

## DISSERTATION

# Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau

Insbesondere von nicht hinterlüfteten Flachdächern, deren Dämm- und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer  
Doktorin/eines Doktors der technischen Wissenschaften  
unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Krec  
E 253 – Institut für Architektur und Entwerfen  
Fakultät für Architektur und Raumplanung

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Architektur und Raumplanung

von  
Dipl. Ing. Julia Bachinger  
Matrikelnummer: 9825268  
Avenue de Châtelaine 85, CH-1219 Genève –GE, Schweiz

Genf, im April 2010



*Deutscher Titel / German title / titre en allemand:*

## **Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau**

Insbesondere von nicht hinterlüfteten Flachdächern, deren Dämm- und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist

*Englischer Titel / English title / titre en anglais:*

## **Moisture behaviour of flat roofs in timber-frame construction**

Particularly of not-ventilated flat roofs, whose insulation and beam layer are situated between vapour barrier or vapour brake and roof membrane

*Französischer Titel / French title / titre en français:*

## **Comportement relatif à l'humidité des toits plats en ossature en bois**

Particulièrement de toits plats non-ventilés composé d'une couche d'isolation et de solives entre barre-vapeur ou frein-vapeur et le d'étanchéité

## Vorwort

Das ansprechende Thema meiner Dissertation verdanke ich einem Vorschlag von DI Dr. Lothar Künz, meinem ehemaligen Arbeitgeber in Vorarlberg. Er erkannte bereits früh, dass die Problematik der nicht hinterlüfteten Flachdächer im Holzbau einer tiefgreifenden Untersuchung bedarf. Er unterstützte mich nicht nur durch den Zugang zu Hintergrundwissen und den Kontakt mit Gutachtern, Architekten und Zimmerleuten in Vorarlberg, sondern auch durch sein Interesse an dem Thema und seine Ermutigungen. Dafür sei ihm und dem ganzen Büro Künz gedankt.

Als ich nach einem Betreuer für meine Doktorarbeit suchte, dachte ich zuerst an Frau Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karin Stieldorf, die mir aus meiner Studienzeit an der TU Wien noch als herzlicher Mensch in Erinnerung war. Sie hatte mich damals stark beeinflusst und mein Interesse an der Bauphysik geweckt. Da sie keine Befugnis zu Betreuung von Dissertationen hatte, empfahl sie mich jedoch weiter an ihren Kollegen Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Krec.

Da ich Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Krec anfangs nur wenig kannte, war ich etwas unsicher. Im Nachhinein weiß ich jedoch, dass ich in ihm den besten Betreuer für meine Arbeit gefunden habe. Seine Betreuung war inhaltlich bereichernd und auch motivierend. Die Art der Kommunikation konnte unkompliziert zu einem großen Teil über Email erfolgen und die Treffen mit ihm waren für mich immer mit großer Vorfreude verbunden, weil ich nicht nur fachlichen Rat bekam sondern auch mit neuem Elan wegging. Dafür bin ich ihm sehr dankbar.

Eine große Hilfe waren mir auch die zahlreichen fachlichen Kontakte, die ich während der Erstellung meiner Dissertation hatte. Da waren anfangs die Kontakte mit Gutachtern, Architekten und Zimmerleuten. Hier möchte ich speziell Herrn Dipl.-HTL-Ing. Helmut Kaiser erwähnen, der mich mit seinem Enthusiasmus ansteckte und mir auch mit etlichen Informationen weiterhalf.

Außerdem möchte ich an dieser Stelle noch Herrn Dipl.-Ing. Dr. Martin Teibinger von der Holzforschung Austria, Herrn Heinz Weber von der Berner Fachhochschule und Herrn Univ. Prof. DI Hermann Kaufmann, meinem Zweitbegutachter, danken. Sie haben mir durch ihr Interesse an meinem Thema den Sinn meiner Arbeit vor Augen geführt.

Da meine Dissertation ausschließlich in meiner Freizeit entstanden ist, stand mein privates Umfeld in engem Kontakt mit meiner Arbeit. Mein Freund Christian musste alle Höhen und Tiefen hautnah miterleben und mittragen. Seine Gründlichkeit beim Korrigieren von Textpassagen, zahlreiche Diskussionen und seine Hilfestellung mit Literatur zu wissenschaftlichem Publizieren haben mir immer wieder neue Anregungen gebracht.

An dieser Stelle möchte ich auch meiner ganzen Familie, meinen Freunden und Arbeitskollegen danken, die mir durch die verschiedensten Diskussionen geholfen haben, Probleme von einem anderen Gesichtspunkt aus zu sehen und neue Ideen zu finden.

Besonders Angelika, meine Schwester, hat mir durch viele Gespräche und mit dem Erfahrungsaustausch zum Doktoratsstudium geholfen, meinen Weg zu finden. Sie stand mir mit fachlichem Rat zu Fragen der Chemie zur Seite und sie hat mich auch bei meinen vielen Wien-Aufenthalten beherbergt.

Auch meine Eltern haben – vermutlich ohne ihr Wissen – wesentlich zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen. Durch ihren Beistand bei vielen alltäglichen Dingen trotz der Entfernung, ihr starkes Interesse an meinen Aktivitäten und ihren uneingeschränkten Respekt gegenüber meinen Entscheidungen haben sie mir in vielen Situationen Kraft und Selbstvertrauen gegeben.

Die Arbeit an meiner Dissertation hat mir in den vergangenen Jahren immer wieder Halt und Richtung gegeben und mich auch auf meinem beruflichen Weg stark beeinflusst. Ich konnte mich mit dem Fortschritt der Dissertation weiterentwickeln und mich orientieren. Ich habe in dieser Zeit in drei verschiedenen Büros gearbeitet, in zwei verschiedenen Ländern gewohnt und zwei verschiedene Sprachen gesprochen. Meine Dissertation war dabei Ruhepol und Orientierungshilfe.

## Kurzfassung

Die größeren Dämmstoffdicken, die Anforderungen an die Ästhetik eines flachen Dachaufbaus und größere Spannweiten haben zur Entwicklung des voll ausgedämmten, vorgefertigten Multibox-Elementes als Flachdach geführt. Durch die Anordnung der tragenden Holzelemente zwischen der Dampfsperre und der Dachhaut ohne Hinterlüftungsebene ist die Konstruktion aus bauphysikalischer Sicht nicht unproblematisch. Außerdem haben sich in den letzten Jahren die Schadensfälle an solchen Konstruktionen gehäuft.

In der vorliegenden Arbeit werden die wesentlichen Schwachpunkte der Multibox-Dächer herausgearbeitet und Hinweise zur Vermeidung von Schadensfällen gegeben. Dazu wurden in der Region Vorarlberg Daten zu realisierten Flachdächern gesammelt, um die Untersuchung auf möglichst realitätsnahen Bauteilaufbauten zu basieren.

In einem weiteren Schritt wurden die Materialkennwerte der üblichen in Vorarlberg verwendeten Dampfbremsen /-sperren und Dachfolien ermittelt.

Vor der eigentlichen Untersuchung der Konstruktion wurde ein offenes Interview mit Architekten, Zimmerer-Betrieben und Sachverständigen für Schadensbegutachtung geführt. Das Interview gibt Einblick in das allgemein vorhandene Wissen zur Problematik des Multibox-Daches.

Den Kern der Arbeit stellt die Analyse des Feuchteverhaltens der gesammelten Bauteilaufbauten mit der Berechnung nach Glaser und einer dynamischen Berechnung mit dem Programm WUFI dar, die für jeden Aufbau mit den Klimadaten von drei verschiedenen Standorten in Vorarlberg durchgeführt wurden. Diese Berechnung erlaubt eine Analyse der Einflussfaktoren auf das Feuchteverhalten.

Die Untersuchung der Auswirkung der klimatischen Randbedingungen gibt Anhaltspunkte zum Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Bauteil. Durch den Vergleich des Feuchteverhaltens der Multibox-Dächer unter verschiedenen Klimabedingungen konnte ein bedeutender Einfluss der Strahlung auf den Feuchtegehalt der untersuchten Bauteilaufbauten nachgewiesen werden.

Weiters wurde das unterschiedliche Verhalten von Dämm- und Trägerebene untersucht und das Feuchteverhalten der Holzbauteile in der Trägerebene wurde detailliert ausgewertet. Dadurch konnte aufgezeigt werden, dass in der Trägerebene vor allem die Holzbauteile im äußeren Randbereich durch Feuchteanreicherung gefährdet sind. Außerdem wurde durch die Analyse der Feuchteverteilung im Trägerquerschnitt gezeigt, dass Verformungen des Trägers aufgrund von Feuchteverlagerungen zu erwarten sind.

Konkreter werden die Anhaltspunkte für die Planung durch die Analyse der Auswirkung der Materialeigenschaften von Dampfsperre, Dachhaut und Dämmung. Dabei wurde festgestellt, dass vor allem ein niedriger  $s_d$ -Wert und ein hoher Absorptionsgrad für Sonnenstrahlung (dunkle Farbe) der Dachhaut das Feuchteverhalten von Multibox-Dächern positiv beeinflussen.

Aufgrund der festgestellten Einflussnahme der Strahlung auf das Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten, wurde eine weitere Berechnung mit dem Glaserverfahren vorgenommen, für die die Außenlufttemperaturen unter Berücksichtigung der solaren Strahlung und des langwelligen Strahlungsaustausches in Strahlungslufttemperaturen umgerechnet wurden.

Den Abschluss der Berechnung der gesammelten Bauteilaufbauten bildet ein Vergleich der Ergebnisse aus der Glaserberechnung und der dynamischen Berechnung. Es können die Grenzen des Glaserverfahrens und der in der Norm festgelegten Maximalwerte aufgezeigt werden.

Weiters werden Vorschläge zur Verbesserung der Feuchtesituation im Bauteil ausgearbeitet und Möglichkeiten aufgezeigt, die Feuchtebelastung der Holzbauteile zu verringern. Es werden aber auch Einschränkungen der Verbesserungsmöglichkeiten herausgestrichen und festgestellt, dass aufgrund von standort- und materialabhängigen Einflüssen individuelle Berechnungen notwendig sind.

## Abstract

After the development of the prefabricated elements in timber-frame construction and their common application for non-ventilated flat roofs (so called „Multibox“ flat roof), the cases of damage for these flat roofs increased in Vorarlberg (Austria).

The arrangement of timber elements between vapour barrier or vapour brake and roof membrane without any ventilation layer provokes critical hygrothermal conditions in the construction element. Due to the lack of investigations on factors influencing moisture behaviour of non-ventilated flat roofs, the reasons of damage are often difficult to determine. The present study investigates on the main factors of influence on the hygrothermal behaviour of “Multibox” flat roof systems.

For this purpose, data of realized flat roofs were collected in the Vorarlberg region, in order to base the investigation on realistic assemblies. Besides, a research on the material characteristics of the commonly applied vapour barrier, vapour brake and roof membrane materials was carried out. Furthermore, architects, carpenters and claim experts have been interviewed to get an overview of the commonly available knowledge on the sensibility of “Multibox” flat roof systems.

The 25 flat roof types obtained by this enquiry were examined by calculations according to Glaser and a dynamical simulation. Both calculation methods were applied in three different climate locations in the Vorarlberg region.

The analysis of the results of these comparative studies reveals the influence of climate conditions on the hygrothermal behaviour of “Multibox” flat-roof systems.

Primarily, it turns out that a Glaser-calculation based on Austrian standards is inadequate to reproduce realistic results for those constructional elements. Moreover, a Glaser-calculation based on radiant air temperature values discloses the inadequateness of this calculation method to provide realistic data on moisture behaviour of non-ventilated flat roofs.

Climate conditions are further proved to have a significant influence on the total amount of moisture within the Multibox flat-roof systems. One major factor, highly influencing the process, is solar radiation.

Furthermore, the comparison of the hygrothermal behaviour of insulation layer and beam layer shows a higher moisture charge for the timber elements in the beam layer. Especially, the border area near the outer surface of the beam shows increasing moisture content. Both border areas of the beam – near the exterior surface and near the interior surface of the element – feature opposed moisture increase and decrease during the winter and summer period. Thus, the periodical deformation of the beam is explained by moisture migration.

In addition, the investigation focuses on the impact of material properties of vapour brake, roof membrane and insulation on the hygrothermal conditions of “Multibox” flat roof systems. The  $s_d$ -value of the roof membrane and its color (value of absorption of solar radiation) are identified as the main factors of influence.

In a final step, the analysis of proposals of improvement of the hygrothermal conditions of timber elements in “Multibox” flat roof systems reveals possibilities of reduction of the moisture charge in the construction elements. However, the limits of these measures are highlighted. Moreover, the necessity of individual dynamical simulations of the assemblies due to their location and material properties is shown.

## Résumé

Dans la région de Vorarlberg, en Autriche, un élément préfabriqué en ossature en bois servant comme toit plat a été développé dans les années 90. Plusieurs caractéristiques de ce toit nommé « Multibox » ont contribué à son emploi fréquent : L'isolation arrangée entre solives peut être effectuée plus épaisse tout en répondant aux exigences des architectes à l'esthétique d'une structure fine. De plus, l'effet de contreventement des panneaux trois-plis permet l'exécution des distances de portée plus importantes.

La position des éléments en bois entre pare-vapeur et lé d'étanchéité du toit sans aucune zone de ventilation apporte des difficultés hygrothermiques. Ces dernières années, le nombre de dégâts concernant des constructions de toits plats non ventilés a augmenté dans la région de Vorarlberg.

Cette étude identifie les principaux points faibles des toits « Multibox » et donne des conseils sur la prévention de dégâts.

Tout au début, une enquête entreprise dans la région de Vorarlberg a permis d'accéder aux données concernant la matérialisation de ces toits, pour que l'investigation puisse être basée sur des composants réalistes. Puis, les caractéristiques des matériaux des pare-vapeurs et lés d'étanchéité couramment utilisés à Vorarlberg ont été déterminées.

Avant l'analyse de l'état hygrothermique des toits « Multibox », des architectes, des charpentiers et des experts en évaluation de dégâts ont été interviewés pour acquérir une connaissance de leur savoir sur la problématique des toits plats non-ventilés.

La détermination des principaux facteurs d'influence au comportement relatif à l'humidité des toits « Multibox » a été effectuée par un calcul selon Glaser et une simulation dynamique basé sur le climat de trois différentes villes à Vorarlberg. L'analyse de l'impact climatique sur l'humidité des éléments de construction des toits plats non-ventilés permet de déterminer l'influence des conditions climatiques sur ces toits. En particulier, cette étude révèle la radiation solaire comme le plus important paramètre climatique.

Par ailleurs, une évaluation de la méthode Glaser a été étudiée afin de juger sa validité pour l'analyse de l'humidité des toits plats non-ventilés. Pour inclure la radiation solaire, un calcul supplémentaire basé sur des températures radiantes de l'air ambiant a été intégré. La comparaison des résultats de ce deuxième calcul selon Glaser avec les résultats de la simulation dynamique démontre l'incapacité de cette méthode de générer des données correctes.

En outre, l'analyse du comportement différent relatif à l'humidité de la zone de la poutre et de la zone isolante indique, pour la première une accumulation d'humidité dans les éléments en bois au niveau extérieur du composant. Une étude détaillée de la quantité d'eau dans la zone de la poutre démontre l'effet de la déformation de celles-ci dû au transfert d'humidité.

Ensuite, l'investigation sur l'influence des matériaux de construction sur le comportement relatif à l'humidité des toits plats non-ventilés révèle des indications précises concernant la matérialisation de l'isolation, du pare-vapeur et du lé d'étanchéité. Il est constaté qu'une valeur  $s_d$  faible et une valeur d'absorption solaire élevée (couleur foncée) du lé d'étanchéité implique un impact positif sur la quantité d'humidité des éléments en bois des toits « Multibox ».

Enfin, des propositions d'amélioration de la situation relative à l'humidité des pièces en bois des toits plats non-ventilés ont été élaborées. Leur analyse permet de démontrer la limitation du niveau minimal de la charge d'humidité des éléments en bois.

En conclusion, il est démontré que les caractéristiques des matériaux et la situation géographique exigent des simulations individuels des toits plats non-ventilés.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation	1
1.2	Hinweise für den Leser	1
1.3	Einführung	2
1.3.1	<i>Das Multibox-Element</i>	2
1.3.2	<i>Holz / Eigenschaften von Holz</i>	8
1.3.2.1	Aufbau von Holz	8
1.3.2.2	Holz als Baustoff	10
1.3.2.3	Zusammenspiel von Holzstruktur und Holzeigenschaften	14
1.3.2.4	Feuchtespezifische Eigenschaften von Holz	16
1.3.2.5	Holzschädlinge und ihre Lebensbedingungen	20
1.3.3	<i>Bauphysik / Berechnungsverfahren</i>	26
1.3.3.1	Feuchtetransport und Feuchtespeicherung	26
1.3.3.2	Anforderungen an den Feuchteschutz: ÖNORM, DIN und SIA	27
1.3.3.3	Dynamische Berechnung des Feuchteverhaltens	28
1.3.3.4	Strahlung	29
<b>2</b>	<b>Kennwerte zur Untersuchung der Flachdachaufbauten</b>	<b>32</b>
2.1	Materialkennwerte	32
2.2	Klimatische Randbedingungen	34
2.2.1	<i>Außenklima</i>	34
2.2.2	<i>Innenklima</i>	36
2.2.3	<i>Wärmeübergangswiderstand</i>	36
2.3	Beurteilungskriterien	37
2.4	Bauteilaufbauten	39
<b>3</b>	<b>Interview</b>	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>Rechnerische Untersuchungen des hygrothermischen Verhaltens von Multibox-Dächern</b>	<b>43</b>
4.1	Diskussion der Ergebnisse eines ausgewählten Beispiels	44
4.1.1	<i>Berechnung nach dem Glaserverfahren – Bauteilaufbau Nr. 03</i>	44
4.1.2	<i>Dynamische Berechnung – Bauteilaufbau Nr. 03</i>	44
4.2	Resultate der Glaserberechnungen mit Klimadaten nach ÖNORM	48
4.2.1	<i>Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse</i>	48
4.2.2	<i>Vergleich von Dämmebene und Trägerebene</i>	53
4.2.3	<i>Problemstellen der Aufbauten gemäß der Berechnung nach dem Glaserverfahren</i>	55
4.3	Resultate der dynamischen Berechnungen	56
4.3.1	<i>Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse</i>	56
4.3.1.1	Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre $\Delta u'_m$	56
4.3.1.2	Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf $\Delta u_m$	62
4.3.1.3	Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-%	68
4.3.1.4	Hygrothermische Zustände	70
4.3.1.5	Vergleich der Klimadaten	71
4.3.1.6	Zusammenfassung der Untersuchung der Klimastandorte	74
4.3.2	<i>Vergleich Dämmebene und Trägerebene</i>	75
4.3.2.1	Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre $\Delta u'_m$	75
4.3.2.2	Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf $\Delta u_m$	79
4.3.2.3	Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-%	83
4.3.2.4	Hygrothermische Zustände	84
4.3.2.5	Zusammenfassung Vergleich Dämmebene und Trägerebene	87
4.3.3	<i>Untersuchung der Feuchteverteilung in Träger und Holzschalung der Trägerebene</i>	88
4.3.4	<i>Einfluss der Materialeigenschaften auf die Berechnungsergebnisse</i>	93
4.3.4.1	Dämmmaterial	93
4.3.4.2	$s_d$ -Wert der Dampfsperre	101
4.3.4.3	$s_d$ -Wert der Dachhaut	105
4.3.4.4	Strahlungsabsorption und -emission der Dachhaut	108
4.3.4.5	Zusammenfassung Materialien	118
4.3.5	<i>Übersicht über die Erkenntnisse aus der Berechnung mit WUFI</i>	119

4.4	Resultate der Glaserberechnungen mit Strahlungslufttemperaturen aus langjährigen Monatsmittelwerten	120
4.4.1	<i>Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse</i>	120
4.4.2	<i>Vergleich der Klimadaten nach ÖNORM und der Strahlungslufttemperaturen aus langjährigen Monatsmittelwerten</i>	125
4.5	Vergleich der Glaserberechnungen und der Berechnung mit WUFI	127
<b>5</b>	<b>Untersuchung von Verbesserungsvorschlägen</b>	<b>130</b>
5.1	Dämmung über der äußeren Holzschalung	130
5.2	Feuchtevariable Dampfbremse	137
5.3	Feuchtigkeitsaustrocknende Dampfbremse	146
5.4	Multibox-Element zur Verbesserung der Raumakustik	152
<b>6</b>	<b>Wege der Vermeidung von Schäden bei Flachdächern im Holzbau, Hinweise für Planung und Normung</b>	<b>155</b>
6.1	Berechnung nach Glaser	155
6.2	Dynamische Simulation	155
6.3	Einfluss und Verhalten einzelner Materialien	158
6.4	Vorschläge zur Verbesserung des hygrothermischen Verhaltens von nicht hinterlüfteten Multibox-Dachaufbauten	159
6.5	Empfehlungen für die Normung	160
6.6	weiterführende Forschung	161
<b>7</b>	<b>Übersicht über Zeichen und Einheiten</b>	<b>162</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>163</b>

#### Anhang A: Materialkennwerte

- Anhang A1: Materialkennwerte der verwendeten Materialien
- Anhang A2: Materialkennwerte von PVC-Dachbahnen
- Anhang A3: Materialkennwerte polyolefiner Dachbahnen
- Anhang A4: Materialkennwerte bituminöser und kautschukhaltiger Dachabdichtungen
- Anhang A5: Materialkennwerte von Dampfbremsen /-sperrern
- Anhang A6: Quellenangaben zu den Materialkennwerten von Dachbahnen und Dampfbremsen /-sperrern

#### Anhang B: Übersicht Klimadaten

#### Anhang C: Übersicht Beurteilungskriterien

#### Anhang D: Interview

- Anhang D1: Fragenkatalog des Interviews
- Anhang D2: Auswertung der Interviews

#### Anhang E: Berechnungsergebnisse Bauteilaufbau Nr. 03

## 1 Einführung

### 1.1 Motivation

Im Holzbau finden in den letzten Jahren und Jahrzehnten immer mehr Änderungen der Bauweise, der Konstruktion und der Bauteilaufbauten statt.

