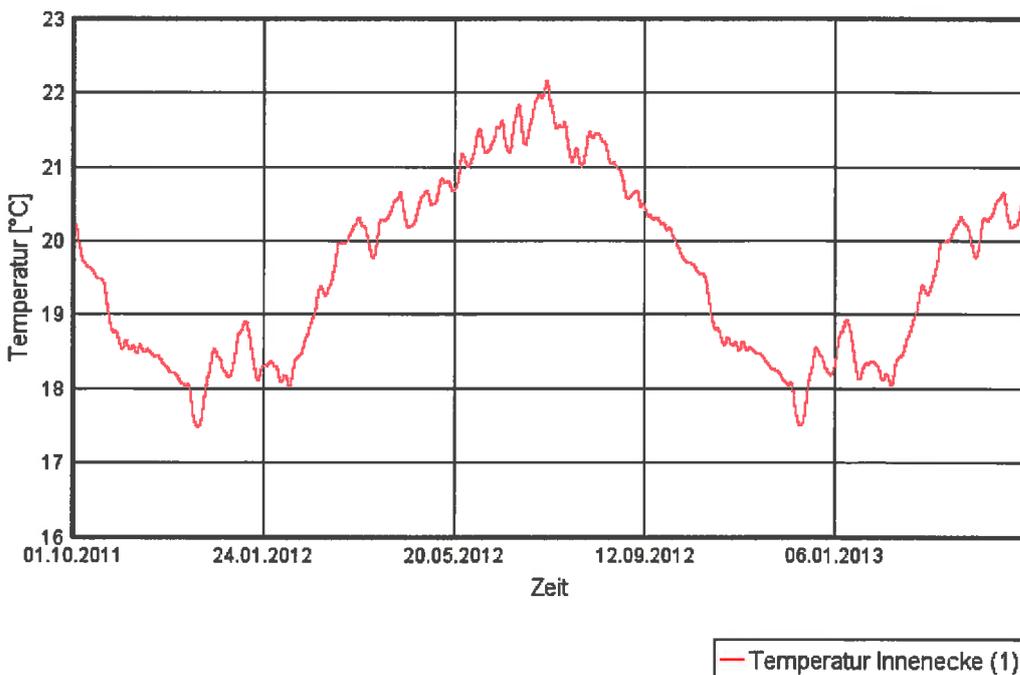
ILA -Stein aus Holz WLG040



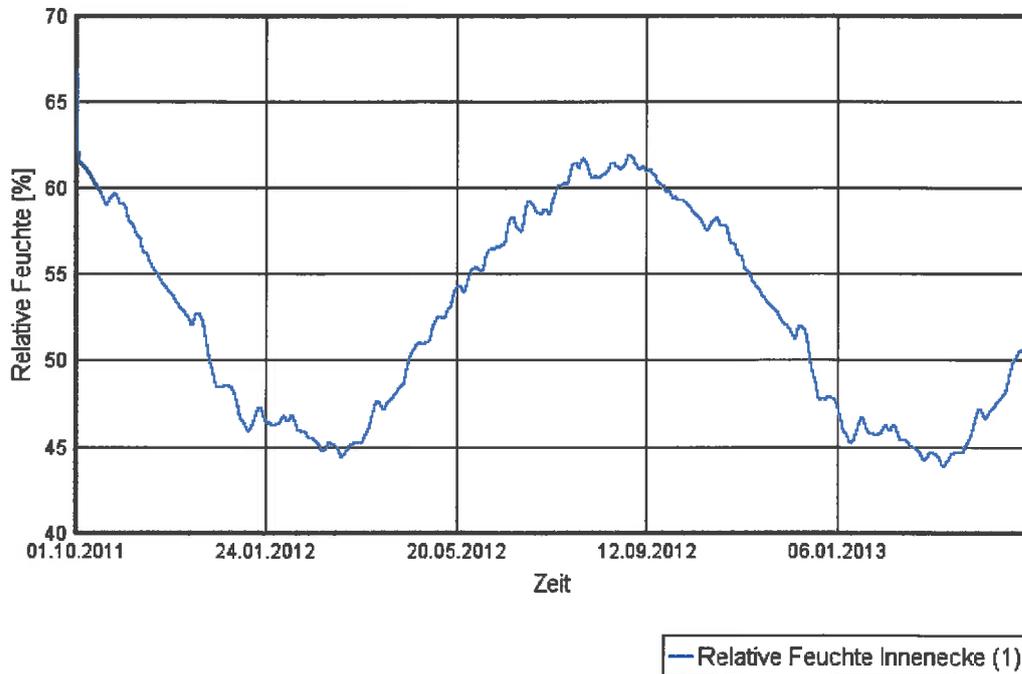
ILA - Stein aus Holz WLG040 mit Schlagregen



