

Diplomarbeit

# Hygrothermische Bewertung von Flachdachaufbauten mit ökologischen Dämmstoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

## Hygrothermal evaluation of flat roof structures with ecological insulation materials

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin  
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

**Nina Schickmayr**

Matr.Nr.: 1325585

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Azra Korjenic**  
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. **Henriette Fischer**  
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. **Florian Teichmann**  
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie  
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Dezember 2023

# Erklärung zur Verfassung der Arbeit

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## DIPOMARBEIT

Nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Wien, im Dezember 2023

---

Unterschrift

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während des Studiums unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, besonders meinen Eltern und meiner Schwester. Danke Papa und ein besonderes danke an meine Mama, dass ihr mir diesen Weg mit eurer Unterstützung ermöglicht habt und mir bei allen Situationen im Laufe des Studiums zur Seite gestanden seid.

Weiters möchte ich mich bei meinem Freund bedanken, dass er mit mir das Ende meines Studiums durchgestanden hat und mich immer unterstützt.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Betreuerin Dipl.-Ing.in Henriette Fischer bedanken, dass sie mich in das spannende Thema dieser Arbeit eingeführt hat. Außerdem gilt mein Dank meinem zweiten Betreuer Dipl.-Ing. Bmst. Florian Teichmann, für die große Unterstützung bei der Erstellung und Fertigstellung dieser Arbeit und die vielen hilfreichen Anregungen.

Abschließend möchte ich mich noch bei allen Freunden bedanken, die meine Studienzeit so unvergesslich gemacht haben und mir immer zur Seite standen.

## Kurzfassung

Aufgrund der Bestrebungen in Richtung Energieeffizienz und der Minimierung von CO<sub>2</sub> Emissionen des Bauwesens rücken die ressourcenschonenden und regionalen Baumaterialien in den Vordergrund. Der Fokus dieser Arbeit liegt daher auf ressourcenschonenden Bauweisen und dem Einsatz von nachhaltigen, lokalen Materialien in Bezug auf das nicht hinterlüftete Flachdach aus Holz. Im Laufe der Zeit gerieten traditionelle Techniken und Erfahrungen im Umgang mit Naturbaustoffen in Vergessenheit, während moderne Baumaterialien und sich wandelnde Standards neue Herausforderungen darstellen, insbesondere in Hinblick auf das Feuchtigkeitsmanagement. Die Feuchte, die in die Konstruktion durch Diffusion und Konvektion über den Winter eindringt, kann nicht zur Gänze verhindert werden, wodurch die Rücktrocknung in den Sommermonaten einen wichtigen Anteil an der Funktionstüchtigkeit dieser Dachkonstruktion darstellt. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf dem Gründach, welches aufgrund des reduzierten Rücktrocknungspotenzials und der möglichen Teilverschattung durch eine Attika eine gute bauphysikalische Planung in Hinblick auf die fehlende Hinterlüftung benötigt. Aufgrund der möglichen negativen Auswirkungen der ökologischen Dämmalternativen auf das Feuchteverhalten der nicht hinterlüfteten Flachdachkonstruktionen aus Holz werden im Rahmen dieser Arbeit typische Flachdachaufbauten unter Berücksichtigung dieser Bedingungen hygrothermisch simuliert und beurteilt.

Im Rahmen des durch das FFG-Programm COIN geförderten Forschungsprojekts natuREbuilt ergab sich die Fragestellung zum hygrothermischen Verhalten von begrünten und nicht hinterlüfteten Flachdächern in Holzmassiv- und Holzrahmenbauweise unter der Verwendung von ökologischen Dämmmaterialien. In dieser Arbeit soll das Wissen im Umgang mit ökologischeren Dämmstoffen in Bezug auf nicht hinterlüftete Flachdachkonstruktionen aus Holz erweitert werden. Dabei stützt sich die Methodik auf hygrothermische Simulationen, wodurch die Eigenschaften der ökologischen Dämmung und die Auswirkungen eines Gründachs optimal berücksichtigt werden können. Durch die Simulation von Standardaufbauten von nicht hinterlüfteten Flachdachkonstruktionen aus Holz, ausgebildet als Folien-, Kies- und Gründach, werden häufig angewandte Dachkonstruktionen abgedeckt. Durch die Berücksichtigung von angenommenen Fehlstellen und unterschiedlichen inneren und äußeren Abschlüssen wird außerdem die Dauerhaftigkeit und Funktionstüchtigkeit bei zusätzlicher Feuchtigkeit im Inneren dieser Aufbauten genau untersucht.

Ziel ist es, die Effektivität und Schadensfreiheit von Flachdachkonstruktionen mit ökologischen Dämmstoffen zu evaluieren. Dafür werden die Ergebnisse mit verwandten wissenschaftlichen Arbeiten und bestehenden Lösungen im Bereich des ökologischen Bauens verglichen. So können die aus den Simulationen erhaltene Ergebnisse direkt mit der schon bestehenden Literatur verglichen und kritisch hinterfragt werden. Dadurch soll gezeigt werden, dass ökologische Dämmalternativen mit modernen Dämmstoffen konkurrieren und in einigen Aspekten diese sogar übertreffen können.

# Abstract

Due to the efforts towards energy efficiency and the minimization of CO<sub>2</sub> emissions in the construction industry, resource-saving and regional building materials are coming to the forefront. The focus of this thesis is therefore on resource-saving construction methods and the use of sustainable, local materials in relation to non-ventilated flat timber roofs. Over time, traditional techniques and experience in dealing with natural building materials have been forgotten, while modern building materials and changing standards present new challenges, especially in terms of moisture management. The moisture that penetrates the construction through diffusion and convection over the winter cannot be completely prevented, which means that re-drying in the summer months is an important part of the functionality of this roof construction. The focus is on the green roof, which requires good building physics planning due to reduced drying potential and potential partial shading by an attic, particularly considering the lack of ventilation. Due to the possible negative impacts of ecological insulation alternatives on the moisture behavior of non-ventilated wooden flat roof constructions, typical flat roof structures are hygrothermally simulated and assessed within the scope of this work, taking these conditions into account.

As part of the natuREbuilt research project, the question of the hygrothermal behavior of green and non-ventilated flat roofs in solid timber and timber frame construction using ecological insulation materials arose. The aim of this work is to expand the knowledge in dealing with more ecological insulation materials in relation to non-ventilated flat roof constructions made of wood. The methodology is based on hygrothermal simulations, whereby the properties of the ecological insulation and the effects of a green roof can be optimally taken into account. The simulation of standard structures of non-ventilated flat roof constructions made of wood, designed as foil, gravel and green roofs, covers frequently used roof constructions. By taking into account assumed defects and different internal and external finishes, the durability and functionality in the event of additional moisture inside these structures is also investigated in detail.

The aim is to evaluate the effectiveness and freedom from damage of flat roof constructions with ecological insulation materials. To this end, our results are compared with related scientific work and existing solutions in the field of ecological construction. In this way, the results obtained from the simulations can be directly compared with the existing literature and critically scrutinized. This will demonstrate that ecological insulation alternatives can compete with modern insulation materials and even outperform them in some aspects.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Inhaltsverzeichnis

Erklärung zur Verfassung der Arbeit .....	II
Danksagung .....	III
Kurzfassung.....	IV
Abstract .....	V
Inhaltsverzeichnis .....	1
1 Einleitung.....	4
1.1 Motivation.....	5
1.2 Fragestellungen .....	5
1.3 Aufbau der Arbeit.....	6
2 Grundlagen.....	7
2.1 Konstruktionsgrundsätze für Flachdächer in Holzbauweise.....	7
2.1.1 Planungsgrundsätze .....	7
2.1.2 Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Flachdächer.....	8
2.1.3 Einfluss der Dampfbremse und der Dacheindeckung.....	8
2.1.4 Einfluss ökologischer Dämmmaterialien .....	9
2.2 Konstruktionsgrundsätze für das begrünte Dach .....	9
2.2.1 Reduziert extensiv begrüntes Dach.....	10
2.2.2 Extensiv begrüntes Dach .....	10
2.2.3 Reduziert intensiv begrüntes Dach.....	10
2.2.4 Intensiv begrüntes Dach.....	10
2.3 Grundlagen des ökologischen Bauens.....	10
2.3.1 Ökologische Dämmstoffe.....	10
2.3.2 Bauökologie und Baubiologie.....	11
2.3.3 Bewertungsmöglichkeiten.....	11
2.3.4 Ökoindex OI3 .....	12
3 Methodik.....	14
3.1 Bauteilanforderungen.....	14
3.2 Aufbautenliste.....	15
3.3 Ablauf der Simulationen .....	17
3.3.1 Schichtaufbau .....	17
3.3.2 Wetterdaten und Orientierung.....	17
3.3.3 Steuerung, Numerik und Rechenzeit .....	18
3.3.4 Ergebnisauswertung mit WUFI Graph .....	18
3.4 Auswertungskriterien .....	18
3.4.1 Gesamtwassergehalt der Konstruktion.....	19
3.4.2 Holzfeuchte .....	20
3.4.3 Auswertung gesamtes Bauteil und schichtweise Auswertung .....	20

3.4.4	Isoplethen.....	20
3.4.5	Tauwasserauswertung.....	21
3.4.6	Wärmeleitfähigkeit.....	21
3.5	Eingabewerte zur Simulation Foliendach.....	24
3.6	Eingabewerte zur Simulation Kiesdach.....	26
3.7	Eingabewerte zur Simulation Gründach.....	28
4	Bewertung der Simulationsergebnisse.....	31
4.1	Auswertung Massiv- und Leichtbauweise Referenzaufbauten.....	31
4.1.1	Massivbauweise mit EPS-Dämmung.....	31
4.1.2	Leichtbauweise mit Mineralwoll-Dämmung.....	32
4.2	Diskussion Referenzaufbauten.....	34
4.3	Auswertung Massiv- und Leichtbauweise mit Dämmalternative.....	34
4.3.1	Massivbauweise mit Kork Dämmung.....	34
4.3.2	Leichtbauweise mit Schafwolle Dämmung.....	36
4.4	Diskussion der Aufbauten mit ökologischen Dämmalternativen.....	37
4.5	Auswertung Massiv- und Leichtbauweise mit Dämmalternative und Fehlstelle.....	38
4.5.1	Massivbauweise mit Kork-Dämmung und Fehlstelle.....	38
4.5.2	Leichtbauweise mit Schafwoll-Dämmung und Fehlstelle.....	40
4.6	Diskussion der Aufbauten mit ökologischen Dämmalternativen und angenommenen Fehlstellen.....	42
4.7	Auswertung Massiv- und Leichtbauweise mit Dämmalternative, mit und ohne Fehlstelle und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen.....	43
4.7.1	Massivbauweise mit Kork-Dämmung, mit und ohne Fehlstelle und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen.....	43
4.7.2	Leichtbauweise mit Schafwoll Dämmung, mit und ohne Fehlstelle und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen.....	46
4.8	Diskussion der der Aufbauten mit ökologischen Dämmalternativen, mit und ohne angenommene Fehlstellen und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen.....	50
4.9	Auswertung Leichtbauweise mit weiteren Dämmalternative, mit innerer Fehlstelle, Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung und feuchtevariabler Dampfbremse.....	51
4.9.1	Leichtbauweise mit Flachs- und Zellulose-Dämmung, innerer Fehlstelle, Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung und feuchtevariabler Dampfbremse.....	51
5	Diskussion der Ergebnisse.....	54
6	Fazit und Ausblick.....	55
7	Literaturverzeichnis.....	57
8	Abbildungsverzeichnis.....	60
9	Tabellenverzeichnis.....	63
Anhang A	.....	65
9.1	Auswertung Massivbauweise mit Kork Dämmung.....	65
9.1.1	Gründach.....	65
9.2	Auswertung Leichtbauweise mit Schafwolle Dämmung.....	69
9.2.1	Gründach.....	69

9.3	Auswertung Massivbauweise mit Kork Dämmung und Fehler .....	74
9.3.1	Gründach mit der Kombination aus innerem und äußerem Fehler.....	74
9.4	Auswertung Leichtbauweise mit Schafwolle Dämmung und Fehler.....	78
9.4.1	Gründach mit Fehler in der inneren Dampfsperre .....	78
9.5	Auswertung Massiv- und Leichtbauweise mit Dämmalternative, mit Fehlstelle und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen.....	83
9.5.1	Massivbauweise, Gründach, Kork-Dämmung, Bitumen-Dachabdichtung, Kombination aus innerer und äußerer Fehlstelle und feuchtevariabler Dampfbremse.....	83
9.5.2	Gründach mit EPDM Dachabdichtung, feuchtevariable innere Dampfbremse und der Kombination aus innerem und äußerem Fehler.....	87
9.5.3	Leichtbauweise, Gründach, Schafwoll-Dämmung, Bitumen-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse .....	91
9.5.4	Leichtbauweise, Gründach, Schafwoll-Dämmung, EPDM-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse .....	96
9.6	Auswertung Leichtbauweise mit weiteren Dämmalternative, mit innerer Fehlstelle, Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung und feuchtevariabler Dampfbremse.....	101
9.6.1	Leichtbauweise, Flachs-Dämmung, Bitumen-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse .....	101
9.6.2	Leichtbauweise, Flachs-Dämmung, EPDM-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse .....	106
9.6.3	Leichtbauweise, Zellulose-Dämmung, Bitumen-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse .....	111
9.6.4	Leichtbauweise, Zellulose-Dämmung, EPDM-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse .....	116

# 1 Einleitung

Die Bautechnologien und Konstruktionen entwickeln sich stetig weiter, doch das Leitbild des Bauens mit niedrigem Energiebedarf durch möglichst kompakte Gebäude mit großen Dämmstärken und das Minimieren der dabei erzeugten CO<sub>2</sub> Emissionen bleibt bestehen. Der Trend geht aktuell in Richtung ressourcenschonender Bauweisen sowie Verwendung von nachhaltigeren und lokaleren Bau- und Dämmmaterialien [1, 2, 3]. Die Erfahrung aus der langjährigen Bautradition im Umgang mit Naturbaustoffen gerät mit der Zeit immer mehr in Vergessenheit, da architektonische Trends immer mehr Konkurrenz in Form neuer Baumaterialien mit besonderen Eigenschaften bekommen und die Standards sowie aktuellen Normen sich ständig verändern bzw. weiterentwickeln [4]. Durch die verlorenen Erfahrungswerte in Bezug auf ökologische Bau- und Dämmstoffe, gelten sie im Vergleich zu den Materialien auf Erdölbasis meistens als kritischer in Hinblick auf das Feuchteverhalten [2].

Der große Unterschied zwischen den meisten nachwachsenden und konventionellen Bauprodukten ist die Sorptionsfähigkeit. Dämmstoffe auf natürlicher Basis können in der Regel gut Feuchte speichern. Zusätzlich bleibt bei den natürlichen Bauprodukten aus nachwachsenden Rohstoffen das in der Wachstumsphase gesammelte CO<sub>2</sub> gespeichert und wird verbaut, während bei der Herstellung von zement- oder kunststoffbasierten Baustoffen hohe CO<sub>2</sub> Emissionen anfallen. Durch hygrothermische Simulation können die spezifischen Eigenschaften der nachhaltigen Materialien im Umgang mit Feuchte berücksichtigt werden und so verschiedene Konstruktionen noch vor einer Realisierung untersucht werden. Damit können sichere und schadensfreie Dachkonstruktionen realisiert und das Bauen unter Verwendung von ökologischen Dämm- und Baumaterialien vorangebracht werden [2].

Neben dem Trend zur Verwendung und der Nutzung der möglichen positiven Effekte der ökologischen Dämmmaterialien hat auch das begrünte Dach durch bestimmte Einflüsse auf das lokale Umfeld an Bedeutung gewonnen. Durch die anhaltenden Veränderungen unseres Klimas in den letzten Jahren und den daraus entstehenden neuen Wetterphänomenen sind Stadtentwicklungskonzepte gefragt, welche mit strategisch gut positionierten Maßnahmen den Folgen der Klimaveränderungen entgegenwirken. Eine Maßnahme betrifft die Integration von mehr „grün“ im städtischen Umfeld. Durch begrünte Fassaden und Dächer aber auch durch generell mehr Grünflächen im Stadtgebiet können die Effekte aus lokalen Hitzephänomenen durch das veränderte Klima abgeschwächt werden [5]. Neben der Erhöhung der lokalen Biodiversität und der Optik wirkt sich das Gründach auch auf das lokale Mikroklima aus, da das Umfeld im Sommer durch die Verdunstungskälte abgekühlt wird, während im Winter die Substratschicht als Puffer wirkt und die verlorene Wärmemenge aus dem Wohnraum reduziert [6].

Das begrünte Flachdach steht für die moderne und nachhaltige Architektur, wobei auch immer mehr auf möglichst schlanke Konstruktionen gesetzt wird [7, 8]. Diese werden durch die Reduktion der Aufbaustärken erreicht, wobei dabei meistens die Hinterlüftung der Dachkonstruktion wegfällt. Gleichzeitig können aber auch noch Photovoltaikanlagen am Dach angeordnet werden, wobei es durch die teils großflächige Beschattung und die fehlende bewegte Luftschicht im Dachaufbau zu einer reduzierten Rücktrocknung kommt und so Schadensfälle nicht ausgeschlossen werden können. Weiters können kleine Leckagen in der luftdichten Ebene der Konstruktion nie ausgeschlossen werden, wodurch das nicht hinterlüftete Flachdach in Holzbauweise nicht als fehlertolerante Konstruktion bewertet wird [1, 3, 9]. Aufgrund der Konstruktion können Schäden übermäßiger Durchfeuchtung meist erst spät entdeckt werden. Die Feuchteschäden im Inneren der Konstruktion durch zu hohe Feuchtigkeitskonzentrationen können das tragende Bauteil Holz oder das Dämmmaterial in oder oberhalb der Tragebene betreffen – beide Schadensfälle sind danach mit einem großen Sanierungsaufwand verbunden [9].

## 1.1 Motivation

Neben den wärme-, brand- und schallschutztechnischen Anforderungen, die einem Dach zugeordnet werden, muss das Dach als oberster Abschluss eines Gebäudes auch in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit mechanischer, witterungsbedingter, hygrischer und thermischer Beanspruchung standhalten. Über das Jahr verteilt ist es den unterschiedlichen Wetterereignissen, regelmäßigen Wartungsarbeiten und Kontrollen sowie intensiven solaren Einflüssen und teils großen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Aufgrund dessen sind die verwendeten Materialien am Dach von großer Bedeutung auch in Bezug auf die Langlebigkeit und Dichtheit der gesamten Konstruktion [10].

Aufgrund der durch die Konstruktion selbst eingebrachten zusätzlichen Feuchtequelle kommt nicht hinterlüfteten Dächern in Holzbauweise, und gemäß der hier vorliegenden Arbeit nicht hinterlüfteten Flachdächern aus Holz, eine besondere Rolle in Hinblick auf das hygrische Verhalten zu [10]. Aufgrund der hohen Vorfertigungsmöglichkeit und der Option von leichteren Dachkonstruktionen kommt es zu einer immer häufigeren Anwendung im Bereich des Daches, wodurch das Wissen über das Materialverhalten für eine schadensfreie Anwendung immer mehr an Bedeutung gewinnt [3].

Einen Sonderfall in Bezug auf das hygrische Verhalten stellt das nicht hinterlüftete, begrünte Flachdach in Holzbauweise dar. Der Feuchteintrag in die Konstruktion durch Diffusion und Konvektion kann über den Winter nicht zur Gänze verhindert werden, wodurch die Rücktrocknung in den Sommermonaten einen wichtigen Anteil an der Funktionstüchtigkeit dieser Dachkonstruktion darstellt. Aufgrund des reduzierten Rücktrocknungspotenzials aufgrund der Begrünung und mögliche Teilverschattung durch eine Attika oder durch eine etwaige PV-Anlage bedarf es einer guten bauphysikalischen Planung dieser nicht hinterlüfteten Dachkonstruktion [3].

Im Rahmen des Forschungsprojekts natuREbuilt [11] ergab sich die Fragestellung zum hygrothermischen Verhalten von begrünten und nicht hinterlüfteten Flachdächern in Holzmassiv- und Holzrahmenbauweise unter der Verwendung von ökologischen Dämmmaterialien. Aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften und der damit zusammenhängenden unterschiedlichen Feuchtetransportmechanismen kann der Feuchtetransport als ein komplexes System mit vielen Randbedingungen dargestellt werden. Grundsätzlich wird dafür das Glaser-Verfahren, ein vereinfachtes Berechnungsverfahren, festgelegt [12, 13]. Jedoch kann dieses nur sehr eingeschränkt für den Feuchteintrag aus dem Innenraum durch Dampfdiffusion angewandt werden. Die Erweiterung, das modifizierte Glasverfahren, ermöglicht zusätzlich die Berücksichtigung der Konvektion durch den Feuchteintrag aus Leckagen und solaren Einträgen, wodurch schon mehr Konstruktionen vereinfacht feuchteschutztechnisch nachgewiesen werden können. Mögliche Randbedingungen, wie die Anwendung von ökologischen Dämmstoffen, Teilverschattung durch etwaige PV-Anlagen am Dach bzw. eine Attika und der Einfluss eines Gründaches, können jedoch weiterhin nicht berücksichtigt werden. Aufgrund der möglichen negativen Auswirkungen dieser Randbedingungen auf das Feuchteverhalten der nicht hinterlüfteten Flachdachkonstruktionen aus Holz werden im Rahmen dieser Arbeit typische Flachdachaufbauten unter Berücksichtigung dieser Bedingungen hygrothermisch simuliert und beurteilt [14].

## 1.2 Fragestellungen

Die Fragestellungen für diese Arbeit in Bezug auf das Feuchteverhalten von nicht hinterlüfteten Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise mit ökologischen Dämmstoffen lauten:

- Fragestellung 1: Bewirkt eine potenziell höhere Feuchtlast durch ökologische Dämmstoffe signifikante Verhaltensänderungen innerhalb der Konstruktion?
- Fragestellung 2: Welche Verhaltensunterschiede zeigen herkömmliche und ökologische Dämmstoffe in einer nicht hinterlüfteten Dachkonstruktion aus Holz?
- Fragestellung 3: Erfordern Konstruktionen mit ökologischen Dämmstoffen in nicht hinterlüfteten Flachdächern in Holzbauweise eine kritischere Betrachtung?

- Fragestellung 4: Können Kondensatbildung oder Schlagregeneinwirkung zu Schäden durch Verrottung oder Schimmelbildung an der Dämmung oder den Holzwerkstoffen innerhalb der Konstruktion führen?
- Fragestellung 5: Können ökologische Dämmungen saisonale Schwankungen in Hinsicht auf Feuchtetransport und -speicherung effektiv besser ausgleichen als herkömmliche synthetische Dämmstoffe?
- Fragestellung 6: Hat die Farbe der Dachoberfläche maßgeblichen Einfluss auf die Funktionstüchtigkeit der Dachkonstruktion und werden im Vergleich bei nicht hinterlüfteten Flachdach mit ökologischer Dämmung andere Temperaturen festgestellt?

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Aufgrund der geringen Fehlertoleranz und der daraus folgenden Frage in Bezug auf die Dauerhaftigkeit nicht hinterlüfteter Flachdachkonstruktion werden dazu in dieser Arbeit Aufbauten für den mehrgeschossigen Neubau erstellt, um Erkenntnisse im Rahmen der Anwendung von nicht hinterlüfteten und ökologisch gedämmten Flachdachkonstruktionen aus Holz zu gewinnen. Im ersten Schritt werden Standardaufbauten ausgewählt, um die mögliche Verwendung von ökologischer Dämmung in üblichen Anwendungsfällen aufzuzeigen. Neben den Aufbauten mit nachhaltigeren Dämmvarianten werden immer auch die Referenzaufbauten mit den heutzutage üblichen Dämmmaterialien simuliert, um im direkten Vergleich die eventuellen Schwächen erkennen und abschätzen zu können. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Aufbauten in ihrer jeweiligen Ausführung werden zu Beginn einige konstruktive und bauphysikalische Randbedingungen festgelegt. Unter anderem werden Annahmen hinsichtlich der tragenden Dachkonstruktion, der U-Wert Anforderung des Flachdaches, die für die Simulationen zur Anwendung kommenden Dämmmaterialien sowie die Art der Abdichtungen und Folien festgelegt. Bei den Aufbauten werden im Vergleich zu den herkömmlichen Dämmstoffen sowohl nachhaltige und ressourcenschonende Dämmvarianten als auch verschiedene Dachaufbauten und unterschiedliche innere Abschlüsse der Konstruktion untersucht. Weiters werden auch Aufbauten mit Fehlstellen simuliert, um die Funktionsweise des Aufbaus mit ökologischer Dämmung in einer Art „worst case“ Szenario darstellen zu können.

Die Aufbauten werden mit dem Programm WUFI 2D simuliert und anschließend mit der Erweiterung des Programms WUFI Graph ausgewertet. Die Ergebnisse der Simulationen werden anschließend untereinander verglichen, um Aussagen zur Dauerhaftigkeit in Bezug auf die Feuchtetransport- und Speichervorgänge innerhalb der Dachkonstruktion treffen zu können.

## 2 Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel wird auf die Konstruktionsgrundsätze für Flachdächer in Holzbauweise eingegangen. Ein Thema, das durch das wachsende Interesse für nachhaltige Baupraktiken zunehmend an Bedeutung gewinnt. Der bekannte Einfluss von ökologischen Dämmalternativen auf die Funktionstüchtigkeit und Dauerhaftigkeit von Flachdachkonstruktionen aus der Literatur wird festgehalten. Zusätzlich wird auf Planungshinweise zur Implementierung von begrünten Dächern eingegangen. Abschließend werden die Bewertungsmethoden für Baumaterialien und Gebäude beleuchtet, um eine umfassende Perspektive auf die ökologischen, ökonomischen und funktionalen Aspekte des Bauens mit Holz und ökologischer Dämmung zu geben.

### 2.1 Konstruktionsgrundsätze für Flachdächer in Holzbauweise

#### 2.1.1 Planungsgrundsätze

Für die Planung und den Bau eines Flachdachs aus Holz gilt es grundsätzliche konstruktive Vorgaben einzuhalten, um eine funktionierende und schadensfreie Konstruktion gewährleisten zu können.

Aufgrund der geringen Dachneigung eines Flachdachs, mit einem Mindestgefälle der Dachabdichtung von 2 % in der Falllinie, kommt es zu einer reduzierten Ableitung des Oberflächenwassers. Deshalb ist auf die zu erwartende Endverformung der Dachkonstruktion zu achten und es müssen schon während der Planung alle auftretenden Nutzlasten wie Dachaufbauten und Schnee berücksichtigt werden. Aufgrund der zulässigen Bautoleranzen in Kombination mit den geringen Dachneigungen kann es trotzdem durch Unebenheiten zu stehendem Wasser kommen, welches ebenfalls in der Planung berücksichtigt werden muss, um etwaige Folgeschäden“ verhindern zu können [10, 15].

Weiters sollen für das Flachdach in Holzbauweise trockene Baustoffe verwendet werden. In Hinblick auf die tragenden Holzbauteile wird gemäß ÖNORM B 2215, bei der Verwendung von Vollholzelementen von einer Ausgleichsfeuchtigkeit von 18 % ausgegangen [16]. In der Fachliteratur wird eine Einbaufeuchte von 16 % für das Holz der Flachdachkonstruktion empfohlen [10, 17].

In Hinblick auf die Lage der Dämmebene stellt die Ausführung eines Flachdachs mit Aufdachdämmung die sicherste Variante dar, da die Dämmebene und die Tragebene getrennt voneinander ausgeführt werden. Eventuell auftretende Feuchteschäden aufgrund von übermäßigem Kondenswasser betreffen so nicht die auf der warmen Seite liegenden statisch relevanten Teile.

Kommt es zu einem erhöhten Diffusionswiderstand außenseitig und einer daraus folgenden reduzierten Rücktrocknung von Feuchtigkeit aus der Konstruktion im Sommer, ist innenseitig ein geringerer Diffusionswiderstand anzuordnen. Dies ergibt sich durch die Art der Dacheindeckung, wie etwa ein Gründach oder die übermäßige Beschattung der Dachfläche. Der mögliche Feuchteintrag von Innen durch eindiffundierende Feuchte im Winter ist jedoch bei der Bestimmung der Dampfbremse zu berücksichtigen und gegebenenfalls ein Tauwassernachweis zu führen.

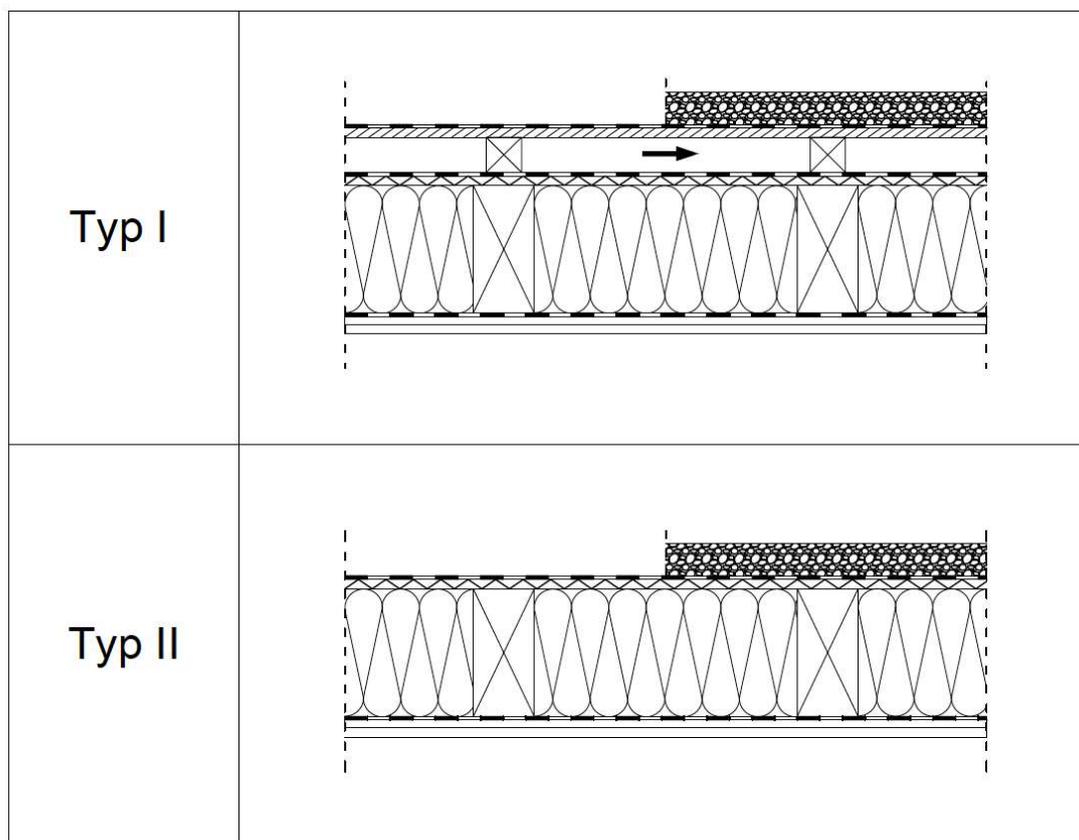
Neben der Wahl der richtigen Abdichtungen ist auch immer auf die Wasser-, Wind- und Luftdichtigkeit der Anschlüsse zu Achten, um funktionierende Schnittstellen gewährleisten zu können. Dabei muss auf einen reibungslosen gewerkeübergreifenden Arbeitsprozess geachtet werden, welcher schon in der interdisziplinären Planung davor ausgearbeitet werden muss.

Holzkonstruktionen lassen sich mit einem hohen Vorfertigungsgrad verwirklichen. Bei einer Konstruktion aus Holzelementen gibt es Vorteile in Bezug auf die wegfallenden Möglichkeiten zur Verletzung der Dampfbremse während der Bauphase und die Auswirkungen von eventuell eingetretener Feuchte, da es nur elementeweise zu Schäden kommen kann.

Neben den konstruktiven Vorgaben für eine feuchtesichere Flachdachkonstruktion aus Holz gibt es auch organisatorische Vorgaben zu beachten. Bereits in der Bauphase muss die Konstruktion temporär gut vor der Witterung geschützt werden, um die offene Holzkonstruktion gleich zu Beginn vor zusätzlicher Feuchte zu schützen. Nach der Fertigstellung muss in regelmäßigen Abständen das Dach gewartet und kontrolliert werden, um Unregelmäßigkeiten früh erkennen zu können [10, 17].

## 2.1.2 Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Flachdächer

Grundsätzlich wird bei einem Flachdach zwischen einer hinterlüfteten und einer nicht hinterlüfteten Konstruktion unterschieden. Die bauphysikalische Wirkungsweise der beiden Varianten ist dabei sehr verschieden und im direkten Vergleich in **Abbildung 1** dargestellt. Dabei ist bei Typ I die hinterlüftete Dachkonstruktion mit der zusätzlichen Belüftungsebene über der Tragebene dargestellt. Direkt darunter, bei Typ II, ist die nicht hinterlüftete Dachvariante ohne Belüftungsebene angeführt. Belüftete Dächer zeichnen sich durch eine erhöhte Fehlertoleranz aus, da gezielt übermäßige Feuchte aus der Konstruktion abgeführt werden kann. Dazu wird meistens oberhalb der Dämmebene eine zusätzliche Belüftungsebene angeordnet, welche zur Dacheindeckung mit einer zusätzlichen Abdichtung gegen Sekundärtauwasser abschließt. Im Gegensatz dazu wird heute aufgrund der hohen Anforderungen hinsichtlich Wärmeschutz immer häufiger die Belüftungsebenen weggelassen, wodurch sich auch die Aufbauhöhe des Flachdaches reduziert [3].



**Abbildung 1:** Aufbaukonzept des hinterlüfteten (Typ I) und nicht hinterlüfteten Flachdaches (Typ II) mit den Schichten bei Typ I von innen nach außen mit 1 2x GKF, 2 Dampfsperre, 3 Dämmstoff zwischen Konstruktionsvollholz, 4 Holzwerkstoff, 5 Dampfbremse, 6 Unterdachbahn, 7 Konterlattung/ Hinterlüftungsebene, 8 Holzschalung, 9 Feuchtigkeitsabdichtung, 10 Dachaufbau; und mit den Schichten bei Typ II mit 1 2x GKF, 2 Dampfsperre, 3 Dämmstoff zwischen Konstruktionsvollholz, 4 Holzwerkstoff, 5 Feuchtigkeitsabdichtung, 6 Dachaufbau

Die Tragkonstruktion sollte in beiden Fällen nach außen möglichst diffusionsoffen ausgeführt werden [18]. Im Fall der hinterlüfteten Variante übernimmt die Hinterlüftungsebene diese Aufgabe. Im Vergleich dazu muss beim nicht hinterlüfteten Flachdach, wo die äußeren Dachabdichtung meist höhere  $s_d$ -Werte als die inneren Dampfbremse aufweist, die zusätzliche Feuchtigkeit zum größten Teil zum Innenraum hin austrocknen [3].

## 2.1.3 Einfluss der Dampfbremse und der Dacheindeckung

Viele Einflussfaktoren beeinflussen das Feuchteverhalten bei einem Flachdach in Holzbauweise. Darunter fallen unter anderem der Diffusionswiderstand der luftdichten Ebene innen sowie der wind- und schlagregendichten Ebene außen und die Art der Dacheindeckung. Sowohl die individuelle Wirkungsweise als auch die Kombination der Abdichtungen außen und der

diffusionshemmenden Schicht innen ist wichtig. Im Winter diffundiert Feuchtigkeit in die Konstruktion, zusätzlich gelangt auch Feuchtigkeit durch Konvektion kleinerer Leckagen ins Innere des Bauteils. Durch außenseitig meist höhere Dampfdiffusionswiderstände muss im Sommer die über den Winter eingetragene Feuchtigkeit nach Innen wieder ausdiffundieren. Insofern kommt der innenseitig angeordneten diffusionshemmenden Schicht eine wichtige Rolle zu, denn im Winter darf sie nur begrenzt Feuchtigkeit in die Konstruktion diffundieren lassen, wohingegen sie im Sommer möglichst offen sein sollte, um die Feuchtigkeit wieder in die Gegenrichtung entweichen zu lassen [3].

Vor allem durch die bei einigen Dacheindeckungen auftretenden geringeren Temperaturen auf der Dachoberfläche ist dieser Vorgang jedenfalls zu beachten. Besonders bei wärme- und feuchtespeichernden Dachaufbauten, wie etwa dem Gründach, wird der potenzielle Rücktrocknungsprozess vermindert, wodurch die Gefahr von in der Konstruktion verbleibender Feuchtigkeit besteht. In Kombination mit einem nicht hinterlüfteten Flachdach haben helle und reflektierende Dacheindeckungen großen Einfluss auf das Rücktrocknungspotenzial des Daches. Für die Funktionalität des Daches ist in diesen Fällen eine Zusatzdämmung im Dach notwendig [3, 18].

Aber auch die Beschattung der Dachoberfläche durch etwaige nachträglich angebrachte PV-Anlagen, die Attika als Dachabschluss oder durch umliegende hohe Gebäude reduziert maßgeblich den Rücktrocknungsprozess des Daches im Sommer [18]. Diese Randbedingungen ordnen nicht hinterlüftete Flachdachaufbauten in Holzbauweise als nicht nachweisfreie Konstruktion gemäß ÖNORM B 8110-2 [12] ein und müssen mittels hygrothermischer Simulation nachgewiesen werden [3].

#### 2.1.4 Einfluss ökologischer Dämmmaterialien

Konventionelle Dämmstoffe und solche aus nachwachsenden Ressourcen weisen zahlreiche unterschiedliche Merkmale auf, darunter die Toleranz gegenüber Nutzungsfehlern sowie das Verhalten bei Feuchtigkeits- oder Wasserkontakt. Der entscheidende Unterschied ökologischer Dämmstoffe im Vergleich zu mineralischen und häufig geschlossenporigen, erdölbasierten Dämmmaterialien liegt in ihrer Reaktion auf übermäßig Feuchtigkeit. Durch ihre sorptiven Eigenschaften können Naturdämmstoffe größere Mengen an Wasser aufnehmen. Diese Möglichkeit der Zwischenspeicherung von Wasser in der Struktur kann aber in der Praxis auch zu Problemen mit angrenzenden Holzbauteilen führen [19, 20].

Dämmstoffe auf natürlicher Basis besitzen eine gute Widerstandsfähigkeit gegen Dampfdiffusion sowie eine gute kapillare Leitfähigkeit, wodurch Feuchte gut aufgenommen, im Material verteilt und zwischengespeichert werden kann. Weiters ändern sich bei kurzzeitigem Kontakt mit Wasser die Dämmeigenschaften nicht, da die Feuchte nur innerhalb der tierischen oder pflanzlichen Zellen aufgenommen wird und der Zellzwischenraum durchgehend für die Dämmwirkung zur Verfügung steht. Die Zellstruktur ist diffusionsoffen, wodurch Feuchte aus dem Inneren der Konstruktion gut nach außen abgegeben werden kann. Es muss jedoch gleichzeitig darauf geachtet werden, dass im Winter zusätzlich eindiffundierte Feuchte noch ausreichend aufgenommen und abgeleitet werden kann [21].

Kommt es zu einem größeren Wasseraufkommen in der Konstruktion in Kombination mit einer über einen längeren Zeitraum anhaltenden gemäßigten Temperatur, kann es zu starkem Schimmel- und Schädlingsbefall kommen, der bei einigen ökologischen Dämmstoffen zu strukturellen Veränderungen des Dämmmaterials führen kann. In weiterer Folge kann es durch das höhere Gewicht des gesättigten Dämmmaterials zu Riss- und Hohlrumbildungen in der Konstruktion kommen, wodurch die Gefahr der Bildung von Wärmebrücken steigt [20, 21].

## 2.2 Konstruktionsgrundsätze für das begrünte Dach

Der grundsätzliche Aufbau eines Gründaches besteht von außen nach innen aus einer Vegetationstragschicht, einer Filterschicht, einer Drain- und Speicherschicht, einer Schutzlage, einer optionalen Trennschicht und der Dachabdichtung. Die Vegetationstragschicht oder Substrat bilden den Nährboden für die Pflanzen und bestehen aus einem mineralischen Gemisch mit variierendem Anteil an organischen Anteilen [22]. Die Filterschicht besteht aus Geotextilen oder Kunststoffvliesen und trennt das Substrat von der Drain- und Speicherschicht, um eine problemlose

Ableitung von überschüssigem Wasser zu gewährleisten. Die Schutzlage schützt die Abdichtung vor Durchdringungen durch Wurzeln oder sonstigen Beschädigungen während der Bauphase [6]. Nachfolgend werden unterschiedliche Arten von Gründachaufbauten näher beschrieben.

### 2.2.1 Reduziert extensiv begrüntes Dach

Diese Art der Dachbegrünung wird überwiegend bei Industriedächern angewandt, welche nur für Wartungszwecke auf Wartungswegen begehbar sind. Bei einer Aufbauhöhe von nur ca. 8 cm ist, das reduziert extensiv begrünte Dach die Variante mit dem niedrigsten Aufbau. Aufgrund einer reduzierten Bepflanzung und der Verwendung von stressresistenten Pflanzenarten kommt es zu einem minimalen Pflegeaufwand ohne Zusatzbewässerung. Je nach Substrataufbau kommen vorwiegend bodendeckende Moos- und Sedumbegrünungen zum Einsatz, wodurch diese Variante die preiswerteste Dachbegrünung darstellt [6].

### 2.2.2 Extensiv begrüntes Dach

Wie schon das reduziert extensive Gründach ist diese Variante auch nur auf Wartungswegen begehbar. Die Aufbaustärke beträgt hier 8 – 15 cm mit geringen Anteilen an organischen Materialien, wodurch es mit einem wassergesättigten Gewicht von 90 – 200 kg/m<sup>2</sup> einen vergleichsweise leichten Gründachaufbau darstellt. Das extensiv begrünte Dach ist ebenfalls eine preiswerte Variante, charakterisiert durch einen geringen Substratbedarf sowie geringere Anforderungen an Abdichtung, Wurzelschutz-, Speicher- und Drainageschicht. Hinsichtlich der Bepflanzung sind nur wenige Pflanzen für die herausfordernde Situation am Dach geeignet und können Wind, Frost und Hitze überstehen. Zur Anwendung kommen hier neben den Bodendeckern auch niedrig wachsende Pflanzen wie Gräser und Kräuter [6, 23].

### 2.2.3 Reduziert intensiv begrüntes Dach

Bei der reduziert intensiven Dachbegrünung kann nun das Dach im Vergleich zu den extensiven Begrünungsvarianten vollständig genutzt werden. Das Substrat wird mehrschichtig aufgebaut, so dass eine durchwurzelbare Aufbauhöhe von mindestens 20 cm erreicht wird. Hinsichtlich der Bepflanzung des Daches kommen allerlei robusten Blütenstauden, Gräsern und sogar Kleingehölzen in Frage. Je nach Art der Pflanzen kann eine Zusatzbewässerung und Pflege notwendig sein [6].

### 2.2.4 Intensiv begrüntes Dach

Bei der intensiv begrünten Dachvariante ist das Benützen der Dachfläche durch z.B. Dachgärten mit deutlich größeren Pflanzen möglich. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Nutzungsarten ist hier ein vielschichtiger Aufbau mit einer Stärke von 15 – 100 cm notwendig. Durch die intensive Nutzung der Dachfläche sind ein Aufbau mit Vegetations-, Filter- und Drainschicht sowie Vorkehrungen für eine Bewässerung erforderlich. Je nach Bepflanzung ist diese Begrünungsvariante aufgrund der notwendigen regelmäßigen Bewässerung und Düngung vergleichsweise pflegeintensiv. Für diese Variante stellen alle üblichen Gartenpflanzen bis kleine Bäume eine mögliche Dachvegetation dar [6, 23].

## 2.3 Grundlagen des ökologischen Bauens

### 2.3.1 Ökologische Dämmstoffe

Dämmmaterialien können allgemein in vier Gruppen eingeteilt werden: in die Gruppe der natürlich-nachhaltigen, die Gruppe der organisch-synthetischen, die Gruppe der anorganisch-natürlichen und die Gruppe der anorganisch-synthetischen Dämmstoffe [21]. Die üblichen Anwendungsformen der unterschiedlichen Materialien sind Platten, Schüttungen, Matten zur Kerndämmung oder Flocken bzw. Schäben, welche meist eingeblasen werden. Neben den Auswahlkriterien wie Wärmeschutz, Schallschutz, Feuchteschutz und Brandschutz wird auch der Faktor Ökobilanz immer wichtiger und damit auch ökologische Dämmmaterialien [21, 24].

Natürliche Dämmstoffe werden mit verschiedenen Gütezeichen ausgezeichnet. Die Abwesenheit einer einheitlichen Definition führt jedoch dazu, dass unterschiedliche Quellen die Materialien nach eigenen Kategorien definieren, wodurch es zu teils großen Unterschieden bei der Aussagekraft der jeweiligen Bewertung kommt. Die Baubiologie und die Bauökologie bilden dabei eine wichtige Grundlage, da sie die gesundheitlichen und ökologischen Auswirkungen von Baustoffen- und -verfahren sowie deren Einfluss auf den Menschen und die Umwelt untersuchen und bewerten [21].

### 2.3.2 Bauökologie und Baubiologie

Der Mensch lebt in ständiger Wechselwirkung mit seiner direkten und indirekten Umwelt. Durch die Errichtung von Gebäuden und die dadurch gleichzeitige Nutzung von Ressourcen ändert sich die uns umgebende Umwelt ständig. Aus dieser Wechselwirkung lassen sich für das ökologische Bauen drei grundsätzliche Schutzziele ableiten:

- Schutz der menschlichen Gesundheit
- Schutz des Ökosystems
- Schutz der Ressourcen

Darauf aufbauend lässt sich Baubiologie als Einfluss des bebauten Umfelds auf den Menschen definieren. Die Bauökologie beschreibt die Wechselwirkung der Gebäude auf das umgebende Ökosystem [24].

### 2.3.3 Bewertungsmöglichkeiten

Ökologische Materialien können nach unterschiedlichen Beurteilungssystemen bewertet werden. Grundsätzlich wird zwischen drei Arten der Produktdeklaration unterschieden. Die Typ I Deklaration wird von einer unabhängigen Stelle an Produkte mit besonderen Umweltleistungen vergeben. Bei der Typ II Deklaration handelt es sich um die Eigendeklaration, wo der Hersteller selbst definierte Kennzeichnungen vergibt. Das Typ III Deklarations-Umweltzeichen beinhaltet umfassende Informationen zu einem Produkt, die sogenannte Environmental Product Declaration, kurz EPD-Daten. Hierbei liegt zu jedem Produkt eine Ökobilanzierung vor, die Auskunft über mögliche Gefährdungspotenziale gibt, ohne sie zu bewerten [24, 25].

Die baubiologischen Gütezeichen ordnen sich in die Typ I Umweltproduktdeklaration ein und geben Information zu den Prüfkriterien und Beurteilungsmethoden [24]. Die bekanntesten Gütezeichen und Labels sind in **Abbildung 2** aufgelistet.



**Abbildung 2:** Bekannteste Gütezeichen und Labels für Bauprodukte: (a) Blauer Engel vergeben durch das Umweltbundesamt/ RAL Deutsches Institut für Gütesicherung e.V., (b) Österreichisches Umweltzeichen vergeben durch das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, (c) EMICODE vergeben durch die Gemeinschaft für Emissionskontrollierte Verlegewerkstoffe, Klebstoffe und Bauprodukte e.V., (d) FSC vergeben durch das Forest Stewardship Council A.C., (e) Natureplus vergeben durch den Internationalen Verein für zukunftsfähiges Bauen und Wohnen - natureplus e.V.

Neben der Beurteilung von Bauprodukten können auch Gebäude bauökologisch beurteilt und bewertet werden. Die Grundlage für die bauökologische Beurteilung von Gebäuden stellen Normen, Merkblätter und Leitfäden dar. Einige Gebäudezertifizierungen bauen darauf auf und geben einen Einblick in die verwendeten Baumaterialien zur Einschätzung der Qualität des Gebäudes [24]. In

Abbildung 3 sind die bekanntesten Zertifizierungssysteme für Gebäude aufgelistet.



**Abbildung 3:** Zertifizierungssysteme für Gebäude: (a) klimaaktiv vergeben durch das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, (b) LEED vergeben durch Leadership in Energy & Environmental Design, (c) ÖGNI vergeben durch die Österreichische Gesellschaft für nachhaltige Immobilienwirtschaft, (d) DGNB vergeben durch die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen, (e) TQB (Total Quality Building) vergeben durch die Gesellschaft für nachhaltiges Bauen

#### 2.3.4 Ökoindex OI3

Für die Beurteilung von Bauprodukten und Bauteilen wurde der lebenszyklusbasierte Ökoindex OI3 entwickelt. Dabei werden diese anhand von drei Umweltindikatoren bewertet und können anschließend verglichen werden. Das Treibhauspotenzial GWP, das Versauerungspotenzial AP und der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf  $PE_{ne}$  bilden zusammen den OI3-Indikator. Bei der Berechnung werden die Umweltwerte anhand einer linearen Funktion aufsummiert und auf  $1 \text{ m}^2$  Konstruktionsfläche bezogen. Anschließend werden je Umweltindikator Punkte von 0 bis 100 vergeben und abschließend die Punkte der drei Kategorien gleichgewichtet zu einer Gesamtpunktzahl addiert [24, 26]. Die produktspezifischen Werte und Daten für die Berechnung des OI3-Index werden als baubook-Richtwerte bezeichnet und stellen eine Kombination aus den bauphysikalischen Werten von baubook und den Ökobilanzindikatoren der IBO-Richtwerte dar [27].

Die drei Umweltindikatoren beschreiben den Beitrag von Bauprodukten und Bauteilen zur globalen Erwärmung, das Versauerungspotenzial von Boden und Wasser sowie den Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie. Das Ergebnis dessen stellt der Ökoindex OI3 in Form von Zahlen dar, anhand derer die Baumaterialien untereinander einheitlich verglichen werden können.

Durch die Angabe des Primärenergiebedarfs werden die gesamten im Rahmen der Herstellung verbrauchten nicht erneuerbaren Ressourcen, wie z.B. Kohle und Erdöl, abgebildet, wobei dabei sowohl stoffliche als auch energetische Quellen berücksichtigt werden. Mit ihrem Beitrag zur globalen Erwärmung bzw. ihrem Treibhauspotenzial werden dabei auch die Treibhausgase wie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  und FCKWs mit ihrem Einfluss auf die Erdatmosphäre einkalkuliert. Der Beitrag der Emissionen wird hierbei auf 100 Jahre und als  $\text{CO}_2$ -Äquivalent angegeben. Bei der Versauerung wird der schädliche Einfluss von Gasen auf ein Ökosystem beschrieben, wobei die Folgen der Versauerung von Seen und Gewässern und die damit einhergehende Reduzierung der Artenvielfalt im Vordergrund stehen [24, 27].

Da der Ökoindex OI3 als ein umfassendes Bewertungssystem für ökologische Baustoffe definiert wurde, wird dieser zur Bewertung der im Rahmen dieser Arbeit ausgewählten Dämmstoffe angewandt. Die Bewertung zielt darauf ab, ein Verständnis für den ökologischen Fußabdruck der Dämmmaterialien zu erlangen und ihre Nachhaltigkeit im baulichen Kontext beurteilen zu können. In **Tabelle 1** wird die Methodik der OI3-Analyse auf die hier untersuchten Dämmvarianten angewendet, um deren ökologische Effizienz im Vergleich zu den heute üblicherweise angewandten synthetischen und mineralischen Dämmmaterialien zu evaluieren.

**Tabelle 1: Dämmstoffe im Überblick (OI3 Index) [28]**

Dämmstoff-kategorie	Dämmstoff	PENRT (nicht erneuerbare Primär-energie, gesamt)	GWP-T (globales Erwärmungspotenzial)	Dichte	typische erforderliche Dämmstoffstärke (für U-Wert= 0,15 W/m <sup>2</sup> K)	typischer Richtwert ΔOI3 (für U-Wert= 0,15 W/m <sup>2</sup> K)
		[MJ/kg]	[CO <sub>2</sub> -eq/kg]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[cm]	[Punkte/m <sup>2</sup> ]
Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen	Flachs	31,44-35,1	0,22-0,49	20-40	27	19
	Holzfaserdämmstoffe	1,74-14,77	-0,74--1,43	30-190	31	12
	Kork	0,31-6,45	-1,22	100-200	33	7
	Schafwolle	19,33	0,6	15-30	28	10
	Zellulose	6,87-19,15	-0,23--0,457	30-90	27	7
Mineralische Dämmstoffe	Mineralfaser	12,73	1,01	115-130	24	26
Synthetische Dämmstoffe	Expandiertes Polystyrol (EPS)	98,9	4,21	15-25	24	20

Im nachfolgenden Kapitel wird die methodische Herangehensweise an die Problemstellung dieser Arbeit erörtert. Zunächst werden die normativen Anforderungen des Bauteils Flachdach betrachtet. Auf dieser Basis werden für die Simulation Aufbauvarianten entwickelt, wobei auf die Materialauswahl und die Festlegung der variablen Parameter der Analyse eingegangen wird. Abschließend werden die notwendigen Eingabewerte für den Simulationsprozess mit dem Programm WUFI 2D erläutert und die Prinzipien sowie das Verfahren für die Auswertung der Ergebnisse festgelegt.

## 3 Methodik

Die Feuchte- und Speichervorgänge innerhalb eines Bauteils sind komplexe Prozesse, wodurch es eine sehr große Anzahl an Simulationen benötigen würde, um alle möglichen Unsicherheiten und Varianten abzudecken. Um den Rahmen dieser Arbeit einzuhalten, wird für das Vorgehen der Simulationen eine Parameterstudie gewählt. Ziel ist es, durch Parameteränderungen und eine festgelegte Anzahl an Simulationen den Einfluss der ökologischen Dämmung im nicht hinterlüfteten Dach in Holzbauweise abzuschätzen.

Zunächst erfolgt die Definition der Aufbauten, die als Grundlage für die Simulationsmodelle dienen. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden bauphysikalische und konstruktive Randbedingungen, wie der Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion und die Tragkonstruktion festgelegt. Begonnen wird mit der Simulation der Referenzaufbauten, für die herkömmliche Dämmvarianten gewählt werden, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen und eine Ausgangslage für die Abschätzung des Einflusses der ökologischen Dämmung zu bekommen. Anschließend werden diese Aufbauten zum Vergleich auch mit Korkdämmung und Schafwolldämmung, als Vertreter der ökologischen Dämmalternativen, simuliert und ausgewertet.

Im nächsten Schritt des Simulationsprozesses werden reale Bedingungen angenommen. Durch Fehlstellen in den Abdichtungsebenen werden die möglichen Unsicherheiten auf der Baustelle und somit zusätzliche Feuchtigkeit in der Konstruktion mitberücksichtigt. Darüber hinaus werden beim inneren Abschluss der Dachkonstruktion, durch die Änderung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, kurz des  $s_d$ -Wertes, weitere kritische Situationen abgedeckt. Danach erfolgt die Auswahl der optimalen Konstruktionsvariante für die Massiv- und Leichtbauweise in Hinsicht auf das hygrothermische Verhalten der Konstruktion. Diese Aufbauten werden abschließend noch mit weiteren ökologischen Dämmvarianten simuliert, um die vermeintlich optimale Konstruktion unter Beweis zu stellen.