Einerseits wird versucht, den Energiebedarf der Neubauten zu reduzieren. Die Dämmstoffdicken der Außenbauteile werden erhöht, luftdichtes Bauen zählt schon lange zum Standard. Es werden vor allem kompakte kubische Gebäude gebaut, um die wärmeabgebende Fläche der Außenwände und Dächer zu verringern.

Außerdem müssen die meisten Gebäude in einem engen finanziellen Rahmen errichtet werden, was gute Planung und eine rationelle Verarbeitung voraussetzt. Mit Fertigteilen können die Anforderungen an den raschen Baufortschritt und kostengünstiges Bauen erfüllt werden.

Und nicht zuletzt will der Architekt ein schlankes, elegantes Gebäude schaffen, das die modernen architektonischen Ansprüche erfüllt.

Diese und noch viele andere Faktoren führten in den 1990er Jahren zur Entwicklung des schlanken, ausgedämmten Multibox – Daches, das in Vorarlberg das erste Mal 1997 beim Bau der Wohnanlage Ölzbündl in Dornbirn (Zschokke 2002) verwirklicht wurde und seither bei vielen Neubauten angewendet wird.

Seit einigen Jahren häufen sich nun aber die Schadensfälle an genau diesen Flachdachaufbauten und eine Ursache ist oft nur schwer zu eruieren. Warum verfaulen Dachschalung und Dachbalken, wenn doch die Dachhaut dicht ist? Wieso knarrt das Dach und wieso entstehen Risse zwischen Decke und Zwischenwänden?

In der vorliegenden Arbeit werden für eine Vielzahl von ausgeführten Flachdachaufbauten in Holzbauweise, deren Tragkonstruktion in der Dämmebene liegt, Fakten zusammengetragen, verglichen und ausgewertet, um die Ursachen für das Auftreten von Schäden und Ansätze zur Vermeidung von Schadensfällen zu finden.

Den Anfang bildet ein offenes Interview mit Architekten, Zimmerer-Betrieben und Sachverständigen. Als Hauptteil wurde eine grundlegende bauphysikalische Untersuchung der Aufbauten durchgeführt. Die Untersuchung zum Feuchteverhalten erfolgte mit der lt. ÖNORM vorgeschriebenen Berechnung nach dem Glaserverfahren und mit dem am Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelten dynamischen Verfahren (Programm WUFI).

### 1.2 Hinweise für den Leser

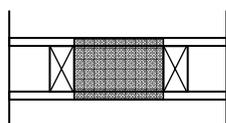
Diese Arbeit gliedert sich in zwei große Abschnitte: Der Einführungsteil besteht aus den Kapiteln 1 und 2, die einen Überblick zur Thematik und Einblick in die verwendeten Grundlagen geben. Im Hauptteil (Kapitel 3, 4 und 5) werden die Ergebnisse der Untersuchungen präsentiert.

Zum einfacheren bzw. schnelleren Lesen, wurden in den Kapiteln 4 und 5 jeweils am Ende der einzelnen Themenfelder Zusammenfassungen eingefügt.

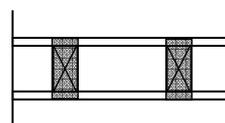
Kapitel 6 resümiert alle Erkenntnisse aus den durchgeführten Studien.

In der Kopfzeile wird rechts jeweils das Überkapitel sowie das Themenfeld der entsprechenden Seite angeführt, um dem Leser die Orientierung zu erleichtern.

Außerdem wurden bei der Besprechung der Ergebnisse Symbole eingeführt, die zeigen, welcher Teilbereich des untersuchten Aufbaus analysiert wird:



Dämmebene



Trägerebene

## 1.3 Einführung

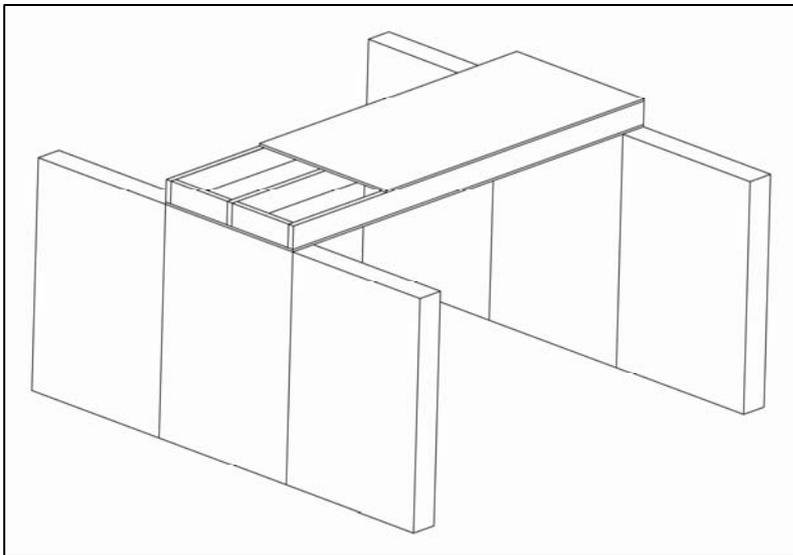
### 1.3.1 Das Multibox-Element

In den 1980er Jahren entstand in Vorarlberg ein Netzwerk von innovativen Planern und Architekten, die weit über die Landesgrenzen hinaus als neue „Vorarlberger Bauschule“ bekannt wurden. Durch den Anspruch mit ihrer Architektur der zeitgenössischen Lebensweise zu genügen ohne die traditionell gewachsenen Wohnmodelle und Tragstrukturen aufzugeben und durch ökologische Grundgedanken haben sie den Holzbau neu belebt.

In den späten 1990er Jahren und zu Beginn des 21. Jahrhunderts herrschte in Vorarlberg die österreichweit größte Dichte an Energiespar- und Passivhäusern. (Kapfinger 2003)

Die energieeffiziente Bauweise bedingt kompakte Formen der Gebäude. Diese und andere Faktoren führten in den 1990er Jahren unter Zusammenarbeit von Architekten, Statikern und Zimmerern zur Entwicklung des Multibox-Elementes (auch Hohlkastenelement genannt).

Das vorgefertigte Element aus Vollholzplatten (z.B. 3-Schichtplatten) und Trägern eignet sich zum Einsatz als Geschoßdecke und als Flachdachaufbau. Bei der Verwendung als Flachdachelement ist vor allem die reduzierte Höhe des Dachaufbaus architektonisch interessant, die durch die Anordnung der Dämmung zwischen den Trägern deutlich niedriger ausfallen kann als bei einem Kaldach. Dadurch können auch große Dämmstoffdicken mit schlanken Flachdachaufbauten realisiert werden. Ein weiterer Grund für den Erfolg der Multibox-Elemente ist die größere Spannweite der Holzkonstruktion im Vergleich zu einer einfachen Holzbalken-Konstruktion. Durch die Plattenwirkung der Vollholzplatten kann mit gleicher Trägerhöhe eine größere Raumbreite ausgeführt werden. Außerdem kann durch die Vorfertigung und die rasche Montage eine große Zeitersparnis für den Baustellenablauf erzielt werden.



**Abbildung 1.1: Schematische Darstellung eines aufgeschnittenen Multibox-Elementes als Fertigteil auf Wandelementen**



### *Schadensfälle*

Für nicht hinterlüftete Flachdächer im Holzbau, deren Dämm- und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist, wurden in den letzten Jahren viele Schadensfälle bekannt. Die Ursache ist oft schwer zu eruieren und wissenschaftliche Untersuchungen liegen bis jetzt nur wenige vor. Von einem generellen Versagen dieser Flachdachaufbauten kann jedoch nicht ausgegangen werden, weil eine große Anzahl von nicht hinterlüfteten Flachdachkonstruktionen problemlos funktioniert.

Abbildung 1.3 und 1.4 zeigen typische Schadensbilder für nicht hinterlüftete Flachdächer im Holzbau.



Abbildung 1.3: typische Schadensbilder von nicht hinterlüfteten Flachdächern mit Dämmung in der Trägerebene



**Abbildung 1.4:** typische Schadensbilder von nicht hinterlüfteten Flachdächern mit Dämmung in der Trägerebene

Die Schadensbilder in Abbildung 1.3 und 1.4 wurden bei unterschiedlichen Sondierungen von Schadensfällen aufgenommen. Nach dem Aufschneiden der Dachhaut wird die Holzschalung sichtbar, die zum Teil hohe Feuchtigkeiten aufweist, bereits verfault oder auch teilweise schon zersplittert. Die Plattenwirkung ist somit nicht mehr gegeben. Auch die Balken und die Dämmung weisen häufig im oberen Bereich Verfaulung bzw. Schimmelfall auf.

Bei der Durchsicht der Fotos zu Schadensfällen konnte bereits vor der eigentlichen Untersuchung festgestellt werden, dass der obere Trägerbereich häufig stärkere Beschädigungen zeigt, als der untere Trägerbereich und im Gefach (siehe Abbildung 1.3 unten).

### *Informationen zu Flachdachaufbauten mit Multibox-Elementen in der Literatur*

Für Architekten, Planer und Bauausführende war es bisher schwierig die Schadensanfälligkeit von Flachdächern mit Hohlkastenelementen abzuschätzen.

In Österreich und Deutschland schreiben die Normen ÖNORM B 8110-2 und DIN 4108-3 für nicht belüftete Dächer mit Dachabdichtung bei der Ausführung einer raumseitigen Dampfsperre mit einem  $s_d$  - Wert über 90m (ÖNORM) bzw. über 100m (DIN) keine Berechnung zur Tauwasserbildung im Bauteil vor. Für einen Großteil der in dieser Arbeit untersuchten Bauteilaufbauten wäre demnach gemäß Norm keine Kondensatberechnung nach Glaser notwendig.

Außerdem gehen manche Standardwerke wie das Planungshandbuch „Holzbau für Architekten“ (Galiläa et al. 1997) 1997 in keiner Weise auf Flachdächer mit Hohlkastenelementen ein.

Im Holzbau-Taschenbuch Band 1 (Halász 1986) geht Halász 1986 nur auf hinterlüftete Flachdächer im Holzbau ein. Er weist jedoch bereits darauf hin, dass auf die Höhe des Hinterlüftungsquerschnittes und die Dichtigkeit der Dampfsperre zu achten ist.

Schulze (Schulze 2005) erwähnt die Problematik der nicht hinterlüfteten Flachdächer mit Dämmung in der Trägerebene erstmals in der dritten Auflage des Buches Holzbau. Er geht dabei hauptsächlich auf die möglichen Schäden aufgrund zu hoher Einbaufeuchte und fehlenden chemischen Holzschutzes der Holzbauteile ein. Aufgrund möglicher Undichtheiten der Dachhaut, die bei einem begrünten Dach schwer feststellbar ist, empfiehlt er für Flachdächer mit Begrünung die Ausbildung der Dämmebene über der Trägerebene.

Studer und Strauss erwähnen in ihrem Merkblatt 2002 (Studer, Strauss 2002) für Flachdachaufbauten mit Hohlkastenelementen nur die eventuelle Aufwölbung der äußeren Platte durch Feuchteanreicherung.

Auch Bonk und Arndt sehen 2004 (Bonk, Arndt 2004) die Ursache für einen Schadensfall eines unbelüfteten Flachdaches mit Vollsparrendämmung in der zu hohen Feuchte im Bauteilaufbau zum Zeitpunkt des Aufbringens der Dachhaut. Sie fordern daher Feuchtemessungen der Baustoffe (Holzbauteile und Dämmung) auf der Baustelle. Außerdem gehen sie auf den lt. Norm geforderten  $s_d$ -Wert der Dampfsperre von  $> 100\text{m}$  ein: Sie fordern die Verwendung von Dampfbremsschichten mit dem minimalen zur Tauwasserbegrenzung notwendigen  $s_d$ -Wert und den Einsatz von feuchteadaptiven Dampfbremsen.

Mehrere Veröffentlichungen am Fraunhofer Institut für Bauphysik (Holm, Künzel 2000, Sedlbauer, Großkinsky 2002, Sedlbauer, Großkinsky 1999, Künzel, Sedlbauer 2007, Hinrichs, Holm 2008, Künzel, Großkinsky 1998) beschäftigen sich mit unbelüfteten Steildächern und belüfteten Flachdächern. Für unbelüftete außenseitig dampfdichte Steildächer wird eine feuchtevariable Dampfbremse empfohlen. Zum Teil wird auf die Problematik der unbelüfteten Flachdächer im Holzbau hingewiesen; eine umfassende Studie liegt jedoch nicht vor.

Haustein erwähnt in (Haustein 2007) einen Schaden an einem nicht belüfteten Flachdach im Holzbau, dessen Dämmung in der Trägerebene ausgebildet ist. Er gibt als Schadensursache den Eintrag von Feuchtigkeit durch Konvektion aufgrund von Leckagen in der luftdichten Hülle (Dampfsperre /-bremse) an. Auf die Problematik der Konstruktion geht er nicht näher ein.

Borsch-Laaks erklärt die unbelüftete Flachdachkonstruktion im Holzbau sogar als empfehlenswerter gegenüber den belüfteten Flachdächern, weil die Sicherstellung der Hinterlüftung (Querschnittshöhe und Zuluftöffnungen) oft schwierig ist (Borsch-Laaks 2004). Lt. Borsch-Laaks lässt sich *„Die größte Planungssicherheit [...] durch nicht belüftete Konstruktionen gewinnen, bei denen feuchtevariable Dampfbremsen eingebaut werden ...“* Er beruft sich bei dieser Aussage unter anderem auf Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik zu unbelüfteten Steildächern und belüfteten Flachdächern sowie auf eine Berechnung des Kondensatanfalls und der Austrocknung nach Glaser für einen unbelüfteten Dachaufbau.

Etwas kritischer sehen die Autoren des schweizer Merkblatts zum Flachdach im Holzbau (SVDW 2007) den unbelüfteten Flachdachaufbau mit Hohlkastenelementen. Sie weisen auf die Notwendigkeit

einer dynamischen Simulation des Feuchteverhaltens dieser Bauteilaufbauten und die geringe Fehlertoleranz des Aufbaus bei Ausführungsfehlern hin.

Bis jetzt kann in der Literatur wenig Information zum Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten mit Multibox-Elementen gefunden werden.

Als einzige Veröffentlichung zu diesem Thema konnte der Forschungsbericht zu Hohlkastenelementen von Gonin, Weber und Blaser (Gonin et al. 2003) gefunden werden. Sie untersuchten die in der Schweiz verbreitete Version der Flachdächer mit Hohlkastenelementen: Die Ausführung ohne raumseitige Dampfsperre /-bremse. Die dampfbremsende Funktion übernimmt in diesem Fall die innere Holzschalung. In einer Parameterstudie zeigen sie auf, dass die Schichtdicke (der  $s_d$ -Wert) der inneren Holzschalung, die Materialwahl der Wärmedämmung und die Ausbildung der Nutzschicht auf der Dachhaut wesentlich zum Feuchteverhalten der Konstruktion beitragen.

Zurzeit wird außerdem an der Holzforschung Austria in Wien an einer Untersuchung von Flachdachaufbauten mit Multibox-Elementen gearbeitet.

## 1.3.2 Holz / Eigenschaften von Holz

Der Baustoff Holz nimmt bereits in der frühen Baugeschichte eine wichtige Rolle ein. Schon im Mittelalter wurde aufgrund der großen Nachfrage nach Bauholz die maschinelle Erzeugung von Schnittholz begonnen (Niemz 1993).

Im 19. Jahrhundert wurde der Baustoff Holz von den neu aufkommenden Materialien Stahl und Beton immer mehr zurückgedrängt. Auch im 20. Jahrhundert – vor allem nach dem 2. Weltkrieg – erhielten Konstruktionen aus Stahlbeton den Vorzug gegenüber Holz.

Erst gegen Ende des 20. Jahrhunderts als die ökologischen Gesichtspunkte des Bauens an Gewicht gewannen, konnte ein Wiederanstieg des Anteils von Holz in der Baubranche verzeichnet werden (Winter 1997).

Die ökologische Bedeutung von Holz ergibt sich einerseits aus der Beurteilung des CO<sub>2</sub> – Verbrauchs von Gewinnung der Rohstoffe bis zu deren Entsorgung (Geissler, Winter 2000). Andererseits begünstigen die zunehmend höheren Dämmstoffdicken der Hüllflächen (Reduzierung Energieverbrauch für die Heizung) den Holzbau (Sperzel 2004), weil im Holzskelettbau die zusätzlich statisch notwendigen Wanddicken entfallen und die Auswirkungen von Wärmebrücken reduziert werden können.

