

Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin

Technischer Bericht

Luisa Sontag, Andreas Nicolai, Stefan Vogelsang

Institut für Bauklimatik
Technische Universität Dresden
D-01062 Dresden, Germany
luisa.sontag@tu-dresden.de

Zusammenfassung

Das Simulationsprogramm *Delphin* ermöglicht die Berechnung des gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Stofftransports in kapillarporösen Materialien. Die Simulation verwendet ein numerisches Lösungsverfahren für die Differentialgleichungen welche die Transportprozesse beschreiben. Zur Kontrolle der numerischen Fehler sowie der korrekten Implementierung der physikalischen Gleichungen werden Validierungsrechnungen durchgeführt. Dafür werden vordefinierte Testfälle eingegeben, gerechnet und mit Referenzlösungen bzw. den Ergebnissen anderer Simulationsprogramme verglichen.

In diesem Artikel werden die Ergebnisse der Validierung der *Delphin* Versionen 5.6, 5.8, 6.0 und 6.1 zusammengefasst. Es wurden folgende Testfälle gerechnet: HAMSTAD Benchmarks 1 bis 5, DIN EN ISO 10211 Fall 1 und 2, DIN EN 15026 und der Aufsaug-Trocknungs-Test. Die Validierung von *Delphin* erfolgte hinsichtlich des Wärme-, Feuchte- und Lufttransports bei ein- und zweidimensionalen Problemstellungen. Alle Programmversionen erfüllen die Anforderungen aller Testfälle.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Fehlerquellen bei numerischen Lösungsverfahren	2
1.2	Validierungssystematik	3
1.3	Beschreibung der Testfälle	4
2	Materialgenerierung	5
2.1	Konstante Speichereigenschaften	5
2.2	Konstante Transporteigenschaften	6
2.3	Feuchtespeicherung	6
2.4	Feuchtetransport	7
2.5	Wärmeleitung	8
2.6	Materialdatei	8
3	HAMSTAD Benchmark 1	10
3.1	Materialdaten	10
3.2	Klimadaten und Randbedingungen	10
3.3	Validierungsrechnung	12
4	HAMSTAD Benchmark 2	20
4.1	Materialdaten	20
4.2	Klimadaten und Randbedingungen	21
4.3	Validierungsrechnung	22
5	HAMSTAD Benchmark 3	27
5.1	Materialdaten	27
5.2	Klimadaten und Randbedingungen	28
5.3	Validierungsrechnung	30

6	HAMSTAD Benchmark 4	37
6.1	Materialdaten	37
6.2	Klimadaten und Randbedingungen	37
6.3	Validierungsrechnung	40
7	HAMSTAD Benchmark 5	50
7.1	Materialdaten	50
7.2	Klimadaten und Randbedingungen	50
7.3	Validierungsrechnung	51
8	DIN EN ISO 10211 Fall 1	55
8.1	Materialdaten	55
8.2	Klimadaten und Randbedingungen	55
8.3	Validierungsrechnung	56
9	DIN EN ISO 10211 Fall 2	62
9.1	Materialdaten	62
9.2	Klimadaten und Randbedingungen	62
9.3	Validierungsrechnung	63
10	DIN EN 15026	68
10.1	Materialdaten	68
10.2	Klimadaten und Randbedingungen	68
10.3	Validierungsrechnung	69
11	Aufsaug-Trocknungs-Testfall (Wetting&Drying)	74
11.1	Materialdaten	74
11.2	Klimadaten und Randbedingungen	74
11.3	Validierungsrechnung	75
12	Zusammenfassung	79

1 Einleitung

Mit dem numerischen Simulationsprogramm *Delphin* können gekoppelte Wärme-, Feuchte-, Stoff- und Lufttransportprozesse in kapillarporösen Medien modelliert und berechnet werden. Unter anderem ist damit eine Beurteilung von Konstruktionen und Konstruktionsdetails hinsichtlich bauphysikalischer Aspekte, wie z. B. dem Feuchteschutz möglich. *Delphin* kann bisher sowohl eindimensionale als auch zweidimensionale Geometrien abbilden. Berechnungen von dreidimensionalen Fällen wird in der Version 6.1 realisiert. Das Simulationsprogramm berechnet instationäre Prozesse und berücksichtigt dynamische Klima- und Randbedingungen.

1.1 Fehlerquellen bei numerischen Lösungsverfahren

Verschiedene numerische Simulationsprogramme für den gekoppelten Masse- und Energietransport können auch bei gleicher Problemstellung unterschiedliche Ergebnisse liefern. Folgende Gründe sind dafür denkbar:

1. unterschiedliche Modellgleichungen (z. B. Wahl der treibenden Potentiale und Transportgleichungen),
2. Berücksichtigung verschiedener physikalischer Effekte (z. B. Luftströmung, Feuchteabhängigkeiten von Materialfunktionen, etc.),
3. andere Parametrisierungsansätze (analytische Funktionen, Datentabellen),
4. Genauigkeitsunterschiede bei der Parametrisierung,
5. verschiedene numerische Lösungsfahren,
6. Gittergenauigkeit bei der Raumdiskretisierung,
7. Zeitschrittgröße und -adaptionsverfahren (bei variablen Zeitschrittverfahren), und
8. Implementierungsfehler.

Um Abweichungen aus den Punkten 1 bis 4 zu minimieren, enthalten die Formulierungen von Validierungstestfällen üblicherweise konkrete Definitionen der physikalischen Zusammenhänge und physikalischen Effekte, welche im Testfall zu berücksichtigen sind. Weiterhin werden die Eingangsparameter der Simulation exakt definiert. Beherrscht ein Simulationsmodell geforderte Funktionalitäten nicht oder bildet diese in abweichender Form ab, führt dieses zu Ergebnisunterschieden bzw. der Testfall kann gar nicht gerechnet werden.

Die verbleibenden Gründe für Ergebnisunterschiede können dem numerischen Verfahren und der Solverimplementierung zugeordnet werden können. Nach Abgleich der Eingangsdaten sowie geeigneter Wahl der numerischen Solverparameter mit Einfluss auf Ergebnisgenauigkeit sollten Simulationsprogramme sehr ähnliche Ergebnisse liefern, andernfalls ist auf eine fehlerhafte Implementierung zu schließen.

Wichtige Parameter zur Reduzierung der numerischen Fehler sind die Zeitschrittgrößen und das Berechnungsgitter, welches zur Raumdiskretisierung der partiellen Differentialgleichungen verwendet wird.

Bei Verfahren mit fester Zeitschrittweite führt eine Reduktion der Schrittgröße zu einer Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit. Bei Verfahren mit dynamischer Zeitschrittanpassung müssen die Toleranzen bzw. Kriterien für die Wahl des Zeitschrittes entsprechend strikt gesetzt werden. *Delphin* verwendet variable Zeitschritte, welche durch eine lokale Integrationsfehlerprüfung basierend auf Ergebnistoleranzen gewählt werden. Die gewünschte Ergebnisgenauigkeit wird als Kombination aus relativen und absoluten Toleranzen festgelegt. So bedeutet z. B. eine relative Toleranz von 10^{-5} bei der Feuchtebilanzgleichung eine Berechnung von Feuchtegehalten mit einer Genauigkeit von 5 signifikanten Stellen.

Bei Berechnungsgittern beeinflussen sowohl Kantenlänge einer Zelle, sowie - bei unstrukturierten Gittern - die Form der Gitterzellen (z. B. Kantenlängenverhältnis, Aspektverhältnis, Mindestwinkel, etc.) die Ergebnisgenauigkeit. In *Delphin* wird ein orthogonales Gitter verwendet und Gitterzellen sind immer Rechtecke. Für die Berechnungsgenauigkeit sind daher die Kantenlängen ausschlaggebend. Eine Verkleinerung der Gitterzellen führt im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Ergebnisgenauigkeit, jedoch können nicht alle aus dem Diskretisierungsverfahren resultierenden Fehler eliminiert werden. Im Rahmen einer Gittersensitivitätsstudie wird das Berechnungsgitter soweit verfeinert, bis sich Ergebnisse nicht mehr signifikant ändern.

Werden Simulationsprogramme miteinander verglichen, die sowohl die physikalischen Modelle korrekt abbilden, geeignete Solverparameter verwenden, und korrekt implementiert sind, können dennoch kleinere Abweichungen in den Ergebnisgrößen auftreten. Dieses liegt zumeist an Rundungsfehlern und der verfügbaren Genauigkeit von Maschinenzahlen. Daher muss bei der Bewertung der Ergebnisse mit einem Akzeptanzband gearbeitet werden. Liegen die Ergebnisse der Simulation innerhalb dieses Bandes, gilt das Simulationsmodell als validiert.

Bei Veränderung und Erweiterung von Simulationsmodellen besteht immer die Gefahr, dass unbeabsichtigt Implementierungsfehler auftreten. Daher ist eine kontinuierliche Validierung aller Modell- und Solverversionen notwendig. Im Hinblick auf das Simulationsprogramm *Delphin* werden vier unterschiedliche Programmversionen getestet:

Delphin 5.6 Bereits 2003 veröffentlicht, letzte Aktualisierung im Sommer 2013

Delphin 5.8 Aktuelle Version des Simulationsprogramms, veröffentlicht Winter 2013/2014

Delphin 6.0 Forschungs- und Entwicklungsversion des Instituts für Bauklimatik, 1D/2D

Delphin 6.1 3D-Erweiterung der Version 6.0 (beinhaltet größere Umstrukturierung)

1.2 Validierungssystematik

Um die oben genannten möglichen Fehlerquellen zu minimieren, wird bei allen Validierungstestfällen wie folgt vorgegangen:

- Zunächst werden Projektdateien für die unterschiedlichen Solverversionen entsprechend der Testspezifikationen erstellt.
- Die Solvertoleranzen werden auf einen moderaten Wert (z. B. 10^{-5}) gesetzt.
- Es werden gleichförmige Berechnungsgitter bei 1D Simulationen definiert, und variable Gitterbreiten bei 2D Simulationen verwendet.
- Die Berechnungsergebnisse werden mit dem Akzeptanzband bzw. bei analytisch auswertbaren Testfällen mit Referenzergebnissen verglichen.

- Bei zu großen Abweichungen wird das Berechnungsgitter verfeinert und gegebenenfalls die Solvereinstellungen angepasst.

Für jeden Testfall sind die Solverparameter angegeben, mit denen die Validierung erfolgreich durchgeführt werden konnte.

Die Berechnung des Flüssigwassertransports kann in *Delphin* mit Hilfe des Kirchhoff-Potentials ψ_l oder der Flüssigwasserleitfähigkeit K_l erfolgen. Die Implementierungen beider Mittelungsverfahren sollen getestet werden, weswegen für alle hygrothermischen Testfälle jeweils Varianten mit K_l und mit ψ_l gerechnet werden.

1.3 Beschreibung der Testfälle

Es werden die in Tabelle 1 abgebildeten Testfälle zur Validierung des Wärme-, Feuchte- und Lufttransportes gerechnet. Bei den Testfällen handelt es sich sowohl um stationäre als auch instationäre Problemstellungen, sowie ein- und zweidimensionale Simulationen.

	Energiebilanz	Feuchtebilanz	Luftströmung	Schlagregen	Dimension	Stationär
HAMSTAD Benchmark 1	x	x			1D	
HAMSTAD Benchmark 2	x	x			1D	x
HAMSTAD Benchmark 3	x	x	x		1D	
HAMSTAD Benchmark 4	x	x		x	1D	
HAMSTAD Benchmark 5	x	x			1D	x
DIN EN 15026	x	x			1D	x
DIN EN ISO 10211 Fall 1	x				2D	x
DIN EN ISO 10211 Fall 2	x				2D	x
Aufsaug-Trocknungs-Test	x	x		x	1D	

Tabelle 1: Übersicht Validierungstestfälle

1.3.1 HAMSTAD

Das HAMSTAD Projekt (Heat, Air and Moisture STAnDardization) aus dem Jahr 2002 beschäftigte sich mit der numerischen Simulation von Wärme-, Feuchte- und Lufttransportmechanismen in Baustoffen. In diesem Projekt sollten die Voraussetzungen geschaffen werden, um unterschiedliche Simulationsprogramme vergleichbar zu machen. Dafür wurde zunächst das physikalische Modell und die dazugehörige mathematische Umsetzung detailliert beschrieben [Hag02]. Es werden dabei sowohl die Energie- und Feuchtemassenbilanz und die Transportgleichungen für Wärme, Feuchte und Luft erläutert, als auch mögliche Anfangs- und Randbedingungen beschrieben. Damit konnten die oben aufgeführten modellbezogenen und parametrisierungsabhängigen Abweichungen ausgeschlossen werden.

Der Hauptbestandteil des HAMSTAD sind jedoch die fünf Benchmarks zur Validierung [Ham02]. Für jeden Testfall sind die benötigten Materialdaten der Konstruktion, sowie die Klima-, Rand- und Anfangsbedingungen gegeben. Die eigenen Simulationsergebnisse können anschließend mit den gegebenen numerischen Lösungen anderer Programme verglichen werden. Bei den Testfällen handelt es sich ausschließlich um eindimensionale Simulationen, wobei stationäre als auch instationäre Prozesse berechnet werden.

1.3.2 DIN EN ISO 10211

Die DIN EN ISO 10211 (Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen) beschäftigt sich mit der numerischen Berechnung von Wärmebrücken. Wärmebrücken haben zur Folge, dass im Gegensatz zu wärmebrückenfreien Bauteilen sich der Wärmeverlust und das Risiko der Tauwasserbildung erhöht. Die Norm erläutert eine Vorgehensweise zur numerischen Berechnung des Wärmestroms und der Oberflächentemperatur anhand von geometrischen zwei- und dreidimensionalen Modellen von Wärmebrücken.

Es handelt sich hierbei um eine rein thermische Betrachtung. Zur Validierung des Berechnungsverfahrens sind im Anhang A vier Prüferferenzfälle gegeben. Bei den ersten beiden Testfällen handelt es sich um zweidimensionale Simulationen. Die Berechnungen aus Fall 3 und 4 dagegen sind dreidimensional und werden deshalb hier zunächst nicht betrachtet. In allen Fällen werden konstante Klimabedingungen angesetzt. [DIN08]

1.3.3 DIN EN 15026

Ein weiterer Prüffall ist in der DIN EN 15026 (Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation) enthalten. Die Norm behandelt die praktische Anwendung von eindimensionalen Simulationen für den instationären Wärme- und Feuchtetransport. Neben der Beschreibung des physikalischen Modells wird auf die Baustoffeigenschaften und die Anfangs- und Randbedingungen eingegangen. Das Vergleichsbeispiel in Anhang A soll sicherstellen, dass die zu prüfende Software die grundlegenden Anforderungen für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport erfüllt und die Ergebnisse innerhalb der festgelegten Grenzen liegen. Es handelt sich hierbei um ein eindimensionales Beispiel mit konstanten Klimabedingungen. Das Prüfergebnis basiert auf einer analytischen Lösung. [DIN07]

1.3.4 Aufsaug-Trocknungs-Test (Wetting&Drying)

Von den Autoren wurde ein spezieller eindimensionaler Testfall definiert, welcher vor allem die Modellgenauigkeit bei Beschreibung von kapillarem Feuchtetransport im mittel- und niederfeuchten Bereich testet. Untersucht wird hierbei das hygrothermische Verhalten infolge einer zeitlich begrenzten einseitigen Wasseraufnahme in die Konstruktion. In diesem Testfall hat das Berechnungsgitter und die Zeitschrittgröße des Lösungsverfahrens besonders großen Einfluss. Die Berechnungsergebnisse der verschiedenen *Delphin* Programmversionen werden untereinander verglichen.

2 Materialgenerierung

Um die Testfälle zu rechnen, müssen zunächst *Delphin* Materialdateien angelegt werden. Die in den Benchmarks angegebenen Daten müssen dafür in eine Materialdatei überführt werden. Die Struktur einer solchen *Delphin* Materialdatei für alle *Delphin* Versionen ab 5.8 ist in [VFN13] ausführlich beschrieben. Besonderheiten in der Materialgenerierung werden bei jeweiligen Testfällen separat erläutert.

Zur Veranschaulichung soll anhand eines Beispiels die Generierung einer *Delphin* Materialdatei erläutert werden. Als Beispiel dient das Material A aus dem HAMSTAD Benchmark 1 [Ham02].

2.1 Konstante Speichereigenschaften

Zunächst werden die konstanten Speichereigenschaften des Materials angegeben. Diese sind aus dem Benchmark direkt abzulesen, bzw. mit Hilfe von Funktionen auszurechnen.

Symbol	Beschreibung	Wert
ρ	Dichte des Materials	2280 kg/m ³
c_p	Spezifische Wärmekapazität des Materials	800 J/kgK
θ_{por}	Offene Porosität	0.146 m ³ /m ³
θ_{eff}	Effektiver Feuchtegehalt bei Sättigung	0.146 m ³ /m ³
θ_{80}	Feuchtegehalt bei relativer Luftfeuchtigkeit von 80 %	0.0792 m ³ /m ³

Tabelle 2: Konstante Speichereigenschaften

Die Dichte des Materials ρ , sowie die spezifische Wärmekapazität c_p sind als konstante Werte angegeben. Die offene Porosität θ_{por} ist der effektiven Sättigung θ_{eff} gleich zusetzten und kann aus der Saugspannungskurve abgelesen werden (siehe Gleichung 1). Der Feuchtegehalt bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % wird aus der Sorptionsisotherme ermittelt (siehe Gleichung 4). Innerhalb des *Delphin* Transportmodells werden θ_{por} und θ_{80} nicht verwendet, sondern gelten als informative Parameter.

2.2 Konstante Transporteigenschaften

Als Nächstes werden die konstanten Transporteigenschaften für den Wärme- und Feuchtetransport angegeben. Da in diesem Benchmark kein Lufttransport stattfindet, müssen hierfür auch keine Transporteigenschaften angegeben werden.

Symbol	Beschreibung	Wert
λ_{dry}	Wärmeleitfähigkeit für das trockene Material	1.5 W/mK
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	200
$K_{l,eff}$	Flüssigwasserleitfähigkeit bei Sättigung	$1.6476 \cdot 10^{-15}$ s

Tabelle 3: Konstante Transporteigenschaften

Die Wärmeleitfähigkeit λ_{dry} des trockenen Materials ist aus der Gleichung (10) für die Wärmeleitung und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ aus der Gleichung (5) für die Wasserdampfdiffusion abzulesen. Für den Flüssigwassertransport ist die Flüssigwasserleitfähigkeit $K_{l,eff}$ aus der Gleichung (8) bei effektiven Feuchtegehalt zu ermitteln. *Delphin* verwendet für die Berechnung der Flüssigwasserleitung die feuchteabhängige Flüssigwasserleitfähigkeit, $K_{l,eff}$ ist daher nur ein informativer Parameter.

2.3 Feuchtespeicherung

Im HAMSTAD Benchmark werden temperatur- bzw. feuchteabhängige Materialeigenschaften mit Hilfe einer Funktion angegeben. Damit diese von *Delphin* gelesen werden können, muss eine analytisch gegebene Funktion in eine Datentabelle überführt werden. Innerhalb von *Delphin* werden Funktionswerte aus dieser Datentabelle mittels linearer Interpolation berechnet. Daher ist eine hohe Anzahl von Stützstellen empfehlenswert, um die Originalfunktion bestmöglich abzubilden. Die abgelegten Datenwerte müssen bei der Saugspannungskurve und bei ihrer Umkehrfunktion streng monoton verlaufen.

2.3.1 Saugspannungskurve

Die Saugspannungskurve $\theta_l(pC)$ beschreibt den im Material vorhandenen Feuchtegehalt θ_l in Abhängigkeit vom Kapillardruck p_c (in HAMSTAD mit positivem Vorzeichen als P_{suc} bezeichnet). Es ist darauf zu achten, dass in den HAMSTAD Benchmarks eine Feuchtemassendichte w verwendet wird, während *Delphin* den Feuchtegehalt θ_l nutzt. Im HAMSTAD Benchmark 1 ist Gleichung (1) für die Saugspannungskurve gegeben.

$$\theta_l = \frac{0.146}{(1 + (8 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{pC})^{1.6})^{0.375}} \quad (1)$$

θ_l	: Feuchtegehalt [m ³ /m ³]	
w	: Feuchtemassendichte [kg/m ³]	= $\rho_l \cdot \theta_l$
ρ_l	: Dichte von Flüssigwasser	= 1000 kg/m ³
θ_{eff}	: Effektive Feuchtegehalt des Materials (siehe Tabelle 2)	= 0.146 kg/m ³
p_c	: Kapillardruck [Pa]	
pC	: Dekadischer Logarithmus des Kapillardrucks [\log_{10} (Pa)]	= $\log_{10}(-p_c)$

Die Funktion ist nun für verschiedene Kapillardrücke pC auszuwerten. Der Kapillardruck wird hierbei mit negativen Wert und als Logarithmus angegeben. Ist das Material trocken, d. h. der Feuchtegehalt $\theta_l = 0$ m³/m³ ist der Kapillardruck am kleinsten. Bei Sättigung des Materials $\theta_l = \theta_{eff}$ ist der Kapillardruck $p_c = 0$ Pa, d. h. es kann kein weiteres Wasser in das Material eindringen.

2.3.2 Umkehrfunktion der Saugspannungskurve

Die Umkehrfunktion $pC(\theta_l)$ ergibt sich durch das Umstellen der Saugspannungskurve nach dem logarithmischen Kapillardruck pC .

$$pC = \log \left(0.125 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{0.146}{\theta_l} \right)^{\frac{1}{0.375}} - 1 \right)^{0.625} \quad (2)$$

Die Umkehrfunktion der Saugspannungskurve ist für verschiedene Feuchtegehalte θ_l auszuwerten und in der Materialdatei abzulegen

2.3.3 Sorptionsisotherme

Oftmals wird die Sorptionsisotherme $\theta_l(\varphi)$ in der Beschreibung der Simulationstestfälle mit angegeben. *Delphin* kann diese einlesen und auch damit rechnen, jedoch sollte möglichst die Darstellung als Saugspannungskurve verwendet werden. Eine Umrechnung erfolgt mit Hilfe der Kelvin-Gleichung (Gleichung 3). Die Sorptionsisotherme liefert den Feuchtegehalt θ_l in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit φ .

$$p_c = \rho_l \cdot R_v \cdot T \cdot \ln(\varphi) \quad (3)$$

R_v	: Gaskonstante für Wasserdampf	= $\frac{R}{M_w} = 462 \text{ J/kgK}$
R	: Universelle Gaskonstante	= 8.314 J/molK
M_w	: Molare Masse von Wasserdampf	= 0.018 kg/mol
φ	: Relative Luftfeuchtigkeit [%]	
T_{ref}	: Referenztemperatur	= 293.15 K

Die Sorptionsisotherme $\theta_l(\varphi)$ für den HAMSTAD Benchmark 1 sieht wie folgt aus:

$$\theta_l = \frac{0.146}{(1 + (-8 \cdot 10^{-8} \cdot R_v \cdot T \cdot \rho_l \cdot \ln(\varphi))^{1.6})^{0.375}} \quad (4)$$

2.4 Feuchtetransport

Weiterhin sind die Materialparameter für den Feuchtetransport anzugeben. Es wird dabei zwischen Dampf- und Flüssigwassertransport unterschieden.

2.4.1 Wasserdampfdiffusion

Der Dampftransport in der Gasphase erfolgt durch Wasserdampfdiffusion. Darunter versteht man einen Stoffaustausch aufgrund eines Dampfdruckgradienten. Die Wasserdampfdiffusion wird in *Delphin* analog zur HAMSTAD Spezifikation durch ineinander überführbare Gleichungen (5) beschrieben.

$$\begin{aligned} j^v &= -\frac{D_v}{R_v \cdot T} \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x_k} \\ &= -\frac{D_{v,air}}{\mu \cdot R_v \cdot T} \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x_k} \\ &= -K_v \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (5)$$

j^v	: Massenstromdichte Wasserdampf [kg/m ² s]	
D_v	: Diffusionskoeffizient im Material [m ² /s]	= $\frac{D_{v,air}}{\mu}$
$D_{v,air}$: Diffusionskoeffizient für Luft	= $26.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
μ	: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]	
R_v	: Gaskonstante für Wasserdampf [J/kgK]	
K_v	: Dampfleitfähigkeit [s]	= $\frac{D_v}{R_v \cdot T}$
p_v	: Wasserdampfdruck [Pa]	

Die Dampfleitfähigkeit K_v wird im HAMSTAD Benchmark in Abhängigkeit des Feuchtegehalts θ_l und mit dekadischen Logarithmus angegeben ([VFN13], S. 11). Es handelt sich hierbei um eine materialspezifische Eigenschaft und muss in der Materialdatei für verschiedene Feuchtegehalte θ_l als Datentabelle angegeben werden. Für das Material in HAMSTAD Benchmark 1 ist folgende Dampfleitfähigkeitsfunktion (Gleichung 6) gegeben.

$$K_v = \frac{26.1 \cdot 10^{-6}}{200 \cdot R_v \cdot T} \cdot \frac{1 - \frac{\theta_l}{0.146}}{0.503 \cdot (1 - \frac{\theta_l}{0.146})^2 + 0.497} \text{ [s]} \quad (6)$$

Alternativ kann mit der bereits in Kapitel 2.2 beschriebenen konstanten Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl gerechnet werden.

2.4.2 Flüssigwassertransport

Der Flüssigwassertransport findet in kapillarporösen Materialien aufgrund eines Druckunterschiedes in den Kapillaren statt und wird in *Delphin* über folgende Formel definiert:

$$j_k^w = -K_l \cdot \frac{\partial p_l}{\partial x_k} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} j^w & : \text{Massenstromdichte Flüssigwasser [kg/m}^2\text{s]} \\ K_l & : \text{Flüssigwasserleitfähigkeit [s]} \\ p_l & : \text{Flüssigwasserdruck [Pa]} \end{aligned}$$

Als materialspezifischer Parameter muss die Flüssigwasserleitfähigkeit K_l in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt θ_l und mit logarithmischem Wert in der Materialdatei angegeben werden ([VFN13], S. 11).

$$K_l = \exp(-39.2619 + 0.0704 \cdot (\rho_l \cdot \theta_l - 73) - 1.7420 \cdot 10^{-4} \cdot (\rho_l \cdot \theta_l - 73)^2 - 2.7953 \cdot 10^{-6} \cdot (\rho_l \cdot \theta_l - 73)^3 - 1.1566 \cdot 10^{-7} \cdot (\rho_l \cdot \theta_l - 73)^4 + 2.5969 \cdot 10^{-9} \cdot (\rho_l \cdot \theta_l - 73)^5) \quad (8)$$

2.5 Wärmeleitung

Der Vorgang der Wärmeleitung wird mittels Gleichung (9) beschrieben. Die Wärmestromdichte ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit λ des Materials und der Größe der Temperaturdifferenz:

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_k} \quad (9)$$

Die Wärmeleitfähigkeit ist materialabhängig (siehe Gleichung 10) und wird durch den Feuchtegehalt θ_l im Material beeinflusst ([VFN13], S. 12). Für die Materialdatei muss die Wärmeleitfähigkeit λ für verschiedene Feuchtegehalte θ_l ausgewertet werden. Ist keine feuchteabhängige Funktion gegeben, wird nur die Wärmeleitfähigkeit λ_{dry} für das trockene Material verwendet (siehe Tabelle 3).

Für das HAMSTAD Benchmark 1 Material ist folgende feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit (Gleichung 10) gegeben. Da es sich um eine lineare Funktion handelt, kann sie durch zwei Datenpunkte exakt abgebildet werden.

$$\lambda = 1.5 + 15.8 \cdot \theta_l \quad (10)$$

$$\begin{aligned} q & : \text{Wärmestromdichte [W/m}^2\text{]} \\ \lambda & : \text{Wärmeleitfähigkeit [W/mK]} \end{aligned}$$

2.6 Materialdatei

Ein Auszug aus der Materialdatei des Materials A aus dem HAMSTAD Benchmark 1 ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Aufbau der Datei und die Bezeichnung der Parameter ist [VFN13] zu entnehmen.

```

[IDENTIFICATION]
NAME      = EN: Load bearing material
PRODUCER  = Chalmers University of Technology (CTH)
CATEGORY  = BRICK

[STORAGE_BASE_PARAMETERS]
RHO       = 2280 kg/m3
CE        = 800 J/kgK
THETA_POR = 0.146 m3/m3
THETA_EFF = 0.146 m3/m3
THETA_80  = 0.0792 m3/m3

[TRANSPORT_BASE_PARAMETERS]
LAMBDA    = 1.5 W/mK
MEW       = 200 -
KLEFF     = 1.6476E-15 s

[MOISTURE_STORAGE]
FUNCTION   = Theta_1(pC)_de
0 4 4.5 ... 14.5 15 16
0.146 0.145999393 0.145996169 ... 5.27836E-06 2.64545E-06 0
FUNCTION   = pC(Theta_1)_de
0 1.0087E-06 1.0174E-06 ... 0.145999999995 0.145999999998 0.146
16 15.69789315 15.69167539 ... 0.799557036 0.631293248 0

[MOISTURE_TRANSPORT]
FUNCTION   = lgKl(Theta_1)
0 0.0001 0.0002 ... 0.1458 0.1459 0.146
-22.9785613200 -22.9525678413 -22.9266899874 ... -14.7994513862 -14.7913143484 -14.7831287790
FUNCTION   = lgKv(Theta_1)
0 0.0001 0.0002 0.0003 ... 0.1458 0.1459 0.146
-12.0160169019 -12.0160152185 -12.0160137380 ... -14.5756969756 -14.8767263526 -20.8767262561

[HEAT_TRANSPORT]
FUNCTION   = lambda(Theta_1)
0 0.146
1.5 3.8068

```

Abbildung 1: Materialdatei Material A HAMSTAD Benchmark 1

3 HAMSTAD Benchmark 1

Bei dem HAMSTAD Benchmark 1 handelt es sich um eine eindimensionale Berechnung eines Daches. Die Konstruktion besteht aus drei Schichten: einer lasttragenden Schicht mit einer Wärmedämmung an der Innenseite und einer Dampfsperre an der Außenseite (siehe Abbildung 2). Die Konstruktion wird als luftdicht angenommen. Es kommt zur Kondensation zwischen der Wärmedämmung und der lasttragenden Schicht. Berechnet wird der Wärme- und Feuchtetransport in der Konstruktion über einen Zeitraum von fünf Jahren unter Verwendung von dynamischen Wetterdaten. Es handelt sich hierbei um eine instationäre hygrothermische Simulation.

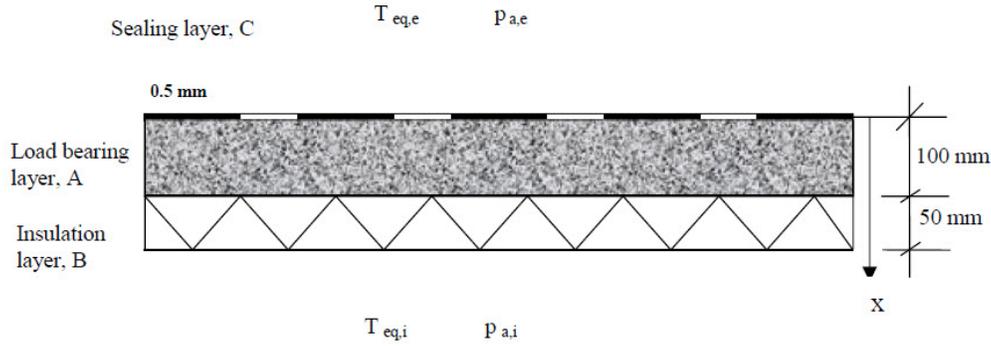


Abbildung 2: Konstruktionsaufbau HAMSTAD Benchmark 1 [Ham02]

3.1 Materialdaten

Die Generierung der Materialdatei für das Material A ist in Kapitel 2 beschrieben. Für die anderen Materialien ist die gleiche Vorgehensweise anzuwenden. Es sind jedoch folgende Besonderheiten zu beachten:

Material B: Wärmedämmung

Die Flüssigwasserleitfähigkeit für das Material B ist mit $K_l = 0$ s angegeben. Demzufolge kann kein Flüssigwassertransport im Material stattfinden. Es handelt sich hierbei um eine nicht kapillaraktive Wärmedämmung. Für die *Delphin* Materialdatei bedeutet das, dass die effektive Flüssigwasserleitfähigkeit mit $K_{l,eff} = 0$ s angegeben wird (TRANSPORT_BASE_PARAMETERS) und das Flag WATER_TIGHT gesetzt wird (IDENTIFICATION). Die Funktion $\lg K_l(\theta_l)$ zur Berechnung der Flüssigwasserleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt entfällt (MOISTURE_TRANSPORT).

Material C: Dampfsperre

Folgende Materialeigenschaften liegen laut des HAMSTAD Benchmark 1 für das Material C vor:

Z_p	: Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand	= 10^{12} m/s
K_l	: Flüssigwasserleitfähigkeit	= 0 s
R	: Wärmedurchlasswiderstand	= $0 \text{ m}^2\text{K/W}$
d	: Schichtdicke	= 0.0005 m

Tabelle 4: Materialangaben Dampfsperre

Aus den ersten beiden Parametern lässt sich schlussfolgern, dass keine Feuchtetransporte an der Dampfsperre stattfinden können. Es wird weder Wasserdampf ($K_v = \frac{0.0005 \text{ m}}{10^{12} \text{ m/s}} = 5 \cdot 10^{-16}$ s) noch Flüssigwasser ($K_l = 0$ s) transportiert. Weiterhin hat die Dampfsperre keinen Einfluss auf Wärmetransportprozesse ($R = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$). Demzufolge muss die Dampfbremse nicht als separates Material in *Delphin* angelegt werden, sondern wird lediglich über die Randbedingungen berücksichtigt (siehe Abschnitt 3.2).

3.2 Klimadaten und Randbedingungen

3.2.1 Klimadaten

Bis auf die konstante Innentemperatur $T_{eq,i}$ werden im HAMSTAD Benchmark 1 dynamische Klimadatenätze angegeben. Insgesamt werden vier Klimabedingungen in *Delphin* eingegeben: die Temperatur T_{eq} und der Wasserdampfdruck p_a jeweils für innen und außen.

	T_{eq} [°C]	p_a [Pa]
Innen	20	dynamisch
Außen	dynamisch	dynamisch

Tabelle 5: Klimabedingungen HAMSTAD Benchmark 1

Die dynamischen Klimadaten sind in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt. Zwischenwerte sind durch lineare Interpolation von *Delphin* zu ermitteln.

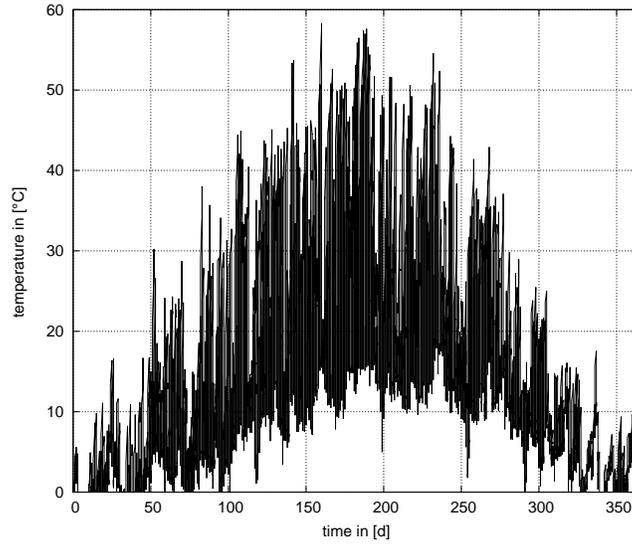


Abbildung 3: Außentemperatur HAMSTAD Benchmark 1

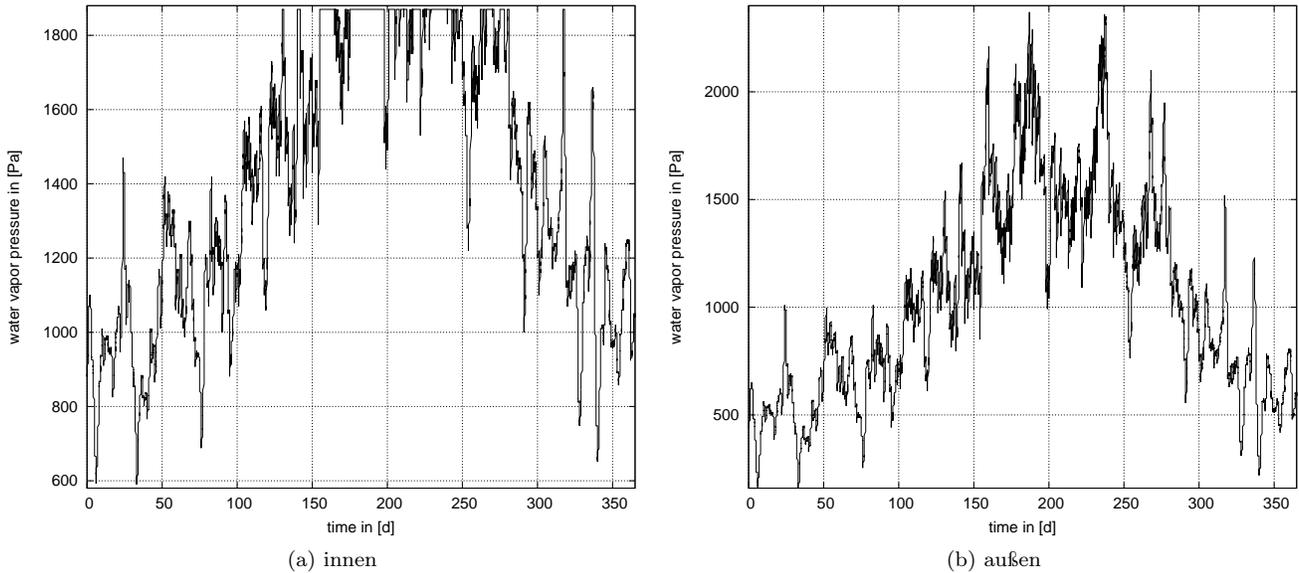


Abbildung 4: Wasserdampfdruck HAMSTAD Benchmark 1

3.2.2 Randbedingungen

Im HAMSTAD Benchmark 1 sind folgende Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten α_e und den Wasserdampfübergangskoeffizienten β_p jeweils für die Innen- und Außenseite der Konstruktion gegeben:

	α_e [W/m ² K]	β_p [s/m]
Innen	7	$2 \cdot 10^{-8}$
Außen	25	0

Tabelle 6: Übergangskoeffizienten HAMSTAD Benchmark 1

Mit Hilfe der Klimadaten und der Übergangskoeffizienten können nun die Randbedingungen definiert werden. Da es sich hierbei um einen gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport handelt, müssen die Randbedingungen Wärmeleitung und Wasserdampfdiffusion den Randelementen zugewiesen werden. Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die Randbedingungen und der dazugehörigen physikalischen Parameter und Klimadateien.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung	Austauschkoeffizient	innen	$\alpha_{e,i}$	$T_{eq,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\alpha_{e,e}$	$T_{eq,e}$
Wasserdampfdiffusion	Austauschkoeffizient	innen	$\beta_{p,i}$	$T_{eq,i}$
				$p_{a,i}$

Tabelle 7: Randbedingungen HAMSTAD Benchmark 1

Da der Wasserdampfübergangskoeffizient für außen $\beta_{p,e} = 0$ s/m und das Material C wasserdicht ist (siehe Abschnitt 3.1), kann kein Wasserdampftransport über die Außenseite statt finden. Die Randbedingung für die Wasserdampfdiffusion an der Außenseite kann deshalb weggelassen werden. Es bleiben drei Randbedingungen übrig: Wärmeleitung innen und außen, sowie Wasserdampfdiffusion innen.