### 3.1 Bauteilanforderungen

An einen Bauteil, und damit an einen Aufbau, werden je nach Nutzung für den Neubau ebenso wie für Sanierung oder Umbau, unterschiedliche technische Anforderungen gestellt. In Österreich werden die Anforderungen an ein Gebäude in sechs OIB-Richtlinien festgelegt und durch die Übernahme, in die im jeweiligen Bundesland geltenden Bauordnung für verbindlich erklärt [29]. Dabei werden Themen wie mechanische Festigkeit, Brandschutz, Hygiene, Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit, Schallschutz und Wärmeschutz abgedeckt [30]. Mittels der in den unterschiedlichen Themenbereichen bestimmten Kennwerte bzw. Kriterien werden die entsprechenden Anforderungen definiert [29]. Die Berücksichtigung aller Themenbereiche würde den Umfang der Arbeit weit überschreiten, da jede Richtlinie neue Anforderungen mit sich bringen würde. Daher konzentriert sich diese Arbeit mit den folgenden Aufbauten hauptsächlich auf das Thema Wärmeschutz und den damit verbundenen Anforderungen sowie Begriffsbestimmungen.

Alle Anforderungen zu den Themen Energieeinsparung und Wärmeschutz sind in der OIB-Richtlinie 6 festgelegt. Ebenso der Nachweis der Anforderungen bei Neubauten und größeren Renovierungen, der mittels Energieausweis erfolgt. Es gibt zwei Nachweiswege für den Nachweis der Einhaltung der Energiekennzahlen im Energieausweis, einerseits über den Endenergiebedarf EEB, andererseits über den Gesamtenergieeffizienz-Faktor  $f_{GEE}$  [29]. Anhand von Gebäudekategorien werden die Nachweise zugeordnet. Die Zuordnung eines Gebäudes erfolgt nach der übermäßigen Nutzung des Gebäudes in die Kategorien Wohngebäude, Nicht-Wohngebäude und sonstige konditionierte Gebäude [31].

Neben den wärmetechnischen Anforderungen an das Gebäude werden in der Richtlinie auch die einzuhaltenden Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der wärmeübertragenden Bauteile bei Neubauten definiert. Diese gelten für die Gebäudeteile eines konditionierten Raums. Für die Aufbauten des Flachdachs für die Simulation ergibt sich somit eine U-Wert Anforderung gemäß OIB 6 Richtlinie Tabelle 4.4.1 von U-Wert  $\leq 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$  [31].

## 3.2 Aufbautenliste

Aufbauend auf der zuvor erwähnten Bauteilanforderung und den zur Verfügung stehenden Materialien in der WUFI-Datenbank werden Aufbauten festgelegt und anschließend für die Simulationen herangezogen. Dabei wird der Fokus auf „Standardaufbauten“ gelegt, um mit dieser Arbeit keine Sonderfälle, sondern allgemein anwendbare Flachdachaufbauten abzudecken. Zu Beginn werden die ausgewählten Aufbauten mit den üblichen Dämmstoffen simuliert, um Referenzwerte für die nachfolgenden Vergleiche zu schaffen. Anschließend werden die Aufbauten auch mit den ökologischen Dämmvarianten über drei Jahre simuliert.

Um die Simulationen und die daraus folgenden Erkenntnisse untereinander vergleichen zu können sowie zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse der unterschiedlichen Ausführungsvarianten wird ein annähernd gleicher U-Wert von  $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$  angestrebt. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Dämmeigenschaften der verschiedenen Dämmstoffe können die Aufbauten zwischen den Varianten daher variieren.

Folgend werden die Aufbauten für die Simulationen aufgegliedert dargestellt:

### I. Referenzaufbauten Holzmassivbauweise

- FD01: Holzmassivbauweise mit EPS-Dämmung ausgebildet als Foliendach
- FD02: Holzmassivbauweise mit EPS-Dämmung ausgebildet als Kiesdach
- FD03: Holzmassivbauweise mit EPS-Dämmung ausgebildet als Gründach

### II. Holzmassivbauweise

- FD04: Holzmassivbauweise mit Korkdämmung ausgebildet als Foliendach
- FD05: Holzmassivbauweise mit Korkdämmung ausgebildet als Kiesdach
- FD06: Holzmassivbauweise mit Korkdämmung ausgebildet als Gründach

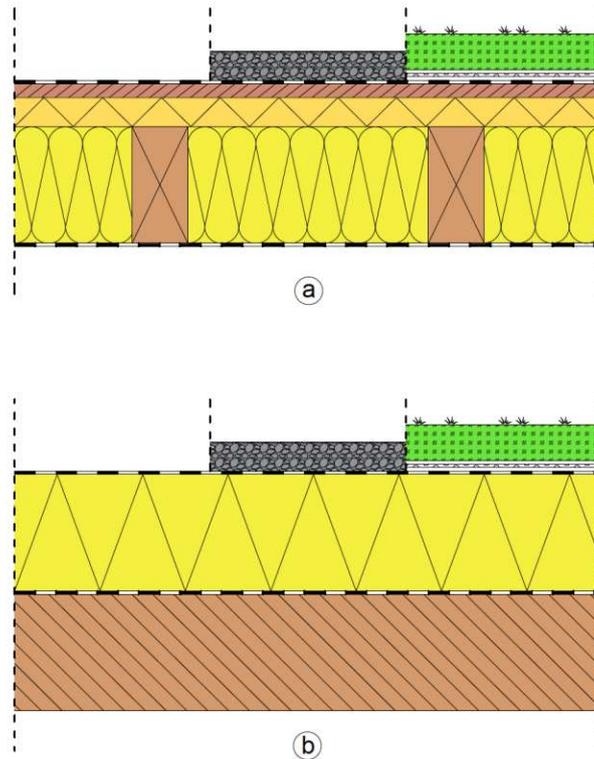
### III. Referenzaufbauten Holzrahmenbauweise

- FD07: Holzrahmenbauweise mit Mineralwolle dämmung ausgebildet als Foliendach
- FD08: Holzrahmenbauweise mit Mineralwolle dämmung ausgebildet als Kiesdach
- FD09: Holzrahmenbauweise mit Mineralwolle dämmung ausgebildet als Gründach

### IV. Holzrahmenbauweise

- FD10: Holzrahmenbauweise mit Schafwolle dämmung ausgebildet als Foliendach
- FD11: Holzrahmenbauweise mit Schafwolle dämmung ausgebildet als Kiesdach
- FD12: Holzrahmenbauweise mit Schafwolle dämmung ausgebildet als Gründach

Für die Referenzaufbauten werden herkömmliche Dämmmaterialien gewählt – im konkreten Fall für die Holzmassivbauweise eine druckfeste EPS Dämmung und für die Holzrahmenbauweise Mineralwolle. Für die Vergleichsaufbauten wurden ökologische Dämmvarianten, Kork als Dämmung für den Holzmassivaufbau und Schafwolle für den Holzrahmenaufbau, gewählt. Graphisch werden die Aufbauten in **Abbildung 4** dargestellt. Bei den folgenden Simulationen mit WUFI 2D werden allerdings die generischen Modelle der beiden Dächer gemäß Fraunhofer Institut verwendet. Die im Leitfaden für die Berechnung empfohlen Randbedingungen und Einstellungen für die Verwendung der generischen Modelle zur Berechnung sind für das Kiesdach in **Kapitel 3.6** und für das Gründach in **Kapitel 3.7** detailliert dargestellt.



**Abbildung 4:** Für die WUFI-Simulationen gewählte Dachkonstruktionen: (a) Holzrahmenbauweise; mit den Schichten von innen nach außen 1 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 2 Dämmstoff zwischen Konstruktionsvollholz, 3 Holzfaserdämmplatte, 4 Holzschalung, 5 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen  $s_d=300m$  und EPDM  $s_d=70m$ ) und (b) Massivbauweise; mit den Schichten 1 Massivholzdecke KLH, 2 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 3 Dämmstoff, 4 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen  $s_d=300m$  und EPDM  $s_d=70m$ ); für das Kiesdach wird der Aufbau noch um ein Schutz- und Filtervlies sowie um den Kies erweitert; für das Gründach wird der Aufbau um Schutzvlies, Wurzelschutzschicht, Drainmatte, Filter- und Schutzschicht und Pflanzensubstrat ergänzt

Aufgrund der variierenden Wärmeleitfähigkeiten der Dämmmaterialien kommt es bei den Aufbauvarianten zu Unterschieden der Aufbaustärke. Wie anfangs schon erwähnt wird für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Varianten ein annähernd gleicher U-Wert von  $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$  angestrebt. Trotzdem resultieren aus verfügbaren Dämmstoffstärken und der unterschiedlichen Konstruktionsweisen geringfügige Abweichungen. Die jeweiligen Aufbaustärken und die damit erreichten U-Werte der Aufbauten sind in **Tabelle 2** aufgelistet.

**Tabelle 2:** Aufbaustärken und U-Werte der Aufbauvarianten

	Leichtbauweise	Massivbauweise
Foliendach	Aufbaustärke gesamt: 0,341 cm U-Wert Aufbau Mineralwolle: $0,161 \text{ W/m}^2\text{K}$ Aufbaustärke gesamt: 0,341 cm U-Wert Aufbau Schafwolle: $0,163 \text{ W/m}^2\text{K}$	Aufbaustärke gesamt: 0,362 cm U-Wert Aufbau EPS: $0,166 \text{ W/m}^2\text{K}$ Aufbaustärke gesamt: 0,402 cm U-Wert Aufbau Kork: $0,160 \text{ W/m}^2\text{K}$
Kiesdach	Aufbaustärke gesamt: 0,391 cm U-Wert Aufbau Mineralwolle: $0,161 \text{ W/m}^2\text{K}$ Aufbaustärke gesamt: 0,391 cm U-Wert Aufbau Schafwolle: $0,163 \text{ W/m}^2\text{K}$	Aufbaustärke gesamt: 0,412 cm U-Wert Aufbau EPS: $0,166 \text{ W/m}^2\text{K}$ Aufbaustärke gesamt: 0,452 cm U-Wert Aufbau Kork: $0,160 \text{ W/m}^2\text{K}$
Gründach	Aufbaustärke gesamt: 0,421 cm U-Wert Aufbau Mineralwolle: $0,161 \text{ W/m}^2\text{K}$ Aufbaustärke gesamt: 0,421 cm U-Wert Aufbau Schafwolle: $0,163 \text{ W/m}^2\text{K}$	Aufbaustärke gesamt: 0,442 cm U-Wert Aufbau EPS: $0,166 \text{ W/m}^2\text{K}$ Aufbaustärke gesamt: 0,482 cm U-Wert Aufbau Kork: $0,160 \text{ W/m}^2\text{K}$

### 3.3 Ablauf der Simulationen

Die Simulationen werden mit dem Programm WUFI 2D in der Version 4.5 durchgeführt. Der Arbeitsbereich kann grob in zwei Bereiche eingeteilt werden. Der erste Abschnitt ist gekennzeichnet durch manuelle Eingaben sowie durch die Definition von Anfangswerten und Randbedingungen. Daran schließt nach erfolgreicher Simulation durch das Programm der zweite Abschnitt des Prozesses an: die Ausgabe und Auswertung der Ergebnisse [32, 33].

Die zwei gewählten Dachkonstruktionen in ihrer jeweiligen Variante werden jeweils für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit dem gleichen Wetterszenario über die Dauer von drei Jahren simuliert. Dafür werden die in WUFI 2D hinterlegten Wetterdaten für Wien verwendet. Die Ergebnisse der Simulationen werden mittels WUFI Graph erstellt und können in mehreren Diagrammen dargestellt werden. Bereits vor der Auswahl zum gewünschten Ergebnis wird automatisch der Gesamtwassergehalt der Konstruktion dargestellt. Daran lässt sich schnell erkennen, ob es zu einem dauerhaften Anstieg des Wassergehalts in der Konstruktion kommt und die Konstruktion somit aus hygrischer Sicht nicht geeignet ist oder ob der Wassergehalt über die Zeit absinkt und sich letztendlich auf einen stabilen Verlauf einschwingt [33].

Abhängig davon, ob man die Konstruktion als Gesamtheit oder schichtweise auswerten möchte, kann man jedes Mal an der Konstruktion das gewünschte Gebiet markieren und sich das entsprechende Diagramm ausgeben lassen. Für den direkten Vergleich oder für mehrere Diagramme einer Schicht können die Ergebnisse auch direkt untereinander dargestellt werden [33].

#### 3.3.1 Schichtaufbau

Für die Eingabe und Darstellung der Konstruktion gibt es, wie in der Einleitung schon kurz beschrieben, einen Bauteileditor in WUFI. Damit können unterschiedliche Bauteile mit ihren Schichten erfasst werden. Die Eingabe der Bauteilschichten funktioniert entweder direkt grafisch im Zeicheneditor oder durch Definition der x und y Koordinaten im Skript darunter. Die Orientierung des Bauteils kann grundsätzlich frei gewählt werden, da in den folgenden Eingabeschritten mit den Randbedingungen und Übergangskoeffizienten die Richtungen der Wärme- und Feuchteprozesse definiert werden [33].

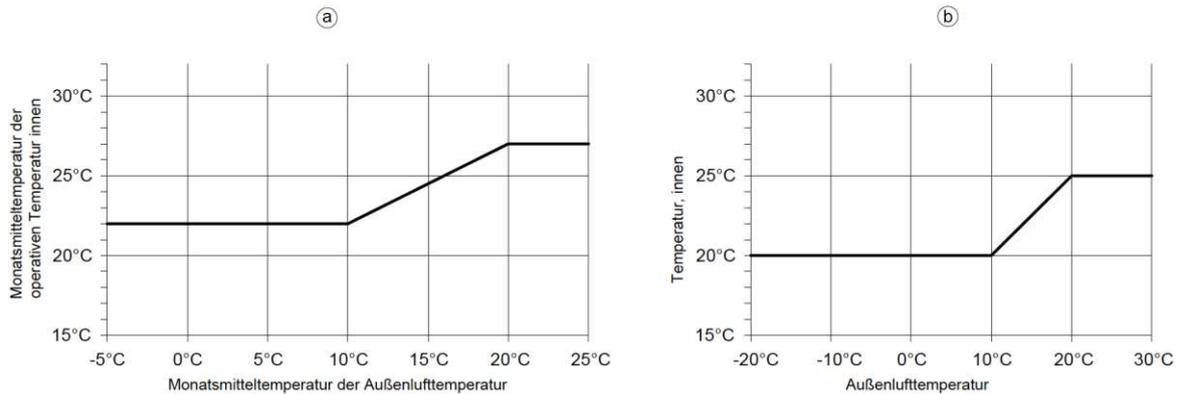
Die in diesem Schritt bestimmten Rechtecke werden auch im Zuge der Eingabe einem Material mit zugeordneter Stärke zugewiesen. Dabei können Materialien aus der WUFI Materialdatenbank verwendet oder manuell eingegeben werden. Für die einzelnen Materialien können die Materialeigenschaften isotrop, d.h. in x- und y- Richtung identisch, oder anisotrop definiert werden. Weiters können die wärme- und feuchte-technischen Parameter der Eigenschaften der Materialien überprüft und gegebenenfalls geändert werden [33].

#### 3.3.2 Wetterdaten und Orientierung

Die WUFI-Datenbank enthält Wetter- und Klimadaten von Europa, Nord- und Südamerika, Japan und Ozeanien. Die Wetterdaten werden für die Randbedingungen des Bauteils benötigt und können entweder direkt aus einer Landkarte oder mit Ortsnamen gesucht und ausgewählt werden [34]. Für die Randbedingung Innenklima stehen vereinfachte Klimamodelle zur Verfügung. Die Wetterdateien für das Innenklima können aus unterschiedlichen Modellen gewählt werden – dabei stehen DIN 4108/ EN 15026/ WTA 6-2, ISO 13788, ASHREA 160 und Sinuskurven zur Auswahl. Für die Randbedingung Außenklima stehen in der Klimadatei Mittel- und Extremwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, die Verteilung der Solarstrahlung sowie Schlagregendaten zur Verfügung [32, 33].

Da das Programm WUFI ein deutsches Produkt ist und somit die Grenzwerte aus der ÖNORM 8110-2 bezüglich des Wärmeübergangswiderstands nicht übernommen werden können, wird für die Simulationen in dieser Arbeit das Modell WTA 6-2 gewählt. Die maßgebenden Unterschiede für die in dieser Arbeit geführten Nachweise betreffen die Wärmeübergangskoeffizienten und das Innenklimamodell. Gemäß WTA Modell 6-2 sind die Wärmeübergangskoeffizient für außen mit  $0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$  und für innen mit  $0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$  definiert. Verglichen mit der ÖNORM 8110-2, worin der Wärmeübergangskoeffizient für außen mit  $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  und für innen mit  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  definiert ist. Das Innenklimamodell der ÖNORM 8110-2 und des WTA Modells 6-2 sind in

**Abbildung 5** dargestellt. Die Unterschiede starten bei der Innentemperatur, die ÖNORM geht von 22°C aus und steigt später auf 27°C während das WTA Modell schon bei 20°C startet und nur auf 25°C ansteigt. In Hinsicht auf die Außentemperatur betrachtet die ÖNORM eine Spanne von -5°C bis 25°C und das WTA Modell einen Bereich von -20°C bis 30°C. Es wird dennoch davon ausgegangen, dass eine in Deutschland funktionierende Konstruktion auch in Österreich zur Anwendung gebracht werden kann.



**Abbildung 5:** Direkter Vergleich der Innenklimamodelle von (a) der ÖNORM 8110-2 und (b) des WTA Modells 6-2

### 3.3.3 Steuerung, Numerik und Rechenzeit

Die Simulationen aller Varianten werden für eine Zeitspanne von drei Jahren mit stündlichen Zeitschritten durchgeführt. Der Oktober wird von WUFI als Startmonat gewählt, da sich ab diesem Zeitpunkt im Bauteil mehr Feuchtigkeit aufbaut, bevor es im Frühling auszutrocknen beginnt. Somit wird der ungünstigste Fall abgebildet [35].

Die Rechenzeit hängt maßgeblich von der Detaillierung des Rechengitters ab und sollte für erste Abschätzungen und Erfahrungen mit der Simulation niedriger gewählt werden. So kann die Rechenzeit von ungefähr 5 Minuten bis zu mehreren Stunden betragen [32].

### 3.3.4 Ergebnisauswertung mit WUFI Graph

Mittels WUFI Graph können die Ergebnisse der Simulationen in Diagrammen dargestellt werden. WUFI liefert jedoch keine Aussage über die Funktionstüchtigkeit oder Dauerhaftigkeit einer Konstruktion oder eines Materials. Mit den Rechenergebnissen zeigt das Programm lediglich Diagramme an, die den zeitlichen Verlauf der simulierten Größen wie Wassergehalt, relative Feuchte, Temperatur usw. abbilden. Die Interpretation der WUFI-Diagramme sowie der sich daraus ergebenden Fragestellungen zur etwaigen Schadensfreiheit der Konstruktion müssen jedoch manuell durch den Planer bearbeitet werden [36].

Gleich zu Beginn wird in WUFI Graph der gesamte Wassergehalt des Bauteils über die simulierte Dauer dargestellt. Dadurch kann sofort eine erste überschlägige Beurteilung der Konstruktion durchgeführt werden. Ein dauerhafter Anstieg des Wassergehalts im Aufbau deutet auf ein feuchtetechnisches Problem hin. Eine diesbezügliche Erklärung könnte sein, dass mehr Feuchte durch Diffusion, Konvektion oder Kapillartransport in das Bauteil eindringt als in dieser Zeit wieder austrocknen kann. Wenn im Gegensatz dazu der Gesamtwassergehalt abfällt, kann das Bauteil in dieser ersten Abschätzung mit einem geringen Schadensrisiko in Bezug auf ein Feuchteproblem eingestuft werden [33, 36].

## 3.4 Auswertungskriterien

Mit WUFI Graph können viele Ergebnisgrößen als Kurven ausgegeben werden, die die zeitliche Veränderung darstellen. Bei der Auswertung der Simulation müssen sowohl die Gesamtkonstruktion als auch die einzelnen Schichten untersucht und, abhängig von dem Material, bewertet werden. Das Vorgehen bei der Analyse der Ergebnisse ist in **Abbildung 6** dargestellt und beginnt bei

der Bewertung der Gesamtkonstruktion. Je nachdem wie sich der Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion darstellt, können daran anschließend die einzelnen Schichten sowie kritische Positionen beurteilt werden [36, 37].



**Abbildung 6:** Vorgehen bei der Ergebnisbewertung mit WUFI [37]

Verglichen mit dem ehemaligen Glaser-Verfahren gibt es hierbei jedoch kein klares Versagensmerkmal. Da WUFI keinen allgemein gültigen Lösungsweg liefert, bleiben die Interpretation und das Heranziehen der richtigen Parameter für die Ergebnisbewertung Aufgabe des Planers. Folgend werden hier nun einige der wichtigsten und im Rahmen dieser Arbeit herangezogenen Auswertungskriterien vorgestellt [36, 37].

### 3.4.1 Gesamtwassergehalt der Konstruktion

Wie schon erwähnt, wird zu Beginn der Auswertung mit WUFI Graph direkt der Gesamtwassergehalt des simulierten Bauteils angegeben. Anhand dieses Diagramms findet die erste Beurteilung der Konstruktion statt, da hier unmittelbar der Anstieg, Abfall oder eingeschwungene Zustand des Wassergehalts erkannt werden kann [33]. Im ungünstigen Fall steigt der Wassergehalt über die Dauer der Simulation dauerhaft an, was auf ein Problem der Konstruktion hindeutet und zu einer genaueren Analyse der Schichten bedarf. Ein steigender Wassergehalt kann mehrere Ursachen haben, die während der Beurteilung herausgefunden werden können. Zum einen kann ein langfristiger Anstieg des Wassergehalts auf eine zu dichte Konstruktion hindeuten, bei welcher die Anfangsfeuchte aufgrund hoher  $s_d$ -Werte nicht austrocknen kann und sich dadurch nur innerhalb der Konstruktion verteilt. Eine weitere Ursache für den Anstieg des Wassergehalts kann eine zu gering eingegebene Anfangsfeuchte der Materialien sein, wobei nur versucht wird, während der Simulation einen eingeschwungenen Zustand zu erreichen. Ein grundlegendes Problem entsteht, wenn aufgrund von Diffusion, Konvektion oder Flüssigtransport mehr Feuchtigkeit in das Innere der Konstruktion gelangt als in derselben Zeit austrocknen kann. Die über einen längeren Zeitraum anhaltende erhöhte Feuchte in dem Bauteil und die dadurch entstehende Gefahr für Schimmel, Holzfäule und Korrosion deklariert die Konstruktion als nicht funktionsfähig und benötigt eine Überarbeitung des Aufbaus [33, 36].

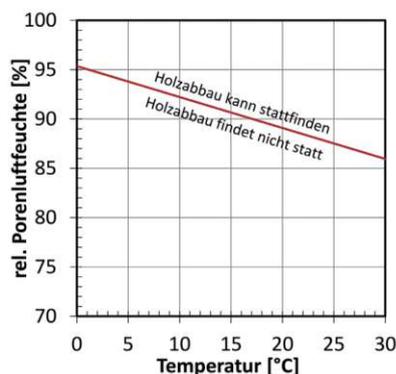
Im Gegensatz zum ansteigenden Wassergehalt wird bei einem fallenden Gesamtwassergehalt das Bauteil als im Prozess des Austrocknens befindlich aufgefasst. Auf den ersten Blick handelt es sich somit um einen funktionsfähigen Aufbau. Im nächsten Schritt werden dann auch die einzelnen Schichten analysiert [33].

Ein über die simulierte Dauer gleichbleibender Wassergehalt im Bauteil wird als eingeschwungener Zustand definiert. Er beschreibt das Feuchteverhalten im Inneren der Konstruktion über die jahreszeitlich bedingten Veränderungen hinweg, unabhängig von den Anfangsbedingungen [33].

### 3.4.2 Holzfeuchte

Bei der Bewertung von Holzwerkstoffen und Massivholzprodukten gibt die Norm einige Werte vor, die dazu dienen, Probleme bei Holzkonstruktionen durch zu hohe Feuchtigkeit weitestgehend zu vermeiden. Gemäß ÖNORM B 3802-2 ist die Holzfeuchtigkeit bei Holzwerkstoffen mit maximal 18 M.-% und bei Vollholz- und Massivholzprodukten mit maximal 20 M.-% begrenzt. Im ersten Jahr ist es möglich, kurzzeitig 22 M.-% im Fall der Massivholzprodukte und 20 M.-% bei Holzwerkstoffen zu erreichen, wenn sichergestellt werden kann, dass es innerhalb von 3 Monaten wieder austrocknet [38]. Berücksichtigt werden muss, dass bei den Grenzwerten laut Norm gewisse Sicherheiten bereits eingerechnet sind, da der eigentliche Abbau des Holzes erst ab einer Fasersättigung von 25-30 M.-% startet. Mit dem Erreichen dieser Holzfeuchtigkeit ist der Punkt erreicht, ab welchem der schädliche Pilz dem Holz so viel Feuchtigkeit entzieht, dass ein Abbau des Holzes möglich wird [36].

Der Holzwerkstoff im Fall der Rahmenbauweise wird mittels ÖNORM B 3802-2 nachgewiesen, während die Massivholzprodukte der Massivholz- und Rahmenbauweise auf zwei Nachweiswegen nachgewiesen werden. Zum einen wird gemäß ÖNORM B 3802-2 die Holzfeuchte in Masseprozent im Mittel über die Schicht herangezogen und mit den Grenzwerten aus der Norm verglichen, was eine Bewertung des Holzzustandes in konstruktiver Hinsicht ermöglicht [38]. Der zweite Nachweisweg erfolgt mittels der Porenluftfeuchte gemäß WTA- Merkblatt 6-8, wobei in diesem Fall der holzerstörende Pilz bewertet und die kritische innere 10mm Schicht des Holzprodukts genauer analysiert wird. Die Porenluftfeuchte in der maßgebenden Schicht des Holzes darf 95% bei 0°C und 86% bei 30°C im Tagesmittel nicht überschreiten, wie in **Abbildung 7** dargestellt wird [32, 37].



**Abbildung 7:** Mittlere Porenluftfeuchte gemäß WTA- Merkblatt 6-8 [39]

### 3.4.3 Auswertung gesamtes Bauteil und schichtweise Auswertung

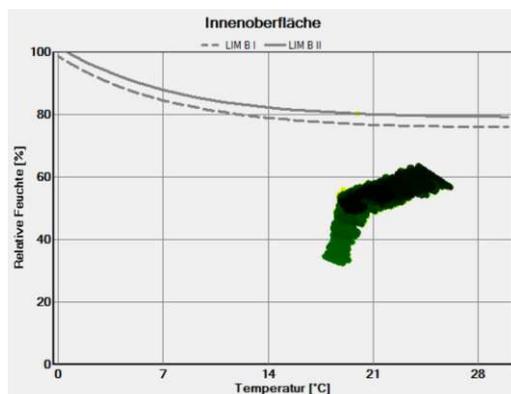
Die gesamte Konstruktion wird nur bei der ersten Einschätzung in Zusammenhang mit dem Gesamtwassergehalt betrachtet, um die grundsätzliche Funktionsfähigkeit schnell einschätzen zu können. Wenn der Wassergehalt im gesamten Bauteil nicht ansteigt, kann mit der Bewertung der Feuchteverhältnisse der einzelnen Schichten fortgesetzt werden. Ident wie beim Gesamtwassergehalt kann der Wassergehalt in den einzelnen Schichten auch wieder ansteigen, fallen oder eingeschwungen sein. Die Schichten mit dem höchsten Wassergehalt bzw. der höchsten relativen Feuchte sind aus hygrothermischer Sicht von besonderem Interesse und müssen abhängig vom Material mit dem passenden Nachweis als normgerecht eingestuft werden [32, 36]. Die Ergebnisdigramme der einzelnen Schichten der Simulationen beinhalten für die Beurteilung den Wassergehalt in M.-% und kg/m<sup>3</sup>, die relative Feuchte in % und die Temperatur in °C [32].

### 3.4.4 Isoplethen

Für Innenoberflächen kann der Nachweis der Isoplethen geführt werden, welche das Risiko eines Schimmelpilzwachstums einschätzen. Dabei werden über die gewählte Simulationsdauer die relative Feuchte und die Temperatur gegenübergestellt. Mit Hilfe dieser grafischen Darstellung kann das Risiko für Schimmelpilzwachstum in Zusammenhang mit LIM-Kurven (Lowest Isopleth for Mould) gut bewertet und beurteilt werden. Die Grenzen werden durch zwei LIM Kurven gebildet.

Die Grenzkurve LIM I bildet den Grenzwert für biologisch verwertbare Substanzen und die Kurve LIM II bildet den Grenzwert für Substrate mit porösem Gefüge, welche biologisch kaum verwertbar sind. Wenn das Risiko von Schimmelpilzwachstum unwahrscheinlich ist, liegen die Werte der Isoplethen unterhalb der entsprechenden LIM-Kurve [40].

In **Abbildung 8** werden die Isoplethen für den zu untersuchenden Zustand in einem Farbverlauf gezeigt, wobei gelb den Berechnungsstart und dunkelgrün bis schwarz das Berechnungsende der Isoplethe darstellt [37].



**Abbildung 8:** Isoplethen zur Bewertung des Risikos von Schimmelpilzwachstum [37]

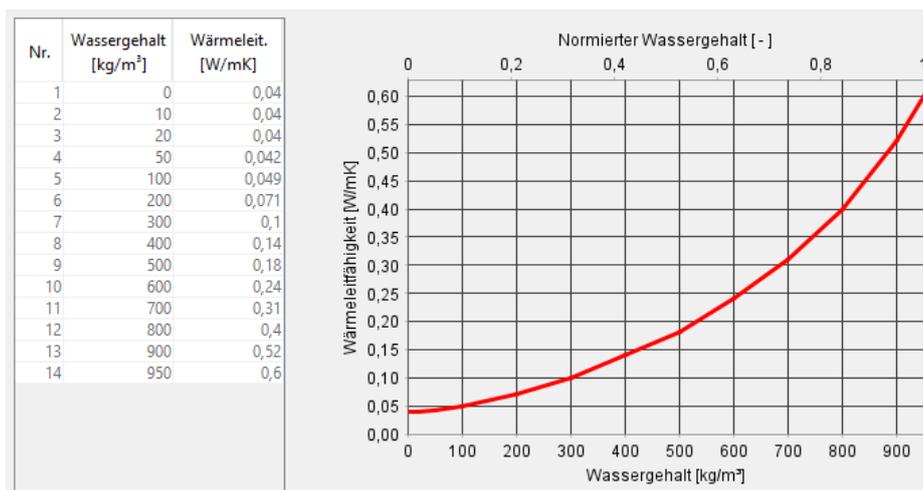
#### 3.4.5 Tauwasserauswertung

Der Nachweis ist oft notwendig, da es durch den Feuchteintrag über Diffusion aus dem Innenraum auf der Innenseite der „kalten“ Dachabdichtung zu Kondensat kommen kann [41]. Die kritische Stelle im Aufbau der Massivbauweise befindet sich zwischen Dämmebene und Dachabdichtung und im Aufbau der Rahmenbauweise zwischen Holzschalung und Dachabdichtung. Neben allgemeinen Materialinformationen sind für einige Materialien auch detaillierte hygrothermische Kenndaten hinterlegt. Dabei werden Bauprodukte mit einer hellgrünen Feuchtespeicherfunktion, wo keine freie Sättigung gemessen werden konnte, und mit einer dunkelgrünen Feuchtespeicherfunktionen, wo eine freie Sättigung gemessen werden konnte, unterschieden. Für den vereinfachten Nachweis benötigt man keine gemessene freie Sättigung. Stattdessen wird eine 1 cm-Schicht des Dämmstoffes im Bereich der Tauwasserebene ausgewertet und im Anschluss mit dem Grenzwert laut ÖNORM EN ISO 13788 abgeglichen [32, 42]. Die Norm definiert den Grenzwert für eine maximale Tauwassermenge im Bauteil mit  $200 \text{ g/m}^2$  [13].

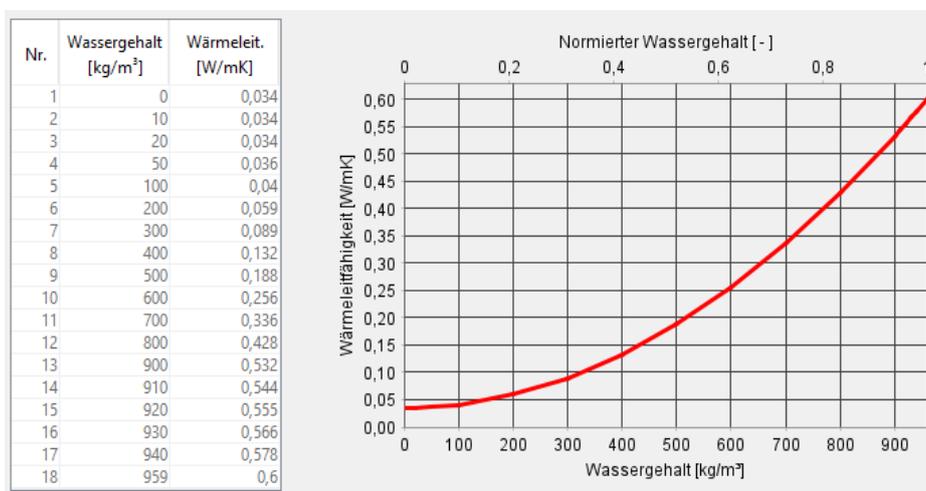
#### 3.4.6 Wärmeleitfähigkeit

Bei der Bewertung der Wärmeleitfähigkeit einer Konstruktion wird auf das Verhalten der einzelnen Materialien und im speziellen auf den Dämmstoff unter Feuchtezunahme eingegangen. Wenn zusätzliche Feuchtigkeit, durch Diffusion in das Dämmmaterial gelangt, kann das zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit in der Konstruktion und in Folge zu einer Erhöhung und somit Verschlechterung des U-Werts führen. Die Abhängigkeiten zwischen normiertem Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit sind bei den Materialkennwerten hinterlegt und die Materialien können mit Hilfe der Maximalwerte bewertet werden [37]. In **Abbildung 9** ist die Kurve der Wärmeleitfähigkeit für EPS-Dämmung dargestellt. Daraus kann abgelesen werden, dass eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit erst ab einem Wassergehalt von  $50 \text{ kg/m}^3$  stattfindet. Dieser Wert dient daher als Referenzwert für die weiterführende Auswertung. Sehr ähnlich dazu ist die Kurve der Wärmeleitfähigkeit für Mineralwoll-Dämmung, siehe **Abbildung 10**. Für Mineralwolle wird hier ebenfalls der Wassergehalt von  $50 \text{ kg/m}^3$  als Referenzwert für die Auswertung herangezogen. In **Abbildung 11** ist die Kurve der Wärmeleitfähigkeit für Kork-Dämmung dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass der Wassergehalt schon ab  $0 \text{ kg/m}^3$  in einen linearen Anstieg übergeht. Der Verlauf der Wärmeleitfähigkeitskurve von Schafwoll-Dämmung, ist in **Abbildung 12** ersichtlich. Hier wird wieder der Wassergehalt von  $50 \text{ kg/m}^3$  als Referenzwert für die Auswertung herangezogen. In **Abbildung 13** ist die Kurve der Wärmeleitfähigkeit für Flachs-Dämmung dargestellt, wobei der Anstieg ab  $0 \text{ kg/m}^3$  wieder als Referenzwert für die Auswertung herangezogen wird. Der Verlauf

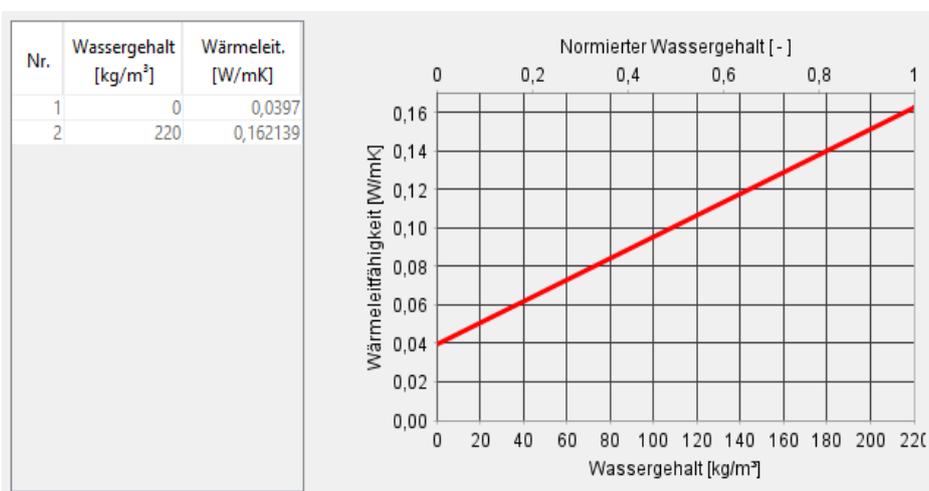
der Wärmeleitfähigkeitskurve von Zellulose-Dämmung, ist in **Abbildung 14** ersichtlich. Hier wird der Wassergehalt von 20 kg/m<sup>3</sup> als Referenzwert für die Auswertung herangezogen.



**Abbildung 9:** Funktion der Wärmeleitfähigkeit von EPS-Dämmung [43]



**Abbildung 10:** Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Mineralwoll-Dämmung [43]



**Abbildung 11:** Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Kork-Dämmung [43]

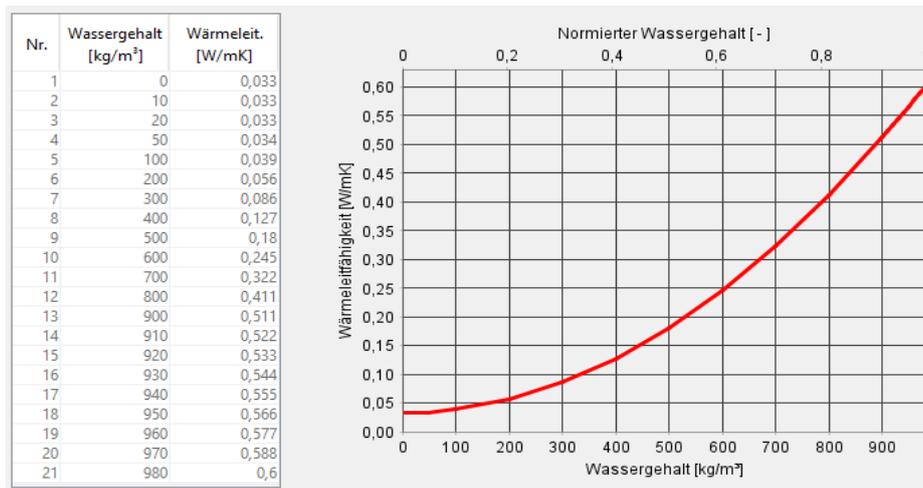


Abbildung 12: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Schafwoll-Dämmung [43]

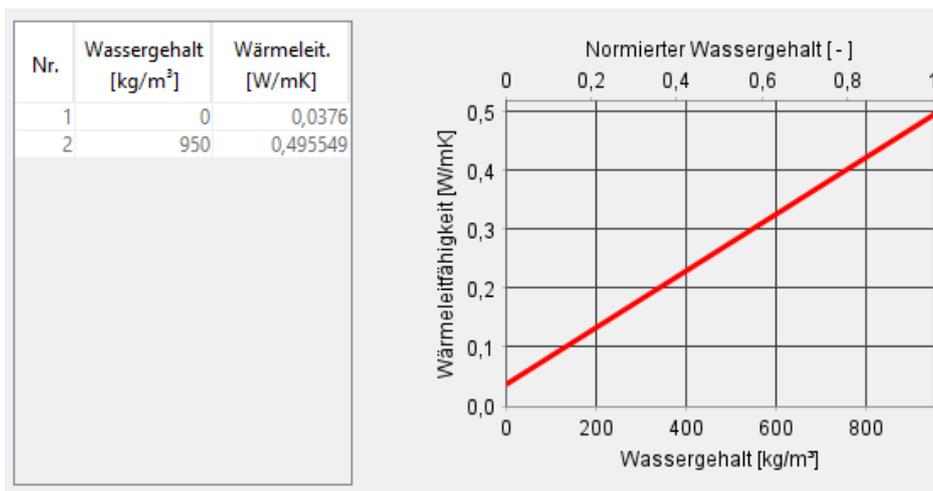


Abbildung 13: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Flachs-Dämmung [43]

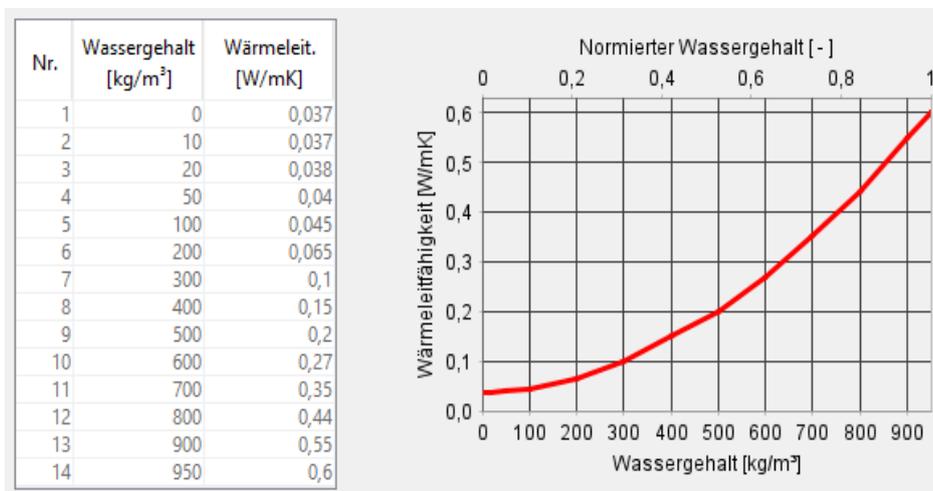
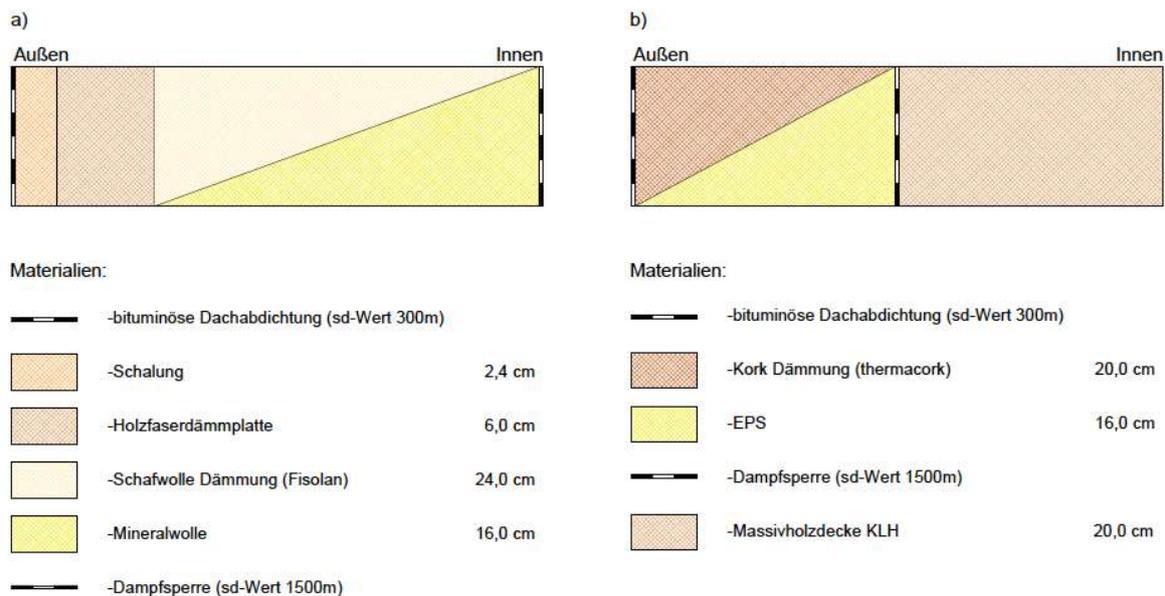


Abbildung 14: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Zellulose-Dämmung [43]

### 3.5 Eingabewerte zur Simulation Foliendach



**Abbildung 15:** Für die WUFI-Simulationen gewählte Foliendachkonstruktionen: (a) Holzrahmenbauweise; mit den Schichten von innen nach außen 1 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 2 Dämmstoff (Mineralwolle und Schafwolle) zwischen Konstruktionsvollholz, 3 Holzfaserdämmplatte, 4 Holzschalung, 5 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen  $s_d=300m$  und EPDM  $s_d=70m$ ) und (b) Massivbauweise; mit den Schichten 1 Massivholzdecke KLH, 2 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 3 Dämmstoff (EPS und Kork), 4 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen  $s_d=300m$  und EPDM  $s_d=70m$ )

Die für die WUFI Simulation des Foliendaches gewählte Dachkonstruktionen sind mit den verwendeten Materialien und ihren Stärken in **Abbildung 15** dargestellt.

Die Simulation der Aufbauten setzt detaillierte Randbedingungen voraus, die sowohl die äußeren Umgebungseinflüsse als auch die inneren Klimabedingungen berücksichtigen. In **Tabelle 3** sind die für die Berechnung notwendigen äußeren und inneren Randbedingungen angeführt.

**Tabelle 3:** Äußere und innere Randbedingungen der Simulation

	Randbedingungen	
	Außen	Innen
Klima	Österreich, Wien; Hohe Warte	WTA 6-2/ EN 15026
Wärmeübergangskoeffizienten	Dach 19 W/m <sup>2</sup> K	Innenoberfläche 8 W/m <sup>2</sup> K
Wärmeübergangswiderstand	0,0526 m <sup>2</sup> K/W	0,125 m <sup>2</sup> K/W
Orientierung/ Neigung	Nord/ 3° (5%)	-
Höhe/ Schlagregenkoeffizient	Kategorie Dach	-

In **Tabelle 4** ist eine Zusammenfassung der wesentlichen Materialkennwerte aus WUFI für die Materialien, die in der Simulation verwendet wurden, aufgelistet.

**Tabelle 4:** Materialkennwerte der verwendeten Materialien aus WUFI

Materialien	Rohdichte	Porosität	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
-	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
Holzschalung	650	0,47	1400	0,13	200
Holzfaserdämmung	260	0,83	1400	0,048	5
EPS	15	0,95	1500	0,04	30
Schafwolle	25,4	0,981	1800	0,033	1,6
Mineralwolle	111	0,959	850	0,034	1,3
Kork	107	0,22	1900	0,0397	28,3
Massivholzdecke KLH	423	0,7	1500	0,12	300

Im Zuge der Simulation des Foliendaches wurden spezifische Oberflächenübergangskoeffizienten für die Außenoberfläche angesetzt, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der hygrothermischen Verhältnisse zu gewährleisten. Die im Programm angenommenen Werte, sind in **Tabelle 5** aufgelistet.

**Tabelle 5:** Oberflächenübergangskoeffizienten der Außenoberfläche beim Foliendach

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit	Wert
Wärmeübergangskoeffizient – beinhaltet langwellige Strahlungsanteile	Dach	[W/m <sup>2</sup> K]	19,0
Kurzwellige Strahlungsadsorptionszahl	Bitumenbahn grau bestreut	[-]	0,85
Langwellige Strahlungsemissionszahl		[-]	0,91
Terrestrische kurzwelliger Reflexionsgrad	Standardwert	[-]	0,2
Explizite Strahlungsbilanz		[-]	nein
s <sub>a</sub> -Wert	Bitumenbahn mit PVC	[m]	300
Anhaftender Anteil des Regens	Keine Regenwasseradsorption	[-]	-

Für die Innenoberfläche des Foliendaches wurden ebenfalls für die Simulation entsprechend angepasste Oberflächenübergangskoeffizienten gewählt, siehe **Tabelle 6**.

**Tabelle 6:** Oberflächenübergangskoeffizienten der Innenoberfläche beim Foliendach

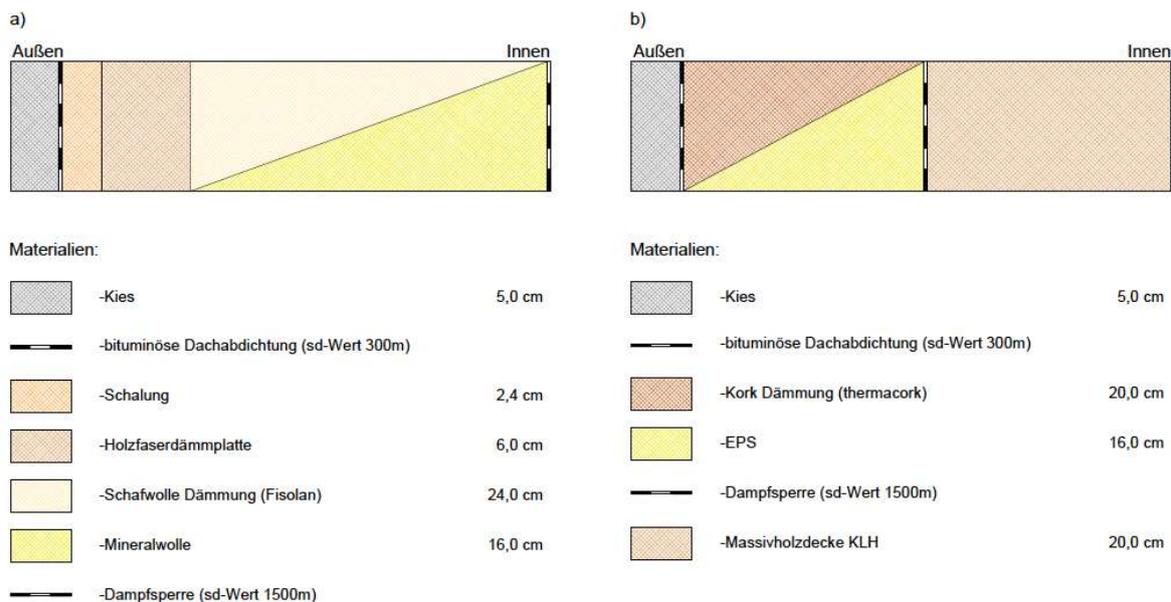
Bezeichnung	Beschreibung	Einheit	Wert
Wärmeübergangskoeffizient	Innenoberfläche	[W/m <sup>2</sup> K]	8,0
s <sub>a</sub> -Wert	Benutzerdefiniert	[m]	1500

Die Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten sind in **Tabelle 7** festgehalten. Sie repräsentieren die Standard-Einbaufeuchte, wie sie durch WUFI vorgegeben wird und bilden die Grundlage für die Anfangsbedingung der Simulation.

**Tabelle 7:** Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten

Materialien	Anfangswassergehalt
-	[kg/m <sup>3</sup> ]
Holzschalung	60,0
Holzfaserdämmung	39,0
EPS	2,1
Schafwolle	0,5
Mineralwolle	4,4
Kork	1,8
Massivholzdecke KLH	56,1

### 3.6 Eingabewerte zur Simulation Kiesdach



**Abbildung 16:** Für die WUFI-Simulationen gewählte Kiesdachkonstruktionen: (a) Holzrahmenbauweise; mit den Schichten von innen nach außen 1 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 2 Dämmstoff (Mineralwolle und Schafwolle) zwischen Konstruktionsvollholz, 3 Holzfaserdämmplatte, 4 Holzschalung, 5 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen  $s_d=300m$  und EPDM  $s_d=70m$ ), 6 Kies und (b) Massivbauweise; mit den Schichten 1 Massivholzdecke KLH, 2 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 3 Dämmstoff (EPS und Kork), 4 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen  $s_d=300m$  und EPDM  $s_d=70m$ ), 5 Kies

Die für die WUFI Simulation des Kiesdaches gewählte Dachkonstruktionen sind mit den verwendeten Materialien und ihren Stärken in **Abbildung 16** dargestellt.

Die Simulation der Aufbauten setzt detaillierte Randbedingungen voraus, die sowohl die äußeren Umgebungseinflüsse als auch die inneren Klimabedingungen berücksichtigen. In **Tabelle 8** sind die für die Berechnung notwendigen äußeren und inneren Randbedingungen angeführt.

**Tabelle 8:** Äußere und innere Randbedingungen der Simulation

	Randbedingungen	
	Außen	Innen
Klima	Österreich, Wien; Hohe Warte	WTA 6-2/ EN 15026
Wärmeübergangskoeffizienten	Dach 19 W/m <sup>2</sup> K	Innenoberfläche 8 W/m <sup>2</sup> K
Wärmeübergangswiderstand	0,0526 m <sup>2</sup> K/W	0,125 m <sup>2</sup> K/W
Orientierung/ Neigung	Nord/ 3° (5%)	-
Höhe/ Schlagregenkoeffizient	Kategorie Dach	-

In **Tabelle 9** ist eine Zusammenfassung der wesentlichen Materialkennwerte aus WUFI für die Materialien, die in der Simulation verwendet wurden, aufgelistet.

**Tabelle 9:** Materialkennwerte der verwendeten Materialien aus WUFI

Materialien	Rohdichte	Porosität	spez. Wärmekapazität	Wärmeleitfähigkeit	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
-	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
Kies	1400	0,3	1000	0,7	1
Holzschalung	650	0,47	1400	0,13	200
Holzfaserdämmung	260	0,83	1400	0,048	5
EPS	15	0,95	1500	0,04	30
Schafwolle	25,4	0,981	1800	0,033	1,6
Mineralwolle	111	0,959	850	0,034	1,3
Kork	107	0,22	1900	0,0397	28,3
Massivholzdecke KLH	423	0,7	1500	0,12	300

Im Zuge der Simulation des Kiesdaches wurden spezifische Oberflächenübergangskoeffizienten für die Außenoberfläche angesetzt, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der hygrothermischen Verhältnisse zu gewährleisten. Die im Programm angenommenen Werte, sind in **Tabelle 10** aufgelistet.

**Tabelle 10:** Oberflächenübergangskoeffizienten der Außenoberfläche beim Kiesdach

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit	Wert
Wärmeübergangskoeffizient – beinhaltet langwellige Strahlungsanteile	Dach	[W/m <sup>2</sup> K]	19,0
Kurzwellige Strahlungsadsorptionszahl	Kiesdach, generisches Modell	[-]	0,5
Langwellige Strahlungsemissionszahl		[-]	0,93
Terrestrische kurzwelliger Reflexionsgrad	Standardwert	[-]	0,2
Explizite Strahlungsbilanz		[-]	nein
s <sub>a</sub> -Wert	keine Beschichtung	[m]	-
Anhaftender Anteil des Regens	gemäß Bauteilneigung	[-]	-

Für die Innenoberfläche des Kiesdaches wurden ebenfalls für die Simulation entsprechend angepasste Oberflächenübergangskoeffizienten gewählt, siehe **Tabelle 11**.