### 1.3.2.1 Aufbau von Holz

Die Holzstruktur wird in Makro-, Mikro- und Submikrostruktur unterteilt. Unter Makrostruktur versteht man die mit dem freien Auge sichtbaren Merkmale – die Mikrostruktur ist unter dem Mikroskop und die Submikrostruktur unter dem Elektronenmikroskop sichtbar. Die Eigenschaften von Holz werden von allen drei Strukturmerkmalen gleichermaßen beeinflusst (Niemz 1993).

Niemz führt folgende Strukturmerkmale an:

#### *Makrostruktur*

Schnittrichtung (Querschnitt, Radialschnitt, Tangentialschnitt)

Faser-Last-Winkel

Kern-/Splintholz (Reifholz, Kernreifholz)

Jahrringbreite und der Spätholzanteil

Vorhandensein von Reaktionsholz

#### *Mikrostruktur*

Gewebeanteile (Gefäßanteile über 20%, Faseranteile über 60%, Holzstrahlanteile,

Längsparenchymanteile)

Gewebeanordnung

Gewebedimensionen

Faserlängen und Faserwanddicken

Zellwandanteil insgesamt

Vorhandensein von Reaktionsholz

Faserverlauf

#### *Submikrostruktur*

Dicke der Zellwandschichten

Fibrillenorientierung

Lignifizierung der Zellwandschichten

Nach Abzug des Wassergehaltes besteht Holz hauptsächlich aus Gerüststoffen (Cellulose, Hemicellulose und Lignin) und in geringem Umfang aus sogenannten Extraktstoffen (Harze, Fette, Gerbsäure, etc.) (Bruckner, Schneider 1997).

Abb. 3/8 Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus von Holz (Nadelholz). (a) Makrostruktur, (b) Mikrostruktur, (c) Submikrostruktur

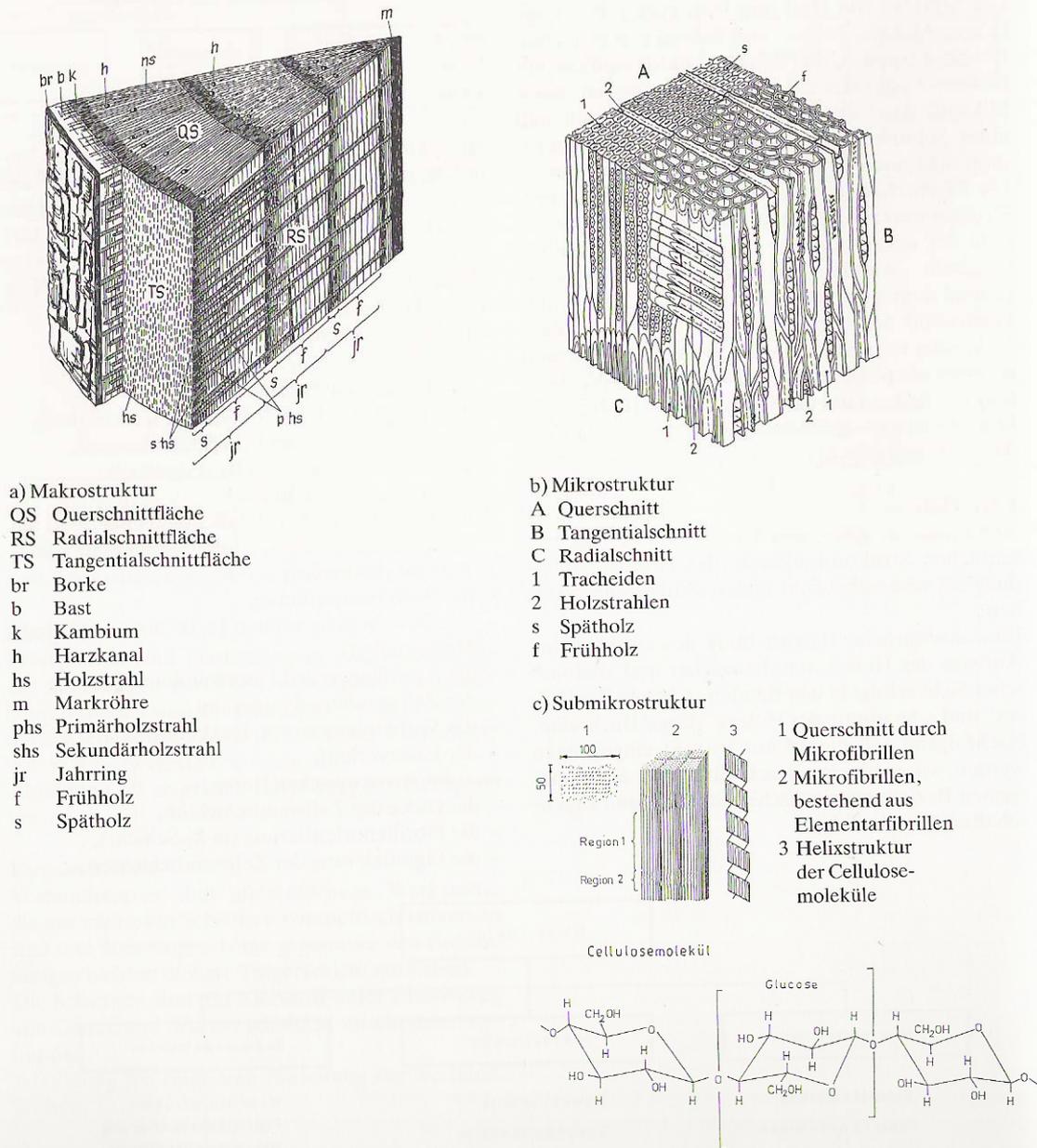


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus von Holz. Aus: (Niemz 1993)

### 1.3.2.2 Holz als Baustoff

Der Baustoff Holz ist in verschiedensten Formen verfügbar: Neben Vollholz werden Holzwerkstoffe als Brettschichtholz, Lagenholz, Spanplatten, Faserplatten oder Verbundplatten produziert. Im Folgenden wird nur auf die Holz und Holzwerkstoffe eingegangen, die für die in dieser Arbeit untersuchten Aufbauten zur Verwendung kommen.

#### *Stabförmiges Holz*

Für den Träger in einem Hohlkastenelement können unterschiedliche stabförmige Holzwerkstoffe oder Holz zum Einsatz kommen:

#### Konstruktionsvollholz (KVH)

Konstruktionsvollholz und keilgezinktes Konstruktionsvollholz ist aus Rundholz gewonnenes Holz in Regelquerschnitten für tragende Konstruktionen. Es liegt in verschiedenen Festigkeitsklassen vor. (dataholz 2009)

#### Konstruktionsholz (Lamellenholz)

(auch: Duo- oder Triobalken)

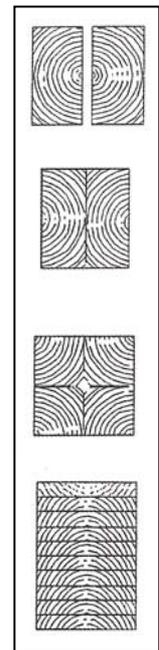
Unter Konstruktionsholz versteht man kerngetrennte oder kernfreie Hölzer, die Rücken an Rücken mit einer senkrechten Fuge verleimt werden. (pro:Holz 2002)

#### Kreuzholz

Kreuzholz besteht aus Viertelhölzern mit nach außen liegender Kernseite. Dadurch können größere Querschnitte und eine höhere Stabilität als mit Konstruktionsvollholz KVH realisiert werden. (pro:Holz 2002)

#### Brettschichtholz (BSH)

Brettschichtholz besteht aus mindestens drei faserparallel miteinander verklebten Holzschichten. Es können gerade und gekrümmte Träger hergestellt werden. Brettschichtholz eignet sich vor allem zur Herstellung von Trägerquerschnitten für Tragwerke mit großen Spannweiten (dataholz 2009). Außerdem können zur Verstärkung der Biegefestigkeit Faserlamellen zwischen die unteren beiden Brettschichten eingearbeitet werden (pro:Holz 2002).



**Abbildung 1.6:**  
Aus: (pro:Holz  
2002)

#### Furnierwerkstoffe

Zu den Furnierwerkstoffen zählen unter anderem das Furnierstreifenholz (PSL – Parallel Strand Lumber (dataholz 2009)), das Spanstreifenholz (LSL – Laminated Strand Lumber (dataholz 2009), Intrallam (pro:Holz 2002)) und das Furnierschichtholz (FSH (pro:Holz 2002), LVL – Laminated Veneer Lumber (dataholz 2009), Microllam (bauen mit holz 1995), Kerto (Niemz 1993)).

Furnierstreifenholz (PSL – Parallel Strand Lumber) wird aus 3mm dicken und 15mm breiten Furnierstreifen erzeugt, die bis zu 2,6 m lang sein können. Die Furnierstreifen werden parallel zur Balkenachse längenversetzt ausgerichtet und mit Phenolharz zu Endlosbalken verklebt. Als Holzarten werden Douglas Fir (DF) und Yellow Pine (SYP) verwendet. (dataholz 2009)

Das Furnierschichtholz Kerto besteht aus jeweils 3,2 mm dicken miteinander verleimten Furnierschichten. Kerto Furnierschichtholz kann in Kerto S und Kerto Q unterteilt werden. Ersteres besteht aus faserparallelen Furnierlagen; Kerto Q hat auch einige rechtwinklig zur Faserrichtung angeordnete Lagen. Kerto Furnierschichtholz kann als balkenförmiges oder plattenförmiges Bauteil angewendet werden. (bauen mit holz 1995)

### Doppel-T-Profil Träger (TJI-Träger)

Doppel-T-Träger bestehen aus Gurten aus Furnierschichtholz oder Vollholz (Schulze 2005) und Stegen aus OSB (Schulze 2005, bauen mit Holz 1995). Gegenüber Konstruktionsvollholz sind größere Trägerhöhen und somit größere Spannweiten und größere Dämmstoffdicken zwischen den Trägern möglich. Durch den schmalen Steg wird die Wärmebrücke reduziert, die durch den Träger verursacht wird. (bauen mit Holz 1995)

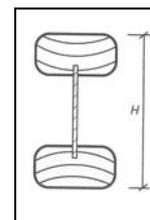


Abbildung 1.7:  
Aus: (Schulze  
2005)

### Nail-Web-Träger (HTS-Träger)

Nail-Web-Träger sind Doppel-T-Träger mit Gurten aus Vollholz und Stegen aus Profilblech (bauen mit Holz 1995). Je nach statischer Notwendigkeit können Nail-Web-Träger mit einem oder zwei Stegen ausgebildet werden (HTS-Träger 2009).

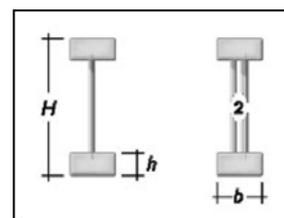


Abbildung 1.8: Aus (HTS-  
Träger 2009)

### Deckensysteme

Es gibt mittlerweile eine Vielzahl unterschiedlicher Deckensysteme. Abbildung 1.9 zeigt eine Auswahl von Deckensystemen; zusammengestellt von pro:Holz (pro:Holz 2002)

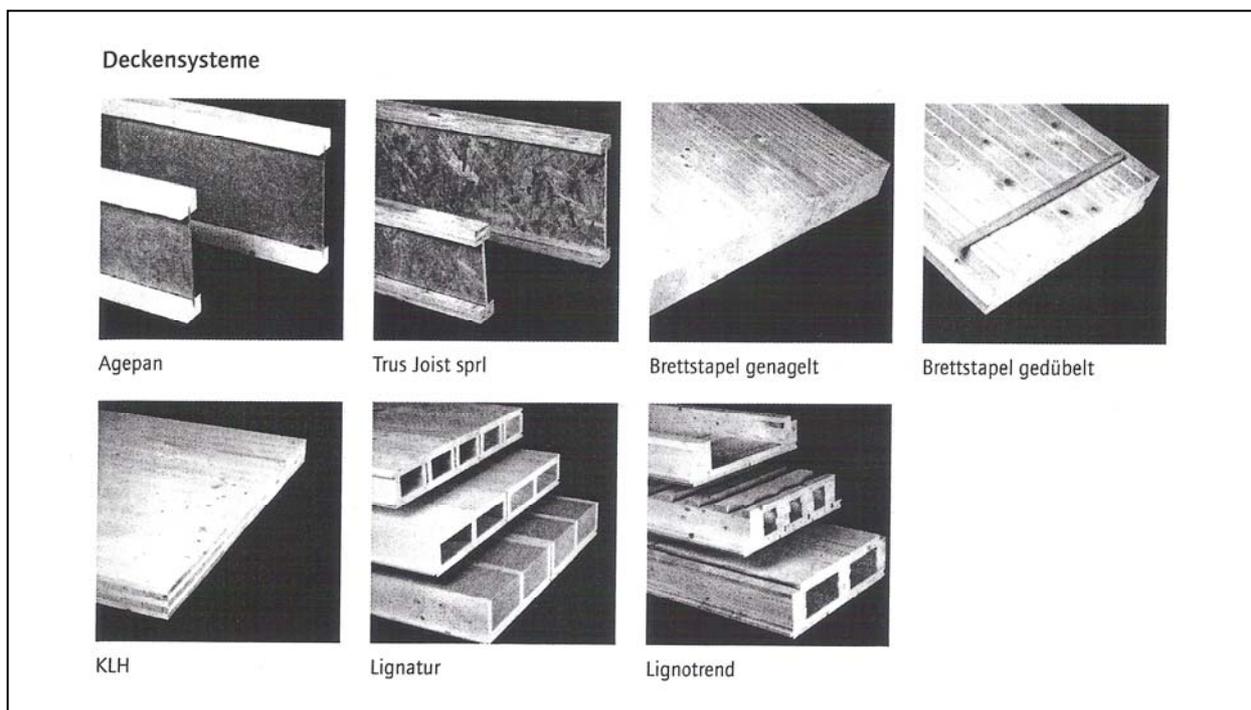


Abbildung 1.9: Deckensysteme. Aus: (pro:Holz 2002)

### *Plattenförmiges Holz*

Plattenförmiges Holz wird für die Hohlkastenelemente als untere und obere Holzschalung eingesetzt. Grundsätzlich werden plattenförmige Holzwerkstoffe lt. dataholz (dataholz 2009) in Lagenwerkstoffe, Spanwerkstoffe und Faserwerkstoffe eingeteilt. Niemz erwähnt zusätzlich noch die Verbundwerkstoffe (Niemz 1993).

### **Lagenholz**

Zum Lagenholz zählt (dataholz 2009):

- Brettsperrholz (z.B. KLH – Massivholz)
  - Massivholzplatten (z.B. 3- oder 5-Schichtplatte K1 Multiplan)
  - Sperrholzplatten
  - Furnierschichtholz (FSH (pro:Holz 2002), LVL – Laminated Veneer Lumber (dataholz 2009), Microllam (bauen mit holz 1995), Kerto-Schichtholz (Niemz 1993), (pro:Holz 2002))
- Niemz ordnet Furnierstreifenholz (PSL – Parallel Strand Lumber) ebenfalls dem Lagenholz zu (Niemz 1993).

Lagenholz besteht aus mehreren übereinander angeordneten Massivholz- oder Furnierholzlagen. Die einzelnen Schichten werden untereinander verklebt (Brettsperrholz zum Teil verklebt oder verdübelt (dataholz 2009)). Die Makrostruktur dieser Holzwerkstoffe wird vor allem von der Holzart, der Schichtdicke, der Vergütung der Lagen (z.B. Einlagerung von Kunstharzen, Verdichtung der Struktur) und der Anordnung der Lagen bestimmt (Niemz 1993).

*Brettsperrholz* besteht aus mindestens drei Lagen mit rechtwinklig angeordneter Faserrichtung, die untereinander verleimt oder verdübelt werden. Der Übergang zwischen Brettsperrholz und Massivholzplatten ist fließend. (dataholz 2009)

*Massivholzplatten* bestehen aus mehreren untereinander verleimten Holzschichten (meistens drei oder fünf Schichten), wobei die Faserrichtung der beiden Deckschichten parallel verläuft und die Faserrichtung der mittleren Schicht rechtwinklig dazu angeordnet ist. (dataholz 2009)

*Sperrholzplatten* sind Platten die aus mindestens drei kreuzweise verklebten Furnierlagen mit einer maximalen Dicke von 7mm bestehen. Durch die Wahl des Klebstoffs können die Platteneigenschaften so beeinflusst werden, dass Platten für den Trocken-, Feucht- und Außenbereich hergestellt werden können.

*Furnierschichtholz* besteht aus mehreren ca. 6mm dicken Furnierlagen, die untereinander verleimt werden. Für plattenförmiges Furnierschichtholz werden zwischen faserparallelen Schichten auch um 90° verdrehte Schichten angeordnet, um eine höher aussteifende Wirkung zu erzielen. Bei stabförmigen Werkstoffen werden nur faserparallele Schichten angeordnet. (dataholz 2009)

### **Spanplatten**

Zu den Spanplatten zählen OSB-Platten, Spanplatten, zementgebundene Spanplatten und Spanstreifenholz (LSL – Laminated Strand Lumber, Intrallam (pro:Holz 2002)).

Spanplatten sind Holzwerkstoffe, die aus untereinander durch Klebstoff oder andere Bindemittel verbundenen spanartigen Partikeln bestehen (dataholz 2009).

*OSB – Platten (Oriented Strand Boards)* sind mehrschichtige Platten aus Spänen, die unter hohem Druck verleimt werden. Die Deckschichten weisen meist überwiegend faserparallele Späne auf. In den mittleren Lagen werden die Späne entweder rechtwinklig dazu oder zufällig angeordnet. (dataholz 2009)

*Spanplatten* sind Platten aus Holzspänen, die mit verschiedenen Bindemitteln verklebt werden. Die Holzspäne liegen überwiegend parallel zur Plattenebene, in der Ebene aber unorientiert. Die Platten werden meist mehrschichtig oder mit Übergang in der Struktur hergestellt. (dataholz 2009)

*Zementgebundene Spanplatten* sind Platten aus Holzspänen, Spänen anderer pflanzlicher Materialien (z.B. Hanf, Flachs) und mineralischen Bindemitteln (z.B. Portland-Zement). Es wird unterschieden

zwischen einschichtigen (homogenen) und mehrschichtigen zementgebundenen Spanplatten. Mehrschichtige Platten werden als Verbundwerkstoff mit anderen Materialien (z.B. Hartschaumplatten) hergestellt. Zementgebundene Spanplatten können auch als aussteifende Beplankung eingesetzt werden. Außerdem sind sie relativ resistent gegen Bewitterung, Frost, Insekten und Pilzbefall. (dataholz 2009)

*Spanstreifenholz* besteht aus ca. 0,8mm dicken Spänen aus Pappelholz, die mit wasserfestem Klebstoff verbunden werden. Bei in Längsrichtung angeordneten Spänen wird der Werkstoff als stabförmiger Bauteil (z.B.: Balken) eingesetzt. Bei einem Einsatz als Platte werden auch Späne in Querrichtung angeordnet, um eine bessere aussteifende Wirkung zu erzielen. (dataholz 2009)

### **Faserplatten**

Unter den Faserplatten werden folgende Plattenarten unterschieden (dataholz 2009):

- Harte Holzfaserplatten (werden allgemein als „Hartfaserplatten“ bezeichnet)
- Mitteldichte Faserplatten (MDF)
- Mittelharte Holzfaserplatten
- Poröse Holzfaserplatten (werden allgemein als „Weichfaserplatten“ bezeichnet)

Faserplatten werden für die untersuchten Hohlkastenelemente nicht als innere oder äußere Holzschalung verwendet.