3.2.3 Anfangsbedingungen

Laut HAMSTAD Benchmark 1 sind folgende Anfangsbedingungen für die Materialschichten A und B anzunehmen (siehe Tabelle 8).

	w [kg/m ³]	T [K]
Material A	145	10
Material B	0.065	

Tabelle 8: Anfangsbedingungen HAMSTAD Benchmark 1

3.3 Validierungsrechnung

3.3.1 Ausgabe

Simuliert wird über einen Zeitraum von 5 Jahren. Dabei werden stündliche Ausgaben für die folgenden physikalischen Größen erstellt:

- Feuchtemassendichte in [kg/m³] in verschiedenen Stellen der Konstruktion: 0.0167 m, 0.05 m, 0.0834 m und 0.125 m
- Integrale Feuchtemasse in [kg/m²] für beide Konstruktionsschichten A und B
- Wärmestromdichte in [W/m²] an der Innenseite der Konstruktion

3.3.2 Solverparameter

Für die Simulation des HAMSTAD Benchmarks 1 werden folgende Solvareinstellungen verwendet:

Solver Einstellungen	
Maximaler Zeitschritt	30 min
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m^3
Absolute Toleranz Feuchte	10^{-6} kg/m^3

Tabelle 9: Solverparameter HAMSTAD Benchmark 1

3.3.3 Diskretisierung

Die eindimensionale Simulation wird mit einer äquidistanten Diskretisierung von 1 mm gerechnet.

3.3.4 Ergebnisse

Für die auszugebenden Feuchtemassendichten an den verschiedenen Stellen der Konstruktion sind in der HAMSTAD Benchmark Dokumentation [Ham02] keine Ergebnisse abgebildet. Deshalb wird auf die Auswertung dieser Ergebnisse hier verzichtet. Es werden nur die integrale Feuchtemasse der einzelnen Materialien, sowie die Wärmestromdichte über die Innenseite der Konstruktion für die Jahre 1 und 5 in Diagrammen veranschaulicht. Verglichen werden die *Delphin* Ergebnisse mit den numerischen Lösungen von:

- 01 KU Leuven
- 02 Eindhoven University of Technology
- 03 Technion Israel Institute of Technology
- 04 Chalmers University of Technology
- 05 Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- 06 National Research Council of Canada
- 08 Technische Universität Dresden (Delphin 4)

Tabelle 10: Legendenummerierung HAMSTAD Benchmark 1

Es werden die Simulationsergebnisse von *Delphin 5.6*, *5.8*, *6.0* und *6.1* farblich hervorgehoben, während die Vergleichsergebnisse grau dargestellt sind.

Simulationsergebnisse 1. Jahr

Integrale Feuchtemasse der lasttragenden Schicht:

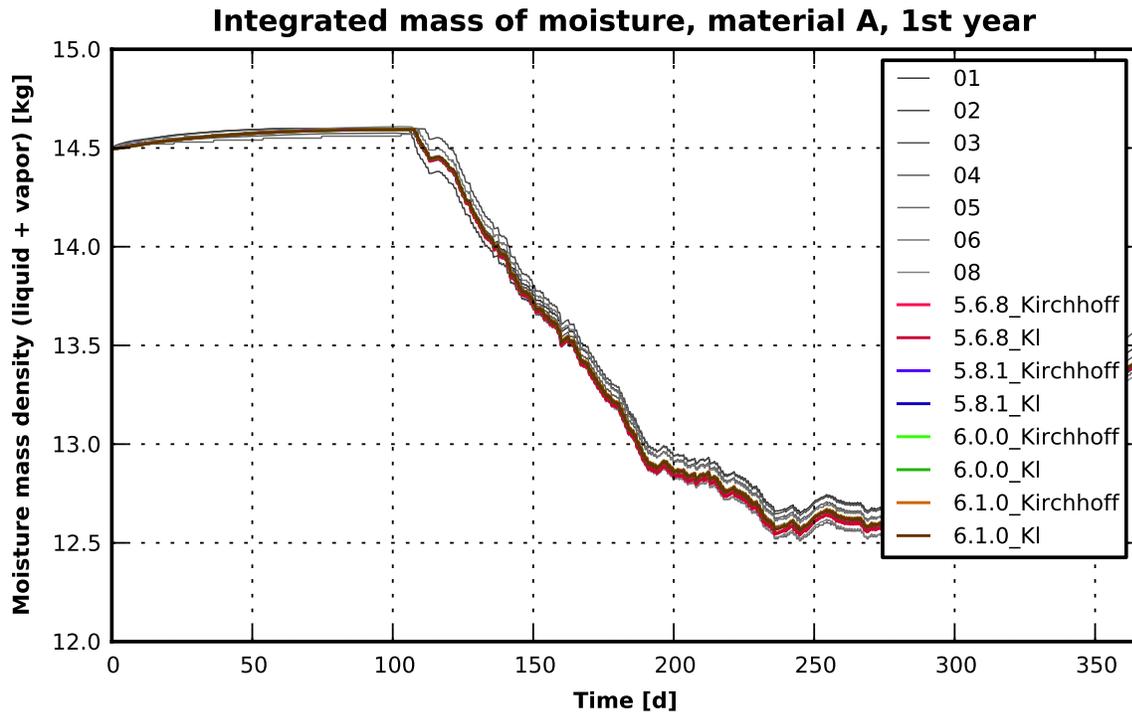


Abbildung 5: Jahresverlauf der integralen Feuchtemasse von Material A

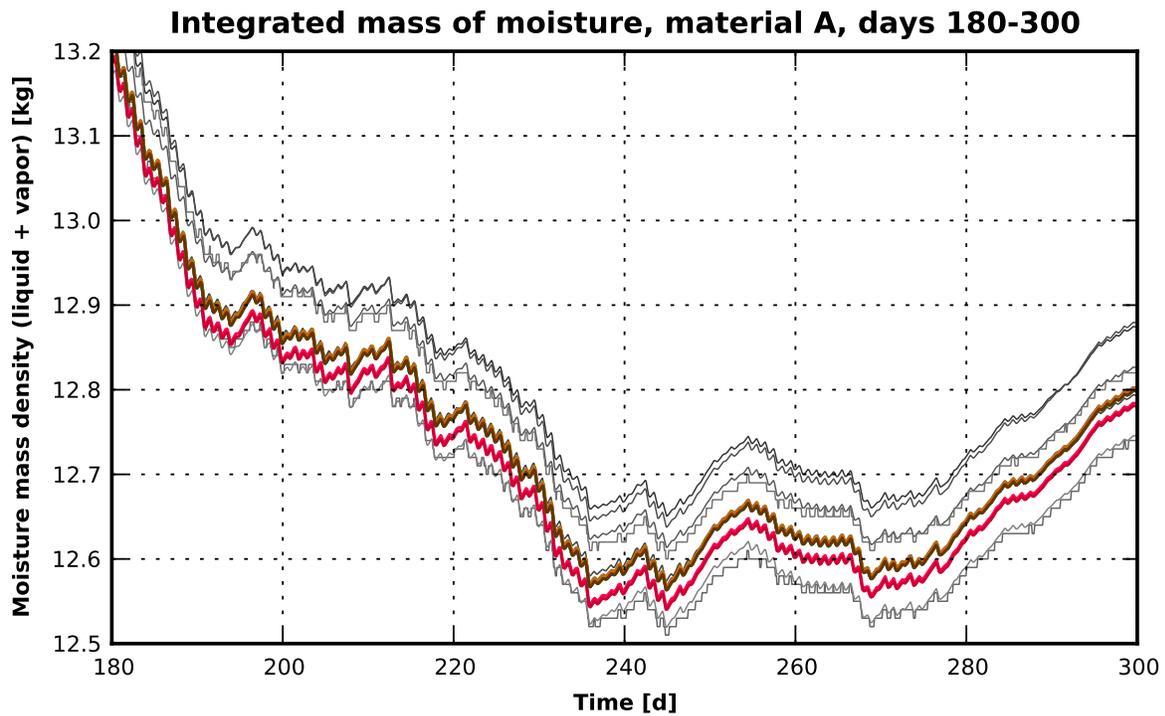


Abbildung 6: Ausschnitt aus dem 1. Jahr der integralen Feuchtemasse von Material A

Simulationsergebnisse 1. Jahr

Integrale Feuchtemasse der Wärmedämmung:

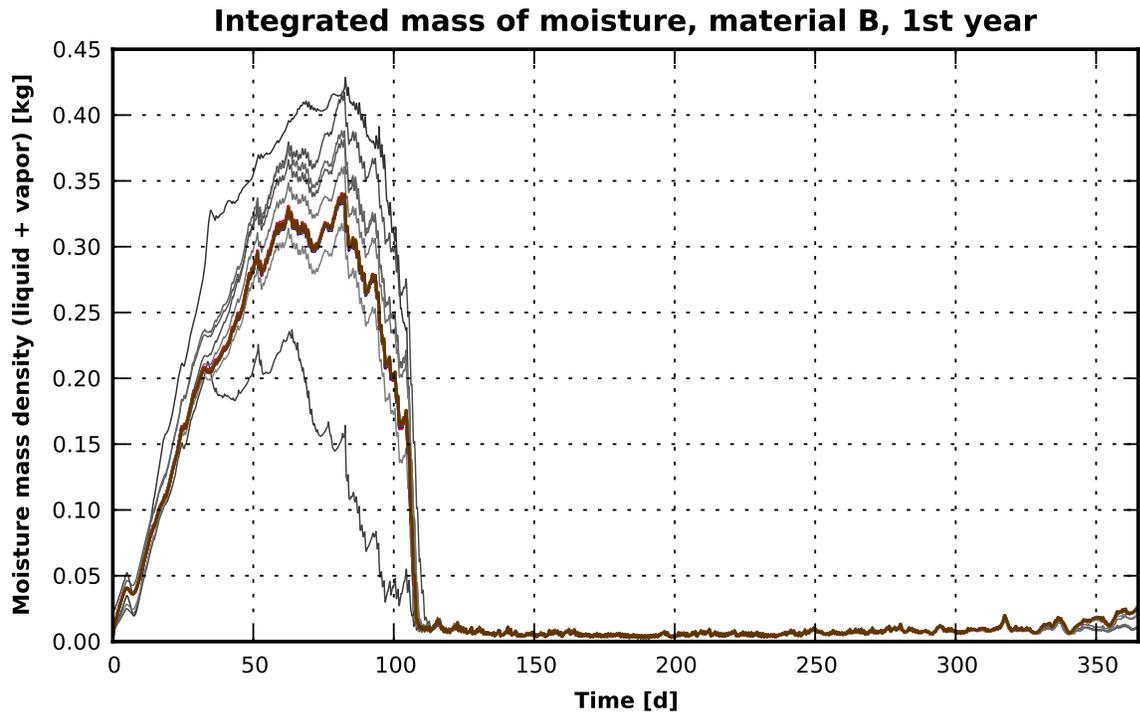


Abbildung 7: Jahresverlauf der integralen Feuchtemasse von Material B

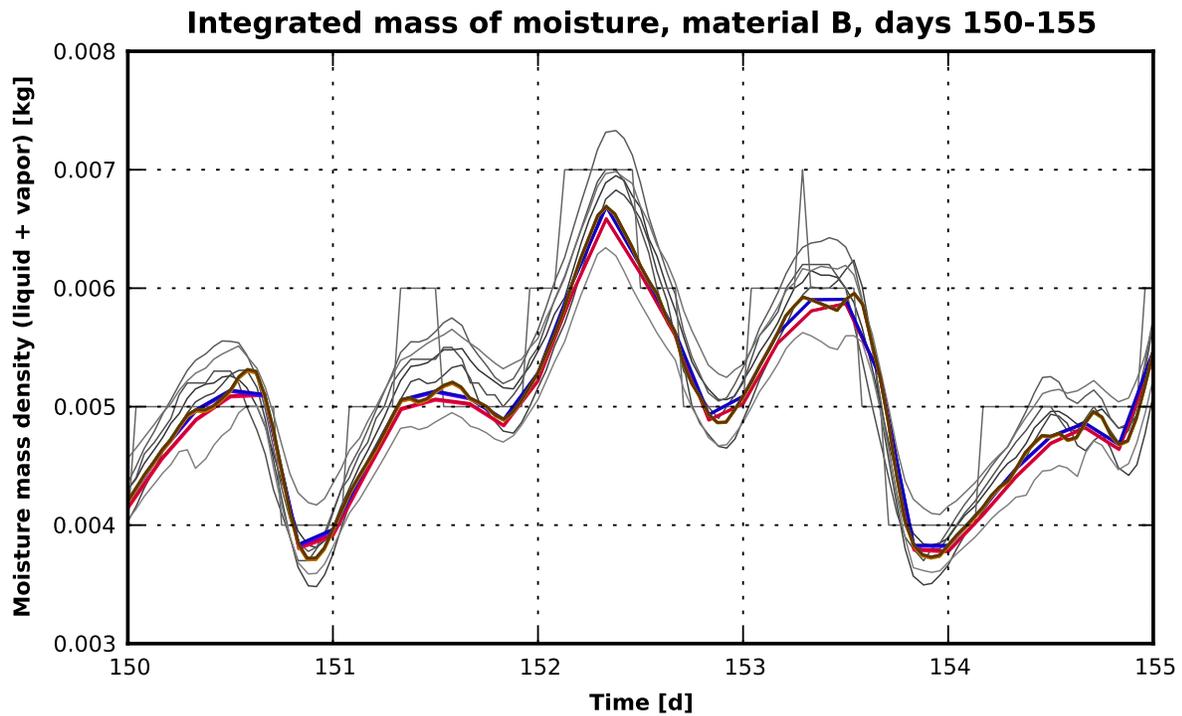


Abbildung 8: Ausschnitt aus dem 1. Jahr der integralen Feuchtemasse von Material B

Simulationsergebnisse 1. Jahr

Wärmestromdichte an der Innenseite der Konstruktion:

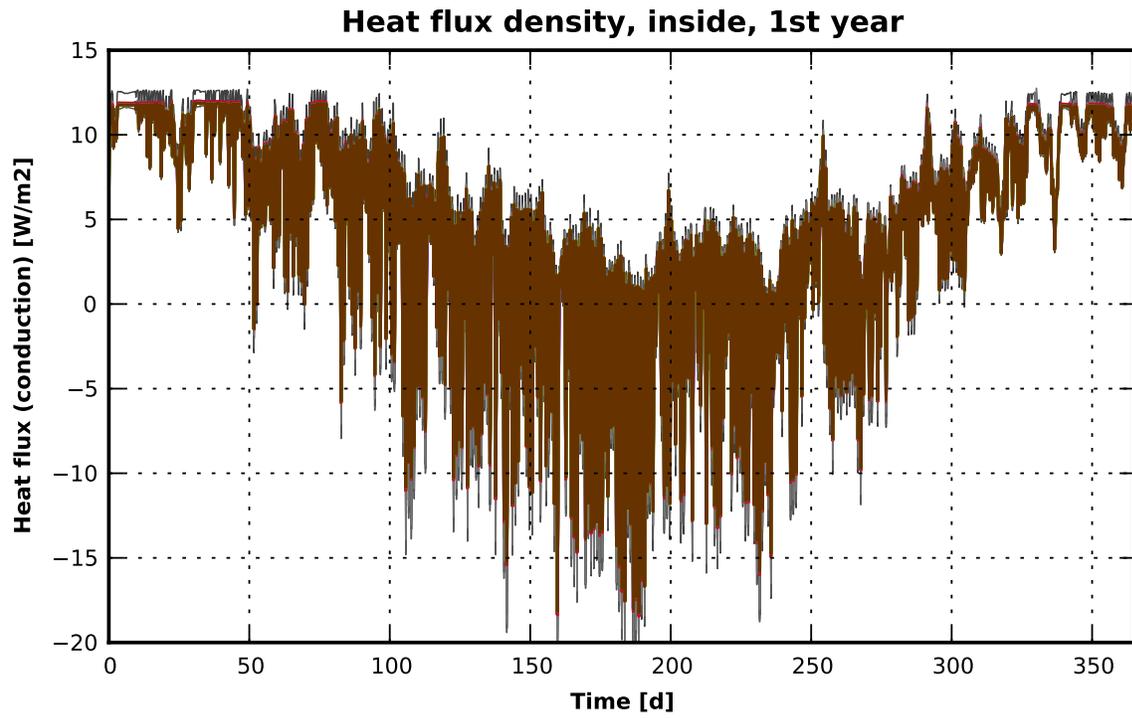


Abbildung 9: Jahresverlauf der Wärmestromdichte an der Innenseite der Konstruktion

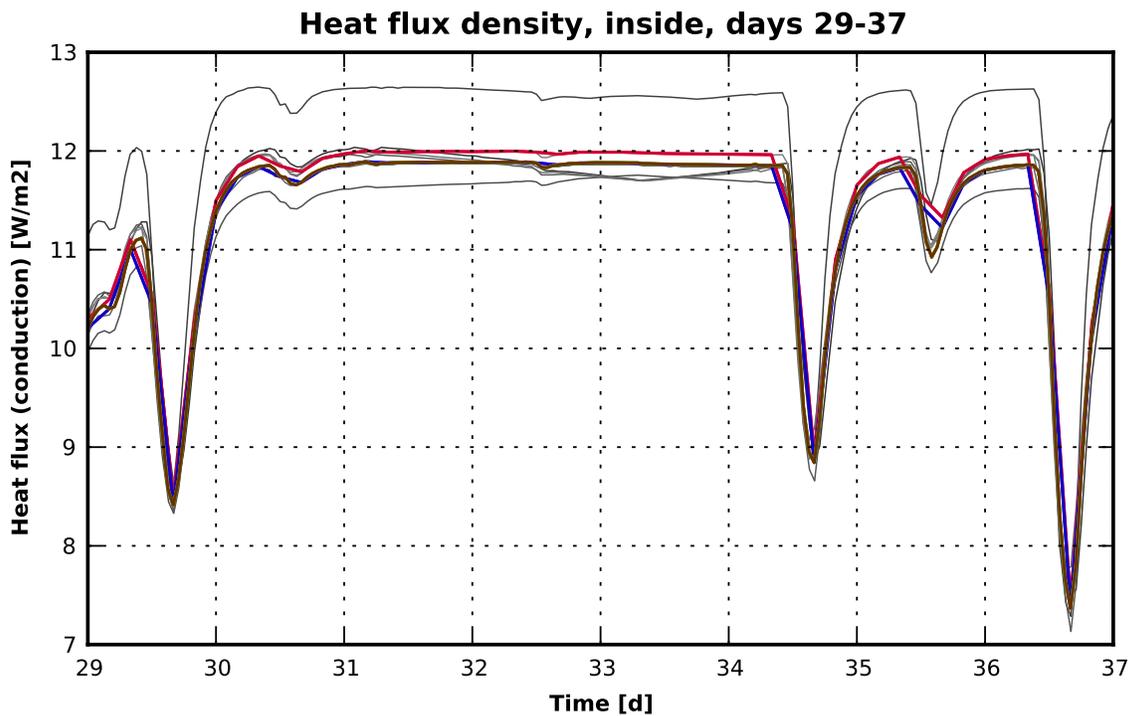


Abbildung 10: Ausschnitt aus dem 1. Jahr der Wärmestromdichte an der Innenseite der Konstruktion

Simulationsergebnisse 5. Jahr

Integrale Feuchtemasse der lasttragenden Schicht:

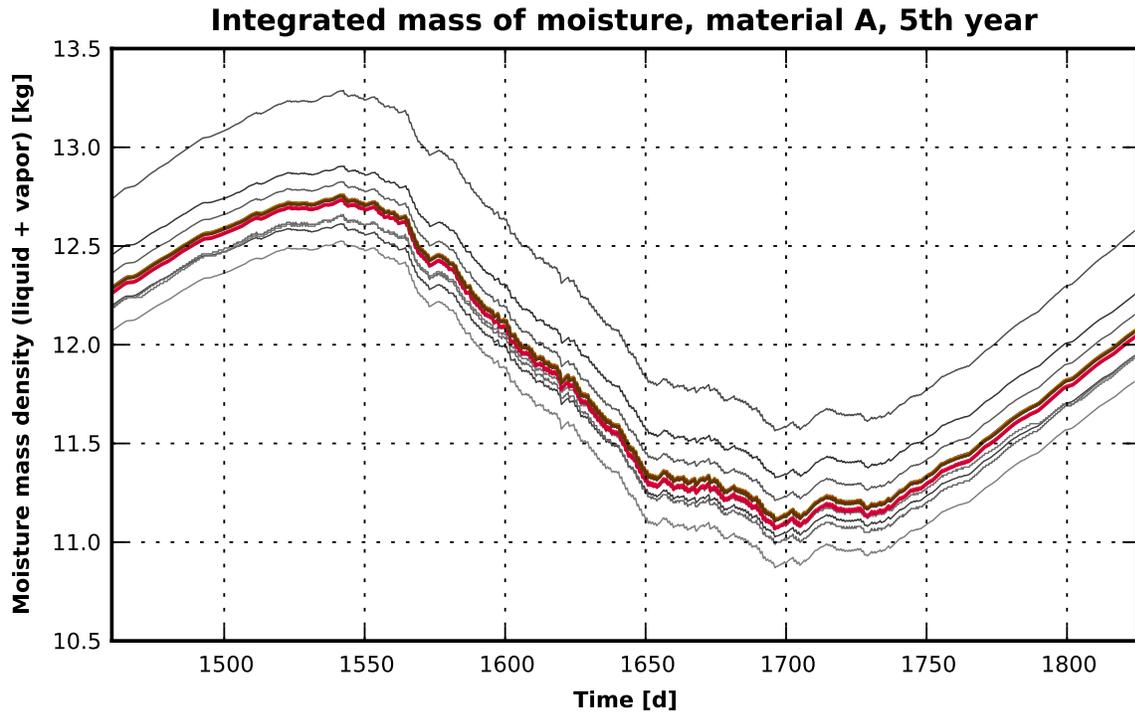


Abbildung 11: Jahresverlauf der integralen Feuchtemasse von Material A

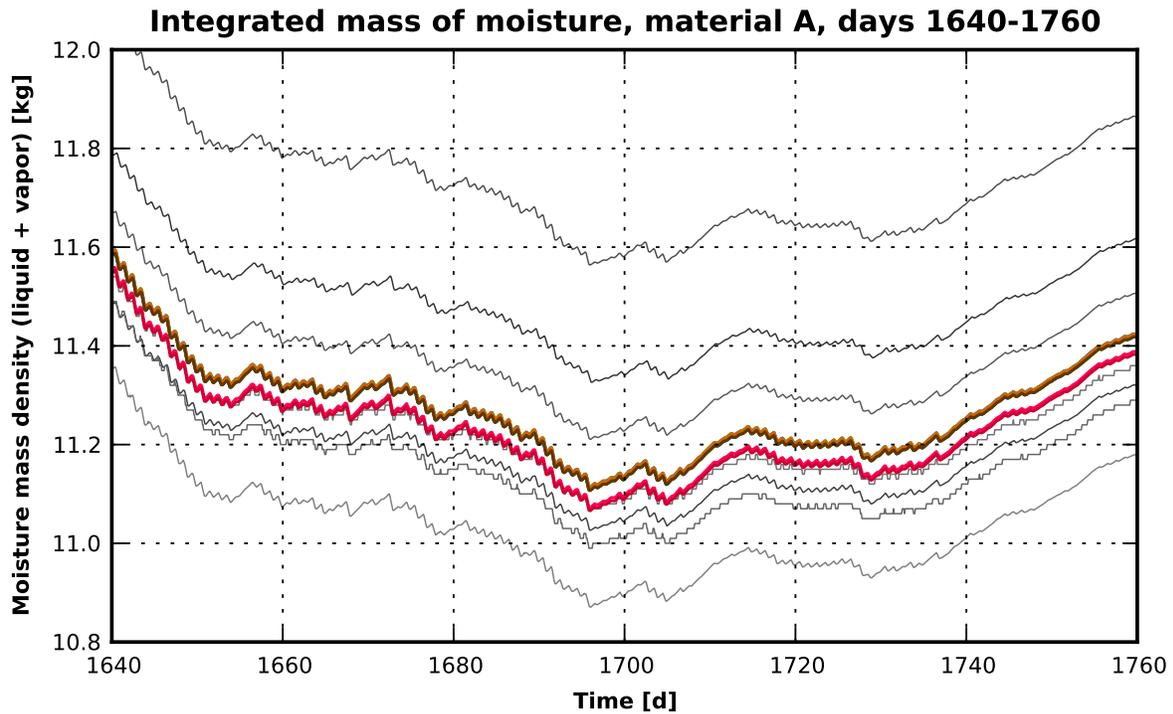


Abbildung 12: Ausschnitt aus dem 5. Jahr der integralen Feuchtemasse von Material A

Simulationsergebnisse 5. Jahr

Integrale Feuchtemasse der Wärmedämmung:

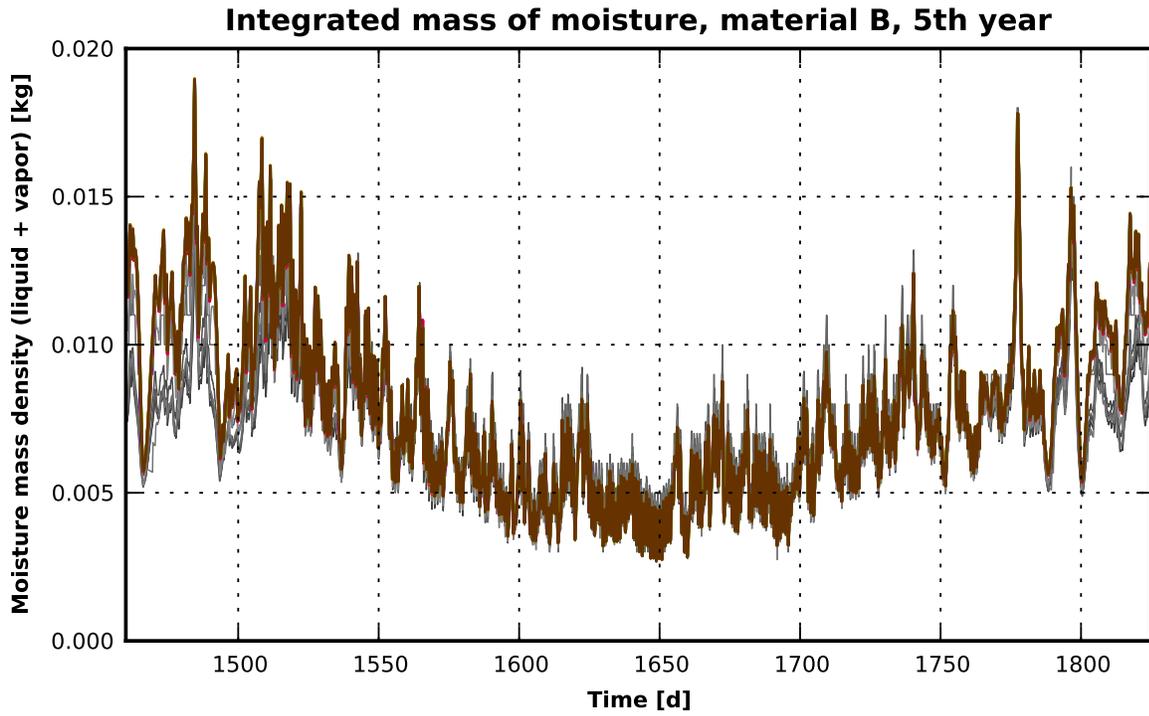


Abbildung 13: Jahresverlauf der integralen Feuchtemasse von Material B

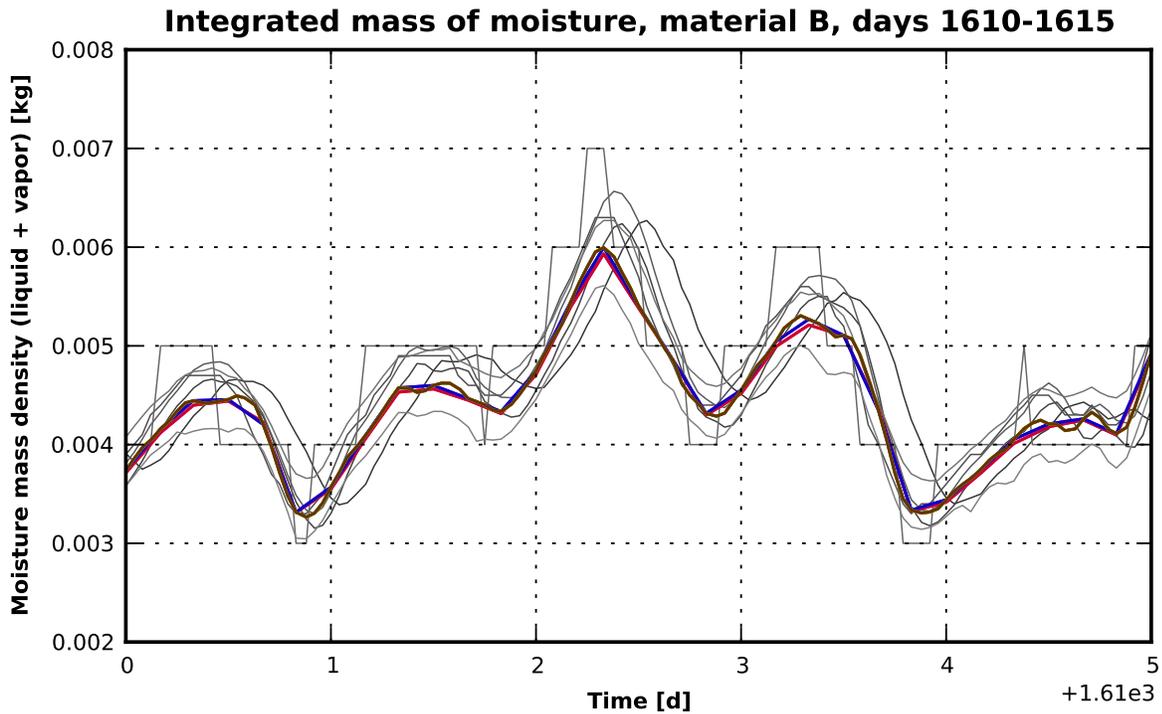


Abbildung 14: Ausschnitt aus dem 5. Jahr der integralen Feuchtemasse von Material B

Simulationsergebnisse 5. Jahr

Wärmestromdichte an der Innenseite der Konstruktion:

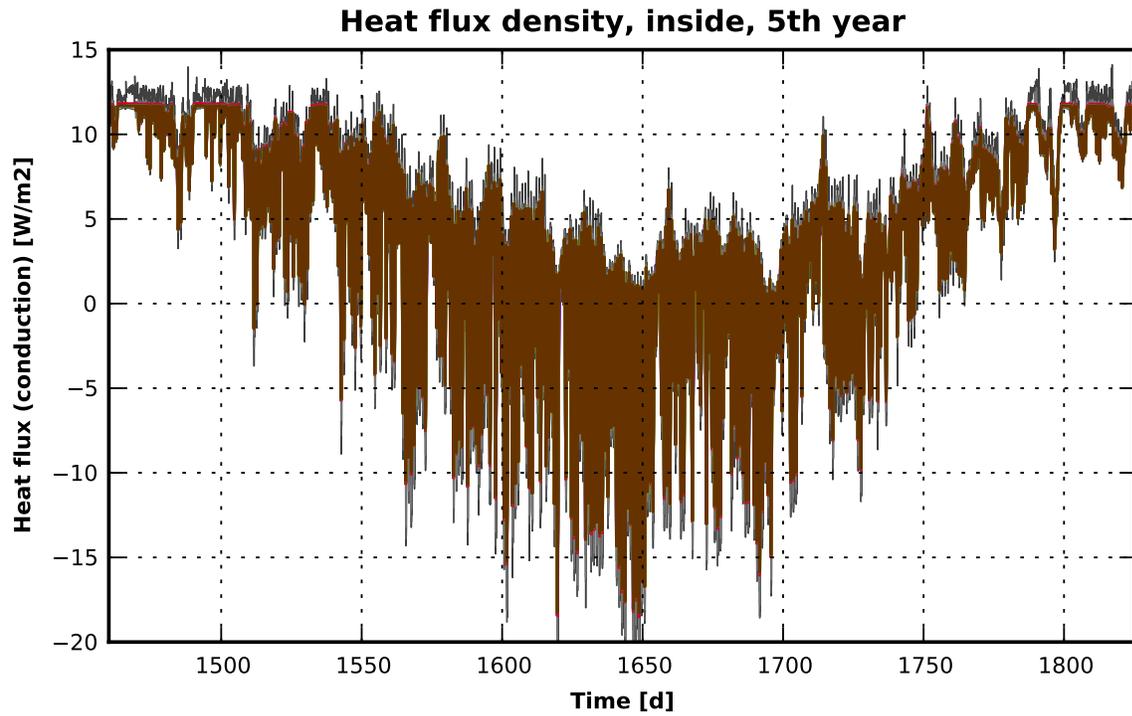


Abbildung 15: Jahresverlauf der Wärmestromdichte an der Innenseite der Konstruktion

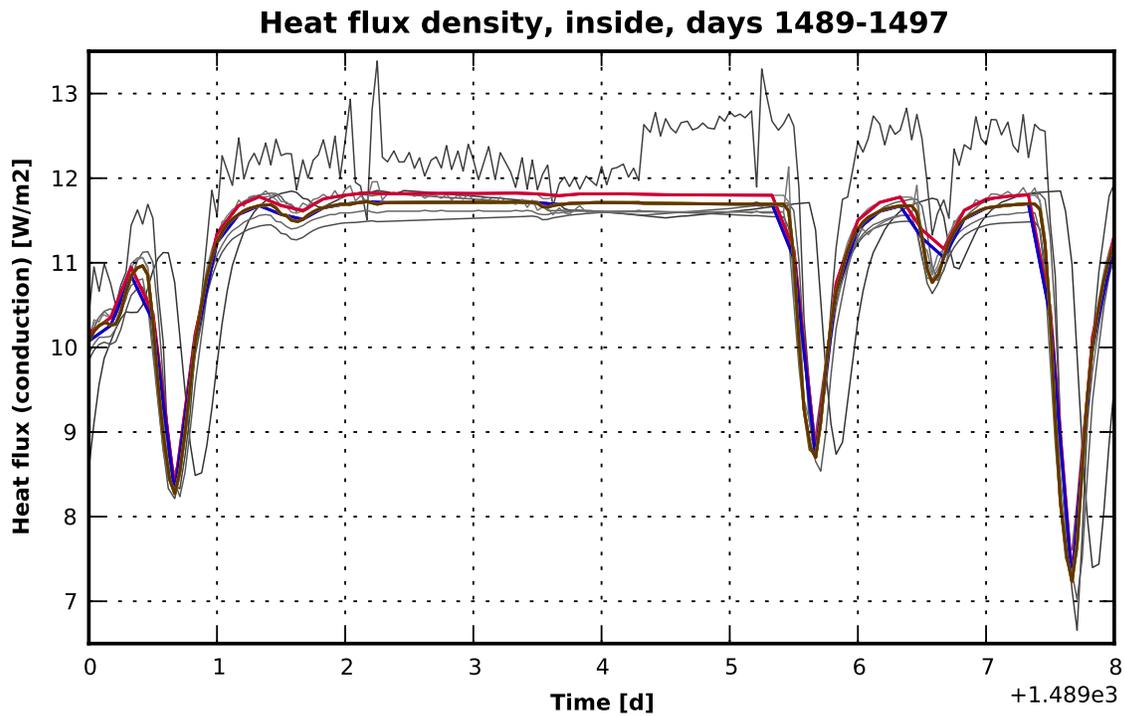


Abbildung 16: Ausschnitt aus dem 5. Jahr der Wärmestromdichte an der Innenseite der Konstruktion

4 HAMSTAD Benchmark 2

Beim HAMSTAD Benchmark 2 handelt es sich um eine homogene Konstruktionsschicht, welche eindimensional berechnet werden soll. Die Konstruktion wird als luftdicht angenommen. Die Randbedingungen sind konstant, so dass sich ein stationärer Zustand einstellt. Da unter isothermen Bedingungen gerechnet wird, findet ausschließlich ein Feuchteumtransport in der Konstruktion statt. Zur Feuchteumverteilung kommt es aufgrund der Differenz der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen der Innen- und Außenseite. Verglichen werden die Simulationsergebnisse mit einer analytischen Lösung.