**Tabelle 11:** Oberflächenübergangskoeffizienten der Innenoberfläche beim Kiesdach

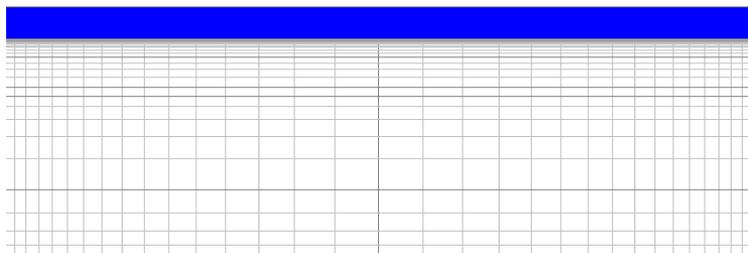
Bezeichnung	Beschreibung	Einheit	Wert
Wärmeübergangskoeffizient	Innenoberfläche	[W/m <sup>2</sup> K]	8,0
s <sub>a</sub> -Wert	Benutzerdefiniert	[m]	1500

Die Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten sind in **Tabelle 12** festgehalten. Sie repräsentieren die Standard-Einbaufeuchte, wie sie durch WUFI vorgegeben wird und bilden die Grundlage für die Anfangsbedingung der Simulation.

**Tabelle 12:** Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten

Materialien	Anfangswassergehalt
-	[kg/m <sup>3</sup> ]
Kies	5,0
Holzschalung	60,0
Holzfaserdämmung	39,0
EPS	2,1
Schafwolle	0,5
Mineralwolle	4,4
Kork	1,8
Massivholzdecke KLH	56,1

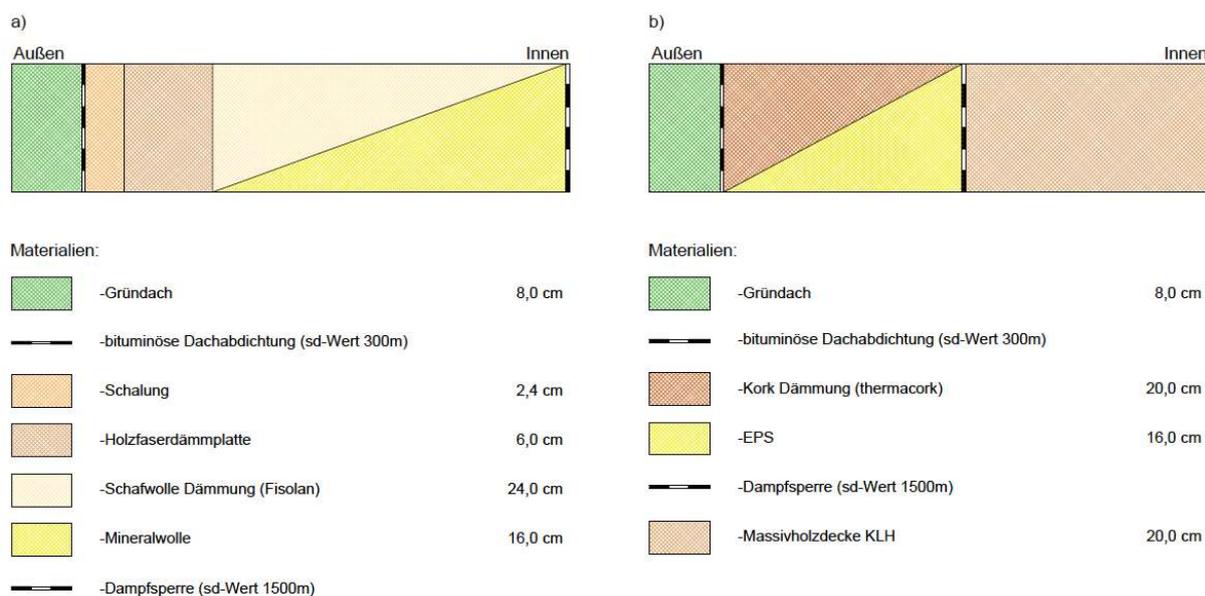
Bei dem generischen Kiesdach von WUFI wurde in der Kiesschicht kein Kapillartransport von Flüssigkeit berücksichtigt. Daher wird, wie in **Abbildung 17** dargestellt, für die möglichst realitätsnahe Simulation des Kiesdaches eine Feuchtequelle in der gesamten Kiesschicht angenommen.



**Abbildung 17:** Positionierung der Feuchtequelle beim Kiesdach

Diese wird über die gesamte Schichtdicke angenommen, jedoch mit Ausnahme der äußersten Schicht, da dies zu numerischen Problemen bei der Berechnung führen kann. Der Feuchtequelle im generischen Kiesdach wird als Quelltyp ein Anteil von 40% der Regenbelastung zugeordnet. Die hygrothermischen Materialeigenschaften für das generische Kiesdachmodell wurden bei Untersuchungen und Messungen an bekiesten Dächern des Fraunhofer Instituts in Holzkirchen gesammelt [44].

### 3.7 Eingabewerte zur Simulation Gründach



**Abbildung 18:** Für die WUFI-Simulationen gewählte Gründachkonstruktionen: (a) Holzrahmenbauweise; mit den Schichten von innen nach außen 1 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 2 Dämmstoff (Mineralwolle und Schafwolle) zwischen Konstruktionsvollholz, 3 Holzfaserdämmplatte, 4 Holzschalung, 5 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen  $s_d=300m$  und EPDM  $s_d=70m$ ), 6 Gründach und (b) Massivbauweise; mit den Schichten 1 Massivholzdecke KLH, 2 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 3 Dämmstoff (EPS und Kork), 4 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen  $s_d=300m$  und EPDM  $s_d=70m$ ), 5 Gründach

Die für die WUFI Simulation des Kiesdaches gewählte Dachkonstruktionen sind mit den verwendeten Materialien und ihren Stärken in **Abbildung 18** dargestellt.

Die Simulation der Aufbauten setzt detaillierte Randbedingungen voraus, die sowohl die äußeren Umgebungseinflüsse als auch die inneren Klimabedingungen berücksichtigen. In **Tabelle 13** sind die für die Berechnung notwendigen äußeren und inneren Randbedingungen angeführt.

**Tabelle 13:** Äußere und innere Randbedingungen der Simulation

	Randbedingungen	
	Außen	Innen
Klima	Österreich, Wien; Hohe Warte	WTA 6-2/ EN 15026
Wärmeübergangskoeffizienten	Dach 19 W/m <sup>2</sup> K	Innenoberfläche 8 W/m <sup>2</sup> K
Wärmeübergangswiderstand	0,0526 m <sup>2</sup> K/W	0,125 m <sup>2</sup> K/W
Orientierung/ Neigung	Nord/ 3° (5%)	-
Höhe/ Schlagregenkoeffizient	Kategorie Dach	-

In **Tabelle 14** ist eine Zusammenfassung der wesentlichen Materialkennwerte aus WUFI für die Materialien, die in der Simulation verwendet wurden, aufgelistet.

**Tabelle 14:** Materialkennwerte der verwendeten Materialien aus WUFI

Materialien	Rohdichte	Porosität	spez. Wärme- kapazität	Wärmeleit- fähigkeit	Wasserdampfdif- fusionswider- standzahl
-	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]
Gründach	1500	0,5	1500	0,9	5
Holzschalung	650	0,47	1400	0,13	200
Holzfaserdämmung	260	0,83	1400	0,048	5
EPS	15	0,95	1500	0,04	30
Schafwolle	25,4	0,981	1800	0,033	1,6
Mineralwolle	111	0,959	850	0,034	1,3
Kork	107	0,22	1900	0,0397	28,3
Massivholzdecke KLH	423	0,7	1500	0,12	300

Im Zuge der Simulation des Gründaches wurden spezifische Oberflächenübergangskoeffizienten für die Außenoberfläche angesetzt, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der hygrothermischen Verhältnisse zu gewährleisten. Die im Programm angenommenen Werte, sind in **Tabelle 15** aufgelistet.

**Tabelle 15:** Oberflächenübergangskoeffizient der Außenoberfläche beim Gründach

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit	Wert
Wärmeübergangskoeffizient – beinhaltet langwellige Strahlungsanteile	Dach	[W/m <sup>2</sup> K]	19,0
Kurzwellige Strahlungsadsorptionszahl	Gründach, generisches Modell	[-]	0,3
Langwellige Strahlungsemissionszahl		[-]	0
Terrestrische kurzwelliger Reflexionsgrad	Standardwert	[-]	0,2
Explizite Strahlungsbilanz		[-]	nein
sa-Wert	keine Beschichtung	[m]	-
Anhaftender Anteil des Regens	gemäß Bauteilneigung	[-]	-

Für die Innenoberfläche des Kiesdaches wurden ebenfalls für die Simulation entsprechend angepasste Oberflächenübergangskoeffizienten gewählt, siehe **Tabelle 16**.

**Tabelle 16:** Oberflächenübergangskoeffizienten der Innenoberfläche beim Gründach

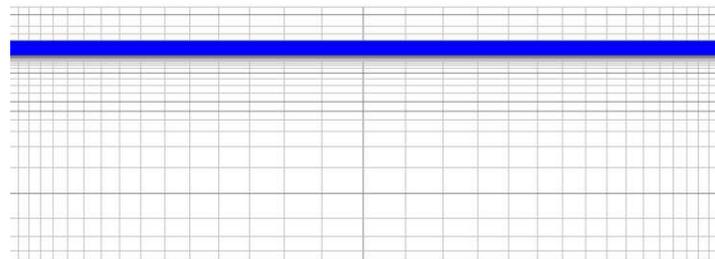
Bezeichnung	Beschreibung	Einheit	Wert
Wärmeübergangskoeffizient	Innenoberfläche	[W/m <sup>2</sup> K]	8,0
sa-Wert	Benutzerdefiniert	[m]	1500

Die Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten sind in **Tabelle 17** festgehalten. Sie repräsentieren die Standard-Einbaufeuchte, wie sie durch WUFI vorgegeben wird und bilden die Grundlage für die Anfangsbedingung der Simulation.

**Tabelle 17:** Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten

Materialien	Anfangswassergehalt
-	[kg/m <sup>3</sup> ]
Gründach	12,0
Holzschalung	60,0
Holzfaserdämmung	39,0
EPS	2,1
Schafwolle	0,5
Mineralwolle	4,4
Kork	1,8
Massivholzdecke KLH	56,1

In **Abbildung 19** wird die Positionierung der Feuchtequelle innerhalb des Aufbaus veranschaulicht. Für eine möglichst realitätsnahe Simulation des Gründaches wird eine Feuchtequelle in den unteren 2cm der Substratschicht angenommen. Die Feuchtequelle bekommt als Quelltyp einen Anteil von 40% der Regenbelastung zugeordnet.



**Abbildung 19:** Positionierung der Feuchtequelle beim Gründach

Die hygrothermischen Materialeigenschaften für das generische Gründachmodell wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts [45] basierend auf Freilanduntersuchungen in Holzkirchen, Leipzig [46], Wien [47] und Kassel [48] evaluiert und sind deshalb gut für Standorte in Mitteleuropa anwendbar. Das Modell ist primär für Aufbauten konzipiert, bei denen genaue Informationen zum Substrat fehlen. Zudem ist das Gründachmodell speziell für extensive Begrünung mit einer maximalen Substratschichtdicke von 15cm entwickelt worden [49].

Nach der in diesem Kapitel erfolgten Darstellung der methodischen Grundlagen der Simulation, in der wir den Aufbau, die angewandten Auswertungskriterien und die gewählten Simulationsparameter ausführlich erklärt haben, wenden wir uns nun der Auswertung der Ergebnisse zu. Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationen detailliert analysiert, mit bestehenden Erkenntnissen aus Fachliteratur verglichen und kritisch bewertet. Dieser Schritt ist erforderlich, da WUFI nur Diagramme und Werte ohne Interpretation der Verläufe ausgibt und erst im Zuge der Auswertung das Verhalten der Aufbauten genau analysiert und Tendenzen erkennbar werden.

## 4 Bewertung der Simulationsergebnisse

Nach erfolgter Simulation der unterschiedlichen Varianten kommt es nun zur Analyse der erhaltenen Ergebnisse. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden für alle Berechnungen gleiche Parameter hinsichtlich U-Wert der Konstruktion, die Klima-Randbedingung für Wien und einer Simulationsdauer von drei Jahren festgelegt. Das Ziel dieser Arbeit ist es, durch gezielte Parameteränderungen den Einfluss der ökologischen Dämmung im nicht hinterlüfteten Dach in Holzbauweise abzuschätzen. Dafür werden Referenzaufbauten mit konventioneller Dämmung für das Flachdach simuliert und allen weiteren Varianten mit ökologischer Dämmung gegenübergestellt. Die Erkenntnisse dieser Analyse werden im Anschluss festgehalten.

Aufgrund der hohen Anzahl an Simulationen werden nur die maßgebenden Varianten näher beschrieben und beurteilt. Ergänzend zu den Bewertungen sind die wichtigsten und aussagekräftigsten Diagramme zu den jeweiligen Ergebnisgrößen im **Anhang A** dieser Arbeit zu finden.

### 4.1 Auswertung Massiv- und Leichtbauweise Referenzaufbauten

#### 4.1.1 Massivbauweise mit EPS-Dämmung

Bei der Beurteilung der Referenzaufbauten in Massivbauweise wird mit dem Gesamtwassergehalt begonnen. Dabei lässt sich schnell feststellen, dass der Verlauf bei allen Dachvarianten ab dem ersten Jahr abfällt und sich somit während der Simulationsdauer kein Wasser in der Konstruktion ansammelt. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass der Aufbau als im Prozess des Austrocknens befindlich aufgefasst werden kann.

Die Bewertung der einzelnen Schichten gibt Aufschluss darüber, dass die Wassergehalte fallend oder eingeschwungen sind. In Bezug auf die EPS-Dämmung kann festgehalten werden, dass es sich in allen Fällen um geringe Mengen Wassergehalt handelt. Betrachtet man die Auswertung des Foliendaches, zeigt sich zu Beginn der Simulation eine kurze Überschreitung des Anfangswassergehalts, dieser fällt aber in den darauffolgenden Jahren deutlich ab. Im Vergleich dazu zeigt sich beim Kies- und Gründach von Beginn an ein eingeschwungener Zustand des Wassergehalts in der Dämmebene, was bedeutet, dass es in dieser Schicht zu keiner Akkumulation von Wasser kommt. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der EPS-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit sind in **Tabelle 18** angeführt.

Bei der Massivholzdecke erkennt man ebenfalls bei den drei Varianten einen fallenden Wassergehalt in der Schicht. Im ersten und zweiten Jahr wird bei allen Dächern der Anfangswassergehalt überschritten, danach lässt sich allerdings ein klarer Abfall im Holz feststellen. Im Vergleich zum Wassergehalt in der EPS-Dämmschicht werden im Holz höhere Wassergehalte festgestellt. Ursache dafür ist, dass Holz als natürlicher Baustoff einen von Natur aus höheren Anfangswassergehalt besitzt. Die Massivholzdecke wird mit Hilfe von zwei Nachweisen bewertet. Die Ergebnisse der beiden Nachweiswege für das Holz sind in **Tabelle 19** dargestellt.

Bezüglich der relativen Feuchte in der EPS-Dämmung finden sich bei allen Varianten geringfügig erhöhte Werte. Begründen lässt sich das damit, dass es sich bei der Dämmung bei der Massivbauvariante um die erste Schicht nach der Dachabdichtung handelt und diese daher mehr den Schwankungen der Außenlufttemperatur ausgesetzt ist als weiter innen liegende Materialschichten. Die relative Feuchte in der Massivholzschicht fällt im direkten Vergleich zur EPS-Dämmung ebenfalls höher aus, da zum einen Holz ein natürliches Material mit einem natürlich höheren Wassergehalt ist und zum anderen die innerste Schicht darstellt, wo Feuchtigkeit aus dem Innenraum ins Holz diffundieren kann.

Das Verhalten der relativen Feuchte in der Dämmebene wird auch in Bezug auf die Temperatur gut dargestellt. Durch die Nähe der EPS-Schicht zur Außenhaut ist sie den jährlichen Temperaturschwankungen zwischen den Saisonen stärker ausgesetzt. Die größte Temperaturdifferenz ist beim Foliendach feststellbar, da die Nähe zur Außenluft sowie die dunkle Färbung der Dachhaut hier sehr maßgebende Parameter darstellen. Deutlich reduzierte Temperaturschwankungen zeigen sich beim Gründach bedingt durch die höhere Schichtdicke des Substrats auf der Dämmung und die hellere Dachoberfläche aufgrund von Pflanzenbewuchs. Während bei der äußeren Schicht

beim Foliendach Sommertemperaturen bis über 42°C erreicht werden können, bewegt sich der Vergleichswert im Gründach bei nur ungefähr 27°C.

Ähnlich wie in der weiter außen liegenden EPS-Dämmung lassen sich auch beim Massivholz aufgrund der Position und der Nähe zum Innenraum sowie der Zunahme der Dachaufbaustärke darüber im Grunde bei allen Dachvarianten geringere Temperaturschwankungen beobachten. Im direkten Vergleich zur EPS-Dämmung werden beim Foliendach im Massivholz in den Sommermonaten Temperaturen über 29°C erreicht, während im Gründach im Massivholz im selben Vergleichszeitraum nur ungefähr 25°C erreicht werden.

**Tabelle 18:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von EPS

Dachvariante	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Foliendach	EPS	1,7 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Kiesdach		1,8 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Gründach		1,9 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 19:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes

Dachvariante	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Foliendach	Massivholzdecke	13,0 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Kiesdach		13,5 M.-%		erfüllt	erfüllt
Gründach		13,6 M.-%		erfüllt	erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Verlust der Dämmleistung sowie zu keinen Problemen mit der Tragfähigkeit noch mit holzzerstörendem Pilzwachstum kommen wird.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der EPS-Dämmung für das Foliendach in **Gleichung 1**, für das Kiesdach in **Gleichung 2** und für das Gründach in **Gleichung 3** angeführt.

$$8,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,081 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 81 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (1)$$

$$9,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,090 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 90 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (2)$$

$$9,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,095 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 95 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (3)$$

Der Nachweis gilt damit für alle drei Dachvarianten als erbracht, es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

#### 4.1.2 Leichtbauweise mit Mineralwoll-Dämmung

Bei der Beurteilung der Referenzaufbauten in Leichtbauweise wird ebenfalls mit dem Gesamtwassergehalt begonnen. Im Zuge der Untersuchung lässt sich schnell feststellen, dass der Verlauf beim Folien- und Kiesdach vom ersten Jahr an abfällt und beim Gründach direkt ein eingeschwungener Zustand erreicht wird. Das lässt den Schluss zu, dass sich in dem Bauteil während der Dauer der Simulation kein Wasser ansammelt und der Aufbau darüber hinaus als im Prozess des Austrocknens befindlich aufgefasst werden kann.

Bei der Beurteilung der einzelnen Schichten kommt man rasch zu dem Ergebnis, dass die Wassergehalte fallend oder eingeschwungen sind. In Bezug auf die Mineralwoll-Dämmung lässt sich in allen Fällen sagen, dass es sich um sehr geringe Mengen an Wassergehalt handelt. Dies könnte einerseits daran liegen, dass der Anfangswassergehalt im Material sehr gering ist, andererseits an der eingeschränkten Feuchtespeicherung bei Faserdämmstoffen [37, 42]. So wird im Fall des Foliendaches zu Beginn der Simulation der Anfangswassergehalt kurz überschritten, fällt aber in den darauffolgenden Jahren deutlich ab. Beim Kies- und Gründach lässt sich von Beginn an ein eingeschwungener Zustand des Wassergehalts in der Dämmebene erkennen, was bedeutet, dass es in

dieser Schicht zu keiner Akkumulation von Wasser kommt. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Mineralwoll-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit sind in **Tabelle 20** angeführt. Bei den Verläufen des Wassergehalts in den Schichten Schalung und Holzfaserdämmung erkennt man bei dem Folien- und Kiesdach einen fallenden Wassergehalt in den Schichten und im Fall des Gründaches einen eingeschwungenen Zustand. Im Gegensatz zur Mineralwolle können hier höhere Wassergehalte beobachtet werden, da es sich bei beiden Materialien um natürliche Baustoffe mit einem von Natur aus höheren Anfangswassergehalt handelt. Der Nachweis der Holzfaserdämmung erfolgt auf Basis der Masseprozent, während für die Holzschalung zusätzlich die Porenluftfeuchte beurteilt wird. Die Ergebnisse der beiden Nachweiswege für das Holz sind in **Tabelle 21** und **Tabelle 22** dargestellt.

In Bezug auf die relative Feuchte kann man bei allen Leichtbauvarianten leicht erhöhte Werte erkennen. Ursache dafür kann sein, dass es sich bei der Schalung und der Holzfaserdämmung um die ersten Schichten nach der Dachhaut handelt, die aufgrund ihrer Position verstärkt den Schwankungen der Außenluft ausgesetzt sind als weiter innenliegende Materialschichten. Die relative Feuchte in der Mineralwolle/Konstruktionsholz-Schicht ist im Vergleich ebenfalls etwas erhöht, da Holz ein natürliches Material mit einem natürlich höheren Wassergehalt ist und es sich um die innerste Schicht handelt, wo Feuchtigkeit aus dem Innenraum ins Holz und die Mineralwolle diffundieren kann.

Das Verhalten der relativen Feuchte in der Dämmebene wird auch gut in Bezug auf die Temperatur dargestellt. Je näher die Schichten an der Außenhaut liegen, desto größer sind die jährlichen Temperaturschwankungen zwischen den Saisonen, denen sie ausgesetzt sind. Im Fall der Leichtbauweise betrifft dies die Schalung und die Holzfaserdämmung. Die größten Schwankungen lassen sich beim Foliendach erkennen, da die Nähe zur Außenluft und die dunkle Färbung der Dachhaut hier sehr maßgebende Parameter darstellen. Im Vergleich dazu lassen sich beim Gründach aufgrund der höheren Aufbaustärke durch das Substrat und der helleren Dachoberfläche aufgrund von Pflanzenbewuchs deutlich reduzierte Temperaturschwankungen erkennen. Die hier erreichten Sommertemperaturen bewegen sich bei den äußeren Schichten beim Foliendach bei bis über 50°C während im Vergleich dazu im Gründach nur ungefähr 30°C erreicht werden. Analog zu den äußeren Schichten lässt sich bei der Mineralwolle aufgrund der Position und Nähe zum Innenraum und mit der Zunahme der Dachaufbaustärke darüber eine Abnahme der Temperaturschwankungen beobachten. So werden beim Foliendach in den Sommermonaten ungefähr 33°C erreicht, während im Gründach in der gleichen Periode nur ungefähr 26°C erreicht werden.

**Tabelle 20:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Mineralwolle

Dachvariante	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Foliendach	Mineralwolle	2,9 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Kiesdach		3,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Gründach		3,2 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 21:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung

Dachvariante	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Foliendach	Holzschalung	14,3 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Kiesdach		15,7 M.-%		erfüllt	erfüllt
Gründach		15,6 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 22:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung

Dachvariante	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
Foliendach	Holzfaserdämmung	14,0 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Kiesdach		15,1 M.-%		erfüllt
Gründach		15,1 M.-%		erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Verlust der Dämmleistung sowie zu keinen Problemen mit der Tragfähigkeit oder holzzerstörendem Pilzwachstum kommen wird.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der Mineralwoll-Dämmung für das Foliendach in **Gleichung 4**, für das Kiesdach in **Gleichung 5** und für das Gründach in **Gleichung 6** angeführt.

$$9,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,094 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 94 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (4)$$

$$10,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,104 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 104 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (5)$$

$$10,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,109 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 109 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (6)$$

Der Nachweis gilt damit für alle drei Dachvarianten als erbracht, es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

## 4.2 Diskussion Referenzaufbauten

Im Fall der beiden Referenzaufbauten konnten alle Nachweise erfüllt werden. In Bezug auf die hygrothermische Simulation bedeutet dies, dass alle Parameter und Anfangsbedingungen korrekt angenommen wurden und die gewählten Konstruktionen funktionieren. Somit können mit dieser Evaluierung in Folge auch die Flachdachaufbauten mit den ökologischen Dämmvarianten berechnet und mit den daraus gewonnenen Werten deren Funktionsfähigkeit bewertet werden.

Die Wassergehalte in der Dämmschicht liegen aufgrund der etwas erhöhten Anfangsfeuchte in der Mineralwolle bei der Rahmenbauweise über denen im EPS. Zudem zeigt sich, dass die geringsten Wassergehalte in der Dämmebene beim Foliendach zu finden sind, was auf die höheren Temperaturen aufgrund der direkten Nähe zur Außenluft zurückzuführen ist. Dies lässt sich gut mit der Färbung der Dachoberfläche erklären, da die dunkle Farbe der Dachabdichtung mehr Strahlung absorbieren kann als eine hellere Dachoberfläche. Die höchsten Wassergehalte sind demnach in der Dämmung des Gründachs zu beobachten, da hier aufgrund der höheren Aufbaustärke durch das Substrat und der helleren Dachoberfläche durch die Pflanzen, deutlich reduzierte Temperaturen zu beobachten sind.

Die leicht erhöhten Wassergehalte in der Dämmschicht der Rahmenbauweise spiegeln sich auch im Holz wider, bleiben aber entfernt von kritischen Werten.

## 4.3 Auswertung Massiv- und Leichtbauweise mit Dämmalternative

### 4.3.1 Massivbauweise mit Kork Dämmung

Die Beurteilung der Massivbauweise mit Korkdämmung startet ebenfalls mit dem Gesamtwassergehalt. Im Zuge der Analyse lässt sich schnell feststellen, dass der Verlauf bei allen Dachvarianten ab dem ersten Jahr abfällt. Im Bauteil wird somit während der Simulationsdauer kein Wasser angesammelt, siehe ab **Abbildung 20**. Aufgrund dessen kann der Aufbau als im Prozess des Austrocknens befindlich aufgefasst werden.

Die Beurteilung der einzelnen Schichten lässt schnell erkennen, dass die Wassergehalte fallend oder eingeschwungen sind. Hinsichtlich der Korkdämmung lässt sich sagen, dass in allen Fällen der Wassergehalt als gering eingestuft werden kann. Im Fall des Folien- und Kiesdaches kann ein klarer Abfall des Wassergehalts über die Simulationsdauer beobachtet werden. Im Vergleich dazu ist beim Gründach von Beginn an ein eingeschwungener Zustand des Wassergehalts der Dämmebene zu erkennen. Damit kann festgehalten werden, dass es in der Dämmebene bei allen Varianten zu keiner Akkumulation von Wasser kommt. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Kork-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit sind in **Tabelle 23** angeführt.

Die Massivholzdecke lässt ebenfalls bei allen drei Varianten einen fallenden Wassergehalt in der Schicht erkennen. Im ersten und zweiten Jahr wird beim Kies- und Gründach der Anfangswassergehalt noch überschritten, danach lässt sich jedoch ein klarer Abfall feststellen. Im Vergleich zum

Wassergehalt in der Korkdämmschicht sind im Holz höhere Wassergehälter zu beobachten. Begründet wird dies damit, dass Holz als natürlicher Baustoff einen von Natur aus höheren Anfangswassergehalt besitzt. Die Massivholzdecke wird mit Hilfe von zwei Nachweisen bewertet. Die Ergebnisse der beiden Nachweiswege für das Holz sind in **Tabelle 24** dargestellt.

In Bezug auf die relative Feuchte der Korkdämmung können bei allen Varianten etwas erhöhte Werte beobachtet werden. Die Ursache dafür liegt darin, dass es sich bei der Dämmung der Massivbauvariante um die erste Schicht nach der Dachabdichtung handelt und so verstärkt den Schwankungen der Außenluft ausgesetzt ist als weiter innenliegende Materialschichten. Die relative Feuchte der Massivholzschicht ist im Vergleich zur Korkdämmung höher, da zum einen Holz als natürliches Material einen natürlich bedingten, höheren Wassergehalt hat und zum anderen die innerste Schicht darstellt, wo Feuchtigkeit aus dem Innenraum ins Holz diffundieren kann.

Das Verhalten der relativen Feuchte in der Dämmebene wird auch gut in Bezug auf die Temperatur dargestellt. Je näher die Korkdämmschicht an der Außenhaut liegt, desto stärker sind die jährlichen Temperaturschwankungen zwischen den Saisonen. Die größten Schwankungen lassen sich beim Foliendach erkennen, da die Nähe zur Außenluft und die dunkle Färbung der Dachhaut hier sehr maßgebende Parameter darstellen. Hingegen lässt sich beim Gründach aufgrund der höheren Schichtdicke auf der Dämmung und der helleren Dachoberfläche aufgrund von Pflanzenbewuchs eine deutlich reduzierte Temperaturschwankung erkennen. So werden bei der äußeren Schicht beim Foliendach im Sommer Temperaturen bis zu 42°C erreicht, im Vergleich dazu im Gründach nur ungefähr 27°C.

Ähnlich wie in der Korkschicht lässt sich beim Massivholz aufgrund der Position und Nähe zum Innenraum und mit der Zunahme der Dachaufbaustärke darüber eine Abnahme der Temperaturschwankungen beobachten. Beim Foliendach werden im Massivholz in den Sommermonaten ungefähr 29°C erreicht, während im Gründach in der gleichen Periode nur ungefähr 25°C erreicht werden.

**Tabelle 23:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork

Dachvariante	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Foliendach	Kork	4,3 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
Kiesdach		4,4 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Gründach		4,4 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 24:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes

Dachvariante	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Foliendach	Massivholzdecke	13,9 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Kiesdach		14,3 M.-%		erfüllt	erfüllt
Gründach		14,5 M.-%		erfüllt	erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Verlust der Dämmleistung sowie zu keinen Problemen mit der Tragfähigkeit oder holzzerstörendem Pilzwachstum kommen wird.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der Korkdämmung für das Foliendach in **Gleichung 7**, für das Kiesdach in **Gleichung 8** und für das Gründach in **Gleichung 9** angeführt.

$$9,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,092 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 92 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (7)$$

$$12,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,120 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 120 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (8)$$

$$12,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 127 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (9)$$

Der Nachweis gilt damit für alle drei Dachvarianten als erbracht, es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

### 4.3.2 Leichtbauweise mit Schafwolle Dämmung

Für die Beurteilung der Leichtbauweise mit Schafwoll-Dämmung wird mit dem Gesamtwassergehalt der Konstruktion begonnen. Erkannt wird dabei, dass der Verlauf beim Foliendach ab dem ersten Jahr abfällt, während beim Kies- und Gründach direkt ein eingeschwungener Zustand erreicht wird. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass sich in diesem Bauteil während der Dauer der Simulation kein Wasser ansammelt und somit der Aufbau als im Prozess des Austrocknens befindlich aufgefasst werden kann, siehe ab **Abbildung 24**.

Bei der Evaluierung der einzelnen Schichten lässt sich schnell erkennen, dass die Wassergehalte fallend oder eingeschwungen sind. Die Schafwoll-Dämmung führt dazu, dass bei allen Dachvarianten nur geringe Wassergehalte festgestellt werden können. Ursache dafür könnte unter anderem der geringe Anfangswassergehalt des Materials sein. So lässt sich bei allen Aufbauten von Beginn an ein eingeschwungener Zustand des Wassergehalts feststellen und es kommt in der Dämmebene zu keiner Akkumulation von Wasser. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Schafwoll-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit sind in **Tabelle 25** angeführt.

Bei den Verläufen des Wassergehalts in den Schichten Schalung und Holzfaserdämmung erkennt man während der Simulationsdauer von Beginn an eingeschwungene Wassergehalte. Im Vergleich zu den anderen Materialien können höhere Wassergehalte beobachtet werden, da es sich bei beiden Materialien um natürliche Baustoffe mit einem von Natur aus höheren Anfangswassergehalt handelt. Der Nachweis der Holzfaserdämmung erfolgt auf Basis der Masseprozent, während für die Holzschalung zusätzlich die Porenluftfeuchte beurteilt wird. Die Ergebnisse der beiden Nachweiswege für das Holz sind in **Tabelle 26** und **Tabelle 27** dargestellt.

Die relative Feuchte betreffend können bei allen Leichtbauvarianten etwas erhöhte Werte erkannt werden. Begründet kann dies damit werden, dass es sich bei der Schalung und der Holzfaserdämmung um die ersten Schichten nach der Dachhautabdichtung handelt, wodurch sie größeren Schwankungen der Außenluft ausgesetzt sind im Vergleich zu den weiter innenliegenden Materialschichten. Die relative Feuchte in der Schafwolle/ Konstruktionsholz Schicht ist ebenfalls etwas erhöht, da Holz ein natürliches Material mit einem von Natur aus höherem Wassergehalt ist und es die innerste Schicht bildet, wo Feuchtigkeit aus dem Innenraum ins Holz und die Schafwolle diffundieren kann.

Das Verhalten der relativen Feuchte in der Dämmebene wird auch gut in Bezug auf die Temperatur dargestellt. Je näher die Schichten an der Außenhaut liegen, desto größer sind die jährlichen Temperaturschwankungen zwischen den Saisonen. Im Fall der Leichtbauweise ist die Schalung und die Holzfaserdämmung davon betroffen. Die größten Schwankungen lassen sich beim Foliendach erkennen, bedingt durch die Nähe zur Außenluft und durch die dunkle Färbung der Dachhaut, die hier sehr maßgebende Parameter darstellen. Im Gegensatz dazu lässt sich beim Gründach aufgrund der höheren Aufbaustärke durch das Substrat und der helleren Dachoberfläche aufgrund von Pflanzenbewuchs deutlich reduzierte Temperaturdifferenzen ablesen. Die äußeren Schichten des Foliendach können im Sommer Temperaturen bis über 50°C erreichen, das Gründach im Vergleich dazu nur in etwa 30°C.

Ähnlich wie in den äußeren Schichten lässt sich bei der Schafwolle durch ihre Position und Nähe zum Innenraum sowie durch die Zunahme der Dachaufbaustärke eine Abnahme der Temperaturschwankungen beobachten. Beim Foliendach werden in den Sommermonaten ungefähr 36°C erreicht während im Gründach in der gleichen Beurteilungsperiode nur ungefähr 27°C erreicht werden.

**Tabelle 25:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle

Dachvariante	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Foliendach	Schafwolle	2,6 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Kiesdach		2,7 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Gründach		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 26:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung

Dachvariante	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Foliendach	Holzschalung	16,0 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Kiesdach		18,2 M.-%		erfüllt	erfüllt
Gründach		18,2 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 27:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung

Dachvariante	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
Foliendach	Holzfaserdämmung	15,4 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Kiesdach		16,7 M.-%		erfüllt
Gründach		15,4 M.-%		erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Verlust der Dämmleistung sowie zu keinen Problemen mit der Tragfähigkeit oder holzzerstörendem Pilzwachstum kommen wird.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der Schafwoll-Dämmung für das Foliendach in **Gleichung 10**, für das Kiesdach in **Gleichung 11** und für das Gründach in **Gleichung 12** angeführt.

$$9,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,092 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 92 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (10)$$

$$12,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,120 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 120 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (11)$$

$$12,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,127 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 127 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (12)$$

Der Nachweis gilt damit für alle drei Dachvarianten als erbracht, es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

#### 4.4 Diskussion der Aufbauten mit ökologischen Dämmalternativen

Im direkten Vergleich der EPS-Dämmung mit der Kork-Dämmung im Rahmen der Massivbauweise sind klare Unterschiede festzustellen. In der Kork-Dämmung kommt es verglichen mit der EPS-Dämmung zu beinahe doppelt so hohem Wassergehalten während des Berechnungszeitraums. Dies hängt mit den unterschiedlichen Materialeigenschaften der Dämmstoffe zusammen. Während EPS aufgrund seines hohen Dampfdiffusionswiderstands kaum in der Lage ist, Wasserdampf und Feuchte aufzunehmen und wieder abzugeben, ist Kork gegenüber Feuchtigkeit relativ unempfindlich, zeigt trotz Feuchtigkeit kaum Verluste der Dämmwirkung und ist aufgrund seiner Struktur in der Lage, im Gegensatz zu EPS, Feuchte zu speichern und auch wieder abzugeben [28, 50].

Vergleicht man nun auch die Mineralwoll-Dämmung mit der Schafwoll-Dämmung sind hier ebenfalls Unterschiede festzustellen, die sich auf deren unterschiedlichen Eigenschaften begründen. Im Fall des Aufbaus mit Schafwolle als natürlichem Dämmmaterial ist in der Dämmebene verglichen mit der Mineralwolle ein ähnlicher Wassergehalt zu beobachten. Dabei gilt zu beachten, dass die Anfangsfeuchte der Schafwolle deutlich geringer ist als die der Mineralwolle. Die Mineralwoll-Dämmung muss an ihrem Einbauort gut vor Feuchtigkeit geschützt werden, da bei einer Durchfeuchtung die Wärmeleitfähigkeit schnell ansteigt und der Dämmstoff schnell seine gute Dämmwirkung verliert. In der Literatur wird Schafwolle als die ideale Dämmung in Kombination mit Holz dargestellt, da es sich sehr schnell und gut an die in der Konstruktion vorherrschenden Bedingungen anpassen und bis zu einem Drittel des Eigengewichts an Feuchtigkeit aufnehmen und auch wieder abgeben kann [28].

Wie schon bei den Referenzaufbauten erwähnt, sind auch bei den ökologischen Dämmalternativen Temperaturunterschiede in der Konstruktion erkennbar. Der Differenzen sind allerdings

nicht so klar wie zuvor feststellbar. Die Auswertung der Temperatur zeigt aber wieder die klaren Temperaturunterschiede zwischen den unterschiedlichen Färbungen der Dachoberfläche. In Bezug auf das Massivholz und den Holzwerkstoff in den Aufbauten lässt sich sagen, dass verglichen zu den Referenzaufbauten, in den Varianten mit Kork- und Schafwoll-Dämmung etwas erhöhte Wassergehalte im Holz vorherrschen. Diese Veränderung kann vermutlich wieder mit dem unterschiedlichen Umgang der Dämmstoffe mit Feuchtigkeit und der allgemein höheren Feuchtebelastung in den Aufbauten mit ökologischer Dämmung erklärt werden.

#### 4.5 Auswertung Massiv- und Leichtbauweise mit Dämmalternative und Fehlstelle

Im vorherigen Abschnitt wurden die Referenzaufbauten und die Aufbauten mit den ökologischen Dämmalternativen ausgewertet und ein erster direkter Vergleich durchgeführt. Ökologische Dämmstoffe zählen in Kombination mit einem Flachdach aus Holz nicht zur ersten Wahl eines Planers. Aus diesem Grund werden im Anschluss an den generellen Vergleich der Referenzaufbauten auch die in dieser Arbeit gewählten ökologischen Dämmstoffe näher untersucht. Diese Untersuchung wird im ersten Schritt auf Basis angenommener Fehlstellen in der äußeren Dachabdichtung, der inneren Dampfsperre und aus der Kombination beider Fehler durchgeführt. Auf diese Weise soll die Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der ökologischen Dämmalternativen nachgewiesen und ihr Einfluss auf die Gesamtkonstruktion beurteilt werden.

##### 4.5.1 Massivbauweise mit Kork-Dämmung und Fehlstelle

Die Analyse der Massivbauweise mit Kork-Dämmung unter der Berücksichtigung von Fehlstellen startet mit der Feststellung des Gesamtwassergehalts der Konstruktion. Das Ergebnis zeigt, dass der Verlauf bei allen Dachvarianten ab dem ersten Jahr abfällt und sich somit in dem Bauteil während der Simulationsdauer kein Wasser ansammelt, siehe ab **Abbildung 29**.

Bei der Analyse der einzelnen Schichten ist diesmal ersichtlich, dass die Verläufe des Wassergehalts nicht bei allen Varianten in einem fallenden oder eingeschwungenen Zustand sind. Beginnend beim Foliendach sind die Verläufe generell abfallend, diesmal jedoch mit leicht erhöhten Werten im Vergleich zur fehlerfreien Variante. Der Aufbau mit dem Fehler in der äußeren Dachabdichtung sowie dem Fehler bei der inneren Dampfsperre ist in der Beurteilung des Wassergehalts in der Dämmung sehr ähnlich.

Betrachtet man jedoch die relative Feuchte im Bauteil, sind Unterschiede feststellbar. Der für die Konstruktion kritischere Fall resultiert aus dem Fehler bei der inneren Dampfsperre, wobei auf Dauer eine höhere relative Feuchte und größere saisonale Schwankungen in der Dämmebene beobachtet werden können. Im Vergleich zu den anderen Aufbauten zeigen die Auswertungen, dass die direkte Nähe von dunkler Dachabdichtung und Dämmung ein maßgeblicher Parameter für die Funktionstüchtigkeit des Aufbaus ist. Dadurch kann durch einen Fehler eingetretene Feuchtigkeit aufgrund der höheren Temperaturen in der Konstruktion eventuell wieder austrocknen. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Kork-Dämmung im Foliendach, basierend auf der Wärmeleitfähigkeit, ist in **Tabelle 28** angeführt. Die Ergebnisse der Nachweise der Massivholzdecke sind in **Tabelle 31** dargestellt.

Bei der Auswertung der Ergebnisse des Kiesdaches lassen sich im Fall eines Fehlers bei der inneren Dampfsperre ein leichter Anstieg des Wassergehalts in der Dämmebene und eine erhöhte relative Feuchte feststellen. Bei dem Fehler in der äußeren Dachabdichtung sowie auch bei der Kombination beider Fehler fällt der Verlauf über die Simulationsdauer leicht ab. Es ist festzustellen, dass der Wassergehalt bei allen Fehlervarianten jenem der fehlerfreien Ausführung ähnlich ist. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Kork-Dämmung im Kiesdach, basierend auf der Wärmeleitfähigkeit, ist in **Tabelle 29** angeführt. Die Ergebnisse der Nachweise der Massivholzdecke sind in **Tabelle 32** dargestellt.

Im Fall des Gründachs zeigt sich ein Anstieg des Wassergehalts in der Korkdämmung bei allen Fehlerannahmen. Der stärkste Anstieg ist bei der Kombination aus Fehler außen und innen zu erkennen. Verglichen mit dem Foliendach sind in der Dämmebene des Gründaches klar reduzierte Temperaturschwankungen zu erkennen, was mit der erhöhten Aufbaustärke durch die Substratschicht erklärbar ist. Zwar ist der Aufbau nach außen immer diffusionsoffener ausgebildet, jedoch kann eine Rücktrocknung durch im Gründachaufbau gespeichertes Wasser reduziert werden. Die

Beurteilung der Dämmeigenschaften der Kork-Dämmung im Gründach, basierend auf der Wärmeleitfähigkeit, ist in **Tabelle 30** angeführt. Die Ergebnisse der Nachweise der Massivholzdecke sind in **Tabelle 33** dargestellt.

**Tabelle 28:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork im Foliendach

Fehlstelle	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Fehler innen	Kork	4,4 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
Fehler außen		4,6 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Fehler innen & außen		4,5 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 29:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork im Kiesdach

Fehlstelle	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Fehler innen	Kork	4,9 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
Fehler außen		4,7 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Fehler innen & außen		4,4 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 30:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork im Gründach

Fehlstelle	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Fehler innen	Kork	4,7 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
Fehler außen		4,6 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Fehler innen & außen		4,7 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 31:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes im Foliendach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Fehler innen	Massivholzdecke	13,5 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Fehler außen		10,6 M.-%		erfüllt	erfüllt
Fehler innen & außen		12,0 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 32:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes im Kiesdach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Fehler innen	Massivholzdecke	14,0 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Fehler außen		13,5 M.-%		erfüllt	erfüllt
Fehler innen & außen		13,4 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 33:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes im Gründach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Fehler innen	Massivholzdecke	12,9 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Fehler außen		13,0 M.-%		erfüllt	erfüllt
Fehler innen & außen		13,0 M.-%		erfüllt	erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Verlust der Dämmleistung sowie zu keinen Problemen mit der Tragfähigkeit oder holzzerstörendem Pilzwachstum kommen wird.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der Kork-Dämmung für die Kombination aus innerem und äußerem Fehler in **Gleichung 13** angeführt.

$$10,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,101 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 101 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (13)$$

Der Nachweis gilt damit als erbracht, es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

#### 4.5.2 Leichtbauweise mit Schafwoll-Dämmung und Fehlstelle

Die Bewertung der Leichtbauweise mit Schafwolle Dämmung unter der Berücksichtigung von Fehlern beginnt mit einer Analyse des Gesamtwassergehalts der Konstruktion. Dabei zeigt sich, dass beim Folien- und Kiesdach der Wassergehalt ab dem ersten Jahr sinkt, wohingegen er beim Gründach tendenziell langsam, aber stetig zunimmt, siehe ab **Abbildung 33**. Dies deutet darauf hin, dass sich bei Folien- und Kiesdächern im Laufe der Simulation kein Wasser im Bauteil ansammelt. Im Gegensatz dazu könnte der anhaltend hohe Wassergehalt im Gründach zu Schäden durch Fäulnis und Schimmelbildung führen, was eine detaillierte Analyse der einzelnen Schichten jedenfalls erforderlich macht. Der beobachtete Anstieg des Wassergehalts im Gründach lässt nach der ersten Untersuchung auf eine geringe Fehlertoleranz dieser Dachkonstruktion schließen.

Bei der Analyse der einzelnen Schichten sind die Verläufe des Wassergehalts nicht bei allen Varianten in einem fallenden oder eingeschwungenen Zustand. So zeigen sich beim Foliendach generell abfallende Verläufe, jedoch mit leicht erhöhten Werten im Vergleich zur fehlerfreien Variante. Der Aufbau mit Fehler in der äußeren Dachabdichtung weist im Vergleich zu den zwei anderen Fehlerannahmen einen geringfügig höheren Wassergehalt in der Dämmebene auf. Bei einem Fehler der inneren Dampfsperre und der Kombination von äußerem und innerem Fehler sind sehr ähnliche Wassergehalte zu erkennen. Die relative Feuchte hingegen ist bei allen drei Mängeln längerfristig erhöht. Im Vergleich zu den anderen Aufbauten und gemäß den bereits erfolgten Auswertungen stellt die dunkle Dachabdichtung einen maßgebenden Parameter für die Funktionstüchtigkeit des Aufbaus dar. Die erhöhten Werte der relativen Feuchte während der Sommermonate lassen den Rückschluss zu, dass durch einen Fehler eingetretene Feuchtigkeit in Zusammenspiel mit höheren Temperaturen innerhalb der Konstruktion eventuell wieder austrocknet. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Schafwoll-Dämmung im Foliendach, basierend auf der Wärmeleitfähigkeit, ist in **Tabelle 34** angeführt. Die Ergebnisse der Beurteilung des Holzes im Foliendach sind in **Tabelle 37** und **Tabelle 40** dargestellt.

Bei der Beurteilung des Kiesdachs lässt sich im Fall des äußeren Fehlers ein direkt von Beginn an eingeschwungener Zustand des Wassergehalts in der Dämmebene feststellen. Bei den beiden anderen Fehlerannahmen fällt der Verlauf während der Dauer der Simulation leicht ab. Generell ist beim Kiesdach festzuhalten, dass der Wassergehalt bei allen Fehlervarianten im Wesentlichen jenem der fehlerfreien Ausführung entspricht. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Schafwoll-Dämmung im Kiesdach, basierend auf der Wärmeleitfähigkeit, ist in **Tabelle 35** angeführt. Die Ergebnisse der Beurteilung des Holzes im Kiesdach sind in **Tabelle 38** und **Tabelle 42** dargestellt. Die Analyse des Gründachaufbaus zeigt einen Anstieg des Wassergehaltes bei allen Fehlerarten über alle Schichten hinweg. Speziell in der Schafwoll-Dämmung ist ein kontinuierlicher Anstieg des Wassergehalts während der gesamten Simulationsdauer zu beobachten. Auch in der Holzfaserdämmung nimmt der Feuchtegehalt bei allen Fehlern zu, wobei die höchsten Werte beim inneren Fehler sowie bei der Kombination aus innerem und äußerem Fehler festgestellt wurden. Im Fall der Schalung steigt der Wassergehalt ebenfalls bei allen Fehlern kontinuierlich an und erreicht innerhalb der drei Simulationsjahre die kritische Grenze der 20 M.-% Marke für Massivholz. Die Ergebnisse der Beurteilung des Holzes im Gründach sind in **Tabelle 39** und **Tabelle 41** dargestellt. Im direkten Vergleich zum Foliendach sind in der Dämmebene des Gründachs klar reduzierte Temperaturen zu erkennen, was mit der erhöhten Aufbaustärke durch die Substratschicht erklärbar ist. Zwar ist der Aufbau nach außen immer diffusionsoffener ausgebildet, jedoch kann eine Rücktrocknung durch das im Gründachaufbau gespeicherte Wasser reduziert werden. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Schafwoll-Dämmung im Gründach, basierend auf der Wärmeleitfähigkeit, ist in **Tabelle 36** angeführt.

**Tabelle 34:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Foliendach

Fehlstelle	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Fehler innen	Schafwolle	1,9 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Fehler außen		1,6 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Fehler innen & außen		1,7 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 35:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Kiesdach

Fehlstelle	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Fehler innen	Schafwolle	2,1 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Fehler außen		1,8 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Fehler innen & außen		1,7 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 36:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach

Fehlstelle	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Fehler innen	Schafwolle	2,1 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Fehler außen		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Fehler innen & außen		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 37:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Foliendach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Fehler innen	Holzschalung	13,6 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Fehler außen		15,8 M.-%		erfüllt	erfüllt
Fehler innen & außen		13,6 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 38:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Kiesdach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Fehler innen	Holzschalung	17,1 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Fehler außen		17,9 M.-%		erfüllt	erfüllt
Fehler innen & außen		17,1 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 39:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
Fehler innen	Holzschalung	19,4 M.-%	20 M.-%	erfüllt	nicht erfüllt
Fehler außen		19,0 M.-%		erfüllt	nicht erfüllt
Fehler innen & außen		19,4 M.-%		erfüllt	nicht erfüllt

**Tabelle 40:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Foliendach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
Fehler innen	Holzfaserdämmung	13,2 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Fehler außen		15,3 M.-%		erfüllt
Fehler innen & außen		13,2 M.-%		erfüllt

**Tabelle 41:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Kiesdach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
Fehler innen	Holzfaserdämmung	14,6 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Fehler außen		15,6 M.-%		erfüllt
Fehler innen & außen		14,6 M.-%		erfüllt

**Tabelle 42:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach

Fehlstelle	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
Fehler innen	Holzfaserdämmung	17,0 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Fehler außen		15,9 M.-%		erfüllt
Fehler innen & außen		16,0 M.-%		erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Verlust der Dämmleistung kommen wird.

Verglichen mit dem Grenzwert für Massivholz von 20 M.-%, kann die Holzfeuchte in Bezug auf die Tragfähigkeit in den Fällen Folien- und Kiesdach als nicht problematisch aufgefasst werden. Im Fall des Gründachs können aufgrund der hohen langfristigen Feuchtegehalte Schäden in der Schalung nicht ausgeschlossen werden. Damit ist der erste Nachweis in allen Fällen knapp erfüllt.

Die Diagramme der Porenluftfeuchte zeigen bei den Dachvarianten Folie und Kies einen Verlauf unterhalb der Grenzlinie. Hingegen wird beim Gründach sowohl beim äußeren und inneren Fehler die Grenzlinie berührt und bei der Kombination der beiden Fehler sogar leicht überschritten. Somit ist der zweite Nachweis vom Gründach nicht erfüllt und Probleme in Bezug auf holzerstörenden Pilzwachstum können nicht ausgeschlossen werden.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der Schafwoll-Dämmung für den Fehler innen in **Gleichung 14** angeführt.

$$8,4 \frac{kg}{m^3} * 0,01 m = 0,084 \frac{kg}{m^2} = 84 \frac{g}{m^2} < 200 \frac{g}{m^2} \quad (14)$$

Der Nachweis gilt damit als erbracht, es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

#### 4.6 Diskussion der Aufbauten mit ökologischen Dämmalternativen und angenommenen Fehlstellen

In der Analyse der Varianten mit angenommenen Fehlstellen sind klare Unterschiede der Dämmmaterialien im Umgang mit der zusätzlichen Feuchtigkeit im Bauteil erkennbar. Das Ergebnis des Gesamtwassergehalts der Konstruktionen im Fall der Massivbauweise mit Kork-Dämmung zeigt, dass der Verlauf weithin bei allen Dachvarianten ab dem ersten Jahr abfällt und sich somit in dem Bauteil während der Simulationsdauer kein Wasser ansammelt. Dadurch und im Zusammenhang mit den fallenden oder eingeschwungenen Wassergehalten in den einzelnen Schichten kann festgehalten werden, dass sowohl das Folien- als auch das Kiesdach trotz Fehlstellen als funktionsfähige Konstruktion eingeordnet werden kann. Wohingegen das Gründach in der Massivbauweise aufgrund des Anstiegs des Wassergehalts in der Dämmebene bei allen Fehlern einen gemäß der hier durchgeführten Simulation eingeschränkt funktionsfähigen Aufbau darstellt. Hierzu lassen sich wieder gut die reduzierten Temperaturen im Gründach aufgrund der helleren Dachoberfläche anmerken, wodurch die im Inneren der Konstruktion erreichten Temperaturen maßgeblich die Funktionsfähigkeit des Daches unterstützen. Die kritischste Variante im Zusammenwirken mit Fehlern stellt das Gründach dar, wobei aufgrund der Höhe des Wassergehalts in den einzelnen Schichten die Kombination aus innerer und äußerer Fehlstelle den maßgebenden Fall darstellt.

Der Gesamtwassergehalt im Fall der Rahmenbauweise zeigt, dass beim Folien- und Kiesdach der Wassergehalt ab dem ersten Jahr sinkt, wohingegen er beim Gründach tendenziell langsam, aber stetig zunimmt. Im Folien- und Kiesdach zeigt die weitere Auswertung in den einzelnen Schichten ebenfalls fallende und eingeschwungene Verläufe des Wassergehalts. Dadurch kann festgehalten

werden, dass diese beiden Dachvarianten trotz Fehlern als funktionsfähige Konstruktionen eingeordnet werden können. Wohingegen das Gründach aufgrund des Anstiegs des Gesamtwassergehalts und dem Anstieg des Wassergehalts über alle Schichten und bei allen Fehlern einen gemäß der hier durchgeführten Simulation nicht funktionsfähigen Aufbau darstellt. Neben der Dämmebene ist auch der Wassergehalt in der Schalung erhöht und erreicht die 20 M.-%-Grenze, wodurch Probleme mit holzzerstörenden Pilzen ebenfalls nicht mehr ausgeschlossen werden können. In den Aufbauten des Folien- und Kiesdaches der Rahmenbauweise können im Vergleich auch hier wieder höhere Temperaturen als im Gründach beobachtet werden. Die kritischste Variante im Zusammenwirken mit Fehlern stellt hier ebenfalls das Gründach dar, wobei aufgrund der Höhe des Wassergehalts in den einzelnen Schichten der Fehler in der inneren Dampfsperre und die Kombination der Fehler die maßgebenden Fälle darstellen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rahmenbauweise mit Schafwolle und Fehlstellen im direkten Vergleich zur Massivbauweise mit Korkdämmung und Fehlstellen als kritischer eingestuft werden kann.