### **Verbundplatten**

Zu den Verbundplatten zählen lt. Niemz (Niemz 1993) unter anderem Tischlerplatten (z.B. Stabsperrholz, Stäbchensperrholz). Verbundplatten kommen bei den untersuchten Hohlkastenelementen nicht zum Einsatz. Sie könnten eventuell als verkleidende innere Holzschalung eingesetzt werden.

### 1.3.2.3 Zusammenspiel von Holzstruktur und Holzeigenschaften

Die Makro-, Mikro- und Submikrostruktur von Holz und Holzwerkstoffen beeinflussen deren Eigenschaften. Niemz zeigt Beziehungen zwischen der Holzstruktur und Holzeigenschaften auf (Niemz 1993). Eine Quantifizierung ist aufgrund der geringen bisherigen Forschungstätigkeit nicht möglich.

#### *Holz*

Unterschiede der Rohdichte von Holz ergeben sich hauptsächlich durch makroskopische Struktureinflüsse wie die Jahrringbreite, das Vorhandensein von Reaktionsholz und durch Kern- bzw. Splintholz.

Die Festigkeit wird durch den Faser-Last-Winkel, die Schnittrichtung, Jahrringbreite, Vorhandensein von Reaktionsholz, durch Kern- bzw. Splintholz beeinflusst. (Niemz 1993)

Der Einfluss von mikroskopischen und submikroskopischen Strukturmerkmalen auf die mechanisch-physikalischen Eigenschaften von Holz wird weitgehend von den makroskopischen Einflüssen überdeckt (Wimmer 1991).

#### *Holzwerkstoffe*

##### **Brettschichtholz / Lamellenholz**

Für Brettschichtholz und Lamellenholz gelten grundsätzlich die gleichen Zusammenhänge zwischen Holzstruktur und Holzeigenschaften wie für Vollholz. Durch die Verarbeitung werden jedoch Holzfehler weitgehend ausgeglichen und es tritt eine Vergütung ein.

##### **Lagenholz**

Wesentliche Einflussfaktoren der Holzstruktur auf die Eigenschaften von Lagenholz sind (Niemz 1993):

- Anteil der Lagen parallel zur Faserrichtung der Deckfurniere
- Verhältnis der Lagendicke zur Gesamtplattendicke
- Faser-Last-Winkel zwischen den Lagen
- Klebstoffanteil

Die Festigkeit von Lagenholz erreicht bei einem Harzgehalt 8 bis 10 % Maximalwerte – mit Ausnahme der Druckfestigkeit, die ihr Maximum bei 60 % erreicht.

Für die maximale Feuchtebeständigkeit sind 30 bis 40 % Harzgehalt notwendig.

- Klebstoffart

Die Klebstoffart beeinflusst die Klimabeständigkeit: Phenolharzverleimte Platten sind im Vergleich zu harnstoffharzverleimten Platten wesentlich beständiger gegenüber Klimaeinflüssen.

- Rohdichte

Mit zunehmendem Grad der Verdichtung steigt die Druckfestigkeit an, Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul erreichen bei 1200 bis 1300 kg/m<sup>3</sup> Maximalwerte.

##### **Spanplatten**

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Eigenschaften von Spanplatten sind (Niemz 1993):

- Schlankheitsgrad der Späne  
(Verhältnis Spanlänge : Spandicke) Bis zu einem Schlankheitsgrad von 100 steigen Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul an – die Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene nimmt ab. Die Ursache für den Festigkeitsanstieg wird in der Zunahme der Überlappungsflächen gesehen.
- Rohdichte  
Die Festigkeit steigt linear mit der Rohdichte an.
- Rohdichteprofil senkrecht zur Plattenebene  
Spanplatten weisen meist unterschiedliche Rohdichten in den Deckschichten und der Mittelschicht auf.
- Festharzanteil der Platten

- Spanorientierung  
Durch die Orientierung der Späne können Biegefestigkeit und Elastizitätsmodul erhöht werden (OSB).
- Spanart  
Die Herstellung der Späne beeinflusst die Platteneigenschaften durch Partikelgestalt und Oberflächenstruktur (Schneidspan, Schlagspan).
- Klebstoffart  
Wie für Lagenholz kann die Klimabeständigkeit durch die Klebstoffart beeinflusst werden.

### **Faserplatten**

Die Einflussfaktoren auf die Platteneigenschaften für Faserplatten sind ähnlich wie für Spanplatten. Ein Unterschied besteht in der Aktivierung der holzeigenen Bindekräfte bei Faserplatten und der Verfilzung der Fasern untereinander. Dadurch können Faserplatten hergestellt werden, die einen wesentlich geringeren Klebstoffanteil aufweisen als Spanplatten (Nassverfahren).

Der Klebstoffanteil für Mitteldichte Faserplatten (MDF) liegt jedoch im Bereich des Klebstoffanteils von Spanplatten.

Den größten Einfluss auf die Platteneigenschaften haben (Niemz 1993):

- Mahlgrad  
Bei der Erhöhung des Mahlgrades von SR 10° auf SR 90° kann die Biegefestigkeit von harten Faserplatten um 80% erhöht werden.
- Rohdichte  
Die Biegefestigkeit von harten Faserplatten erhöht sich bei Anheben der Rohdichte von 630 kg/m<sup>3</sup> auf 1000kg/m<sup>3</sup> um 70%.

### 1.3.2.4 Feuchtespezifische Eigenschaften von Holz

Die Feuchte spielt für die mechanischen Eigenschaften des Baustoffes Holz eine zentrale Rolle, weil sie diese wesentlich beeinflussen kann. Außerdem beeinflusst die Holzfeuchte das Volumen (Quellen und Schwinden) und ermöglicht neben anderen Faktoren den Befall durch Schimmelpilz.

#### *Kenngößen der Holzfeuchte*

Holz besteht aus 50 % bis 60 % Porenanteil und verfügt dadurch über eine große innere Oberfläche. Durch die poröse Struktur kann Holz Wasser aus der Luft (in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit) und flüssiges Wasser oder andere Flüssigkeiten (Holzschutzmittel, Klebstoffe) aufnehmen.

Je nach Wasseranteil können folgende Feuchtezustände unterschieden werden:

- Darrtrocken:  
Die Holzfeuchte beträgt 0,0 M-%, es ist kein Wasser vorhanden. Der darrtrockene Zustand dient als Bezugsgröße. In verbautem Holz kommt dieser Zustand nicht vor (Bruckner, Schneider 1997).
- Fasersättigung:  
Das gesamte Mikrosystem des Holzes (Hohlraumsystem in den Zellwänden) ist mit Wasser gefüllt (Niemz 1993). Der Fasersättigungsbereich liegt bei ca. 30 M-% (Bruckner, Schneider 1997).
- Wassersättigung:  
Im Zustand der Wassersättigung ist das gesamte Mikro- und Makrosystem des Holzes mit Wasser gefüllt (Niemz 1993).

Weiters werden die Bereiche zwischen den oben genannten Zuständen unterschieden (Bruckner, Schneider 1997):

- Bereich zwischen Fasersättigung und Darrzustand:  
Das Mikrosystem des Holzes ist nicht feuchtegesättigt. Die Holzfeuchte liegt zwischen 0,0 M-% und 30 M-%. Bei der Veränderung des Feuchtegehaltes kommt es in diesem Bereich zu Veränderungen des Volumens (Schwind- und Quellerscheinungen). Bauholz wird in diesem Feuchtebereich verarbeitet.  
In diesem Bereich wird der Wassergehalt des Holzes von der Luftfeuchte der Umgebung bestimmt. Die hygroskopischen Gleichgewichtsfeuchten werden auch mit dem Index der relativen Luftfeuchtigkeit bezeichnet: z.B.  $u_{50}$  (Lutz et al. 2002).
- Bereich zwischen Wasser- und Fasersättigung:  
Der Feuchtegehalt liegt über 30 M-%. Das Mikrosystem ist maximal mit Wasser gefüllt, die Hohlräume nur teilweise. Die Holzfeuchte im lebenden Baum liegt meist in diesem Bereich (Niemz 1993).

Der Wasseranteil in Holz wird dabei in freies Wasser und gebundenes Wasser unterteilt. Mit freiem Wasser wird das Wasser im Makrosystem (oberhalb der Fasersättigung) bezeichnet. Das gebundene Wasser, ist die im Mikrosystem eingelagerte Feuchtigkeit (unterhalb der Fasersättigung). (Niemz 1993)

Der Feuchteanteil des Holzes wird als massebezogene Holzfeuchte angegeben. Es gilt:

$$u_{m,H} = \frac{m_u - m_{dtr}}{m_{dtr}} \cdot 100[\%] \quad (1.1)$$

$u_{m,H}$  ... massebezogene Holzfeuchte  
 $m_u$  ... Masse des feuchten Holzes  
 $m_{dtr}$  ... Masse des darrtrockenen Holzes

### Sorptionsverhalten von Holz

Die Feuchteaufnahme und –abgabe von Baustoffen wird durch die Sorptionsisotherme bestimmt, die das Verhältnis des Feuchtegehaltes des Baustoffs zur relativen Luftfeuchtigkeit abbildet. Bei der Feuchteaufnahme spricht man von Adsorption, bei der Abgabe von Desorption.

### Sorption

Der für das Bauwesen maßgebliche Feuchtebereich für Holz ist der Bereich zwischen Darrzustand und Fasersättigung (hygroskopischer Bereich). In diesem Bereich kommt es zur Einlagerung von gebundenem Wasser, das aus der Luft aufgenommen wird.

Je nach Art der Bindungsform des Wassers wird in diesem Bereich zwischen folgenden Phasen unterschieden: (Niemz 1993)

- Chemisorption (Holzfeuchte 0 bis 6 M-%, rel. Luftfeuchte  $\leq 20\%$ )  
Wassermoleküle werden über Wasserstoffbrückenbindungen an Cellulosemoleküle angelagert.
- Adsorption (Holzfeuchte 6 bis 15 M-%, rel. Luftfeuchte  $\leq 60\%$ )  
(auch: Physisorption) Wassermoleküle werden aufgrund physikalischer Wechselwirkungen zwischen den Molekülen gebunden.
- Kapillarkondensation (Holzfeuchte 15 M-% bis Fasersättigung, rel. Luftfeuchte 60% bis 100%)  
Die Kapillaren des Mikrosystems füllen sich zunehmend mit Wasser, weil aufgrund des geringen Sättigungsdampfdruckes ein Teil des Wasserdampfes kondensiert. Dabei dehnen sich die Fibrillen, soweit es möglich ist.

Die Einlagerung von Wasser im hygroskopischen Bereich führt zu Quell- und Schwindverformungen des Holzes.

Bei der Feuchteaufnahme entsteht Sorptionswärme, die mit ansteigendem Feuchtegehalt abnimmt und bei  $u_m = 30\%$  den Wert 0 erreicht.

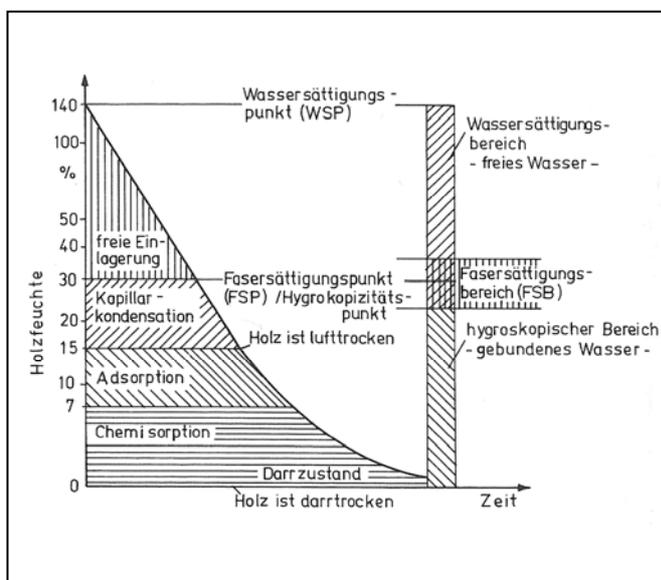


Abbildung 1.10: Bindungsformen des Wassers in Holz.  
Aus: (Niemz 1993)

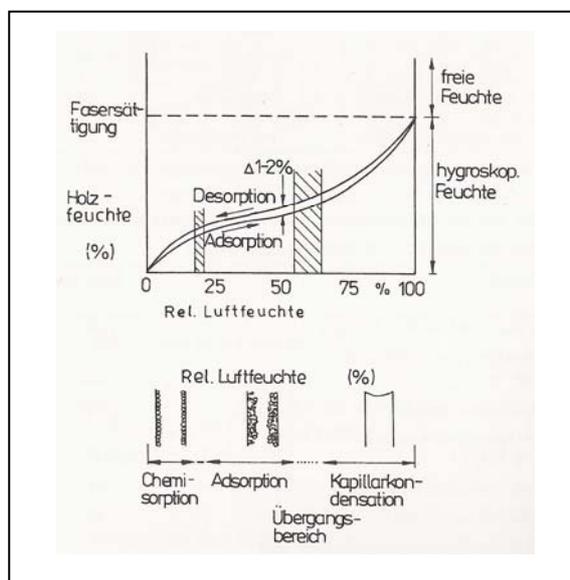


Abbildung 1.11: Sorptionsisothermen von Holz und Bindungsformen des Wassers. Aus: (Niemz 1993)

Der Fasersättigungsbereich ist erreicht, wenn der höchstmögliche Gehalt an gebundenem Wasser vorliegt. Er stellt sich ein, wenn das Holz mit wasserdampfgesättigter Luft (mit 100% relativer Luftfeuchte) umgeben ist.

Trendelenburg (Trendelenburg 1955) gibt für Nadelhölzer ohne Farbkern (Fichte und Tanne) einen Feuchtegehalt von 30 M-% bis 34 M-% als Fasersättigungsbereich an.

### Feuchtespeicherisotherme von Holz

Die Feuchtespeicherisotherme bildet die in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit aufgetragenen Holzfeuchten ab. Für Holz und feinporige mineralische Baustoffe ergibt sich ein typisch S-förmiger Verlauf der Feuchtespeicherisotherme (Lutz et al. 2002). Bei Vergleich der Sorptionsisothermen für die Feuchtaufnahme (Adsorption) und der Feuchteabgabe (Desorption) lässt sich feststellen, dass diese nicht deckungsgleich sind. Die Ursache dafür wird im Hystereseffekt gesehen – der Vorgang ist jedoch nicht eindeutig geklärt (Niemz 1993). Lt. Künzel (Künzel 1994) ist für die Beurteilung und Charakterisierung von Baustoffen die Adsorptionsisotherme ausreichend. Rode (Rode 1990) schlägt vor, die Adsorptions- und Desorptionsisotherme zu mitteln.

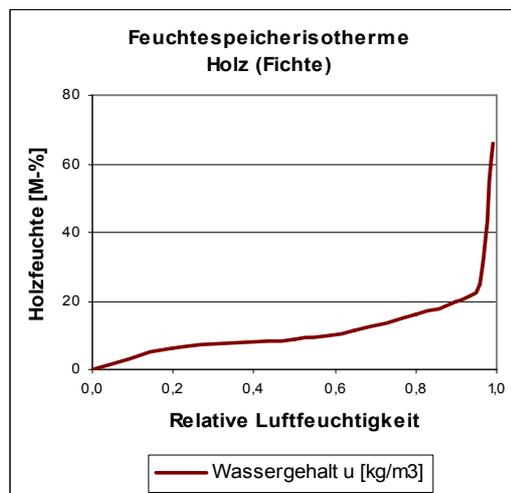


Abbildung 1.12: Feuchtespeicherisotherme für Holz (Fichte) (WUFI Pro 2005)

Die Untersuchung der Hohlkastenelemente mit dem Programm WUFI (WUFI Pro 2005) erfolgt aufgrund der Programmeigenschaften nur mit der Adsorptionsisotherme.

### Einflüsse auf das Sorptionsverhalten von Holz

Unterhalb des Fasersättigungsbereiches stellt sich für Holz durch hygroskopische Wasseraufnahme aus der Luft eine Gleichgewichtsfeuchte ein, die durch folgende Parameter beeinflusst wird (Niemz 1993):

- relative Luftfeuchte
- Temperatur
- Luftdruck
- chemischer und struktureller Aufbau des Holzes

Niemz zeigt, dass sich bei höheren *Temperaturen* niedrigere Holzfeuchten einstellen als bei niedrigen Temperaturen (Niemz 1993). Lt. Klopfer (Lutz et al. 2002) ist der Einfluss der Temperatur auf den Feuchtegehalt von Baustoffen so gering, dass er außer Acht gelassen werden kann.

Außerdem beeinflusst die Art der *Trocknung* durch die Veränderung des Aufbaus des Holzes die Holzfeuchte. Bei höheren Trocknungstemperaturen kann die Sorptionsisotherme von Holz im Bereich von 40% bis 80% relativer Luftfeuchte deutlich nach unten verschoben werden (Niemz 1993).

Auch die Bestandteile der *Holzschutzmittel* können Veränderungen des Feuchteverhaltens von Holzbauteilen bewirken. Bei einer Behandlung mit salzhaltigen Holzschutzmitteln kann ein starker Anstieg des Feuchtegehaltes beobachtet werden (Niemz 1993).

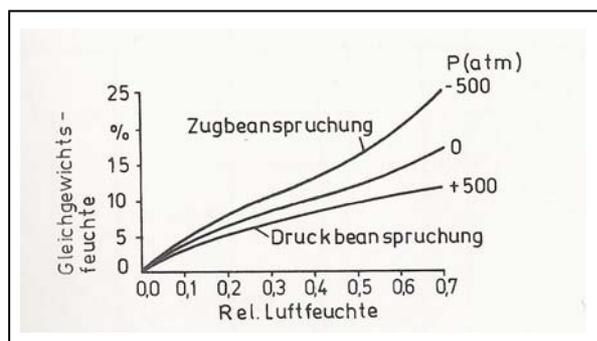


Abbildung 1.13: Lasteinfluß auf die Sorptionsisotherme von Holz. Aus: (Niemz 1993)

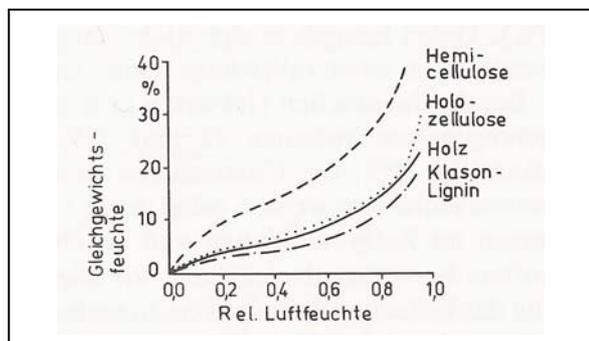


Abbildung 1.14: Sorptionsisothermen von Hemicellulose, Holocellulose, Klason-Lignin und Holz. Aus: (Niemz 1993)

Der *Lasteinfluß* auf das Holzbauteil kann ebenfalls zu einer Verschiebung der Sorptionsisotherme führen. Abbildung 1.13 zeigt, dass die Holzfeuchte bei Zugbeanspruchung deutlich höher und bei Druckbeanspruchung deutlich niedriger liegt als ohne Lasteinfluß.

Die Bestandteile von Holz – Cellulose, Hemicellulose und Lignin – weisen unterschiedliche Sorptionsisothermen auf. *Holzerstörende Pilze*, die Cellulose und Hemicellulose abbauen (Braunfäule) können dadurch das Sorptionsverhalten von Holz wesentlich beeinflussen. Ligninabbauende Pilze (Weißfäule) haben keinen Einfluss auf das Feuchteverhalten von Holz. (Niemz 1993)

Bei Holzwerkstoffen hat vor allem das verwendete *Bindemittel* einen großen Einfluss auf das Sorptionsverhalten (Niemz 1993).