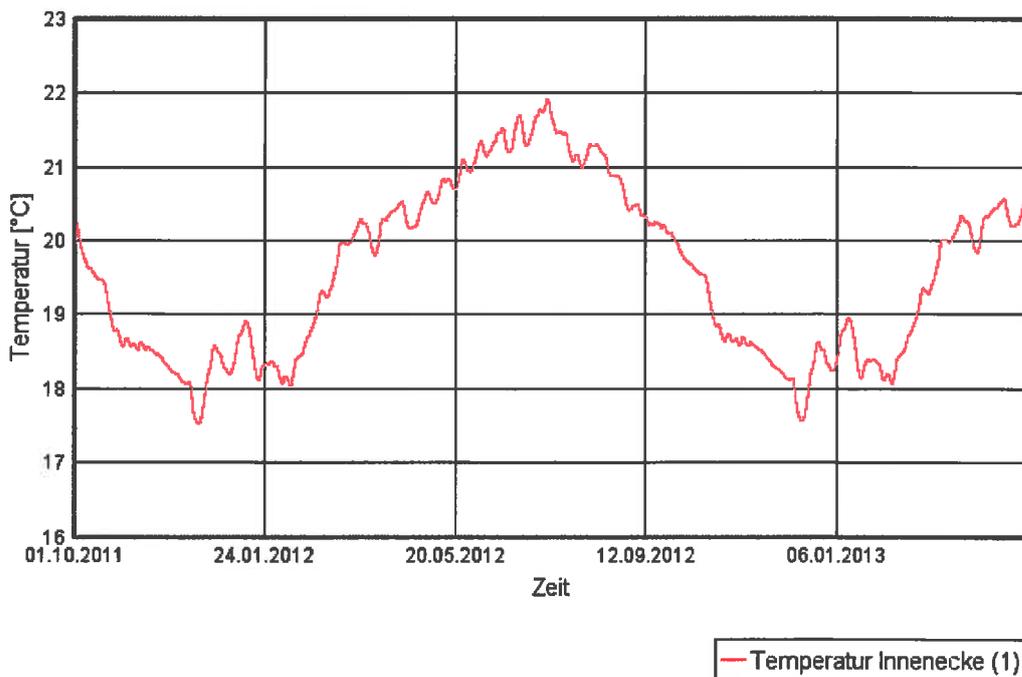
ILA - Stein aus Holz WLG040 mit Schlagregen