#### 4.7 Auswertung Massiv- und Leichtbauweise mit Dämmalternative, mit und ohne Fehlstelle und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen

In folgendem Abschnitt des Analysekapitels liegt der Fokus auf weiteren Parameteränderungen der untersuchten Aufbauten. Aufgrund der festgelegten Anzahl an Simulationen werden aus dem vorherigen Unterkapitel nur die kritischsten Aufbauten aufgrund der jeweiligen Fehlerannahmen für die folgenden Analysen herangezogen. Als kritischster Aufbau wurde für das Gründach in Massivbauweise die Kombination aus innerem und äußerem Fehler und für die Rahmenbauweise der innere Fehler gewählt. In diesen Aufbauten werden nun verschiedene Abdichtungen und Folien variiert. Für die äußere Dachabdichtung stehen dabei eine Bitumenabdichtung mit einem  $s_d$ -Wert von 300 m und eine EPDM-Abdichtung mit einem  $s_d$ -Wert von 70 m zur Auswahl. Im Fall der inneren Folie werden eine feuchtevariable Dampfbremse mit einem feuchteabhängigen  $s_d$ -Wert von 0,8 m-60 m, eine Dampfbremse mit  $s_d$ -Wert von 100 m und 200 m und für die Leichtbauweise eine OSB Platte mit einem  $s_d$ -Wert von ungefähr 3 m als innerer Abschluss gewählt. Aufgrund der im Vergleich zu den anderen Dämmstoffen höheren Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl der Korkdämmung wird zusätzlich die Variante des Aufbaus ohne Dampfbremse untersucht. Ziel ist es, eine sichere Aufbauvariante im Sinne von einem eingeschwungenen oder fallenden Gesamtwassergehalt und geringe Wassergehalte in den einzelnen Schichten zu erhalten.

##### 4.7.1 Massivbauweise mit Kork-Dämmung, mit und ohne Fehlstelle und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen

Die Untersuchung der Massivbauweise mit Kork-Dämmung und Betrachtung einer Kombination aus innerem und äußerem Fehler startet mit der Feststellung des Gesamtwassergehalts der Konstruktion. Das Ergebnis zeigt, dass der Verlauf bei der Bitumen- als auch bei der EPDM-Dachabdichtung bei allen inneren Abschlüssen ab dem ersten Jahr abfällt und sich somit in beiden Fällen in dem Bauteil während der Simulationsdauer kein Wasser ansammelt, siehe

##### **Abbildung 38 - Abbildung 44.**

Bei der Analyse der einzelnen Schichten des Gründachs ist ersichtlich, dass die Verläufe des Wassergehalts nicht bei allen Varianten in einem fallenden oder eingeschwungenen Zustand sind. Die Verläufe bei Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung sind sehr ähnlich. Beginnend bei der Dämmebene sind die Verläufe beim inneren Abschluss mit  $s_d$ -Wert 100 m- und 200 m generell ansteigend, wobei beim Abschluss mit feuchtevariabler oder ohne Dampfbremse zu Beginn ein Anstieg stattfindet, bevor ein eingeschwungener Zustand mit jedoch leicht erhöhten Werten gegenüber den anderen inneren Abschlüssen erreicht wird. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Kork-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit ist mit der Bitumen-Dachabdichtung in **Tabelle 44** und mit der EPDM Dachabdichtung in **Tabelle 46** angeführt.

In der Schicht der Massivholzdecke lassen sich bei allen inneren Abschlüssen fallende Wassergehalte verzeichnen. Im Vergleich zu den anderen inneren Abschlüssen können beim inneren Abschluss mit feuchtevariabler Dampfbremse leicht geringere Wassergehalte im Holz beobachtet werden. Die Massivholzdecke wird mit Hilfe von zwei Nachweisen bewertet. Die Ergebnisse der

beiden Nachweiswege für das Holz sind mit Bitumen Dachabdichtung in **Tabelle 48** und mit EPDM Dachabdichtung in **Tabelle 50** dargestellt.

Für Gründächer mit Kork-Dämmung mit einer Kombination aus innerem und äußerem Fehler erweisen sich Bitumen- und EPDM-Dachabdichtungen in Kombination mit einer feuchtevariable Dampfbremse als optimale Ausführung.

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen bestätigen, dass das Gründach mit Kork-Dämmung und der Kombination aus innerem und äußerem Fehler und einer Bitumen- oder EPDM Dachabdichtung in Verbindung mit einer feuchtevariablen Dampfbremse, eine funktionstüchtige Konstruktion darstellt. Daher wird hier nur kurz auf die fehlerfreie Variante eingegangen. Das Ergebnis des Gesamtwassergehalts der Konstruktion zeigt sowohl mit Bitumen- als auch mit EPDM Dachabdichtung einen fallenden Verlauf. Bei der Analyse der einzelnen Schichten ist der Verlauf des Wassergehalts in der Dämmebene mit Bitumen Dachabdichtung beim 100 m- und 200 m-Abschluss generell ansteigend, während beim Abschluss mit feuchtevariabler oder ohne Dampfbremse zu Beginn ein Anstieg stattfindet, bevor ein eingeschwungener Zustand erreicht wird. Im direkten Vergleich der Konstruktion mit EPDM Dachabdichtung ist bei allen inneren Abschlüssen, ein über die Simulationsdauer ansteigender Verlauf des Wassergehalts in der Dämmebene ersichtlich. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Kork-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit ist für die Bitumen-Dachabdichtung in **Tabelle 43** und für die EPDM Dachabdichtung in **Tabelle 45** angeführt.

In der Schicht der Massivholzdecke lassen sich bei allen inneren Abschlüssen fallende Wassergehalte verzeichnen. Die Massivholzdecke wird mit Hilfe von zwei Nachweisen bewertet. Die Ergebnisse der beiden Nachweiswege für das Holz sind mit Bitumen Dachabdichtung in **Tabelle 47** und mit EPDM Dachabdichtung in **Tabelle 49** dargestellt.

Als Erkenntnis für die Gründachvariante ohne Fehlstelle lässt sich festhalten, dass ein Gründach mit Bitumen Dachabdichtung, kombiniert mit dem inneren Abschluss einer feuchtevariablen Dampfbremse oder ohne Dampfbremse, als optimale Konstruktionslösung ermittelt wurde.

**Tabelle 43:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
ohne Dampfbremse	Kork	5,2 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
Feuchtevariabler Dampfbremse		5,4 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Dampfbremse mit sd-Wert 100m		4,3 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Dampfbremse mit sd-Wert 200m		5,0 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 44:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork beim Gründach, mit innerem und äußerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
ohne Dampfbremse	Kork	5,5 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
Feuchtevariabler Dampfbremse		5,4 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Dampfbremse mit sd-Wert 100m		4,7 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Dampfbremse mit sd-Wert 200m		4,6 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 45:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
ohne Dampfbremse	Kork	6,4 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
Feuchtevariabler Dampfbremse		6,4 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Dampfbremse mit sd-Wert 100m		4,7 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Dampfbremse mit sd-Wert 200m		4,5 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 46:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork beim Gründach, mit innerem und äußerem Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
ohne Dampfbremse	Kork	5,5 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
Feuchtevariabler Dampfbremse		5,4 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Dampfbremse mit sd-Wert 100m		4,8 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg
Dampfbremse mit sd-Wert 200m		4,7 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 47:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
ohne Dampfbremse	Massivholzdecke	11,4 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		11,1 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit sd-Wert 100m		11,7 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit sd-Wert 200m		11,7 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 48:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes beim Gründach, mit innerem und äußerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
ohne Dampfbremse	Massivholzdecke	11,0 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		11,0 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit sd-Wert 100m		11,4 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit sd-Wert 200m		11,5 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 49:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
ohne Dampfbremse	Massivholzdecke	11,1 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		11,0 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit sd-Wert 100m		11,4 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit sd-Wert 200m		11,4 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 50:** Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes beim Gründach, mit innerem und äußerem Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
ohne Dampfbremse	Massivholzdecke	M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		10,9 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit sd-Wert 100m		11,3 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit sd-Wert 200m		11,3 M.-%		erfüllt	erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Verlust der Dämmleistung sowie zu keinen Problemen mit der Tragfähigkeit oder holzzerstörendem Pilzwachstum kommen wird.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der Kork-Dämmung, mit der Kombination aus innerem und äußerem Fehler mit Bitumen-Dachabdichtung in **Gleichung 15** und mit EPD-Dachabdichtung in **Gleichung 16** angeführt.

$$11,4 \frac{kg}{m^3} * 0,01 m = 0,114 \frac{kg}{m^2} = 114 \frac{g}{m^2} < 200 \frac{g}{m^2} \quad (15)$$

$$14,1 \frac{kg}{m^3} * 0,01 m = 0,141 \frac{kg}{m^2} = 141 \frac{g}{m^2} < 200 \frac{g}{m^2} \quad (16)$$

Der Nachweis gilt damit als erbracht, es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

#### 4.7.2 Leichtbauweise mit Schafwoll Dämmung, mit und ohne Fehlstelle und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen

Die Untersuchung der Leichtbauweise mit Schafwoll-Dämmung und Betrachtung eines inneren Fehlers startet mit der Feststellung des Gesamtwassergehalts der Konstruktion. Das Ergebnis zeigt, dass der Verlauf bei der Bitumen- als auch bei der EPDM-Dachabdichtung im Zusammenspiel einer feuchtevariablen Dampfbremse eingeschwungen ist, siehe **Abbildung 46 – Abbildung 55**. Bei der Analyse der Dämmebene kann ebenfalls bei der feuchtevariablen Dampfbremse ein eingeschwungener Zustand des Wassergehalts festgestellt werden. Beim Verlauf des Wassergehalts in der Schafwolle sowohl mit Bitumen- als auch EPDM Dachabdichtung sind die höchsten Werte bei dem inneren Abschluss mit der OSB Platte zu verzeichnen. Die Ergebnisse der Beurteilung der Dämmeigenschaften der Schafwoll-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit ist mit der Bitumen-Dachabdichtung in **Tabelle 52** und mit der EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 54** angeführt.

In den Schichten der Holzschalung als auch der Holzfaserdämmung lassen sich ähnlich der Dämmschicht ein eingeschwungener Zustand des Wassergehalts feststellen. Die Ergebnisse des Nachweises der Holzschalung sind mit Bitumen Dachabdichtung in **Tabelle 56** und mit EPDM-

Dachabdichtung in **Tabelle 58** dargestellt. Die Ergebnisse des Nachweises der Holzfaserdämmung sind mit Bitumen Dachabdichtung in **Tabelle 60** und mit EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 62** dargestellt.

Für Gründächer mit Schafwoll-Dämmung mit innerem Fehler erweisen sich Bitumen- und EPDM-Dachabdichtungen in Kombination mit feuchtvariabler Dampfbremse als optimale Ausführung. Im Vergleich dazu zeigt das Ergebnis des Gesamtwassergehalts der fehlerfreien Konstruktion bei der Variante mit Bitumen- Dachabdichtung beim inneren Abschluss mit einem  $s_d$ -Wert von 100 m oder 200 m einen von Beginn an eingeschwungenen und beim inneren Abschluss mit einer feuchtevariablen Dampfbremse oder einer OSB Platte einen ansteigenden Verlauf. Der Gesamtwasser- verlauf der Variante mit EPDM Dachabdichtung zeigt beim inneren Abschluss mit einem  $s_d$ -Wert von 100 m oder 200 m oder der feuchtevariablen Dampfbremse einen von Beginn an einge- schwungenen und beim inneren Abschluss mit der OSB Platte einen ansteigenden Verlauf.

Bei der Analyse der einzelnen Schichten ist beim Verlauf des Wassergehalts in der Dämmebene und den Holzschichten mit Bitumen- als auch EPDM- Dachabdichtung nur beim inneren Abschluss mit OSB Platte ein Anstieg zu verzeichnen. Der Verlauf des Wassergehalts in der Schafwolle ist beim inneren Abschluss mit den  $s_d$ -Werten 100 m, 200 m und der feuchtevariablen Dampfbremse generell in einem eingeschwungenen Zustand. Die Ergebnisse der Beurteilung der Dämmeigen- schaften der Schafwoll-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit ist mit der Bitumen-Dachab- dichtung in **Tabelle 51** und mit der EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 53** angeführt. Die Ergeb- nisse des Nachweises der Holzschalung sind mit Bitumen Dachabdichtung in **Tabelle 55** und mit EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 57** dargestellt. Die Ergebnisse des Nachweises der Holzfaserdämmung sind mit Bitumen Dachabdichtung in **Tabelle 59** und mit EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 61** dargestellt.

Als Erkenntnis für die Gründachvariante ohne Fehlstelle lässt sich festhalten, dass ein Gründach mit Bitumen Dachabdichtung, kombiniert mit einem inneren Abschluss mit einem  $s_d$ -Wert von 100 m oder 200 m, als optimale Konstruktionslösung ermittelt wurde. Im Fall der EPDM Dachab- dichtung stellt der innere Abschluss mit einem  $s_d$ -Wert von 200 m oder einer feuchtevariablen Dampfbremse eine optimale Konstruktionslösung dar.

**Tabelle 51:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaf- ten
OSB- Platte	Schafwolle	2,0 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Feuchtevariable Dampfbremse		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 100m		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 200m		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 52:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach, mit inne- rem Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaf- ten
OSB- Platte	Schafwolle	2,0 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Feuchtevariable Dampfbremse		2,0 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 100m		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 200m		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 53:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
OSB- Platte	Schafwolle	2,0 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Feuchtevariable Dampfbremse		2,0 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Dampfbremse mit s <sub>d</sub> -Wert 100m		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Dampfbremse mit s <sub>d</sub> -Wert 200m		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 54:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach, mit innerem Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
OSB- Platte	Schafwolle	2,0 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>	konstant
Feuchtevariable Dampfbremse		2,0 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Dampfbremse mit s <sub>d</sub> -Wert 100m		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant
Dampfbremse mit s <sub>d</sub> -Wert 200m		2,1 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 55:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
OSB- Platte	Holzschalung	19,8 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
Feuchtevariable Dampfbremse		18,4 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit s <sub>d</sub> -Wert 100m		18,4 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit s <sub>d</sub> -Wert 200m		18,4 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 56:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
OSB- Platte	Holzschalung	20,0 M.-%	20 M.-%	nicht erfüllt	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		19,1 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit s <sub>d</sub> -Wert 100m		19,1 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit s <sub>d</sub> -Wert 200m		19,0 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 57:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
OSB- Platte	Holzschalung	20,0 M.-%	20 M.-%	nicht erfüllt	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		18,5 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 100m		18,5 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 200m		18,5 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 58:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach, mit innerem Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2	Nachweis WTA 6-8
OSB- Platte	Holzschalung	20,0 M.-%	20 M.-%	nicht erfüllt	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		19,1 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 100m		19,1 M.-%		erfüllt	erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 200m		19,1 M.-%		erfüllt	erfüllt

**Tabelle 59:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
OSB- Platte	Holzfaserdämmung	17,0 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		15,4 M.-%		erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 100m		15,5M.-%		erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 200m		15,8M.-%		erfüllt

**Tabelle 60:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
OSB- Platte	Holzfaserdämmung	17,0 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		15,7 M.-%		erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 100m		15,7 M.-%		erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 200m		15,9M.-%		erfüllt

**Tabelle 61:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
OSB- Platte	Holzfaserdämmung	16,5 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		15,3 M.-%		erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 100m		15,8 M.-%		erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 200m		15,6 M.-%		erfüllt

**Tabelle 62:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach, mit innerem Fehler und EPDM Dachabdichtung

Abschluss	Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
OSB- Platte	Holzfaserdämmung	16,7 M.-%	18 M.-%	erfüllt
Feuchtevariabler Dampfbremse		15,7 M.-%		erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 100m		15,7 M.-%		erfüllt
Dampfbremse mit $s_d$ -Wert 200m		15,9 M.-%		erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinem Verlust der Dämmleistung sowie zu keinen Problemen mit der Tragfähigkeit noch mit holzzerstörendem Pilzwachstum kommen wird.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der Schafwoll-Dämmung mit innerem Fehler, feuchtevariabler Dampfbremse und Bitumen-Dachabdichtung in **Gleichung 17** und mit EPDM-Dachabdichtung in **Gleichung 18** angeführt.

$$2,0 \frac{kg}{m^3} * 0,01 m = 0,020 \frac{kg}{m^2} = 20 \frac{g}{m^2} < 200 \frac{g}{m^2} \quad (17)$$

$$2,0 \frac{kg}{m^3} * 0,01 m = 0,020 \frac{kg}{m^2} = 20 \frac{g}{m^2} < 200 \frac{g}{m^2} \quad (18)$$

Der Nachweis gilt damit als erbracht, es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

#### 4.8 Diskussion der der Aufbauten mit ökologischen Dämmalternativen, mit und ohne angenommene Fehlstellen und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen

In der Analyse der Varianten mit und ohne angenommene Fehlstellen und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen sind klare Unterschiede der Dämmmaterialien im Umgang mit der zusätzlichen Feuchtigkeit im Bauteil erkennbar. Das Ergebnis des Gesamtwassergehalts des Gründaches mit Kork-Dämmung und innerem und äußerem Fehler zeigt, dass der Verlauf weit hin ab dem ersten Jahr abfällt und sich somit in dem Bauteil während der Simulationsdauer kein Wasser ansammelt. Der Wassergehalt in der Kork-Dämmung der Massivbauweise mit Bitumen und EPDM-Dachabdichtung erreicht nur bei der feuchtevariablen Dampfbremse, nach einem anfänglichen Anstieg einen eingeschwungenen Zustand.

Die Massivholzdecke im Fall der feuchtevariablen Dampfbremse mit Fehlerannahme zeigt einen fallenden Verlauf des Wassergehalts und geringere Wassergehalte im Vergleich zur dichteren Variante mit Fehlstelle. Die Beurteilung der Rahmenbauweise zeigt bei der Variante mit innerer Fehlstelle, Bitumen-Dachabdichtung und feuchtevariablen Dampfbremse einen eingeschwungenen Zustand des Gesamtwassergehalts der Konstruktion. Der Gesamtwassergehalt der

Leichtbauweise lässt bei allen weiteren inneren Abschlüssen einen ansteigenden Verlauf erkennen und lässt die Schlussfolgerung zu, dass es sich hierbei um nicht funktionsfähige Aufbauten handelt. Im Fall der EPDM-Dachabdichtung konnte ebenfalls mit der feuchtevariablen Dampfbremse ein eingeschwungener Zustand sowohl des Gesamtwassergehalts als auch der einzelnen Schichten beobachtet werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass hier mit den „weniger dichten“ inneren Abschlüssen bessere Ergebnisse erzielt werden konnten.

#### 4.9 Auswertung Leichtbauweise mit weiteren Dämmalternative, mit innerer Fehlstelle, Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung und feuchtevariabler Dampfbremse

In folgendem Abschnitt des Analysekapitels liegt der Fokus auf zusätzlichen ökologischen Dämmalternativen, um die untersuchten Aufbauten weitergehend zu beurteilen. Da im Fall der Massivbauweise die alternativen druckfesten Dämmalternativen in WUFI nicht gefunden wurden, werden im Folgenden die Dämmalternativen der Leichtbauweise analysiert. Hierfür wird die vermeintlich optimale Ausführungsvariante der Leichtbauweise herangezogen und mit Flachs- und Zellulose-Dämmung simuliert, um die Funktionsfähigkeit des Aufbaus unter Beweis zu stellen.

##### 4.9.1 Leichtbauweise mit Flachs- und Zellulose-Dämmung, innerer Fehlstelle, Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung und feuchtevariabler Dampfbremse

Die Beurteilung der Leichtbauweise mit Flachs- und Zellulose-Dämmung startet mit dem Gesamtwassergehalt. Im Zuge der Analyse lässt sich feststellen, dass sich der Verlauf direkt in einem eingeschwungenen Zustand befindet. Im Bauteil wird somit während der Simulationsdauer kein Wasser angesammelt, siehe **Abbildung 56 - Abbildung 75**.

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Schichten beurteilt. Hinsichtlich der Kombination aus Flachs- und Zellulose-Dämmung mit Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung lässt sich sagen, dass ein von Beginn an eingeschwungener Zustand erreicht wird. Im Fall der Holzschalung mit EPDM-Dachabdichtung kann ein klarer Anstieg des Wassergehalts über die Simulationsdauer beobachtet werden, wobei auch der Grenzwert von 20 M.-% überschritten wird. Im Vergleich dazu ist bei der Bitumen-Dachabdichtung kein Problem bei der Holzschalung und Holzfaserdämmung erkennbar. Damit kann festgehalten werden, dass die Dämmalternativen Flachs und Zellulose in Kombination mit einer Bitumen-Dachabdichtung und einer feuchtevariablen Dampfbremse mit Fehlstelle eine optimale Konstruktionslösung darstellen und fehlertolerant sind. Die Beurteilung der Dämmeigenschaften der Flachs-Dämmung anhand der Wärmeleitfähigkeit sind in **Tabelle 63** und der Zellulose-Dämmung in **Tabelle 64** angeführt. Die Ergebnisse des Nachweises der Holzschalung sind mit für Flachs mit Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 65** und für Zellulose mit Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 66** dargestellt. Die Ergebnisse des Nachweises der Holzfaserdämmung sind für Flachs mit Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 67** und für Zellulose mit Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung in **Tabelle 68** dargestellt.

**Tabelle 63:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Flachs beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung

Abschluss		Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Feuchtevariable Dampfbremse	Bitumen	Flachs	4,7 kg/m <sup>3</sup>	0 kg/m <sup>3</sup>	gfg. Anstieg
	EPDM		4,7 kg/m <sup>3</sup>		gfg. Anstieg

**Tabelle 64:** Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Zellulose beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung

Abschluss		Dämmung	Ergebniswert	Referenzwert	Dämmeigenschaften
Feuchtevariable Dampfbremse	Bitumen	Zellulose	7,3 kg/m <sup>3</sup>	20 kg/m <sup>3</sup>	konstant
	EPDM		7,3 kg/m <sup>3</sup>		konstant

**Tabelle 65:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung bei Flachs-Dämmung, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung

Abschluss		Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B	Nachweis WTA 6-8
Feuchtevariabler Dampfbremse	Bitumen	Holzschalung	18,3 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
	EPDM		20,3 M.-%		nicht erfüllt	nicht erfüllt

**Tabelle 66:** Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung bei Zellulose-Dämmung, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung

Abschluss		Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B	Nachweis WTA 6-8
Feuchtevariabler Dampfbremse	Bitumen	Holzschalung	18,4 M.-%	20 M.-%	erfüllt	erfüllt
	EPDM		21,0 M.-%		nicht erfüllt	nicht erfüllt

**Tabelle 67:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung bei Flachs-Dämmung, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM Dachabdichtung

Abschluss		Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
Feuchtevariabler Dampfbremse	Bitumen	Holzfaserdämmung	16,5 M.-%	18 M.-%	erfüllt
	EPDM		16,5 M.-%		erfüllt

**Tabelle 68:** Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung bei Zellulose-Dämmung, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM Dachabdichtung

Abschluss		Holzwerkstoff	Ergebniswert	Grenzwert	Nachweis ÖNORM B 3802-2
Feuchtevariabler Dampfbremse	Bitumen	Holzfaserdämmung	17,0 M.-%	18 M.-%	erfüllt
	EPDM		17,0 M.-%		erfüllt

Alle Nachweise sind damit abgeschlossen und es kann davon ausgegangen werden, dass es im Fall der Flachs-Dämmung zu einer geringfügigen Verschlechterung der Dämmleistung kommt. Für die Zellulose-Dämmung kommt es zu keinem Verlust der Dämmleistung. Weiters kommt es zu keinen Problemen mit der Tragfähigkeit oder mit holzerstörendem Pilzwachstum.

Abschließend ist das Ergebnis des vereinfachten Nachweises des Tauwasserrisikos der Flachs-Dämmung mit Bitumen-Dachabdichtung in **Gleichung 19**, mit EPDM-Dachabdichtung in **Gleichung 20** und für die Zellulose-Dämmung mit Bitumen-Dachabdichtung in **Gleichung 21** und mit EPDM-Dachabdichtung in **Gleichung 22** angeführt.

$$4,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,049 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 49 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (19)$$

$$4,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,049 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 49 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (20)$$

$$7,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,076 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 76 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (21)$$

$$7,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,01 \text{ m} = 0,076 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 76 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} < 200 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} \quad (22)$$

Der Nachweis gilt damit als erbracht. Es sollte in diesen Fällen zu keinem Tauwasserrisiko kommen.

Im Anschluss an die detaillierte Auswertung der erzielten Ergebnisse in Bezug auf das hygrothermische Verhalten von Flachdächern aus Holz, bietet das folgende Kapitel nun eine umfassende Gegenüberstellung dieser Resultate mit den Erkenntnissen aus fach einschlägiger Fachliteratur. Ein solcher Vergleich erlaubt es nicht nur die vorliegenden Ergebnisse in einen breiteren wissenschaftlichen Kontext einzuordnen, sondern auch deren Bedeutung und Zuverlässigkeit zu bewerten. Dabei werden sowohl Übereinstimmungen als auch Abweichungen zu den Resultaten anderer Studien beleuchtet, um ein besseres Verständnis für das Verhalten der Flachdachkonstruktionen mit ökologischer Dämmstoffen zu entwickeln.

## 5 Diskussion der Ergebnisse

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich auf unterschiedliche Aspekte der Aufbauten und betreffen das Temperaturverhalten innerhalb der Konstruktion, die unterschiedlichen Wassergehalte im Inneren des Aufbaus, die Anordnung der Abdichtungen und Dampfbremsen und die Fehlstellenannahme.

In Bezug auf das Temperaturverhalten innerhalb der Konstruktion, konnte festgestellt werden, dass die Färbung der Dachoberfläche und die Nähe der Dämmung zur Außenluft das Verhalten und die Funktionstüchtigkeit des Aufbaus maßgeblich beeinflussen.

So hat sich gezeigt, dass die geringsten Wassergehalte in der Dämmebene beim Foliendach zu finden sind, was auf die höheren Temperaturen aufgrund der direkten Nähe zur Außenluft zurückzuführen ist. Dies lässt sich gut mit der Färbung der Dachoberfläche erklären, da die dunkle Farbe der Dachabdichtung mehr Strahlung absorbieren kann als eine hellere Dachoberfläche. Die höchsten Wassergehalte sind demnach in der Dämmung des Gründachs zu beobachten, da hier aufgrund der höheren Aufbaustärke durch das Substrat und der helleren Dachoberfläche durch den Pflanzenbewuchs, deutlich reduzierte Temperaturen zu beobachten sind. Diese Erkenntnis findet sich ebenfalls in einigen Forschungsberichten und wird auch mit Feldversuchen bestätigt [51, 52, 53, 54].

Zu dem Vergleich der Wassergehalte in einem nicht hinterlüfteten Flachdach aus Holz mit herkömmlicher Dämmung, wie Mineralwolle und EPS und einer Flachdachkonstruktion mit ökologischen Dämmalternativen, wie Kork und Schafwolle konnte in der Fachliteratur ein Vergleich zwischen Mineralwolle und Zellulose-Dämmung gefunden werden [54]. Darin wird ein höherer Wassergehalt in der Konstruktion mit Zellulose-Dämmung bestätigt.

Die optimale Anordnung der Dampfbremse und der Dachabdichtung für die hier untersuchten Aufbauten wurde in Kapitel 4.7 analysiert. Hierbei waren klare Unterschiede der Dämmmaterialien im Umgang mit der zusätzlichen Feuchtigkeit im Bauteil erkennbar. Der Wassergehalt in der Kork-Dämmung der Massivbauweise mit Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung und innerem und äußerem Fehler erreicht nur bei der feuchtevariablen Dampfbremse, nach einem anfänglichen Anstieg einen eingeschwungenen Zustand. Die Beurteilung der Rahmenbauweise bei der Variante mit innerer Fehlstelle, Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung und feuchtevariabler Dampfbremse zeigte ähnliche Resultate, einen eingeschwungenen Zustand des Gesamtwassergehalts der Konstruktion.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass hier mit den „weniger dichten“ inneren Abschlüssen bessere Ergebnisse erzielt werden konnten. Mit der gewählten Abdichtung und Dampfbremse muss sichergestellt werden, dass vorhandene und zusätzlich eingedrungene Feuchtigkeit wieder austrocknen kann. Als Ergebnis der Simulationen kann festgehalten werden, dass eine feuchtevariable Dampfbremse als innerer Abschluss zu empfehlen ist, da sie eine ausreichende Austrocknung unterstützt. Diese Erkenntnis wird auch in [52] unterstrichen. In Zusammenhang mit einem nicht hinterlüfteten Flachdach aus Holz und einer dichteren äußeren Dachabdichtung als innen wird auch in [55] diese Erkenntnis gewonnen.

Das die Untersuchung des Gründachs die kritischste Variante darstellt und die Verwendung einer feuchtevariablen Dampfbremse als innere diffusionshemmende Schicht die hygrische Situation im unbelüfteten Flachdach aus Holz, wird auch hier unterstrichen.

Bei Abdichtungsarbeiten eines Daches besteht die Möglichkeit von Fehlern, die Vernachlässigung dieser führt bei der hygrothermischen Simulation zu verfälschten Resultaten, da die im Programm angenommene optimalen Situationen nicht der Realität entsprechen. Im Rahmen der Arbeit wurden durch die Berücksichtigung von angenommenen Fehlstellen realitätsnahe Situationen simuliert. Erst durch die Annahme von Unsicherheiten gewinnen die Ergebnisse aus Simulationsprogrammen an Relevanz. Auf diese Erkenntnis wird auch in [36] hingewiesen.

## 6 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurden aufgrund der geringen Fehlertoleranz und der daraus folgenden Frage in Bezug auf die Dauerhaftigkeit nicht hinterlüfteter Flachdachkonstruktionen, Aufbauten für den mehrgeschossigen Neubau erstellt, um Erkenntnisse im Rahmen der Anwendung von nicht hinterlüfteten und ökologisch gedämmten Flachdachkonstruktionen aus Holz zu gewinnen.

Ziel der Arbeit war es, durch Parameteränderungen und eine festgelegte Anzahl an Simulationen den Einfluss der ökologischen Dämmung im nicht hinterlüfteten Dach in Holzbauweise einzuschätzen.

Begonnen wurde mit der Simulation der Referenzaufbauten, für die herkömmliche Dämmvarianten gewählt werden, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen und eine Ausgangslage für die Abschätzung des Einflusses der ökologischen Dämmung zu bekommen.

In Kapitel 1.2 wurden Forschungsfragen formuliert, welche hier nun mit der Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den verschiedenen Simulationsvarianten beantwortet werden.

In Bezug auf Fragestellung 1 hat sich gezeigt, dass die in Aufbauten mit ökologischen Dämmstoffen höhere Feuchtelast nicht zwangsweise zu Verhaltensänderungen innerhalb der Konstruktion führt. Jedoch sollten Massivholz und Holzwerkstoffe in Kombination mit einem Holzdach kritischer bewertet werden. Da die hier gewählten ökologischen Dämmmaterialien im Vergleich zur herkömmlichen Dämmung wie EPS und Mineralwolle mehr Feuchtigkeit speichern können. Im direkten Kontakt muss das Holz geschützt werden, da der längerfristige Kontakt mit erhöhter Feuchtigkeit zu Problemen der Tragfähigkeit oder holzerstörenden Pilzwachstum führen kann.

Bei der Untersuchung der Fragestellung 2 zeigte sich, dass Kork- und Schafwoll-Dämmungen über alle Simulationen hinweg einen höheren Wassergehalt aufwiesen als konventionelle Dämmmaterialien und das trotz der niedrigeren initialen Feuchtigkeitswerte der ökologischen Dämmstoffe.

Zu Fragestellung 3 kann zusammengefasst werden, dass aufgrund der höheren Feuchtigkeit in Zusammenhang mit den ökologischen Dämmungen im nicht hinterlüfteten Flachdach eine kritischere Betrachtung zu empfehlen ist. Mit der gewählten Abdichtung und Dampfbremse muss sichergestellt werden, dass vorhandene und zusätzlich eingedrungene Feuchtigkeit wieder austrocknen kann. Als Ergebnis der Simulationen kann festgehalten werden, dass eine feuchtevariable Dampfbremse als innerer Abschluss zu empfehlen ist, da sie eine ausreichende Austrocknung unterstützt. Im Zusammenhang mit der Flachdachkonstruktion aus Holz gilt, dass eine kritischere Betrachtung beim Holz ebenfalls empfehlenswert ist, da es bei längerfristigem direktem Kontakt mit erhöhten Wassergehalten zu Schäden kommen kann.

Zu Fragestellung 4 hatten die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Aufbauten im Zusammenhang mit den ökologischen Dämmalternativen keine Probleme mit Tauwasser. Das Gründach stellt ab den Simulationen mit Fehlstellen keine funktionsfähige Konstruktion mehr dar, da der Wassergehalt in der Gesamtkonstruktion und in allen Schichten ansteigt. Jedoch kann kein Zusammenhang dieser Probleme mit Tauwasser oder übermäßiger Regenbelastung festgestellt werden.

Zu Fragestellung 5 ließ sich durch die Simulationen feststellen, dass die ökologischen Dämmstoffe aufgrund ihrer Fähigkeit zur Feuchteaufnahme, -speicherung und -abgabe eine Tendenz zum besseren Umgang mit erhöhten Feuchtelasten in der Konstruktion aufweisen.

In Bezug auf Fragestellung 6 hat sich gezeigt, dass die Farbe der Dachoberfläche großen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Dachkonstruktion hat. Aufgrund einer dunklen Farbe der Dachoberfläche kann mehr Strahlung absorbiert werden, wodurch höhere Temperaturen in den Aufbauten beobachtet werden konnten. Beim Foliendach konnten die höchsten Temperaturen festgestellt werden und dadurch im Großen und Ganzen auch die geringsten Wassergehalte in der Dämmung. Im Vergleich dazu stellte das Gründach in nahezu jeder Ausführung die kritischste Variante dar. Dies lässt sich mit der erhöhten Aufbaustärke und der helleren Dachoberfläche aufgrund der Bepflanzung am Dach erklären. Es kann festgehalten werden, dass die Färbung der

Dachoberfläche einen maßgebenden Parameter bei der Funktionsfähigkeit des nicht hinterlüfteten Flachdaches aus Holz darstellt.

Abschließend kann gesagt werden, dass trotz erhöhter Feuchtigkeit in der Konstruktion bei ökologischen Dämmmaterialien funktionierende Aufbauten in Kombination mit nicht hinterlüfteten Flachdachkonstruktionen aus Holz mit feuchtevariabler Dampfbremsen erreicht werden können. Im Vergleich zu dichteren Dachaufbauten kann durch die feuchtevariable Dampfbremse das Austrocknen übermäßige Feuchtigkeit unterstützt werden und weiterführenden Schäden so verhindert werden.

Darüber hinaus konnten alle zu Beginn definierten Fragestellungen dieser Arbeit beantwortet werden, jedoch kann die Analyse des Einflusses von ökologischer Dämmalternativen auf nicht hinterlüftete Flachdachkonstruktionen aus Holz noch weiter ausgebaut werden. So beschränken sich die Ergebnisse dieser Arbeit auf ausgewählten Konstruktionslösungen mit zuvor definierten Dämmmaterialien. In Hinblick auf den Aufbau gibt es noch weitere Varianten, die untersucht werden können, um ein noch breiteres Anwendungsgebiet abzudecken. Zudem gibt es in Folge auch kritische Anschlussstellen des Daches, die einer genaueren hygrothermischen Simulation unterzogen werden können. In Bezug auf die Klimarandbedingungen wurde in dieser Arbeit nur ein vordefiniertes Klima für Wien herangezogen, dieses stellt meist eine Vereinfachung der realen Klimabedingungen dar und bildet somit nicht die realen Bedingungen ab. Standortbezogene Einflüsse werden somit vernachlässigt.

Neben den bereits existierenden Arbeiten zu ähnlichen Themenbereichen der hygrothermischen Simulation, wie sie in Kapitel 5 bildet diese Arbeit eine mit den hier ausgearbeiteten und untersuchten Aufbauten eine Grundlage im Bereich der nicht hinterlüfteten Flachdachkonstruktion aus Holz mit ökologischer Dämmung und soll für weiterführende Detailuntersuchungen herangezogen werden. Die Methode der Modellbildung in WUFI wurde in dieser Arbeit nur für einen speziellen Fall ermittelt und könnte für unterschiedliche Ausführungsvarianten weitergeführt werden.

Zu den Ergebnissen in dieser Arbeit wird noch festgehalten, dass bei den Simulationen mit dem Programm WUFI, Unsicherheiten berücksichtigt wurden, systematische Fehler jedoch nicht ausgeschlossen werden können. Für die Bestätigung der im Rahmen der Simulation erhaltenen Ergebnissen wird daher eine Feldstudie oder die Überprüfung mit einem weiteren Simulationsprogramm empfohlen.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] J. Bachinger, Dissertation: Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau, Wien: TU Wien, 2010.
- [2] H. Künzel, „Neue Normung beim Feuchteschutz fördert nachwachsende Bau- und Dämmstoffe,“ 10. Holzbau Spezial Bauphysik & Gebäudetechnik, 2019.
- [3] D. Schmidt und D. Kehl, „Flachdächer in Holzbauweise,“ Informationsdienst Holz, Berlin, 2019.
- [4] C. von Büren, „Wettstreit der Baustoffe,“ in *Funktion & Form*, Basel, Springer Basel AG, 1985, pp. 26-39.
- [5] I. Baciú, N. Taranu, D. Isopescu, M. Lupu, T. Dragan und S. Maxineasa, „IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 789012001: Green roofs - modern solutions for greening buildings,“ IOP Publishing, Iasi, 2020.
- [6] Grün statt Grau - Verband für Bauwerksbegrünung, „Grundlagen der Dachbegrünung,“ Wien, 2016.
- [7] W. Ansel, R. Appl, F. Betzler und M. Köhler, Handbuch - Bauwerksbegrünung, Planung-Konstruktion-Ausführung, Köln: Rudolf Müller Verlag, 2012.
- [8] S. Dr. Braaker, *Dissertation: Habitat Connectivity in an urban Ecosystem*, Freiburg (CH): ETH Zürich, 2012.
- [9] R. Oswald, M. Zöllner, R. Spilker und S. Sous, Zuverlässigkeit von Holzkonstruktionen ohne Unterlüftung der Abdichtungs- oder Decklage, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014.
- [10] B. Nusser, „Wiener Holzschutztage: Flachdächer in Holzbauweise bauphysikalisch richtig ausgeführt,“ Holzforschung Austria, Wien, 2017.
- [11] Technische Universität Wien, „natuREbuilt – Innovationsnetzwerk für regenerative, rezyklierbare, regionale und resiliente Komponenten im Hochbau,“ FFG, Wien, 2023.
- [12] *ÖNORM B 8110-2: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz*, Austrian Standards, 2020.
- [13] *ÖNORM EN ISO 13788: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren*, Austrian Standards, 2013.
- [14] J. Schwaller, P. Wegerer und T. Bednar, „Modifikation des Glaser-Verfahrens zur Berücksichtigung solarer Strahlung und konvektiver Feuchteinträge,“ *Bauphysik*, Bd. 38, Nr. Heft 2, pp. 71-80, 2016.
- [15] *ÖNORM B 3691: Planung und Ausführung von Dachabdichtungen*, Austrian Standards, 2019.
- [16] *ÖNORM B 2215: Holzbauarbeiten - Werkvertragsnorm*, Austrian Standards, 2017.
- [17] M. Teibinger und J. Bachinger, „Flachgeneigte Dächer aus Holz - Planungsbroschüre: Auszug: Nachweisfreie Konstruktionen für Objekte mit geringer Feuchtelast,“ *HFA Schriftenreihe*, Bd. 29, Nr. Holzforschung Austria, 2015.
- [18] M. Teibinger, „Nachweismöglichkeiten für Flachdächer,“ *Zuschnitt*, Nr. 47, pp. 10-12, 2012.
- [19] M. Stahr, Sanierung von baulichen Anlagen - Nachhaltig, Ökologisch und Umweltgerecht, Leipzig: Springer Vieweg, 2019.
- [20] D. Küsters, „Schimmelpilze und Bakterien in baubiologischen Produkten,“ 7. AGÖF-Fachkongress, Bde. %1 von %2Umwelt, Gebäude & Gesundheit, Nr. 7, pp. 94-103, 2004.
- [21] M. Blei, „Verhalten und Auswahl von natürlichen organischen Dämmstoffen bei Wasserschäden,“ *Wohnmedizin*, Bd. 55, Nr. 1, pp. 13-22, 2017.

- [22] *ÖNORM L 1131: Gartengestaltung und Landschaftsbau - Begrünung von Dächern und Decken auf Bauwerken - Anforderungen an Planung, Ausführung und Erhaltung*, Austrian Standards, 2010.
- [23] M. Brune, S. Bender und M. Groth, „Gebäudebegrünung und Klimawandel. Anpassung an die Folgen des Klimawandels durch klimawandeltaugliche Begrünung. Report 30,“ Climate Service Center Germany, Hamburg, 2017.
- [24] D. Stephan, Diplomarbeit: Nachhaltigkeit im Bauwesen: Ökologische Analyse von Baustoffen und Bauteilen, Wien: TU Wien, 2018.
- [25] S. El khouli, V. John und M. Zeumer, Nachhaltig konstruieren - Vom Tragwerksentwurf bis zur Materialauswahl: Gebäude ökologisch bilanzieren und optimieren, München: Detail, 2014.
- [26] M. Beermann und E. Sauper, „Monitoring results of innovative energy-efficient buildings in Austria. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 323 012122,“ IOP Publishing, Graz, 2019.
- [27] IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, „Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 für Bauteile und Gebäude, Version 4.0,“ Wien, 2018.
- [28] B. Bauer, F. Dolezal, G. Enzenberger, A. Scharnhorst, T. Steiner, G. Buschbacher und E.-M. Lems, Dämmstoffe richtig eingesetzt: Eignung, Anwendung und Umweltverträglichkeit von Dämmstoffen, Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022.
- [29] A. Galusic, Masterarbeit: Hygrothermische Untersuchung von Detaillösungen und Entwicklung eines Normenleitfadens für den Holzmassivbau, Graz: Technische Universität Graz, 2020.
- [30] OIB Österreichisches Institut für Bautechnik, „OIB Richtlinien 2023,“ [Online]. Available: <https://www.oib.or.at/oib-richtlinien/richtlinien/2023>. [Zugriff am 03 12 2023].
- [31] *OIB Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz*, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023.
- [32] N. Trivicevic, Diplomarbeit: Unsicherheiten bei hygrothermischen Simulationen, Graz: TU Graz, 2021.
- [33] Fraunhofer Institut Bauphysik, WUFI 2D: Beispielfall Schritt für Schritt, Holzkirchen: Fraunhofer Institut Bauphysik, 2014.
- [34] F. I. Bauphysik, „WUFI Homepage,“ 2019. [Online]. Available: <https://wufi.de/de/software/wufi-2d/>. [Zugriff am 3 11 2023].
- [35] Fraunhofer IBP, „Leitfaden zur Berechnung von Flachdächern,“ Fraunhofer IBP, 2023.
- [36] D. Zirkelbach, „Hygrothermische Simulation – Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige,“ in *12. Internationale Baufach- und Sachverständigentagung Ausbau und Fassade*, Regensburg, 2013, pp. 119-129.
- [37] Fraunhofer Institut Bauphysik, Leitfaden zur Auswertung und Beurteilung hygrothermischer Rechenergebnisse, Holzkirchen, 2022.
- [38] *ÖNORM B 3802-2: Holzschutz im Bauwesen Teil 2: Baulicher Schutz des Holzes*, Austrian Standards, 2015.
- [39] D. Kehl, *WTA-Merkblatt 6-8 »Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation«*, WTA Reviewed, 2017.
- [40] Fraunhofer Institut Bauphysik, WUFI Graph Hilfe, Holzkirchen, 2021.
- [41] J. Meinhardt, *Diplomarbeit: Analyse der ÖNORM B 8110-2:2020 und ein Vergleich verschiedener Nachweisverfahren zur Bestimmung der Tauwasserbildung*, Graz: TU Graz, 2021.
- [42] Fraunhofer Institut Bauphysik, „Tauwasserauswertung,“ Fraunhofer IBP, Holzkirchen, 2021.
- [43] Fraunhofer Institut für Bauphysik, *WUFI Materialdatenbank*, Holzkirchen: Fraunhofer IBP, 2023.

- [44] Fraunhofer Institut Bauphysik, „Leitfaden zur Berechnung von bekiesten Dächern,“ Holzkirchen, 2017.
- [45] B. Schafaczek und D. Zirkelbach, „Abschlussbericht: Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparemtern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013.
- [46] S. Winter, C. Fülle und N. Werther, „Forschungsprojekt MFPA Leipzig und TU München (Z 6 – 10.08.18.7-07.18). „Flachdächer in Holzbauweise“,“ TU München, MFPA Leipzig, Leipzig, 2009.
- [47] M. Teibinger und B. Nusser, „Forschungsbericht: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten Hölzernen Dachkonstruktionen,“ Holzforschung Austria, Wien, 2010.
- [48] G. Minke, F. Otto und R. Gross, „Abschlussbericht: Ermittlung des Wärmedämmverhaltens von Gründächern,“ ZUB Kassel, Kassel, 2009.
- [49] Fraunhofer Institut Bauphysik, „Leitfaden zur Berechnung von extensiv begrüntem Dächern,“ Holzkirchen, 2017.
- [50] M.-L. Haag, *Diplomarbeit: Ökologisch Bauen - Anreize und Hürden beim Einfamilienhausbau*, Wien: TU Wien, 2019.
- [51] H. M. Künzel und A. Karagiozis, „Hygrothermal behaviour and simulation in buildings,“ Woodhead Publishing Limited, Holzkirchen, 2010.
- [52] H. M. Künzel, „Bauschäden - Schadensdiagnose durch hygrothermische Simulation,“ Fraunhofer IRB Verlag, Holzkirchen, 2012.
- [53] H. M. Künzel und K. Sedlbauer, „Auswirkung heller Dichtungsbahnen auf das Austrocknungspotential von Leichtbau-Flachdächern,“ WTA Journal, Holzkirchen, 2008.
- [54] S. Winter, C. Fülle und N. Werther, „Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerechter Kon,“ Fraunhofer IRB Verlag, Leipzig, 2009.
- [55] B. Nusser und M. Teibinger, „Effects of combined shading and air exfiltration on lightweight building elements with high outer diffusion resistance,“ Holzforschung Austria, Wien, 2013.
- [56] *ÖNORM EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*, Austrian Standards, 2007.
- [57] D. Zirkelbach, „Forschungsergebnisse aus der Bauphysik Band 26: Wärme- und Feuchteverhalten von begrünten Dachkonstruktionen,“ Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2017.
- [58] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, „Das österreichische Umweltzeichen: Ausgezeichnet Leben mit dem österreichischen Umweltzeichen - schaut auf Umwelt und Qualität,“ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien, 2019.
- [59] *OIB Richtlinie 2: Brandschutz*, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023.
- [60] U. Pitha, I. Zluwa, J. Preiss, V. Enzi, L. Jesner, K. Lapin und J. Virgolini, „Leitfaden Dachbegrünung,“ Wiener Umweltschutzabteilung - MA22 der Stadt Wien, Wien, 2021.
- [61] H. H. Saber, M. C. Swinton, P. Kalinger und R. M. Paroli, „Long-term hygrothermal performance of white and black roofs in North American climates,“ Elsevier Verlag, Kanada, 2011.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbaukonzept des hinterlüfteten (Typ I) und nicht hinterlüfteten Flachdaches (Typ II) mit den Schichten bei Typ I von innen nach außen mit 1 2x GKF, 2 Dampfsperre, 3 Dämmstoff zwischen Konstruktionsvollholz, 4 Holzwerkstoff, 5 Dampfbremse, 6 Unterdachbahn, 7 Konterlattung/ Hinterlüftungsebene, 8 Holzschalung, 9 Feuchtigkeitsabdichtung, 10 Dachaufbau; und mit den Schichten bei Typ II mit 1 2x GKF, 2 Dampfsperre, 3 Dämmstoff zwischen Konstruktionsvollholz, 4 Holzwerkstoff, 5 Feuchtigkeitsabdichtung, 6 Dachaufbau .....	8
Abbildung 2: Bekannteste Gütezeichen und Labels für Bauprodukte: (a) Blauer Engel vergeben durch das Umweltbundesamt/ RAL Deutsches Institut für Gütesicherung e.V., (b) Österreichisches Umweltzeichen vergeben durch das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, (c) EMICODE vergeben durch die Gemeinschaft für Emissionskontrollierte Verlegewerkstoffe, Klebstoffe und Bauprodukte e.V., (d) FSC vergeben durch das Forest Stewardship Council A.C., (e) Natureplus vergeben durch den Internationalen Verein für zukunftsfähiges Bauen und Wohnen - natureplus e.V. ....	11
Abbildung 3: Zertifizierungssysteme für Gebäude: (a) klimaaktiv vergeben durch das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, (b) LEED vergeben durch Leadership in Energy & Environmental Design, (c) ÖGNI vergeben durch die Österreichische Gesellschaft für nachhaltige Immobilienwirtschaft, (d) DGNB vergeben durch die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen, (e) TQB (Total Quality Building) vergeben durch die Gesellschaft für nachhaltiges Bauen .....	12
Abbildung 4: Für die WUFI-Simulationen gewählte Dachkonstruktionen: (a) Holzrahmenbauweise; mit den Schichten von innen nach außen 1 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 2 Dämmstoff zwischen Konstruktionsvollholz, 3 Holzfaserdämmplatte, 4 Holzschalung, 5 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen $s_d=300m$ und EPDM $s_d=70m$ ) und (b) Massivbauweise; mit den Schichten 1 Massivholzdecke KLH, 2 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 3 Dämmstoff, 4 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen $s_d=300m$ und EPDM $s_d=70m$ ); für das Kiesdach wird der Aufbau noch um ein Schutz- und Filtervlies sowie um den Kies erweitert; für das Gründach wird der Aufbau um Schutzvlies, Wurzelschutzschicht, Drainmatte, Filter- und Schutzschicht und Pflanzensubstrat ergänzt .....	16
Abbildung 5: Direkter Vergleich der Innenklimamodelle von (a) der ÖNORM 8110-2 und (b) des WTA Modells 6-2.....	18
Abbildung 6: Vorgehen bei der Ergebnisbewertung mit WUFI [37].....	19
Abbildung 7: Mittlere Porenluftfeuchte gemäß WTA- Merkblatt 6-8 [39] .....	20
Abbildung 8: Isoplethen zur Bewertung des Risikos von Schimmelpilzwachstum [37].....	21
Abbildung 9: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von EPS-Dämmung [43].....	22
Abbildung 10: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Mineralwoll-Dämmung [43].....	22
Abbildung 11: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Kork-Dämmung [43].....	22
Abbildung 12: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Schafwoll-Dämmung [43].....	23
Abbildung 13: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Flachs-Dämmung [43].....	23
Abbildung 14: Funktion der Wärmeleitfähigkeit von Zellulose-Dämmung [43] .....	23
Abbildung 15: Für die WUFI-Simulationen gewählte Foliendachkonstruktionen: (a) Holzrahmenbauweise; mit den Schichten von innen nach außen 1 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 2 Dämmstoff (Mineralwolle und Schafwolle) zwischen Konstruktionsvollholz, 3 Holzfaserdämmplatte, 4 Holzschalung, 5 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen $s_d=300m$ und EPDM $s_d=70m$ ) und (b) Massivbauweise; mit den Schichten 1 Massivholzdecke KLH, 2 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 3 Dämmstoff (EPS und Kork), 4 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen $s_d=300m$ und EPDM $s_d=70m$ ).....	24
Abbildung 16: Für die WUFI-Simulationen gewählte Kiesdachkonstruktionen: (a) Holzrahmenbauweise; mit den Schichten von innen nach außen 1 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 2 Dämmstoff (Mineralwolle und Schafwolle) zwischen Konstruktionsvollholz, 3 Holzfaserdämmplatte, 4 Holzschalung, 5 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen $s_d=300m$ und EPDM $s_d=70m$ ), 6 Kies und (b) Massivbauweise; mit den Schichten 1 Massivholzdecke KLH, 2 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 3 Dämmstoff (EPS und Kork), 4 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen $s_d=300m$ und EPDM $s_d=70m$ ), 5 Kies.....	26
Abbildung 17: Positionierung der Feuchtequelle beim Kiesdach .....	28

Abbildung 18: Für die WUFI-Simulationen gewählte Gründachkonstruktionen: (a) Holzrahmenbauweise; mit den Schichten von innen nach außen 1 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 2 Dämmstoff (Mineralwolle und Schafwolle) zwischen Konstruktionsvollholz, 3 Holzfaserdämmplatte, 4 Holzschalung, 5 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen $s_d=300m$ und EPDM $s_d=70m$ ), 6 Gründach und (b) Massivbauweise; mit den Schichten 1 Massivholzdecke KLH, 2 Dampfsperre ( $s_d=1500m$ ), 3 Dämmstoff (EPS und Kork), 4 Feuchtigkeitsabdichtung (Bitumen $s_d=300m$ und EPDM $s_d=70m$ ), 5 Gründach .....	28
Abbildung 19: Positionierung der Feuchtequelle beim Gründach .....	30
Abbildung 20: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	65
Abbildung 21: Wassergehaltsverlauf der gesamten Kork Dämmebene .....	66
Abbildung 22: Wassergehaltsverlauf der gesamten Massivholzschicht .....	67
Abbildung 23: Porenluftfeuchte einer 1 cm Massivholz Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	68
Abbildung 24: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	69
Abbildung 25: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schafwolle Dämmebene .....	70
Abbildung 26: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser Dämmebene .....	71
Abbildung 27: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung .....	72
Abbildung 28: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	73
Abbildung 29: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	74
Abbildung 30: Wassergehaltsverlauf der gesamten Kork Dämmebene .....	75
Abbildung 31: Wassergehaltsverlauf der gesamten Massivholzschicht .....	76
Abbildung 32: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	77
Abbildung 33: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	78
Abbildung 34: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schafwolle Dämmebene .....	79
Abbildung 35: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser-Dämmebene .....	80
Abbildung 36: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung .....	81
Abbildung 37: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	82
Abbildung 38: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	83
Abbildung 39: Wassergehaltsverlauf der gesamten Kork Dämmebene .....	84
Abbildung 40: Wassergehaltsverlauf der gesamten Massivholzschicht .....	85
Abbildung 41: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	86
Abbildung 42: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	87
Abbildung 43: Wassergehaltsverlauf der gesamten Kork Dämmebene .....	88
Abbildung 44: Wassergehaltsverlauf der gesamten Massivholzschicht .....	89
Abbildung 45: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	90
Abbildung 46: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	91
Abbildung 47: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schafwolle Dämmebene .....	92
Abbildung 48: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser-Dämmebene .....	93
Abbildung 49: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung .....	94
Abbildung 50: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	95
Abbildung 51: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	96
Abbildung 52: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schafwolle Dämmebene .....	97
Abbildung 53: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser-Dämmebene .....	98
Abbildung 54: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung .....	99
Abbildung 55: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	100
Abbildung 56: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	101
Abbildung 57: Wassergehaltsverlauf der gesamten Flachs-Dämmebene .....	102
Abbildung 58: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser-Dämmebene .....	103
Abbildung 59: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung .....	104
Abbildung 60: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	105
Abbildung 61: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	106
Abbildung 62: Wassergehaltsverlauf der gesamten Flachs-Dämmebene .....	107
Abbildung 63: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser-Dämmebene .....	108
Abbildung 64: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung .....	109
Abbildung 65: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8 .....	110
Abbildung 66: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion .....	111

Abbildung 67: Wassergehaltsverlauf der gesamten Zellulose-Dämmebene .....	112
Abbildung 68: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser-Dämmebene.....	113
Abbildung 69: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung.....	114
Abbildung 70: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8.....	115
Abbildung 71: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion.....	116
Abbildung 72: Wassergehaltsverlauf der gesamten Zellulose-Dämmebene .....	117
Abbildung 73: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser-Dämmebene.....	118
Abbildung 74: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung.....	119
Abbildung 75: Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8.....	120

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dämmstoffe im Überblick (OI3 Index) [28].....	13
Tabelle 2: Aufbaustärken und U-Werte der Aufbauvarianten.....	16
Tabelle 3: Äußere und innere Randbedingungen der Simulation.....	24
Tabelle 4: Materialkennwerte der verwendeten Materialien aus WUFI .....	25
Tabelle 5: Oberflächenübergangskoeffizienten der Außenoberfläche beim Foliendach.....	25
Tabelle 6: Oberflächenübergangskoeffizienten der Innenoberfläche beim Foliendach.....	25
Tabelle 7: Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten .....	25
Tabelle 8: Äußere und innere Randbedingungen der Simulation.....	26
Tabelle 9: Materialkennwerte der verwendeten Materialien aus WUFI .....	27
Tabelle 10: Oberflächenübergangskoeffizienten der Außenoberfläche beim Kieddach.....	27
Tabelle 11: Oberflächenübergangskoeffizienten der Innenoberfläche beim Kieddach.....	27
Tabelle 12: Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten.....	27
Tabelle 13: Äußere und innere Randbedingungen der Simulation .....	29
Tabelle 14: Materialkennwerte der verwendeten Materialien aus WUFI.....	29
Tabelle 15: Oberflächenübergangskoeffizient der Außenoberfläche beim Gründach .....	29
Tabelle 16: Oberflächenübergangskoeffizienten der Innenoberfläche beim Gründach.....	29
Tabelle 17: Anfangswassergehalte der einzelnen Schichten.....	30
Tabelle 18: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von EPS .....	32
Tabelle 19: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes .....	32
Tabelle 20: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Mineralwolle .....	33
Tabelle 21: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung .....	33
Tabelle 22: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung .....	33
Tabelle 23: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork .....	35
Tabelle 24: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes .....	35
Tabelle 25: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle .....	36
Tabelle 26: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung .....	37
Tabelle 27: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung .....	37
Tabelle 28: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork im Foliendach .....	39
Tabelle 29: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork im Kieddach.....	39
Tabelle 30: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork im Gründach.....	39
Tabelle 31: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes im Foliendach .....	39
Tabelle 32: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes im Kieddach.....	39
Tabelle 33: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes im Gründach.....	39
Tabelle 34: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Foliendach.....	41
Tabelle 35: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Kieddach.....	41
Tabelle 36: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach.....	41
Tabelle 37: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Foliendach .....	41
Tabelle 38: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Kieddach.....	41
Tabelle 39: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach.....	41
Tabelle 40: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Foliendach.....	41
Tabelle 41: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Kieddach .....	42
Tabelle 42: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach .....	42
Tabelle 43: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung .....	44
Tabelle 44: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork beim Gründach, mit innerem und äußerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung.....	44
Tabelle 45: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung .....	45
Tabelle 46: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Kork beim Gründach, mit innerem und äußerem Fehler und EPDM Dachabdichtung .....	45

Tabelle 47: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung.....	45
Tabelle 48: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes beim Gründach, mit innerem und äußerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung .....	45
Tabelle 49: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung.....	46
Tabelle 50: Ergebnisse der Bewertung des Massivholzes beim Gründach, mit innerem und äußerem Fehler und EPDM Dachabdichtung.....	46
Tabelle 51: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung .....	47
Tabelle 52: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung .....	47
Tabelle 53: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung.....	48
Tabelle 54: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Schafwolle beim Gründach, mit innerem Fehler und EPDM Dachabdichtung .....	48
Tabelle 55: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung.....	48
Tabelle 56: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung.....	48
Tabelle 57: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung.....	49
Tabelle 58: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung beim Gründach, mit innerem Fehler und EPDM Dachabdichtung.....	49
Tabelle 59: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach, ohne Fehler und Bitumen Dachabdichtung.....	49
Tabelle 60: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen Dachabdichtung .....	49
Tabelle 61: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach, ohne Fehler und EPDM Dachabdichtung.....	50
Tabelle 62: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung beim Gründach, mit innerem Fehler und EPDM Dachabdichtung .....	50
Tabelle 63: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Flachs beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung .....	51
Tabelle 64: Ergebnisse der Bewertung der Dämmeigenschaften von Zellulose beim Gründach, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung.....	52
Tabelle 65: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung bei Flachs-Dämmung, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung.....	52
Tabelle 66: Ergebnisse der Bewertung des Holzschalung bei Zellulose-Dämmung, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung.....	52
Tabelle 67: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung bei Flachs-Dämmung, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM Dachabdichtung.....	52
Tabelle 68: Ergebnisse der Bewertung des Holzfaserdämmung bei Zellulose-Dämmung, mit innerem Fehler und Bitumen- und EPDM Dachabdichtung.....	52

# Anhang A

Nachfolgend sind die Ergebnisse in Form von WUFI Diagrammen dargestellt. Die Analysen und Diskussionen in **Kapitel 4** stützen sich auf den hier visualisierten Daten und Verläufe. Es ist anzumerken, dass die Referenzaufbauten mit herkömmlichen Dämmstoffen zwar als Grundlage für die Vergleiche dienen, jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit stehen und daher hier nicht dargestellt werden. Für eine bessere Übersichtlichkeit wird hier nur die maßgebende Variante, das Gründach dargestellt.