#### *Bedeutung der Holzfeuchte für Bauholz*

Die Schwankung der Holzfeuchte im hygroskopischen Bereich wirkt sich unterschiedlich auf Bauholz aus (Niemz 1993):

- Mit zunehmender Holzfeuchte sinkt die *Festigkeit* des Holzes. Abbildung 1.15 zeigt den Einfluss der Holzfeuchte auf den Elastizitätsmodul, die Biegefestigkeit und die Druckfestigkeit.
- Die *Kriechverformung* von Holzbauteilen bei Langzeitbelastung fällt mit höherer Holzfeuchtigkeit stärker aus.
- Die *Wärmeleitfähigkeit* von Holz steigt mit zunehmendem Feuchtegehalt des Holzes.
- Die Anfälligkeit gegen *Pilze* ist bei höherer Holzfeuchte größer.
- Durch *Quellen und Schwinden* können an der Oberfläche Risse entstehen oder Platten können sich aufwölben.

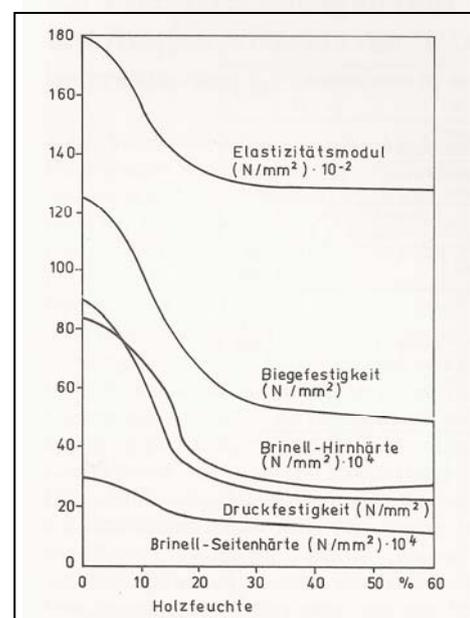


Abbildung 1.15: Einfluss des Feuchtegehalts auf die Festigkeit von Holz. Aus: (Niemz 1993)

Im Allgemeinen wird daher empfohlen, Bauholz unter den später erwarteten Umgebungsbedingungen (Luftfeuchte) zu verarbeiten.

Die ÖNORMen B 2215, B 2217 und B 2320 schreiben für Unterkonstruktionen aus Holz einen maximalen Feuchtegehalt von 18 M-% beim Einbau vor.

In DIN 68 800-2 wird der Einbau von Holz mit dem im Mittel zu erwartenden Feuchtegehalt lt.

DIN 1052-1 vorgeschrieben. DIN 1052-1 gibt die Gleichgewichtsfeuchte im Gebrauchszustand bei überdeckten, offenen Bauwerken mit  $15 \pm 3$  M-% an. Die Norm DIN 1052-1 wurde im Jahr 2000 durch die Norm DIN 1052 ersetzt, die angibt, dass eine Gleichgewichtsfeuchte von 10 M-% bis 20 M-% erwartet werden kann, wenn die Holzbaustoffe einer Temperatur von 20°C und nur für einige Wochen im Jahr einer relativen Luftfeuchte über 85% ausgesetzt sind.

### 1.3.2.5 Holzschädlinge und ihre Lebensbedingungen

#### *Holzschädlinge*

Um die berechneten Ergebnisse interpretieren zu können, ist es notwendig die Holzschädlinge und deren Lebensbedingungen zu kennen. So können Grenzwerte festgelegt werden, unterhalb denen nicht mit Beeinträchtigung der Eigenschaften des Holzes (vor allem der Festigkeit) durch Schädlinge gerechnet werden muss.

Die Holzschädlinge können unterteilt werden in pflanzliche Holzschädlinge (Pilze und Mikroorganismen) tierische Holzschädlinge (Käfer, Holzwespen, Ameisen, Schmetterlinge) und marine Holzschädlinge (Muscheln und Krebse).

Für die vorliegende Arbeit sind vor allem die pflanzlichen Holzschädlinge von Bedeutung, wobei die Zerstörung des Holzes hauptsächlich durch Pilze passiert.

Manche Mikroorganismen ernähren sich zwar von Holz, es entstehen dadurch jedoch kaum nennenswerte Schäden (Bruckner, Schneider 1997).

Die holzerstörenden Pilze werden anhand der Zerstörungserscheinungen klassifiziert. Es wird unterschieden zwischen Braunfäule, Weißfäule und Moderfäule. Diese bewirken einen Festigkeitsverlust des Holzes (Niemz 1993).

Die *Braunfäulepilze* (auch: Destruktionsfäule) ernähren sich vorwiegend von Cellulose und Kohlenhydraten, wodurch das Holz braun verfärbt wird (Bruckner, Schneider 1997).

Zu den häufigsten holzerstörenden Braunfäule-Pilzen zählen unter anderem der sogenannte Echte Hausschwamm (*Serpula lacrimans*), Blättlinge (*Gloeophyllum*), Porenschwämme (*Antroidea*, *Poria*) und der Kellerschwamm (*Coniophora*).

Der Echte Hausschwamm produziert als Stoffwechselprodukt Wasser, das an der Oberfläche in Form von Wassertropfen ausgeschieden wird. Durch diese Befeuchtung kann er auch relativ trockenes Holz befallen. Außerdem kann sich der Hausschwamm mit einem Strangmyzel über weite Strecken ausbreiten und so Mauerwerk bzw. trockenes Holz überwinden. Das übliche Schadensbild ist braunes, würfelförmig zerstörtes Holz (Lignatec 2001). Die optimale Temperatur für das Wachstum des Echten Hausschwammes liegt bei 20 bis 22 °C (Bruckner, Schneider 1997).

Im Gegensatz zu den Braunfäule-Pilzen bauen die *Weißfäule-Pilze* (auch: Korrosionsfäule) hauptsächlich Lignin ab, wodurch das Holz sehr hell erscheint.

Weitere holzerzerstörende Pilze sind lt. ÖNORM EN 335-1 die *Moderfäule-Pilze*, die nur in sehr feuchtem Holz (Erdkontakt oder in Wasser) auftreten.

Neben diesen holzerstörenden Pilzen werden in ÖNORM EN 335-1 die holzverfärbenden Pilze angeführt, die in Bezug auf das ästhetische Aussehen von Holz von Bedeutung sind aber keine Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften des Holzes haben.

### *Lebensbedingungen von Holzschädlingen*

Zur Vorhersage von Pilzbefall und Pilzwachstum ist es notwendig die Lebensbedingungen der Pilze zu kennen. In der Literatur finden sich zahlreiche Angaben zur groben Einschätzung der Berechnungsergebnisse, die sich teilweise markant unterscheiden.

Vor allem Temperatur und Feuchte aber auch die Zeit der Feuchteeinwirkung spielen eine große Rolle für das Pilzwachstum.

### **Temperatur und Feuchte**

Schulze (Schulze 2005) führt an, dass Pilzwachstum erst erfolgen kann, sobald freies Wasser vorhanden ist. Das heißt, lt. Schulze muss erst oberhalb des Fasersättigungsbereichs mit Pilzwachstum gerechnet werden.

Der Fasersättigungspunkt von Holz liegt bei ca. 30 M-% (Niemz 1993). (Entspricht der Holzfeuchte von Holz mit einer Rohdichte von  $500 \text{ kg/m}^2$  bei einer relativen Luftfeuchtigkeit  $\phi$  von ca. 96 % - siehe Feuchtespeicherfunktion).

Um sicherzustellen, dass der Wert  $u \geq 30 \text{ M-%}$  an keiner Stelle des Holzes überschritten wird, ist aufgrund der großen Unterschiede der Holzeigenschaften bei einer stichprobenartigen Messung der Wert  $u \leq 20 \text{ M-%}$  einzuhalten (Schulze 2005). (Entspricht der Holzfeuchte von Holz mit einer Rohdichte von  $500 \text{ kg/m}^2$  bei einer relativen Luftfeuchtigkeit  $\phi$  von ca. 90 % - siehe Feuchtespeicherfunktion, Kapitel 1.2.2).

Auch die ÖNORM EN 335-1 gibt für die Entwicklung holzerstörender Pilze eine Holzfeuchte von mehr als 20 M-% an.

In der DIN 68 800 wird ein Wachstum von holzerstörenden Pilzen bei anhaltender Holzfeuchtigkeit über 20 M-% angegeben.

Für die Holzfeuchte führen Bruckner et al. (Bruckner, Schneider 1997) den gleichen Wert an. Außerdem geben sie an, dass die optimale Temperatur für das Wachstum der Pilze zwischen  $20^\circ\text{C}$  und  $35^\circ\text{C}$  liegt.

Hingegen tritt nach Block auf Holz bereits bei 80% relativer Luftfeuchtigkeit und  $30^\circ\text{C}$  nach 35 Tagen Pilzwachstum auf (Block 1953).

Sedlbauer stellt fest, dass bereits ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70% mit Schimmelpilzwachstum in Gebäuden gerechnet werden muss. Für manche xerophile<sup>1</sup> Pilze reicht zwar eine Luftfeuchtigkeit von 65% aus, aber diese treten selten in Gebäuden auf. Je höher die Feuchtigkeit ansteigt, für umso mehr Arten von Pilzen liegen ausreichende Wachstumsvoraussetzungen vor. Ab 80% relativer Luftfeuchtigkeit herrschen für fast alle Pilzarten ausreichende Wachstumsbedingungen. Der Optimalbereich liegt bei 90% bis 96% relativer Luftfeuchtigkeit. Bei 100% bzw. flüssigem Wasser können jedoch nur mehr wenige Pilze ausreichende Lebensbedingungen finden (Reiß 1988). Somit kann festgestellt werden, dass lt. Sedlbauer bereits unterhalb des Fasersättigungspunktes von Holz (bei ca. 30 M-%) Schimmelpilzwachstum möglich ist.

Schimmelpilzwachstum kann bei minimalen Feuchten nur bei optimalen Temperaturen erfolgen (Sedlbauer 2001). Daher sind Temperaturen und relative Luftfeuchtigkeit immer gemeinsam zu betrachten.

Tabelle 1.1 zeigt eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Angaben in der Literatur, ab welcher Temperatur bzw. ab welcher relativen Luftfeuchte Pilzwachstum auf Holz erfolgt. Das zeigt die Komplexität der Bestimmung eines Grenzwertes. Das Pilzwachstum wird durch das Zusammenwirken verschiedener Parameter stark beeinflusst.

---

<sup>1</sup> Eine grobe Unterteilung der Pilze hinsichtlich ihrer Feuchteabhängigkeit wurde von Snow (Snow 1949) vorgeschlagen: xerophile Pilze – Wachstum unterhalb einer relativen Luftfeuchtigkeit von 85% möglich; mesophile Pilze – Wachstum ab 85% relativer Luftfeuchtigkeit möglich und hydrophile Pilze – Wachstum ab 95% Luftfeuchtigkeit möglich.

Quelle	Holzfeuchte* M-%	rel. Luftfeuchte $\phi$ [%]	Temperatur T [°C]
Schulze 2005	≤ 20,0 M-%	≤ ca. 85 %	k.A.
ÖNORM EN 335-1	≤ 20,0 M-%	≤ ca. 85 %	k.A.
DIN 1052	≤ 20,0 M-%	≤ ca. 85 %	k.A.
Bruckner, Schneider 1997	≤ 20,0 M-%	≤ ca. 85 %	20°C bis 35°C
Block 1953	≤ 16,0 M-%	≤ 80%	30°C (Wachstum nach 35 Tagen)
Viitanen 2001 **	≤ 14,5 M-%	≤ ca. 75%	20°C
Sedlbauer 2001	≤ 12,9 M-% ≤ 16,0 M-%	≤ 70% ≤ 80%	abhängig von Pilzart, Wachstum bei min. Feuchte nur mit opt. Temperatur möglich
* M-% gemäß der in Kapitel 1.2.2.4 angeführten Sorptionsisotherme für Holz.			
** Viitanen führt noch weitere Einflussfaktoren wie z.B. die Oberflächenbeschaffenheit oder die Nährstoffgehalt des Holzes an.			

**Tabelle 1.1: Übersicht zu den unterschiedlichen Angaben in der Literatur zur relativen Luftfeuchte und Temperatur, ab der mit Pilzwachstum auf Holz zu rechnen ist.**

### Zeit

Die meisten Untersuchungen zu Sporenauskeimungszeit und Dauer des Myzelwachstums fanden unter stationären Verhältnissen statt. Für die Bewertung eines Pilzwachstums auf einer Bauteiloberfläche oder im Bauteil ist es jedoch notwendig, das Verhalten der Pilze unter instationären Verhältnissen zu kennen. Dazu wurden verschiedene Versuche durchgeführt, die unterschiedliche Baustoffe, Temperaturen und Feuchtigkeiten untersuchen und angeben, ab wie vielen Stunden pro Tag einer erhöhten Feuchtigkeit mit Pilzwachstum zu rechnen ist.

Je nach Baustoff, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit variiert die Anzahl der Stunden pro Tag bei den von Sedlbauer angeführten Untersuchungen zwischen 1h und 12h pro Tag (Sedlbauer 2001).

### Schimmelpilzvorhersagemodelle

Zur Vorhersage des Wachstums von Schimmelpilz sind Feuchte, Temperatur, Nährstoffverfügbarkeit (bzw. Baumaterial) und Zeit gleichzeitig zu betrachten. Um mit diesen Parametern die Bildung von Schimmelpilz vorhersagen zu können wurden verschiedenste Vorhersagemodelle entwickelt. Hier werden die zur Interpretation der Berechnungsergebnisse dieser Untersuchung verwendeten Vorhersagemodelle vorgestellt:

### Isoplethenmodell durch Einführung des $LIM_{Bau}$ von Sedlbauer

Eine umfassende Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit – die ja wiederum die Holzfeuchte bestimmt – und der Nährstoffverfügbarkeit auf das Pilzwachstum wurde von Sedlbauer in seiner Dissertation durchgeführt (Sedlbauer 2001).

Er erstellte feuchte- und temperaturabhängige Grenzisoplethen für unterschiedliche Substratgruppen von Bauprodukten jeweils für die Sporenauskeimung und das Myzelwachstum (siehe Abbildung 1.16).

Die Isoplethen stellen „Linien gleicher Sporenauskeimungszeit oder gleichen Wachstums dar. Je nach Nährstoffverfügbarkeit wird von Substratgruppe I oder II ausgegangen. Holz wird zu Substratgruppe II gezählt (Sedlbauer 2001).

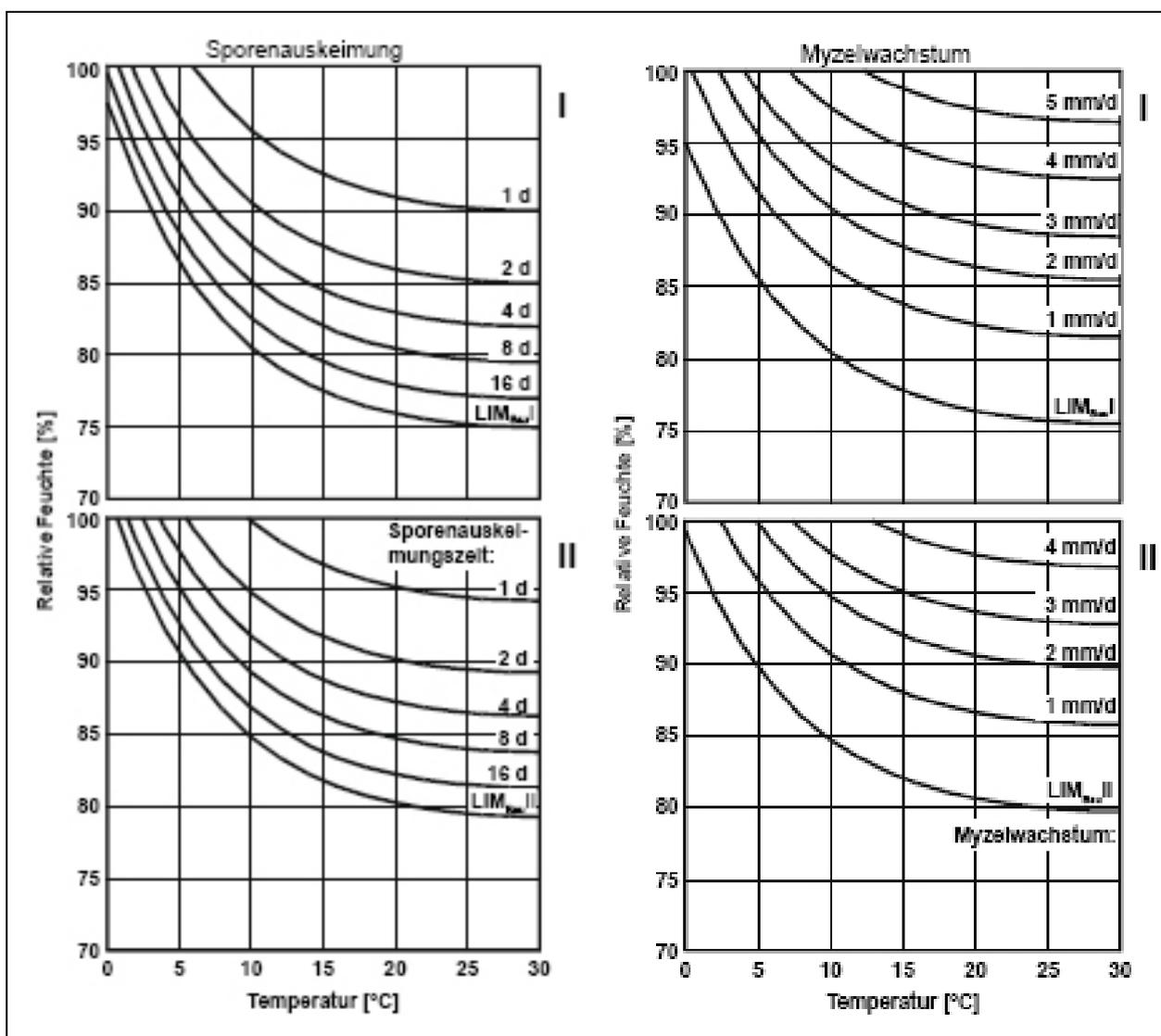


Abbildung 1.16: Verallgemeinertes Isoplethensystem von Sedlbauer (Sedlbauer 2001)

Für die Sporenauskeimungszeit wird die Dauer in Tagen (d) angegeben. Das Myzelwachstum wird in mm/Tag (mm/d) angegeben.

Unter dem von Sedlbauer eingeführten  $LIM_{Bau}$  kann davon ausgegangen werden, dass auf Baustoffen keine biologische Aktivität erfolgt.

Die Untersuchung der Berechnungsergebnisse dieser Arbeit mit dem Isoplethenmodell von Sedlbauer erfolgt mittels der Ausgaben des Programms WUFI. In WUFI werden jedoch keine Isoplethen für die Sporenauskeimungszeit bzw. das Myzelwachstum angegeben. Zur besseren Interpretation der Überschreitungen des  $LIM_{Bau}$  wird daher bei einer Überschreitung des  $LIM_{Bau}$  II jeweils der ungünstigste Wert mit dem Modell von Viitanen und Hukka untersucht.