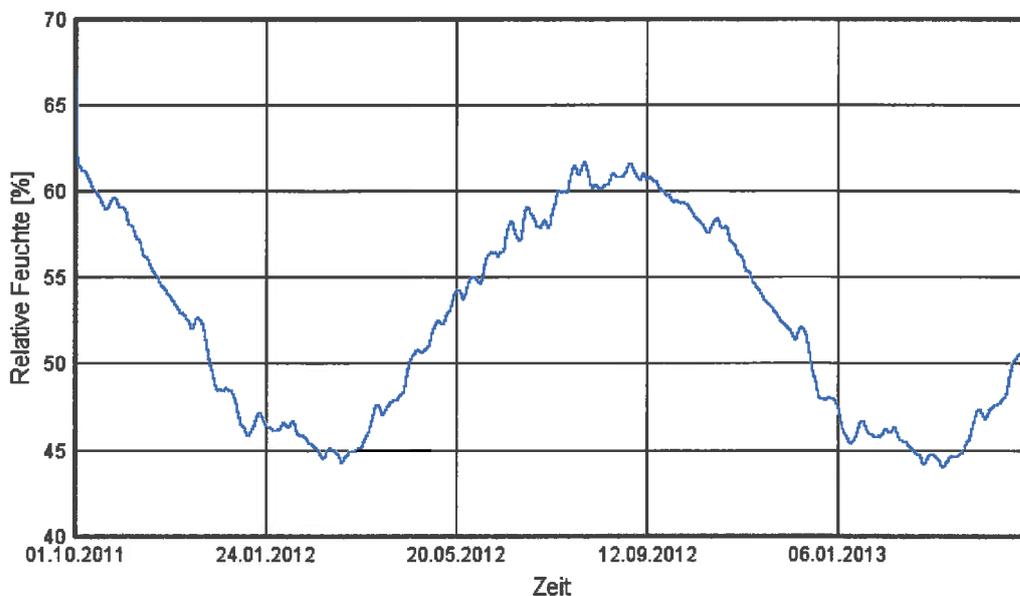
ILA -Stein aus Holz WLG035



ILA -Stein aus Holz WLG035

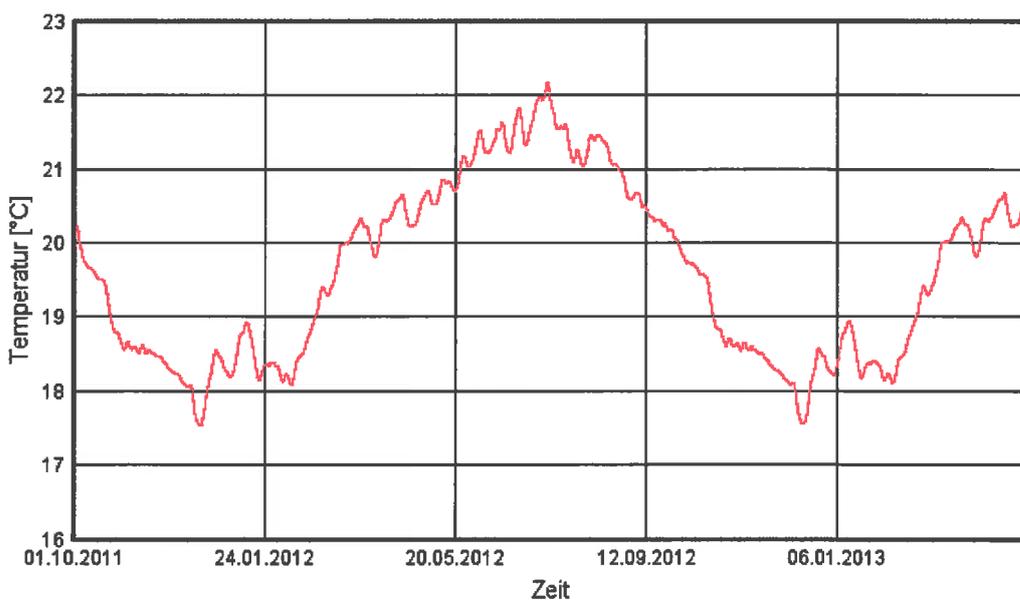


ILA - Stein aus Holz WLG035 mit Schlagregen



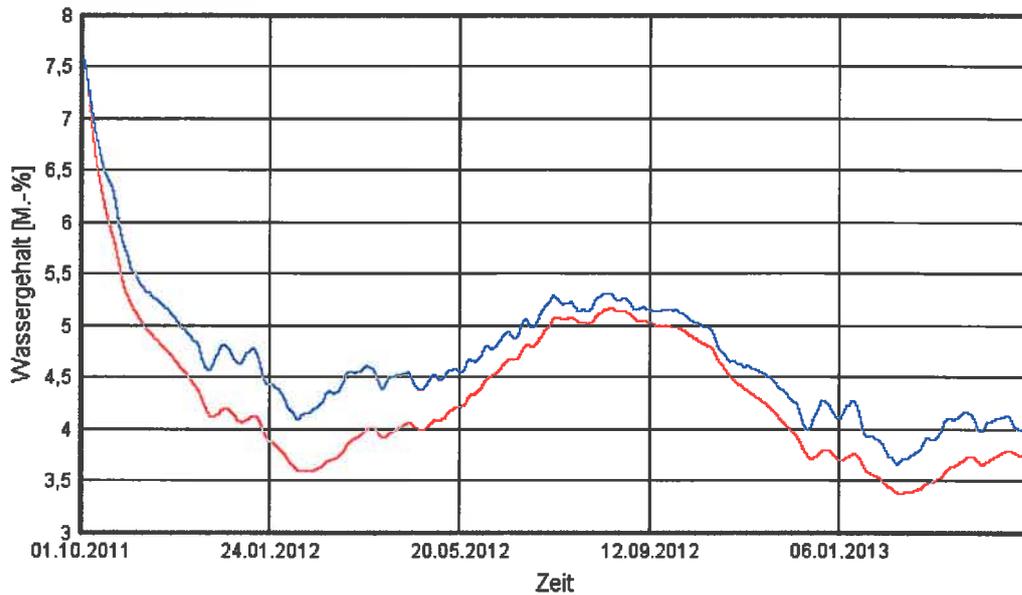
— Relative Feuchte Innenecke (1)