## 9.1 Auswertung Massivbauweise mit Kork Dämmung

### 9.1.1 Gründach

#### Gesamtwassergehalt

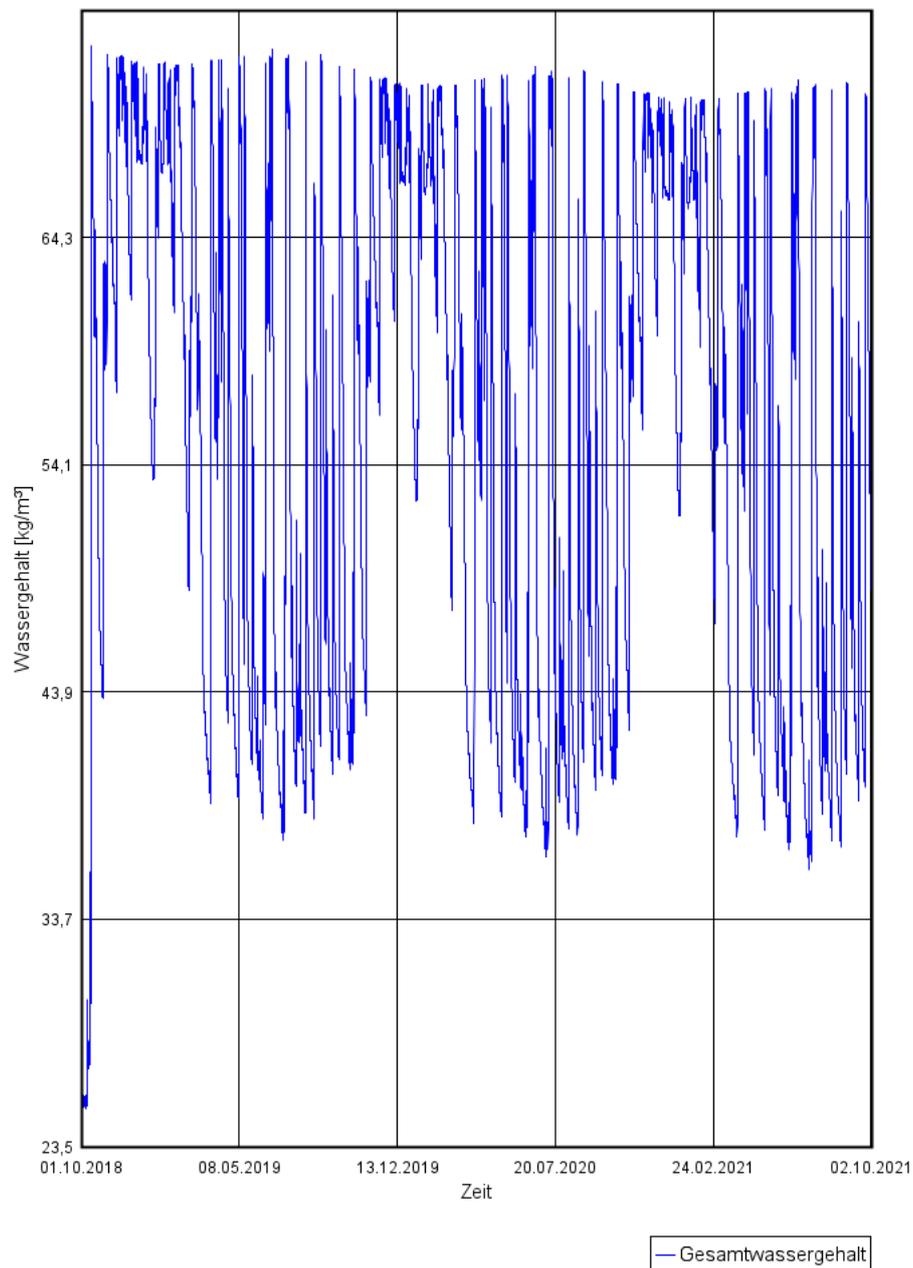
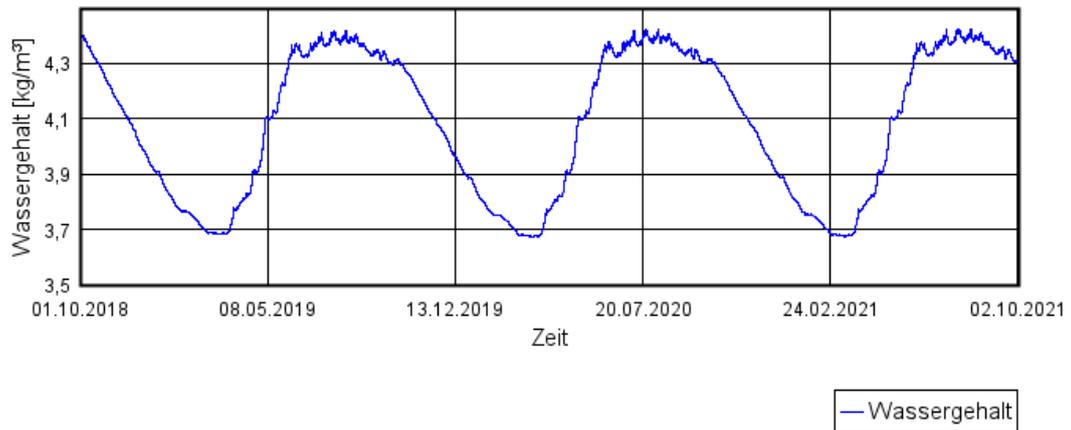
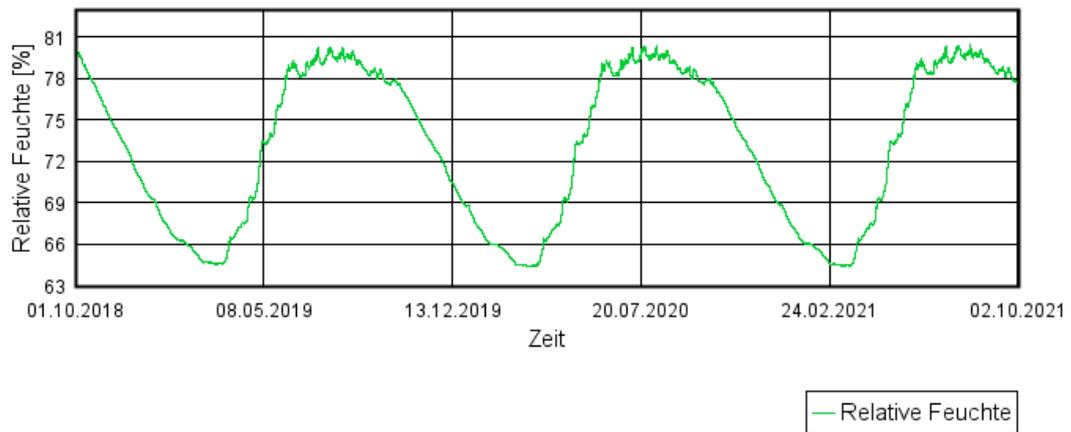


Abbildung 20: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

## Wassergehalt



## Relative Feuchte



## Temperatur

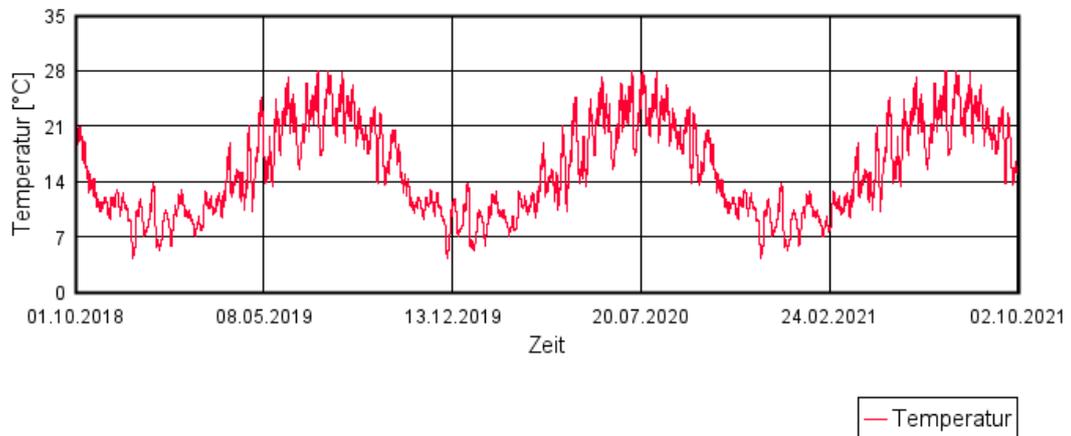
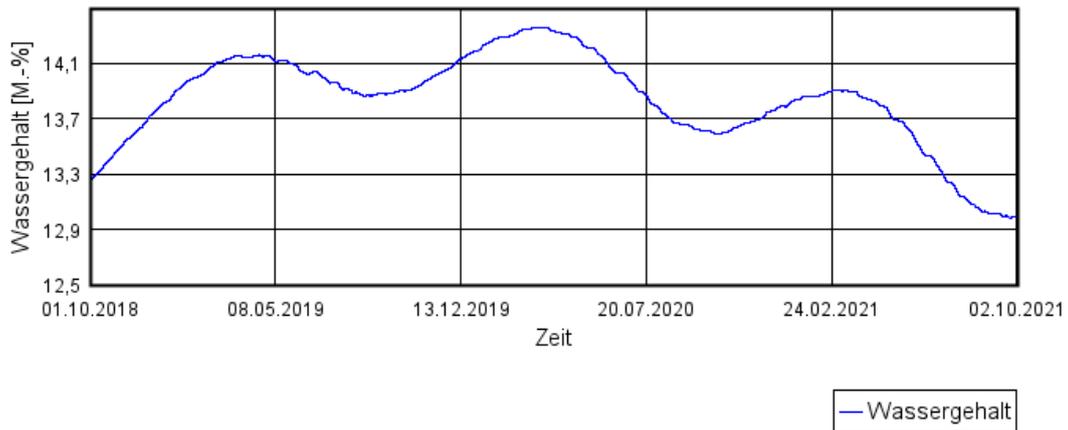
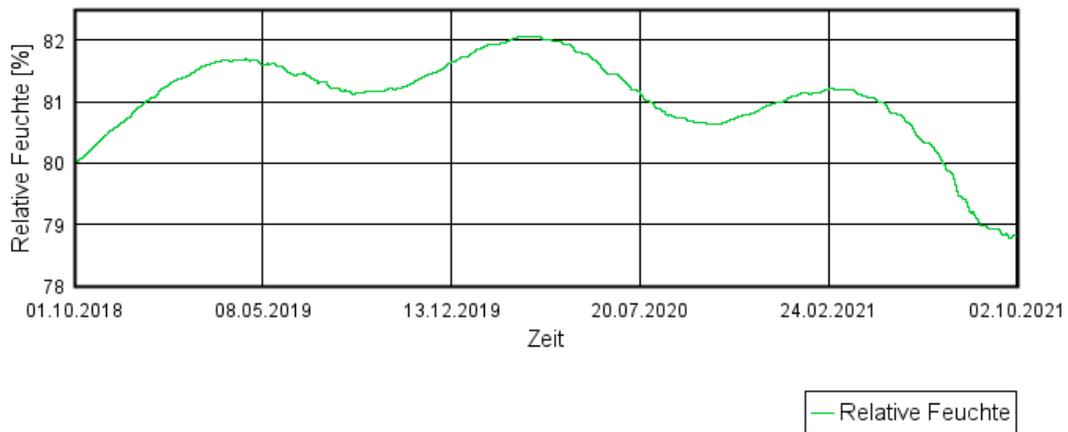


Abbildung 21: Wassergehaltsverlauf der gesamten Kork Dämmebene

## Wassergehalt



## Relative Feuchte



## Temperatur

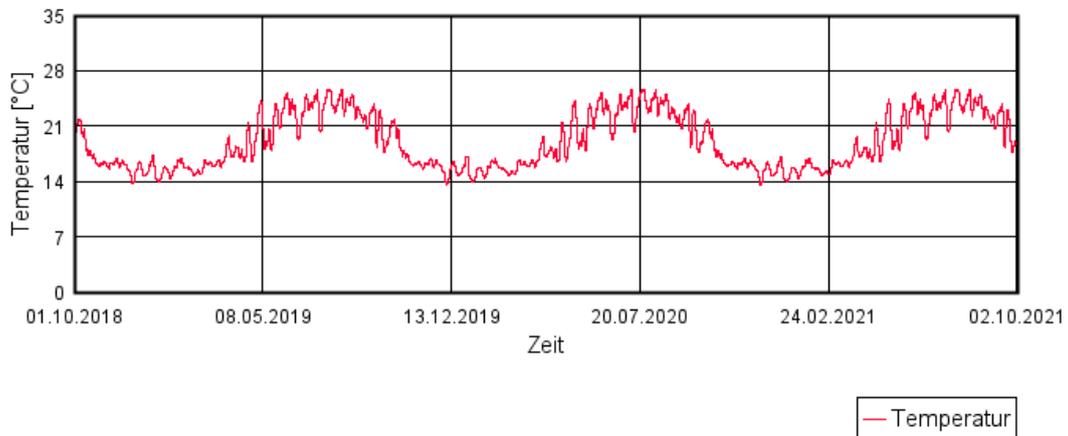
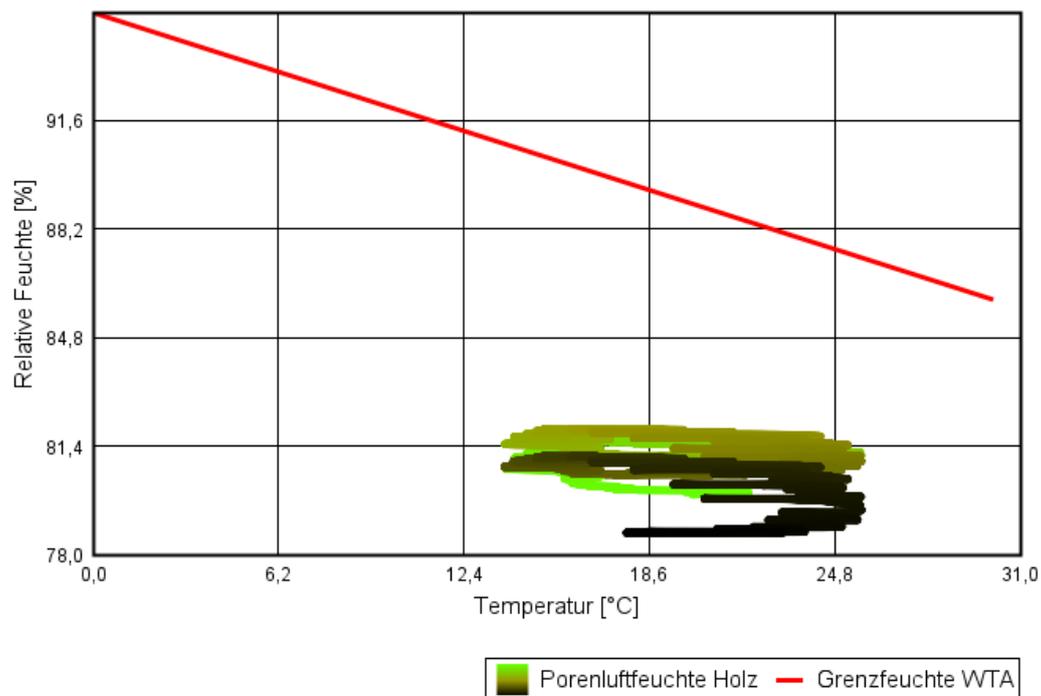


Abbildung 22: Wassergehaltsverlauf der gesamten Massivholzschicht

### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 23:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Massivholz Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

## 9.2 Auswertung Leichtbauweise mit Schafwolle Dämmung

### 9.2.1 Gründach

#### Gesamtwassergehalt

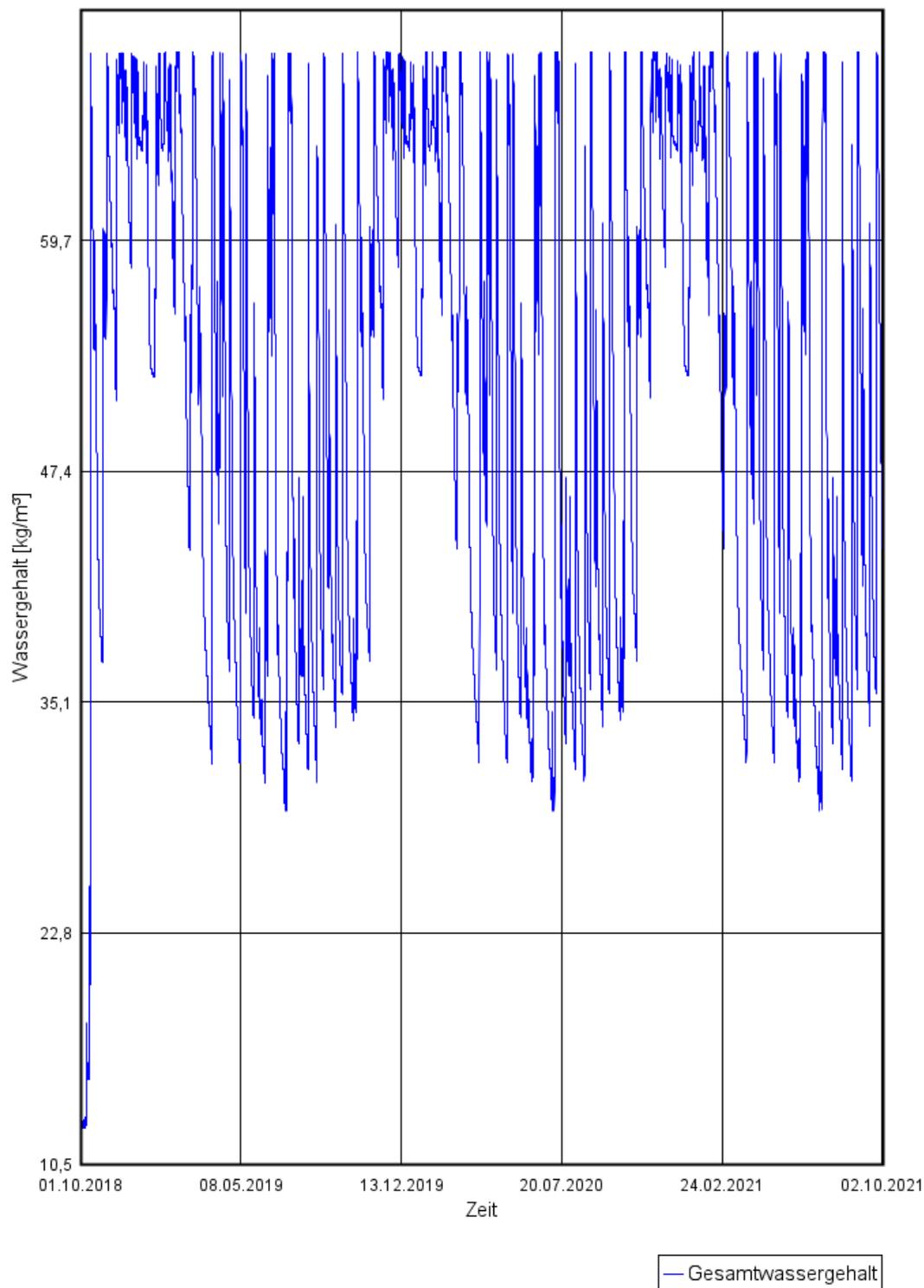
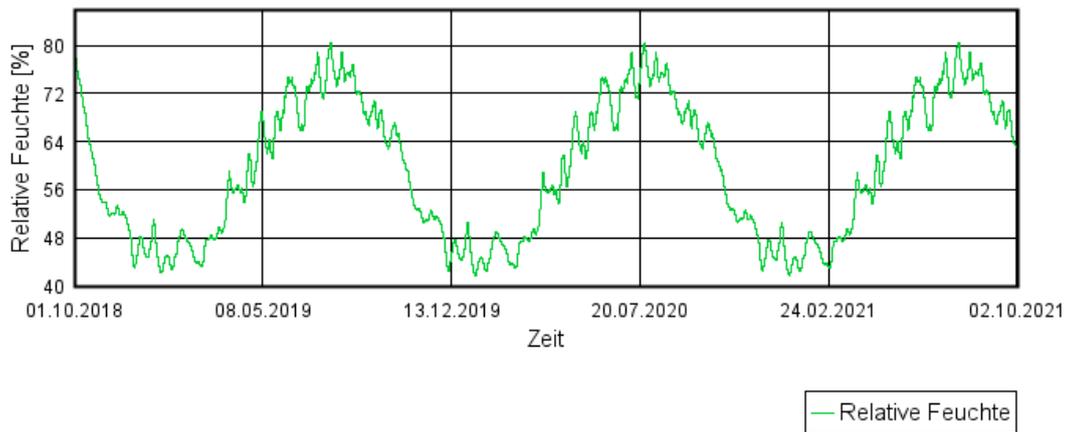


Abbildung 24: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

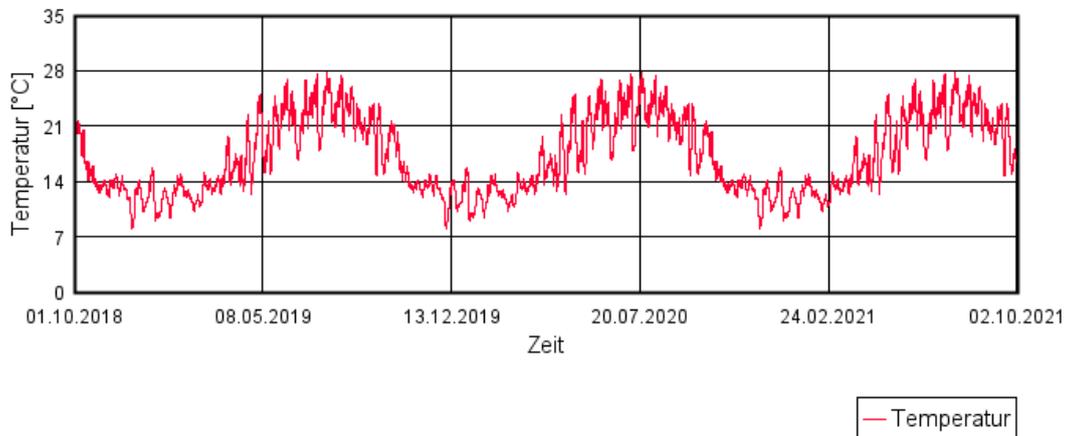
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

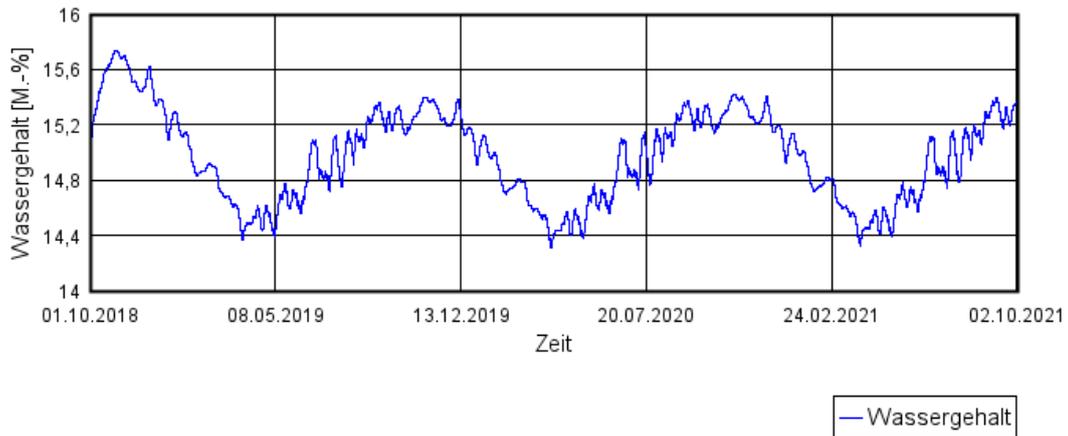


## Temperatur

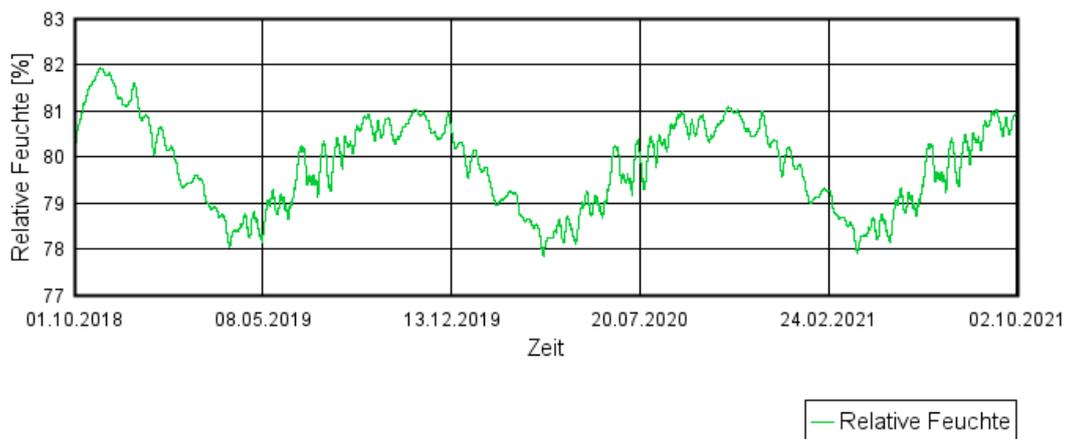


**Abbildung 25:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Schafwolle Dämmebene

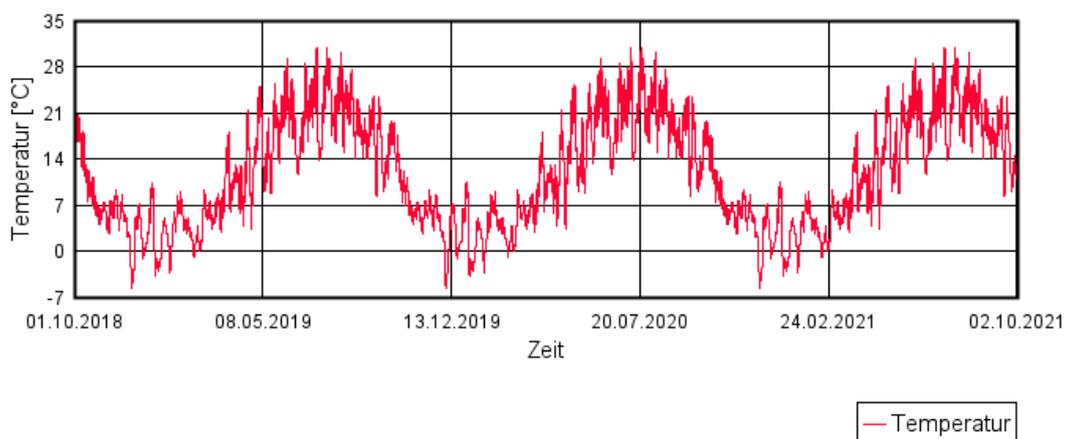
### Wassergehalt



### Relative Feuchte

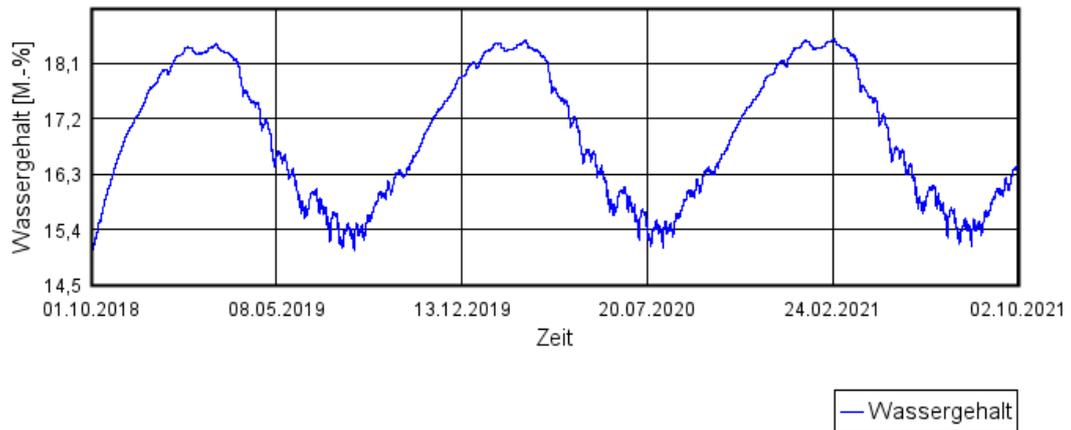


### Temperatur

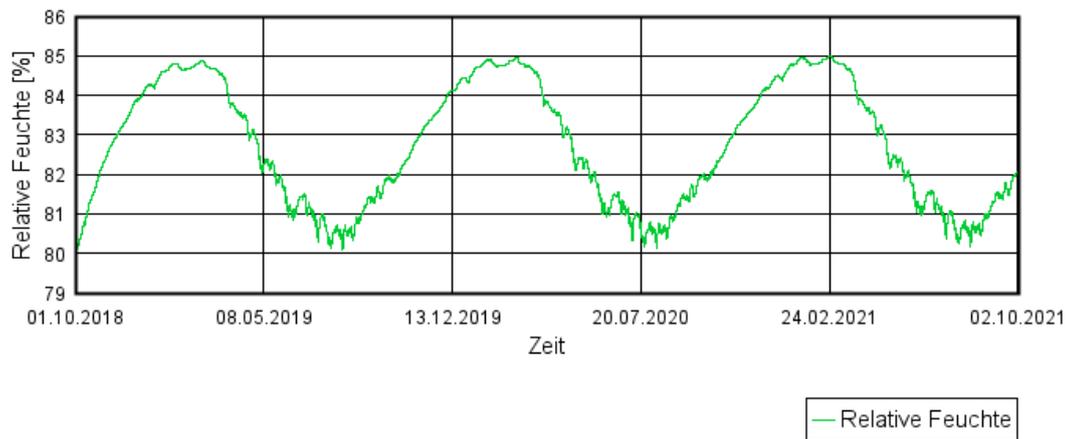


**Abbildung 26:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfaser Dämmebene

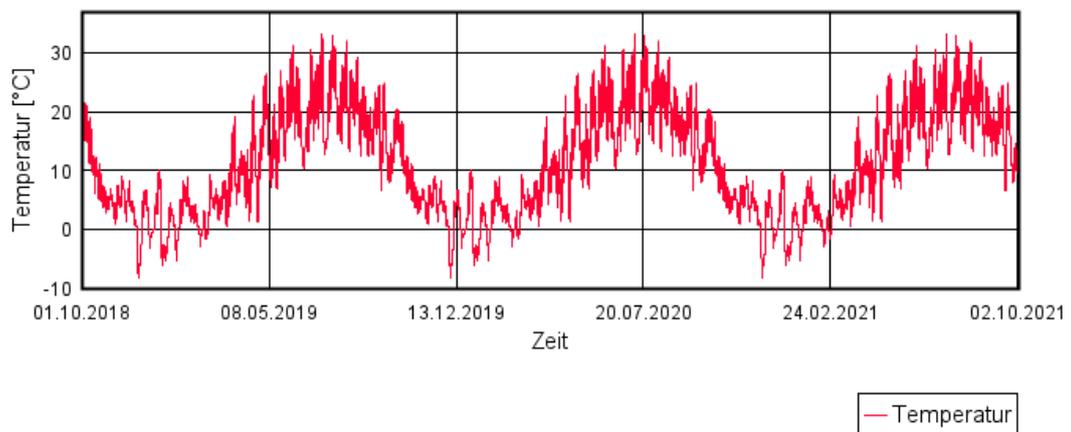
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

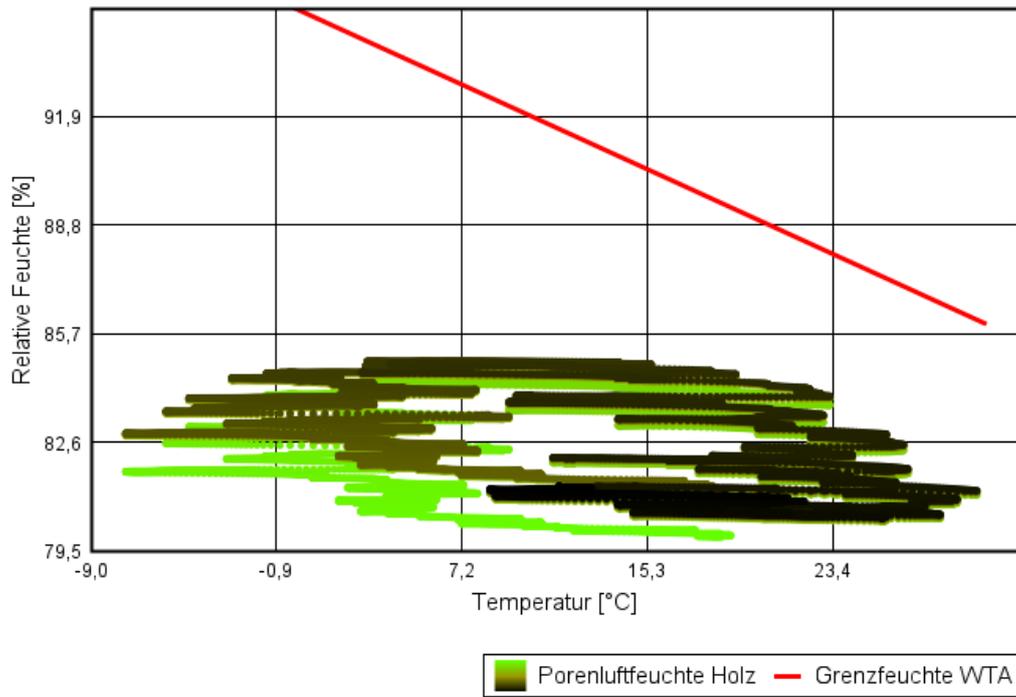


## Temperatur



**Abbildung 27:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung

### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 28:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

### 9.3 Auswertung Massivbauweise mit Kork Dämmung und Fehler

#### 9.3.1 Gründach mit der Kombination aus innerem und äußerem Fehler

#### Gesamtwassergehalt

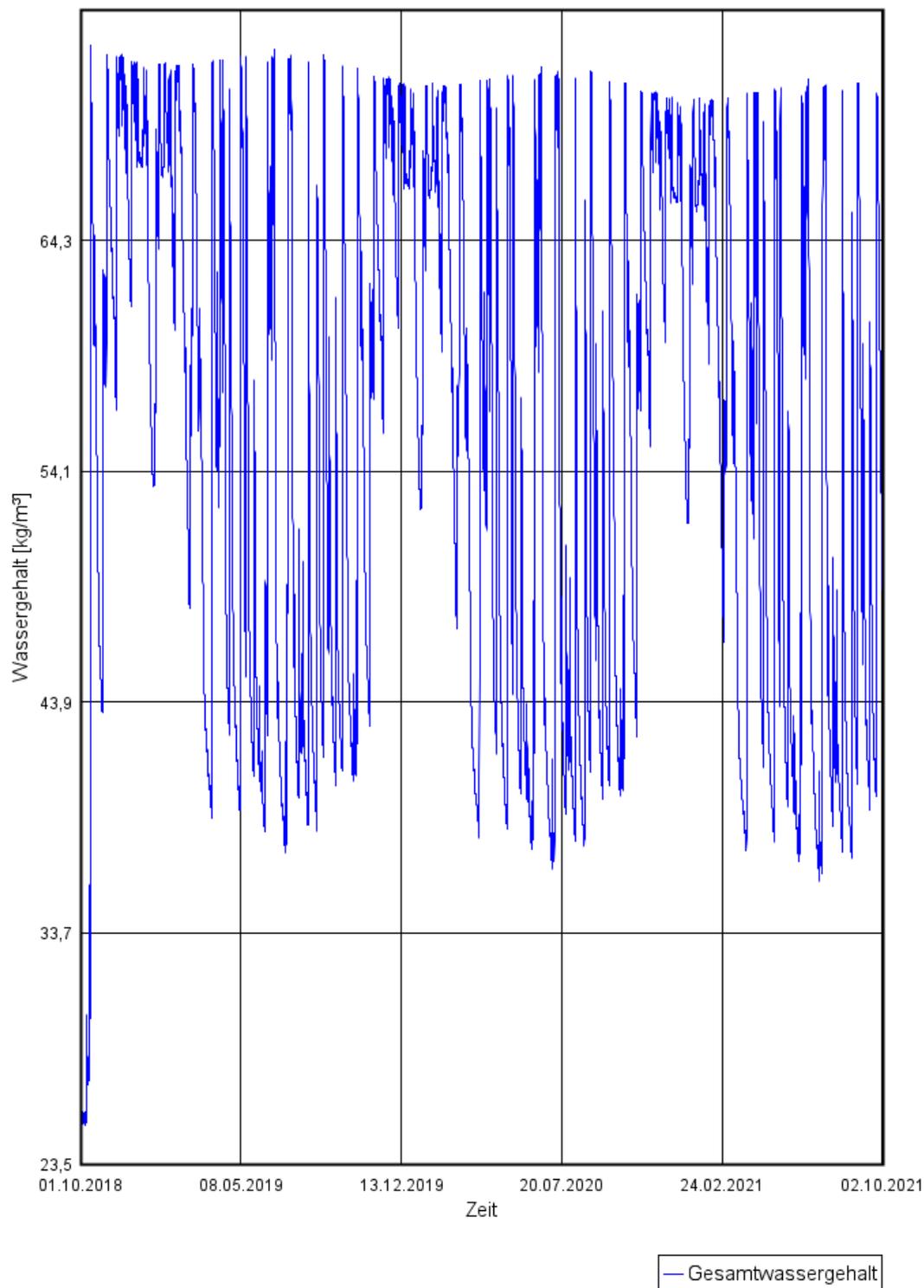
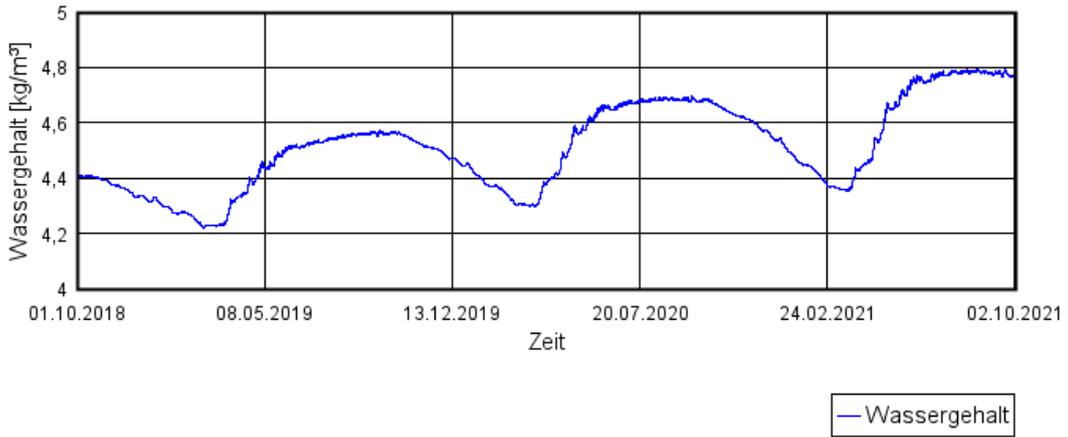
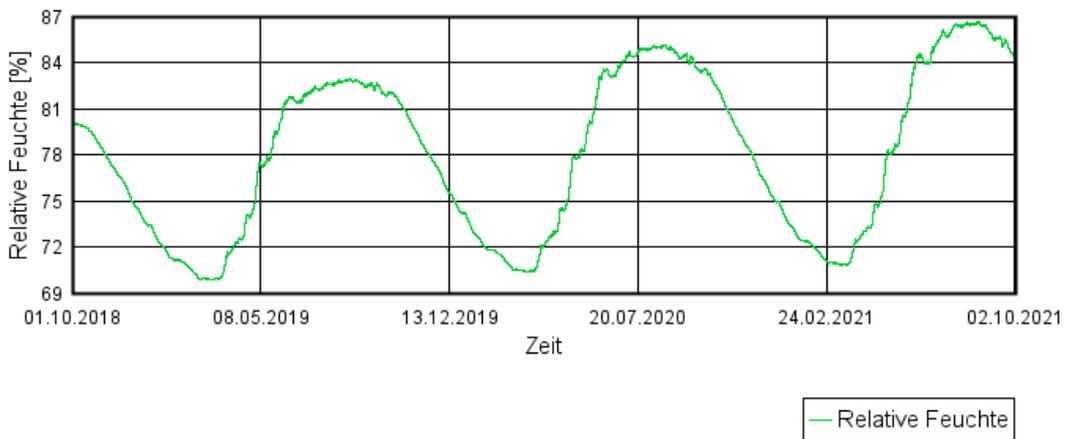


Abbildung 29: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

### Wassergehalt



### Relative Feuchte



### Temperatur

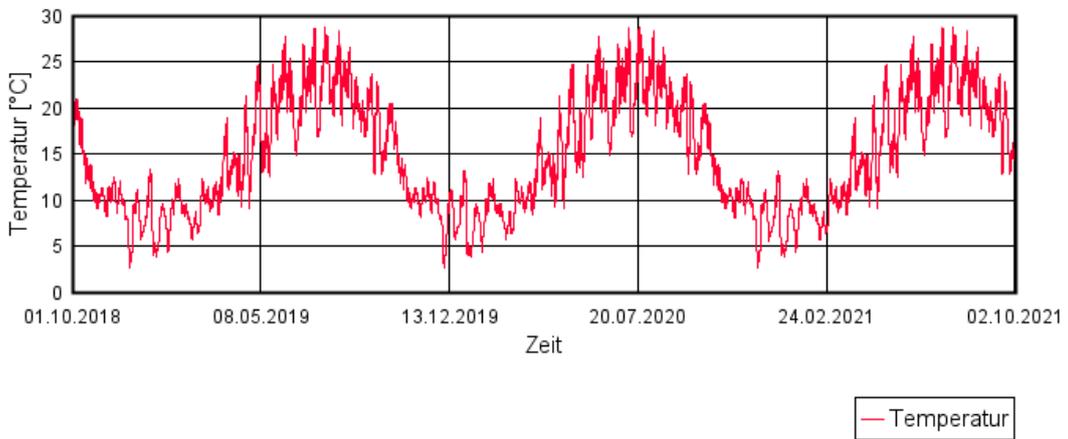
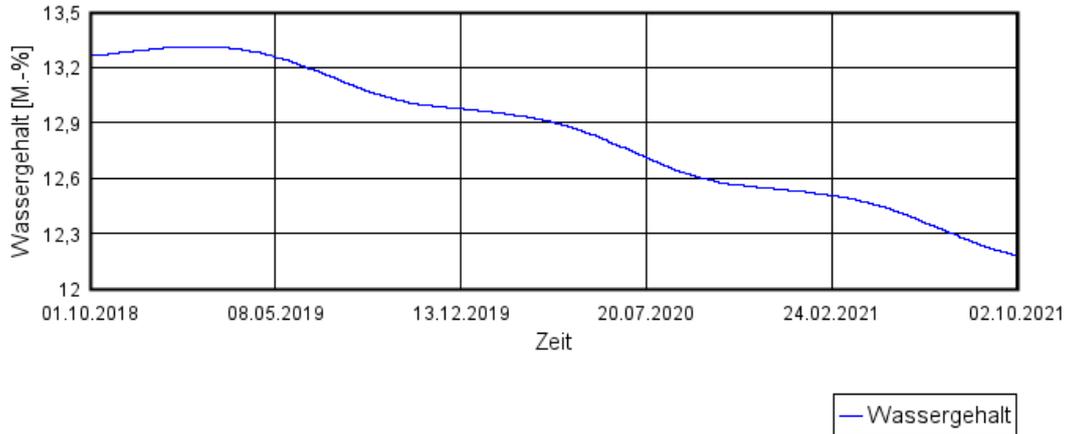
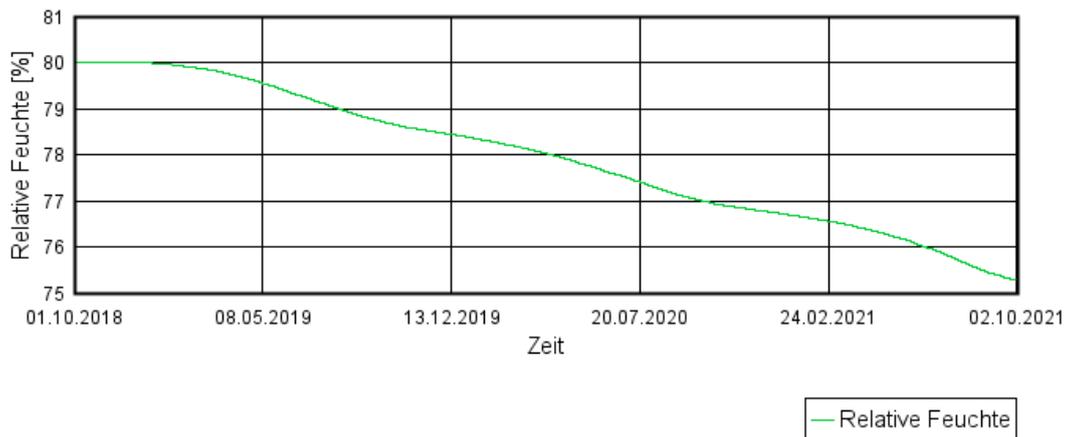


Abbildung 30: Wassergehaltsverlauf der gesamten Kork Dämmebene

### Wassergehalt



### Relative Feuchte



### Temperatur

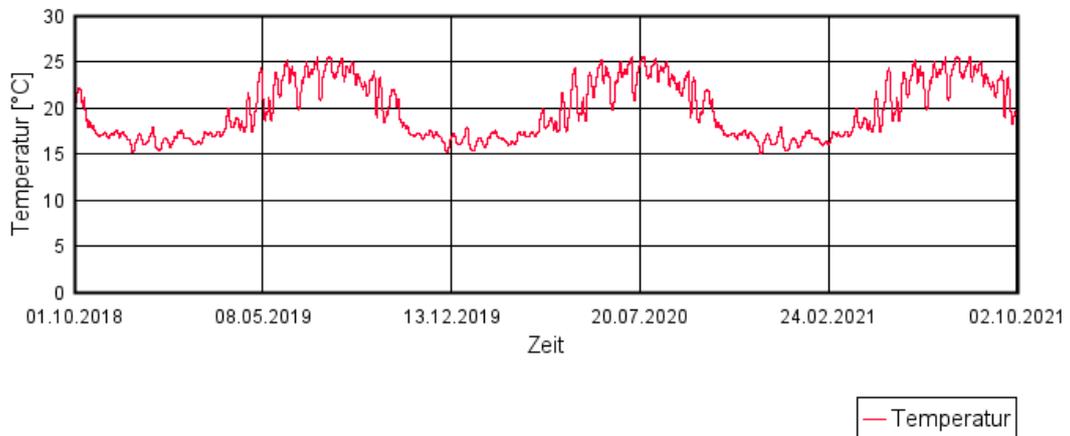
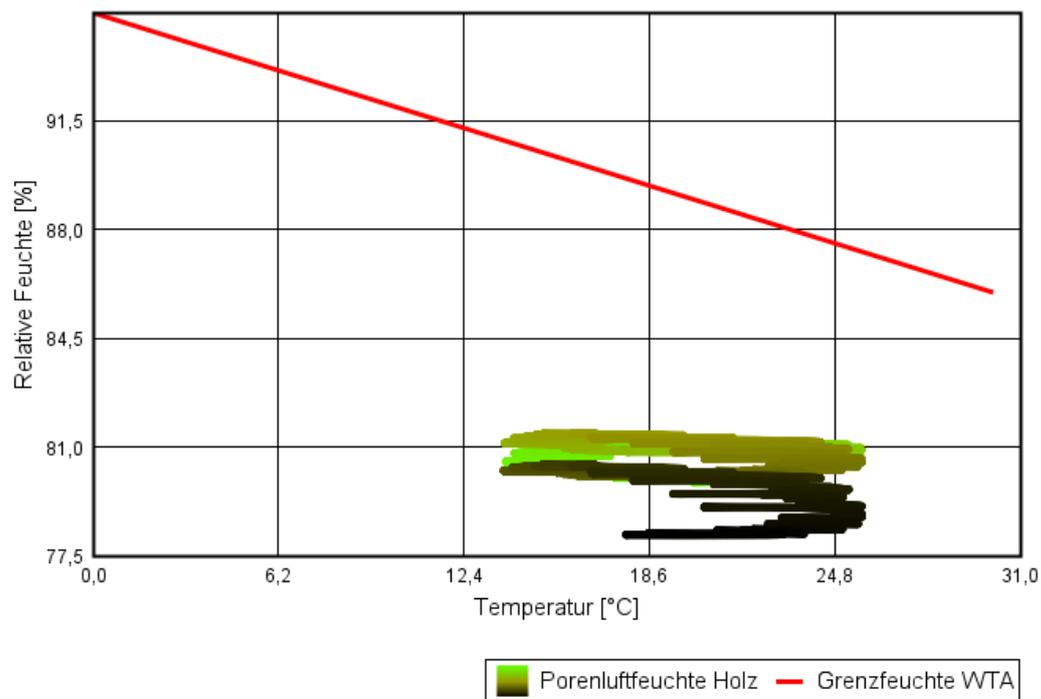


Abbildung 31: Wassergehaltsverlauf der gesamten Massivholzschicht

### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 32:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