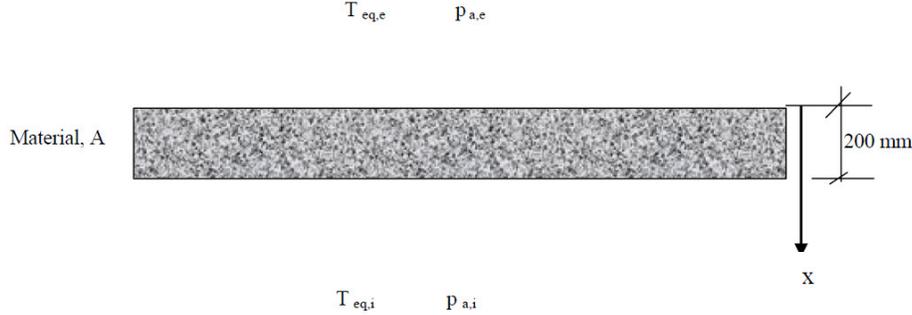


Abbildung 17: Konstruktionsaufbau HAMSTAD Benchmark 2 [Ham02]

4.1 Materialdaten

Ein Beispiel zur Generierung der Materialdatei aus denen im Benchmark angegebenen Daten ist in Kapitel 2 beschrieben. Für das Material A des HAMSTAD Benchmarks 2 ist die gleiche Vorgehensweise anzuwenden. Die Schichtdicke für das Material beträgt 0.2 m.

Im Gegensatz zu dem Beispiel in Kapitel 2, ist die Wärmeleitfähigkeit λ bei diesem Benchmark als konstant, d. h. feuchteunabhängig angegeben.

Ebenso ist die Dampfleitfähigkeit $K_v = 10^{-15}$ s als konstanter Wert definiert. Somit muss die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ mit Hilfe der Formel (6) berechnet werden. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ergibt sich aus:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{D_{v,air}}{K_v \cdot R_v \cdot T} \\ &= \frac{26,1 \cdot 10^{-6}}{10^{-15} \cdot \frac{8,314}{0,018} \cdot 193,15} \\ &= 192758 \end{aligned}$$

Für die Berechnung des Flüssigwassertransportes ist ein konstanter Wert für den Feuchtediffusionskoeffizienten D_w gegeben. Dieser setzt sich aus dem Anteil des Flüssigwassers und des Wasserdampfes (siehe Formel 12, aus [Ham02], S. 20) zusammen. Da die Dampfleitfähigkeit K_v als konstanter Wert gegeben ist, muss nur noch die Flüssigwasserleitfähigkeit K_l berechnet werden.

$$D_w = 6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \quad (11)$$

$$= -K_l \cdot \frac{\partial p_c}{\partial w} + K_v \cdot p_s \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial w} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} D_w &: \text{Feuchtediffusionskoeffizient [m}^2/\text{s]} \\ p_s &: \text{Sättigungsdampfdruck bei 20}^\circ\text{C} = 2340 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Mit Hilfe der Kelvin-Gleichung (Formel 3) kann $\frac{\partial p_c}{\partial w}$ ersetzt werden ([Ham02], S. 20) durch:

$$\frac{\partial p_c}{\partial w} = -\rho_l \cdot R_v \cdot T \cdot \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial w}$$

Eingesetzt in die Gleichung (12) ergibt sich folgende Flüssigwasserleitfähigkeit K_l :

$$D_w = \frac{K_l \cdot \rho_l \cdot R_v \cdot T}{\varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial w} + K_v \cdot p_s \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial w}$$

$$K_l = \frac{\left(D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial \varphi} - K_v \cdot p_s \right) \cdot \varphi}{\rho_l \cdot R_v \cdot T}$$

Abbildung 18 zeigt die zu berücksichtigenden Besonderheiten in der Materialdatei für den HAMSTAD Benchmark 2.

```
[MOISTURE_TRANSPORT]
FUNCTION = lgKl(Theta_1)
0 0.003642069 0.003857632 ... 0.11431643 0.115152019 0.116
-18.5 -17.55504423 -17.54278843 ... -14.43869732 -14.43191981 -14.42509209

FUNCTION = lgKv(Theta_1)
0 0.116
-15 -15

FUNCTION = lgDl(Theta_1)
0 0.116
-9.2218487496 -9.2218487496

[HEAT_TRANSPORT]
FUNCTION = lambda(Theta_1)
0 0.116
0.15 0.15
```

Abbildung 18: Ausschnitt Materialdatei HAMSTAD Benchmark 2

4.2 Klimadaten und Randbedingungen

4.2.1 Klimadaten

Im HAMSTAD Benchmark 2 sind konstante Temperaturen T_{eq} und konstante relative Luftfechtigkeiten φ_a für jeweils innen und außen gegeben. Es ist deshalb zu erwarten, dass sich nach einer bestimmten Simulationsdauer ein stationärer Zustand einstellt. Die Temperaturen an der Innen- und Außenseite sind gleich, weshalb es nur zum Feuchtetransport kommt.

Der Wasserdampfdruck p_a wird über die relative Luftfeuchtigkeit φ_a und dem Sättigungsdampfdruck p_s bei einer Lufttemperatur von 20°C berechnet:

$$p_a = \varphi_a \cdot p_s(20^\circ\text{C})$$

Die Klimabedingungen sind in Tabelle 11 dargestellt.

	T_{eq} [°C]	φ_a [%]	p_a [Pa]
Innen	20	65	1521
Außen	20	45	1053

Tabelle 11: Klimabedingungen HAMSTAD Benchmark 2

4.2.2 Randbedingungen

Es sind folgende Werte für den Wärmeübergangskoeffizienten α_e und den Wasserdampfübergangskoeffizienten β_p jeweils für die Innen- und Außenseite der Konstruktion gegeben:

	α_e [W/m ² K]	β_p [s/m]
Innen	25	10 ⁻³
Außen	25	10 ⁻³

Tabelle 12: Übergangskoeffizienten HAMSTAD Benchmark 2

Da es sich hierbei um einen gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport handelt, müssen vier Randbedingungen (Wärmeleitung und Dampfdiffusion jeweils innen und außen) definiert werden. Tabelle 13 zeigt die verwendeten Randbedingungen mit den dazugehörigen physikalischen Parametern und Klimadaten.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung	Austauschkoeffizient	innen	$\alpha_{e,i}$	$T_{eq,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\alpha_{e,e}$	$T_{eq,e}$
Wasserdampfdiffusion	Austauschkoeffizient	innen	$\beta_{p,i}$	$T_{eq,i}$
				$p_{a,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\beta_{p,e}$	$T_{eq,e}$
				$p_{a,e}$

Tabelle 13: Randbedingungen HAMSTAD Benchmark 2

4.2.3 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingung ist eine relative Luftfeuchtigkeit φ bzw. eine Feuchtemassendichte w , sowie eine Anfangstemperatur T für die gesamte Konstruktion gegeben. Für die Simulation wird die Feuchtemassendichte als Anfangsbedingung verwendet.

	φ [%]	w [kg/m ³]	T [°C]
Material A	95	84.7687	20

Tabelle 14: Anfangsbedingungen HAMSTAD Benchmark 2

4.3 Validierungsrechnung

4.3.1 Ausgabe

Im Benchmark ist die Simulationszeit mit 1000 Stunden angegeben. Dabei werden folgende Ausgaben geschrieben:

- Feuchtemassendichte in [kg/m³] im Abstand von 0.01 m

Die Ausgaben werden in *Delphin* stündlich berechnet und anschließend nach 100, 300 und 1000 Stunden ausgewertet.

4.3.2 Solverparameter

Für den HAMSTAD Benchmark 2 wird mit folgenden Solvareinstellungen gerechnet:

Solver Einstellungen	
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m ³
Absolute Toleranz Feuchte	10^{-6} kg/m ³

Tabelle 15: Solverparameter HAMSTAD Benchmark 2

4.3.3 Diskretisierung

Die eindimensionale Simulation wird mit einer äquidistanten Diskretisierung von 1 mm gerechnet.

4.3.4 Ergebnisse

Verglichen werden die *Delphin* Ergebnisse mit der analytischen Lösung sowie den numerischen Lösungen von:

- 01 KU Leuven
- 03 Technion Israel Institute of Technology
- 04 Chalmers University of Technology
- 06 National Research Council of Canada
- 07 TNO Building and Construction Research
- 08 Technische Universität Dresden (Delphin 4)
- 09 Analytische Lösung

Tabelle 16: Legendenummerierung HAMSTAD Benchmark 2

Es werden die Simulationsergebnisse von *Delphin 5.6*, *5.8*, *6.0* und *6.1* farblich hervorgehoben, während die Vergleichsergebnisse grau dargestellt sind.

Simulationsergebnisse nach 100 Stunden

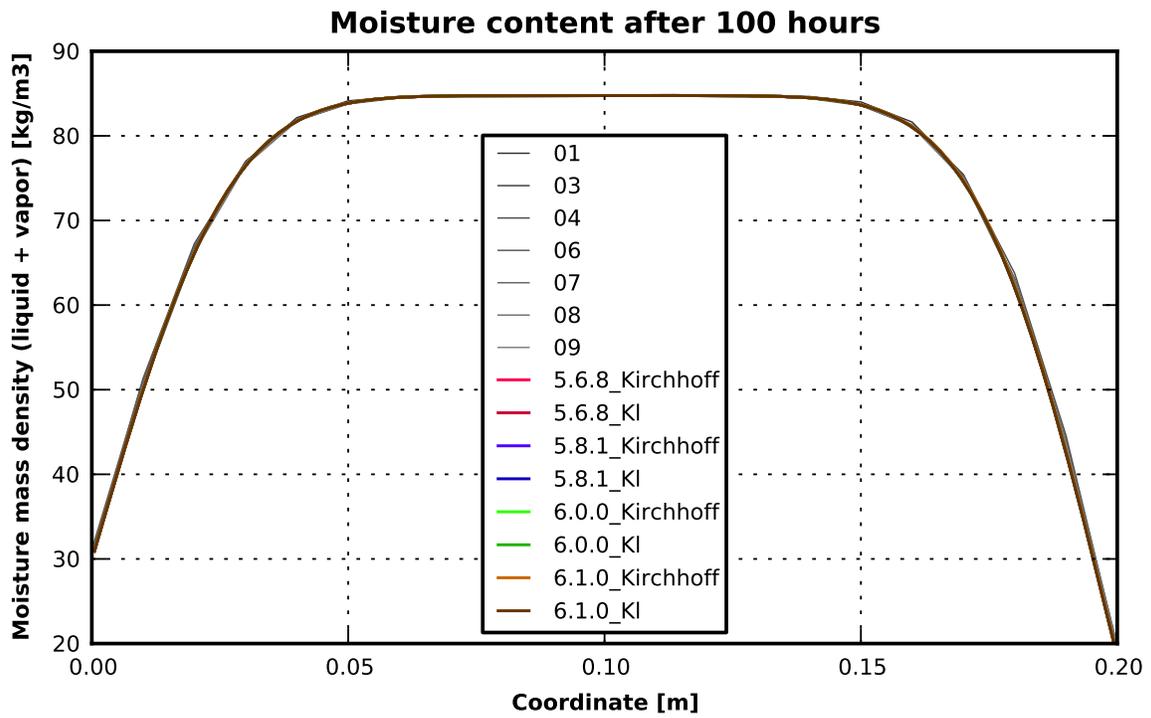


Abbildung 19: Feuchtemassendichte nach 100 Stunden

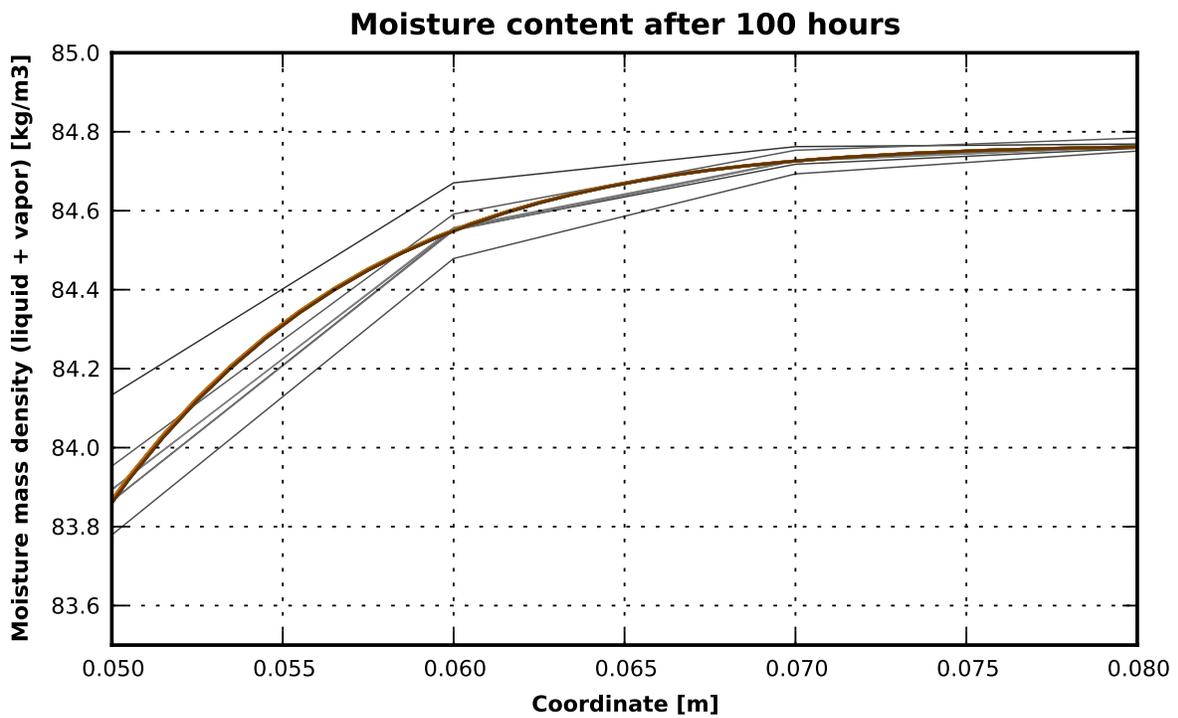


Abbildung 20: Feuchtemassendichte nach 100 Stunden, 0.05 – 0.08 m

Simulationsergebnisse nach 300 Stunden

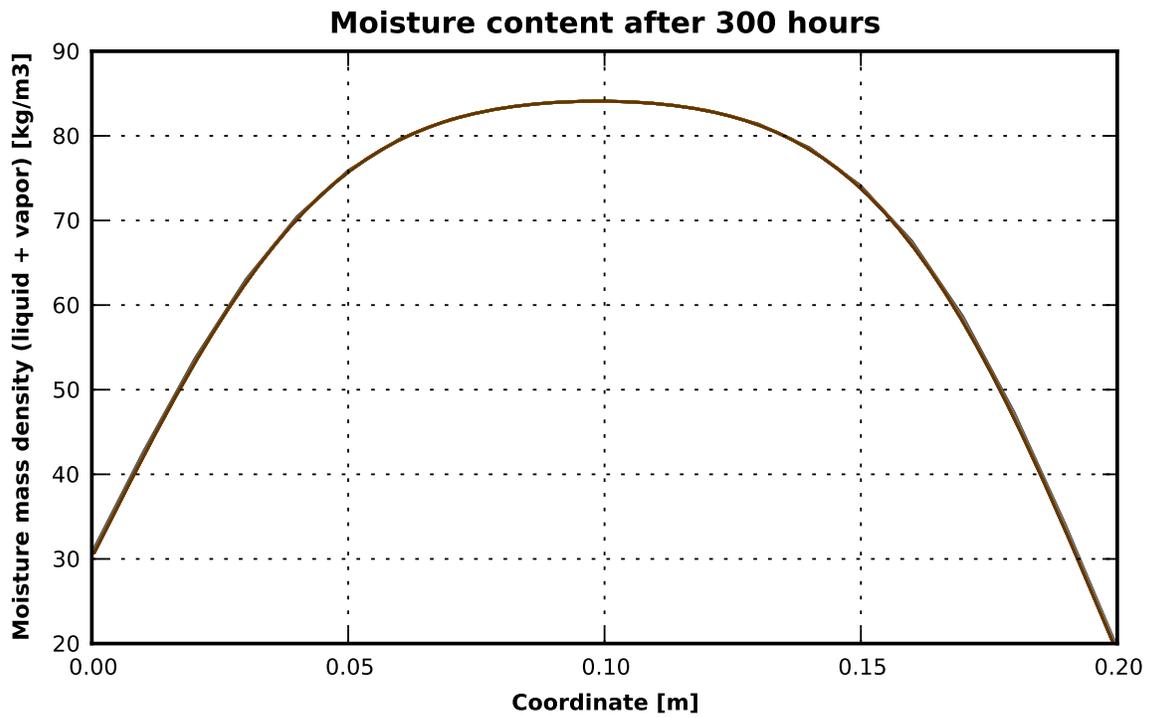


Abbildung 21: Feuchtemassendichte nach 300 Stunden

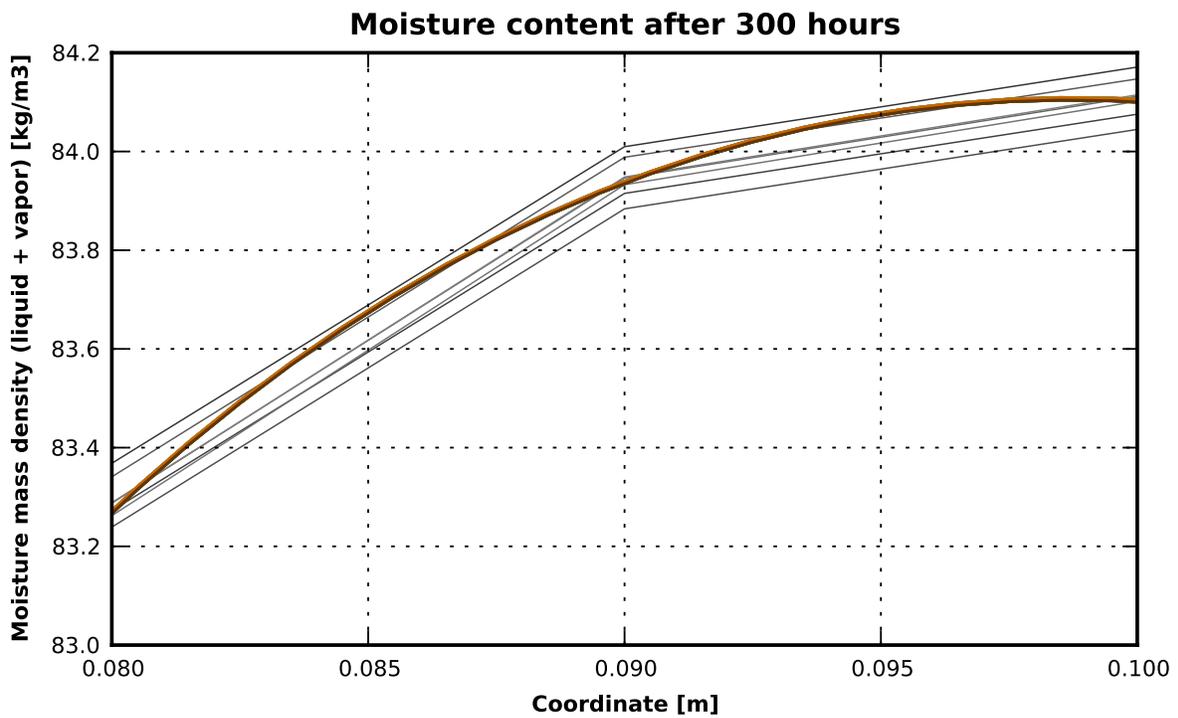


Abbildung 22: Feuchtemassendichte nach 300 Stunden, 0.08 – 0.1 m

Simulationsergebnisse nach 1000 Stunden

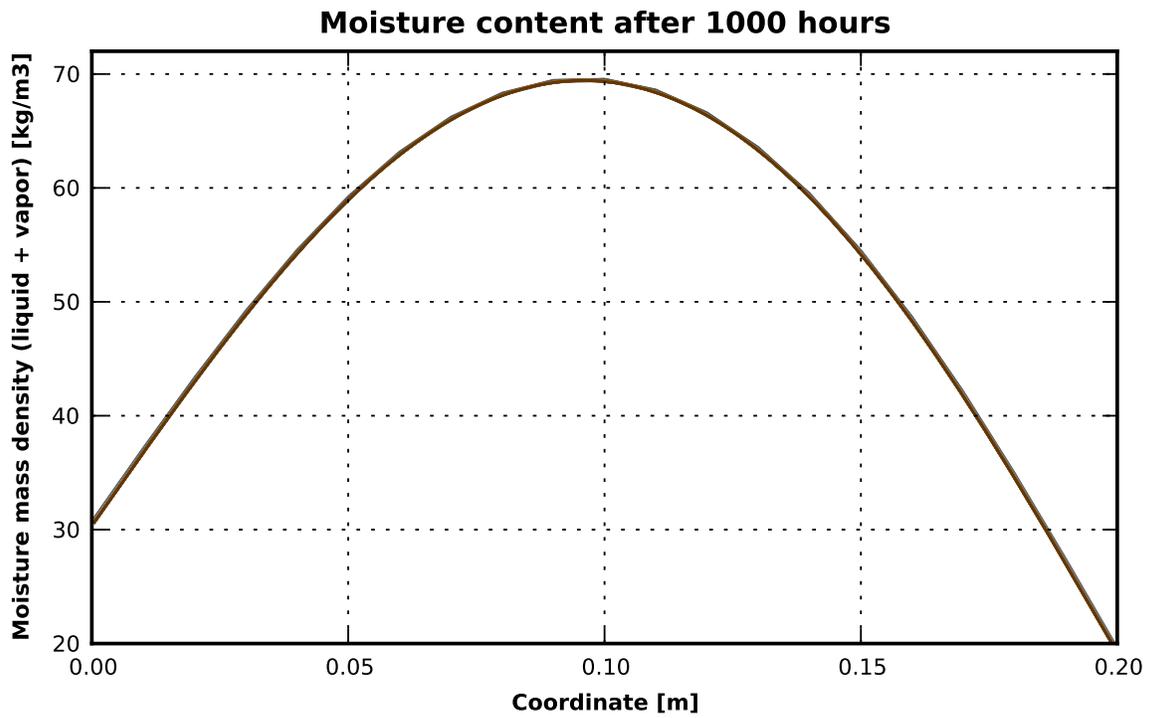


Abbildung 23: Feuchtemassendichte nach 1000 Stunden

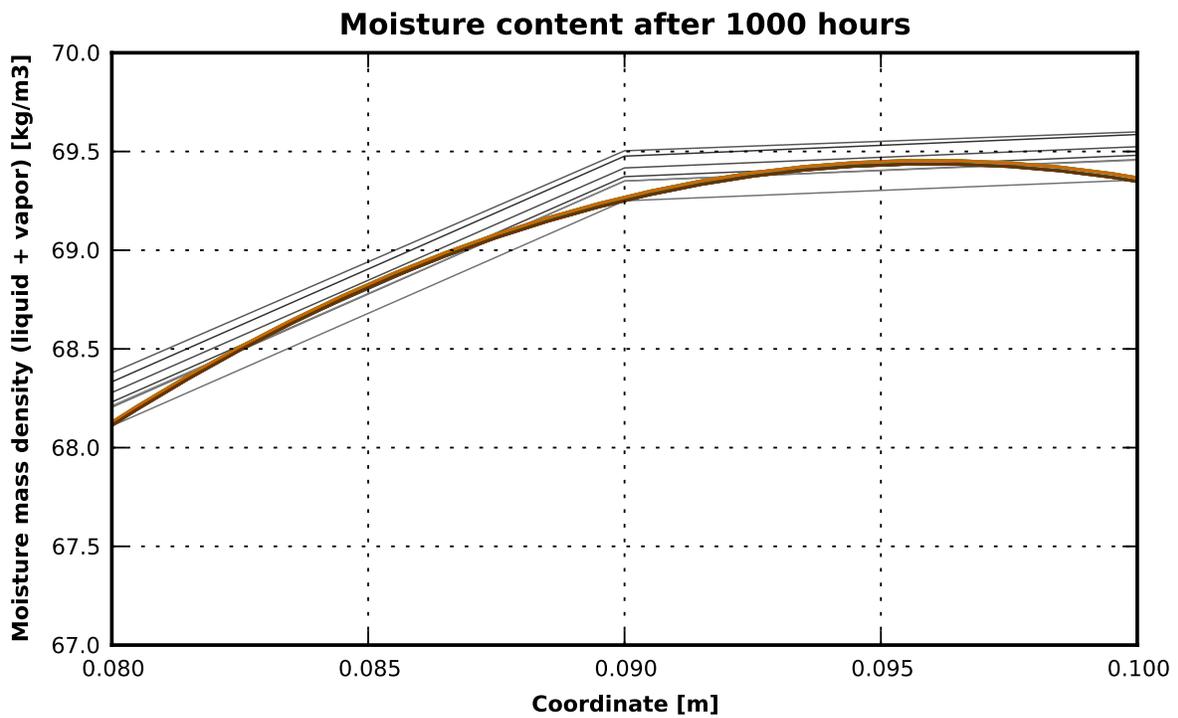


Abbildung 24: Feuchtemassendichte nach 1000 Stunden ,0.08 – 0.1 m

5 HAMSTAD Benchmark 3

Im HAMSTAD Benchmark 3 wird der gekoppelte Wärme-, Feuchte- und Lufttransport durch eine einschichtige Konstruktion untersucht. Von besonderer Bedeutung ist hierbei der Luftstrom durch die Konstruktion infolge eines Luftdruckgradienten. Während die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeiten als konstant angenommen werden, ändert sich der Luftdruckgradient mit der Zeit. Infolge der klimatischen Unterschiede zwischen der Innen- und Außenseite kommt es außerdem zum Feuchtetransport im Material. Es handelt sich hierbei um eine eindimensionale instationäre Simulation.

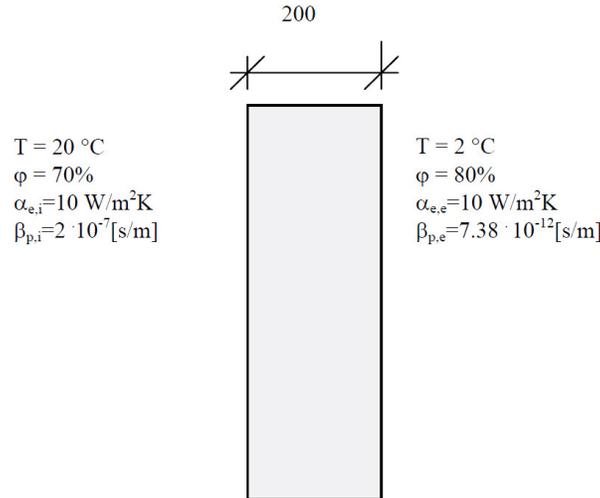


Abbildung 25: Konstruktionsaufbau HAMSTAD Benchmark 3 [Ham02]

5.1 Materialdaten

Ein Beispiel zur Generierung der Materialdatei aus denen im Benchmark angegebenen Daten ist in Kapitel 2 beschrieben. Die darin beschriebene Vorgehensweise kann auch auf dieses Material angewendet werden. Die Schichtdicke für das Material beträgt 0.2 m.

Im Gegensatz zu dem Beispiel aus Kapitel 2 wird hier auch der Lufttransport berücksichtigt, so dass weitere Materialeigenschaften mit angegeben werden müssen. Lufttransport findet immer von Bereichen mit höherem Luftdruck zu Bereichen mit geringerem Luftdruck statt (siehe Abbildung 26). Die resultierende Luftmassenstromdichte j^a wird in *Delphin* wie folgt berechnet:

$$j^a = -K_g \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \text{ [kg/m}^2\text{s]} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} j^a & : \text{Luftmassenstromdichte [kg/m}^2\text{s]} \\ K_g & : \text{Gaspermeabilität [s]} \\ p & : \text{Luftdruck [Pa]} \end{aligned}$$

Die Gaspermeabilität K_g ist ein materialspezifischer Parameter und muss in der Materialdatei angegeben werden. Im HAMSTAD Benchmark 3 ist die Gaspermeabilität nicht direkt gegeben, sondern muss berechnet werden. Zur Erläuterung der Berechnungsweise ist die Skizze in Abbildung 26 zu betrachten.

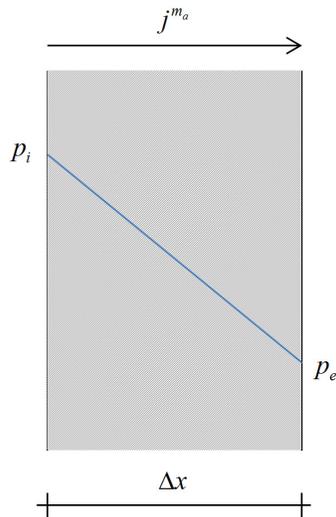


Abbildung 26: Luftdruckdifferenz über eine Konstruktion mit der Schichtdicke Δx

Die Luftmassenstromdichte j^a für eine Konstruktion mit einer Schichtdicke von Δx wird mit Hilfe der Formel (13) wie folgt berechnet:

$$j^a = -K_g \cdot \left(\frac{p_i - p_e}{\Delta x} \right)$$

$$K_g = \frac{j^a \cdot \Delta x}{p_i - p_e} \quad (14)$$

Im HAMSTAD Benchmark dagegen wird die Luftmassenstromdichte wie folgt definiert:

$$j^a = \rho_a \cdot C \cdot (p_i - p_e) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \rho_a &: \text{Luftdichte} &= 1.243 \text{ kg/m}^3 \\ C &: \text{Volumenstrom} &= 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sPa} \end{aligned}$$

Durch Einsetzen der Formel (15) in die Gleichung (14) ergibt sich für die Gaspermeabilität K_g :

$$\begin{aligned} K_g &= \rho_a \cdot C \cdot \Delta x \\ &= 1.243 \text{ kg/m}^3 \cdot 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sPa} \cdot 0.2 \text{ m} \\ &= 7.46 \cdot 10^{-6} \text{ s} \end{aligned}$$

In der Materialdatei wird die Gaspermeabilität als konstanter Wert angegeben (siehe Abbildung 27).

```
[TRANSPORT_BASE_PARAMETERS]
...
KG          = 7.4626E-06 s
```

Abbildung 27: Auszug Materialdatei HAMSTAD Benchmark 3

5.2 Klimadaten und Randbedingungen

5.2.1 Klimadaten

Für den HAMSTAD Benchmark 3 sind konstante Klimadaten für die Umgebungstemperatur, sowie die relative Luftfeuchtigkeit gegeben. Der Luftstrom wird durch einen Luftdruckunterschied zwischen der Innen- und Außenseite der Konstruktion angetrieben, welches sich im Verlauf der Simulation einmal sprunghaft ändert. In Abbildung 28

ist der gegebene Luftdruckunterschied zwischen Innen- und Außenseite der Konstruktion dargestellt. Dieser Verlauf muss in eine Klimadatei geschrieben werden, damit diese von *Delphin* eingelesen werden kann.

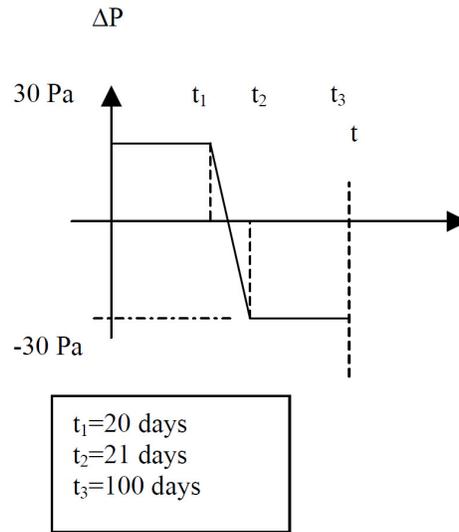


Abbildung 28: Randbedingung Luftdruckdifferenz [Ham02]

Dafür wird die Umgebungsluft für innen und außen mit dem Normaldruck (101325 Pa) definiert. Während der Luftdruck an der Außenseite als konstant angenommen wird, muss für die Innenseite eine Klimadatei mit den Änderungen des Luftdrucks erstellt werden. Dazu wird vom Normaldruck die gegebene Luftdruckdifferenz abgezogen bzw. dazu addiert. Die Klimadatei für den Luftdruck an der Innenseite der Konstruktion ist in Abbildung 29 zu sehen. Es ist darauf zu achten, dass die Zwischenwerte von *Delphin* linear interpoliert werden.

GASPRESS Pa		
0	00:00:00	101355
20	00:00:00	101355
21	00:00:00	101295
100	00:00:00	101295

Abbildung 29: Klimadatei Luftdruckdifferenz

In Tabelle 17 sind die Klimadaten aus dem HAMSTAD Benchmark 3 jeweils für innen und außen in einer Übersicht dargestellt.

	T_e [°C]	φ [%]	p [Pa]
Innen	20	70	dynamisch
Außen	2	80	101325

Tabelle 17: Klimabedingungen HAMSTAD Benchmark 3

5.2.2 Randbedingungen

Die Wärmeübergangskoeffizienten α_e und Wasserdampfübergangskoeffizienten β_p sind in Tabelle 18 dargestellt. Für den Luftübergangskoeffizient β_a wird die Voreinstellung von *Delphin* übernommen.

	α_e [W/m ² K]	β_p [s/m]	β_a [s/m]
Innen	10	$2 \cdot 10^{-7}$	1000
Außen	10	$7.38 \cdot 10^{-12}$	1000

Tabelle 18: Übergangskoeffizienten HAMSTAD Benchmark 3

Damit können die Randbedingungen für Wärmeleitung, Wasserdampfdiffusion und Lufttransport jeweils an der Innen- und Außenseite definiert werden. Tabelle 19 zeigt die Randbedingungen, inklusive der dazugehörigen physikalischen Parameter und Klimadaten.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung	Austauschkoeffizient	innen	$\alpha_{e,i}$	$T_{eq,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\alpha_{e,e}$	$T_{eq,e}$
Wasserdampfdiffusion	Austauschkoeffizient	innen	$\beta_{p,i}$	$T_{eq,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\beta_{p,e}$	φ_i $T_{eq,e}$
Luftkonvektion	Austauschkoeffizient	innen	$\beta_{a,i}$	φ_e $T_{eq,i}$
				φ_i
	Austauschkoeffizient	außen	$\beta_{a,e}$	p_i $T_{eq,e}$
				φ_e p_e

Tabelle 19: Randbedingungen HAMSTAD Benchmark 3

5.2.3 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingungen sind eine Temperatur T und eine relative Luftfeuchtigkeit φ für die gesamte Konstruktion gegeben (siehe Tabelle 20).

	φ [%]	T [°C]
Material A	95	20

Tabelle 20: Anfangsbedingungen HAMSTAD Benchmark 3

5.3 Validierungsrechnung

5.3.1 Ausgabe

Laut Benchmark beträgt die Simulationszeit 2400 Stunden. Dabei werden stündliche Ausgaben von den folgenden physikalischen Größen erstellt:

- Feuchtemassendichte w in [kg/m³] in verschiedenen Stellen der Konstruktion: 0.05 m, 0.1 m, 0.15 m, 0.17 m und 0.19 m
- Temperatur T in [°C] in verschiedenen Stellen der Konstruktion: 0.05 m, 0.1 m, 0.15 m, 0.17 m und 0.19 m

5.3.2 Solverparameter

Tabelle 21 gibt eine Übersicht über die eingestellten Solverparameter für den HAMSTAD Benchmark 3.

Solver Einstellungen	
Maximaler Zeitschritt	30 min
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m ³
Absolute Toleranz Feuchte	10^{-6} kg/m ³
Absolute Toleranz Luft	10^{-6} kg/m ³

Tabelle 21: Solverparameter HAMSTAD Benchmark 3

5.3.3 Diskretisierung

Es wird mit einer äquidistanten Diskretisierung von 1 mm gerechnet.

5.3.4 Ergebnisse

Verglichen werden die Ergebnisse mit den numerischen Lösungen von:

- 03 Technion Israel Institute of Technology
- 04 Chalmers University of Technology
- 06 National Research Council of Canada
- 08 Technische Universität Dresden (Delphin 4)

Tabelle 22: Legendenummerierung HAMSTAD Benchmark 3

Es werden die Simulationsergebnisse von *Delphin 5.6*, *5.8*, *6.0* und *6.1* farblich hervorgehoben, während die Vergleichsergebnisse grau dargestellt sind.