ILA - Stein aus Holz WLG035 mit Schlagregen



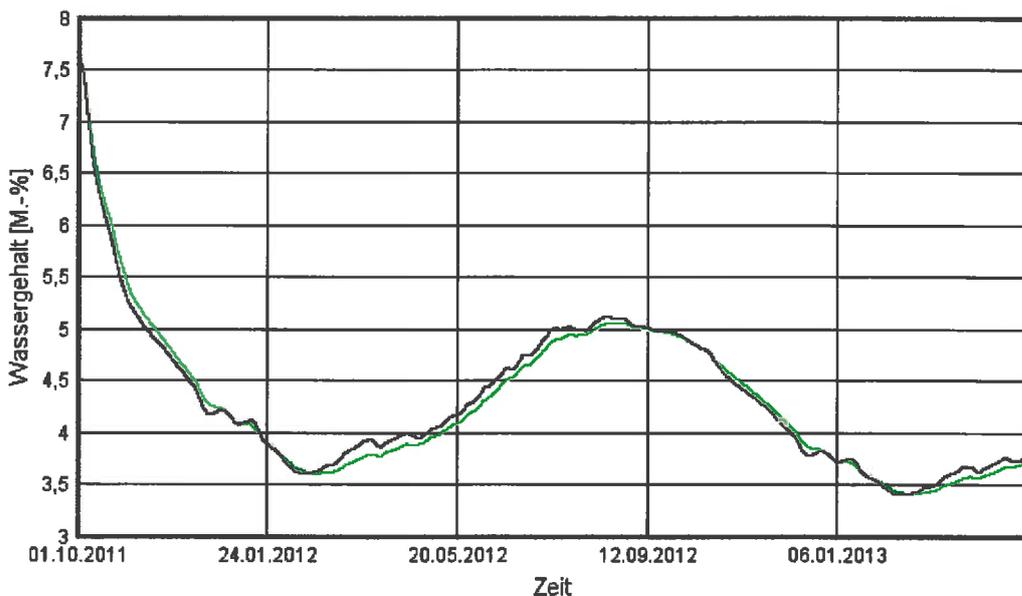
— Temperatur Innenecke (1)

ILA - Stein aus Holz WLG040



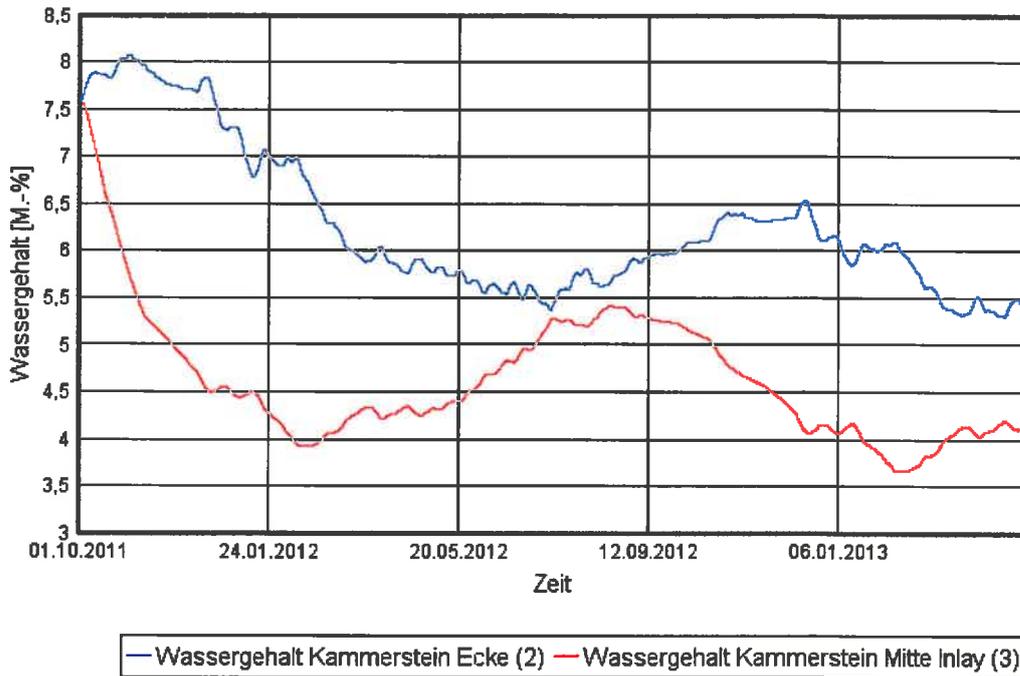
— Wassergehalt Kammerstein Ecke (2) — Wassergehalt Kammerstein Mitte Inlay (3)