### Modell von Hukka und Viitanen

Viitanen beschäftigt sich in zahlreichen Untersuchungen mit der Schimmelpilzvorhersage auf Holz. Er sieht in der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Einwirkungszeit und materialspezifischen Eigenschaften die wesentlichen Faktoren für das Schimmelpilzwachstum (Viitanen et al. 2003).

In einem Übersichtsdiagramm zeigt Viitanen in (Viitanen 2001) die kritischen Feuchte- und Temperaturniveaus für Schimmelpilzwachstum auf Holz:

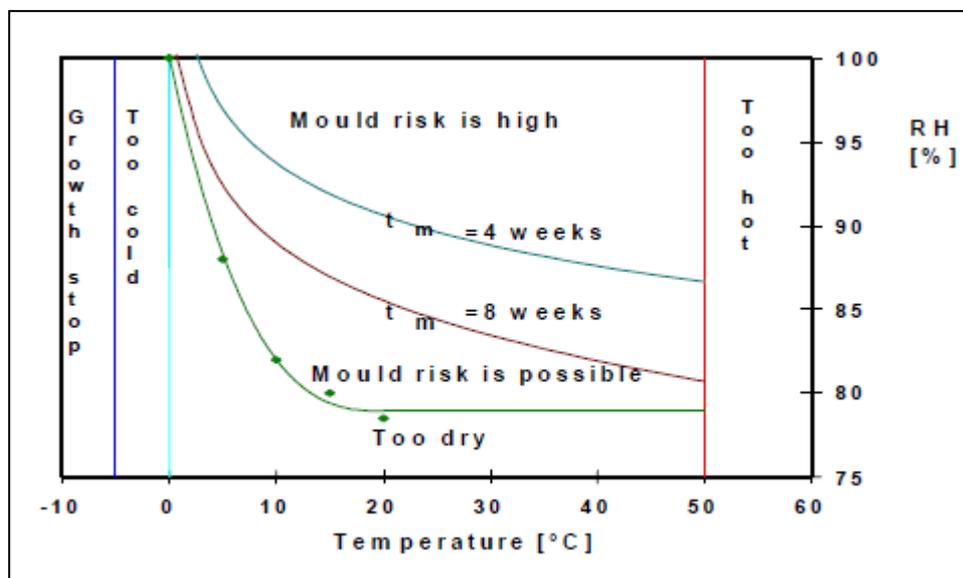


Abbildung 1.17: Übersichtsmodell zur kritischen Temperatur und relativen Luftfeuchte für Schimmelpilzwachstum auf Holz. Aus: (Viitanen 2001)

Bei Temperaturen über 50°C und unter 0°C ist nicht mit dem Auftreten von Schimmel zu rechnen. Ab ca. 75 % bis 80 % relativer Luftfeuchte kann Schimmelpilzwachstum auf Holz auftreten. Das Wachstum ist bei hoher Luftfeuchtigkeit und Temperaturen zwischen 20°C und 40°C schneller, bei niedrigen Temperaturen (unter 5°C) findet auch bei hohen Luftfeuchtigkeiten nur sehr langsames Wachstum statt.

Viitanen gibt an, dass für das Schimmelpilzwachstum auf Holz vor allem auch die Menge und Qualität von Kernholz und Splintholz, die Oberflächenqualität, der Nährstoffgehalt an der Oberfläche, der Diffusionswiderstand des Holzes und die Oberflächenbehandlung eine wesentliche Rolle spielen (Viitanen 2001).

Der hauptsächliche Einfluss liegt dabei im Nährstoffgehalt, der je nach Trocknungsmethode bzw. bei nach der Trocknung gesägtem Holz oder luftgetrocknetem Holz variiert.

Hukka und Viitanen führen zur Beurteilung von Schimmelpilzwachstum in (Hukka et al. 1999) den „Mould growth index“ ein:

Mould growth index	Flächenbelag [%]	Charakterisierung
0	0	kein Wachstum
1	≤ 1,0 %	geringes Wachstum, nur unter dem Mikroskop sichtbar
2	≤ 10,0 %	Moderates Wachstum, nur unter dem Mikroskop sichtbar
3	≤ 30,0 %	visuell sichtbares Wachstum
4	≤ 70,0 %	
5	> 70,0 %	
6	100,00%	

**Tabelle 1.2: Mould growth index in Abhängigkeit von der prozentualen Flächenbelegung und verbale Charakterisierung. Aus: (Sedlbauer 2001, p 51)**

Zur Berechnung des Mould growth index entwickelten Hukka und Viitanen eine Näherungsgleichung, wobei sie auch für die Ermittlung der kritischen relativen Luftfeuchte und der Zeitdauer der Einwirkung bis zum Erreichen von Mould growth index 1 und Mould growth index 3 (erstes Myzelwachstum mit freiem Auge sichtbar) eine Gleichung aufstellten (Hukka et al. 1999):

$$\varphi_{krit} = -0,00267 \cdot \vartheta^3 + 0,160 \cdot \vartheta^2 - 3,13 \cdot \vartheta + 100 \quad \text{wenn } \vartheta \leq 20, \text{ sonst } 80\% \quad (1.2)$$

$$t_m = \exp(-0,68 \cdot \ln \vartheta - 13,90 \cdot \ln \varphi + 0,14 \cdot W - 0,33 \cdot SQ + 66,02) \quad (1.3)$$

$$t_v = \exp(-0,74 \cdot \ln \vartheta - 12,72 \cdot \ln \varphi + 0,06 \cdot W + 61,50) \quad (1.4)$$

- $\varphi_{krit}$  [%] ... relative Luftfeuchte, ab der Schimmelpilzwachstum auf den Holzproben möglich ist  
 $\vartheta$  [°C] ... Temperatur  
 $t_m$  [h] ... Zeitdauer bis Erreichen von Mould growth index 1  
 $t_v$  [h] ... Zeitdauer bis erstes Myzelwachstum mit dem Auge sichtbar wird  
 $W$  [-] ... Holzart (0 = Kiefer, 1 = Fichte)  
 $SQ$  [-] ... Oberflächenqualität (0 = nach Trocknung gesägt, 1 = kammergetrocknet)

Diese Gleichungen werden in der vorliegenden Arbeit eingesetzt, um die Berechnungsergebnisse zu beurteilen. Dazu wird für den Temperatur- und Feuchtezustand an der inneren und äußeren Oberfläche der äußeren Holzschalung die kritische Luftfeuchtigkeit,  $t_m$  und  $t_v$  ermittelt, der im Isoplethensystem nach Sedlbauer die günstigsten Verhältnisse für Schimmelpilzwachstum aufweist. Als die günstigsten Verhältnisse für Schimmelpilzwachstum werden die Zustände definiert, bei denen  $t_m$  am kürzesten ist.

Die beiden erläuterten Methoden zur Beurteilung von Schimmelpilzwachstum – das Isoplethenmodell von Sedlbauer und das Modell von Hukka und Viitanen – wurden auch bei anderen Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Holz im Bauwesen mit dem Programm WUFI zur Beurteilung der Ergebnisse verwendet (Black 2006, Karagiozis 2002).

### 1.3.3 Bauphysik / Berechnungsverfahren

#### 1.3.3.1 Feuchtetransport und Feuchtespeicherung

##### *Feuchtetransport*

Der Feuchtetransport in Bauteilen kann durch Konvektion und Dampfdiffusion (und Kapillartransport) stattfinden.

Durch *Konvektion* kann im Winter die warme Raumluft über Fugen in das Bauteil eindringen. Je nach Wassergehalt der Luft und Temperaturgefälle im Bauteil kondensiert die eingedrungene Luft, wodurch der Feuchtegehalt der Konstruktion ansteigt.

Neben den Energieverlusten ist daher auch die Vermeidung von Feuchtigkeitsproblemen ein Grund für die Forderung einer luftdichten Gebäudehülle (Lutz et al. 2002).

In dieser Arbeit wird die Auswirkung von Konvektion auf das Feuchteverhalten der Hohlkastenelemente nicht untersucht. Die Berechnungen beziehen sich ausschließlich auf das durch Diffusion verursachte Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten.

Als *Wasserdampfdiffusion* bezeichnet man das Wandern einzelner Wassermoleküle im Gaszustand. Der Strom findet von Stellen größerer zu kleinerer Wasserdampfkonzentration statt. Neben der Diffusion finden in Baustoffen auch Effusion und Lösungsdiffusion statt. Man spricht von Effusion, wenn der Porendurchmesser kleiner als 100 nm ist und daher die Bewegung der Wassermoleküle stärker durch die Porenwand gesteuert wird als über die Ablenkung durch andere Wassermoleküle. Lösungsdiffusion findet statt, wenn sich die Wassermoleküle durch ein flüssiges (oder quasi flüssiges) Medium bewegen, in dem sie gelöst sind. Wassermoleküle können sich so durch organische Polymere (Bitumen, Kunststoffe, Holz, Cellulose, etc.) bewegen (Lutz et al. 2002).

Zur Bewertung des Diffusionswiderstandes von Materialien dient die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Sie gibt an, wieviel mal kleiner die Diffusionsstromdichte der Wassermoleküle durch das Material im Vergleich zur Diffusion durch ruhende Luft ist.

Durch Multiplikation der Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  mit der Baustoffdicke ergibt sich die äquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  (der sogenannte  $s_d$  – Wert), ein Maß für den Diffusionswiderstand einer Bauteilschicht.

Diese Materialgröße kommt bei dem stationären Berechnungsverfahren nach Glaser primär zum Tragen.

Bei der dynamischen Berechnung mit dem Programm WUFI wird zusätzlich (neben anderen Parametern) die Abhängigkeit der Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  von der relativen Luftfeuchte berücksichtigt.

##### *Feuchtespeicherung in Baustoffen*

Die Feuchtigkeitsaufnahme (Sorption) von Baustoffen findet im hygroskopischen Bereich vorwiegend durch Diffusion statt. Hygroskopische Feuchten sind diejenigen Feuchtegehalte, die sich in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte der Umgebung – bis zu einer relativen Luftfeuchte von ca. 95% – im Material einstellen. Materialfeuchten bei einer relativen Luftfeuchte über 95% werden als überhygroskopische Feuchten bezeichnet.

Der Feuchtetransport im Material erfolgt bei porösen Materialien (Holz, Beton, etc.) im hygroskopischen Bereich einerseits durch Diffusion und je nach Durchmesser der Porenradien auch in flüssiger Form durch Kapillarkondensation. Dieser Vorgang wird durch die Sorptionsisotherme beschrieben, die den Wassergehalt des Materials in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit darstellt.

Für überhygroskopische Feuchten können zwei Bereiche unterschieden werden: Der Kapillarbereich, der mit der freiwilligen Wasseraufnahme sein Maximum erreicht, und der Übersättigungsbereich, der der vollständigen Füllung aller Poren und Hohlräume eines Materials mit Wasser entspricht. Der Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit und dem Wassergehalt wird für den überhygroskopischen Bereich in der Kapillardruck-Kurve abgebildet.

Durch Zusammenfügen der Sorptionsisotherme und der Kapillardruck-Kurve ergibt sich die Feuchtespeicherisotherme, die den Wassergehalt eines Materials in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit darstellt (Lutz et al. 2002). Häufig wird die Feuchtespeicherisotherme jedoch kurz als Sorptionsisotherme bezeichnet.

Auch organischen Polymeren kann eine Feuchtespeicherfunktion zugeordnet werden. Der Transport der Wassermoleküle erfolgt jedoch mittels Lösungsdiffusion. Eine weitere Besonderheit stellt die vergleichsweise hohe Temperaturabhängigkeit der Feuchtespeicherfunktion für organische Polymere im Vergleich zur Feuchtespeicherung in porösen Materialien dar (Lutz et al. 2002).

Die Feuchtespeicherfunktionen der Baustoffe (mit Ausnahme von Dachhaut und Dampfbremsen /-sperrern) werden bei der Berechnung mit dem Programm WUFI berücksichtigt. Die Berechnung nach Glaser geht nicht auf die Feuchtespeicherfähigkeit von Baustoffen ein.

### 1.3.3.2 Anforderungen an den Feuchteschutz: ÖNORM, DIN und SIA

Für die in dieser Arbeit untersuchten Dachaufbauten schreiben in Österreich die Norm ÖNORM B 8110-2 und in Deutschland die Norm DIN 4108-3 bei der Ausführung einer raumseitigen Dampfsperre mit einem  $s_d$  - Wert über 90m (ÖNORM) bzw. über 100m (DIN) keine Berechnung zur Tauwasserbildung im Bauteil vor.

Die in der Schweiz gültige Norm SIA 180 nimmt die angeführte Konstruktion nicht von einem Nachweis aus.

Alle drei Normen basieren auf der in EN ISO 13788 definierten Berechnung nach dem Glaser-Verfahren. Einzig in der Norm SIA 180 findet sich ein Vermerk, dass dieses Berechnungsverfahren nicht zur Definition des tatsächlichen Feuchtegehaltes der Konstruktion dient, sondern nur ein Verfahren zu Abschätzung der Anreicherung an Feuchte im Bauteilaufbau ist.

Zur Beurteilung der Berechnungsergebnisse werden in den Normen zum Teil unterschiedliche Kriterien angegeben. Eine Übersicht wurde in Tabelle 1.3 zusammengestellt.

<b>Übersicht zu den Anforderungen an den Feuchteschutz im Bauteilinneren</b>	<b>ÖNORM B 8110-2</b>	<b>DIN 4108-3</b>	<b>SIA 180</b>
Austrocknung in Sommermonaten	≥ Kondensatmenge	≥ Kondensatmenge	≥ Kondensatmenge
Erhöhung M-% Holz	≤ 3%	≤ 5%	≤ 3%
Erhöhung M-% Holzwerkstoffe	≤ 3%	≤ 3%	≤ 3%
Tauwassermenge an Schichtgrenze kapillar nicht oder wenig aufnahmefähiger Stoffe	≤ 0,5 kg/m <sup>2</sup>	≤ 0,5 kg/m <sup>2</sup>	-
Verringerung Wärmeschutz des Bauteils	≤ 10%	-	-
Erhöhung V-% Dämmung	-	-	≤ 1%
Tauwassermenge poröse Baustoffe	-	-	≤ 0,8 kg/m <sup>2</sup>
Tauwassermenge	-	≤ 1,0 kg/m <sup>2</sup>	-

**Tabelle 1.3 : Übersicht zu den Anforderungen an den Feuchteschutz im Bauteilinneren der nationalen Normen in Österreich, Deutschland und der Schweiz.**

In der Schweiz wird in dem 2007 herausgegebenen Merkblatt zum Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise (SVDW 2007) von der technischen Kommission Flachdach darauf hingewiesen, dass für nicht durchlüftete Konstruktionen eine dynamische Berechnung durchgeführt werden sollte und eine Berechnung nach Glaser nicht ausreichend ist.

In dieser Arbeit wurde zur Berechnung der Tauwassermenge nach dem Glaserverfahren gemäß EN ISO 13788 das Programm ArchiPHYSIK (ArchiPHYSIK 2007) verwendet.

### 1.3.3.3 Dynamische Berechnung des Feuchteverhaltens

Für die instationäre Berechnung des Feuchteverhaltens wurde für diese Arbeit das Programm WUFI (WUFI Pro 2005) – Wärme Und Feuchte Instationär – ausgewählt.

Bei der Berechnung mit WUFI werden gegenüber dem Glaserverfahren wesentlich mehr

Materialeigenschaften berücksichtigt:

- Feuchtespeicherfähigkeit von Baustoffen
- Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit
- Feuchteabhängigkeit der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
- Kurzwellige Strahlungsabsorption
- Langwellige Strahlungsemission

Weiters liegen der Berechnung mit WUFI detailliertere Klimadaten zugrunde. Es werden nicht nur stündliche Daten herangezogen, sondern auch eine größere Anzahl von Parametern berücksichtigt.

Neben der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte sind das:

- Direkte Sonnenstrahlung
- Diffuse Himmelstrahlung
- Windrichtung
- Windgeschwindigkeit
- Niederschlagsmenge (in dieser Arbeit nicht berücksichtigt)

Nicht berücksichtigt wird bei der Berechnung mit WUFI die Entstehung von Wärmequellen bzw. Wärmesenken bei Adsorption und Desorption.

Außerdem wird der Desorptionsast der Feuchtespeicherfunktion nicht berücksichtigt. Für die Desorption werden die Werte der Adsorption verwendet.

Trotzdem kann von einer realitätsnahen Simulation gesprochen werden, die es erlaubt, die wesentlichen Einflüsse auf das Feuchteverhalten eines Bauteils zu eruieren.

Holm zeigt in seiner Dissertation (Holm 2001) mittels eines stochastischen Ansatzes, dass mit einer hygrothermischen Simulation die dominanten und weniger einflussreichen Faktoren bestimmt werden können.

Die Untersuchung des Feuchteverhaltens wird in dieser Arbeit eindimensional jeweils für die Trägerebene und die Dämmebene vorgenommen. Dies gilt für die Berechnung mit dem Glaserverfahren nach EN ISO 13788, das nur eine eindimensionale Betrachtung vorsieht, und die instationäre Berechnung mit dem Programm WUFI.

Für die dynamische Berechnung wäre eine zweidimensionale Betrachtung mit WUFI 2D möglich. Zur vereinfachten Beurteilung der Berechnungsergebnisse, zum Vergleich mit der Berechnung nach dem Glaserverfahren und zur Verkürzung der Rechenzeit wurde für die Untersuchungen mit dem Programm WUFI die eindimensionale Berechnung gewählt.

Außerdem führen Künzel und Zirkelbach in (Künzel, Zirkelbach 2006) an, dass zur Beurteilung von Holzbau-Konstruktionen mit nur einer Wärmedämmebene eine eindimensionale Berechnung ähnliche Ergebnisse liefert wie eine zweidimensionale Berechnung.

### 1.3.3.4 Strahlung

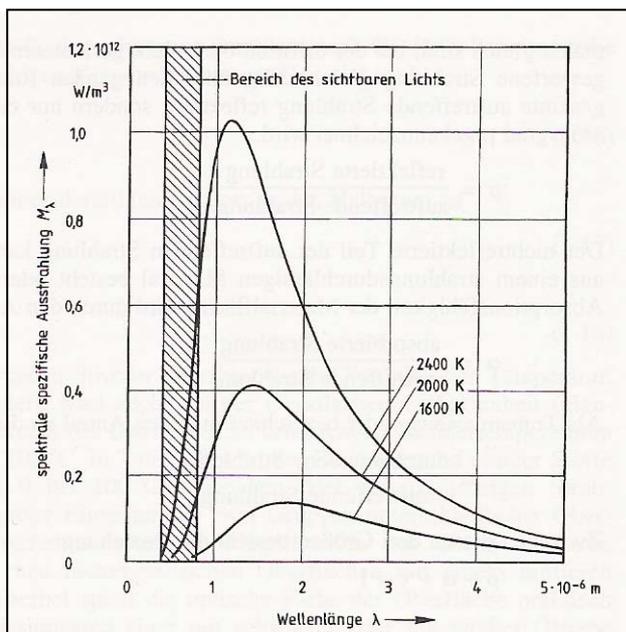
Durch elektromagnetische Strahlung wird Energie von Körperoberflächen an die Umgebung abgegeben (Emission) oder aufgenommen (Absorption).