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf bei 0.05 m

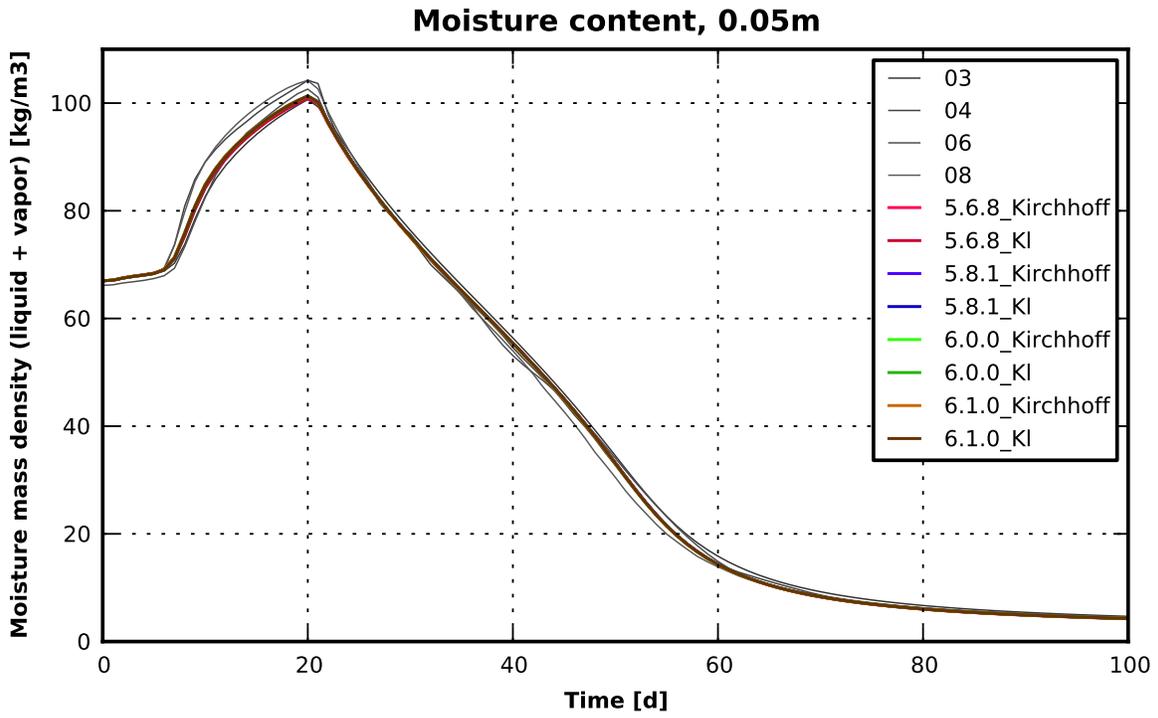


Abbildung 30: Feuchtegehalt bei 0.05m

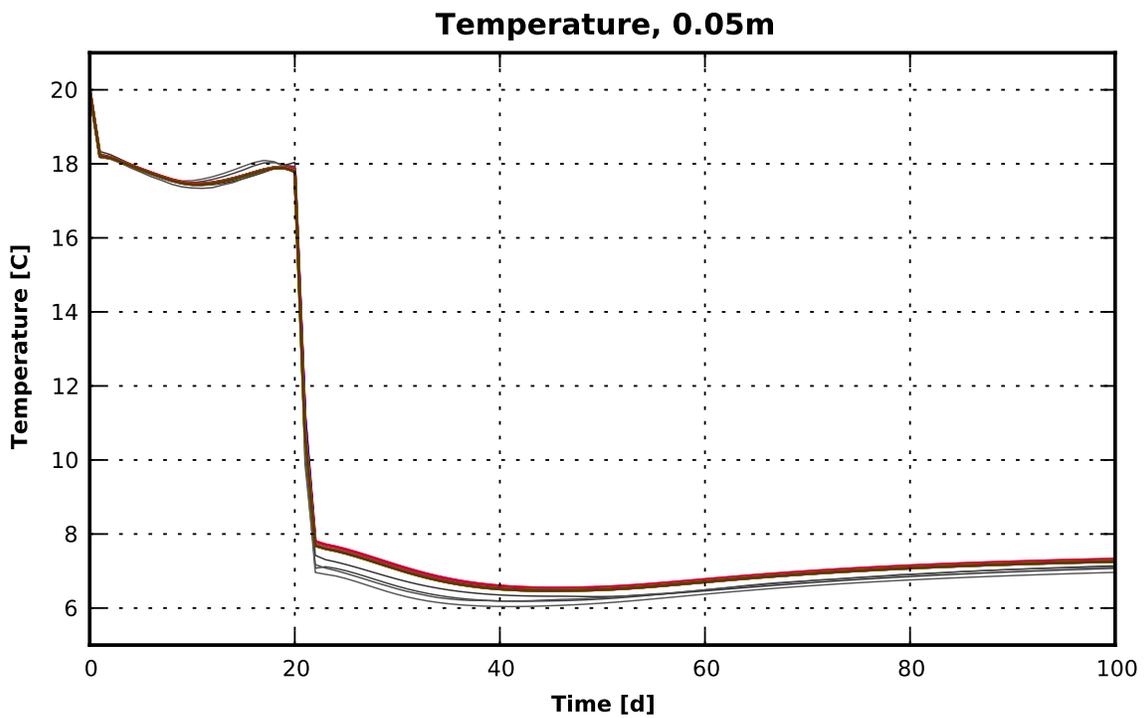


Abbildung 31: Temperatur bei 0.05m

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf bei 0.10 m

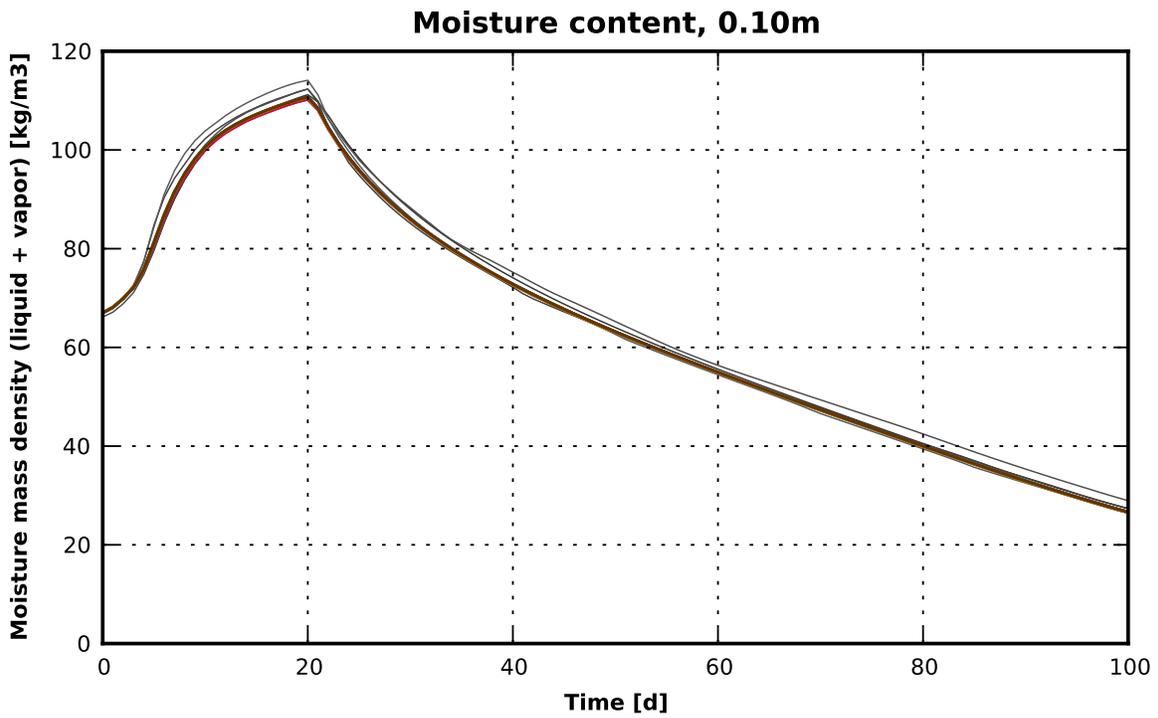


Abbildung 32: Feuchtegehalt bei 0.10m

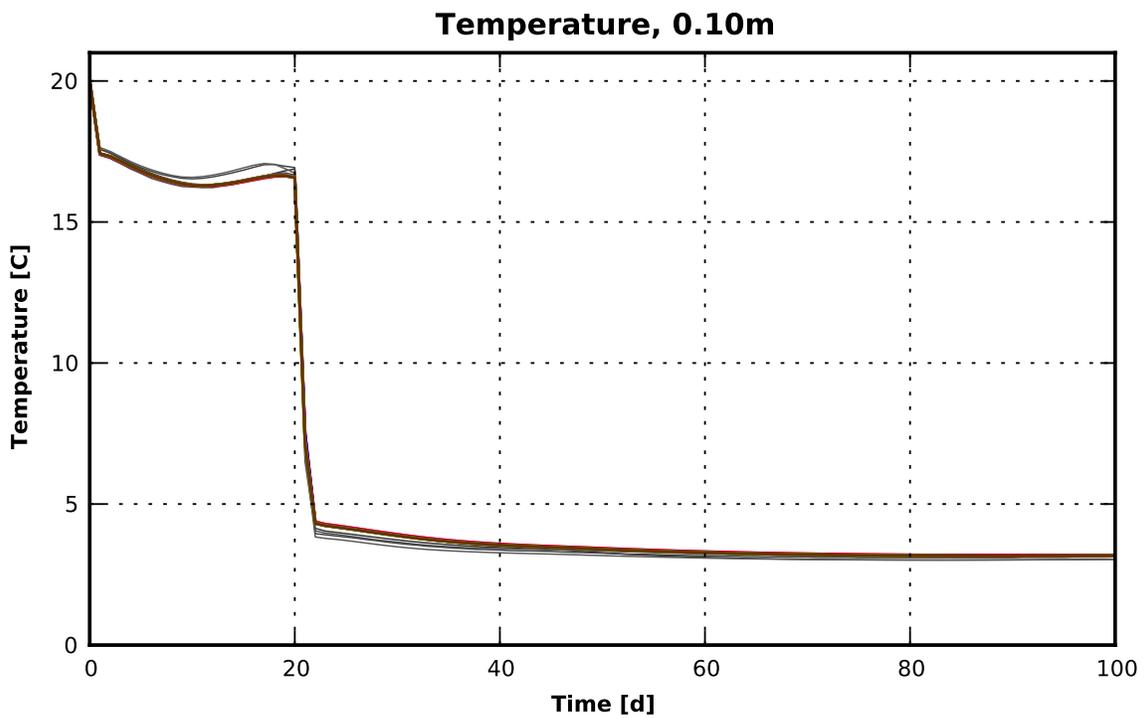


Abbildung 33: Temperatur bei 0.10m

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf bei 0.15 m

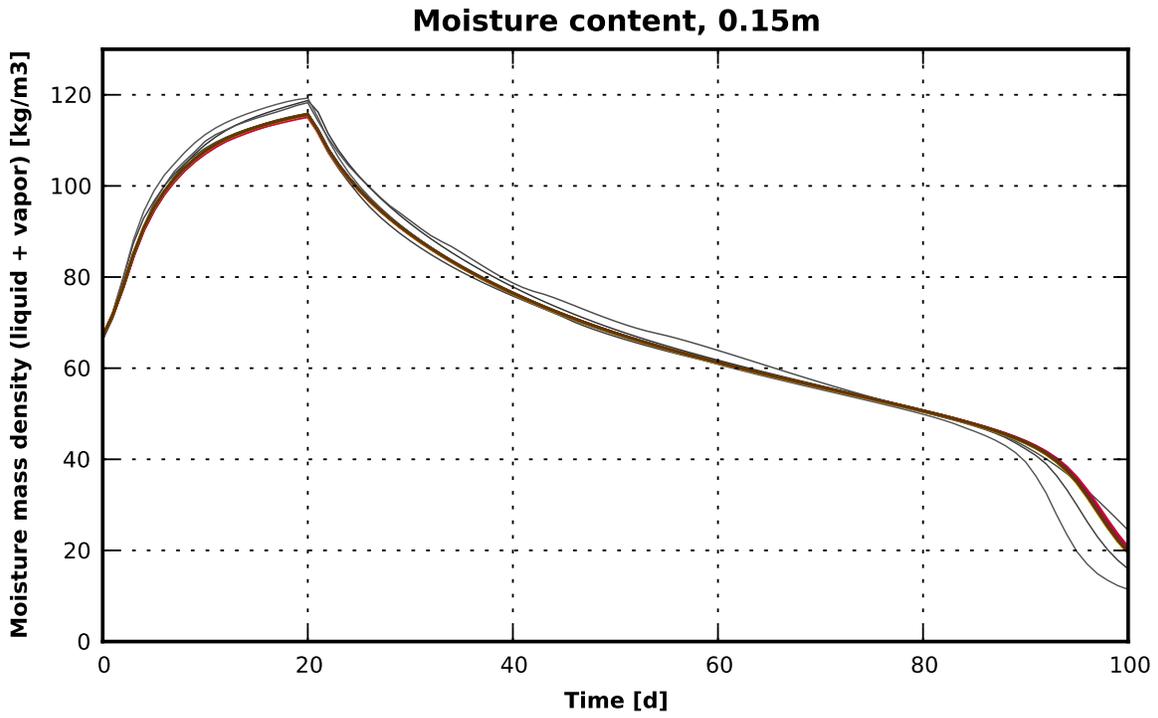


Abbildung 34: Feuchtegehalt bei 0.15m

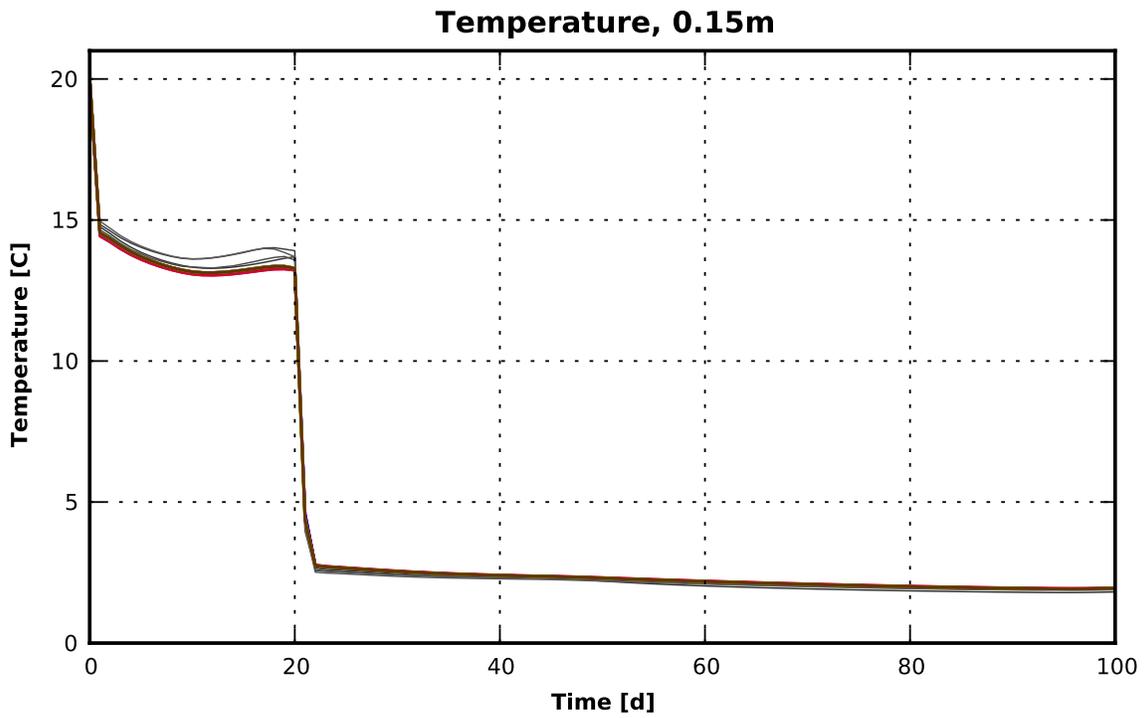


Abbildung 35: Temperatur bei 0.15m

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf bei 0.17 m

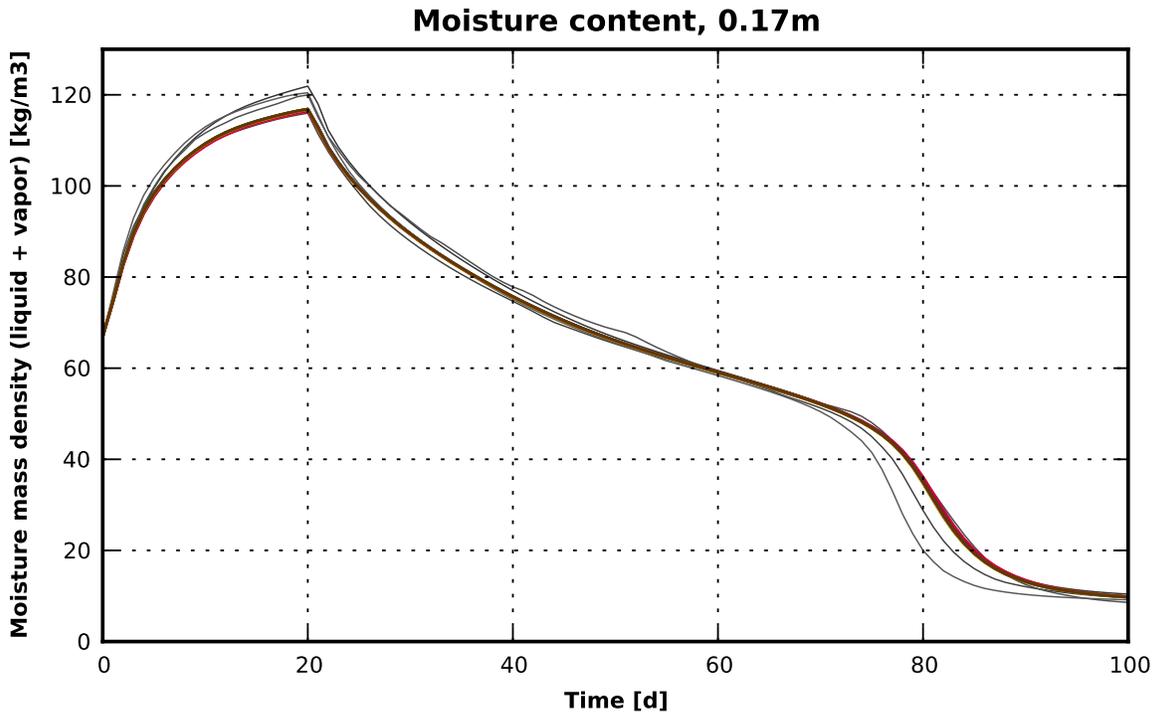


Abbildung 36: Feuchtegehalt bei 0.17m

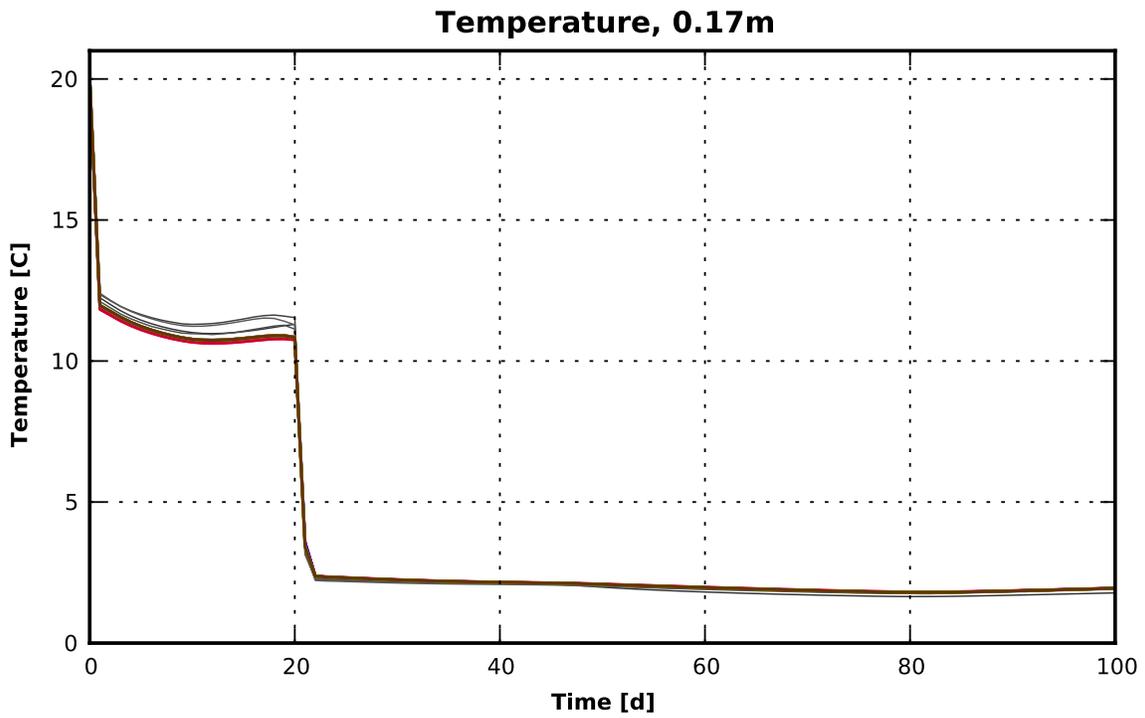


Abbildung 37: Temperatur bei 0.17m

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf bei 0.19 m

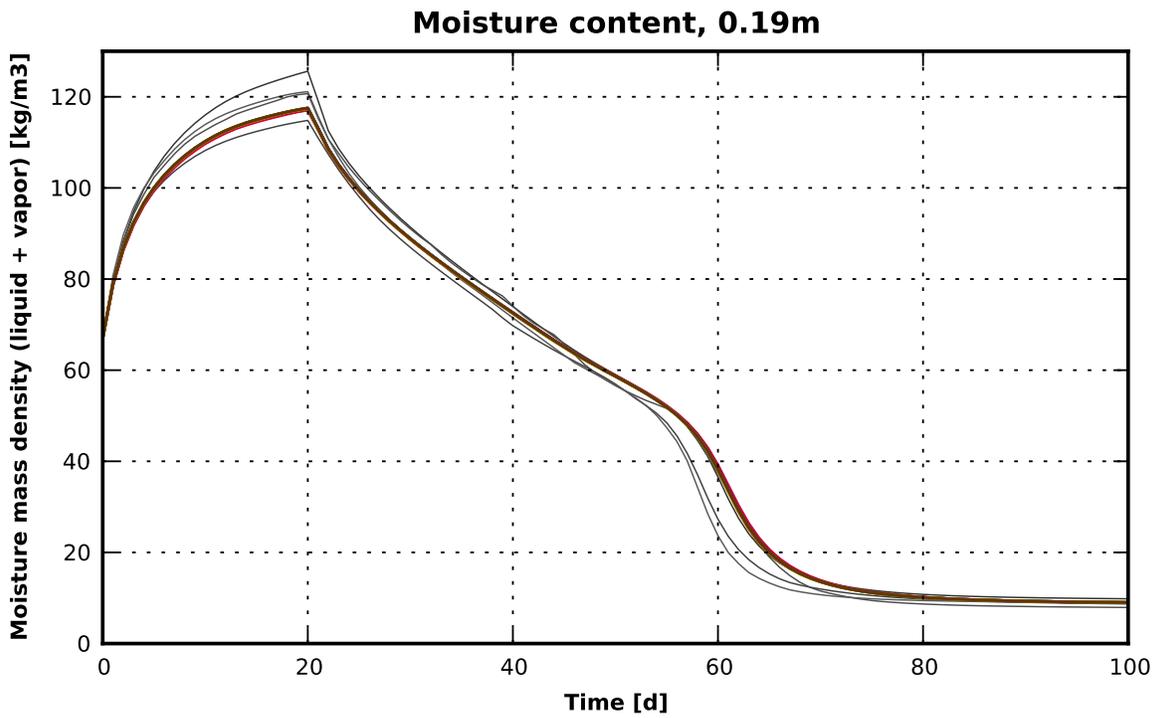


Abbildung 38: Feuchtegehalt bei 0.19m

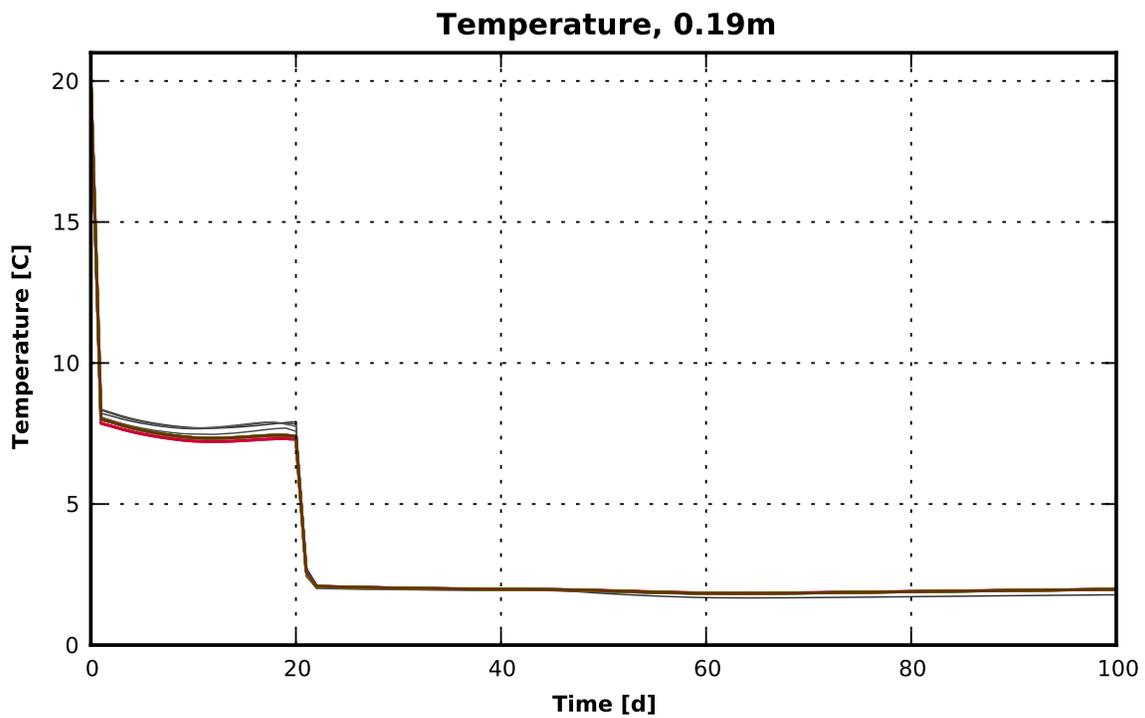


Abbildung 39: Temperatur bei 0.19m

6 HAMSTAD Benchmark 4

Im HAMSTAD Benchmark 4 wird eine zweischichtige Wand mit dynamischen Klimabedingungen untersucht. Die Konstruktion besteht aus einer lasttragenden Schicht und einer hygroskopischen Wandverkleidung auf der Innenseite. Infolge einer Regenbelastung an der Außenseite dringt Feuchtigkeit in die Konstruktion ein. Die Besonderheit bei diesem Benchmark ist die Modellierung dieser Feuchtebelastung. Die Konstruktion wird als luftdicht angenommen. Es wird somit nur der Wärme- und Feuchtetransport untersucht.

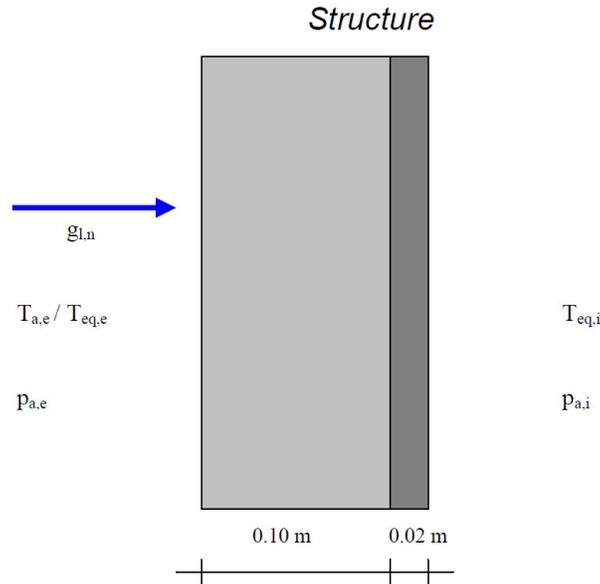


Abbildung 40: Konstruktionsaufbau HAMSTAD Benchmark 4 [Ham02]

6.1 Materialdaten

Ein Beispiel zur Generierung der Materialdatei aus denen im Benchmark angegebenen Daten ist in Kapitel 2 beschrieben. Die darin beschriebene Vorgehensweise kann auch auf die Materialien des HAMSTAD Benchmarks 4 angewendet werden. Es ist jedoch auf folgende Besonderheit bei der Materialgenerierung zu achten:

Material A: Lasttragende Schicht

Die Flüssigwasserleitfähigkeit K_l ist als Datentabelle mit den Werten $\log p_c$ und $\log K_l$ vorgegeben. Die Werte für $\log p_c$ müssen daher erst mit Hilfe der Saugspannungskurve in den Feuchtegehalt θ_l umgerechnet werden. Die Interpolation der Werte soll mit den logarithmischen Werten erfolgen.

Die Schichtdicke für die lasttragende Schicht beträgt 0.1 m und für die hygroskopische Wandverkleidung 0.02 m.

6.2 Klimadaten und Randbedingungen

6.2.1 Klimadaten

Als Klimadaten sind die Umgebungstemperaturen T_{eq} und die Wasserdampfdrücke p_a für jeweils innen und außen gegeben. Die Klimadaten sind als stündliche Werte abgebildet und sollen sich dabei sprunghaft ändern, d. h. es wird keine lineare Interpolation angewendet.

Die Besonderheit des Benchmarks stellt die Modellierung der Regenbedingung dar. Gegeben ist eine Massenstromdichte g_l und eine konstante Umgebungstemperatur T_a . Zu beachten ist, dass solange der Regen auf die Oberfläche trifft, die Regentemperatur an der Oberfläche anliegen soll. Daher soll auch dann, wenn die Bauteiloberfläche bereits gesättigt ist und kein Regen mehr in die Konstruktion eindringen kann, die Regentemperatur an der Oberfläche anliegen. Die Klimabedingungen sind der Tabelle 23 zu entnehmen.

	T_{eq} [°C]	p_a [Pa]	T_a [°C]	g_l [kg/m ² s]
Innen	20	dynamisch	-	-
Außen	dynamisch	1150	10	dynamisch

Tabelle 23: Klimabedingungen HAMSTAD Benchmark 4

Die dynamischen Klimadaten sind in den Abbildungen 41, 42 und 43 dargestellt.

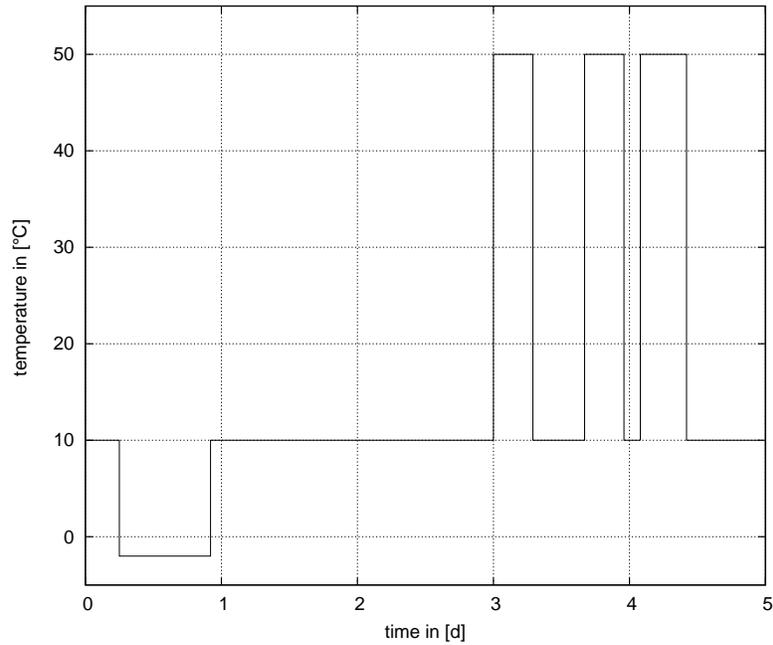


Abbildung 41: Außentemperatur HAMSTAD Benchmark 4

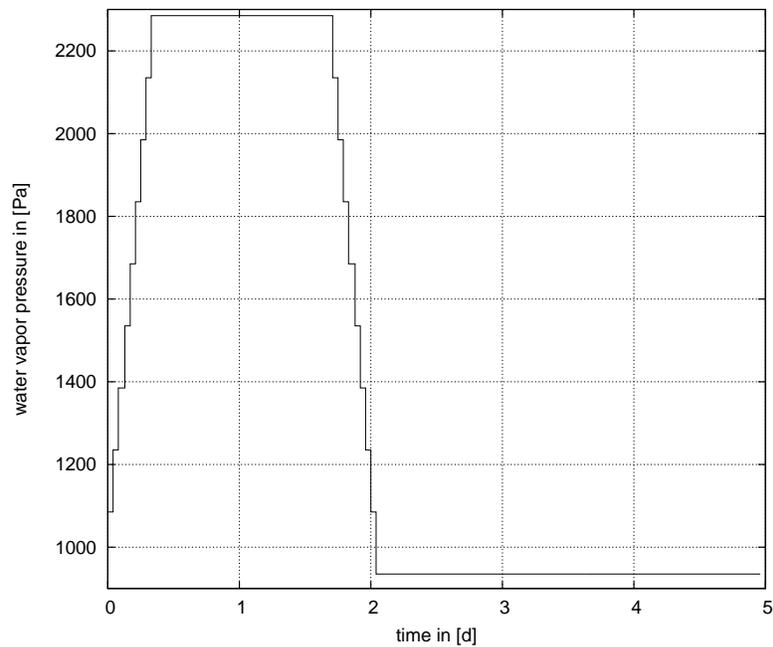


Abbildung 42: Wasserdampfdruck außen HAMSTAD Benchmark 4

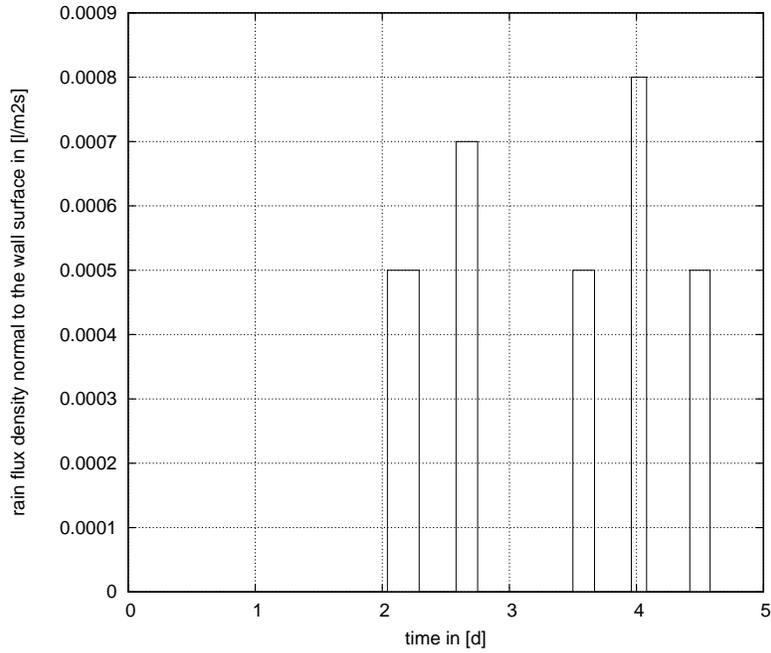


Abbildung 43: Aufgeprägte Feuchtemassendichte HAMSTAD Benchmark 4

6.2.2 Randbedingungen

Im HAMSTAD Benchmark 4 sind folgende Wärmeübergangskoeffizienten α_e und Wasserdampfübergangskoeffizient β_p jeweils für innen und außen gegeben:

	α_e [W/m ² K]	β_p [s/m]
Innen	8	$3 \cdot 10^{-8}$
Außen	25	$2 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 24: Übergangskoeffizienten HAMSTAD Benchmark 4

Mit Hilfe der Klimadaten und der Übergangskoeffizienten können nun die Randbedingungen definiert werden. Da es sich um einen gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport handelt, müssen die Randbedingungen Wärmeleitung und Wasserdampfdiffusion für innen und außen festgelegt werden. Zusätzlich muss für die Feuchtebelastung an der Außenseite die Randbedingung Regen definiert werden. Die relative Luftfeuchtigkeit wird während der Regenereignisse mit 100 % angesetzt. Tabelle 25 zeigt die verwendeten Randbedingungen und die dazugehörigen physikalischen Parameter sowie Klimadaten.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung	Austauschkoeffizient	innen	$\alpha_{e,i}$	$T_{eq,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\alpha_{e,e}$	$T_{eq,e}$
Wasserdampfdiffusion	Austauschkoeffizient	innen	$\beta_{p,i}$	$T_{eq,i}$
				$p_{a,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\beta_{p,e}$	$T_{eq,e}$
Regen	Aufgeprägte Flussdichte	außen	k_{rain}	gl
			$T_{rain,min}$	$T_{a,e}$
			$j_{rain,min}^w$	$\varphi_e = 100\%$

Tabelle 25: Randbedingungen HAMSTAD Benchmark 4

Für die Regenparameter werden die Voreinstellungen von *Delphin* übernommen:

k_{rain}	: Belastungskoeffizient für Regen	= 1
$T_{rain,min}$: Minimale Regentemperatur (darunter fällt Regen als Schnee)	= -2°C
$J_{rain,min}^w$: Minimaler Regenvolumenstrom	= $0 \text{ l/m}^2\text{s}$

6.2.3 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingungen sind ein Kapillardruck p_c , die dazugehörigen Feuchtemassendichten w und eine Temperatur T für beide Materialien angegeben, wobei p_c und T für die Definition der Anfangsbedingungen verwendet werden.

	p_c [Pa]	w [kg/m ³]	T [K]
Material A	120738829	0.4	20
Material B		47.5	

Tabelle 26: Anfangsbedingungen HAMSTAD Benchmark 4

6.3 Validierungsrechnung

6.3.1 Ausgabe

Die Simulationszeitraum bei diesem Benchmark beträgt 5 Tage. Dabei sollen stündliche Ausgaben von den folgenden physikalischen Größen geschrieben werden:

- Feuchtemassendichte in [kg/m³] an der Innen- und Außenseite der Konstruktion
- Feuchtemassenverteilung in [kg/m³] über die gesamte Konstruktion
- Temperatur in [°C] an der Innen- und Außenseite der Konstruktion
- Temperaturfeld in [°C] über die gesamte Konstruktion

6.3.2 Solverparameter

Für den HAMSTAD Benchmark 4 wird mit folgenden Solvareinstellungen simuliert:

Solver Einstellungen	
Maximaler Zeitschritt	30 min
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m^3
Absolute Toleranz Feuchte	10^{-5} kg/m^3

Tabelle 27: Solverparameter HAMSTAD Benchmark 4

6.3.3 Diskretisierung

Die eindimensionale Simulation wird mit einer äquidistanten Diskretisierung von 0.5 mm gerechnet.