## 9.4 Auswertung Leichtbauweise mit Schafwolle Dämmung und Fehler

### 9.4.1 Gründach mit Fehler in der inneren Dampfsperre

#### Gesamtwassergehalt

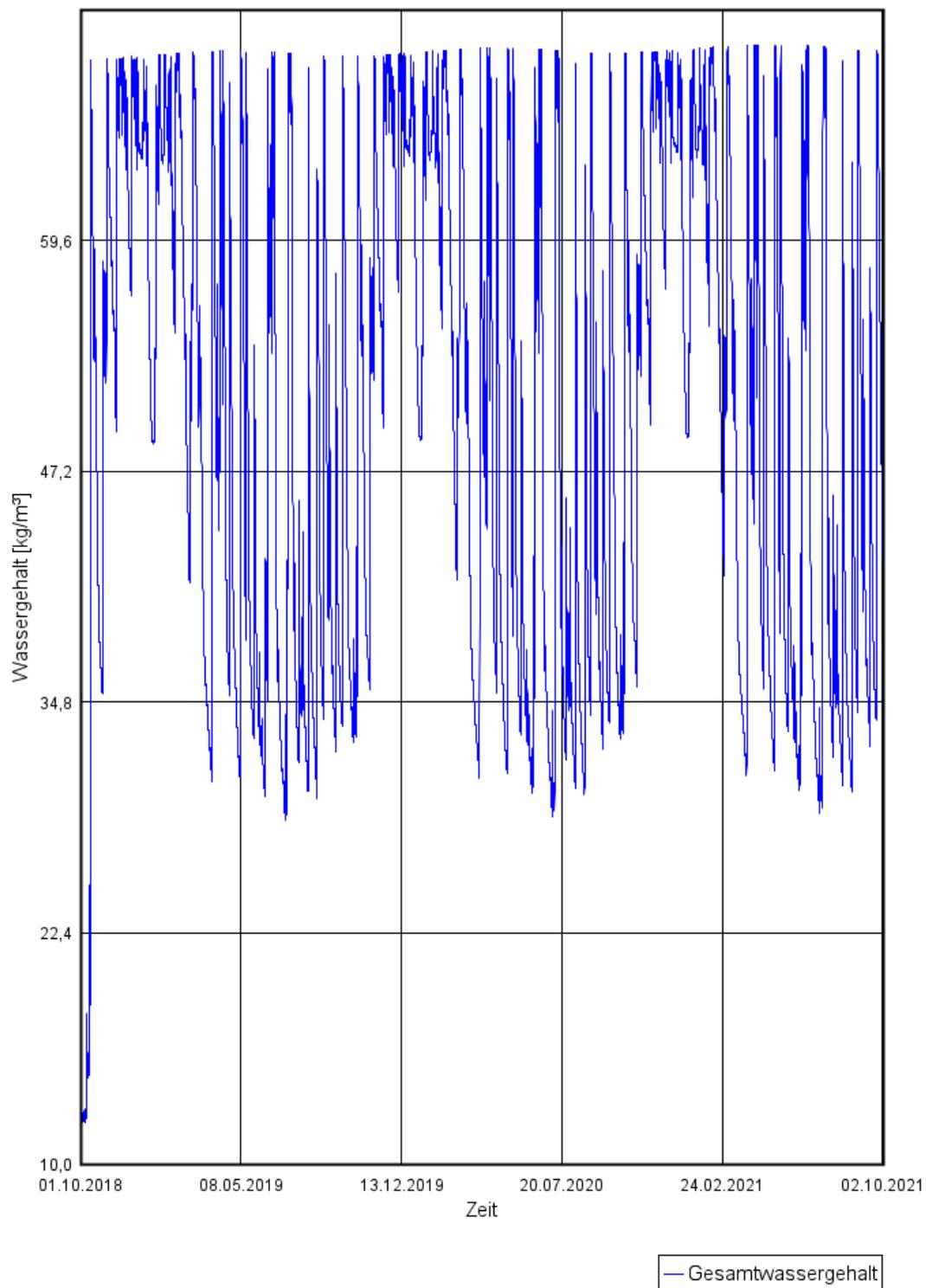
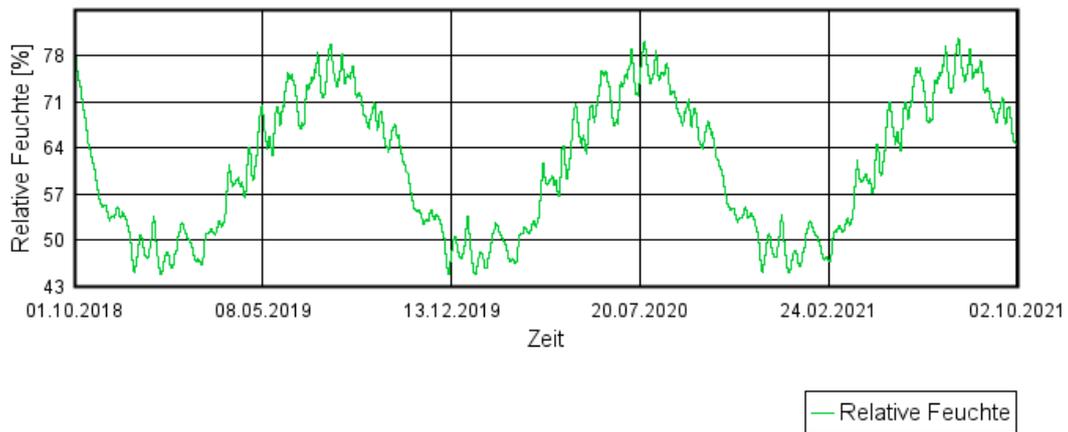


Abbildung 33: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

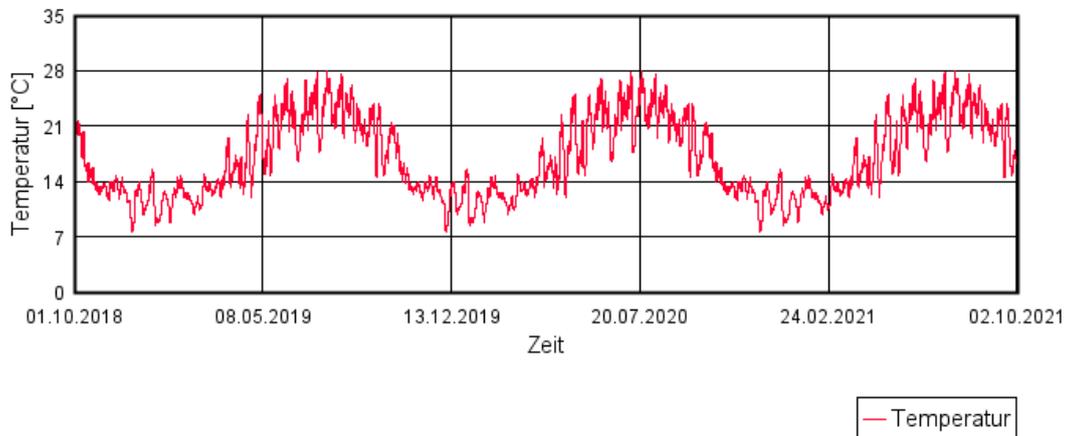
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

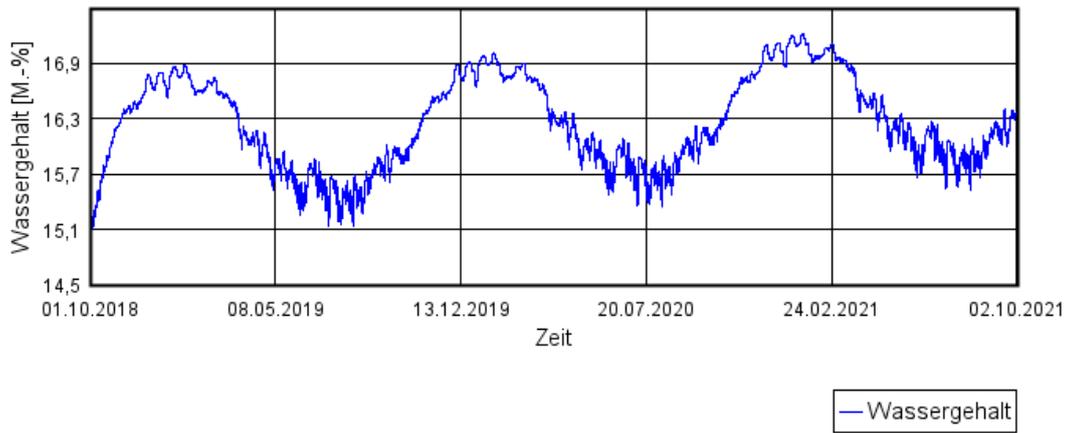


## Temperatur

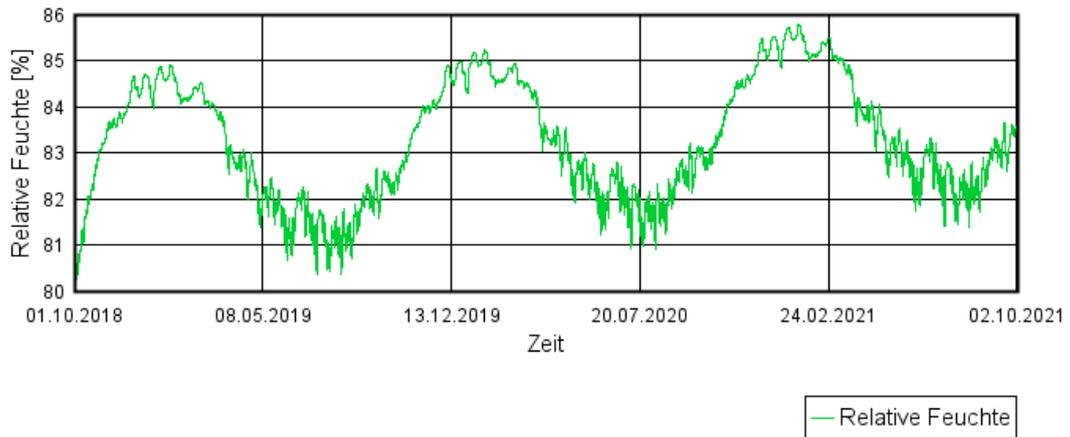


**Abbildung 34:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Schafwolle Dämmebene

### Wassergehalt



### Relative Feuchte



### Temperatur

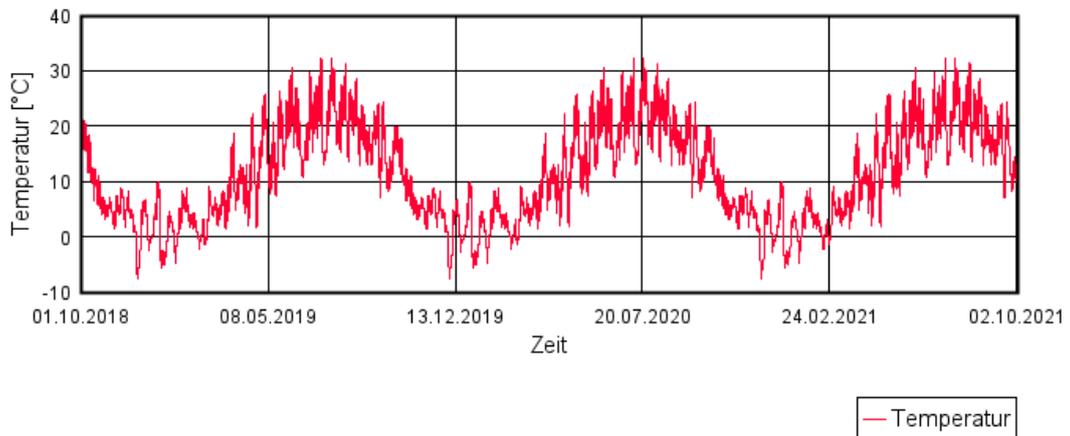
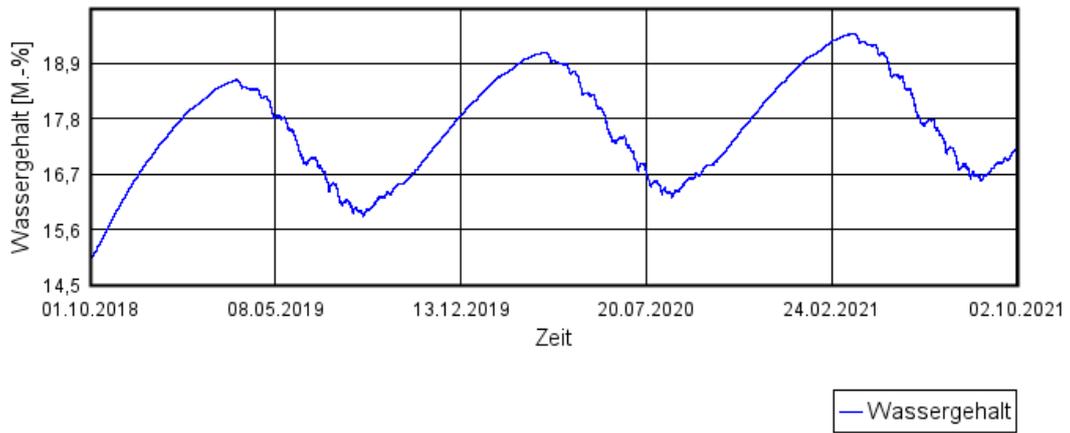
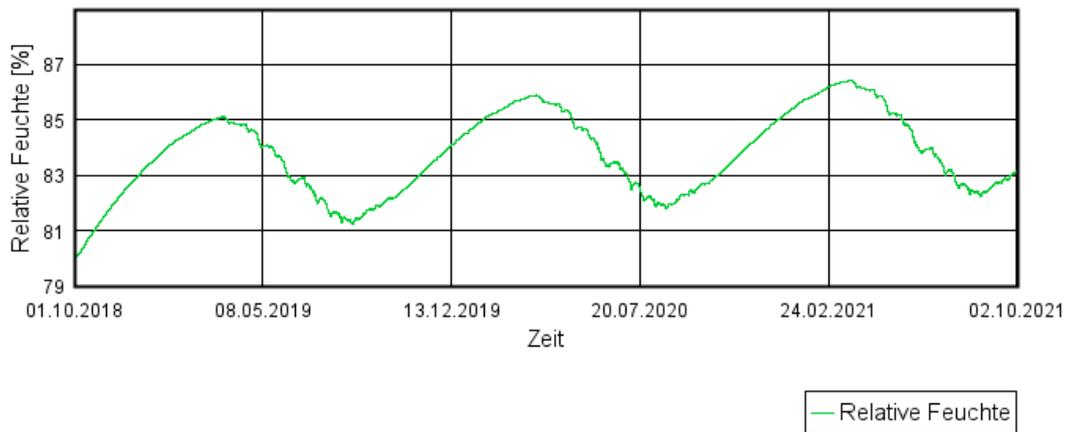


Abbildung 35: Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfasern-Dämmebene

### Wassergehalt



### Relative Feuchte



### Temperatur

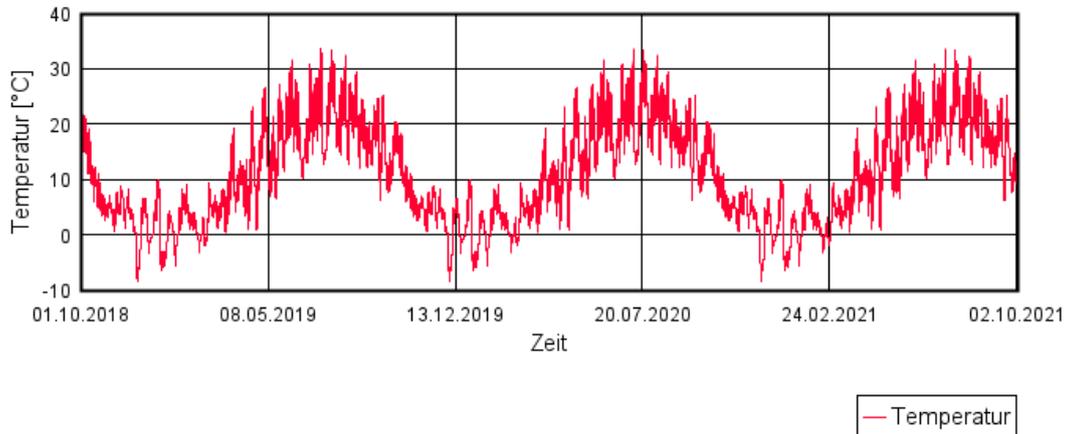
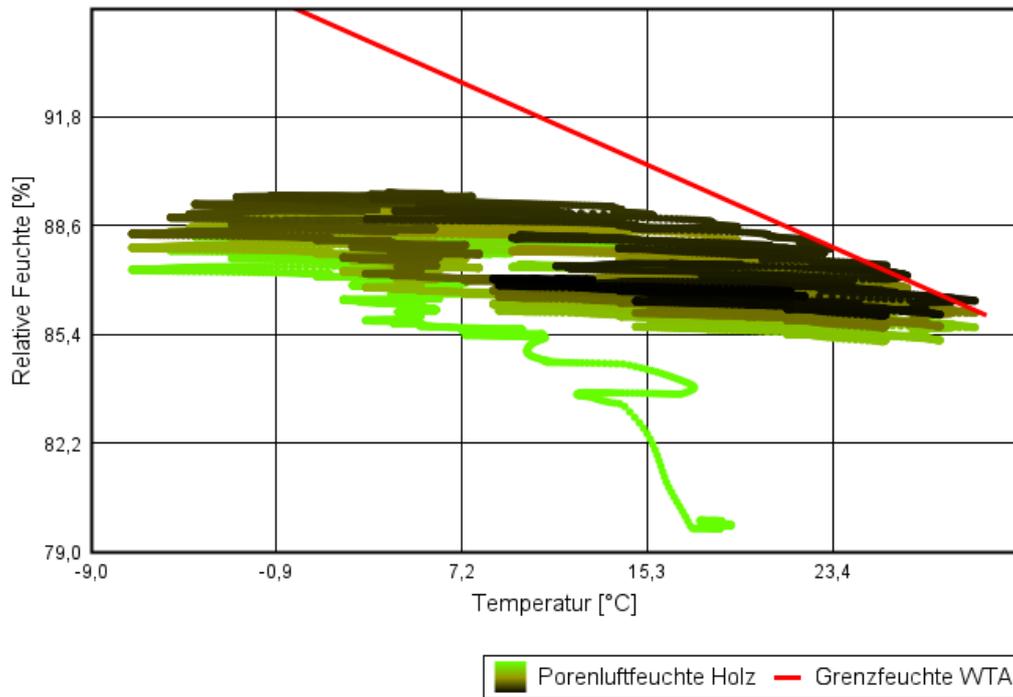


Abbildung 36: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung

### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8

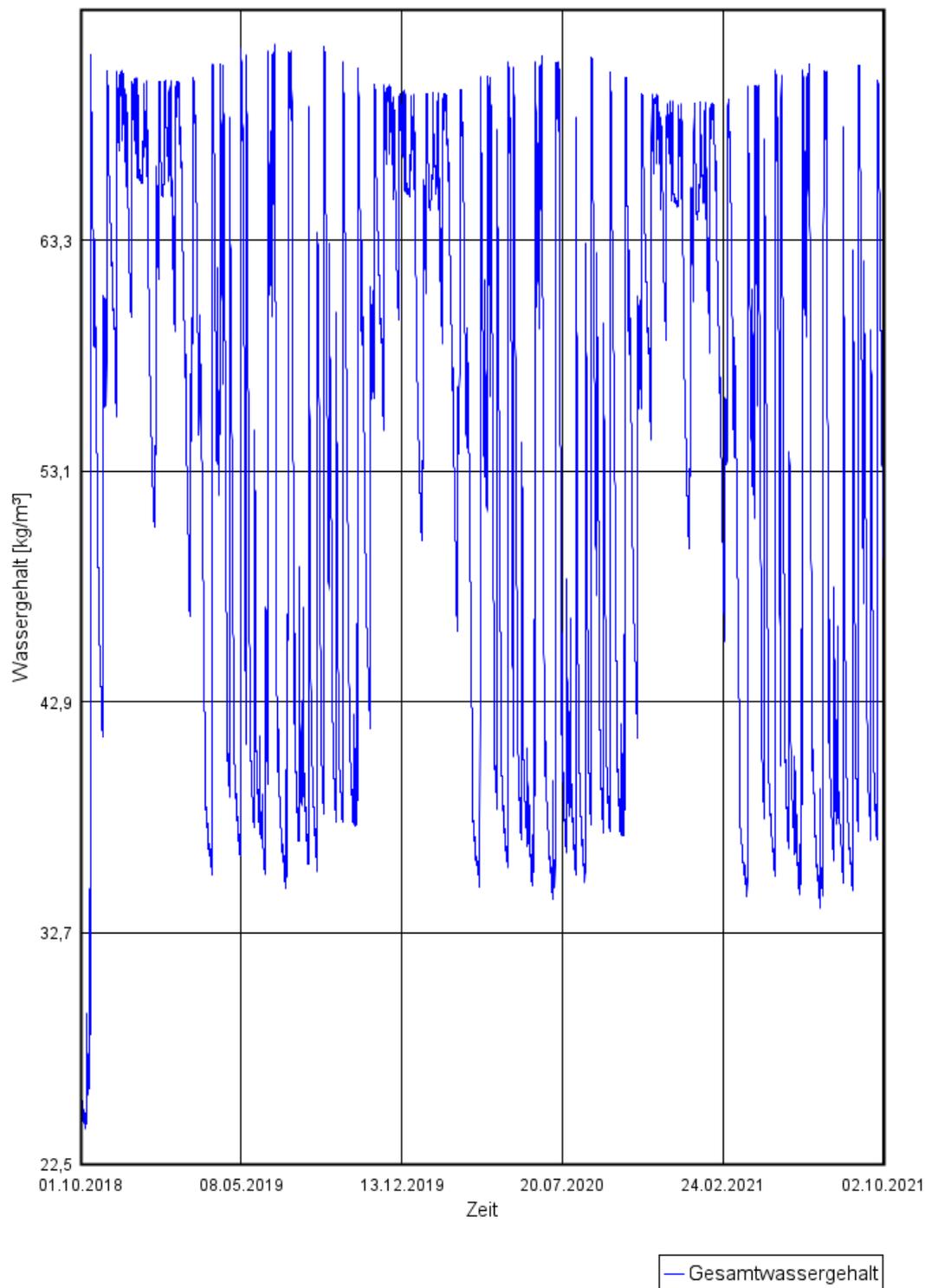


**Abbildung 37:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

9.5 Auswertung Massiv- und Leichtbauweise mit Dämmalternative, mit Fehlstelle und verschiedenen äußeren und inneren Abschlüssen

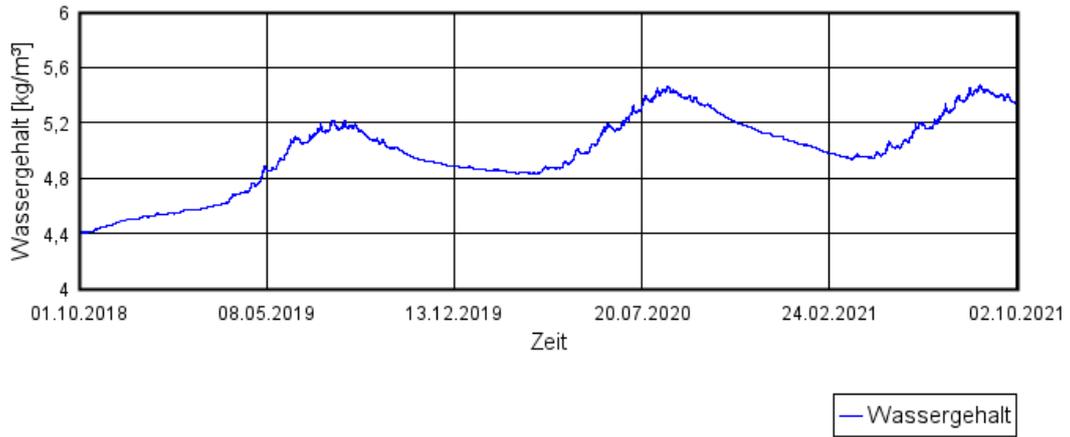
9.5.1 Massivbauweise, Gründach, Kork-Dämmung, Bitumen-Dachabdichtung, Kombination aus innerer und äußerer Fehlstelle und feuchtevariabler Dampfbremse

**Gesamtwassergehalt**

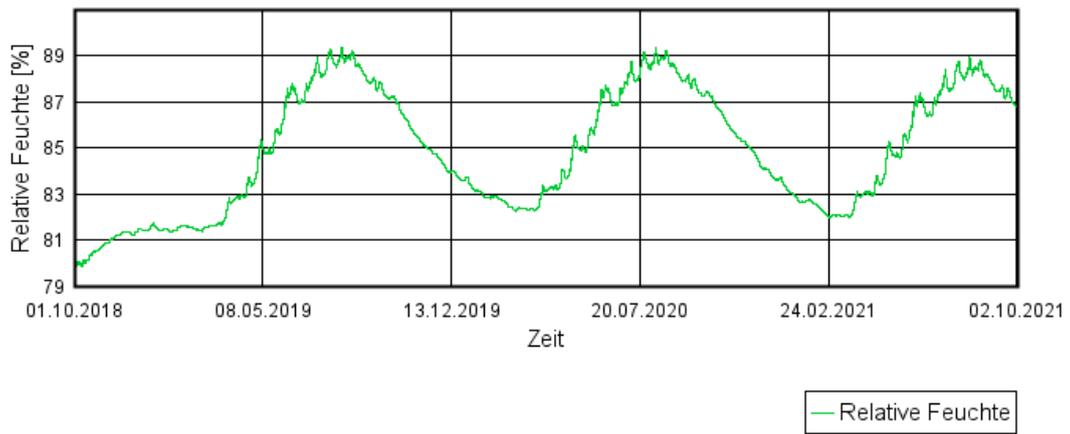


**Abbildung 38:** Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

### Wassergehalt



### Relative Feuchte



### Temperatur

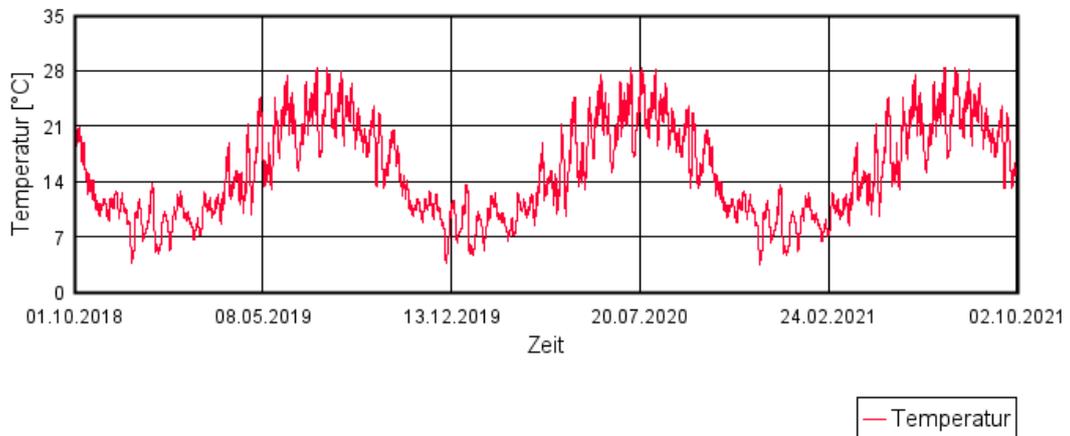
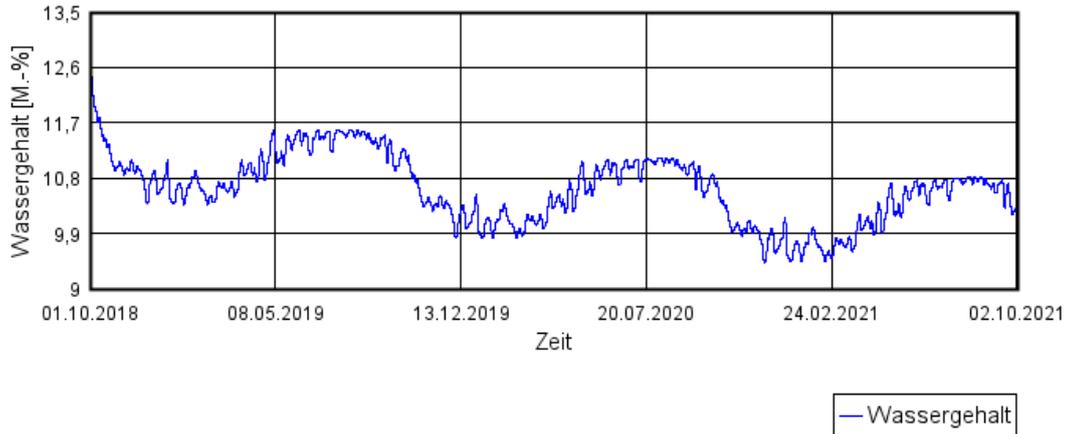
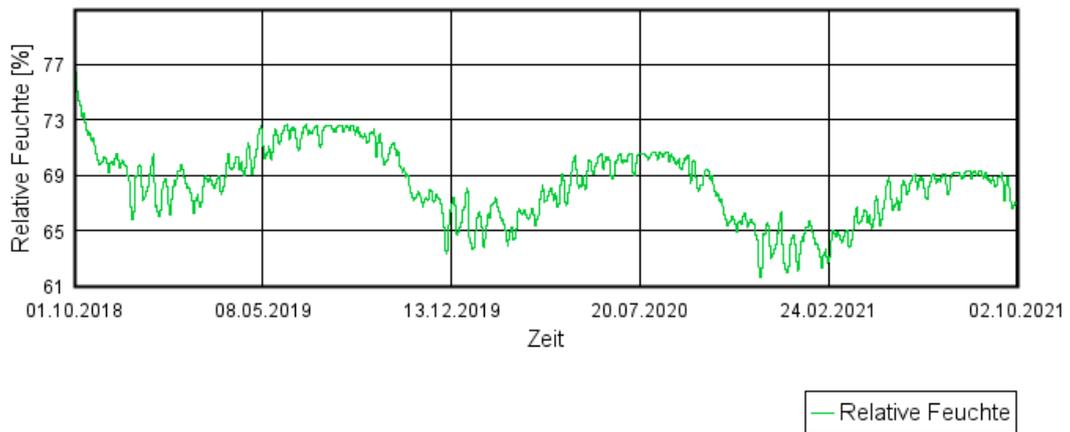


Abbildung 39: Wassergehaltsverlauf der gesamten Kork Dämmebene

### Wassergehalt



### Relative Feuchte



### Temperatur

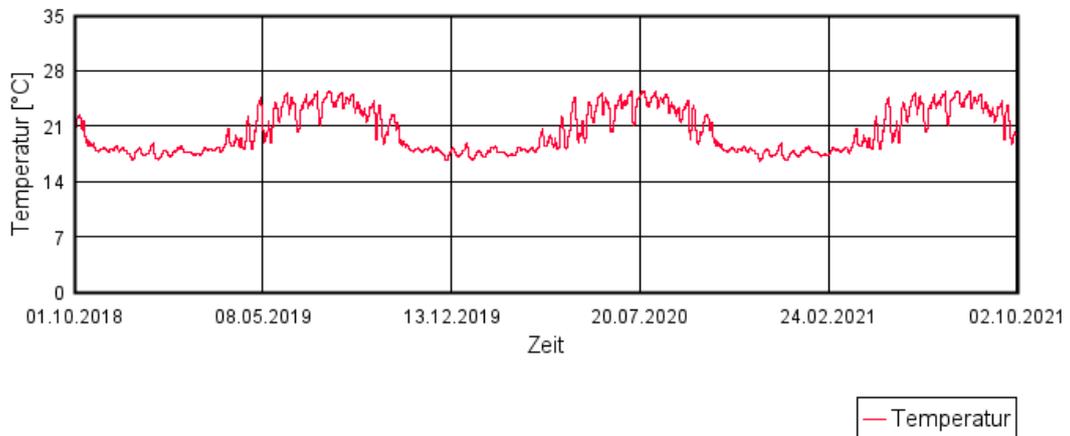
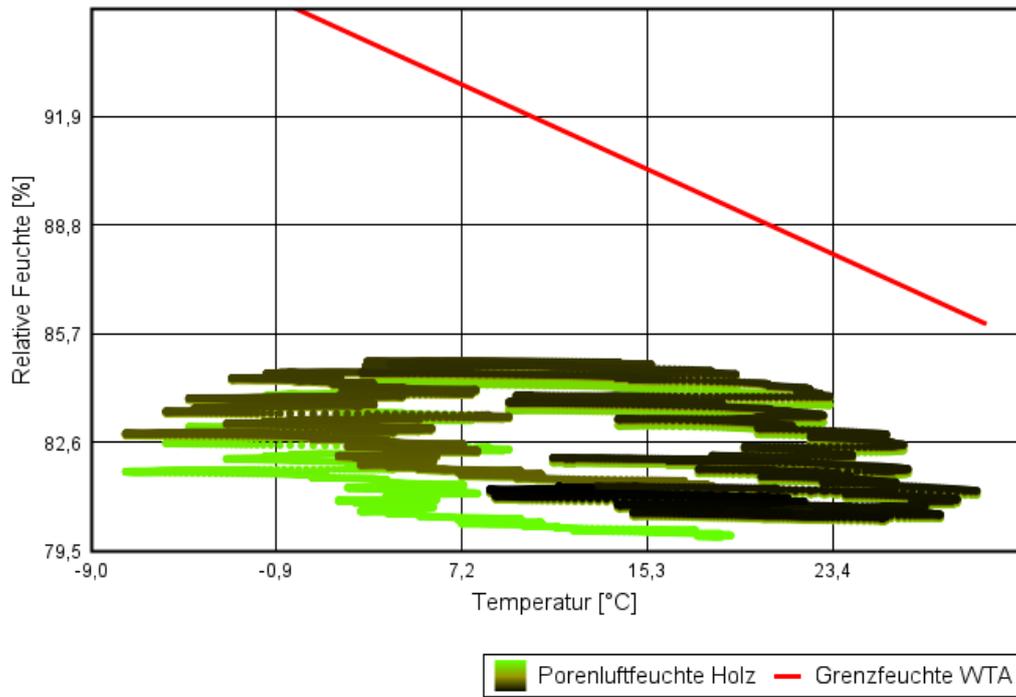


Abbildung 40: Wassergehaltsverlauf der gesamten Massivholzschicht

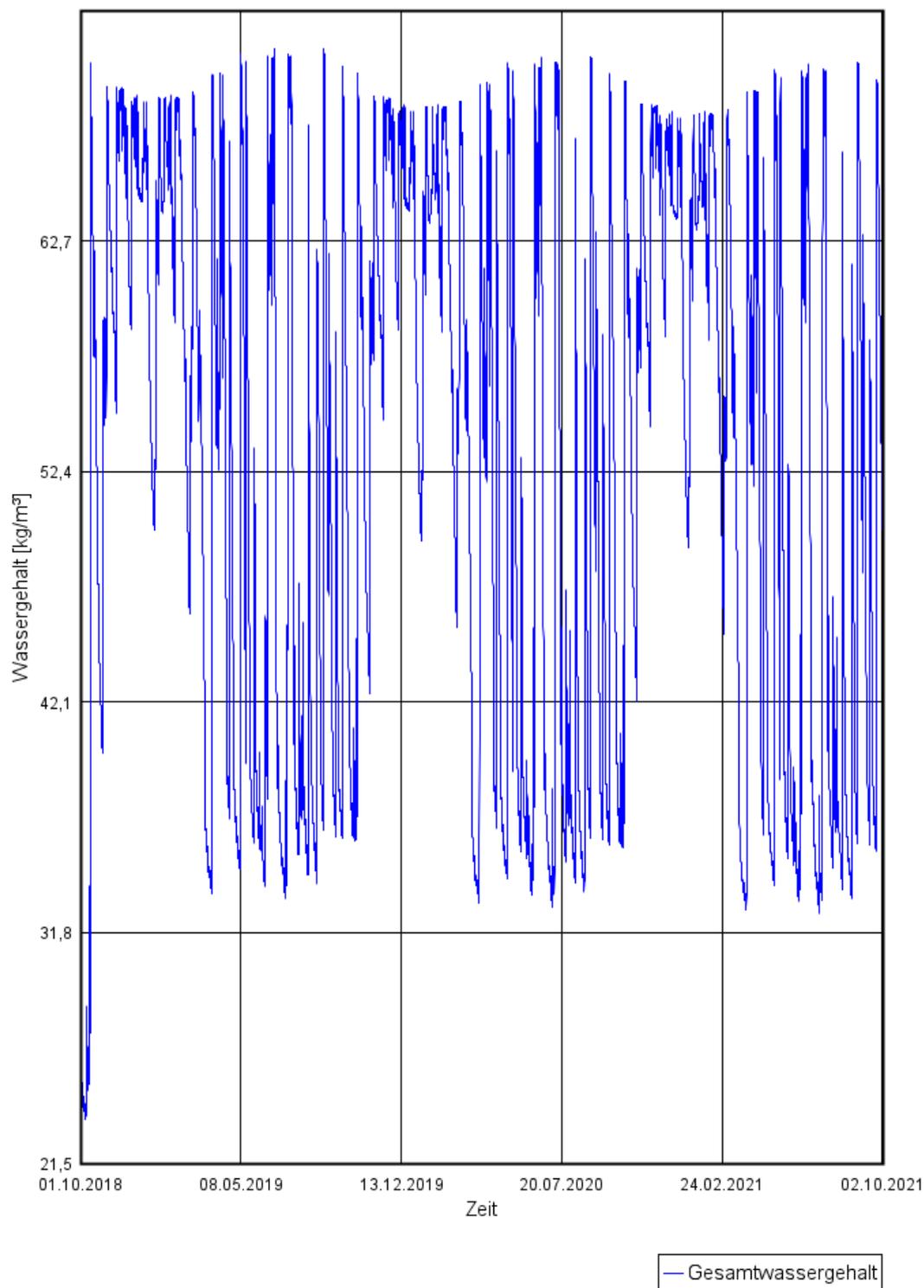
### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 41:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

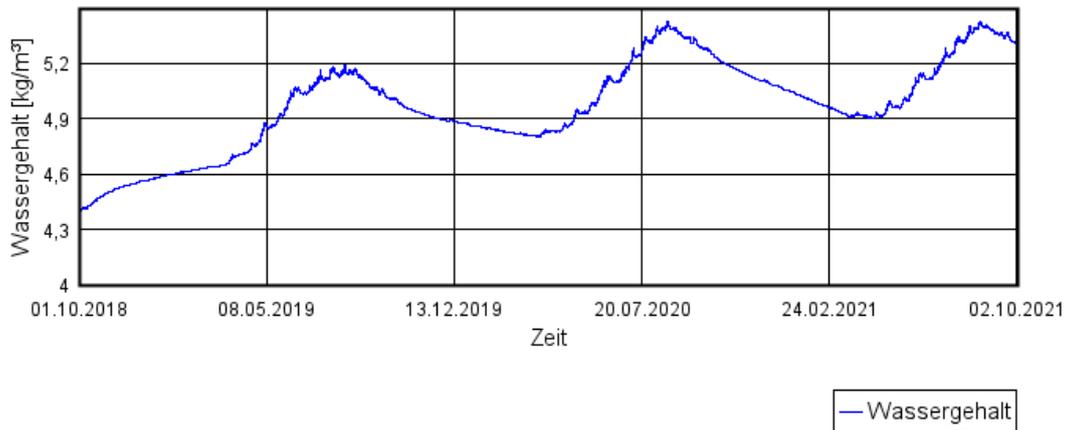
9.5.2 Gründach mit EPDM Dachabdichtung, feuchtevariable innere Dampfbremse und der Kombination aus innerem und äußerem Fehler

**Gesamtwassergehalt**

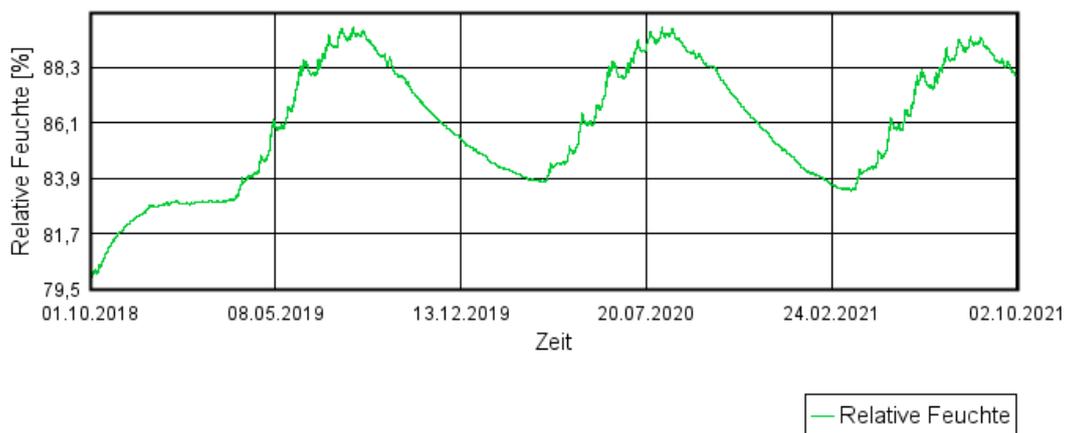


**Abbildung 42:** Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

## Wassergehalt



## Relative Feuchte



## Temperatur

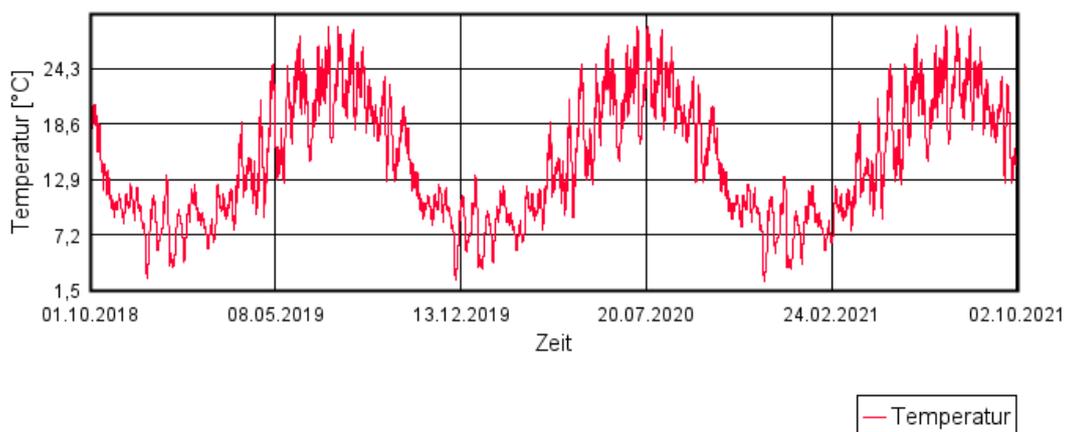
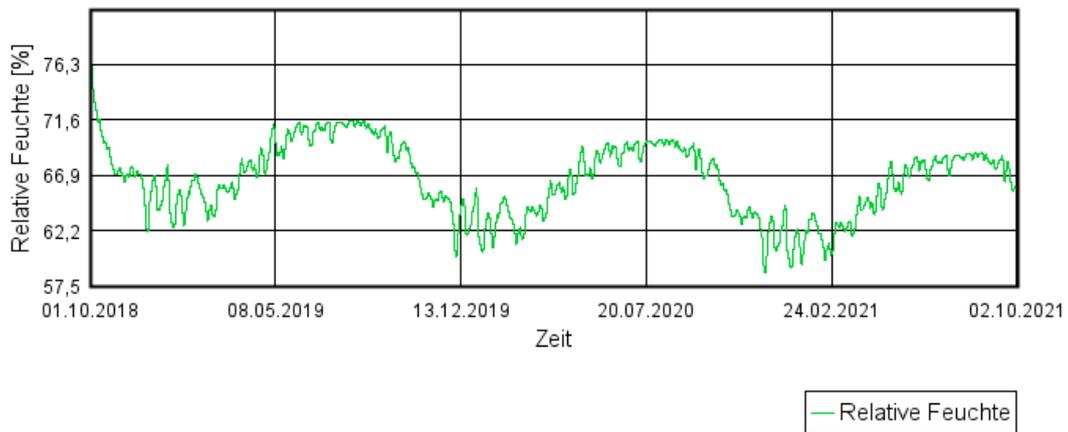


Abbildung 43: Wassergehaltsverlauf der gesamten Kork Dämmebene

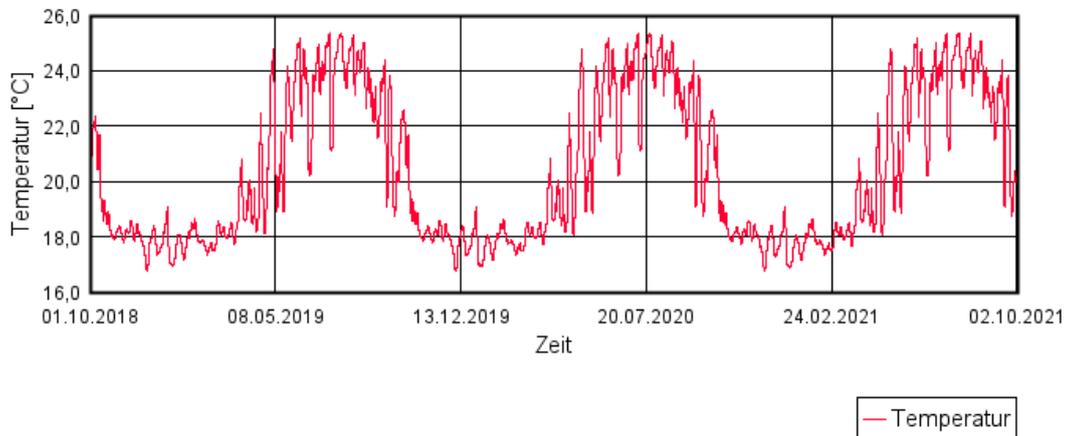
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

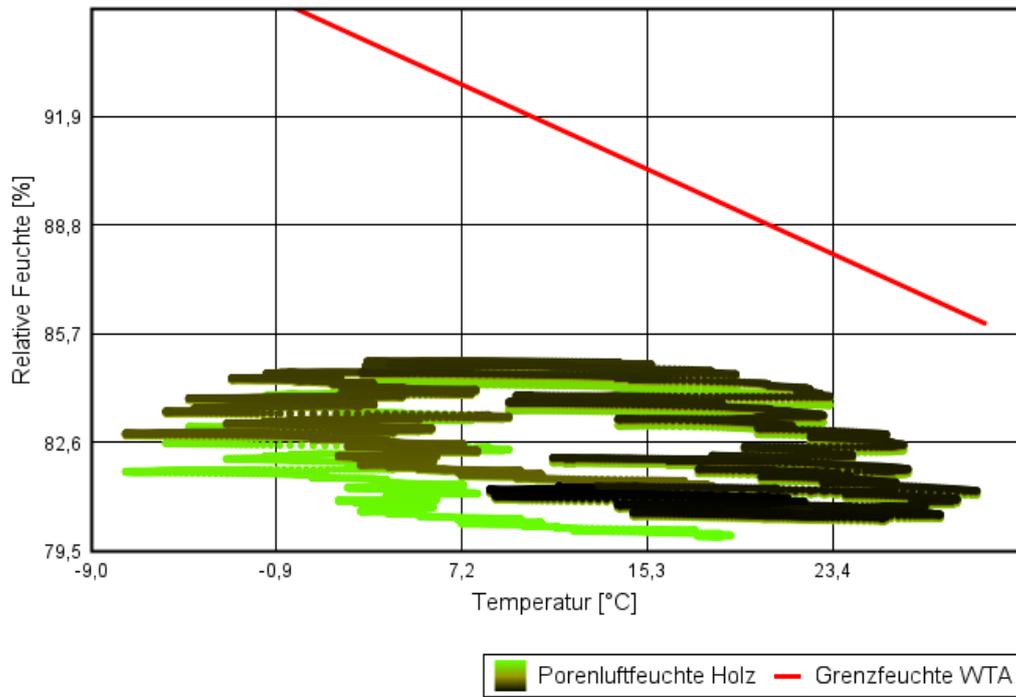


## Temperatur



**Abbildung 44:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Massivholzschicht

### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 45:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

9.5.3 Leichtbauweise, Gründach, Schafwoll-Dämmung, Bitumen-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse

### Gesamtwassergehalt

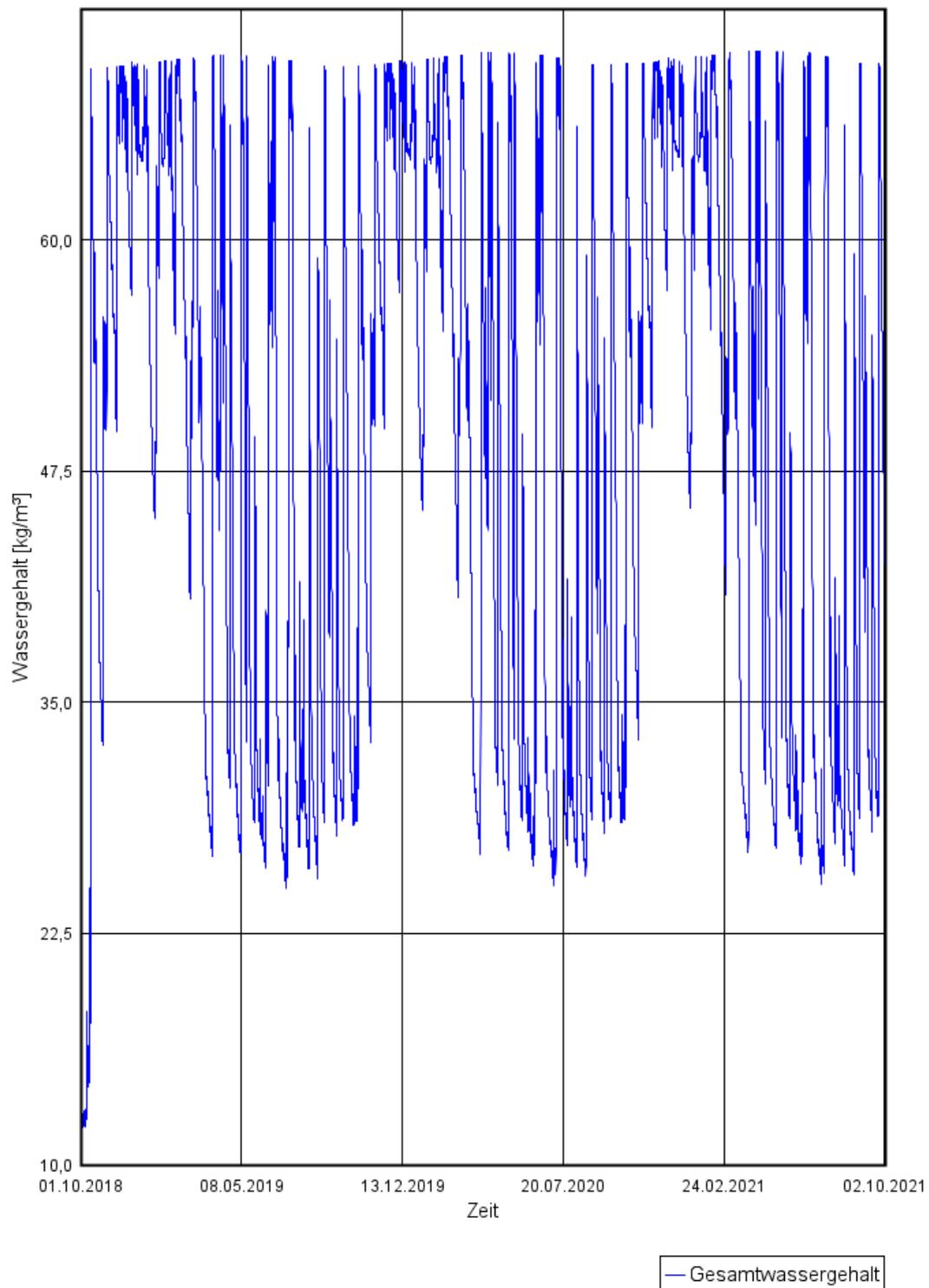
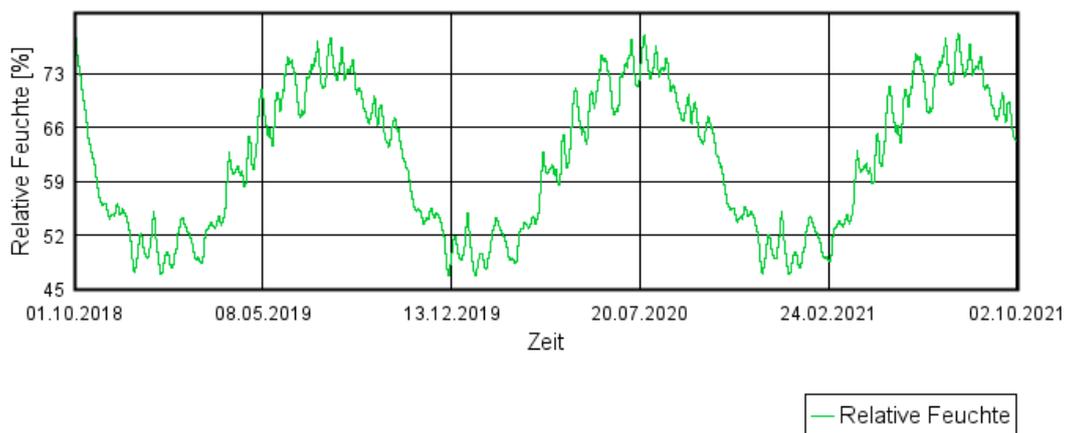


Abbildung 46: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

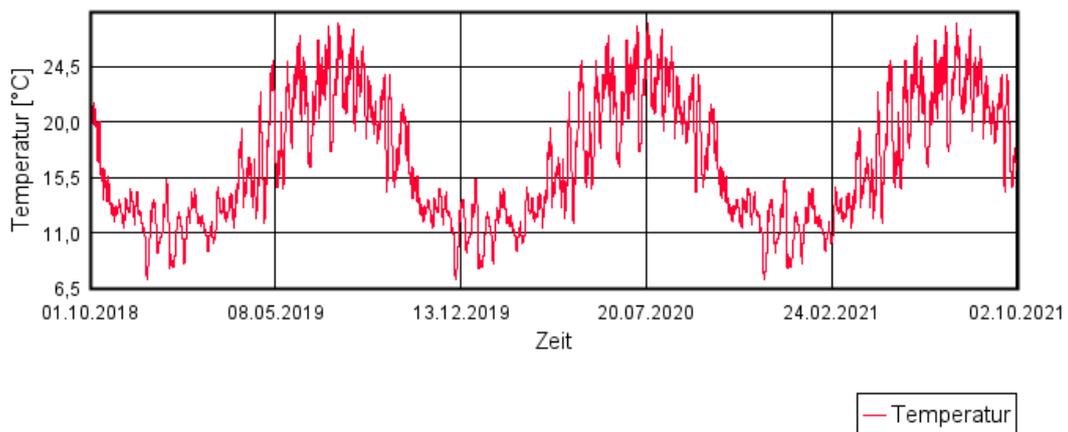
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