ILA - Stein aus Holz WLG040

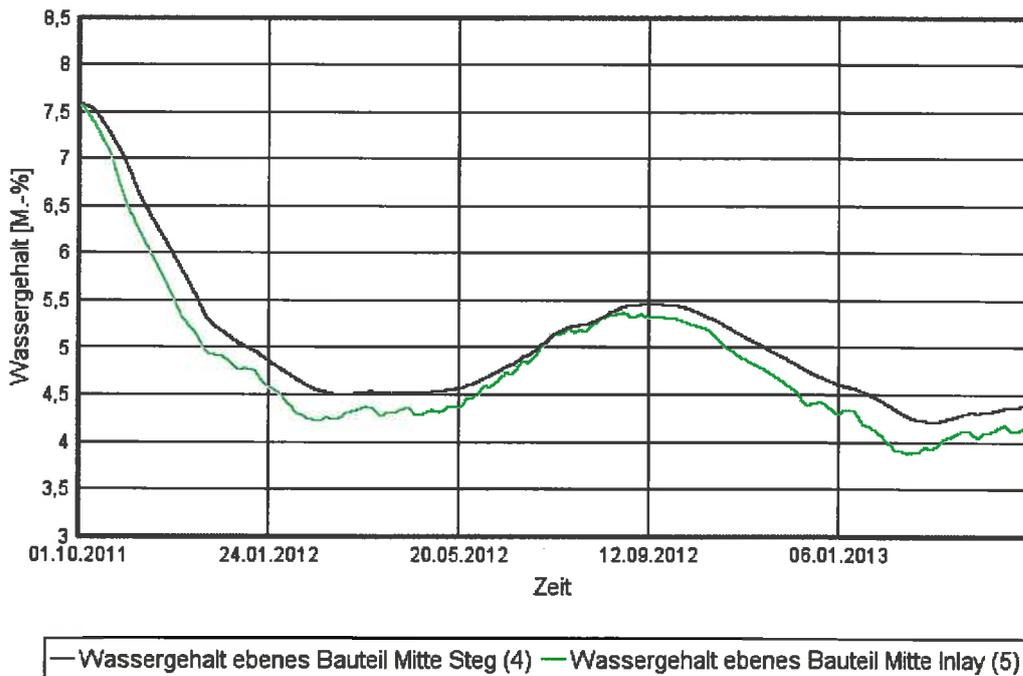


— Wassergehalt ebenes Bauteil Mitte Steg (4) — Wassergehalt ebenes Bauteil Mitte Inlay (5)