6.3.4 Ergebnisse

Verglichen werden die Ergebnisse mit den numerischen Lösungen von:

- 01 KU Leuven
- 03 Technion Israel Institute of Technology
- 04 Chalmers University of Technology
- 05 Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- 06 National Research Council of Canada
- 08 Technische Universität Dresden (Delphin 4)

Tabelle 28: Legendenummerierung HAMSTAD Benchmark 4

Es werden die Simulationsergebnisse von *Delphin 5.6*, *5.8*, *6.0* und *6.1* farblich hervorgehoben, während die Vergleichsergebnisse grau dargestellt sind.

Feuchtemassendichte an der Innenseite der Konstruktion

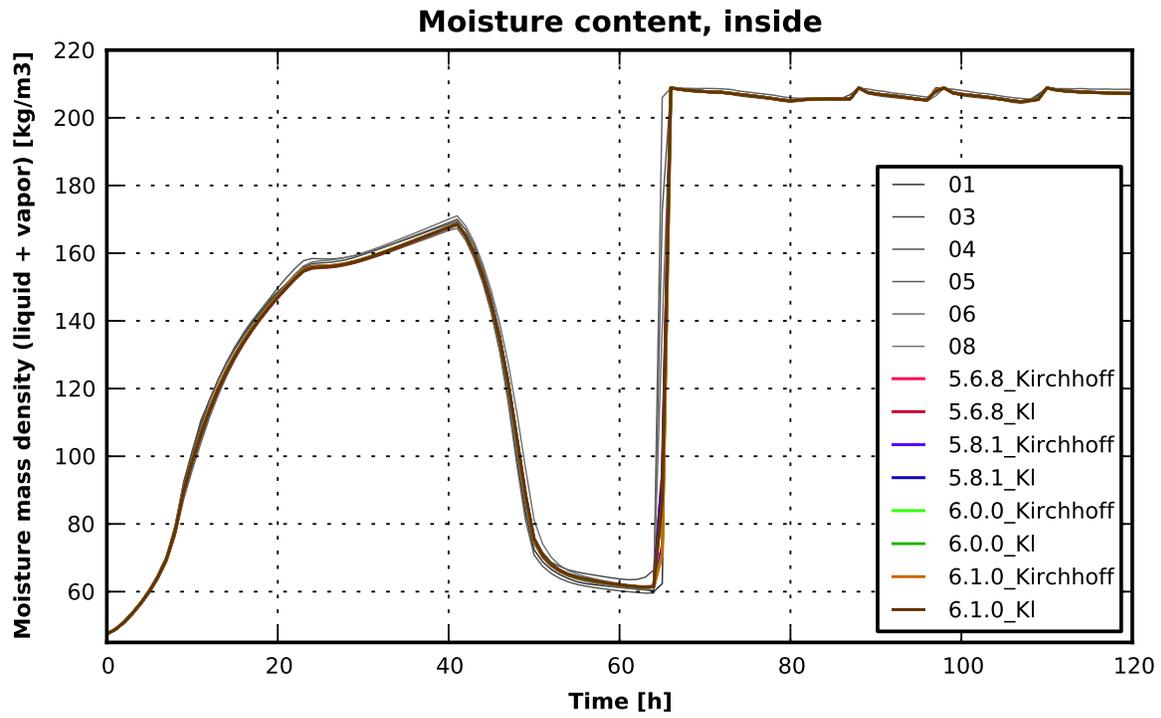


Abbildung 44: Feuchtemassendichte Innenseite

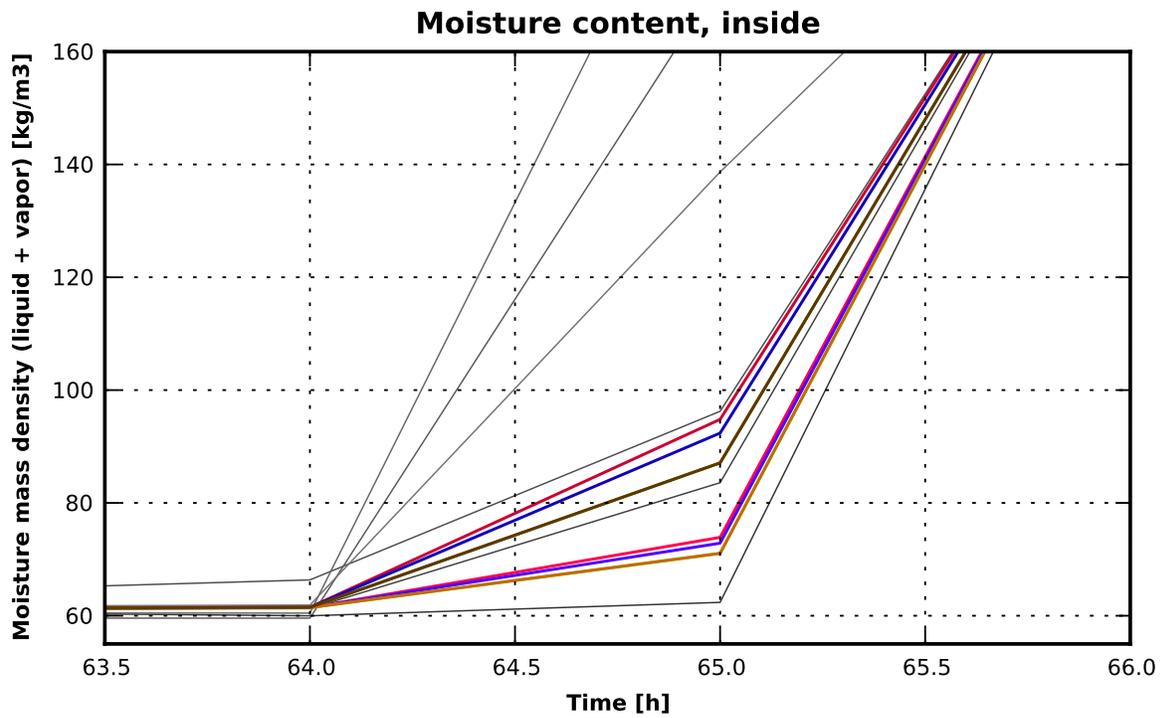


Abbildung 45: Ausschnitt Feuchtemassendichte Innenseite

Feuchtemassendichte an der Außenseite der Konstruktion

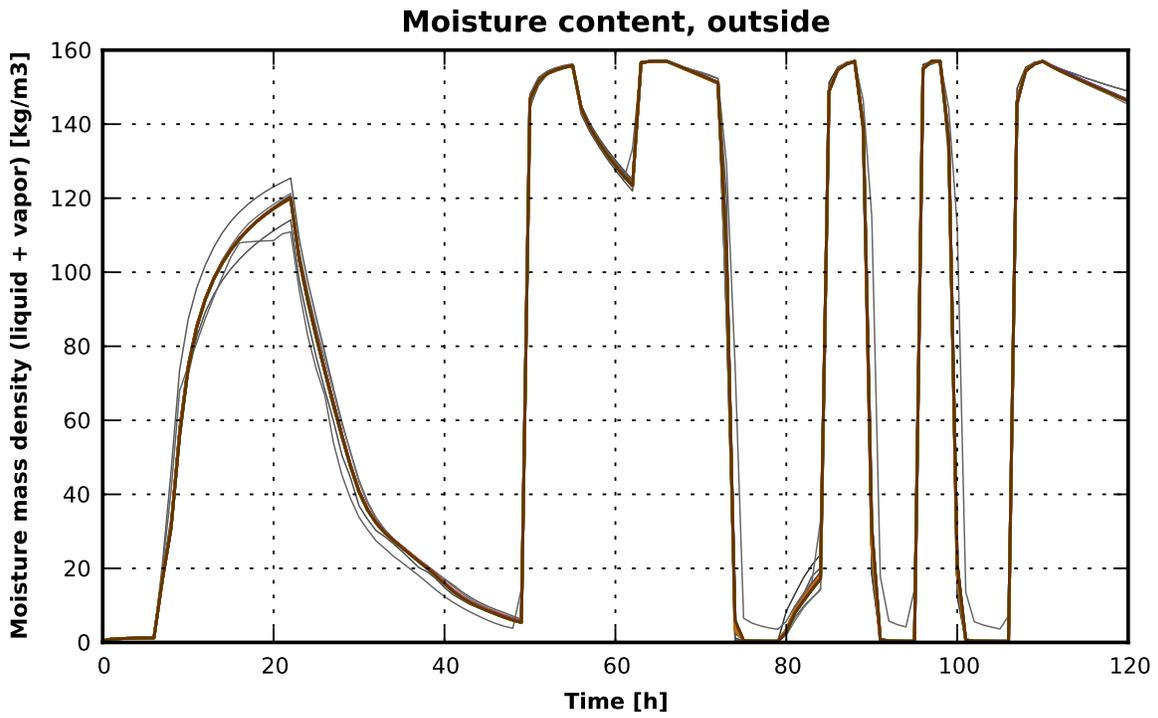


Abbildung 46: Feuchtemassendichte Außenseite

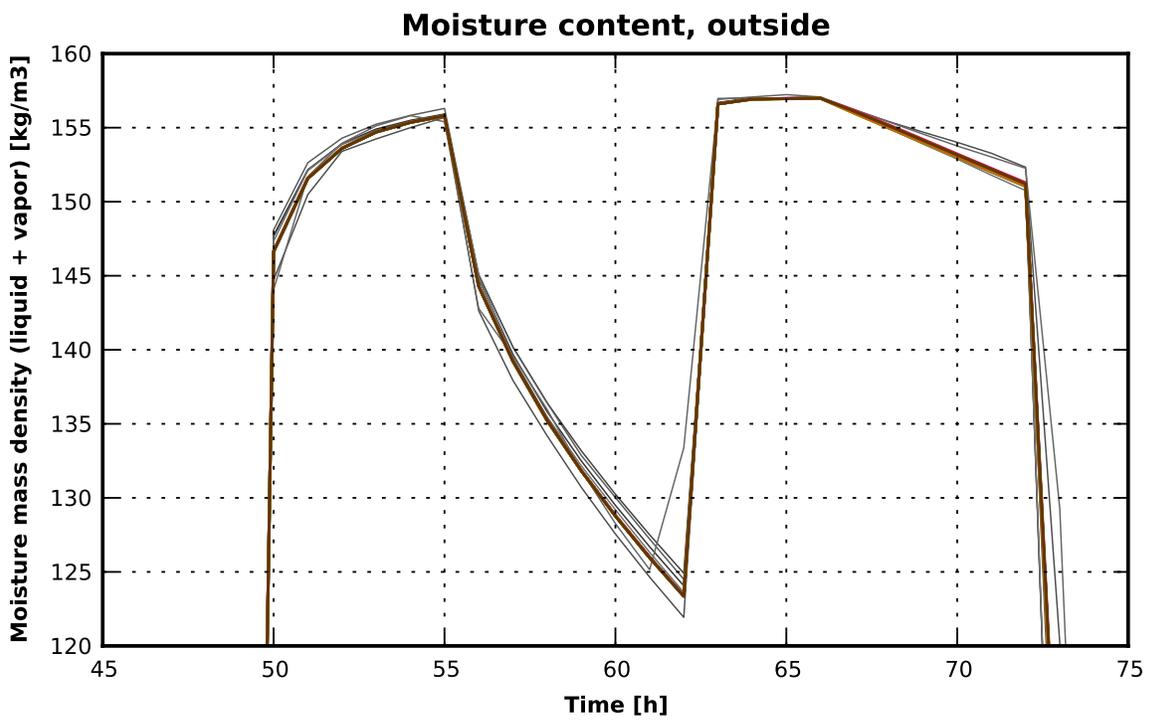


Abbildung 47: Ausschnitt Feuchtemassendichte Außenseite

Temperatur an der Innenseite der Konstruktion

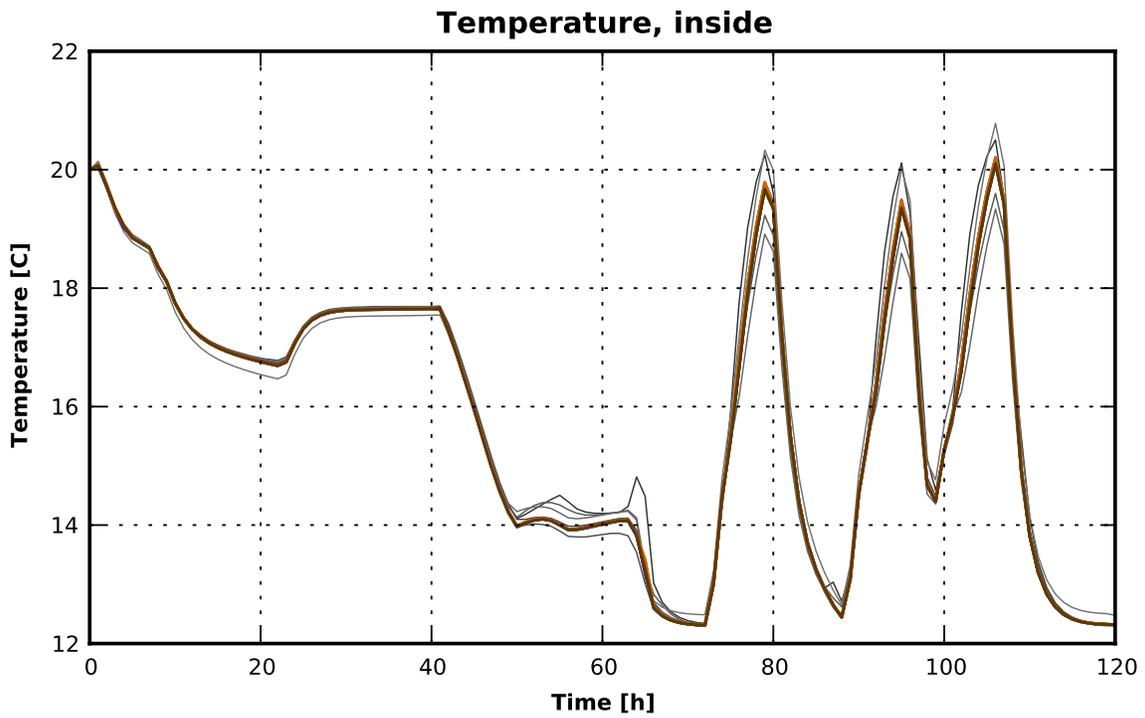


Abbildung 48: Temperatur Innenseite

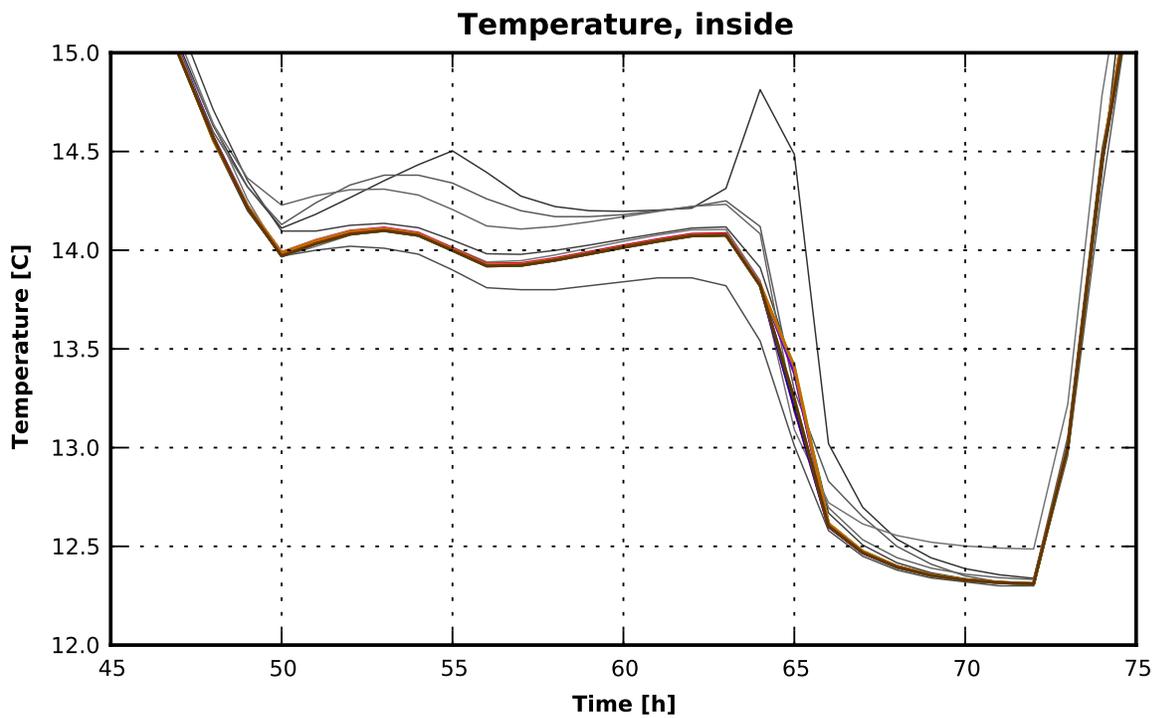


Abbildung 49: Ausschnitt Temperatur Innenseite

Temperatur an der Außenseite der Konstruktion

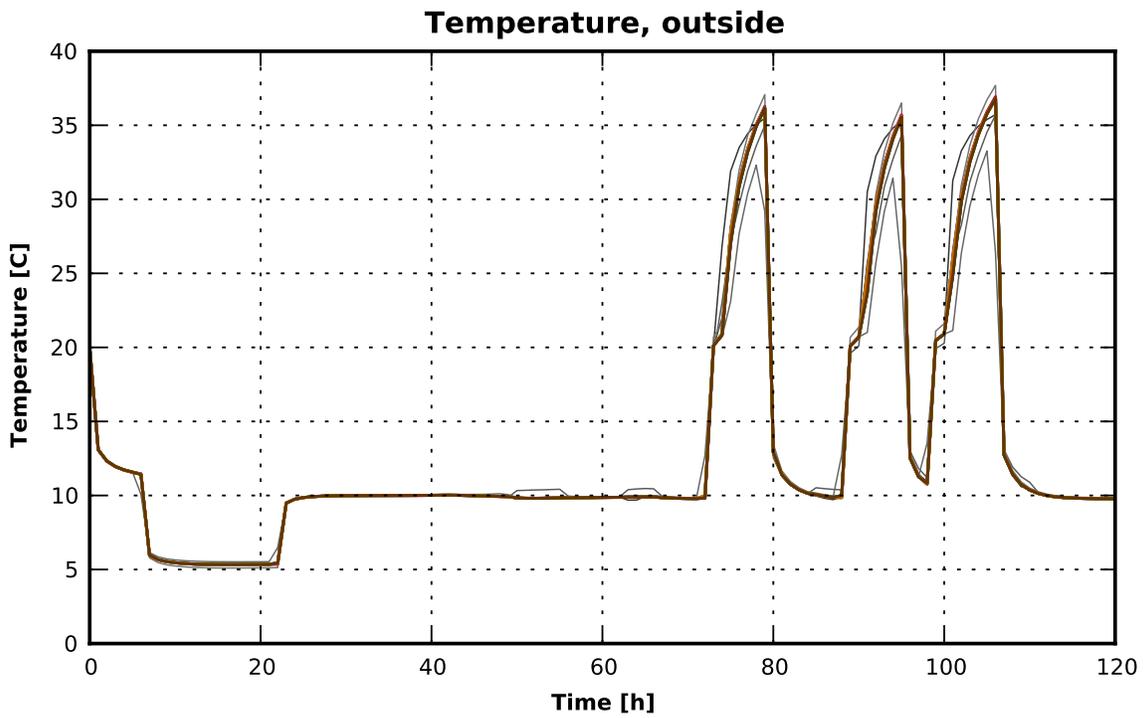


Abbildung 50: Temperatur Außenseite

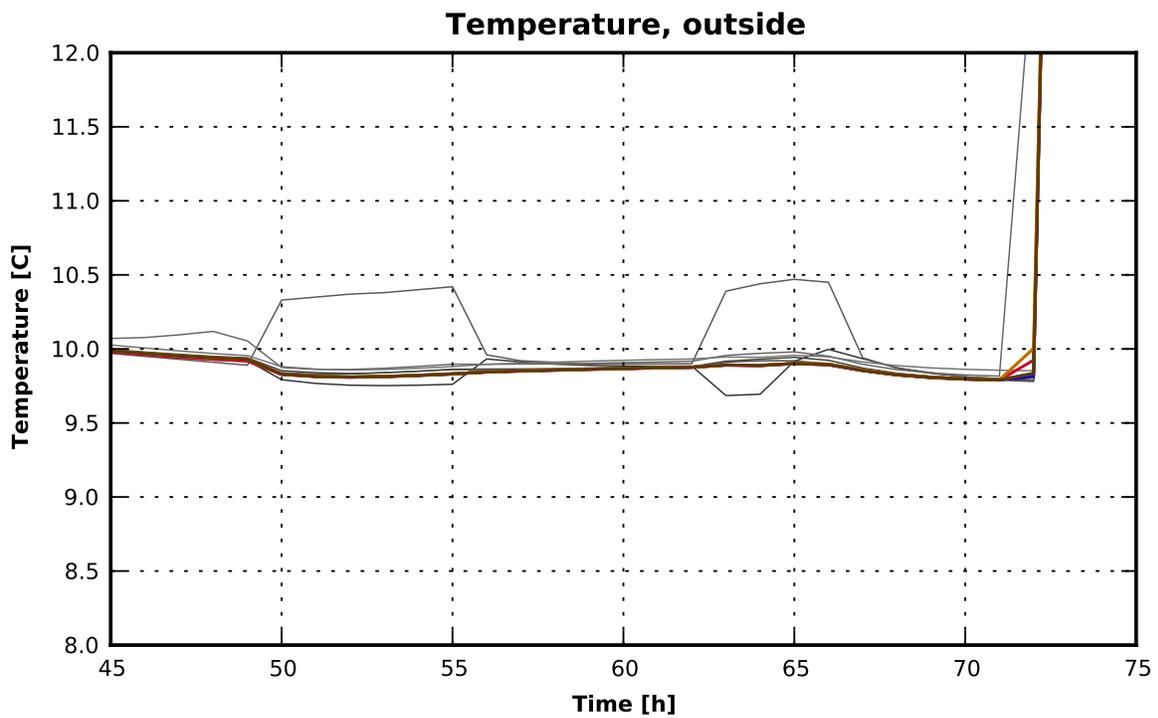


Abbildung 51: Ausschnitt Temperatur Außenseite

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf nach 12 Stunden

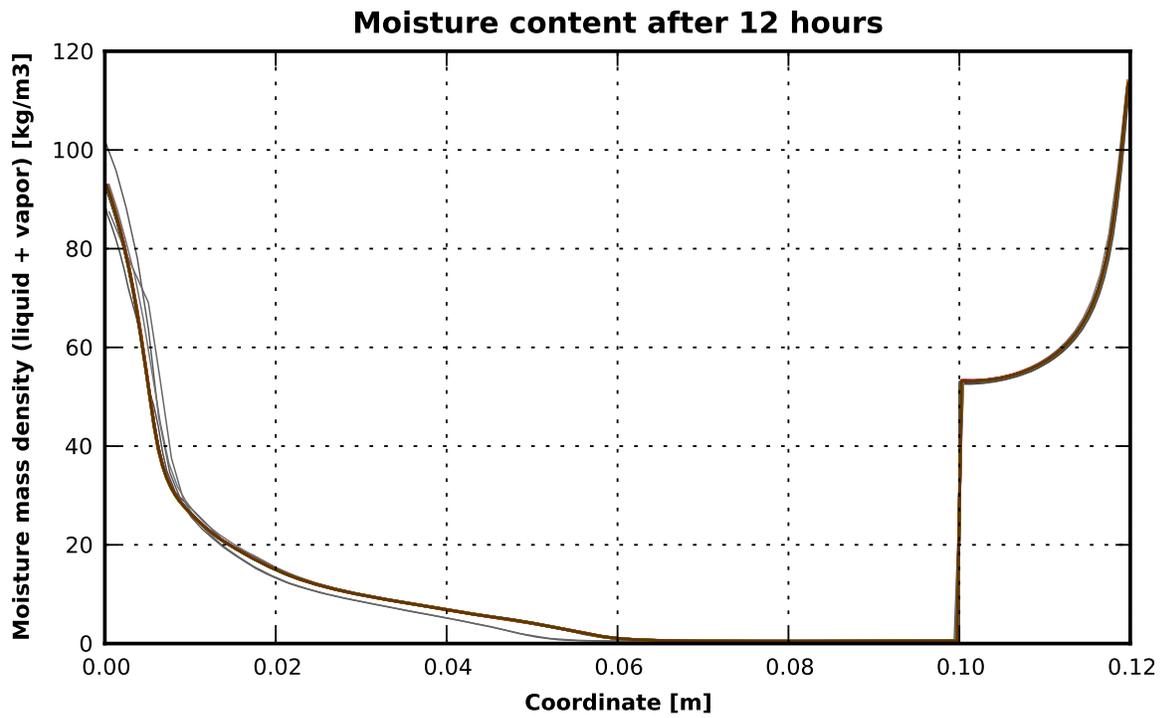


Abbildung 52: Feuchtemassendichte nach 12 Stunden

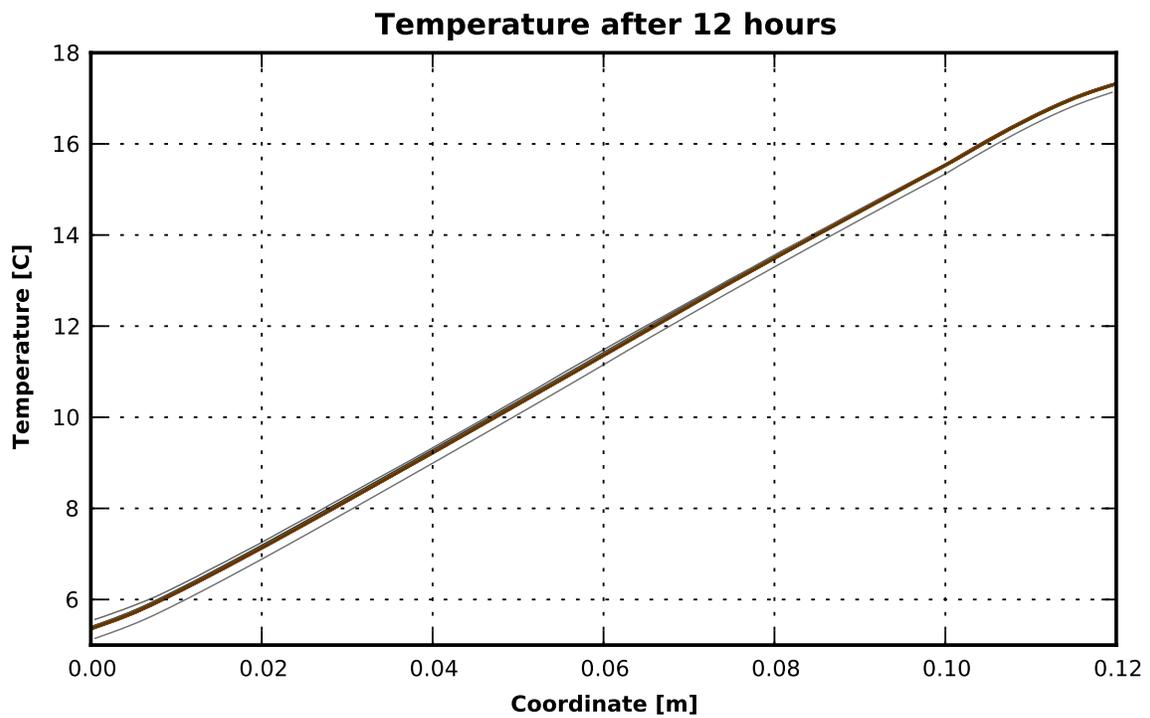


Abbildung 53: Temperatur nach 12 Stunden

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf nach 54 Stunden

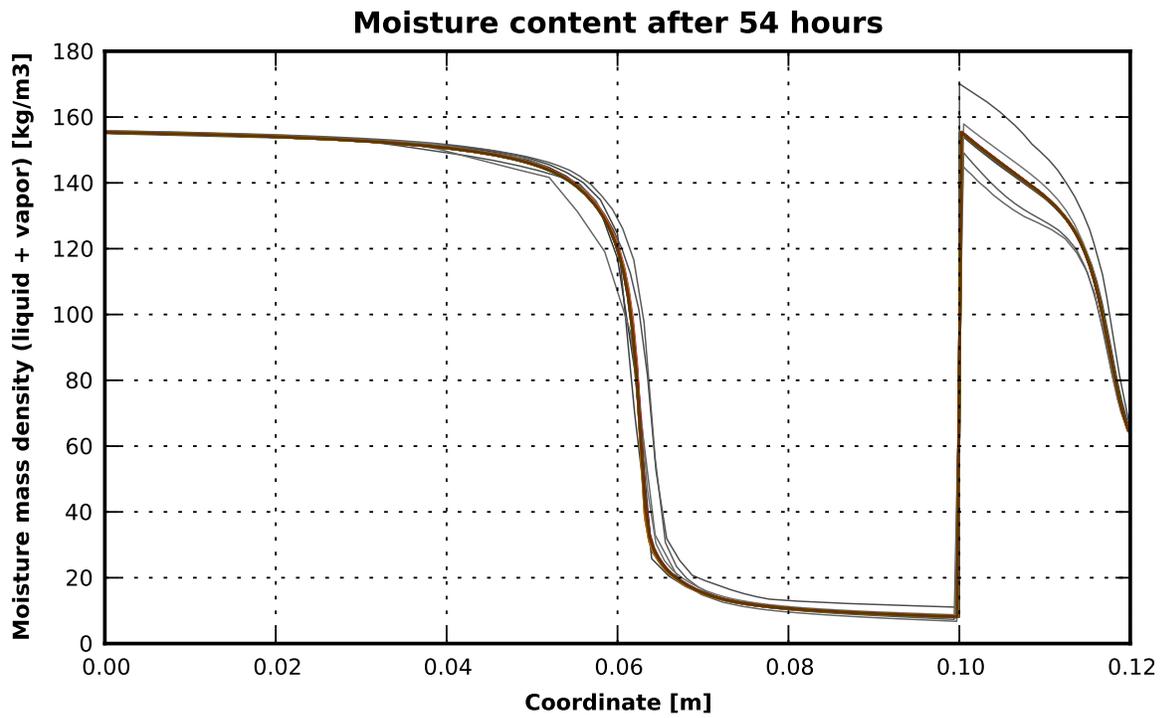


Abbildung 54: Feuchtemassendichte nach 54 Stunden

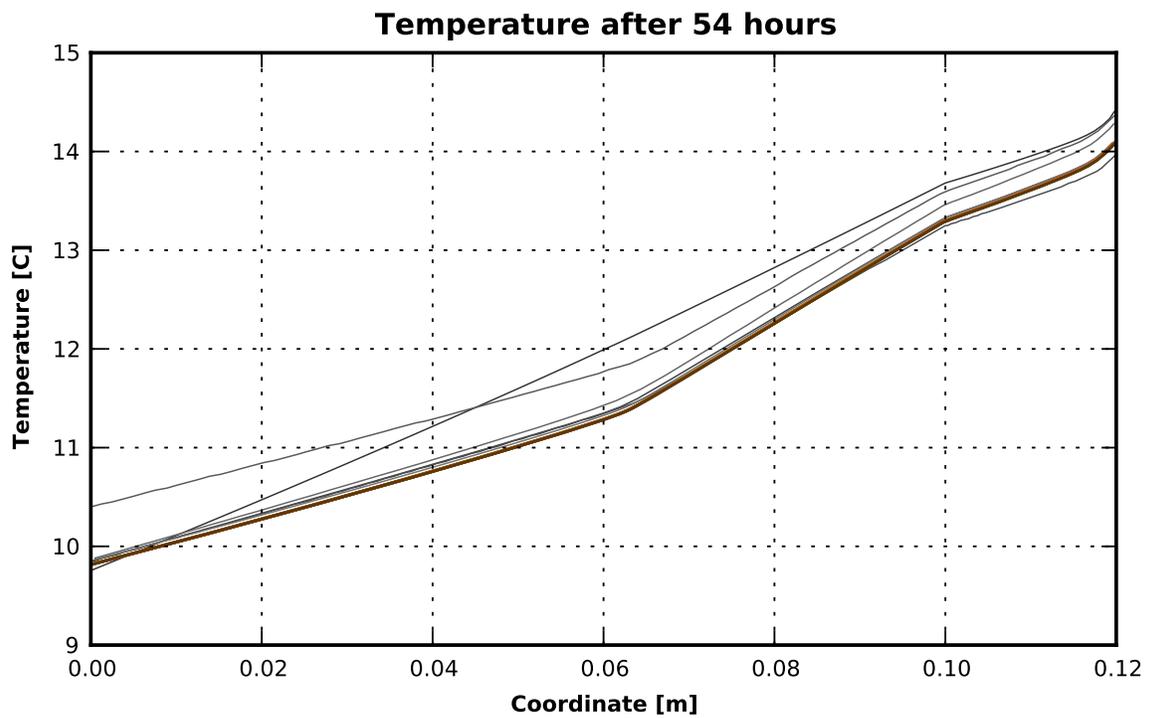


Abbildung 55: Temperatur nach 54 Stunden

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf nach 78 Stunden

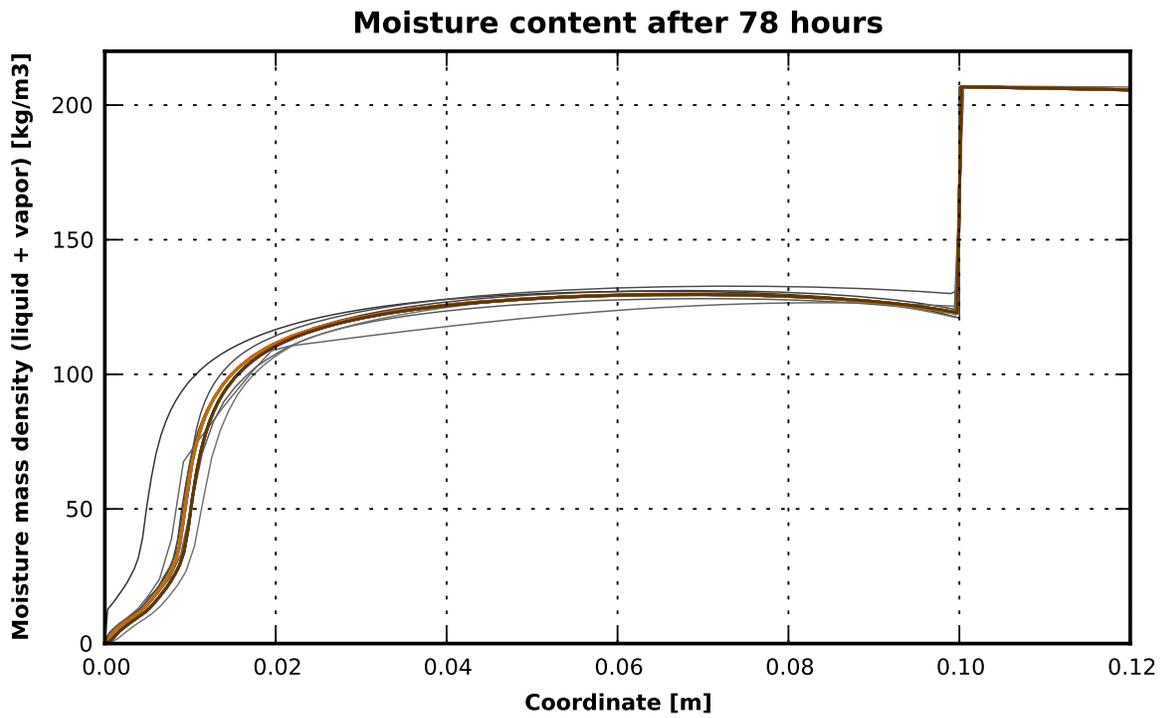


Abbildung 56: Feuchtemassendichte nach 78 Stunden

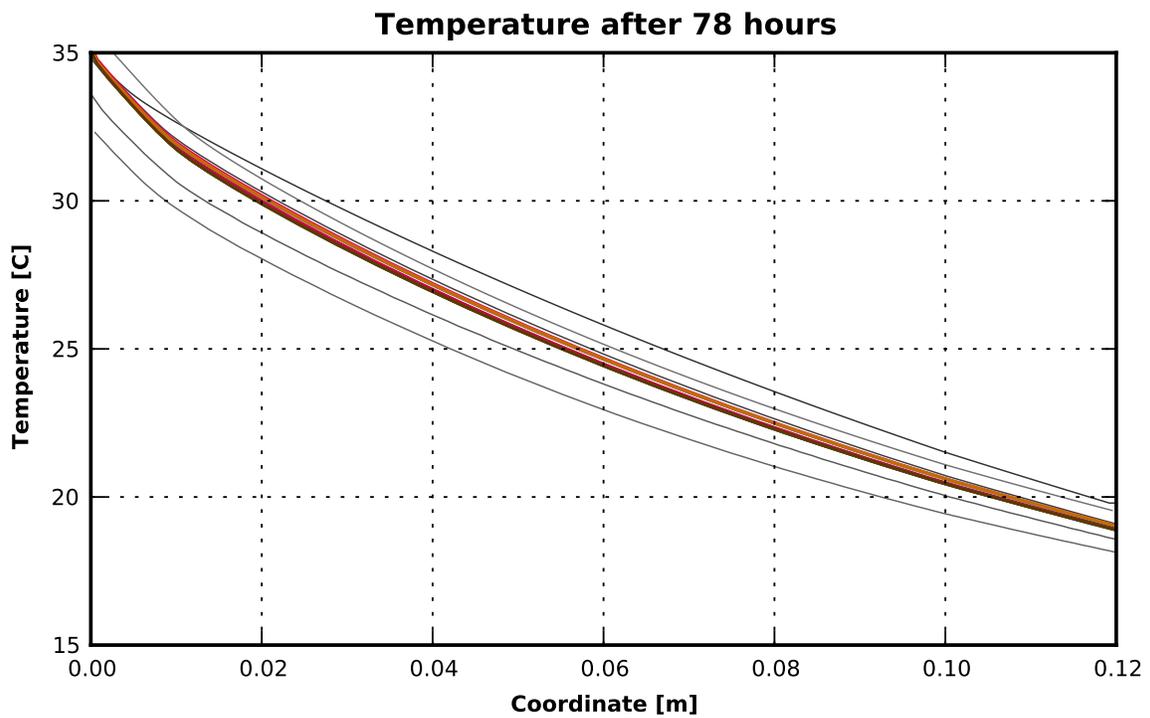


Abbildung 57: Temperatur nach 78 Stunden

Feuchtemassen- und Temperaturverlauf nach 96 Stunden

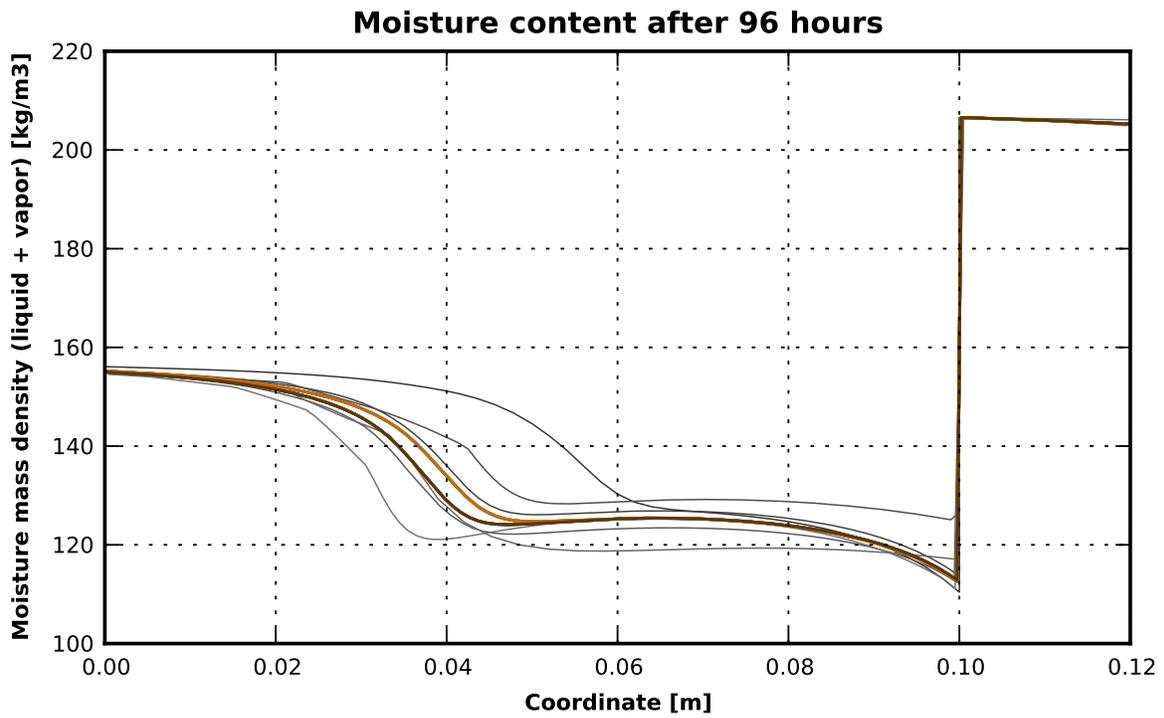


Abbildung 58: Feuchtemassendichte nach 96 Stunden

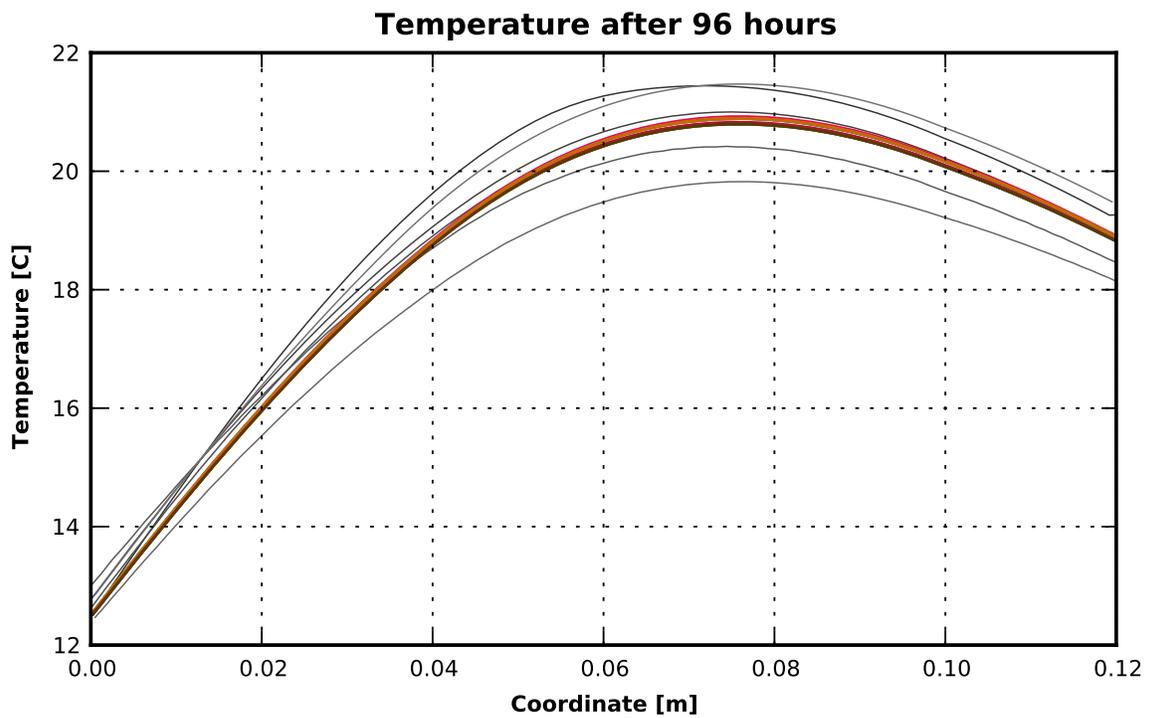


Abbildung 59: Temperatur nach 96 Stunden

7 HAMSTAD Benchmark 5

Im HAMSTAD Benchmark 5 wird die Feuchteverteilung in einer Wandkonstruktion mit kapillaraktiver Innendämmung untersucht. Die Innendämmung ist auf einer 36.5 cm starke Ziegelwand mit Mörtel angebracht. Da die Konstruktion als luftdicht angenommen wird, wird nur der Wärme- und Feuchtetransport in der Simulation berücksichtigt. Die Klimadaten sind konstant, weshalb sich ein stationärer Zustand einstellt.

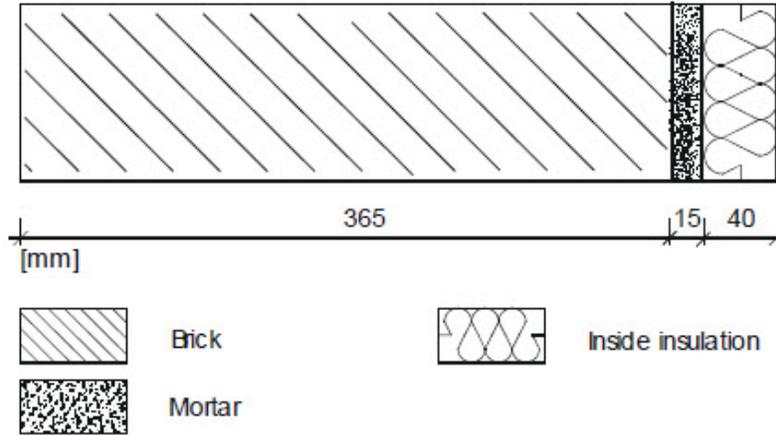


Abbildung 60: Konstruktionsaufbau HAMSTAD Benchmark 5 [Ham02]

7.1 Materialdaten

Ein Beispiel zur Generierung der Materialdatei aus denen im Benchmark angegebenen Daten ist in Kapitel 2 beschrieben. Die darin beschriebene Vorgehensweise kann auch bei der Materialgenerierung dieses Benchmarks angewendet werden. Es sind keine weiteren Besonderheiten bei der Materialgenerierung zu beachten. Die Konstruktion setzt sich aus einer 36.5 cm starken Ziegelwand und einer 4 cm starken Innendämmung zusammen, dazwischen befindet sich eine 1.5 cm dicke Mörtelschicht.

7.2 Klimadaten und Randbedingungen

7.2.1 Klimabedingungen

Die Temperaturen für die Umgebungsluft T_{eq} und die relative Luftfeuchtigkeit φ sind sowohl innen als auch außen konstant. Es wird deshalb nach einer gewissen Simulationszeit ein stationärer Zustand erwartet. Die Klimabedingungen sind der Tabelle 29 zu entnehmen.

	T_{eq} [°C]	φ [%]
Innen	20	60
Außen	0	80

Tabelle 29: Klimabedingungen HAMSTAD Benchmark 5

7.2.2 Randbedingungen

Als Wärmeübergangskoeffizienten α_e und Wasserdampfdiffusionskoeffizient β_p werden folgende Werte im HAMSTAD Benchmark 5 festgelegt:

	α_e [W/m ² K]	β_p [s/m]
Innen	8	$5.8823 \cdot 10^{-8}$
Außen	25	$1.8382 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 30: Übergangskoeffizienten HAMSTAD Benchmark 5

Da es sich bei diesem Benchmark um einen gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport handelt, müssen vier Randbedingungen festgelegt werden: Wärmeleitung und Wasserdampfdiffusion jeweils für innen und außen. Tabelle 31 zeigt die zu verwendenden Randbedingungen und die dazugehörigen physikalischen Parameter sowie Klimadaten.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung	Austauschkoeffizient	innen	$\alpha_{e,i}$	$T_{eq,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\alpha_{e,e}$	$T_{eq,e}$
Wasserdampfdiffusion	Austauschkoeffizient	innen	$\beta_{p,i}$	$T_{eq,i}$
				φ_i
	Austauschkoeffizient	außen	$\beta_{p,e}$	$T_{eq,e}$
				φ_e

Tabelle 31: Randbedingungen HAMSTAD Benchmark 5

7.2.3 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingungen werden folgende Werte für die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur definiert:

	φ [%]	T [°C]
Gesamte Konstruktion	60	20

Tabelle 32: Anfangsbedingungen HAMSTAD Benchmark 5

7.3 Validierungsrechnung

7.3.1 Ausgabe

Die Simulationszeit beträgt beim HAMSTAD Benchmark 5 60 Tage. Dabei sollen folgende Ausgaben erstellt werden:

- Feuchtemassenverteilung in [kg/m³] nach 60 Tagen
- Relative Luftfeuchtigkeit in [%] nach 60 Tagen

7.3.2 Solverparameter

Für die Simulation werden die Solvereinrichtungen nach Tabelle 33 gewählt.

Solver Einstellungen	
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m ³
Absolute Toleranz Feuchte	10^{-6} kg/m ³