#### Emission

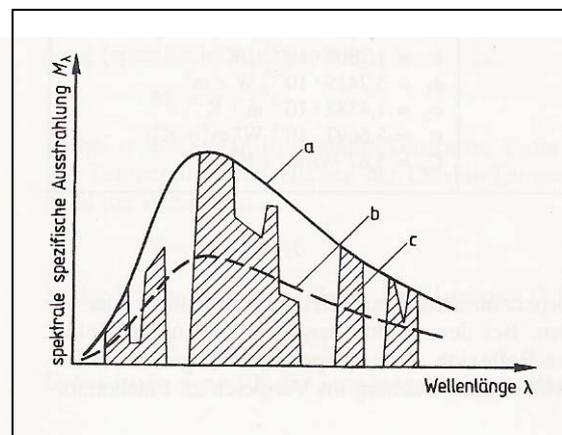
Die von Körpern ausgestrahlte Energie hängt stark von der Temperatur und den Strahlungseigenschaften der Oberfläche ab. Einen Körper mit der höchstmöglichen Abstrahlung  $M$  bei einer bestimmten Temperatur nennt man „schwarzen Strahler“ („schwarzen Körper“).

Als Maß für die abgestrahlte Energie wird die spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_\lambda$  verwendet. Diese hängt neben der Temperatur von der Wellenlänge  $\lambda$  ab.  $M_\lambda$  nimmt mit zunehmender Wellenlänge bis zu einem Wert von  $\lambda_{\max}$  zu und nimmt bei weiter steigender Wellenlänge wieder ab (siehe Abbildung 1.18).

Das Maximum von  $M_\lambda$  verschiebt sich für höhere Temperaturen zu kleineren Wellenlängen. Der Zusammenhang zwischen  $\lambda_{\max}$  und der zugehörigen Temperatur wird durch das Wiensche Verschiebungsgesetz beschrieben: Das Produkt von  $\lambda_{\max}$  und der Temperatur ist konstant (Lutz et al. 2002).



**Abbildung 1.18: Spektrale spezifische Ausstrahlung  $M_\lambda$  der Strahlung des schwarzen Strahlers nach dem Planckschen Gesetz. Aus: Lutz et al. 2002**



**Abbildung 1.19: Schematische Darstellung der spektralen spezifischen Ausstrahlung  $M_\lambda$  schwarzer (a), grauer (b), selektiver (c) Strahlung. Aus: Lutz et al. 2002**

Der Maximalwert der spektralen spezifischen Ausstrahlung bei einer bestimmten Temperatur wird nur vom schwarzen Strahler erreicht. Für reale Temperaturstrahler ist die Ausstrahlung geringer. Es wird zwischen grauer Strahlung und selektiver Strahlung unterschieden. Bei grauer Strahlung wird die Ausstrahlung gegenüber der schwarzen Strahlung über den gesamten Wellenlängenbereich um einen konstanten Faktor reduziert. Bei selektiver Strahlung ist die Strahlungsintensität gegenüber dem Schwarzkörperideal für die einzelnen Wellenlängen jeweils unterschiedlich stark reduziert (Lutz et al. 2002).

Im Bauwesen kann die langwellige Abstrahlung von Bauteiloberflächen mit dem Modell des grauen Strahlers ausreichend genau beschrieben werden. Das Emissionsvermögen eines grauen Strahlers wird durch den Emissionsgrad  $\varepsilon$  beschrieben, der sich aus dem Verhältnis der emittierten spezifischen Ausstrahlung  $M$  zu der des schwarzen Körpers  $M_s$  errechnet.

$$\varepsilon = \frac{M}{M_s} \quad (1.5)$$

Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  ist kein Stoffwert sondern eine temperaturabhängige Funktion, die vor allem von der Oberflächenbeschaffenheit des Materials abhängt. Im Bauwesen wird der Emissionsgrad  $\varepsilon$  in der Regel als Wert für den Temperaturbereich zwischen 0°C und 100°C angegeben. Dabei kann grob zwischen zwei Baustoffgruppen unterschieden werden: Metallflächen weisen einen mittleren Emissionsgrad  $\varepsilon$  von ca. 0,05 auf. Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  von nichtmetallischen Oberflächen liegt im Mittel bei 0,9. Die Oberflächenfarbe hat dabei auf den Emissionsgrad  $\varepsilon$  keinen wesentlichen Einfluss (Lutz et al. 2002).

Oberfläche	Emissionsgrad
Silber, poliert	0,03
Kupfer, poliert	0,04
Kupfer, schwarz oxydiert	0,82
Aluminium, walzblank	0,05
Eisen, blank geätzt	0,16
Eisen, geschmirgelt	0,26
Eisen, stark verrostet	0,85
Glas	0,88
Linoleum	0,88
Papier	0,89
Holz	0,91
Mörtel, Putz, Beton	0,93
Ziegel	0,93
Dachpappe	0,93
Aluminiumbronzeanstrich	0,40
Ölfarbenanstrich, schwarz, matt	0,97
Ölfarbenanstrich, schwarz, glänzend	0,88
Ölfarbenanstrich, weiß	0,89
Heizkörperlack	0,93

**Tabelle 1.4 : Emissionsgrad technischer Oberflächen zwischen 0 und 100°C nach E.Schmidt, Eckert und Reinders. Aus: Lutz et al. 2002**

### Absorption

Die auf der Bauteiloberfläche auftreffende Strahlung kann reflektiert, absorbiert oder durchgelassen werden. Nur ein Teil der Strahlung wird reflektiert, der durch den Reflexionsgrad  $\rho$  gekennzeichnet wird. Die restliche Strahlung wird absorbiert oder bei transparenten Materialien durchgelassen. Der Absorptionsgrad  $\alpha$  kennzeichnet die Absorptionsfähigkeit der Oberfläche (Lutz et al. 2002).

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} \quad (1.6)$$

Der Strahlungsabsorptionsgrad  $\alpha$  wird hauptsächlich von der Farbe der Oberfläche beeinflusst. Dunkle Flächen absorbieren mehr Strahlungsenergie und haben einen entsprechend höheren Strahlungsabsorptionsgrad als helle Flächen. (Hohmann et al. 2004)

Tabelle 1.5 gibt einen Überblick über Richtwerte für den Strahlungsabsorptionsgrad  $\alpha$  von Flächen lt. DIN 4108-6.

Oberfläche	Strahlungsabsorptionsgrad $\alpha$
Wandoberflächen:	
– heller Anstrich	0,4
– gedeckter Anstrich	0,6
– dunkler Anstrich	0,8
Klinkermauerwerk	0,8
helles Sichtmauerwerk	0,6
Dächer (Beschaffenheit):	
– ziegelrot	0,6
– dunkle Oberfläche	0,8
– Metall (blank)	0,2
– Bitumendachbahn (besandet)	0,6

**Tabelle 1.5 : Richtwerte für den Strahlungsabsorptionsgrad  $\alpha$  verschiedener Oberflächen im energetisch wirksamen Spektrum des Sonnenlichts. Aus: DIN 4108-6, Tabelle 8**

#### *Emissionsgrad und Absorptionsgrad*

Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  und der Absorptionsgrad  $\alpha$  beschreiben die Eigenschaften von Oberflächen bezüglich Strahlung unterschiedlichen Ursprungs und Wellenlängenbereichs.

Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  beschreibt die Oberflächeneigenschaften bezüglich Emission von Strahlung im langwelligen Bereich. Er ist ein Mittelwert über das langwellige Spektrum (die maximale Wellenlänge  $\lambda_{\max}$  von Wärmestrahlung bei 20°C beträgt  $9,9 \cdot 10^{-6}$  m) und über den relevanten Temperaturbereich.

Der Absorptionsgrad  $\alpha$  beschreibt die Oberflächeneigenschaften bezüglich Absorption von Strahlung. Er ist ein Mittelwert über das terrestrische Sonnenspektrum, dessen Hauptbeitrag im kurzwelligen Bereich liegt (sichtbares Licht: Wellenlänge  $\lambda = 0,38 \cdot 10^{-6}$  m bis  $0,78 \cdot 10^{-6}$  m (Hohmann et al. 2004)).

In der vorliegenden Arbeit beziehen sich die Begriffe „Emission“ (bzw. „Strahlungsemission“) auf die Emission von Wärmestrahlung und die Ausdrücke „Absorption“ (bzw. „Strahlungsabsorption“) auf die Absorption von Sonnenstrahlung.

Auf den Einfluss der Strahlungsabsorption und –emission auf das Feuchteverhalten und auf das Austrocknungspotential von Dachaufbauten im Holzbau gehen Künzel und Sedlbauer (Künzel, Sedlbauer 2007) in einer Untersuchung zu Oberflächentemperaturen von reflektierenden Flachdächern ein. Sie stellen fest, dass das Rücktrocknungspotential für Dachaufbauten mit reflektierenden (weißen) Dachbahnen stark reduziert ist.

## 2 Kennwerte zur Untersuchung der Flachdachaufbauten

### 2.1 Materialkennwerte

Um eine Vergleichbarkeit der Berechnungen zu erreichen, müssen die Materialkennwerte festgelegt werden, die für alle Berechnung verwendet werden.

Die in dieser Arbeit verwendeten Baustoffkenndaten können aus der Tabelle in Anhang A1 entnommen werden.

Grundsätzlich werden die Materialeigenschaften aus der ÖNORM EN 12524 verwendet. Diese beinhaltet die wärme- und feuchteschutztechnischen Eigenschaften von Baustoffen. So werden die Rohdichte, die spezifische Wärme und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  für Dämmstoffe, Holz und Holzwerkstoffe, Gipskartonbauplatten und Beton aus dieser Norm verwendet.

Die Wärmeleitfähigkeit für Holz und Holzwerkstoffe, Gipskartonbauplatten und Beton wird ebenfalls aus der oben angeführten Norm bezogen. Zur Wärmeleitfähigkeit der Dämmstoffe gibt es in der Norm keine Angaben, daher werden die Werte aus der WUFI – Datenbank (WUFI Pro 2005) bezogen.

Für den Feuchtegehalt der Dämmstoffe werden die Angaben der Norm berücksichtigt. Für den Feuchtegehalt von Gipskartonbauplatten und Beton werden die Angaben lt. DIN V 4108-4 herangezogen. Die Anfangsfeuchte von Holz und Holzwerkstoffen wurde innerhalb dem in den ÖNORMen B 2215, B 2217 und B 2320 vorgegebenen Schwankungsbereichen für die Einbaufeuchte auf 15,0 M-% festgelegt.

Zur erweiterten dynamischen Simulation werden die Kennwerte für Porosität und den Wärmeleitfähigkeitszuschlag aus der WUFI – Datenbank (WUFI Pro 2005) zu Grunde gelegt.

Für Luftschichten werden für alle Kennwerte die Eigenschaften aus der WUFI – Datenbank (WUFI Pro 2005) herangezogen.

#### *Dampfbremse /-sperre und Dachhaut*

In der Berechnung von Kondensation und Diffusion spielen gerade Baustoffkennwerte der Folien – Dachhaut und Dampfbremse /-sperre – eine große Rolle. Für die Folien werden die Materialeigenschaften primär aus der Norm und, wenn dort keine Angabe erfolgt, aus der WUFI – Datenbank (WUFI Pro 2005) eingesetzt.

Der  $\mu$ -Wert bzw. der  $s_D$ -Wert und die Rohdichte wird, sofern eine genaue Produktangabe vorliegt, lt. Herstellerangaben eingesetzt.

Liegt keine genaue Produktangabe vor, so werden für  $\mu$ -Wert und Rohdichte von Dachbahnen aus PVC oder Polyolefinen, für die in der Norm nur unzureichende bzw. gar keine Angaben zu finden sind, die vom Verfasser gemäß den Daten im Anhang A2 und A3 ermittelten Mittelwerte eingesetzt.

#### **Dachhaut**

In Tabelle A2 und Tabelle A3 wurden die Baustoffkenndaten von Dachhaut- und Dampfsperrenprodukten der gängigen in Vorarlberg verwendeten Produkte zusammengestellt. Für die Berechnung sind vor allem die Dicke, das Flächengewicht bzw. die Rohdichte und der  $\mu$ -Wert bzw. der  $s_D$ -Wert interessant.

Die Spalte „Materialangabe“ dient dazu, das Produkt zu den jeweiligen Werten aus der Norm bzw. der WUFI-Datenbank (WUFI Pro 2005) nach der Tabelle in A1 zuordnen zu können und somit auch die restlichen zu Berechnung notwendigen Materialkennwerte zu erhalten.

Für Dachbahnen aus PVC und Dachbahnen aus Polyolefinen wurden aus den in Tabelle A2 und Tabelle A3 aufgenommenen Produkten die Mittelwerte für die Rohdichte und den  $\mu$ -Wert ermittelt, die bei der Berechnung für PVC bzw. Polyolefine eingesetzt werden, sofern das im Dachaufbau verwendete Produkt nicht bekannt ist.

Für bituminöse Flachdachabdichtungen und kautschukhaltige Dachbahnen (EPDM – Ethylen-Propylen-Diene-Monomer) werden für die Berechnung Dicke und  $\mu$ -Wert gemäß den in Tabelle A4 zusammengestellten Herstellerangaben verwendet.

### **Dampfbremsen /-sperrern**

Die Benennung der Dampfsperren /-bremsen wird in dieser Arbeit gemäß der Einteilung lt. Klopfer (Lutz et al. 2002) vorgenommen: Für Baustoffschichten mit einem  $s_d$ -Wert zwischen 10m und 100m wird die Bezeichnung Dampfbremse verwendet, Baustoffschichten mit einem  $s_d$ -Wert über 100m werden als Dampfsperre bezeichnet.

Da lt. ÖNORM B 7220 für Dächer mit Abdichtungen eine Dampfsperre mit einem  $s_d$ -Wert  $\geq 130m$  einzusetzen ist, liegen für die untersuchten Dächer hauptsächlich Dampfsperren vor.

Anhang A5 gibt eine Übersicht über die zur Zeit der Erstellung der untersuchten Bauteilaufbauten gängigen Dampfbremsen /-sperrern in Vorarlberg.

## 2.2 Klimatische Randbedingungen

### 2.2.1 Außenklima

Wie die Materialkennwerte werden auch die Klimastandorte vereinheitlicht, um eine Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse zu erreichen.

Dazu wurden drei Standorte in Vorarlberg ausgewählt:

- Bregenz: Seehöhe 400 m, Region West (nach ÖNORM B 8110-2)
- Bürs: Seehöhe 570 m, Region West
- Schröcken: Seehöhe 1269 m, Region West

Diese drei Orte unterscheiden sich in Bezug auf das vorherrschende Klima wesentlich.

Bregenz liegt im Rheintal am Bodensee, wodurch sich dort auch im Winter ein eher mildes Klima einstellt. Vor allem im Frühjahr und Herbst herrscht in Bregenz nasskaltes Wetter mit häufig bedecktem Himmel und Nebel.

Der Ort Bürs am südlichen Ende des Rheintales liegt nur wenig höher als Bregenz, zeigt aber deutlich trockeneres und kühleres Klima.

Schröcken ist mit 1269 m Seehöhe ein richtiger Gebirgsort, der im Winter sehr kalte Temperaturen bei trockener Luft und wenig Bewölkung aufweist.

Die Berechnung des Feuchteverhaltens der Aufbauten an unterschiedlichen Klimastandorten soll einen Vergleich des Einflusses des Außenklimas auf das Feuchteverhalten der Aufbauten erlauben.

Für die *Glaserberechnung* wurden die lt. ÖNORM B 8110-2 ermittelten mittleren Monatswerte für die Außenlufttemperatur und die relative Luftfeuchte verwendet.

Die Ermittlung der Außenlufttemperatur nach dem Modell in ÖNORM B 8110-2 erfolgt mithilfe von Regressionskoeffizienten (a,b) und unter Berücksichtigung der Höhenlage. Da bis zu einer Höhe von 750 m die gleichen Regressionskoeffizienten eingesetzt werden, werden mit dem Modell nach ÖNORM B 8110-2 für Bregenz und Bürs trotz der unterschiedlichen vorherrschenden Klimabedingungen nur minimal unterschiedliche Werte angesetzt.

Eine zweite Berechnung nach Glaser wurde für die ausgewählten Standorte mit Strahlungslufttemperaturen aus den langjährigen Monatsmittelwerten durchgeführt. Unter Strahlungslufttemperatur versteht man eine fiktive Temperatur, die neben der Außenlufttemperatur auch den Einfluss der Sonneneinstrahlung und der langwelligen Abstrahlung der außenliegenden Oberfläche des Bauteils berücksichtigt (Koch, Pechinger 1977).

Für die *dynamische Berechnung mit WUFI* wurden für die drei ausgewählten Standorte halbsynthetische Klimadaten aus langjährigen Monatsmittelwerten verwendet. Dabei werden die Außenlufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung, Himmelstrahlung und Windgeschwindigkeit berücksichtigt. Der Niederschlag wird in der Berechnung nicht berücksichtigt. Die dynamische Berechnung wird über einen Zeitraum von 5 Jahren ausgeführt, beginnend mit dem 1. Oktober.

Die halbsynthetischen Klimadatensätze (HSDK) wurden von Prof. Klaus Kreč aus den langjährigen Monatsmittelwerten erstellt. Dabei werden aus einem bestehenden Basisdatensatz mit stündlichen Werten Monate mit ähnlichen Monatsmittelwerten ermittelt und deren stündlichen Werte in das Testreferenzjahr eingestezt. Die berücksichtigten Parameter – Außenluft, relative Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung, Himmelstrahlung und Windgeschwindigkeit – werden als Gesamtpaket eingesetzt, um den Korrelationen zwischen den Parametern Rechnung zu tragen.

Als Basisdatensatz wurden für die vorliegenden HSDK die gemessenen Stundenwerte der Station Wien, Hohe Warte, aus dem Zeitintervall zwischen 1. Januar 1951 und 31. Dezember 1988 herangezogen. Da eine genaue Übereinstimmung der Monatsmittelwerte aller Parameter mit den Monatsmittelwerten des ausgewählten Monats des Basisdatensatzes sehr unwahrscheinlich ist, kann durch Veränderung einzelner Stundenwerte eine Anpassung vorgenommen werden.

So kann aus langjährigen monatlichen Mittelwerten das vorherrschende Klima möglichst genau abgebildet werden und die Korrelation der unterschiedlichen Datenarten erhalten bleiben. (Heindl et al. 1990)

Eine Übersicht zu den langjährigen Monatsmittelwerten der verwendeten Klimadaten und den halbsynthetischen Klimadatensätzen für die ausgewählten Standorte wurde in Anhang B zusammengestellt. Als Quellen der langjährige Monatsmittelwerte wurden (ZAMG 2006a, ZAMG 2006b, ZAMG 2006c) und (PVGIS) herangezogen.