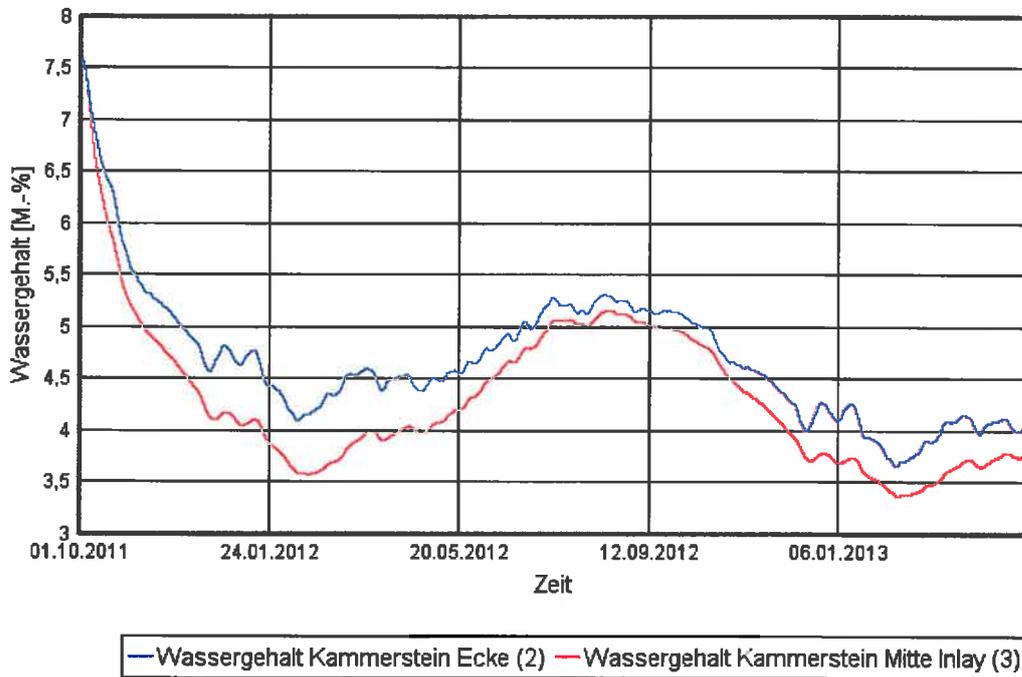
ILA - Stein aus Holz WLG040 mit Schlagregen



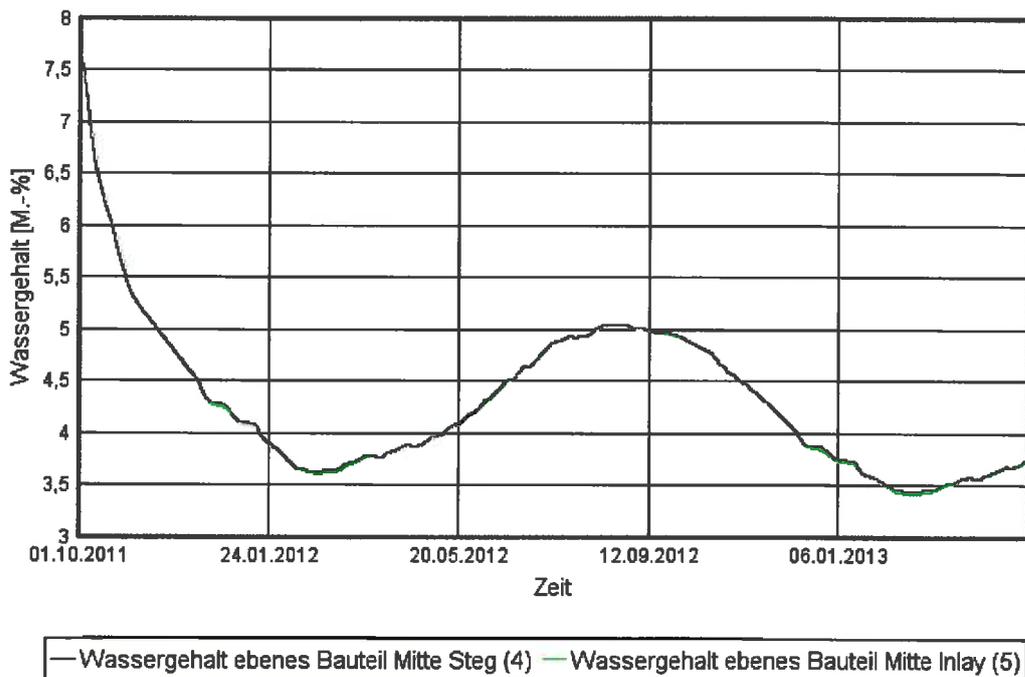
ILA - Stein aus Holz WLG040 mit Schlagregen