Tabelle 33: Solverparameter HAMSTAD Benchmark 5

7.3.3 Diskretisierung

Für die eindimensionale Simulation wird mit einer äquidistanten Diskretisierung von 0.5 mm simuliert.

7.3.4 Ergebnisse

Die Simulationsergebnisse (siehe Abbildungen 61 bis 64) werden mit den numerischen Lösungen aus Tabelle 34 verglichen.

01	KU Leuven
02	Eindhoven University of Technology
03	Technion Israel Institute of Technology
04	Chalmers University of Technology
06	National Research Council of Canada
08	Delphin 4

Tabelle 34: Legendenummerierung HAMSTAD Benchmark 5

Es werden die Simulationsergebnisse von *Delphin 5.6*, *5.8*, *6.0* und *6.1* farblich hervorgehoben, während die Vergleichsergebnisse grau dargestellt sind.

Feuchtemassendichte nach 60 Tagen

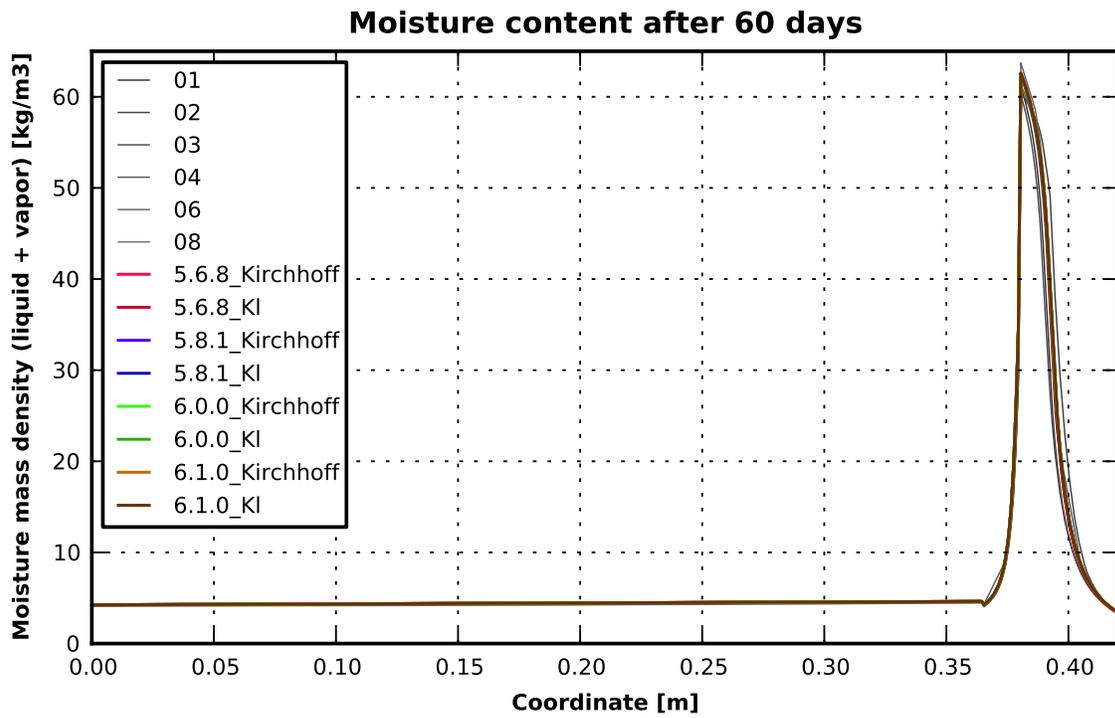


Abbildung 61: Feuchtemassendichte nach 60 Tagen

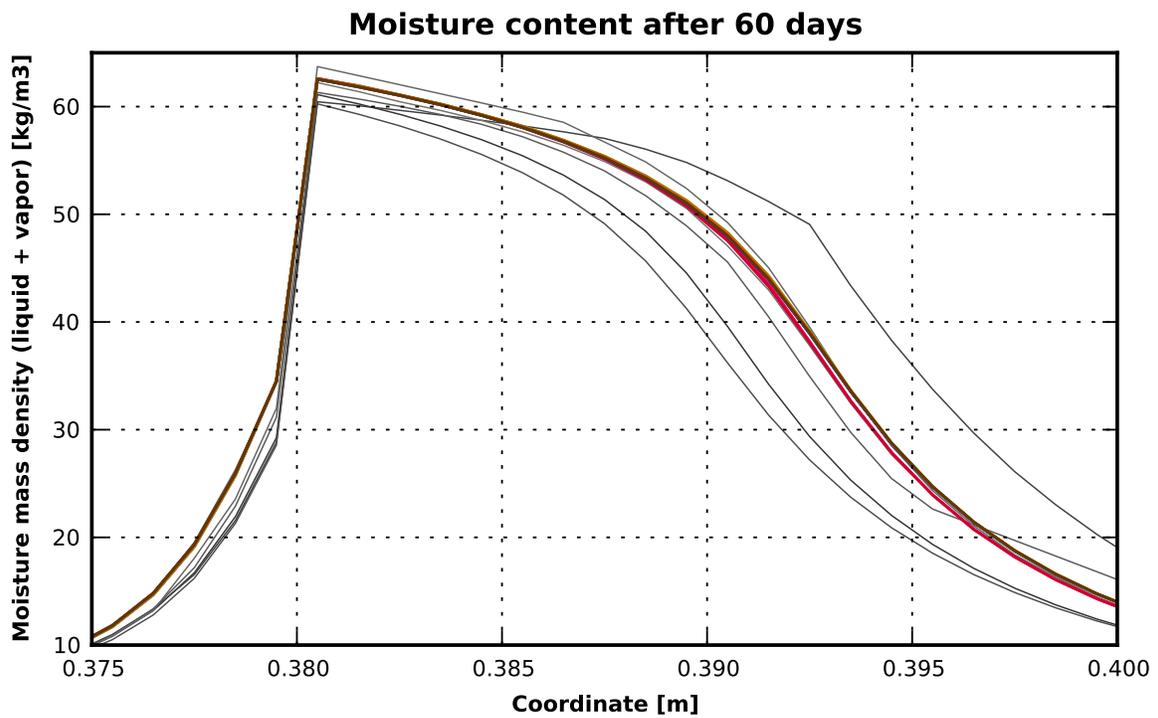


Abbildung 62: Ausschnitt des Feuchteverlaufs an der Kontaktstelle der Materialien

Relative Luftfeuchtigkeit nach 60 Tagen

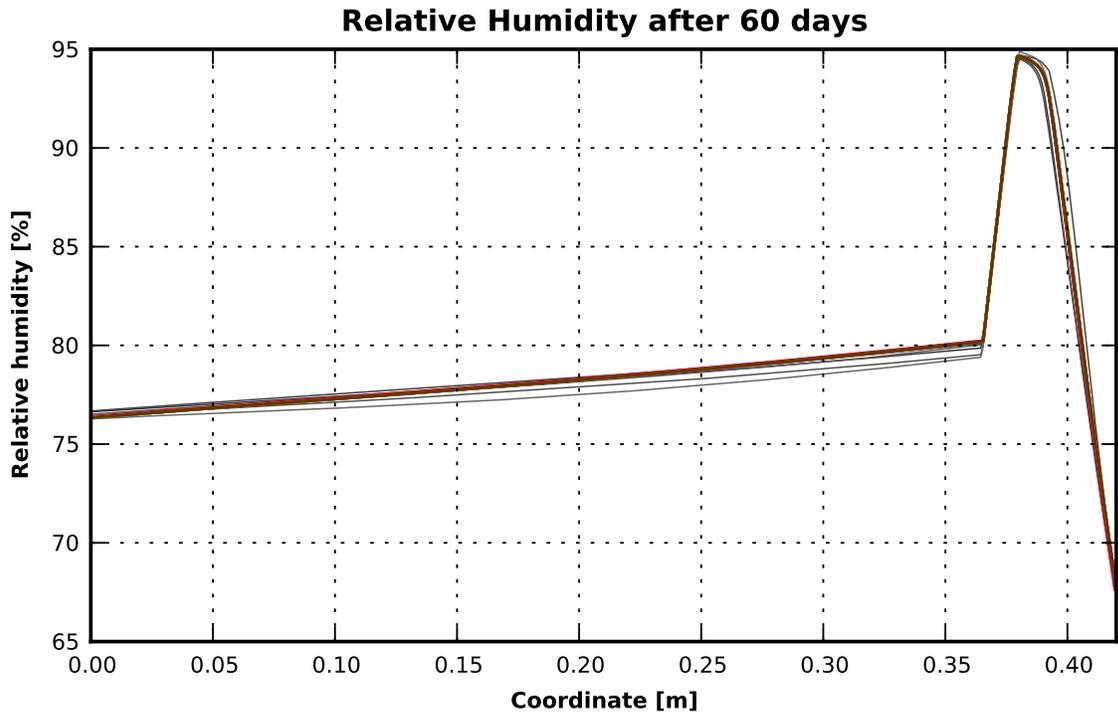


Abbildung 63: Relative Luftfeuchtigkeit nach 60 Tagen

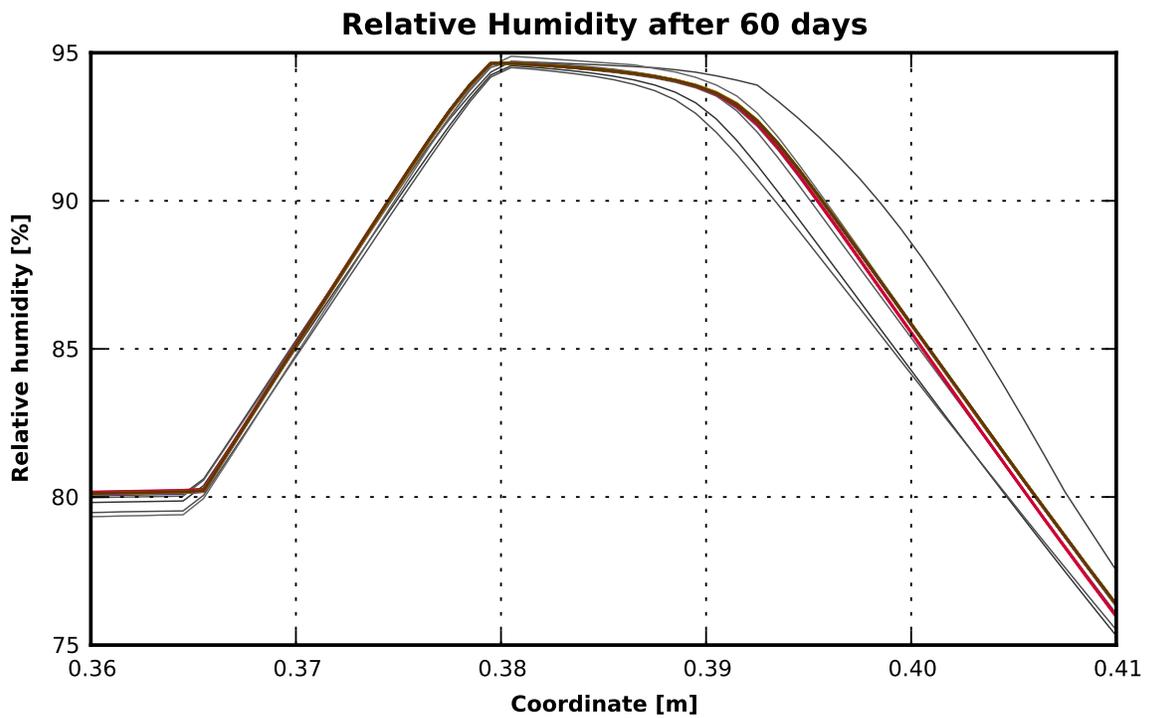


Abbildung 64: Ausschnitt der relativen Luftfeuchtigkeit nach 60 Tagen

8 DIN EN ISO 10211 Fall 1

Im Fall 1 der DIN EN ISO 10211 wird der Wärmedurchgang durch eine quadratische Stütze mit bekannten Oberflächentemperaturen berechnet. Als Vergleich zu dem Simulationsergebnis ist eine analytische Lösung für verschiedene Punkte in der Stütze angegeben. Abbildung 65 zeigt den Aufbau des Prüffalls. Für die Simulation wird die Symmetrie der Stütze ausgenutzt. Es handelt sich hierbei um eine zweidimensionale, rein thermische Simulation. Durch konstante Randbedingungen stellt sich ein stationärer Zustand ein.

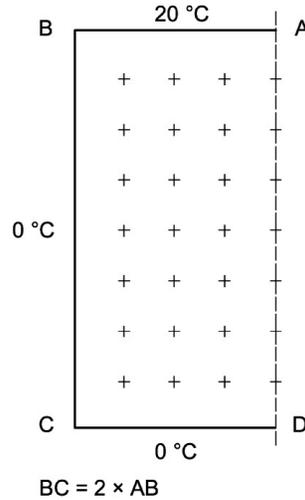


Abbildung 65: Aufbau DIN EN ISO 10211 Fall 1 [DIN08]

8.1 Materialdaten

Für die Berechnung dieses Testfalls kann ein beliebiges Material verwendet werden. Es wurde ein Beton aus der *Delphin* Materialdatenbank verwendet.

8.2 Klimadaten und Randbedingungen

8.2.1 Klimabedingungen

Als Klimabedingungen werden konstanten Oberflächentemperaturen für die Seiten AB, BC und CD verwendet.

	T [°C]	Beschreibung
Innen	20 °C	A-B
Außen	0 °C	B-C und C-D

Tabelle 35: Klimabedingungen DIN EN ISO 10211 Fall 1

8.2.2 Randbedingungen

Da es sich bei den Klimabedingungen um Oberflächentemperaturen und nicht um Umgebungstemperaturen handelt, müssen keine Wärmeübergangskoeffizienten definiert werden. Bei dieser rein thermische Simulation müssen keine weiteren Randbedingungen festgelegt werden. Tabelle 36 zeigt die verwendeten Randbedingungen und die dazugehörigen Klimadaten.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung	Oberflächenwert	innen	-	T_i
	Oberflächenwert	außen	-	T_e

Tabelle 36: Randbedingungen DIN EN ISO 10211 Fall 1

8.2.3 Anfangsbedingungen

Die Norm selbst definiert keine Anfangsbedingungen, da der zeitliche Verlauf für die Auswertung nicht relevant ist. Es wird daher eine Anfangstemperatur von $T = 10\text{ °C}$ festgelegt.

Gesamte Konstruktion	
$T\text{ [°C]}$	10

Tabelle 37: Anfangsbedingung DIN EN ISO 10211 Fall 1

8.3 Validierungsrechnung

8.3.1 Ausgabe

Die Simulation wird solange fortgesetzt, bis sich die physikalischen Größen zeitlich nicht mehr ändern. Bei dem gewählten Material stellt sich spätestens nach 40 Tagen der stationäre Zustand ein. Es werden folgende Ausgaben erstellt:

- Temperaturverteilung in [°C] für die gesamte Konstruktion

8.3.2 Solverparameter

Für den Prüffall 1 der DIN EN ISO 10211 wird mit folgenden Solvareinstellungen simuliert:

Solver Einstellungen	
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m^3

Tabelle 38: Solverparameter DIN EN ISO 10211 Fall 1

8.3.3 Diskretisierung

Damit das Berechnungsgitter geeignet generiert und verfeinert werden kann, werden zwei Materialien mit unterschiedlichen Namen aber gleichen Eigenschaften in *Delphin* definiert. Diese werden dann in Form eines Schachbrettmusters der Konstruktion zugewiesen, so dass die Ecken jeweils an einem auszuwertenden Referenzpunkt liegen (siehe Abbildung 66). Jetzt kann mit Hilfe des eingebauten Gittergenerators ein variables Gitternetz erzeugt werden. Durch diese Vorgehensweise wird insbesondere an den Referenzpunkten feiner diskretisiert, was zu genaueren Ergebnissen führt.

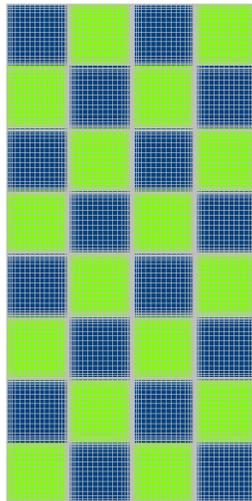


Abbildung 66: Diskretisierung DIN EN ISO 10211 Fall 1

In der Norm wird lediglich das Seitenverhältnis $BC = 2 \cdot AB$ angegeben (siehe Abbildung 65). In *Delphin* wird daher mit einer 1 m x 2 m Konstruktion gerechnet. Für die Gittergenerierung wird eine minimale Elementdicke von 1 mm, eine maximale Elementdicke von 20 mm und ein Ausdehnungsfaktor von 1,43 festgelegt. Damit ergibt sich eine Elementanzahl von 20000.

8.3.4 Ergebnisse

In der Norm werden für Referenzpunkte analytische Ergebnisse (Abbildung 67) mit maximalen Abweichungen von 0,1 Knach unten und oben angegeben. Jeweils vier Referenzpunkte liegen in einer Linie und werden in den nachfolgenden Diagrammen zusammen mit den berechnete Temperaturprofilen dargestellt.

Analytische Lösung an den Gitter-Knoten			
9,7	13,4	14,7	15,1
5,3	8,6	10,3	10,8
3,2	5,6	7,0	7,5
2,0	3,6	4,7	5,0
1,3	2,3	3,0	3,2
0,7	1,4	1,8	1,9
0,3	0,6	0,8	0,9

Abbildung 67: Analytische Lösung DIN EN ISO 10211 Fall 1 [DIN08]

Es werden die Simulationsergebnisse von *Delphin 5.6*, *5.8*, *6.0* und *6.1* dargestellt. Die analytische Lösung ist in den folgenden Diagrammen durch einen Minimal- und Maximalwert veranschaulicht. Alle Abweichungen befinden sich unterhalb des Grenzwerts von 0,1 K. *Delphin* hält somit die geforderte Genauigkeit nach DIN EN ISO 10211 ein.