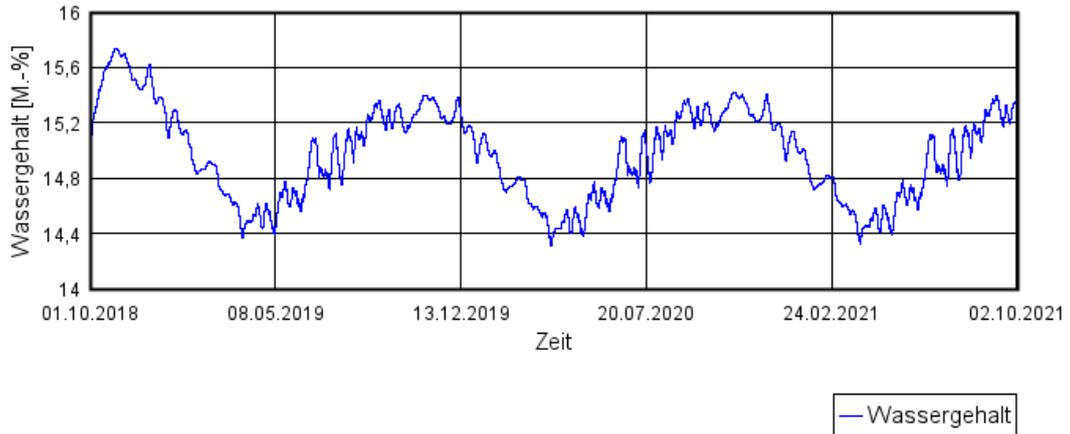


## Temperatur

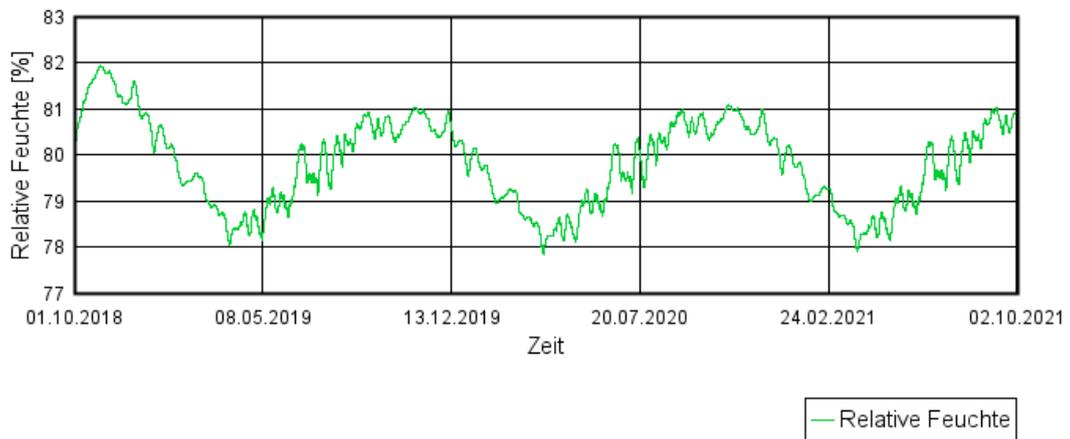


**Abbildung 47:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Schafwolle Dämmebene

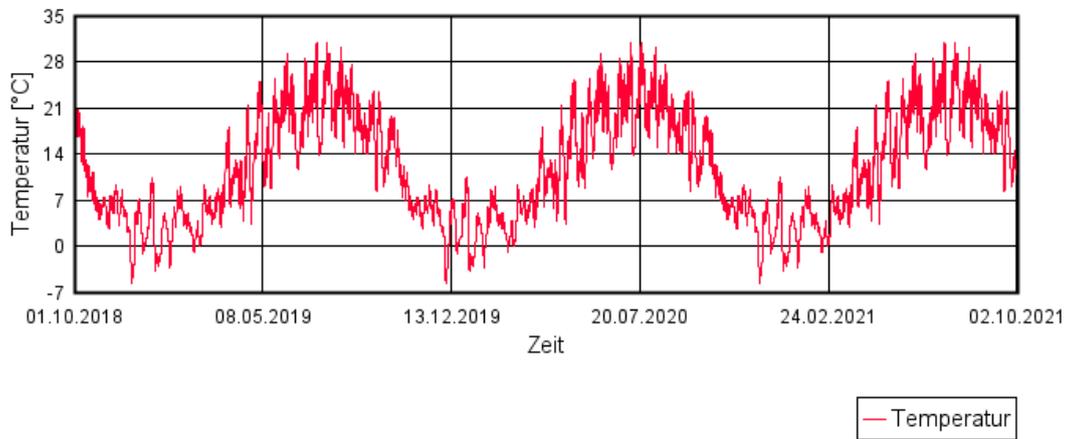
### Wassergehalt



### Relative Feuchte

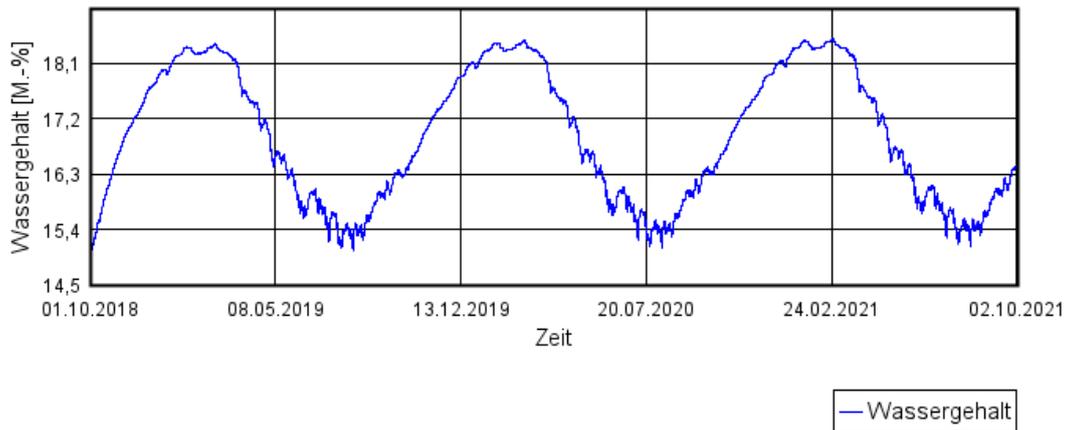


### Temperatur

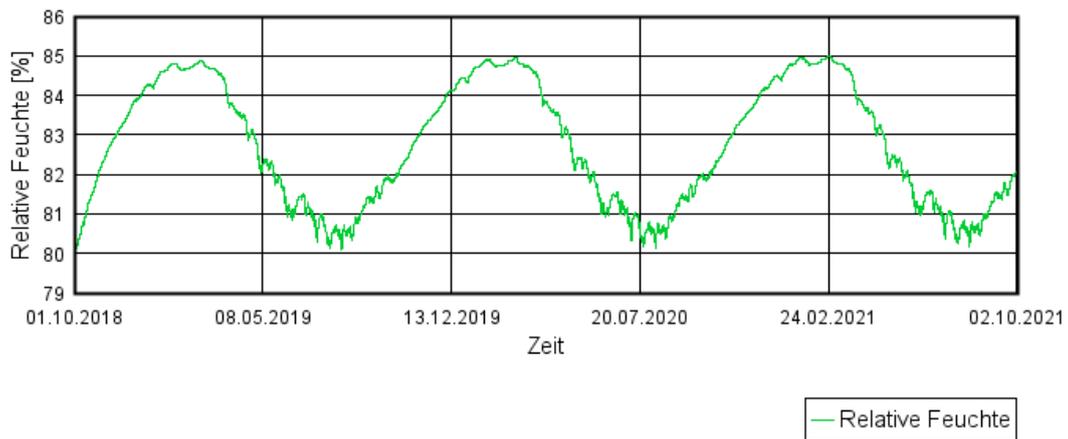


**Abbildung 48:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfasern-Dämmebene

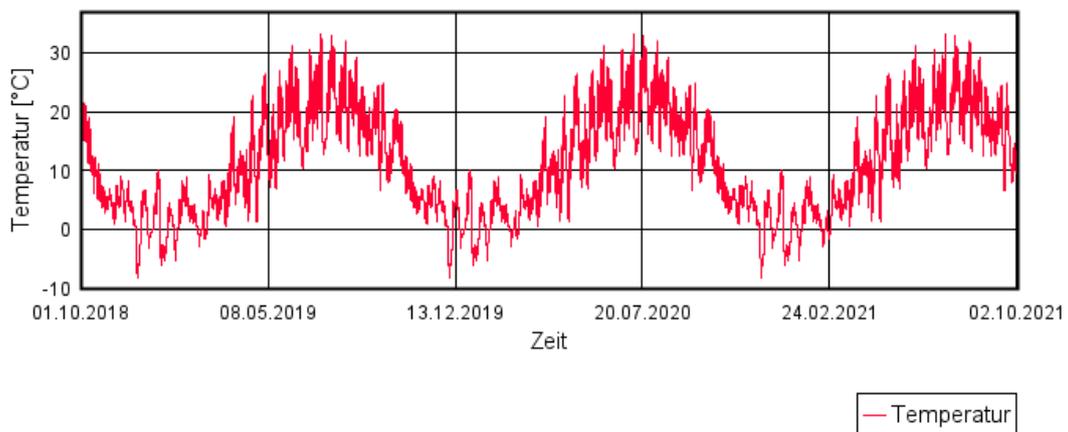
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

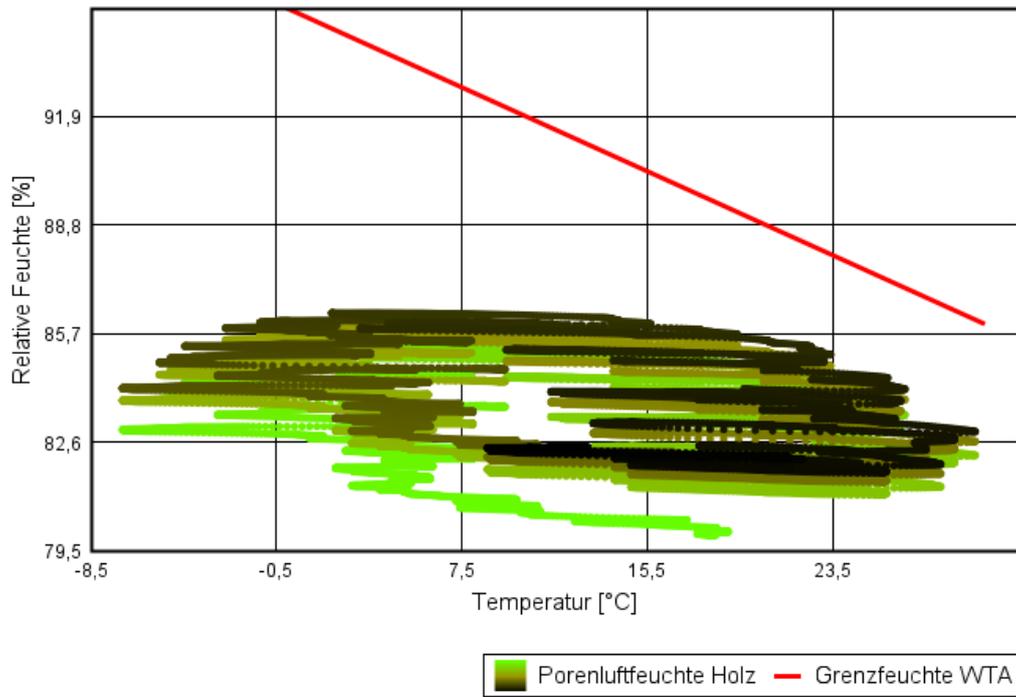


## Temperatur



**Abbildung 49:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung

### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 50:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

9.5.4 Leichtbauweise, Gründach, Schafwoll-Dämmung, EPDM-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse

### Gesamtwassergehalt

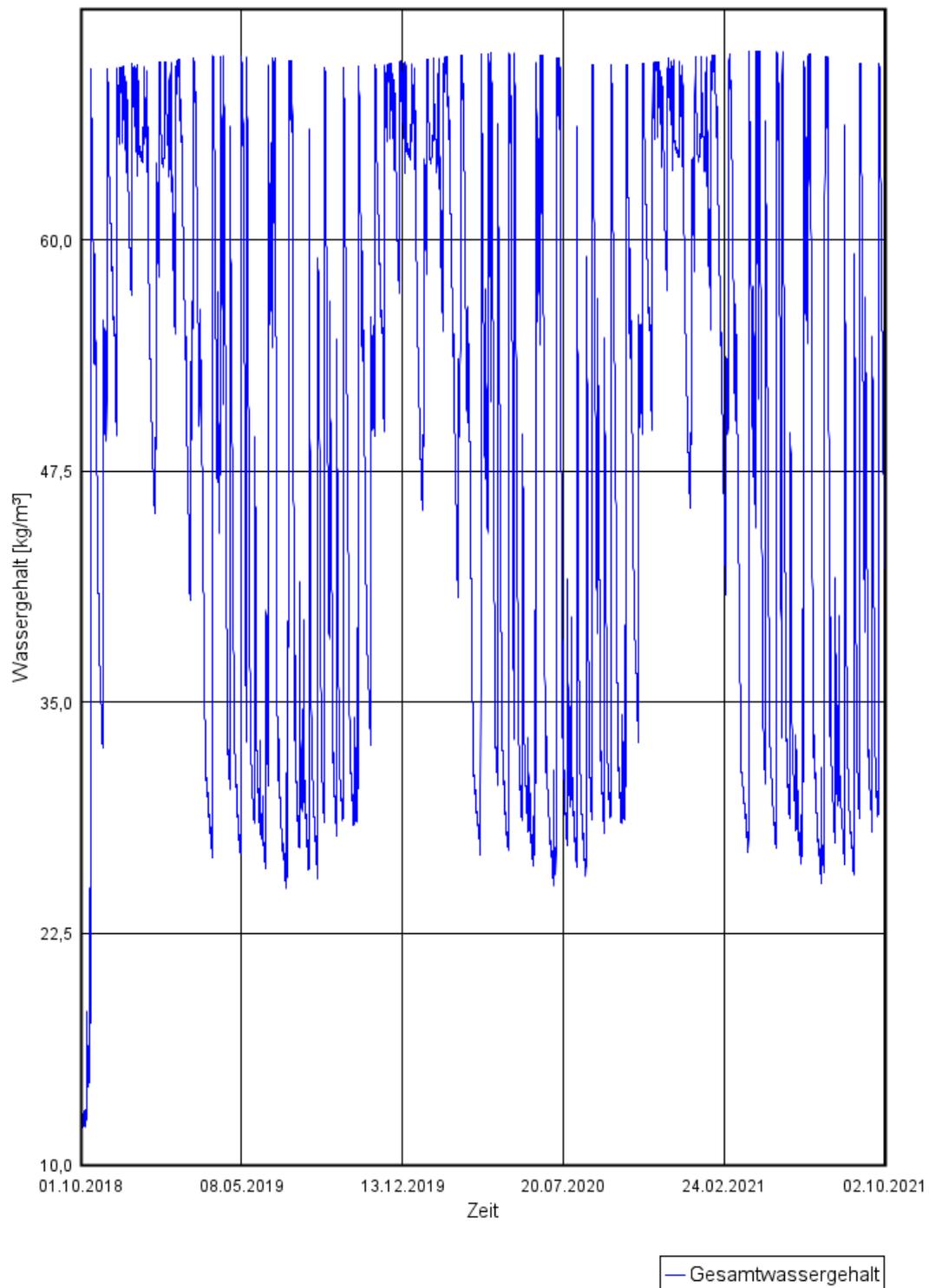
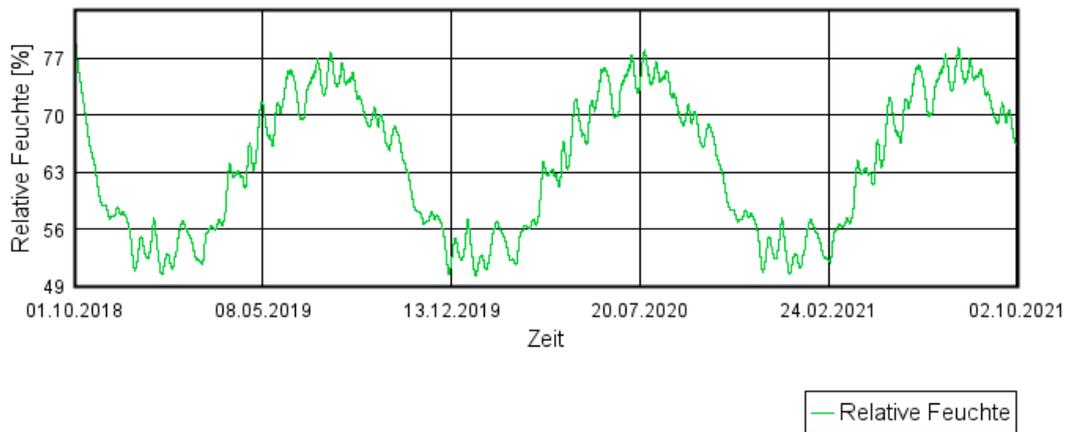


Abbildung 51: Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

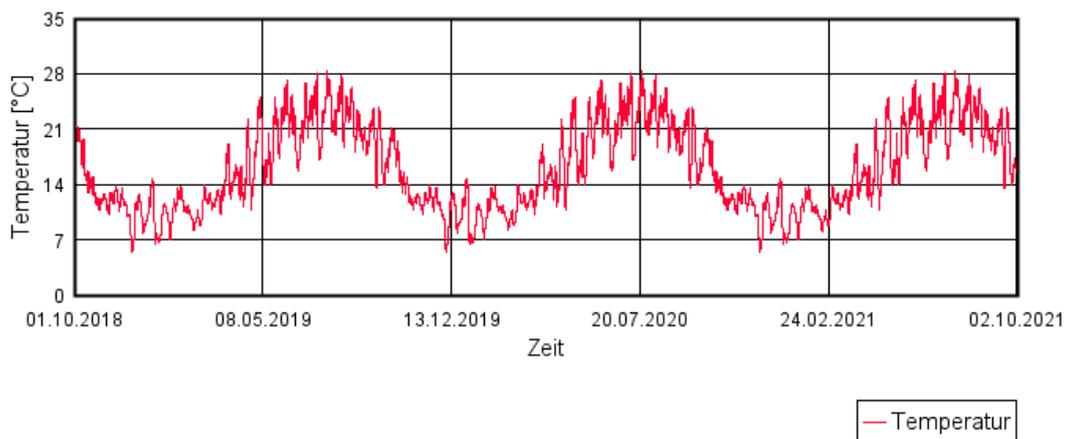
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

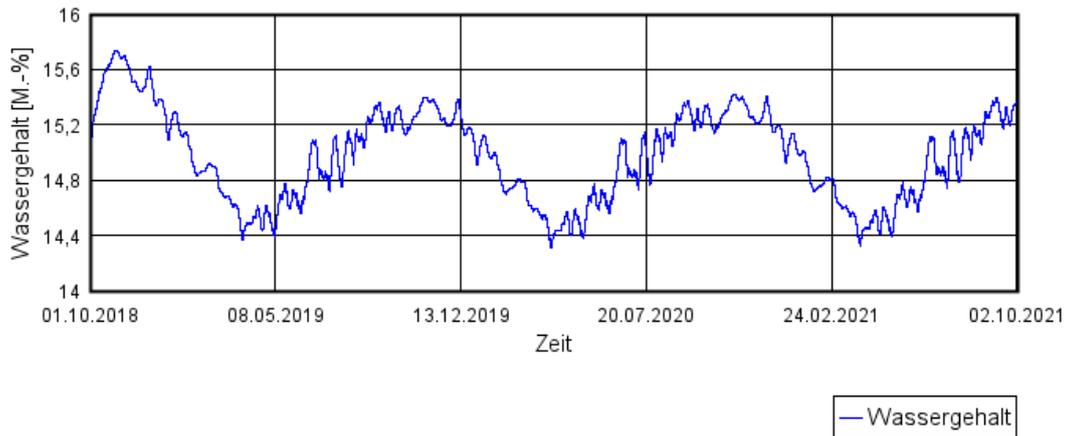


## Temperatur

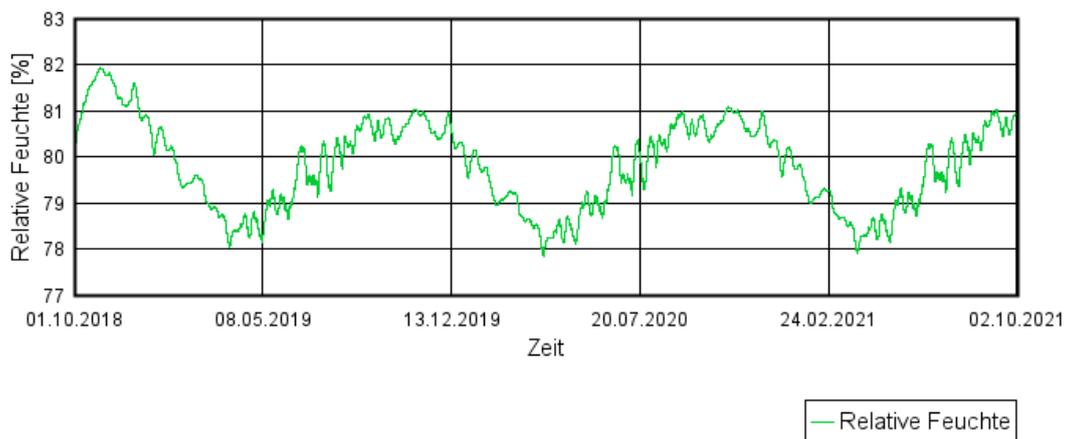


**Abbildung 52:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Schafwolle Dämmebene

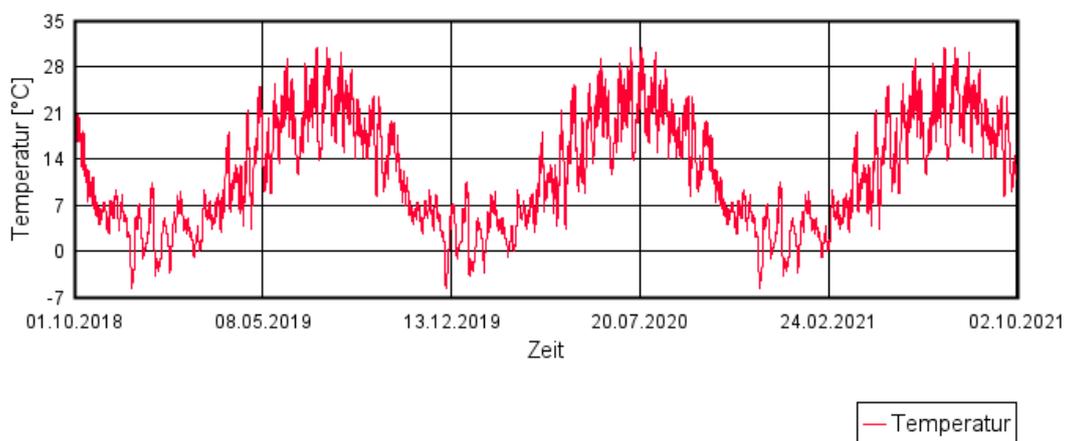
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

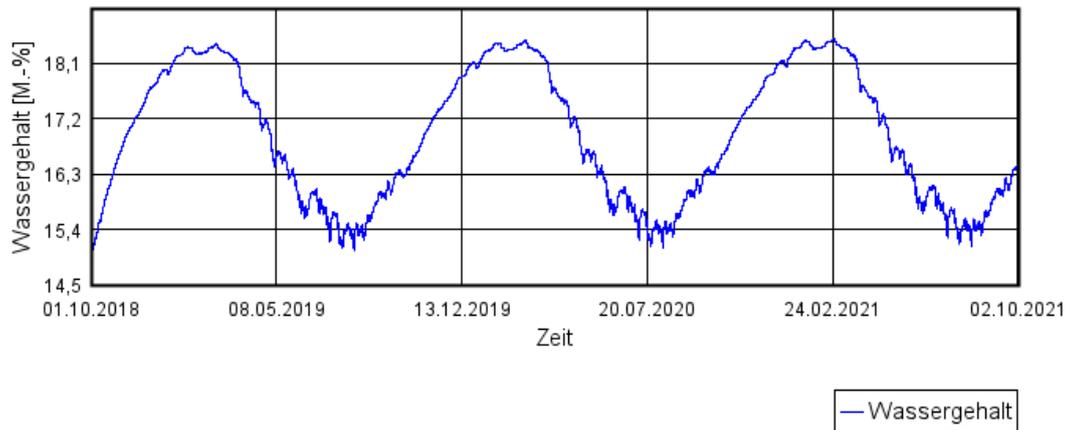


## Temperatur

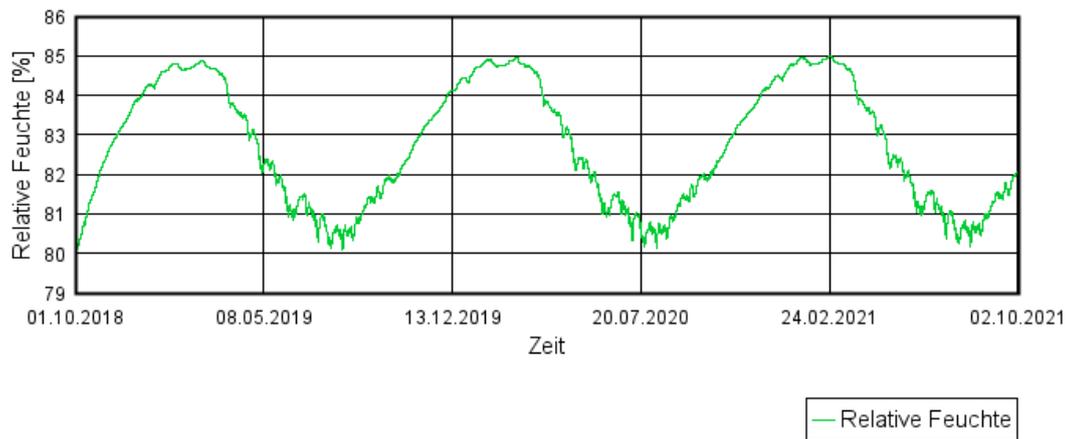


**Abbildung 53:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfasern-Dämmebene

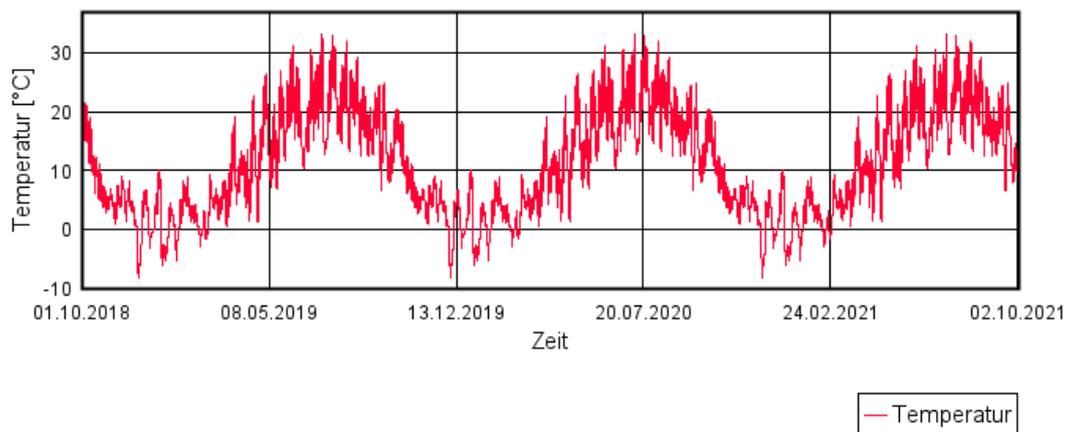
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

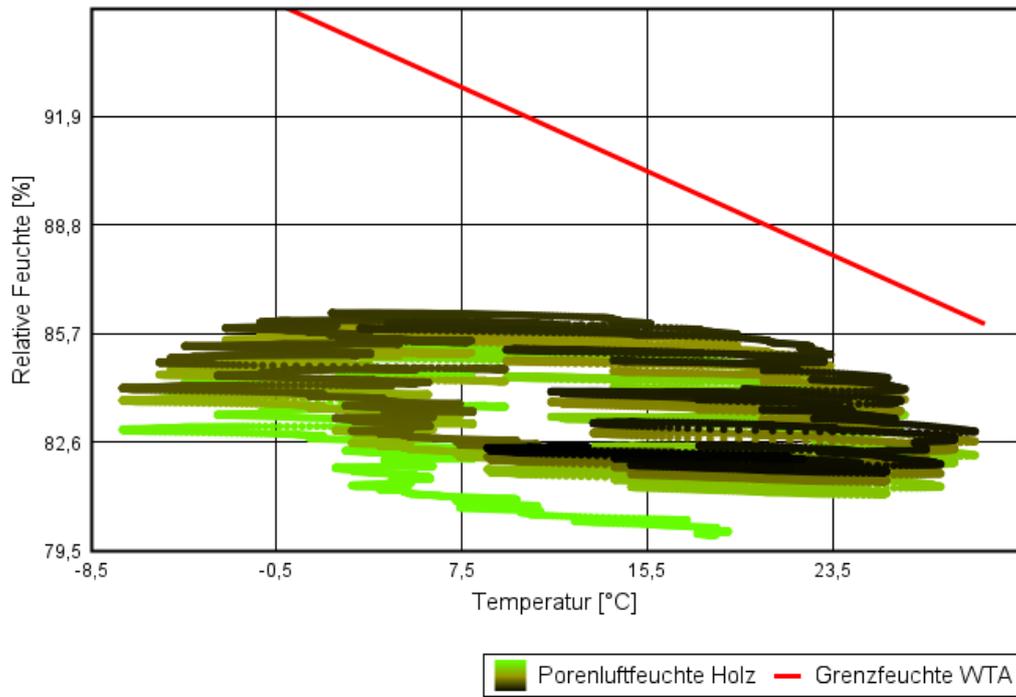


## Temperatur



**Abbildung 54:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung

### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8

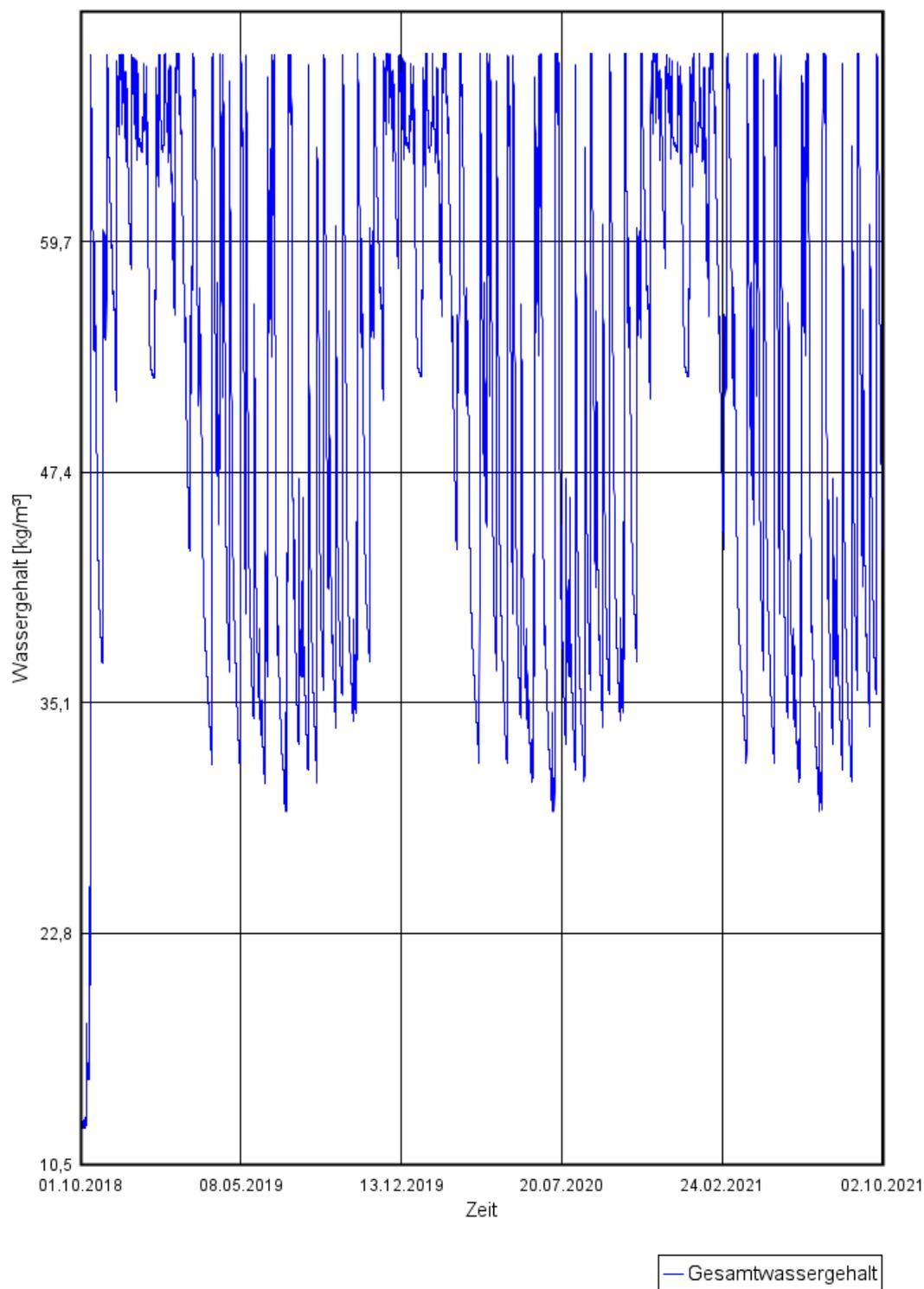


**Abbildung 55:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

9.6 Auswertung Leichtbauweise mit weiteren Dämmalternative, mit innerer Fehlstelle, Bitumen- und EPDM-Dachabdichtung und feuchtevariabler Dampfbremse

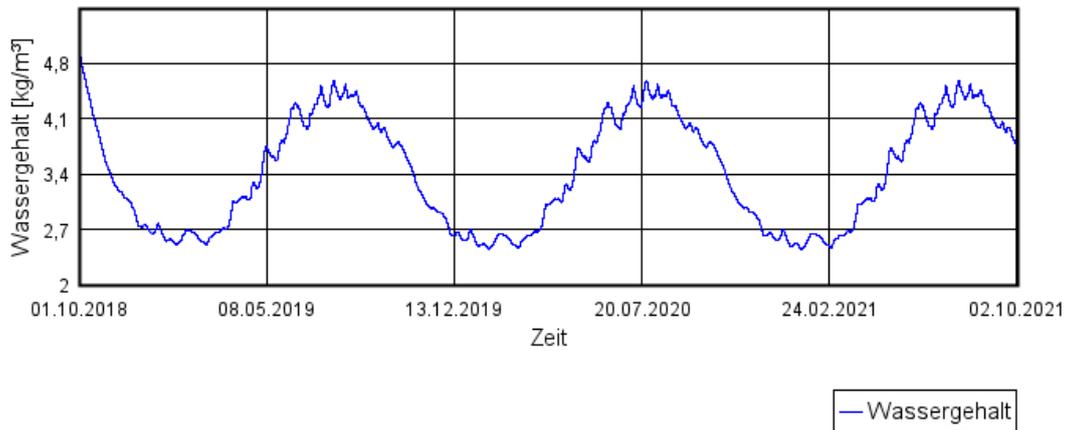
9.6.1 Leichtbauweise, Flachs-Dämmung, Bitumen-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse

**Gesamtwassergehalt**

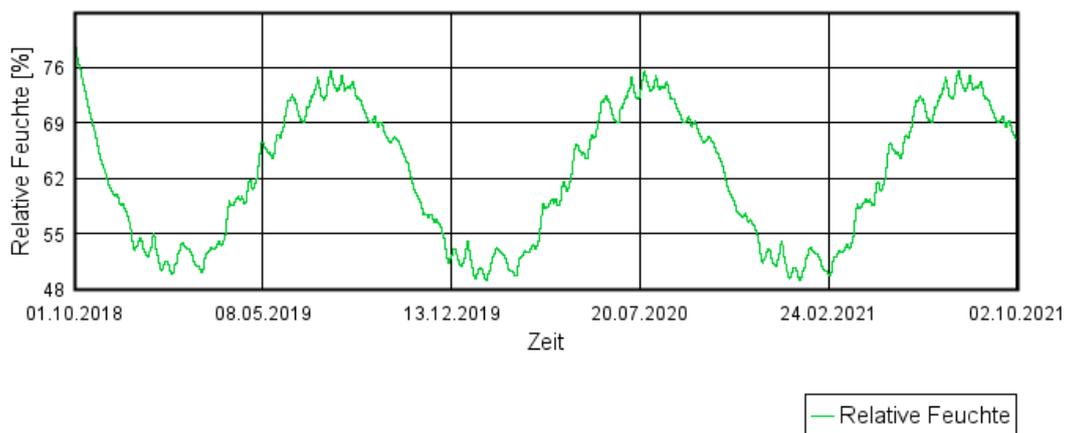


**Abbildung 56:** Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

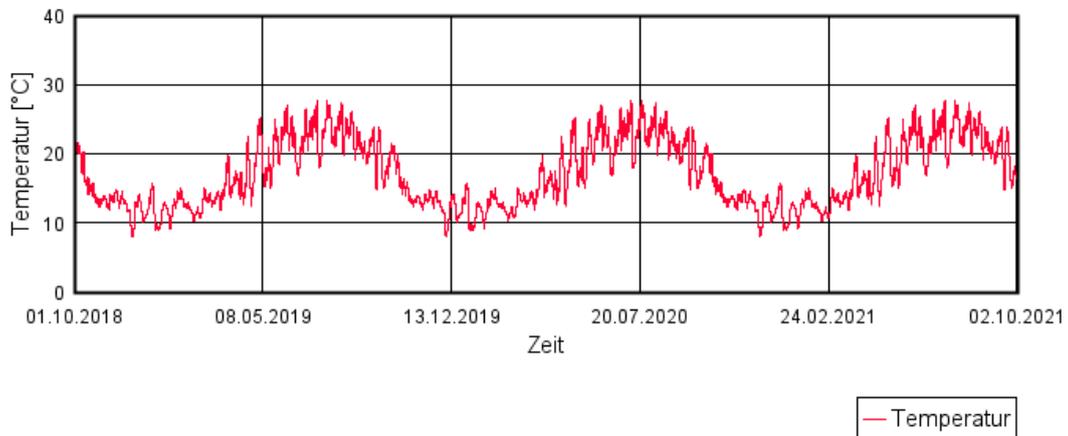
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

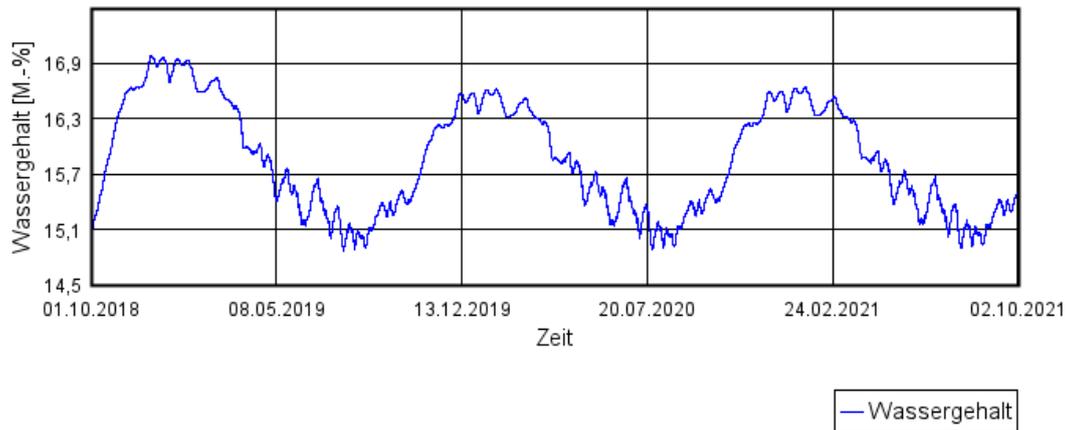


## Temperatur

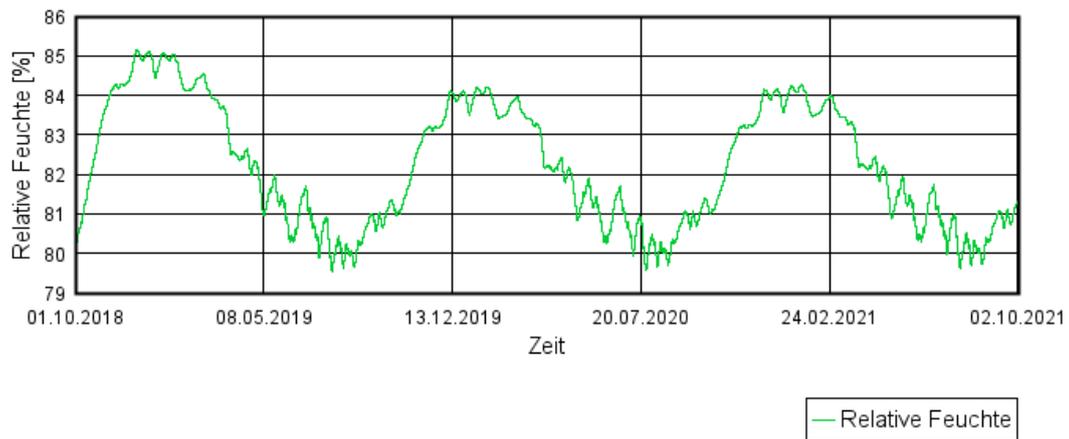


**Abbildung 57:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Flachs-Dämmebene

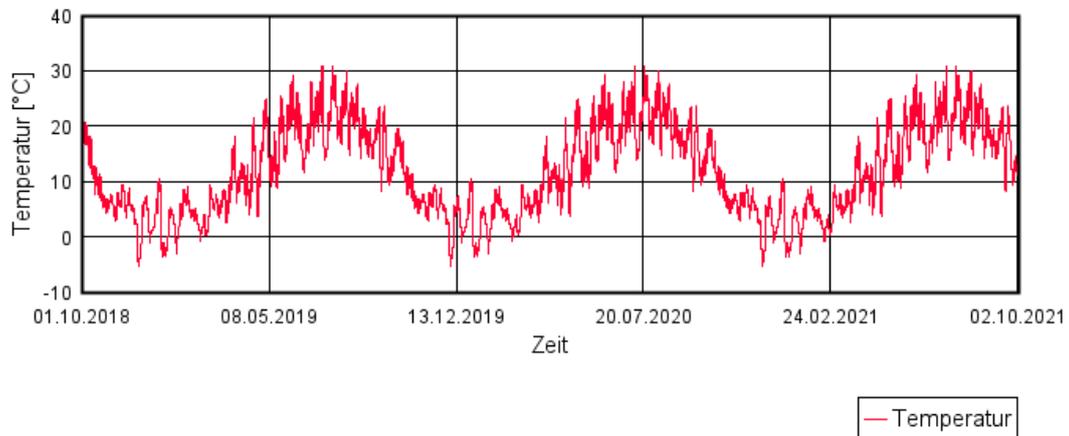
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

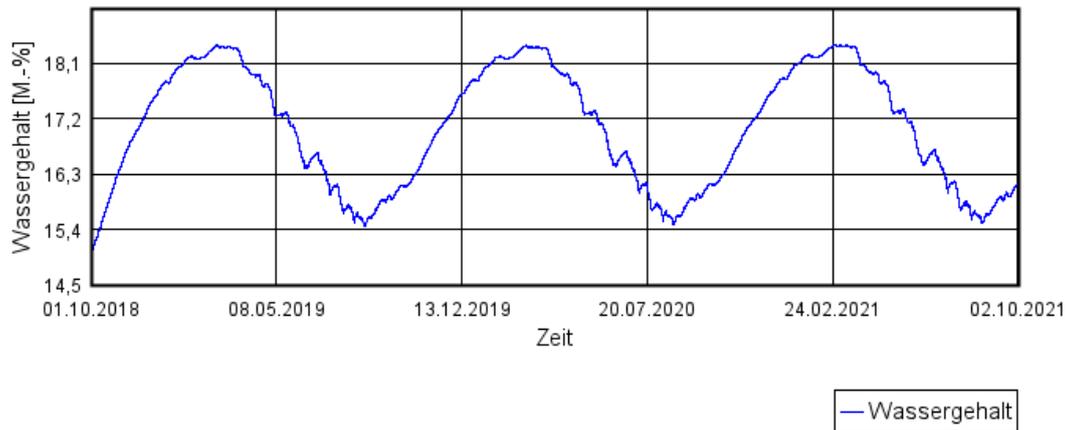


## Temperatur

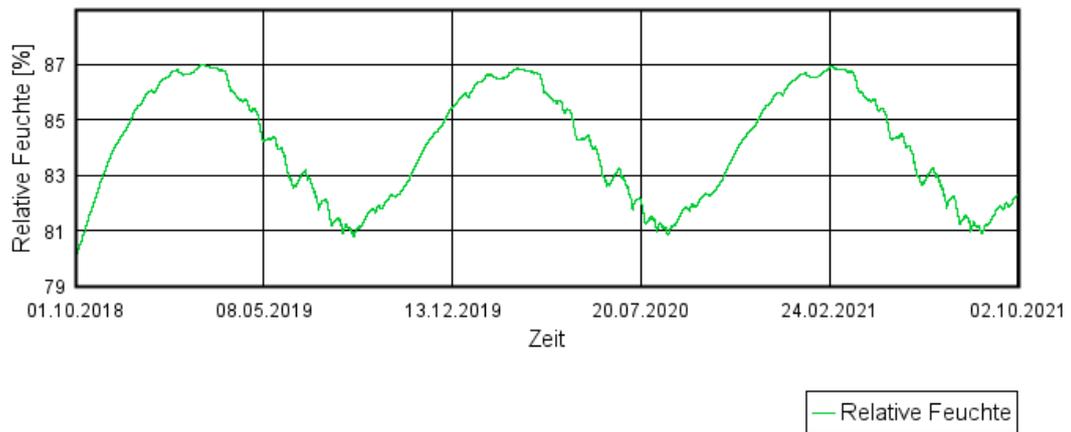


**Abbildung 58:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfasern-Dämmebene

## Wassergehalt



## Relative Feuchte



## Temperatur

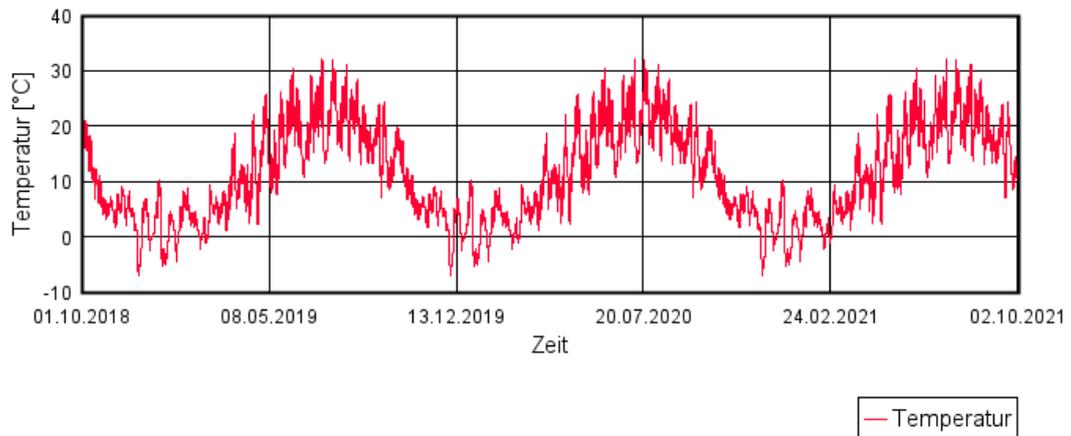
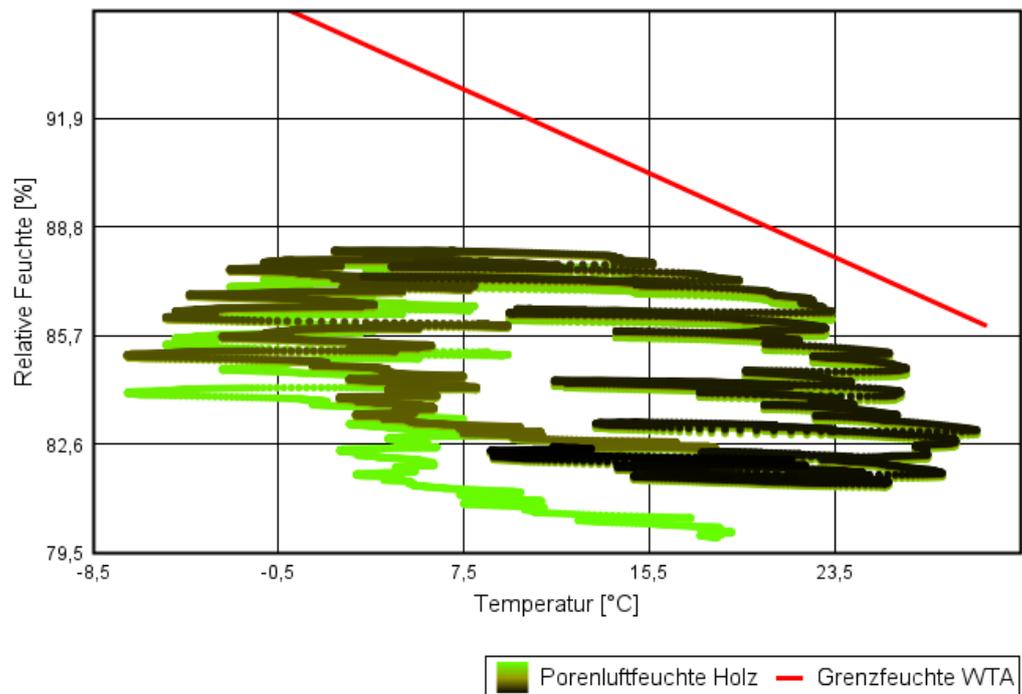


Abbildung 59: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung

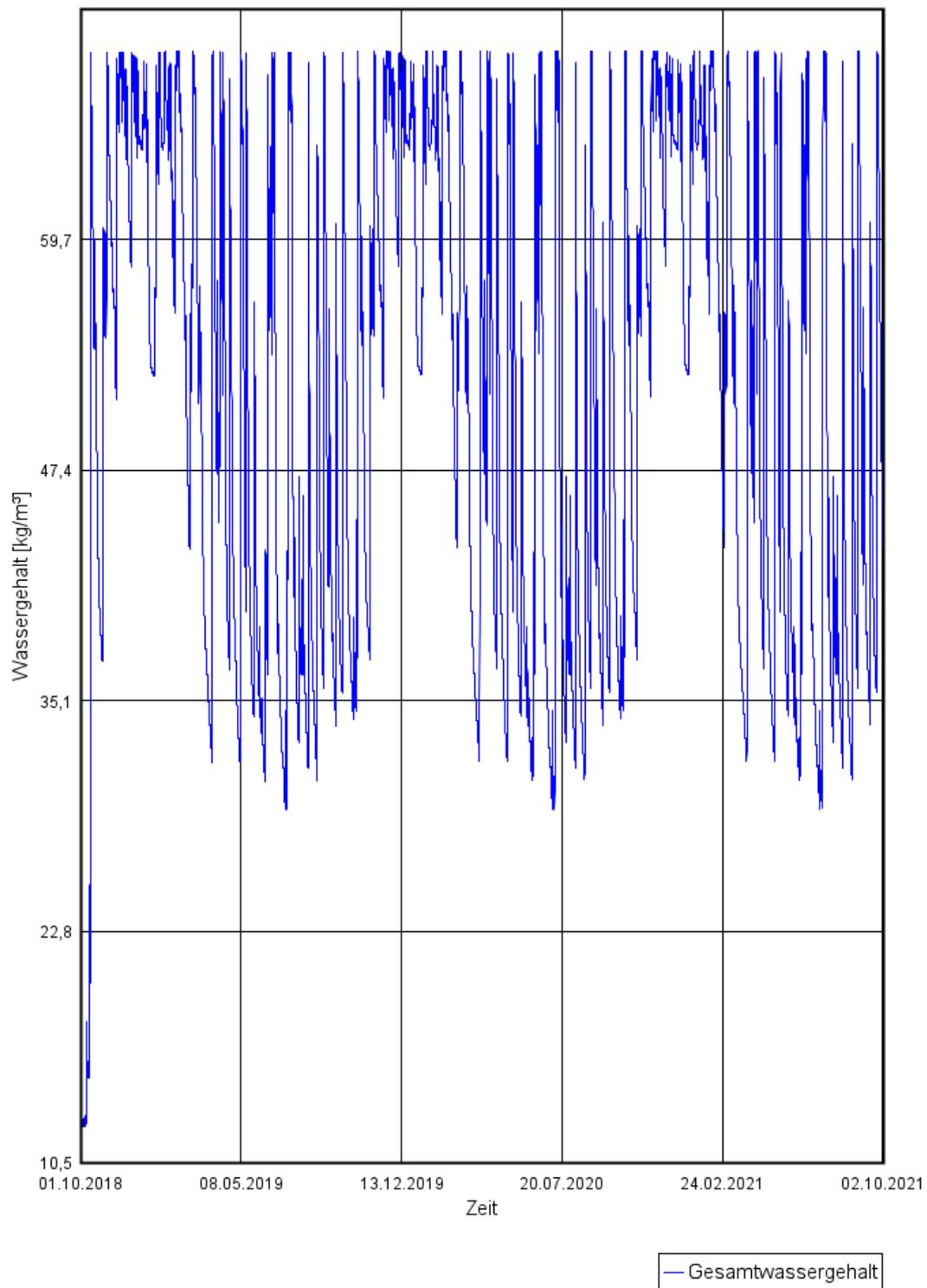
### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 60:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

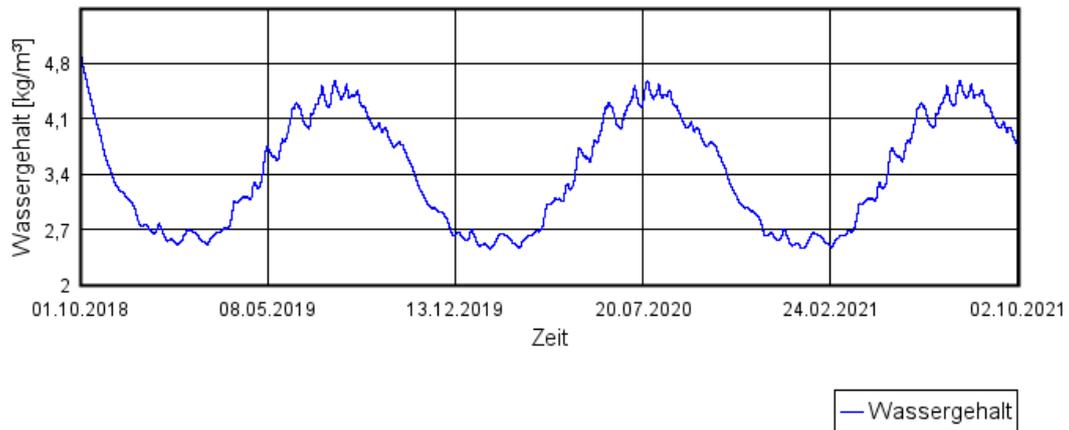
9.6.2 Leichtbauweise, Flachs-Dämmung, EPDM-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse