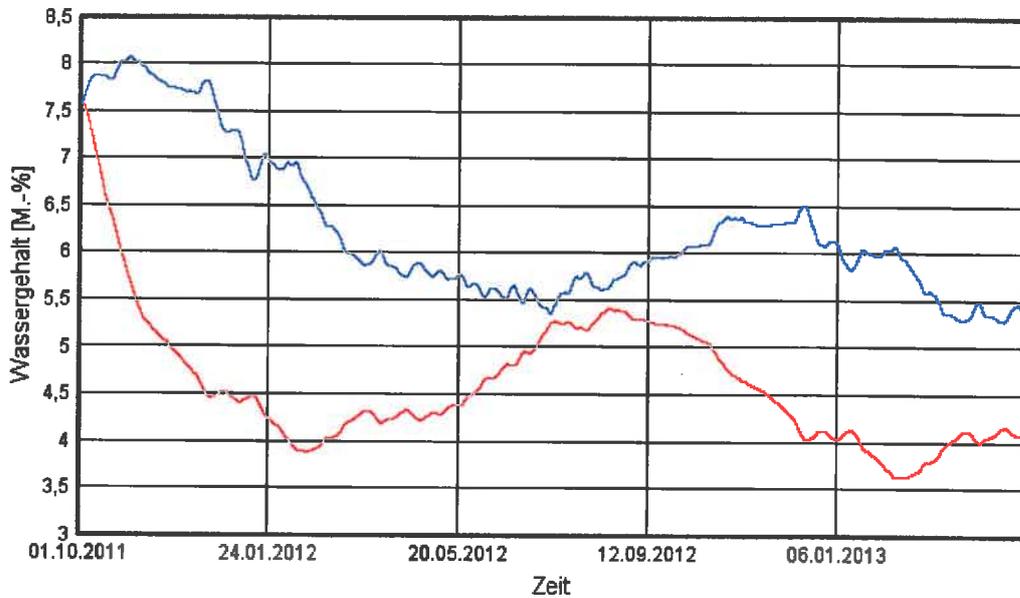
ILA - Stein aus Holz WLG035



ILA - Stein aus Holz WLG035

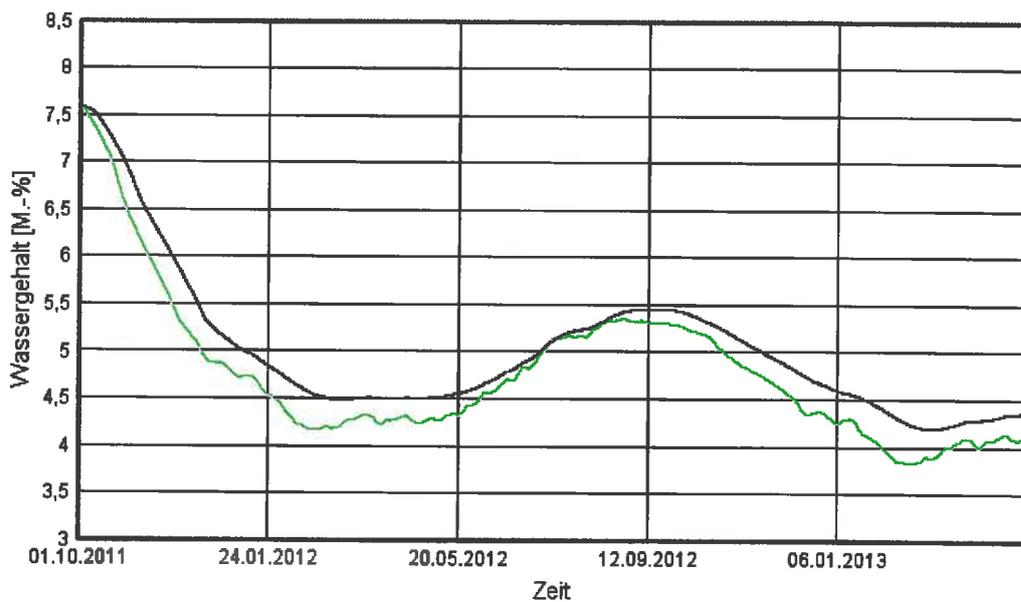


ILA - Stein aus Holz WLG035 mit Schlagregen



— Wassergehalt Kammerstein Ecke (2) — Wassergehalt Kammerstein Mitte Inlay (3)

ILA - Stein aus Holz WLG035 mit Schlagregen



— Wassergehalt ebenes Bauteil Mitte Steg (4) — Wassergehalt ebenes Bauteil Mitte Inlay (5)