Temperaturverlauf an den horizontalen Gitterlinien

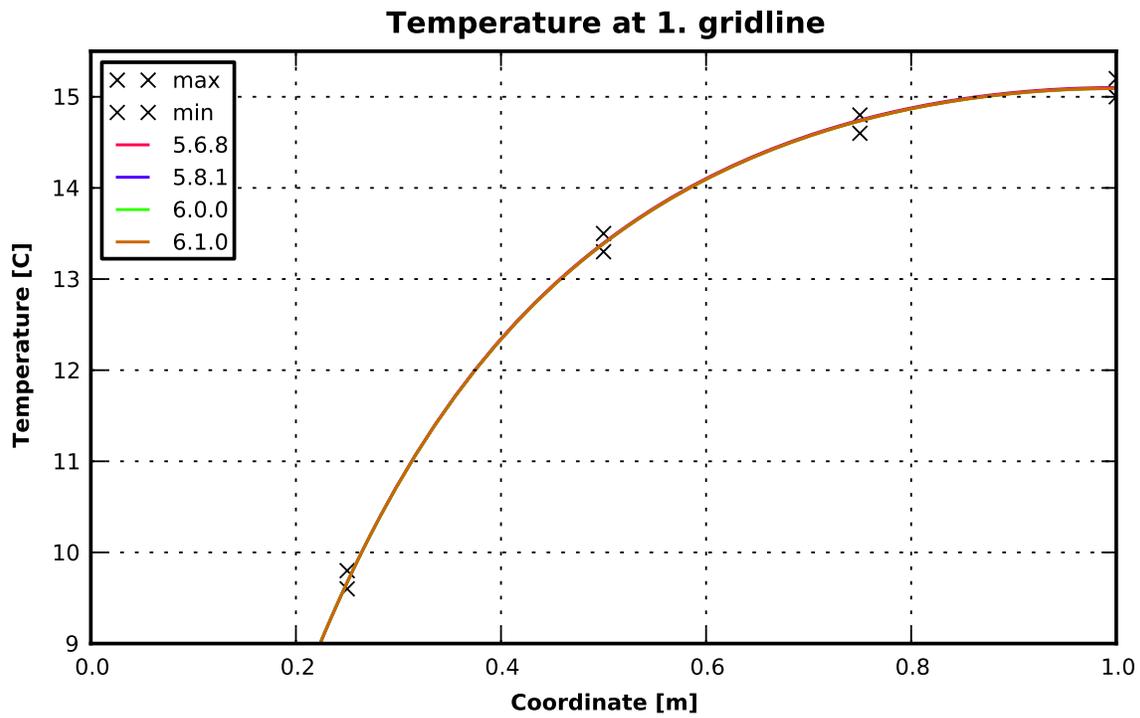


Abbildung 68: Temperatur an Gitterlinie 1

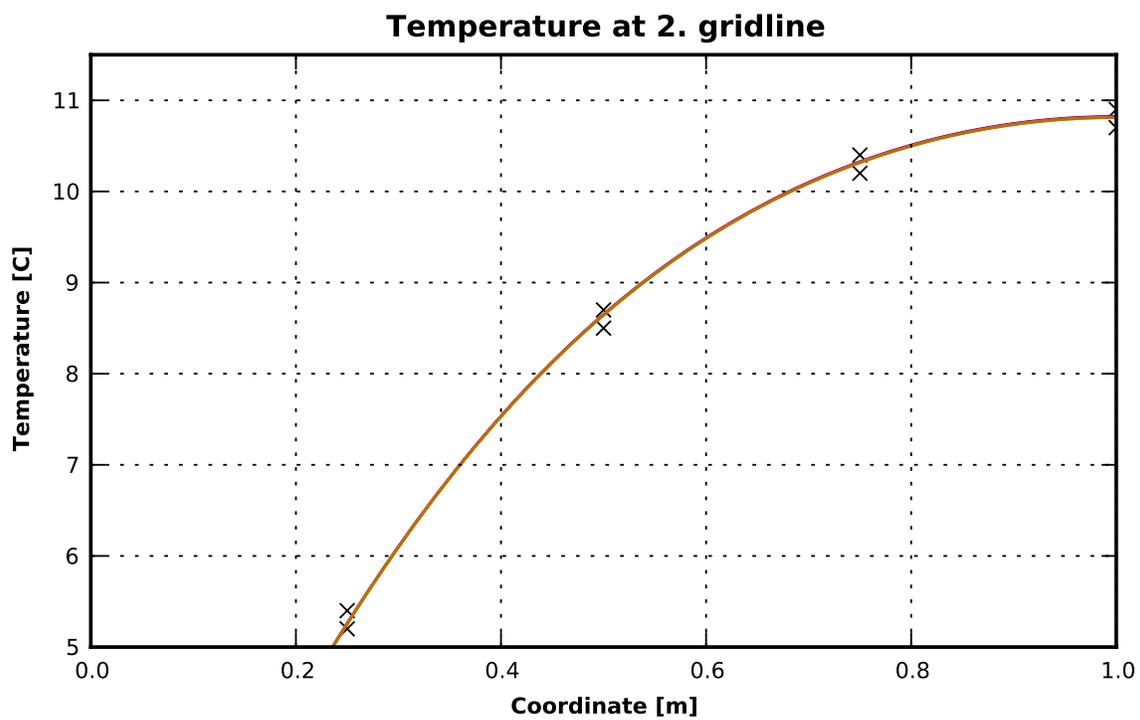


Abbildung 69: Temperatur an Gitterlinie 2

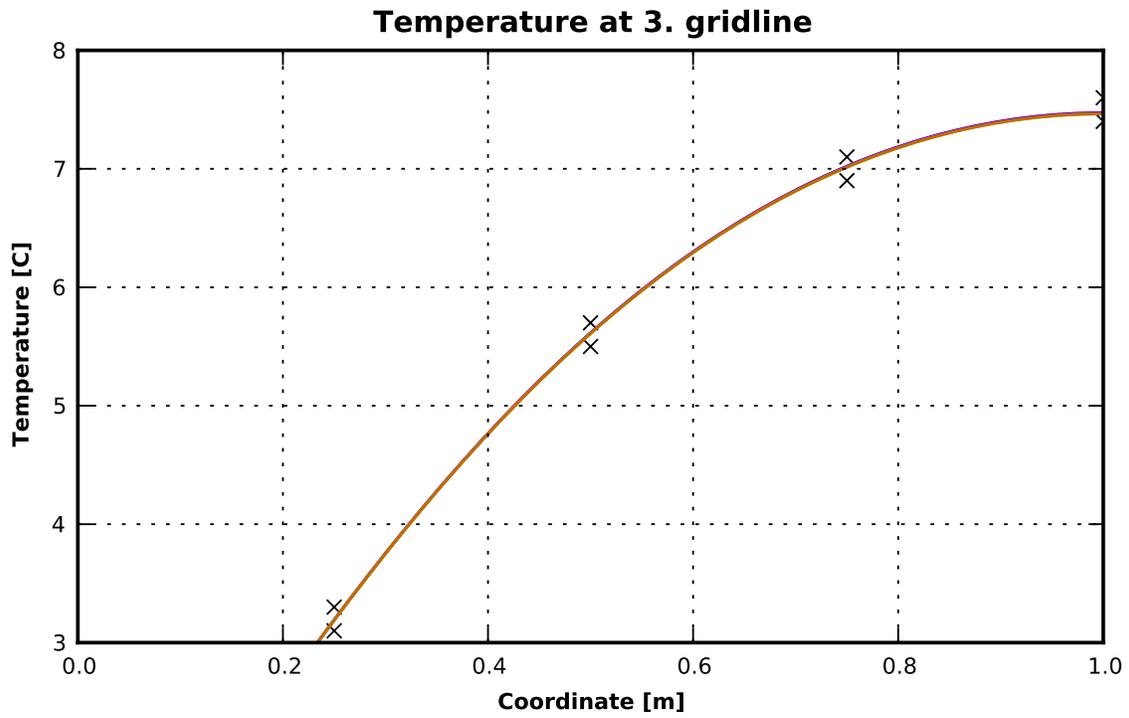


Abbildung 70: Temperatur an Gitterlinie 3

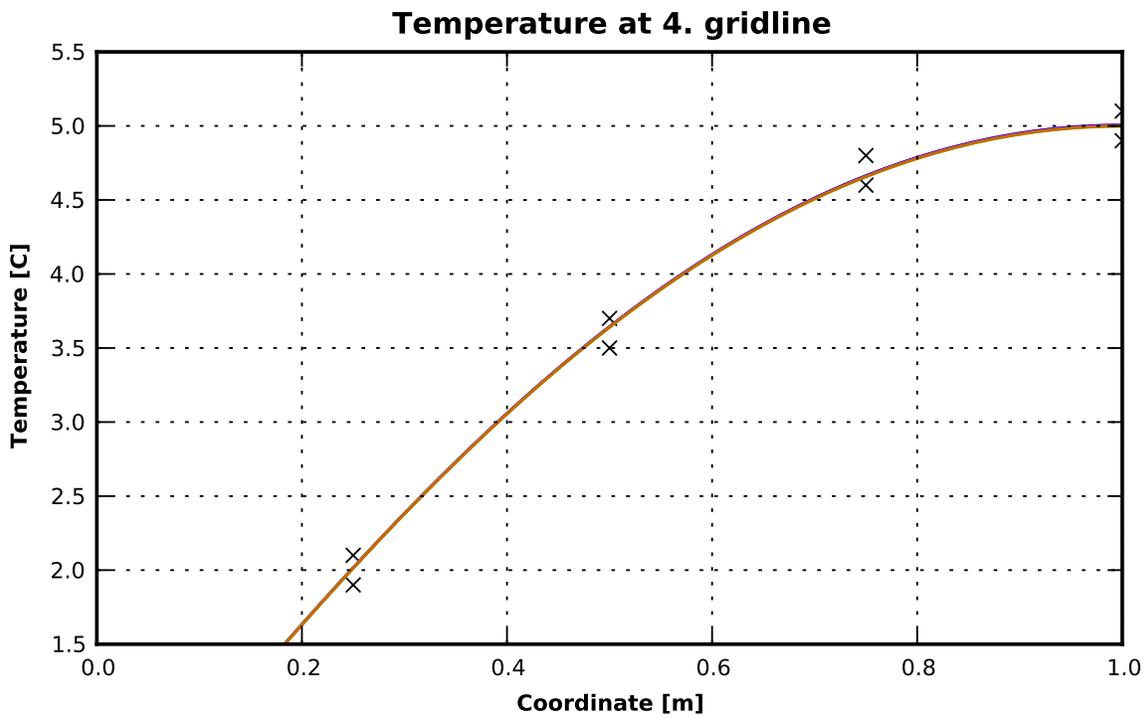


Abbildung 71: Temperatur an Gitterlinie 4

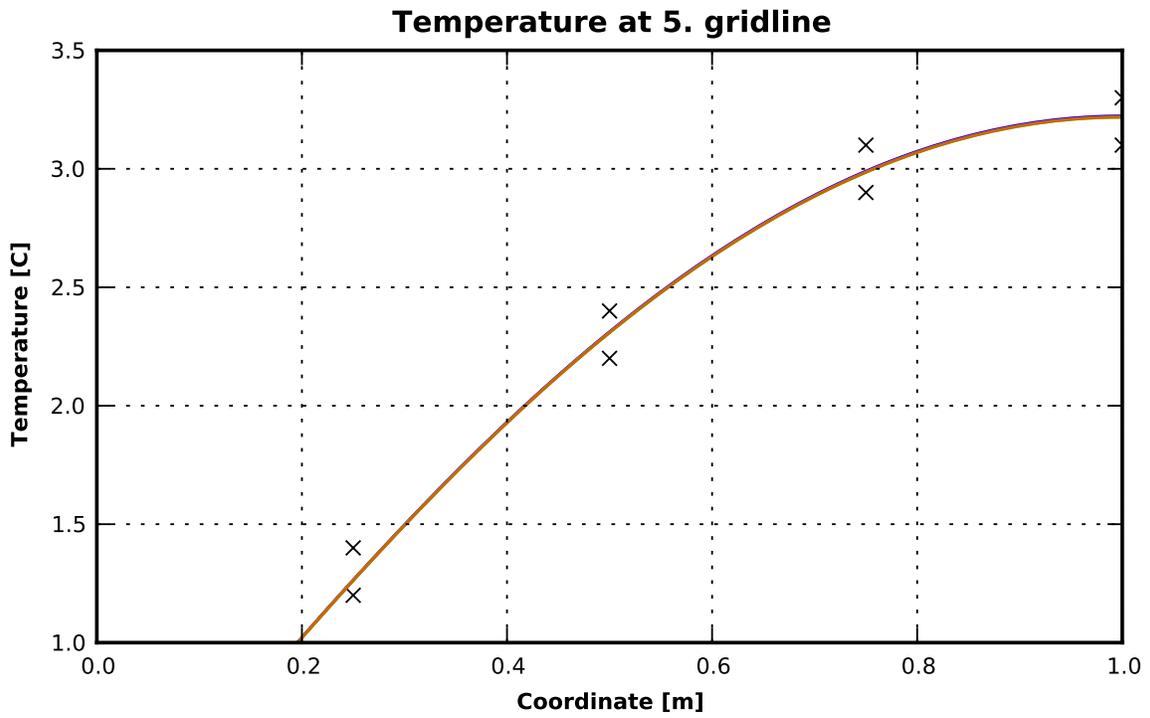


Abbildung 72: Temperatur an Gitterlinie 5

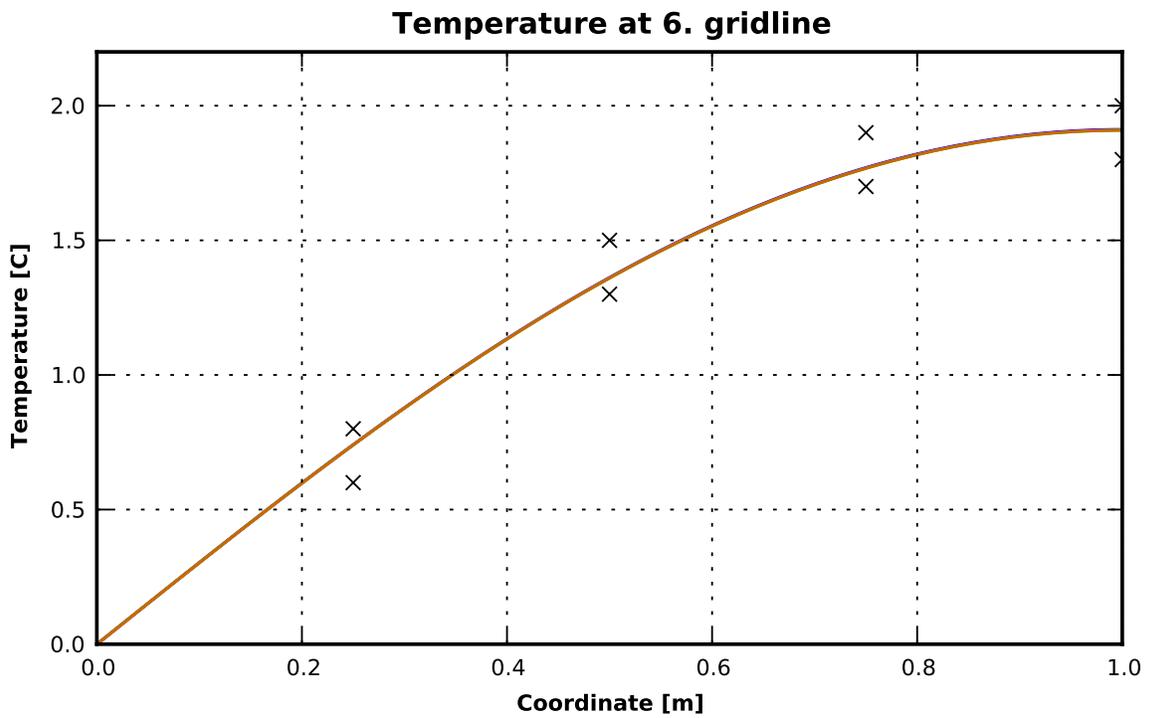


Abbildung 73: Temperatur an Gitterlinie 6

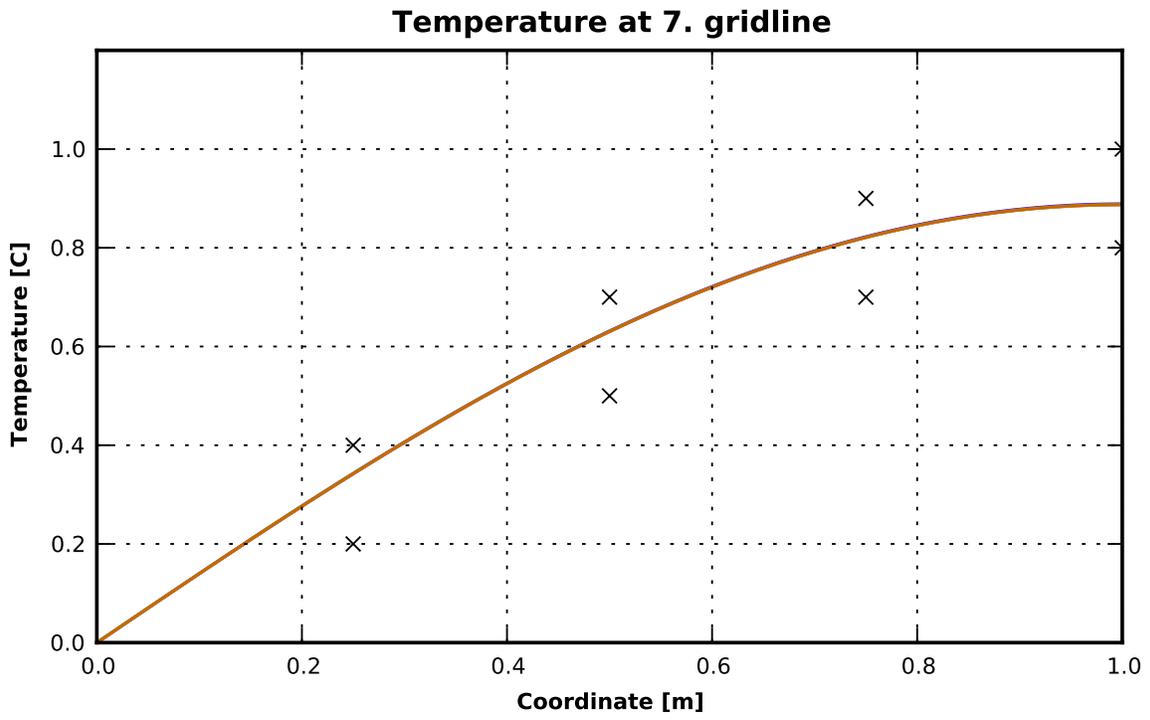


Abbildung 74: Temperatur an Gitterlinie 7

9 DIN EN ISO 10211 Fall 2

Im Prüferferenzfall 2 der DIN EN ISO 10211 wird ein zweidimensionales Konstruktionsdetail untersucht. Das Bauteil setzt sich aus den Materialien Beton, Holz, Wärmedämmung und Aluminium zusammen (siehe Abbildung 75). Da nur konstante Randbedingungen gegeben sind, wird nach einer gewissen Simulationszeit der stationäre Zustand erreicht. Die Simulation erfolgt rein thermisch.

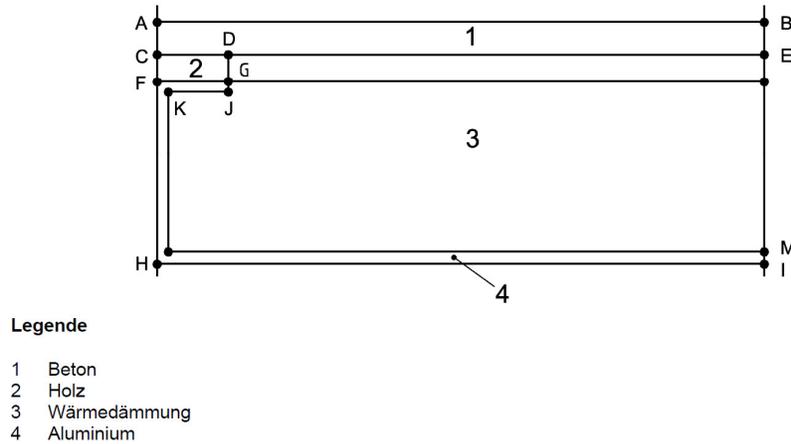


Abbildung 75: Aufbau DIN EN ISO 10211 Fall 2 [DIN08]

9.1 Materialdaten

Als Materialdaten werden in der Norm ausschließlich die Wärmeleitfähigkeiten der Materialien angegeben. Da es sich um eine rein thermische Simulation handelt, sind die anderen Materialdaten nicht von Interesse. Um dies in *Delphin* zu realisieren, können beliebige Materialien aus der Datenbank ausgewählt werden, von denen anschließend nur die Wärmeleitfähigkeit angepasst wird. Tabelle 39 enthält die in der Norm definierten Wärmeleitfähigkeiten der vier Materialien.

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
1 Beton	1.15
2 Holz	0.12
3 Wärmedämmung	0.029
4 Aluminium	230

Tabelle 39: Materialangaben DIN EN ISO 10211

9.2 Klimadaten und Randbedingungen

9.2.1 Klimabedingungen

Als Klimabedingungen sind konstante Umgebungstemperaturen T_{eq} für die Ober- und Unterseite der Konstruktion gegeben.

	T_{eq} [°C]
Innen H-I	20
Außen A-B	0

Tabelle 40: Klimabedingungen DIN EN ISO 10211 Fall 2

9.2.2 Randbedingungen

Weiterhin sind Wärmeübergangswiderstände R_s für innen und außen gegeben.

	R_s [m ² K/W]
Innen	0.06
Außen	0.11

Tabelle 41: Randbedingungen DIN EN ISO 10211 Fall 2

Als Randbedingung wird bei einer rein thermischen Simulation nur die Wärmeleitung an der Außen- und Innenseite benötigt. Der Wärmeübergangswiderstand R_s muss dazu in einen Wärmeübergangskoeffizienten α_e umgerechnet werden:

$$\alpha_e = \frac{1}{R_s}$$

Tabelle 42 zeigt die verwendeten Randbedingungen und die dazugehörigen physikalischen Parameter sowie Klimadaten.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung	Austauschkoeffizient	innen	$\alpha_{e,i}$	$T_{eq,i}$
	Austauschkoeffizient	außen	$\alpha_{e,e}$	$T_{eq,e}$

Tabelle 42: Randbedingungen DIN EN ISO 10211 Fall 2

9.2.3 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingung wird die Temperatur mit 10 °C angenommen.

	T [°C]
Gesamte Konstruktion	10

Tabelle 43: Anfangsbedingungen DIN 10211 Fall 2

9.3 Validierungsrechnung

9.3.1 Ausgabe

Da es sich um eine stationäre Simulation handelt muss solange simuliert werden, bis sich die Ausgabegrößen zeitlich nicht mehr ändern. Die Simulationszeit beträgt 5 Tage, der stationäre Zustand sollte hier bereits erreicht sein. Es werden dabei folgende Ausgaben erstellt:

- Temperaturverlauf in [°C] für die gesamte Konstruktion
- Gesamtwärmestrom in [W/m] der durch die Konstruktion geht

9.3.2 Solverparameter

Es wird mit folgenden Solvareinstellungen gerechnet:

Solver Einstellungen	
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m ³

Tabelle 44: Solverparameter DIN 10211 Fall 2

9.3.3 Diskretisierung

Dünne Metallbleche erfordern ein sehr feines Gitter um und nahe der Blechlagen. Ebenso werden schmale Elemente nahe der Oberfläche zur Erfassung des Wärmestromes benötigt. Für die zweidimensionale Diskretisierung wird daher eine minimale Elementdicke von 0.1 mm und eine maximale Elementdicke von 5 mm festgelegt. Mit dem

Ausdehnungsfaktor von 1,081 ergeben sich somit 36666 Elemente. Ein Teil der diskretisierten Konstruktion ist in Abbildung 76 zu sehen.

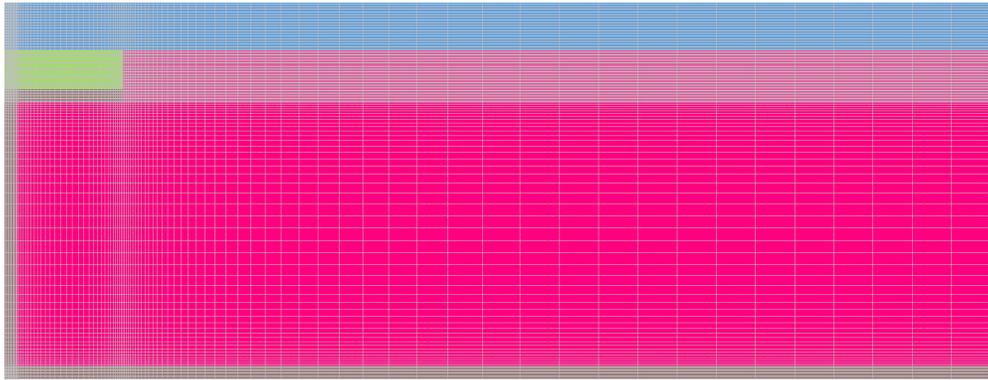


Abbildung 76: Ausschnitt der diskretisierten Konstruktion DIN EN ISO 10211 Fall 2

9.3.4 Ergebnisse

In den Diagrammen 78 bis 82 sind die Temperaturverläufe an den verschiedenen Referenzpunkten dargestellt. Die Simulationsergebnisse von *Delphin* werden mit der numerischen Lösung aus Abbildung 77 verglichen.

Temperaturen, in °C		
A: 7,1		B: 0,8
C: 7,9	D: 6,3	E: 0,8
F: 16,4	G: 16,3	
H: 16,8		I: 18,3
Gesamtwärmestrom: 9,5 W/m		

Abbildung 77: Numerische Lösung DIN EN ISO 10211 Fall 2 [DIN08]

Dabei sind folgende Abweichungen erlaubt:

- Temperatur: ± 0.1 °C
- Wärmestrom: ± 0.1 W/m

Es werden die Simulationsergebnisse von *Delphin* 5.6, 5.8, 6.0 und 6.1 dargestellt. Die erlaubte maximale Abweichung wird in den Diagrammen durch Minimal- und Maximalwerte veranschaulicht. Alle Ergebnisse liegen im gültigen Bereich. *Delphin* hält somit die geforderte Genauigkeit ein.

Temperaturverlauf an den Referenzpunkten

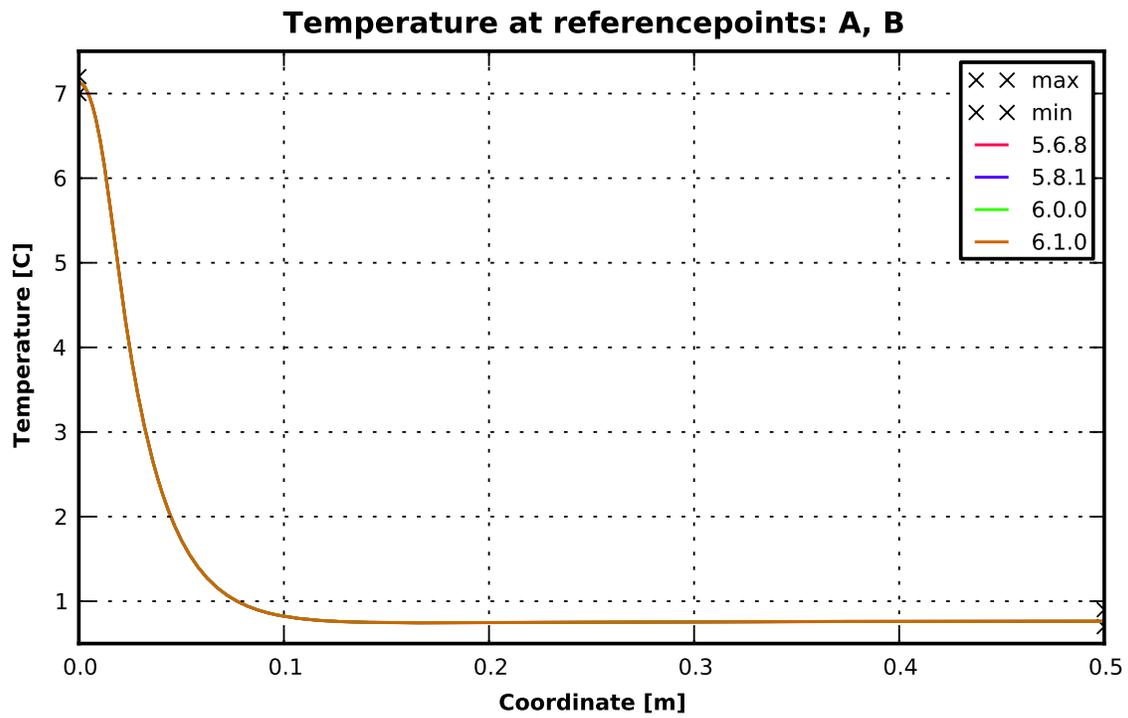


Abbildung 78: Temperatur an den Referenzpunkten: A, B

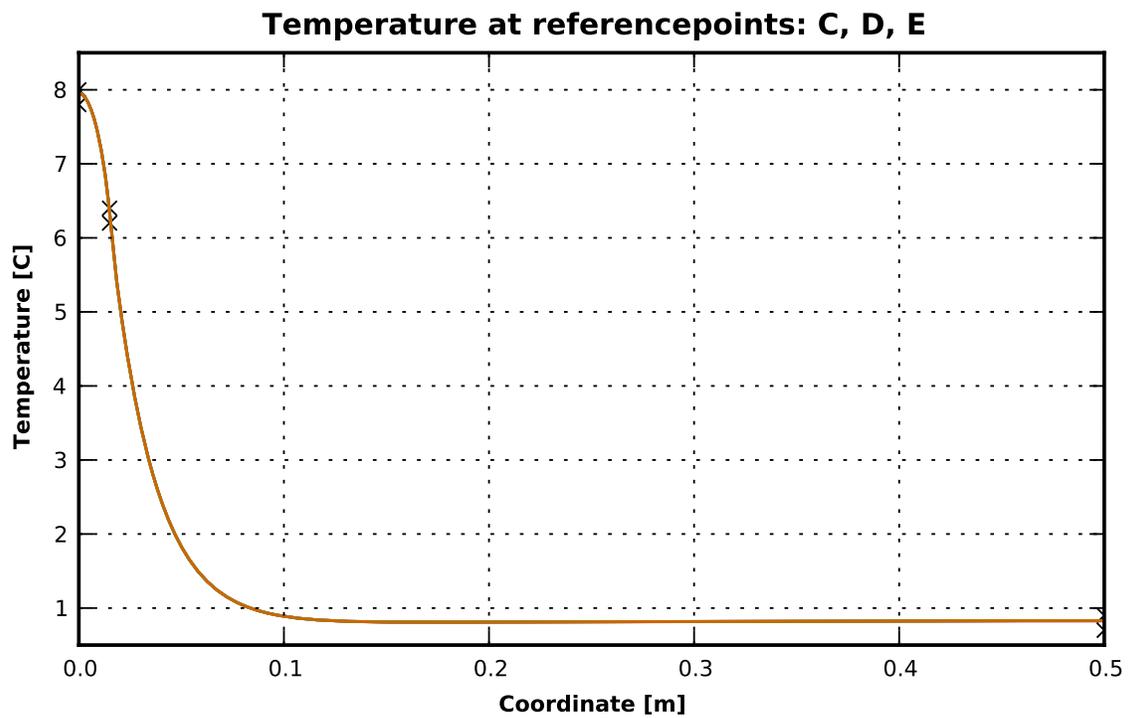


Abbildung 79: Temperatur an den Referenzpunkten: C, D, E

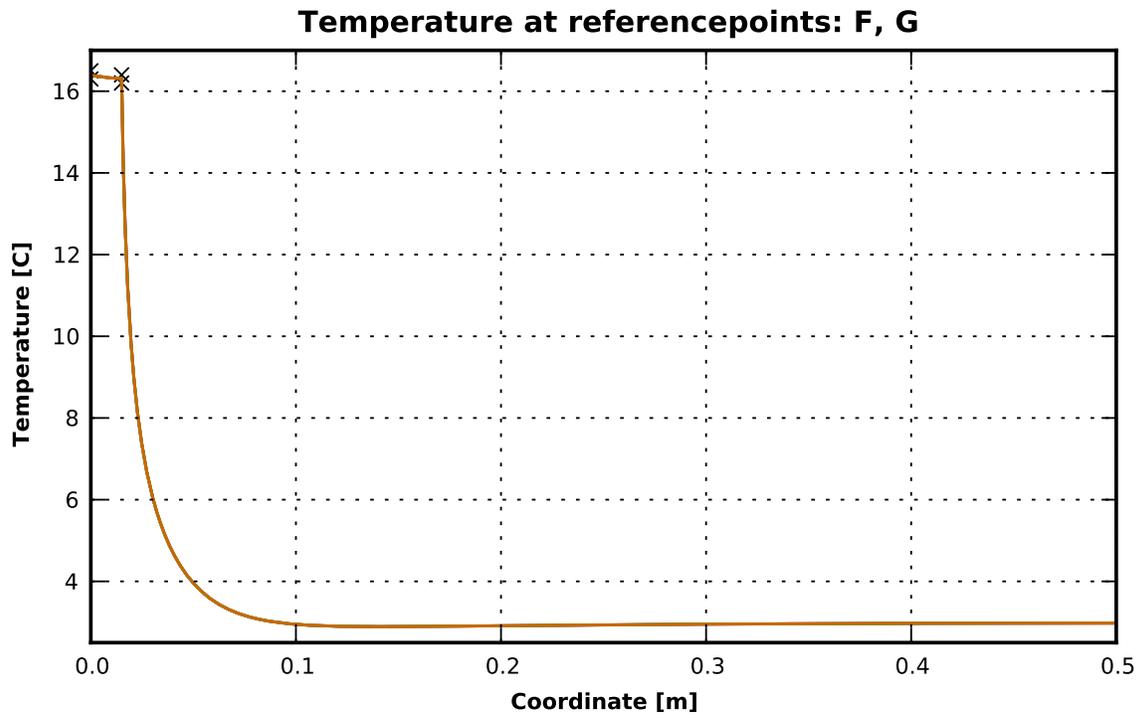


Abbildung 80: Temperatur an den Referenzpunkten: F, G

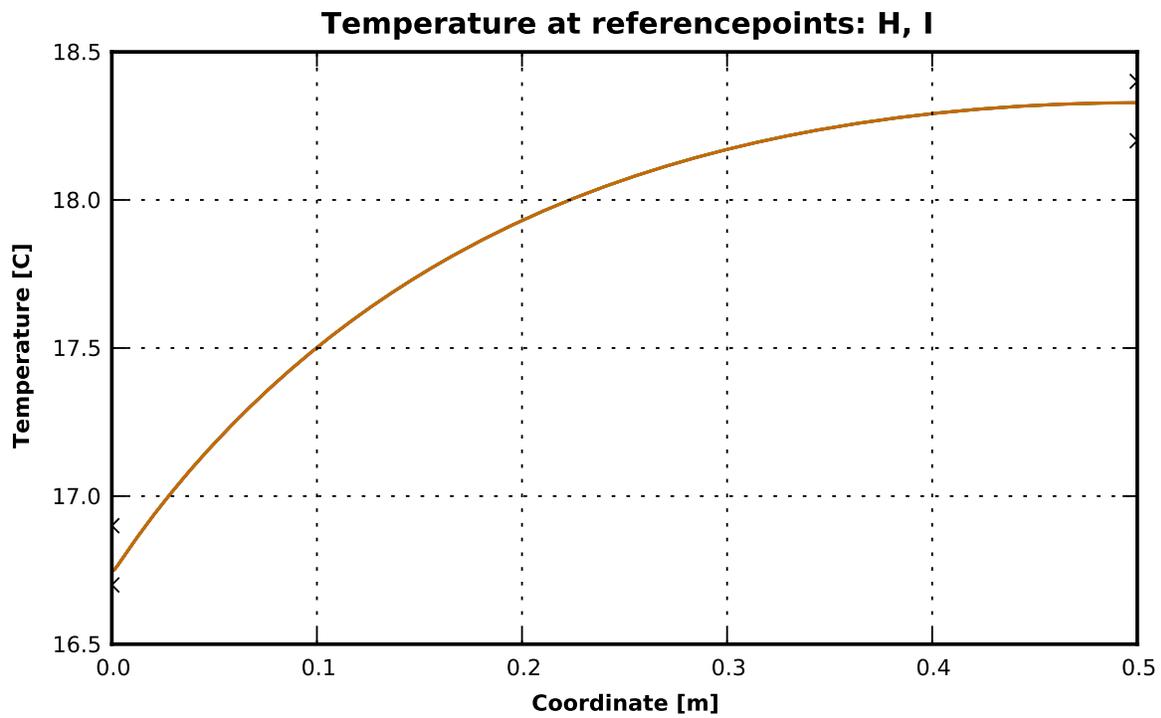


Abbildung 81: Temperatur an den Referenzpunkten: H, I

Wärmestromdichte

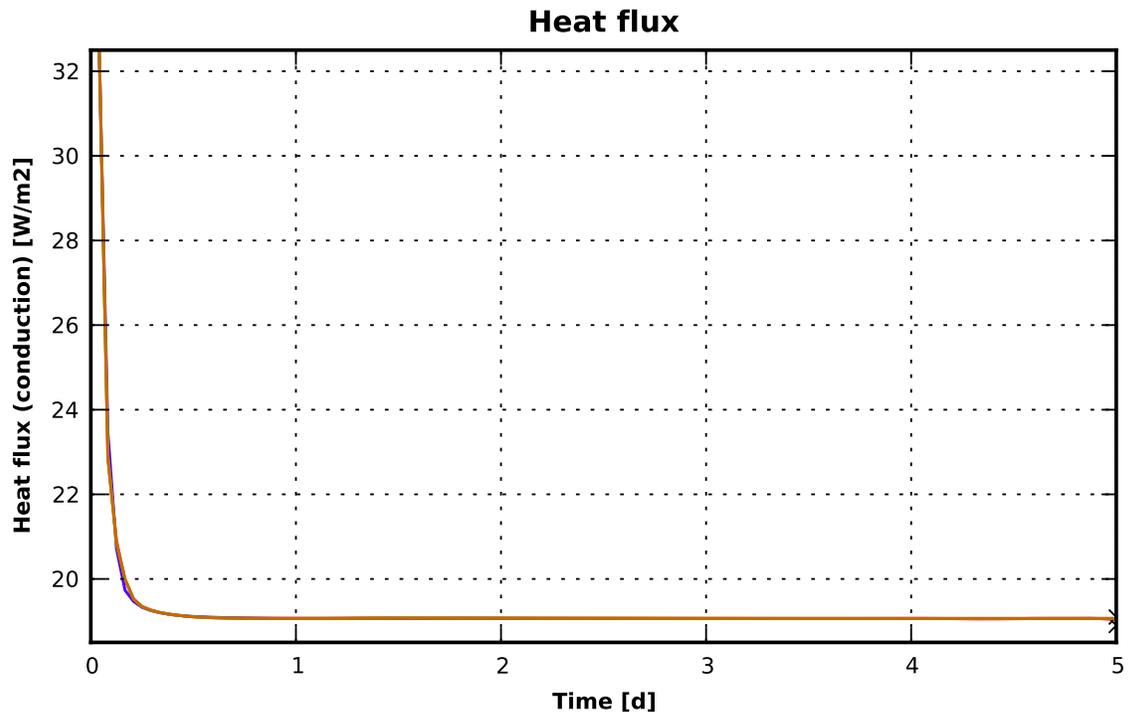


Abbildung 82: Wärmestromdichte

10 DIN EN 15026

Der in DIN EN 15026 gegebene Testfall beschäftigt sich mit dem gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport einer eindimensionalen Konstruktion. Der homogene Baustoff wird als luftdicht angenommen und befindet sich im Gleichgewicht mit dem Umgebungsklima. Durch eine sprunghafte Änderung der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit kommt es zum Feuchte- und Wärmetransport in der Konstruktion. Da das Umgebungsklima konstant bleibt, stellt sich nach einer gewissen Simulationszeit ein stationärer Zustand ein.

10.1 Materialdaten

Die in der Norm gegebenen Materialeigenschaften sind identisch mit denen des HAMSTAD Benchmarks 1 für das Material A. Die Generierung dieser Materialdatei ist in Kapitel 2 beschrieben.

10.2 Klimadaten und Randbedingungen

10.2.1 Klimabedingungen

Zu Beginn der Simulation kommt es zur sprunghaften Änderung der Temperatur T und der relativen Luftfeuchtigkeit φ . Da die Klimabedingungen danach konstant sind, stellt sich nach gewisser Zeit ein stationärer Zustand ein.

	T [°C]	φ [%]
Außen	30	95

Tabelle 45: Klimabedingungen DIN EN 15026

10.2.2 Randbedingungen

Da die Grenzwiderstände laut Norm nicht berücksichtigt werden sollen, wird die Temperatur als Oberflächenwert angegeben, d. h. es ist kein Wärmeübergangswiderstand α_e notwendig. Für die Randbedingung der Wasserdampfdiffusion wird jedoch ein Wasserdampfübergangswiderstand β_p benötigt, es wurde daher die Voreinstellung von *Delphin* übernommen (siehe Tabelle 46).

	β_p [s/m]
Außen	$3 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 46: Übergangsbedingungen DIN EN 15026

In Tabelle 47 sind die verwendeten Randbedingungen mit den dazugehörigen physikalischen Parametern und den Klimadaten angegeben. Für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport werden die Randbedingungen Wärmeleitung und Wasserdampfdiffusion benötigt.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung	Oberflächenwert	außen	-	T_e
Wasserdampfdiffusion	Austauschkoeffizient	außen	$\beta_{p,e}$	T_e φ_e

Tabelle 47: Randbedingungen DIN EN 15026

10.2.3 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingungen sind in der DIN EN 15026 folgende Werte für die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gegeben:

	φ [%]	T [°C]
Gesamte Konstruktion	50	20

Tabelle 48: Anfangsbedingungen DIN EN 15026

10.3 Validierungsrechnung

10.3.1 Ausgabe

Es wird über einen Zeitraum von einem Jahr simuliert. Die Auswertung der Ausgaben erfolgt jeweils nach 7, 30 und 365 Tagen. Es sollen dabei folgende physikalische Größen ausgegeben werden:

- Temperaturverteilung in [°C] über die gesamte Konstruktion
- Feuchtemassenverteilung in [kg/m³] über die gesamte Konstruktion

10.3.2 Solverparameter

Für die Vergleichsprüfung nach DIN EN 15026 werden folgenden Solvareinstellungen vorgenommen.

Solver Einstellungen	
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m ³
Absolute Toleranz Feuchte	10^{-6} kg/m ³

Tabelle 49: Solverparameter DIN EN 15026

10.3.3 Diskretisierung

Es soll das Feuchte- und Wärmeverhalten einer unendlich dicken Konstruktion bei einseitiger klimatischer Belastung untersucht werden. Da für die Maße der Konstruktion keine Werte vorgegeben sind, wird mit 100 m x 1 m simuliert. Es wird weiterhin mit einer variablen Diskretisierung gearbeitet, die minimale Elementdicke beträgt dabei 0.5 mm und die maximale Elementdicke 20 mm. Mit einem Ausdehnungsfaktor von 1,523 ergeben sich somit 5014 Elemente.

10.3.4 Ergebnisse

Die von *Delphin* ermittelten Simulationsergebnisse werden mit den numerischen Lösungen aus der Norm verglichen. Es sind sowohl die Feuchteverteilung (siehe Abbildung 83) als auch der Temperaturverlauf (siehe Abbildung 84) zu untersuchen. Die Norm schreibt dabei eine maximale Abweichung von $\pm 2.5\%$ vor. Der einzuhaltende Grenzbereich ist in den folgenden Diagrammen durch einen Minimal- und Maximalwert gegeben.