**Gesamtwassergehalt**

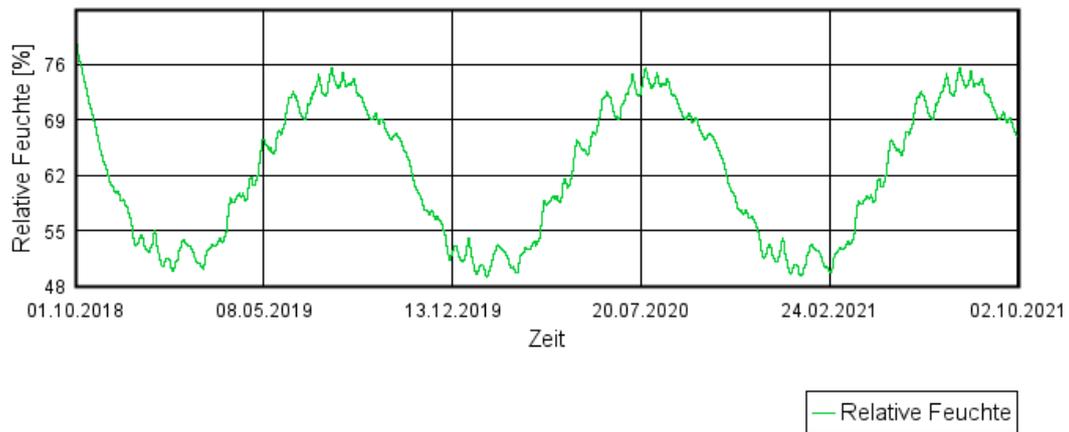


**Abbildung 61:** Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

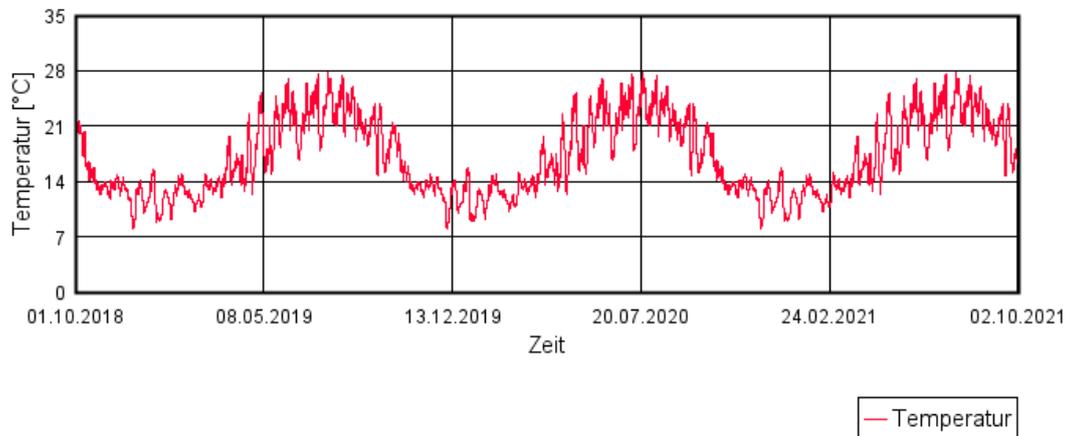
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

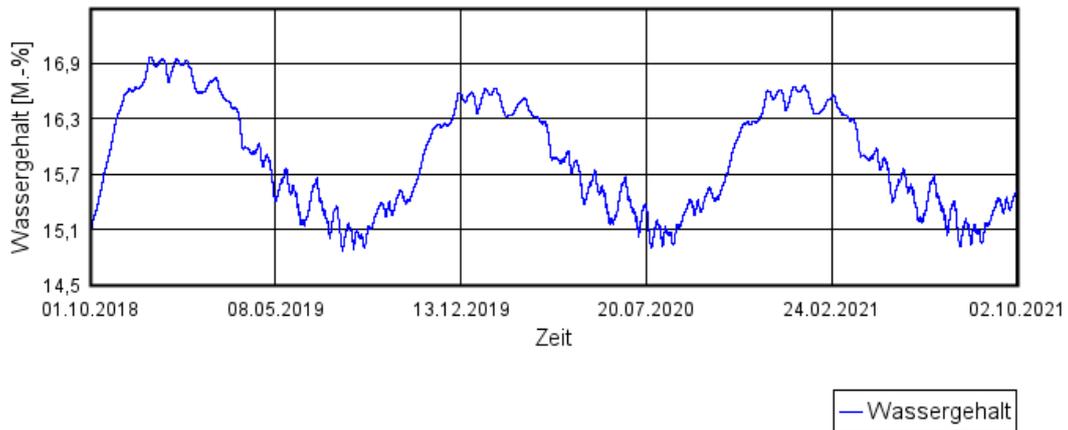


## Temperatur

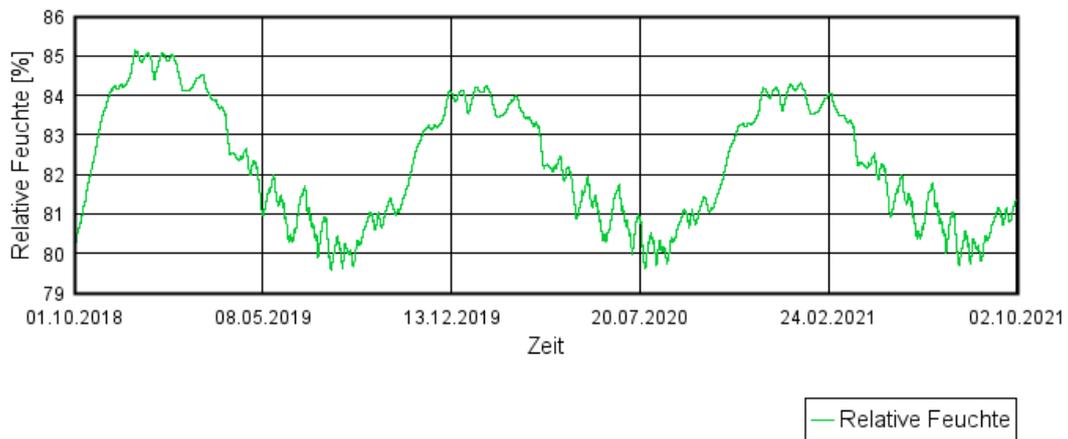


**Abbildung 62:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Flachs-Dämmebene

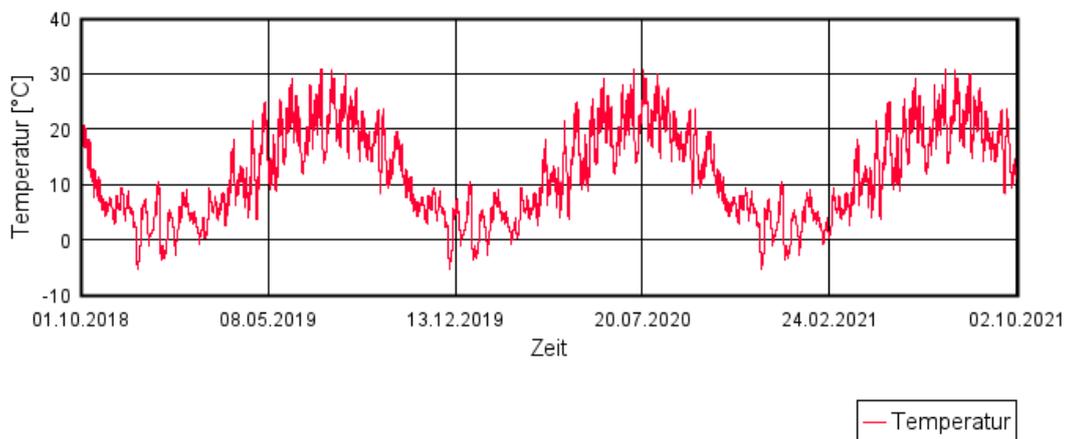
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

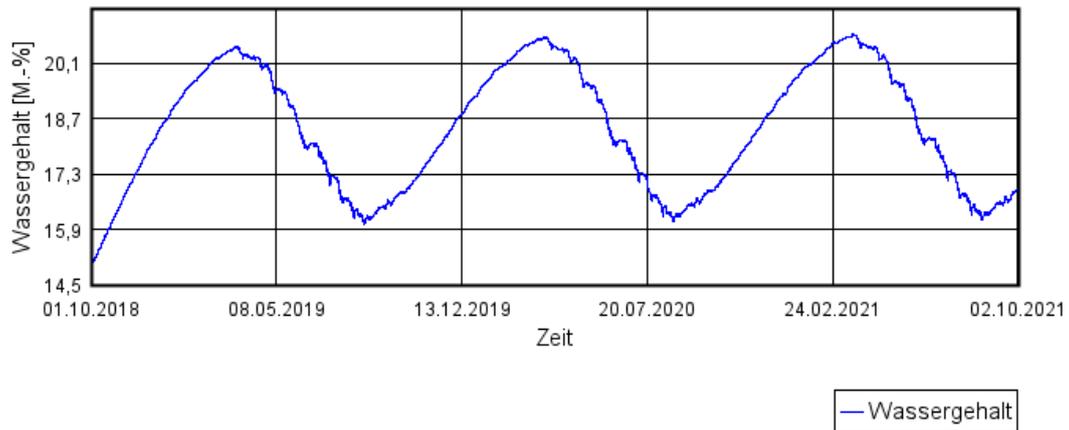


## Temperatur

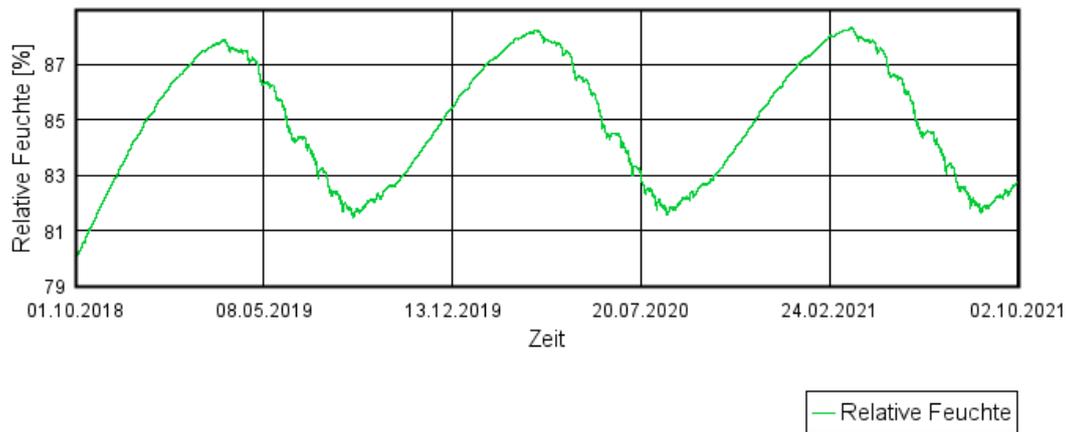


**Abbildung 63:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfasern-Dämmebene

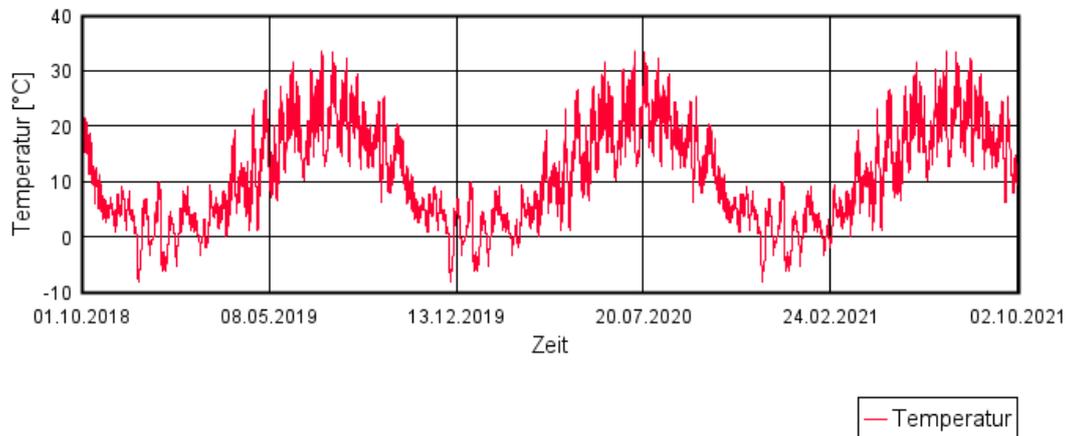
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

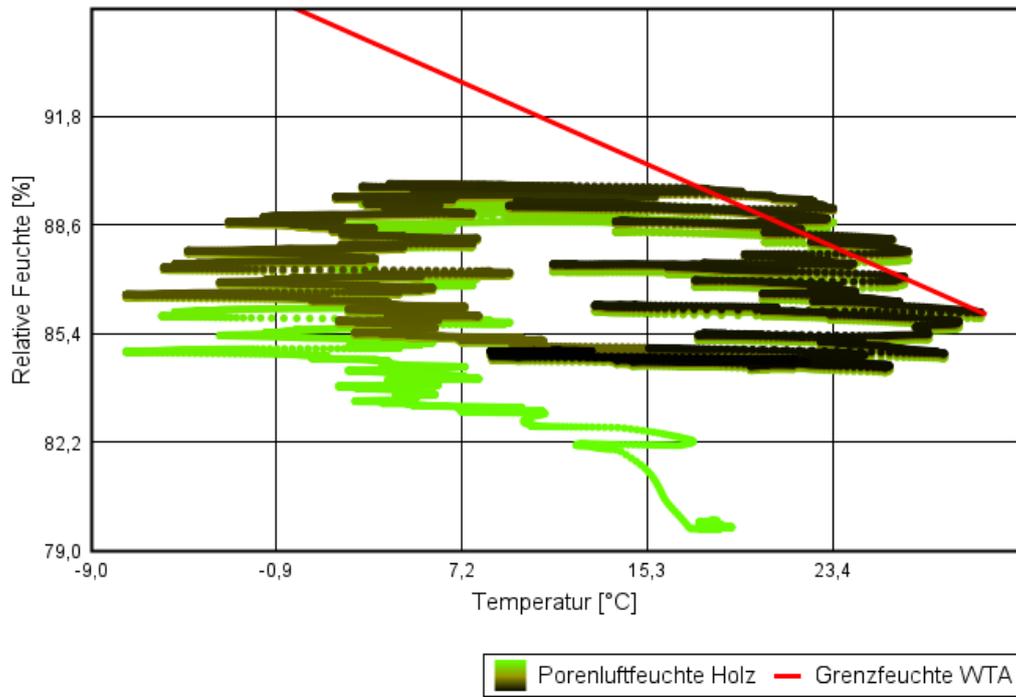


## Temperatur



**Abbildung 64:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung

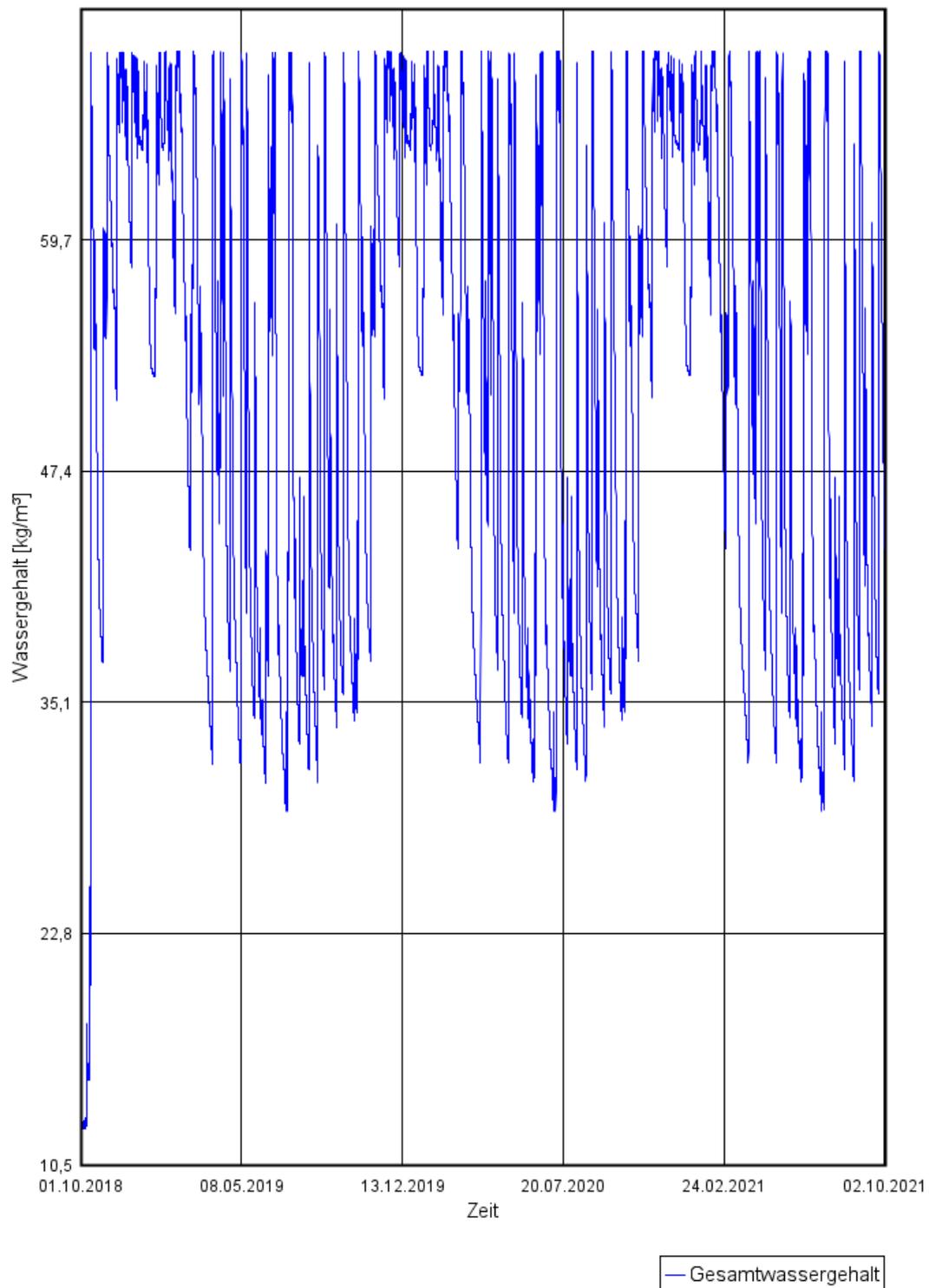
### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 65:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

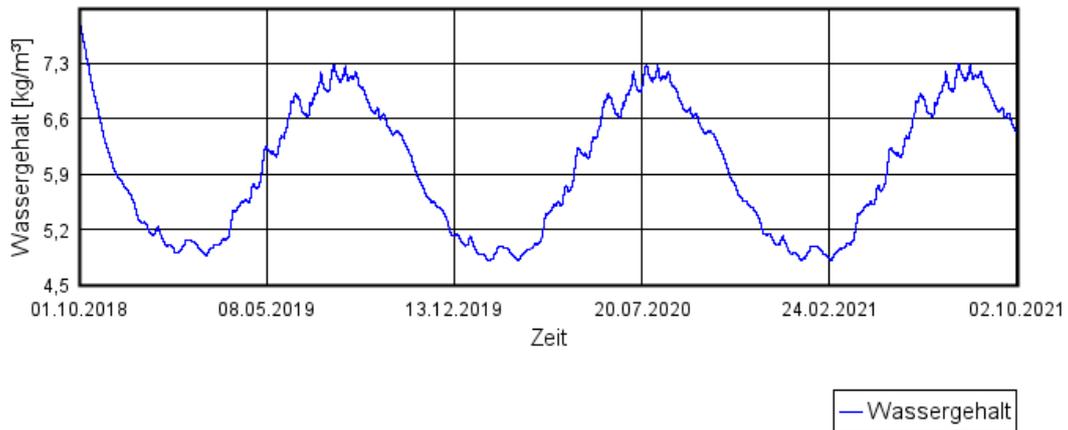
9.6.3 Leichtbauweise, Zellulose-Dämmung, Bitumen-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse

**Gesamtwassergehalt**

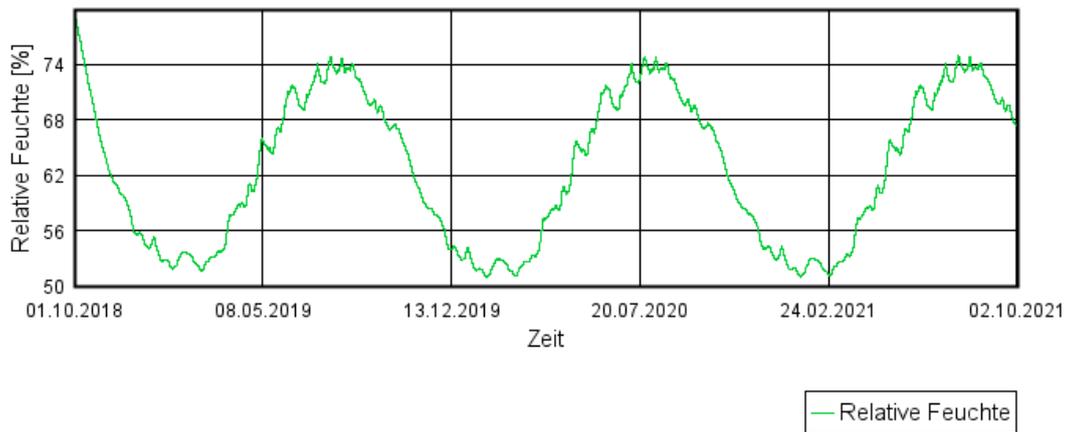


**Abbildung 66:** Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

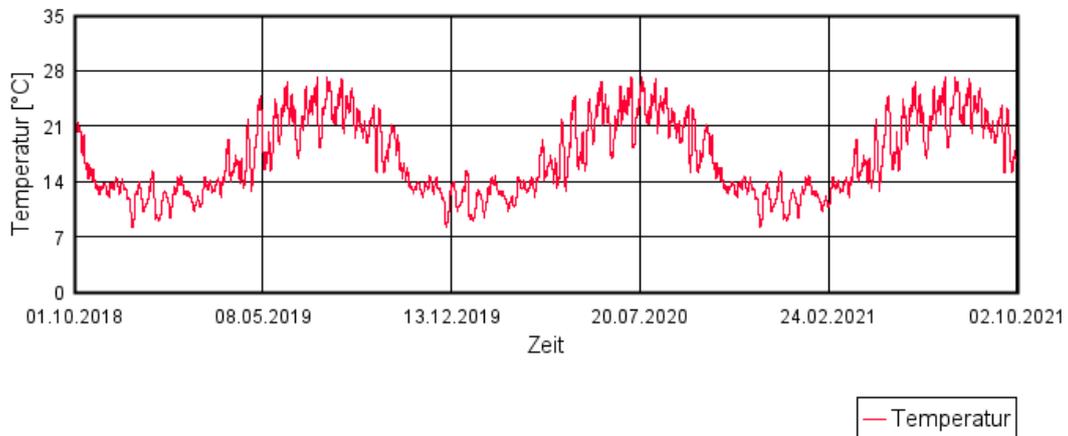
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

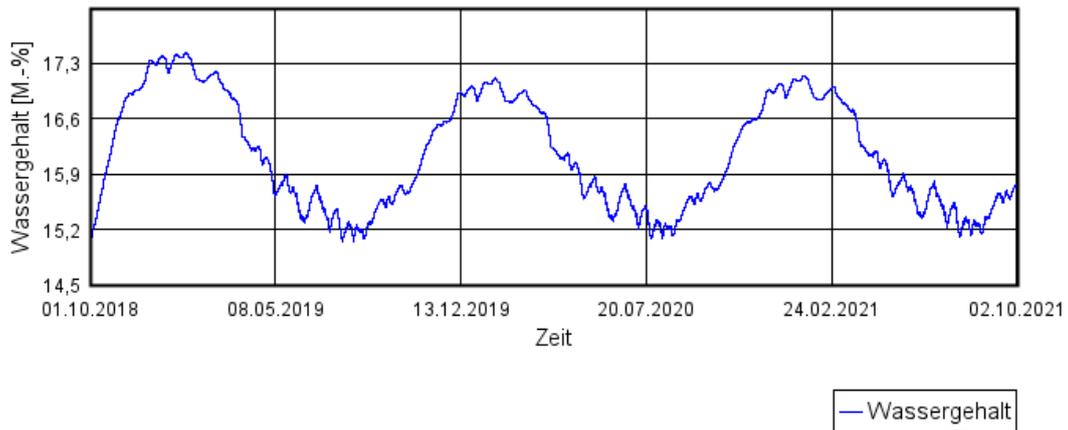


## Temperatur

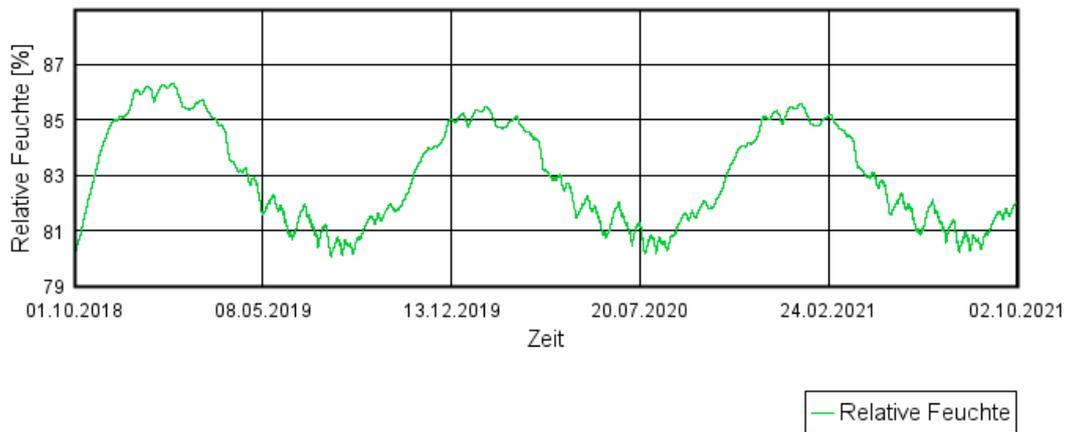


**Abbildung 67:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Zellulose-Dämmebene

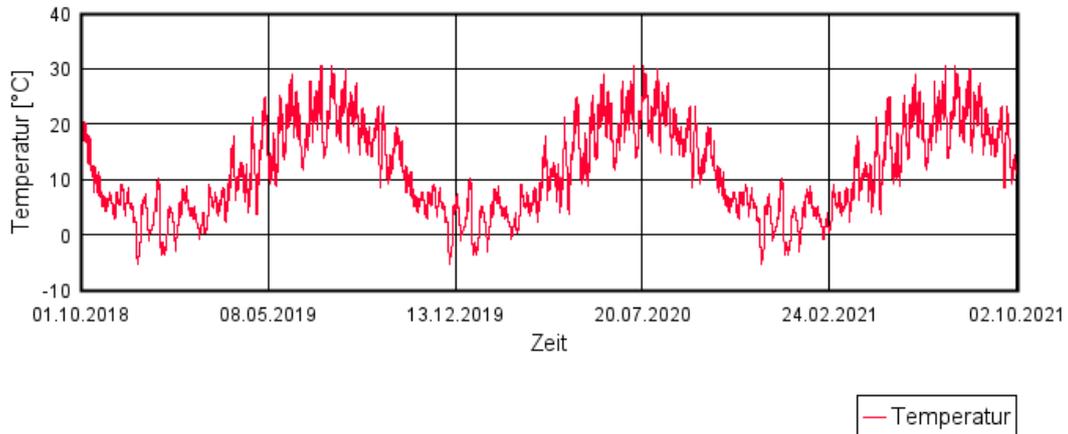
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

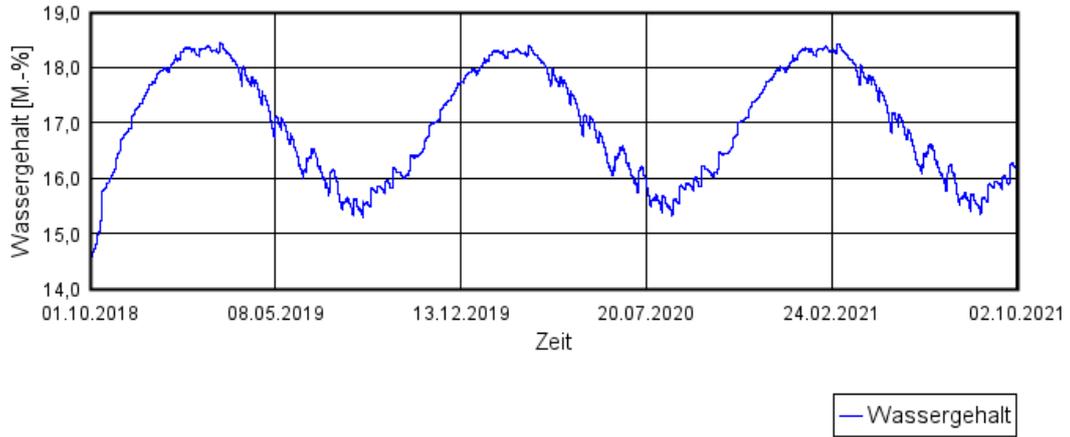


## Temperatur

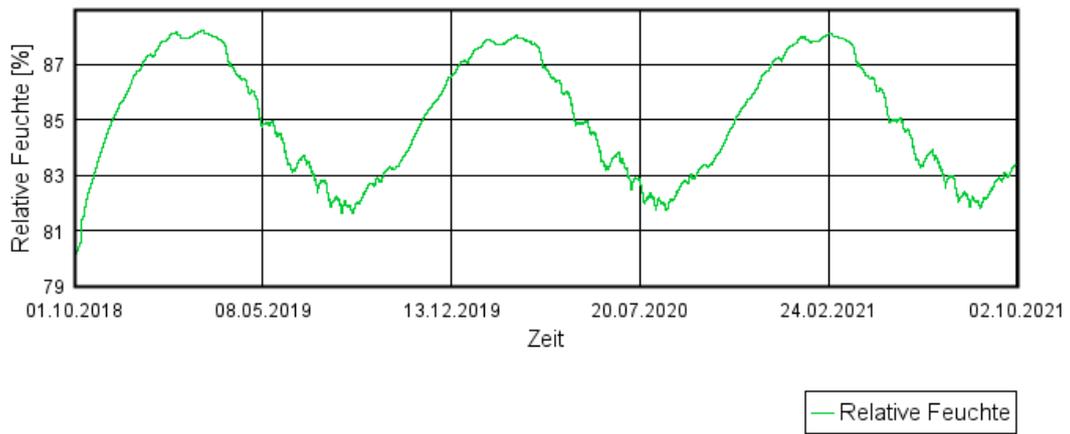


**Abbildung 68:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfasern-Dämmebene

### Wassergehalt



### Relative Feuchte



### Temperatur

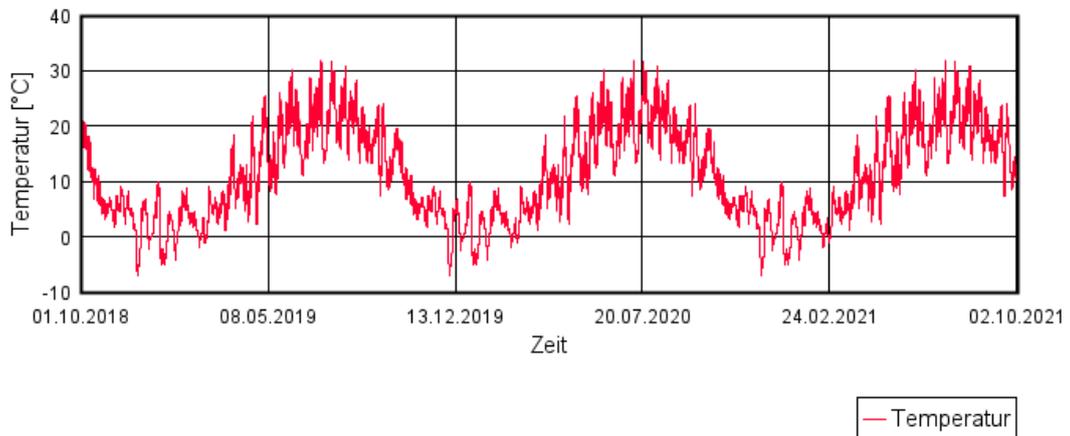
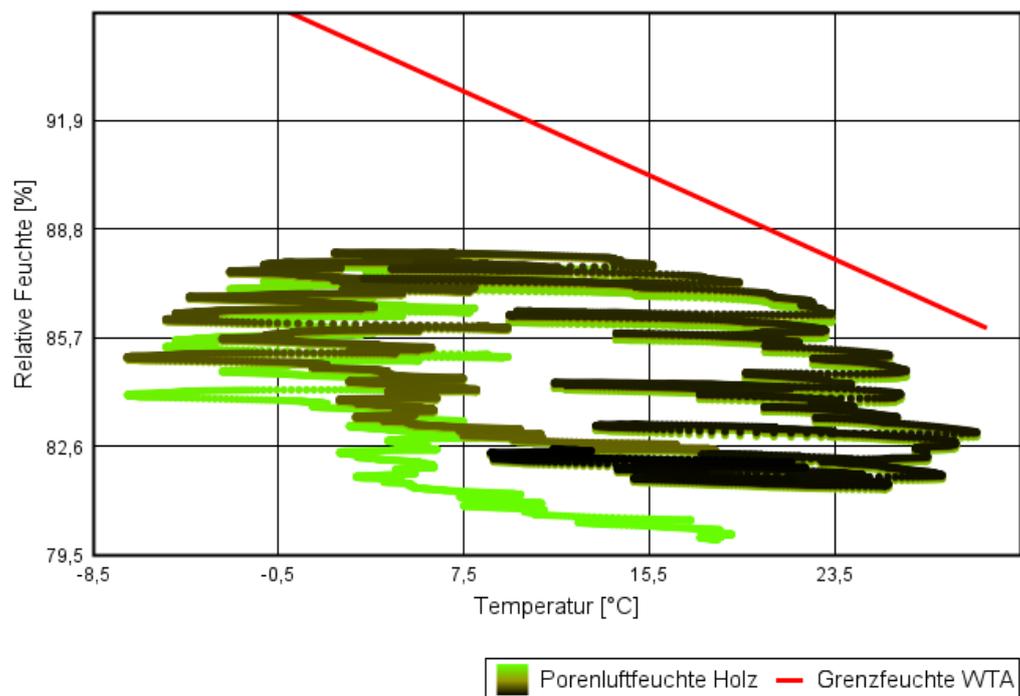


Abbildung 69: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung

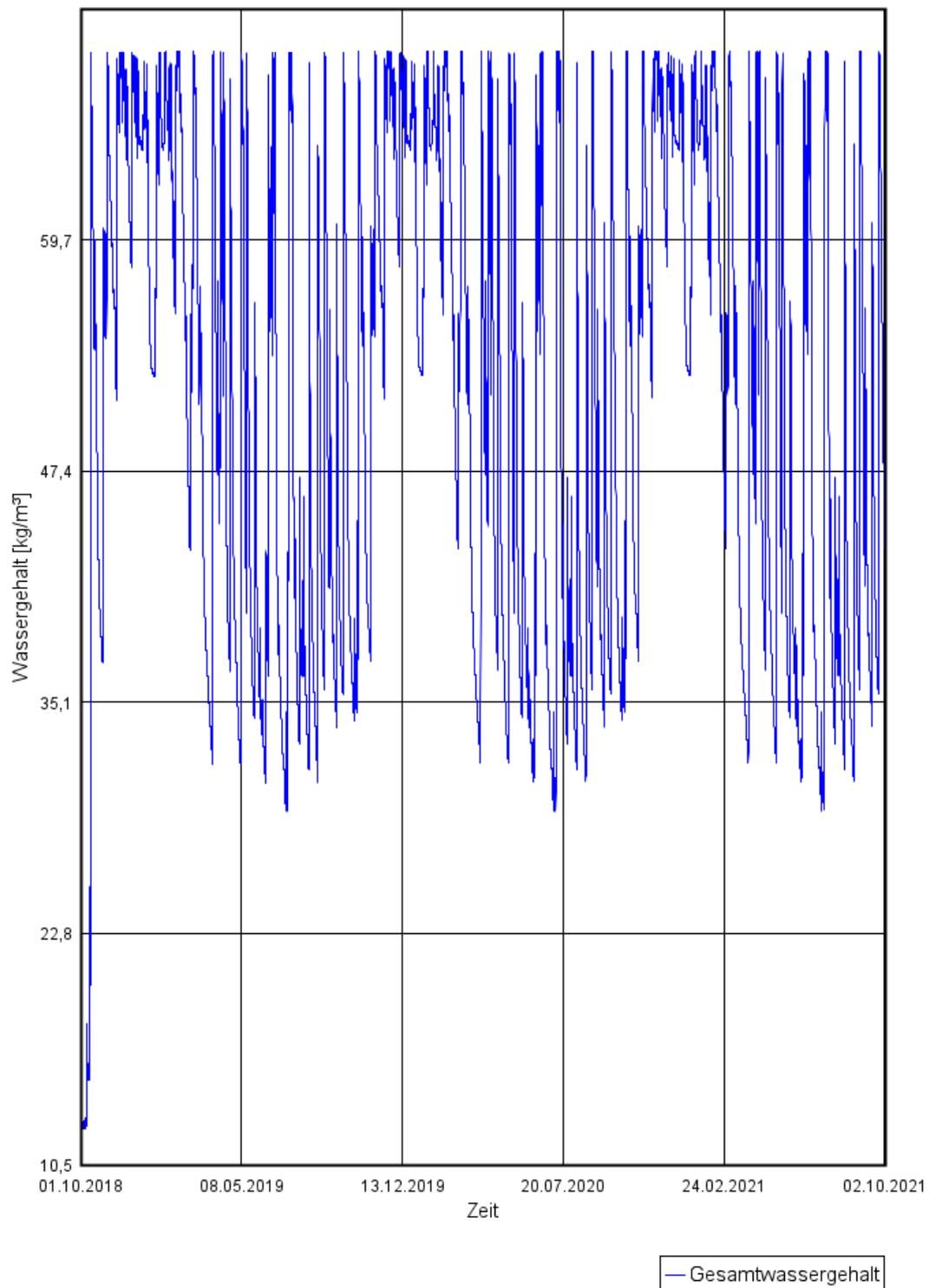
### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 70:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8

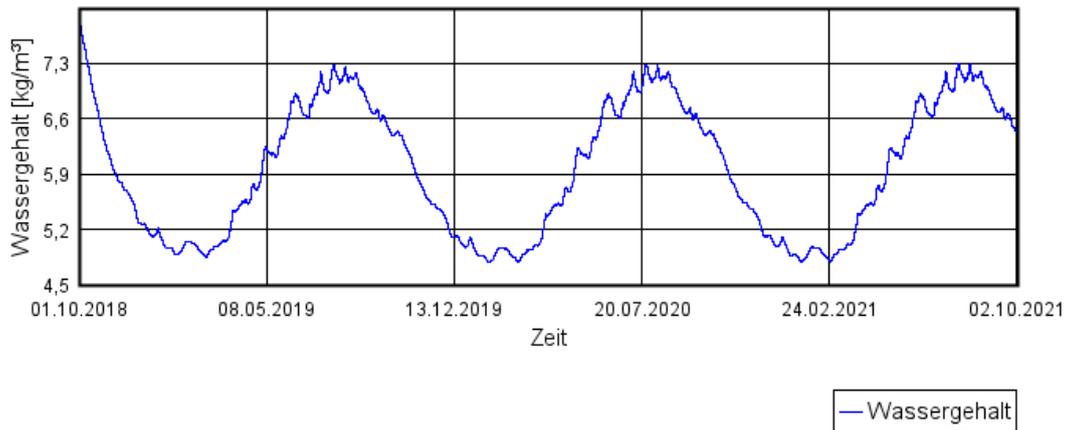
9.6.4 Leichtbauweise, Zellulose-Dämmung, EPDM-Dachabdichtung, innere Fehlstelle und feuchtevariable Dampfbremse

**Gesamtwassergehalt**

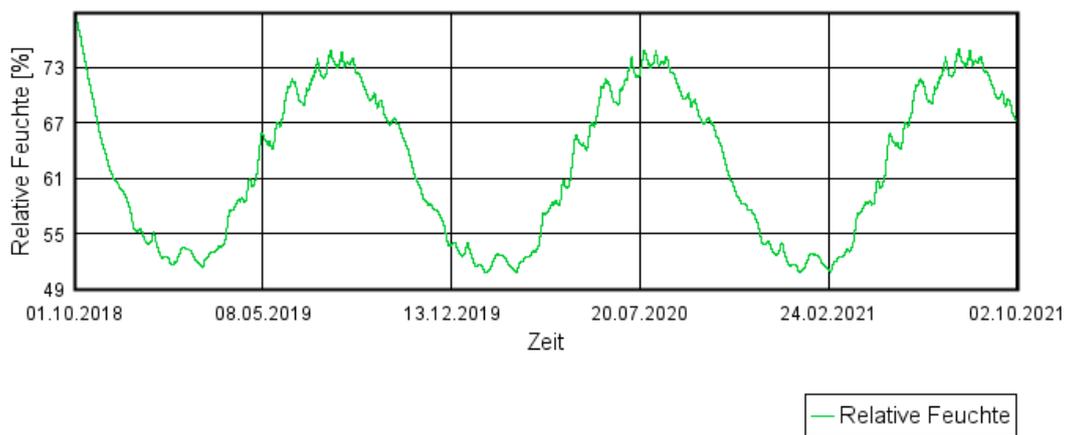


**Abbildung 71:** Verlauf des Gesamtwassergehalts der Konstruktion

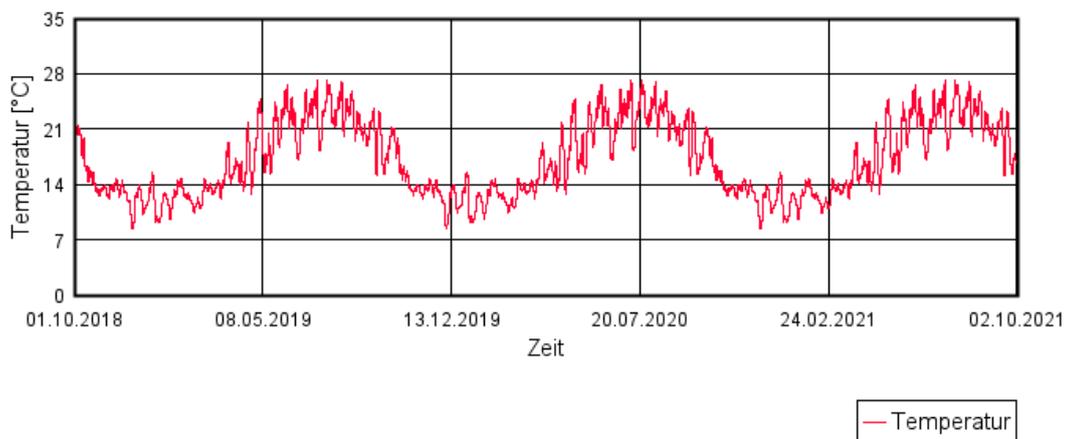
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

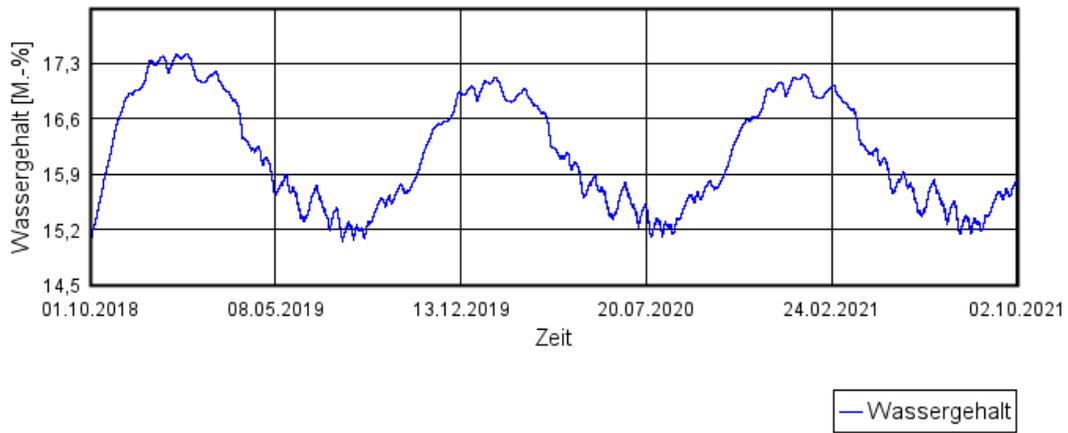


## Temperatur

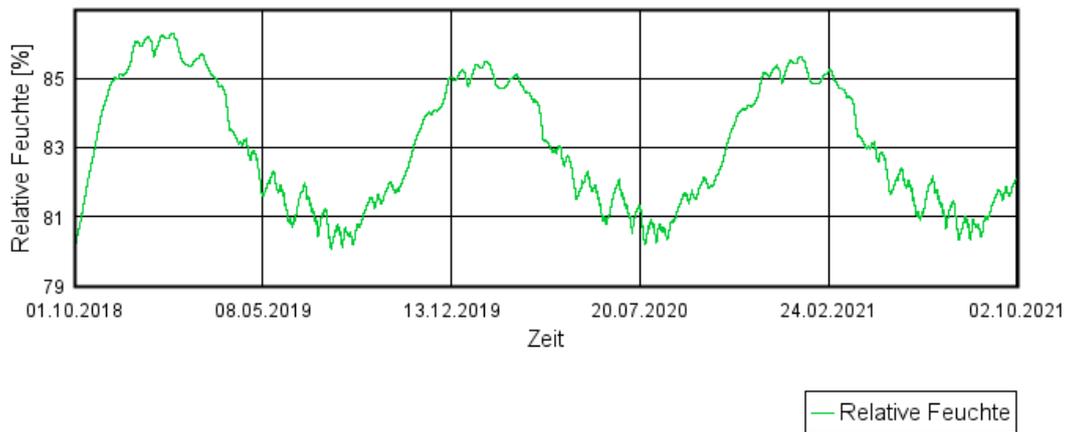


**Abbildung 72:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Zellulose-Dämmebene

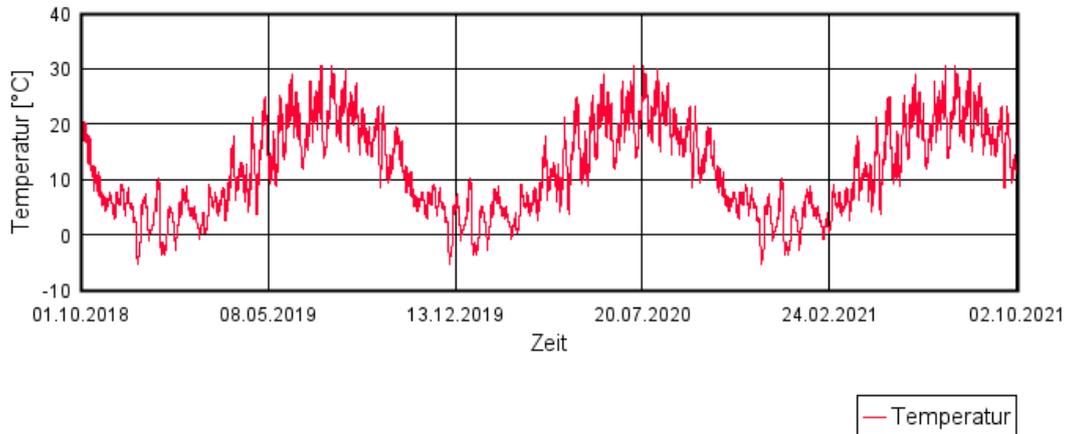
## Wassergehalt



## Relative Feuchte

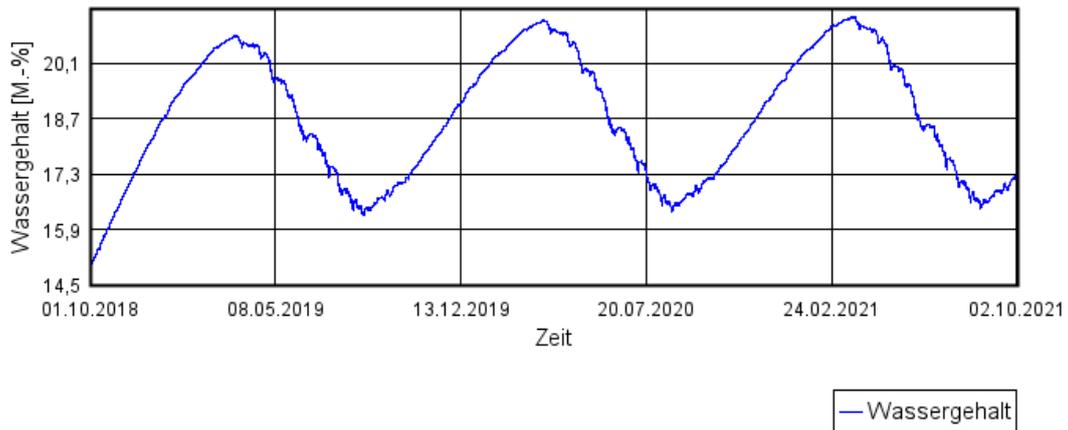


## Temperatur

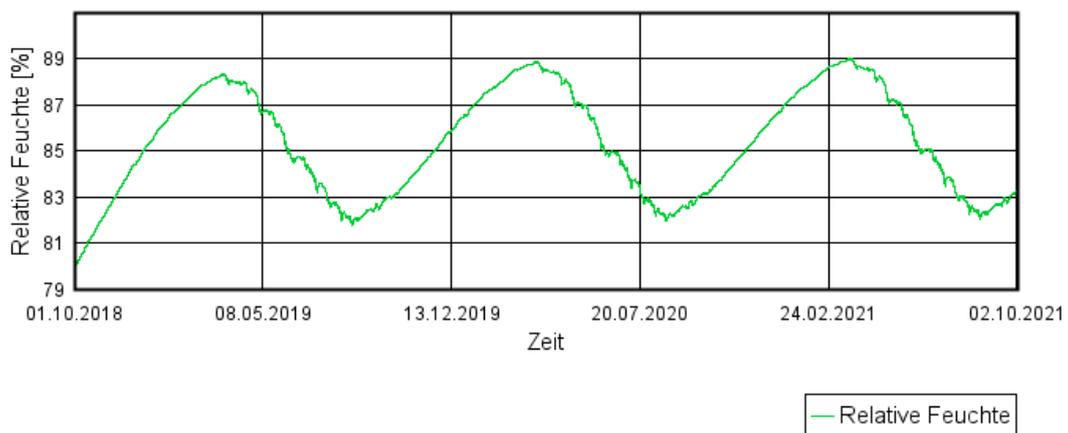


**Abbildung 73:** Wassergehaltsverlauf der gesamten Holzfasern-Dämmebene

### Wassergehalt



### Relative Feuchte



### Temperatur

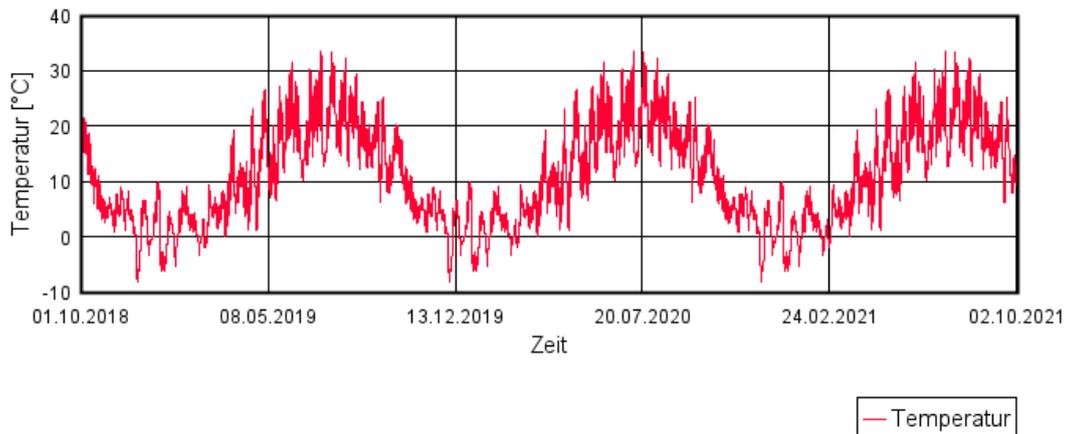
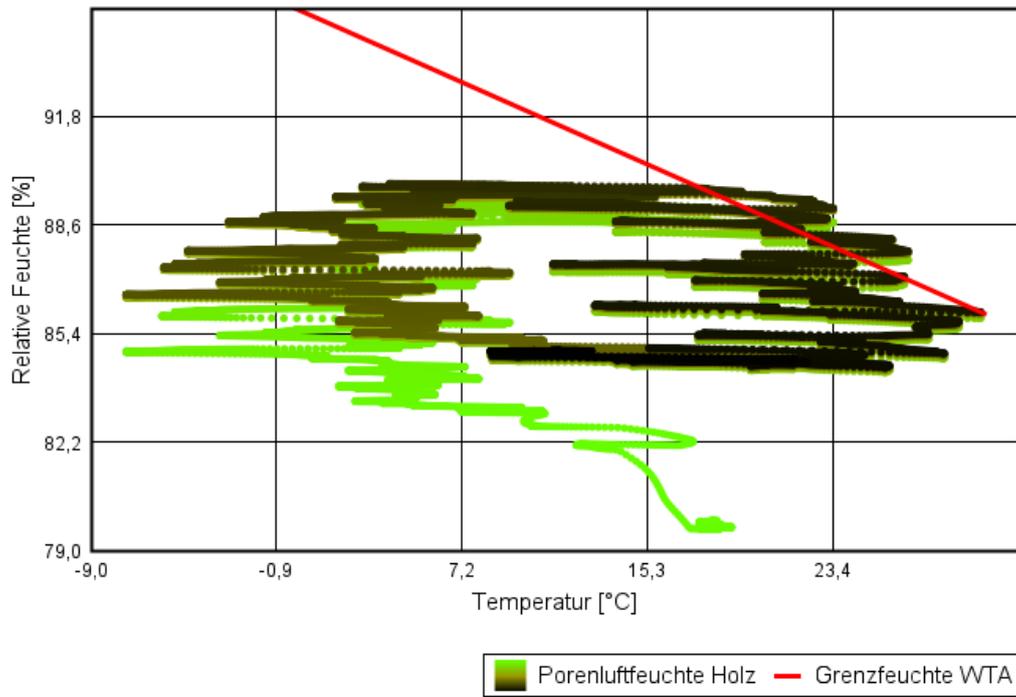


Abbildung 74: Wassergehaltsverlauf der gesamten Schalung

### Porenluftfeuchte Holz WTA 6-8



**Abbildung 75:** Porenluftfeuchte einer 1 cm Schalungs- Schicht gemäß WTA-Merkblatt 6-8