Tage	$x = 0,01$		$x = 0,02$		$x = 0,03$		$x = 0,04$		$x = 0,05$		$x = 0,06$		$x = 0,08$		$x = 0,10$	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
7	50,2	54,5	41,3	45,6	40,8	45,1	40,8	45,1								
30	81,0	85,3	51,1	55,3	43,6	47,9	41,5	45,7	40,9	45,2	40,8	45,1	40,8	45,1		
365	117,5	121,8	104,4	108,7	88,7	93,0	75,6	77,9	62,8	67,1	55,7	60,0	47,9	52,2	44,1	48,4

Abbildung 83: Numerische Lösung der Feuchteverteilung DIN EN 15026 [DIN07]

Tage	$x = 0,5$		$x = 1,0$		$x = 1,5$		$x = 2,0$		$x = 2,5$		$x = 3,0$		$x = 4,0$		$x = 5,0$	
	min.	max.														
7	26,4	26,9	23,6	24,1	21,7	22,2	20,6	21,1	20,0	20,5	19,8	20,4	19,8	20,3	19,8	20,3
30	28,1	28,6	26,5	27,0	25,0	25,5	23,7	24,3	22,7	23,2	21,8	22,3	20,7	21,2	20,1	20,6
365	29,2	29,8	28,8	29,3	28,3	28,8	27,8	28,4	27,4	27,9	26,9	27,4	26,0	26,6	25,2	25,7

Abbildung 84: Numerische Lösung des Temperaturverlaufs DIN EN 15026 [DIN07]

Es werden die Simulationsergebnisse von *Delphin 5.6*, *5.8*, *6.0* und *6.1* dargestellt. Alle *Delphin* Simulationsergebnisse befinden sich innerhalb der angegebenen Grenzen und halten somit die geforderte Genauigkeit ein.

Feuchte- und Temperaturverteilung nach 7 Tagen

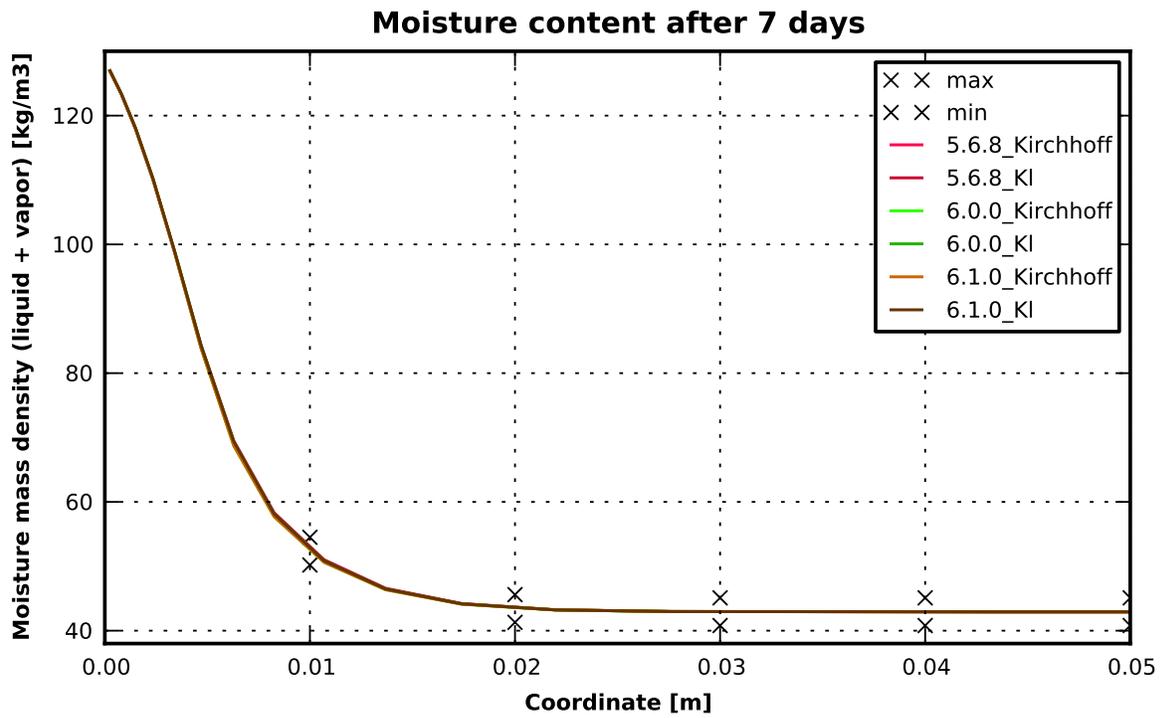


Abbildung 85: Feuchtegehalt nach 7 Tagen

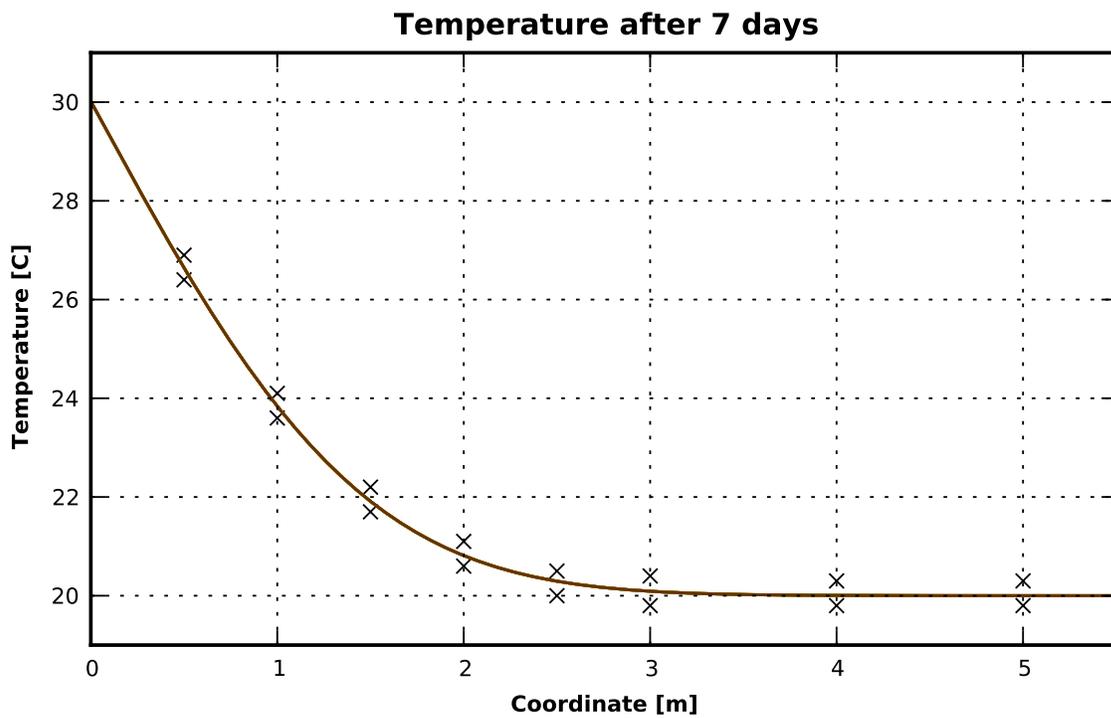


Abbildung 86: Temperatur nach 7 Tagen

Feuchte- und Temperaturverteilung nach 30 Tagen

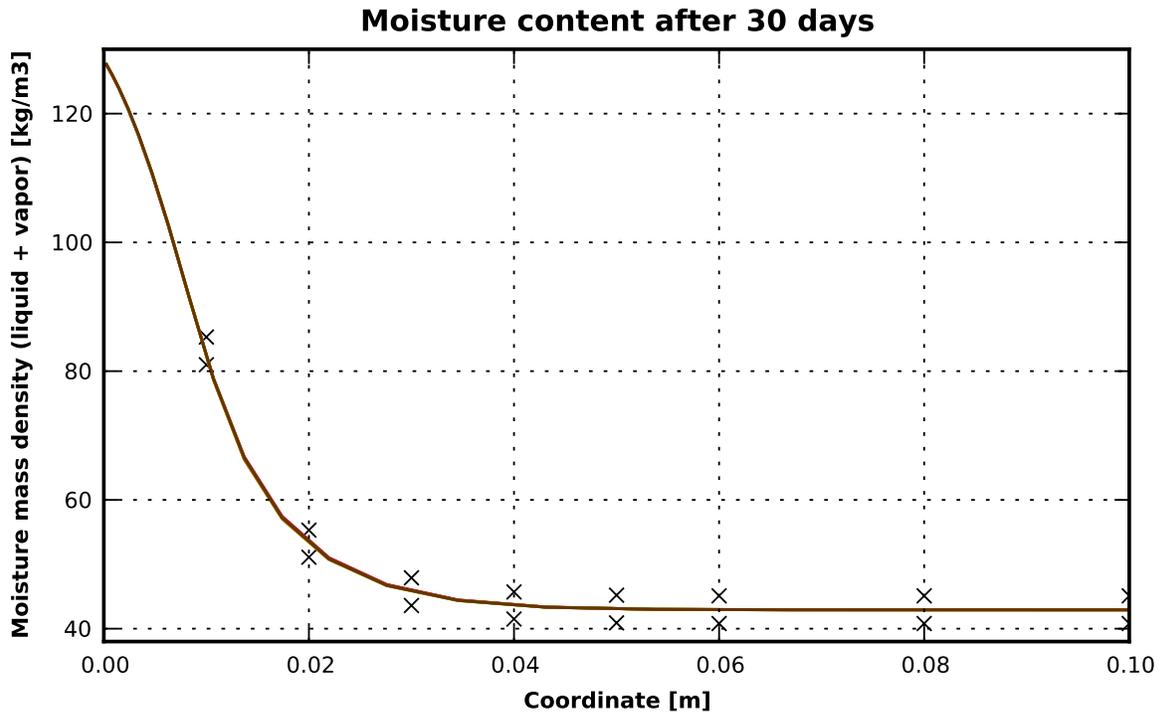


Abbildung 87: Feuchtegehalt nach 30 Tagen

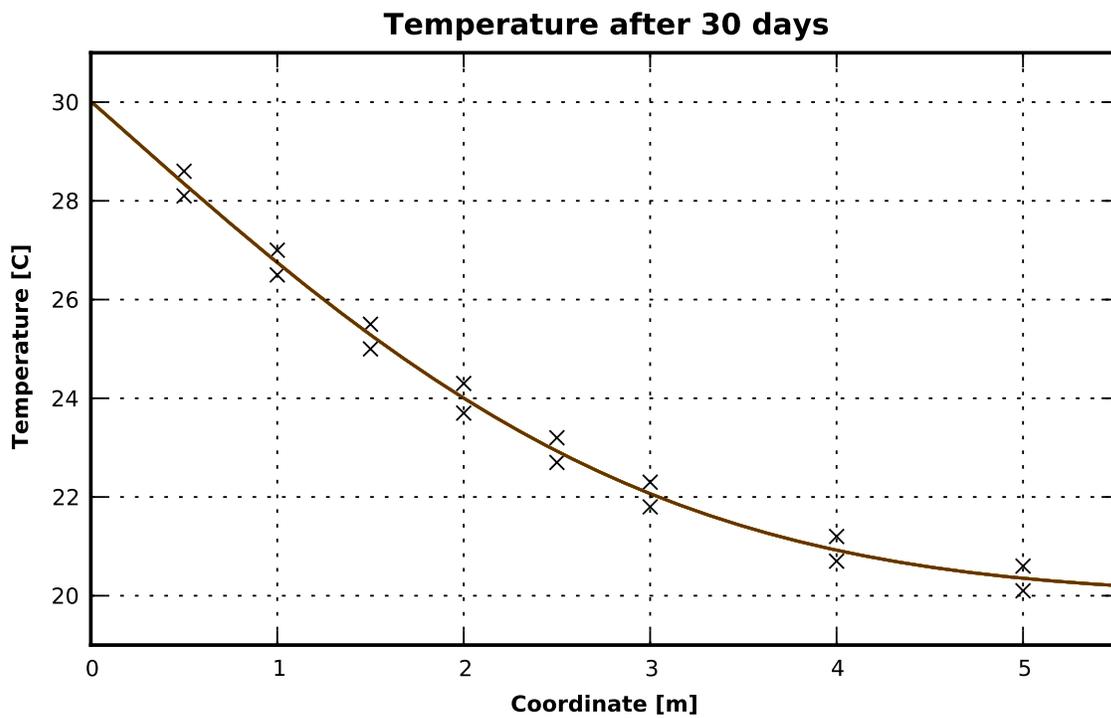


Abbildung 88: Temperatur nach 30 Tagen

Feuchte- und Temperaturverteilung nach 365 Tagen

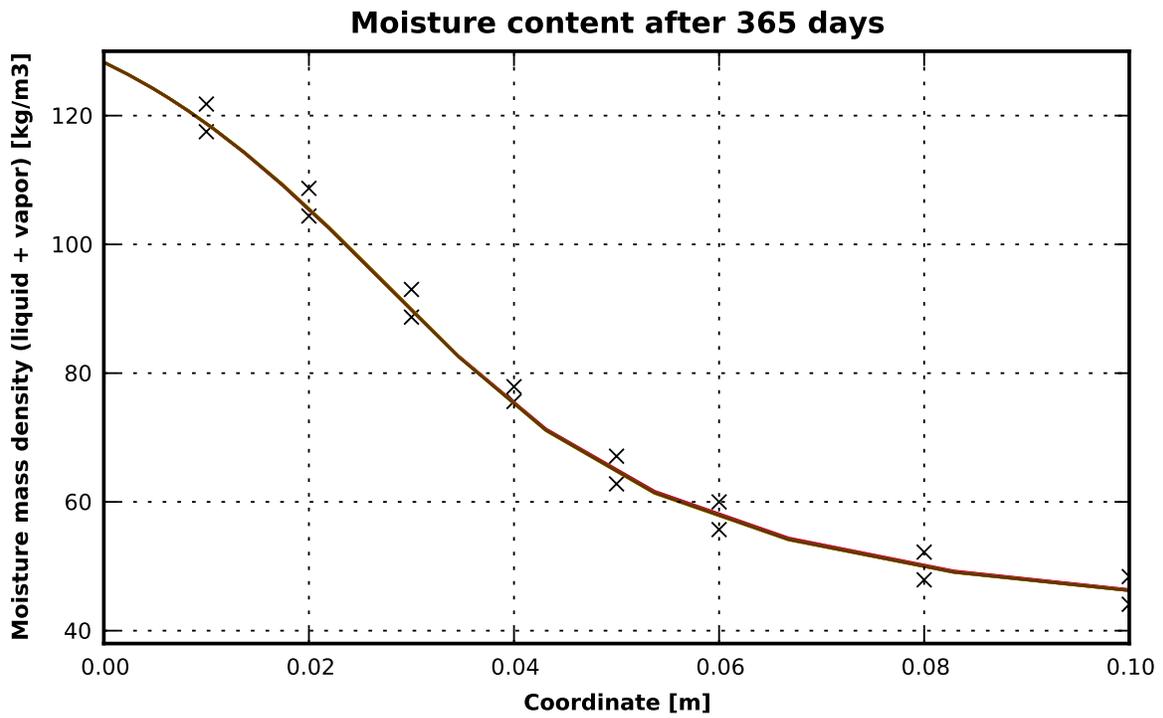


Abbildung 89: Feuchtegehalt nach 365 Tagen

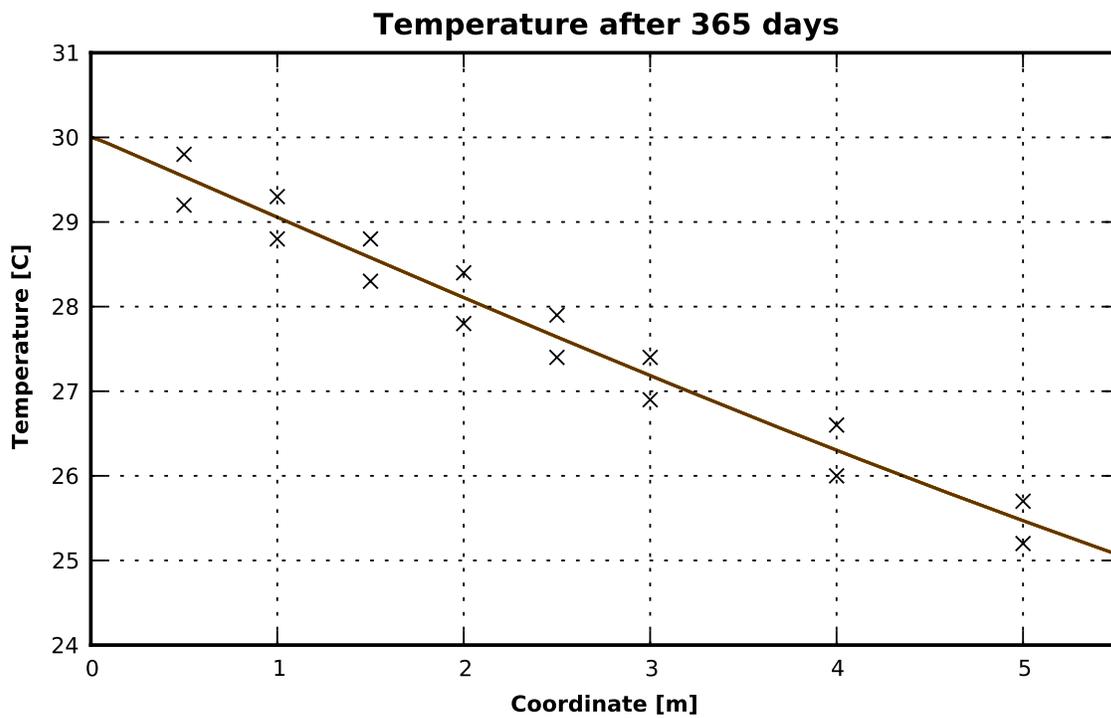


Abbildung 90: Temperatur nach 365 Tagen

11 Aufsaug-Trocknungs-Testfall (Wetting&Drying)

Beim Aufsaug-Trocknungs-Testfall wird eine zeitlich begrenzte Feuchtebelastung an der Außenseite einer einschichtigen Konstruktion untersucht. Im Anschluss an die Feuchtebelastung setzt beidseitig Trocknung ein. Während das Material an der Befeuchtungsseite bereits wieder trocknet, dringt Wasser durch kapillare Leitung weiterhin ins Innere der Konstruktion ein und führt schließlich auf der Innenseite der Konstruktion zu einer Erhöhung der Oberflächenfeuchte. In diesem Benchmark wird primär die Abbildung der kapillaren Leitung im mittel- und niederfeuchten Bereich geprüft. Dieser Prozess wird in den anderen Validierungsfällen nicht gezielt untersucht. Der Testfall wurde selbst definiert und enthält deshalb keine genormte Referenzlösung. Es werden *Delphin* Ergebnisse als Referenzlösungen angegeben.

11.1 Materialdaten

Als Material wurde die lasttragende Schicht aus dem HAMSTAD Benchmark 4 gewählt (siehe Kapitel 6.1). Die einschichtige Konstruktion ist 0.2m dick.

11.2 Klimadaten und Randbedingungen

11.2.1 Klimabedingungen

Als Klimabedingungen werden zum einen konstante Umgebungstemperaturen T_{eq} und relative Luftfechtigkeiten φ für innen und außen gegeben und zum anderen wird eine zeitlich begrenzte Feuchtelast an der Außenseite der Konstruktion festgelegt. Die Feuchtelast wird über die Druckhöhe h^{surf} definiert. Die Wand wird nur die ersten 1.15 Tage befeuchtet, danach fällt diese Last weg und der Trocknungsprozess setzt ein. Tabelle 50 zeigt die verwendeten Klimadaten für den Aufsaug-Trocknungs-Testfall.

	T_{eq} [°C]	φ [%]	h^{surf} [m]
Innen	20	50	-
Außen	40	50	1

Tabelle 50: Klimabedingungen

11.2.2 Randbedingungen

Für die Randbedingungen sind die Übergangswiderstände für die Wärmeleitung und die Wasserdampfdiffusion notwendig. Der Wärmeübergangswiderstand α_e und der Wasserdampfdiffusionswiderstand β_p sind in der folgenden Tabelle abgebildet.

	α_e [W/m ² K]	β_p [s/m]
Innen	2	$3 \cdot 10^{-9}$
Außen	15	$2 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 51: Übergangskoeffizienten Aufsaug-Trocknungs-Testfall

Beim gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport sind die Randbedingungen Wärmeleitung und Wasserdampfdiffusion zu definieren. Zusätzlich wird in diesem Prüffall die Konstruktion für 1.15 Tage einer Feuchtelast ausgesetzt. Dazu wird die Randbedingung Wasserkontakt verwendet, welche zum einem die Druckhöhe h^{surf} und zum anderen die Wassertemperatur T_w benötigt. Als Wassertemperatur wird in diesem Fall die äußere Umgebungstemperatur verwendet. Parallel dazu wird eine Randbedingung Wärmeleitung vom Typ Oberflächentemperatur definiert. Auch diese Randbedingung ist zeitlich begrenzt und gilt nur für die ersten 1.15 Tage. Anschließend wird während des Trocknungszeitraumes für die Wärmeleitung wieder ein Austauschkoefizient benötigt. Die verwendeten Randbedingungen, sowie die dazugehörigen physikalischen Parameter und Klimadaten sind in Tabelle 52 abgebildet.

Randbedingung	Art	Ort	Parameter	Klimadatei
Wärmeleitung (0 – 1.15 d)	Austauschkoefizient	innen	$\alpha_{e,i}$	$T_{eq,i}$
	Oberflächenwert	außen	-	$T_{eq,e}$
(1.15 – 50 d)	Austauschkoefizient	außen	$\alpha_{e,e}$	$T_{eq,e}$
	Wasserdampfdiffusion	innen	$\beta_{p,i}$	$T_{eq,i}$
Wasserkontakt (0 – 1.15 d)	Austauschkoefizient	außen	$\beta_{p,e}$	φ_i $T_{eq,e}$
	Oberflächenwert	außen	-	φ_e h^{surf} $T_{eq,e}$

Tabelle 52: Randbedingungen Aufsaug-Trocknungs-Testfall

11.2.3 Anfangsbedingungen

Als Anfangsbedingungen werden eine Temperatur T und eine relative Luftfeuchtigkeit φ nach Tabelle 53 festgelegt.

	φ [%]	T [°C]
Gesamte Konstruktion	50	20

Tabelle 53: Anfangsbedingungen Aufsaug-Trocknungs-Testfall

11.3 Validierungsrechnung

11.3.1 Ausgabe

Der Aufsaug-Trocknungs-Testfall wird über 50 Tage simuliert. Dabei werden stündliche Ausgaben von den folgenden physikalischen Größen erstellt:

- Temperaturfeld in [°C] über die gesamte Konstruktion
- Feuchtemassenverteilung in [kg/m³] über die gesamte Konstruktion
- Relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Konstruktion
- Temperaturverlauf an der Innenseite der Konstruktion

11.3.2 Solverparameter

Für den Aufsaug-Trocknungs-Testfall wird mit folgenden Solvareinstellungen gerechnet:

Solver Einstellungen	
Maximaler Zeitschritt	30 min
Relative Toleranz	10^{-5}
Absolute Toleranz Energie	0.1 J/m ³
Absolute Toleranz Feuchte	10^{-6} kg/m ³

Tabelle 54: Solverparameter Aufsaug-Trocknungs-Testfall

11.3.3 Diskretisierung

Es handelt sich hierbei um eine eindimensionale Simulation. Es wird mit einer äquidistant Diskretisierung von 0.1 mm simuliert.

11.3.4 Ergebnisse

Der Vergleich der Simulationsergebnisse der verschiedenen *Delphin* Versionen zeigt eine gute Übereinstimmung. Die mit *Delphin* berechneten Temperaturen, Luftfeuchten und Feuchtemassendichten werden im Folgenden zur Validierung anderer Simulationsprogramme aufgeführt:

Zeit in [d]	0	0.25	0.625	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	8
φ in [%]	50	43.4	39.6	43.5	62.3	71.5	73.8	70.4	53.3	41.9	36.5	33.8	32.2
T in [°C]	20	22.7	24.7	25.9	26.9	27.1	27.2	27.5	28.4	29.2	29.7	29.9	30.0

Tabelle 55: Referenzergebnisse an der Innenseite der Konstruktion

x in [m]	0	0.01	0.02	0.035	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	
w in [kg/m ³]	0.5 Tage	0.78	4.57	9.07	9.82	8.09	2.39	1.22	0.74	0.35	0.07	0.05	0.04
	2.5 Tage	0.06	0.55	0.79	1.10	1.64	1.82	1.69	1.39	1.10	0.86	0.59	0.08

Tabelle 56: Referenzergebnisse für die Feuchtemassenverteilung

Zustandsverlauf an der Innenseite der Konstruktion

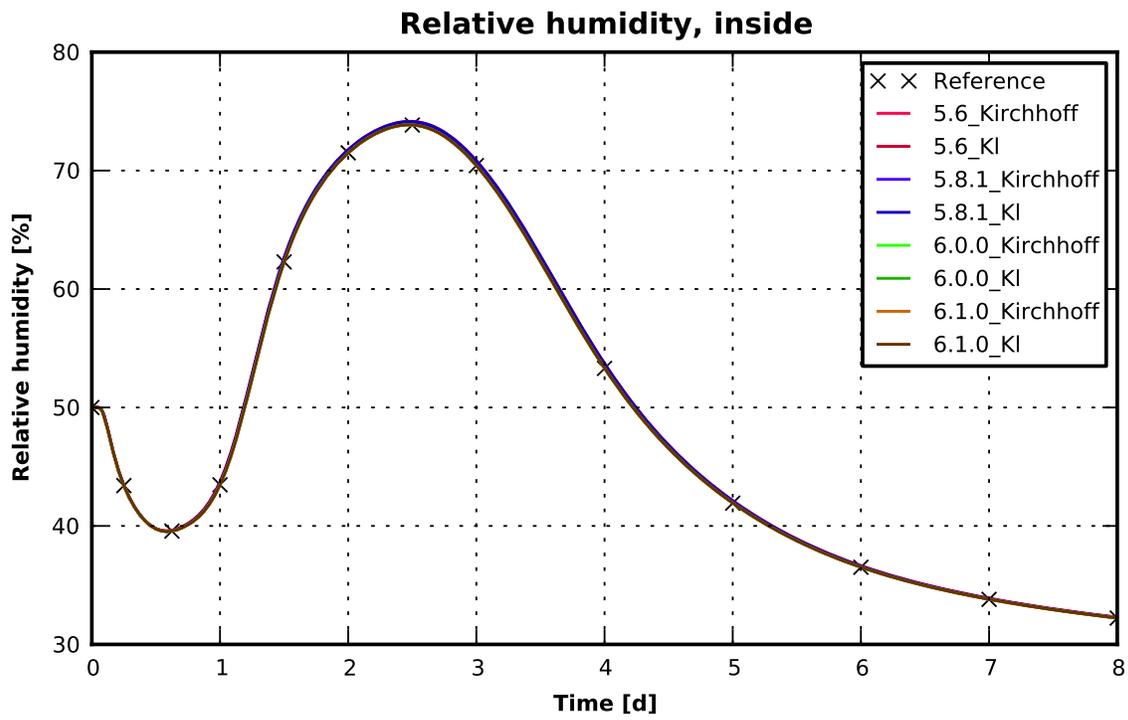


Abbildung 91: Relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite

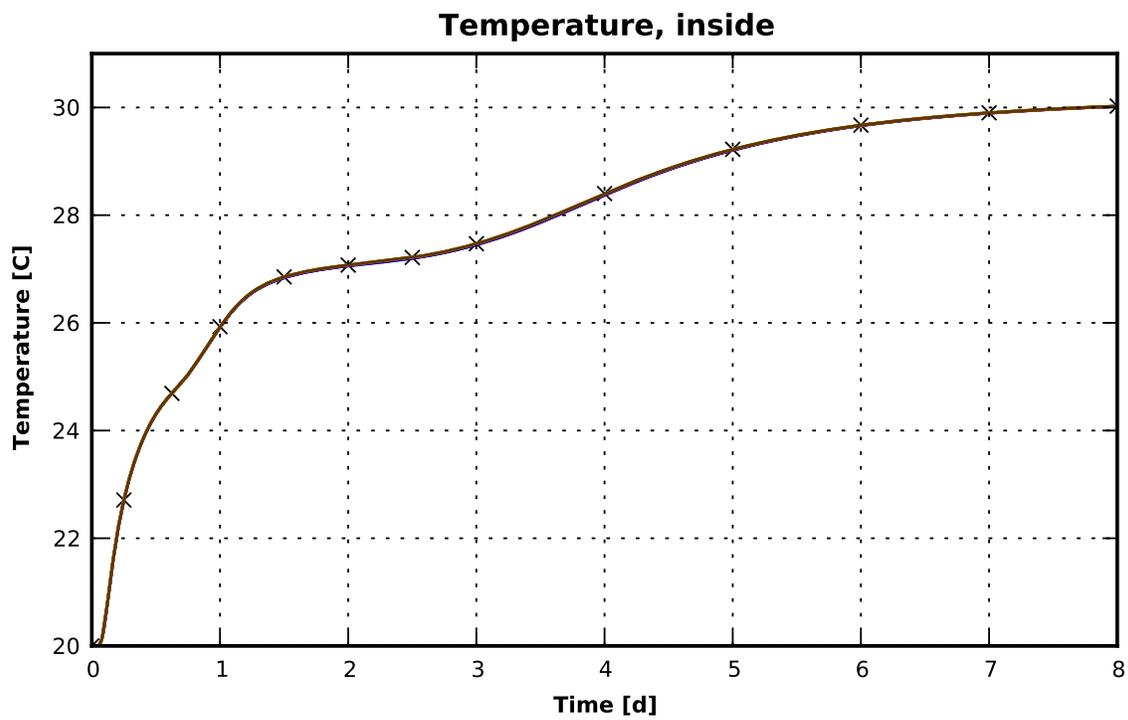


Abbildung 92: Temperaturverlauf an der Innenseite

Feuchtemassenverteilung während der Feuchtebelastung von außen

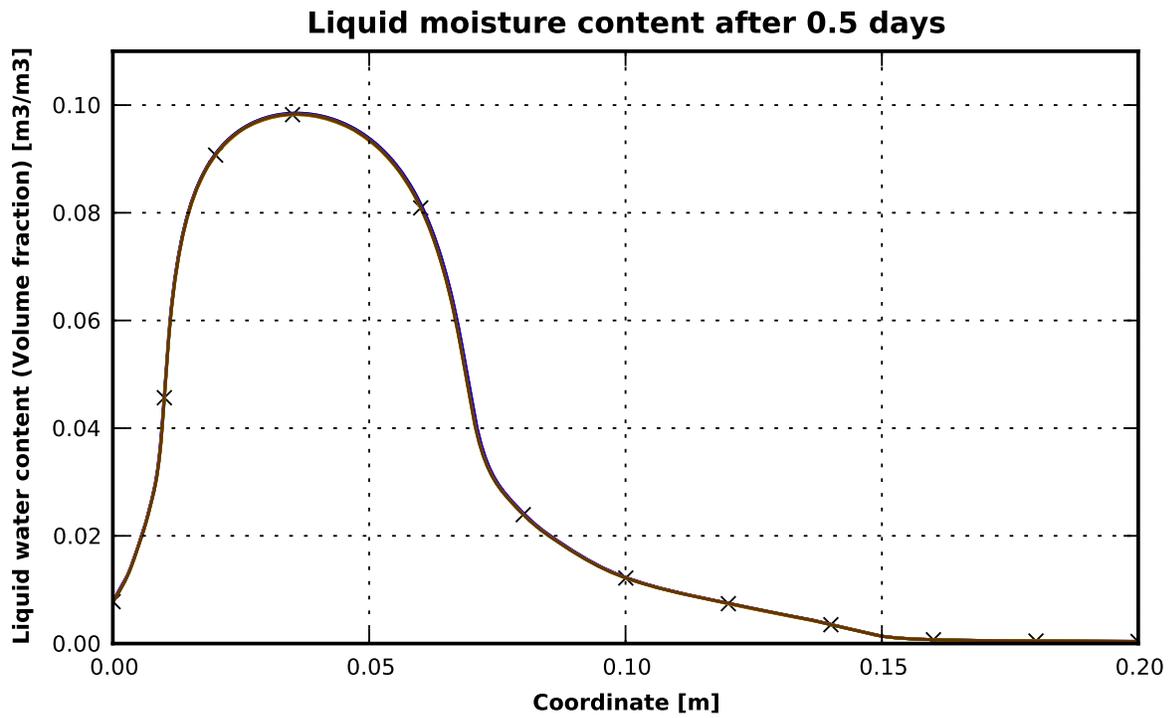


Abbildung 93: Feuchtemassenverteilung nach 0.5 Tagen

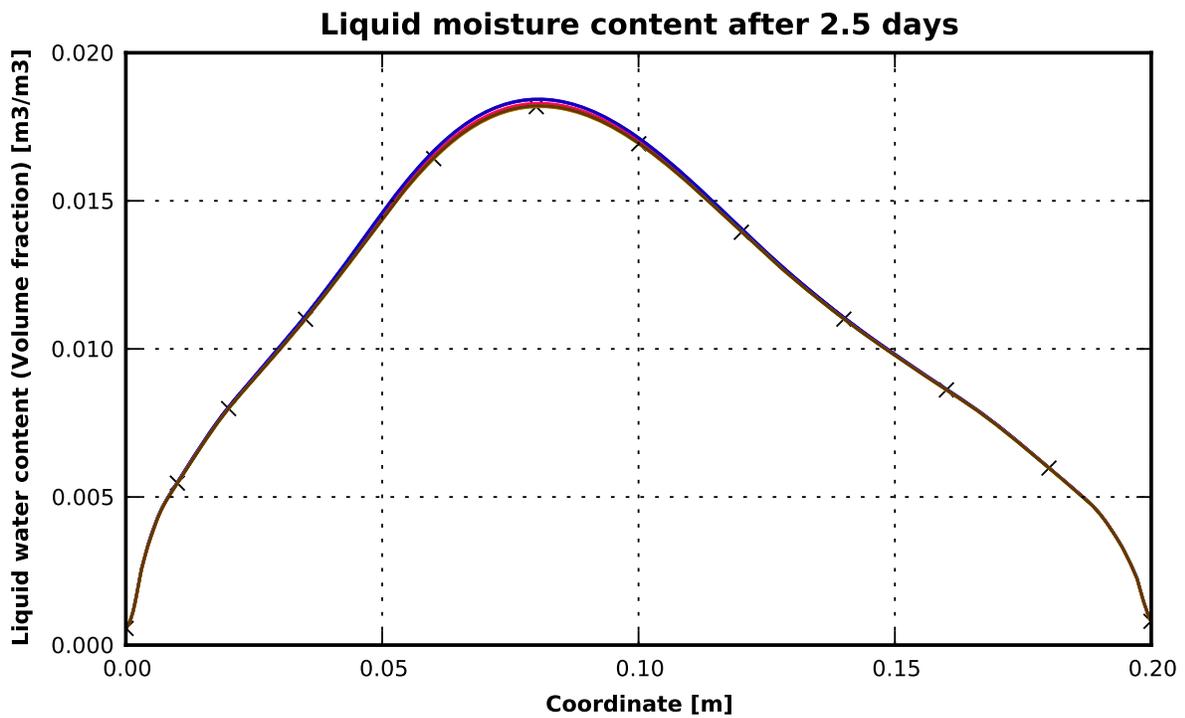


Abbildung 94: Feuchtemassenverteilung nach 2.5 Tagen

12 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurden die verschiedenen *Delphin*-Versionen für die hygrothermische Simulation validiert. Die einzelnen Testfälle wurden beschrieben, und Besonderheiten bei der Modellierung und Dateneingabe diskutiert. Alle getesteten Validierungsfälle konnten mit allen Versionen von *Delphin* abgebildet und nachgerechnet werden. Die Ergebnisse lagen dabei immer im vorgegebenen Toleranzbereich, bzw. im Bereich der anderen numerischen Lösungen. *Delphin* kann somit für gängige Problemfälle zuverlässig angewendet werden.

Geringe Abweichungen zwischen den getesteten *Delphin* Versionen sind auf Details der Implementierung zurückzuführen, welche sich aus Modellerweiterungen und Maßnahmen zur Performancesteigerung ergaben. Zum Beispiel werden bei den *Delphin*-Programmen seit Version 5.8 die Oberflächentemperaturen durch lineare Extrapolation bestimmt, welches Einfluss auf die Gitterabhängigkeit der Randwertberechnung hat. Abweichungen zwischen der Berechnung des kapillaren Flüssigwassertransports mit Hilfe des Kirchhoff-Potentials und der Flüssigwasserleitfähigkeit resultieren aus der Mittelungsmethode für Flüssigwasserleitfähigkeiten zwischen benachbarten Elementen. Allgemein haben die unterschiedlichen *Delphin*-Versionen eine verschiedene Gittersensibilität. Mit kleiner werdender Diskretisierung werden daher die Unterschiede geringer.

Getestet wurden die Transportvorgänge für Wärme, Feuchte und Luft. Es wurden dabei verschiedene Randbedingungen und Klimabedingungen getestet und sowohl eindimensionale als auch zweidimensionale Problemstellungen untersucht.

Hinsichtlich der aktuellen Anwendungsszenarien für hygrothermische Bauteilsimulation bedarf es weiterer Testfälle. Insbesondere instationäre hygrothermische 2D Berechnungen sowie Simulationen von feuchteabhängigen Folien werden in den vorhandenen Testfällen bislang nicht berücksichtigt.

Literatur

- [DIN07] *DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.* 2007
- [DIN08] *DIN EN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen.* 2008
- [Hag02] HAGENTOFT, Carl-Eric: HAMSTAD- WP2 Modeling / Chalmers University of Technology, Building Physics. 2002. – Technical Report
- [Ham02] CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY: HAMSTAD - Determination of liquid water transfer properties of porous building materials and development of numerical assessment methods. 2002. – Technical Report
- [VFN13] VOGELANG, St. ; FECHNER, H. ; NICOLAI, A.: Delphin 6 Material File Specification / Technische Universität Dresden, Institut für Bauklimatik. 2013. – Technical Report. – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-126274>