### Vergleich Außenlufttemperatur nach ÖNORM B 8110-2 und langjährige Monatsmittelwerte

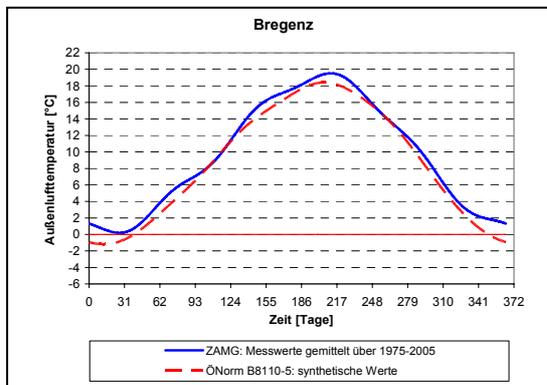


Diagramm 2.1: Bregenz

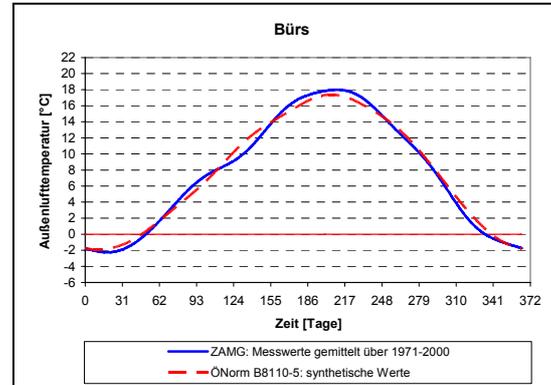


Diagramm 2.2: Bürs

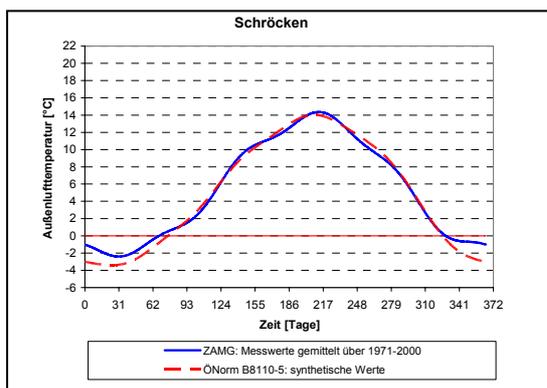


Diagramm 2.3: Schröcken

Diagramm 2.1, 2.2 und 2.3 zeigen eine Gegenüberstellung der Außenlufttemperatur nach ÖNORM B 8110-5 und der langjährigen Monatsmittelwerte. Die Monatsmittelwerte werden mittels einer Fourier-Kontinuierung in geglätteten Verläufen dargestellt (Heindl, Kreč 1985). In Anhang B sind die Diagramme in voller Größe angeführt.

Die langjährigen Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur zeigen für die drei untersuchten Standorte ähnliche Unterschiede wie die gemäß ÖNORM ermittelten mittleren Monatswerte der Außenlufttemperatur: Für den Klimastandort Bregenz herrscht in allen Monaten eine höhere Lufttemperatur als in Bürs. Die langjährigen Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur in Schröcken liegen tiefer als in Bürs und Bregenz.

Für Bregenz zeigt sich bei den langjährigen Werten für alle Monate ein höherer Monatsmittelwert der Lufttemperatur als für die gemäß ÖNORM B 8110-2 ermittelten Werte.

Für Bürs überschreiten die langjährigen Werte der mittleren Monatslufttemperatur in den Monaten März, April, Juni, Juli und August die Monatsmittelwerte lt. ÖNORM. In den anderen Monaten ergeben sich lt. Den langjährigen Monatsmittelwerten niedrigere Temperaturen als nach ÖNORM. Für die Berechnung des Kondensatausfalls nach Glaser werden unter Verwendung der Klimadaten lt. ÖNORM höhere Temperaturen angesetzt als im langjährigen Mittel tatsächlich in Bürs auftreten.

Für Schröcken unterschreiten die langjährigen Monatsmittelwerte in den Monaten April, Juni, Juli, September, Oktober die Mittelwerte der Außenlufttemperatur lt. ÖNORM. In den restlichen Monaten liegen die langjährigen Monatsmittelwerte der Lufttemperaturen über den nach ÖNORM ermittelten Werten.

Für den Klimastandort Schröcken werden bei der Glaserberechnung mit den Klimadaten lt. ÖNORM für die Austrocknung höhere Temperaturen herangezogen als im langjährigen Mittel in Schröcken auftreten.

### Relative Luftfeuchte nach ÖNORM B 8110-2 und langjährige Monatsmittelwerte

Als Werte für die relative Luftfeuchte der Außenluft ist lt. ÖNORM B 8110-2 für die Monate September bis April 80%, für Mai bis August 75% anzusetzen.

Luftfeuchtigkeit %	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Quelle
Bregenz ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Bregenz statistische Werte	82,0	80,0	75,0	73,0	72,0	72,0	73,0	77,0	81,0	84,0	84,0	83,0	ZAMG 2006a
Bürs ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Bürs statistische Werte	84,0	77,0	70,0	66,0	65,0	67,0	68,0	69,0	75,0	79,0	84,0	86,0	ZAMG 2006c
Schröcken ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Schröcken statistische Werte	63,0	62,0	65,0	64,0	62,0	67,0	68,0	69,0	68,0	65,0	69,0	65,0	ZAMG 2006b

**Tabelle 2.1**

Die langjährigen Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte liegen in Bregenz in den Monaten August bis Januar über dem lt. ÖNORM B 8110-2 vorgegebenen Werten.

In Bürs liegt die relative Luftfeuchte in den Monaten November bis Januar über den Werten nach Norm und in Schröcken bleiben die langjährigen mittleren Werte der relativen Luftfeuchte immer unter den Werten nach ÖNORM.

## 2.2.2 Innenklima

Für das Innenklima wurden der *Berechnung nach Glaser* die Werte gemäß ÖNORM B 8110-2 zugrunde gelegt: Die Lufttemperatur wird mit 20°C angenommen. Die relative Luftfeuchte beträgt 65 % bei einer Außenlufttemperatur zwischen 0°C und 10°C. Bei höheren oder tieferen Außenlufttemperaturen wird die die relative Luftfeuchte um 1 % je 1°K angehoben bzw. verringert.

Für die *dynamische Berechnung mit WUFI* wurden für das Innenklima „Raumklimabedingungen, normale Feuchtelast“ festgelegt.

Die Innenlufttemperatur wird durch eine Sinuskurve mit einer Abweichung von 1°C um einen Mittelwert von 21°C bestimmt. Analog dazu wird die relative Luftfeuchte mit einer Sinuskurve um einen Mittelwert von 50 % und einer Amplitude von 10 % dargestellt.

## 2.2.3 Wärmeübergangswiderstand

Die Rahmenbedingungen des Wärmeübergangs an den außenseitigen Oberflächen  $R_{se}$  und an den innenseitigen Oberflächen  $R_{si}$  wurde für die *Berechnung nach Glaser* gemäß ÖNORM B 8110-2 wie folgt festgelegt:

- $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$
- $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$

Für die Wärmeübergangswiderstände an der Innen- und Außenoberfläche wurden für die dynamische Berechnung mit dem Programm WUFI die Standardeinstellungen für einen Dachaufbau verwendet:

- $R_{se} = 0,0526 \text{ m}^2\text{K/W}$
- $R_{si} = 0,125 \text{ m}^2\text{K/W}$

## 2.3 Beurteilungskriterien

Um eine Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse zu erreichen, wurden einheitliche Beurteilungskriterien ausgearbeitet. Aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsverfahren und Ergebnisparameter können die Berechnungsergebnisse aus dem Glaserverfahren jedoch nur bedingt mit den Ergebnissen aus der dynamischen Berechnung mit WUFI verglichen werden.

Die ausgearbeiteten Beurteilungskriterien erlauben eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Glaserverfahren und aus der dynamischen Berechnung. Darauf aufbauend wird versucht, auch einen Vergleich der Ergebnisse aus der Glaserberechnung mit den Ergebnissen aus der dynamischen Berechnung anzustellen.

In Anhang C werden die Beurteilungskriterien in Tabellenform dargestellt.

### *Berechnung mit dem Glaserverfahren*

Die Beurteilung der Berechnungsergebnisse erfolgt nach den in Kapitel 8.3 der ÖNORM B 8110-2 bzw. in DIN 4108-3 beschriebenen Kriterien:

- Es wird festgehalten, ob es zu einer Kondenswasserbildung im Bauteilinneren kommt
- Verdunstung des angefallenen Tauwassers in den Sommermonaten
- Kondenswassermenge  $M_{a,max} \geq 0,5 \text{ kg/m}^2$  an kapillar nicht oder wenig aufnahmefähigen Schichten<sup>1</sup> (ÖNORM B 8110-2) oder eine Kondenswassermenge  $M_{a,max} \geq 1,0 \text{ kg/m}^2$  an kapillar wasseraufnahmefähigen Schichten<sup>1</sup> (DIN 4108-3) wird überschritten.
- Verminderung des Wärmeschutzes um mehr als 10%
- Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts von Holz und Holzwerkstoffe  $\Delta u_m \geq 3\%$

### *Dynamische Berechnung mit WUFI*

Die Beurteilung der Berechnungsergebnisse zum Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten wird nach folgenden Kriterien durchgeführt:

#### A. Beurteilung des Feuchteverhaltens:

1. Gesamtwassergehalt:
  - Gesamtwassergehalt steigt an / bleibt gleich / nimmt ab
  - Die Veränderung des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre  $\Delta u'_m$  wird durch die Differenz zwischen dem Mittelwert des Gesamtwassergehaltes  $u_m$  des zweiten und dem Mittelwert des Gesamtwassergehaltes  $u_m$  des fünften (letzten) simulierten Jahres ermittelt. Ist  $\Delta u'_m$  eine positive Zahl, so ist keine vollständige Austrocknung gegeben. Ergibt sich für  $\Delta u'_m$  eine negative Zahl, so trocknet die im Jahresverlauf anfallende Feuchtigkeit wieder vollständig aus.
  - Die Feuchteschwankung pro Winter wird durch die Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf  $\Delta u_m$  angegeben, wobei  $\Delta u_m$  der Differenz des niedrigsten Gesamtwassergehaltes  $u_m^{\min}$  und des höchsten Gesamtwassergehaltes  $u_m^{\max}$  eines Jahres entspricht. Sollten sich im Verlauf der fünf berechneten Jahre unterschiedliche Schwankungsbreiten ergeben, so wird der höchste für  $\Delta u_m$  ermittelte Wert der letzten 4 Berechnungsjahre verwendet.
  - Feuchteaufnahme von  $M_{a,max} \geq 0,5 \text{ kg/m}^2$  an kapillar nicht oder wenig aufnahmefähigen Schichten<sup>1</sup> (ÖNORM B 8110-2) bzw.  $M_{a,max} \geq 1,0 \text{ kg/m}^2$  an kapillar wasseraufnahmefähigen Schichten<sup>1</sup> (DIN 4108-3) pro Winter wird überschritten.

<sup>1</sup> Definition der kapillaren Wasseraufnahmefähigkeit für diese Untersuchung:

Kapillar wasseraufnahmefähige Schicht: Holz, Zellulosedämmung, Holzwerkstoffe, etc.

Kapillar nicht wasseraufnahmefähige Schicht: Mineralwolle, Dampfsperren /-bremsen und Dachhaut, EPS-Dämmung

2. Wassergehalt der einzelnen Schichten:
  - Der Wassergehalt der äußeren Holzschalung, der Dämmschicht oder des Trägers steigt an / bleibt gleich / nimmt ab
  - Für Holz und Holzwerkstoffe darf die Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts pro Winter nicht mehr als 3% betragen. Die Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts wird aus dem Verhältnis der Feuchteaufnahme pro Jahr  $\Delta u_{m,i}$  zum niedrigsten Wassergehalt des Jahres  $u_{m,i}^{\min}$  ermittelt.
  - Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf, angegeben durch  $\Delta u_{m,i}$ , wobei  $\Delta u_{m,i}$  der Differenz des niedrigsten Wassergehaltes  $u_{m,i}^{\min}$  und des höchsten Wassergehaltes  $u_{m,i}^{\max}$  eines Jahres entspricht.  
Sollten sich im Verlauf der fünf berechneten Jahre unterschiedliche Schwankungsbreiten ergeben, so wird der Maximalwert der für die letzten vier Jahre für  $\Delta u_{m,i}$  ermittelten Werte verwendet.
  - Die Veränderung des Wassergehaltes  $\Delta u'_{m,i}$  der äußeren Holzschalung, der Dämmschicht und des Trägers über vier Jahre.
  - Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der äußeren Holzschalung, der Dämmschicht und des Trägers und der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Baustoffe im fünften Jahr der Berechnung.
- B. Beurteilung von Schimmelpilzwachstum und anderen Schädlingen:
  - Der hygrothermische Zustand der äußeren Holzschalung wird an Außen- und Innenseite (ca. 2 bis 3 mm unter der Außen- bzw. der Innenoberfläche der äußeren Holzschalung) untersucht. Dazu wird festgestellt, ob sich in der Ausgabe der Isoplethen Punkte hygrothermischen Zustands über der Grenzisoplethe LIM B II befinden. Unterhalb der Isoplethe LIM B II ist bei Holz im Regelfall nicht mit Sporenauskeimung und Schimmelwachstum zu rechnen (Sedlbauer 2001)
  - Um den hygrothermischen Zustand besser quantifizieren und vergleichen zu können, wird unterschieden ob wenig oder viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe eruiert wurden.  
Dazu wird definiert, dass ab  $\geq 30$  Punkten viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe liegen.
  - Sobald festgestellt wurde, dass hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe LIM B II vorhanden sind, wird eine Untersuchung des jeweils höchsten Wertes für die relative Luftfeuchte bei 10°C, 15°C, 20°C, 25°C und 30°C mit dem Modell von Hukka und Viitanen vorgenommen. Zum Vergleich wird derjenige Zustand herangezogen, für den die kürzeste Zeitdauer  $t_m$  ermittelt wurde.

## 2.4 Bauteilaufbauten

Die untersuchten Bauteilaufbauten stammen ausschließlich von ausgeführten Gebäuden. Es wurden Schadensfälle und Flachdachaufbauten ohne bisher bekannten Schaden aufgenommen. Bei allen Aufbauten handelt es sich um Hohlkastenelemente (Bauteilaufbau wie eingangs beschrieben) bzw. Aufbauten, die in ihrer Struktur einem Hohlkastenelement gleichen, auch wenn sie nicht vorfabriziert gebaut wurden.

Die Informationen zu den Bauteilaufbauten wurden von Planern, ausführenden Firmen und Gutachtern für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung gestellt. Alle Namen, Adressangaben und diverse ähnliche für die Berechnung unrelevante Angaben wurden anonymisiert.

Dämmebene und Trägerebene werden mit beiden Berechnungsmethoden – Berechnung nach Glaser und dynamische Berechnung mit WUFI – separat untersucht. Eine zweidimensionale Untersuchung zur Einbeziehung der Wechselwirkung zwischen Dämmung und Träger ist bei einer Glaserberechnung und einer dynamischen Berechnung mit WUFI Pro 2005 nicht möglich.

In der Phase der Datensammlung zu ausgebildeten Hohlkastenkonstruktionen konnte bei Durchsicht der Fotos von Schadensfällen bereits festgestellt werden, dass der obere Bereich der Träger und die Schalung über dem Träger häufig stärkere Beschädigungen aufweisen als im Gefachbereich. (siehe Fotos Kapitel 1.2.1)

Für die Trägerebene wird angenommen, dass die Bauteilaufbauten mit einem Träger aus Konstruktionsvollholz, Konstruktionsholz, Kreuzholz oder Brettschichtholz (siehe Kapitel 1.2.2.2) ausgeführt wurden. Eine Ausführung der Aufbauten mit Doppel-T-Profil Trägern oder anderen Trägersystemen war zum Zeitpunkt der Ermittlung der Aufbauten in Vorarlberg wenig üblich. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Ausführung der Träger mit einem Doppel-T-Profil durch die Reduzierung der Breite der Trägerebene deren Einfluss auf das Feuchteverhalten des Bauteils verringert wird.

Tabelle 2.2 gibt eine Übersicht zu Dämmmaterial, Dachhaut und Dampfbremse /-sperre der Bauteilaufbauten. Insgesamt konnten Daten zu 25 Bauteilaufbauten gesammelt werden, die den oben genannten Kriterien entsprechen.

Hinsichtlich der Dachhaut kann bei Vergleich der  $s_d$ -Werte festgestellt werden, dass die meisten Aufbauten eine Dachhaut mit einem  $s_d$ -Wert im Bereich von 300 m aufweisen. Das entspricht einer zweilagigen bituminösen Abdichtung, einer durchschnittlichen Dachfolie aus Polyolefinen (FPO) oder einer bitumenhaltigen Kautschukbahn (Resitrix). Es wurden 6 Aufbauten eruiert, für die der  $s_d$ -Wert der Dachhaut unter 100 m liegt. Nur ein Dachaufbau weist ein Blechdach auf, das einen  $s_d$ -Wert von 6000 m besitzt (Aufbau Nr. 16).

Für die Dampfsperre /-bremse wurden in den unterschiedlichen Dichtheitsstufen jeweils ähnlich viele Dachaufbauten ermittelt. Nur ein Bauteilaufbau (Nr. 24) weist eine Dampfbremse mit einem sehr niedrigen  $s_d$ -Wert auf.

Bauteil Nr. 24 hat außerdem nur eine Dämmung von 4 cm Dicke, was auf seine Einbausituation in einem nicht beheizten Raum zurückzuführen ist. Dieser Bauteil wird in der vorliegenden Arbeit aufgrund des gleichen Aufbaus unter den gleichen Randbedingungen untersucht wie alle anderen Dachaufbauten. In der Besprechung der Ergebnisse wird er teilweise gesondert betrachtet, um die Resultate nicht zu verfälschen.

Die beiden Aufbauten Nr. 9 und Nr. 10 unterscheiden sich in den in der Tabelle angeführten Eigenschaften nicht. Die Ausführung der Dachaufbauten erfolgte jedoch unterschiedlich: Aufbau Nr. 9 wurde mit Kiesauflage ausgeführt, bei Aufbau Nr. 10 stellt die Dachhaut die äußerste Bauteilschicht dar.

Nr	Dämmstoff	Dämmhöhe [m]	Trägerhöhe [m]	Dachhaut	sd-Wert Dachhaut	Dampfsperre	sd-Wert Dampfsperre	Schadensfall
1	Zellulose	0,3	0,3	Resitrix classic	279	Sarnavap 2000E	400	Nein
2	Zellulose	0,35	0,35	Resitrix classic	279	Sisalex 514	1800	Nein
3	Mineralwolle	0,4	0,4	Sucoflex 132	34,2	Sarnavap 1000	240	Nein
4	Mineralwolle	0,24	0,24	Sarnafil S 327 - 18	33	Sarnavap 2000E	400	Nein
5	Mineralwolle	0,18	0,18	Elastovill E-KV-4+ Elastovill E-KV-5	280	Sarnavap 2000E	400	Ja
6	Mineralwolle	0,25	0,25	Elastovill E-KV-4+ Elastovill E-KV-5	280	Sarnavap 2000E	400	Nein
7	Mineralwolle	0,24	0,24	Elastovill E-KV-4+ Elastovill E-KV-5	280	Insulex 716	4500	Nein
8	Mineralwolle	0,2	0,2	Sarnafil TG 66-1,8	279	Insulex 716	4500	Nein
9	Zellulose	0,28	0,28	Sarnafil TG 66-1,8	279	Sisalex 514	1800	Nein
10	Zellulose	0,28	0,28	Sarnafil TS 77-1,8	279	Sisalex 514	1800	Nein
11	Zellulose	0,3	0,3	Sarnafil TS 77-1,8	279	Sarnavap 2000E	400	Nein
12	Mineralwolle	0,24	0,24	Sucoflex 132	34,2	Sarnavap 1000	240	Ja
13	Mineralwolle	0,28	0,28	Euphant EPDM 1,5	67,5	Sarnavap 1000	240	Nein
14	Mineralwolle	0,3	0,3	Dachhaut FPO	283	Sisalex 518	1800	Nein
15	Mineralwolle	0,2	0,2	Resitrix classic	279	Sarnavap 2000E	400	Nein
16	Mineralwolle	0,14	0,16	Kupferblech	6000	Sarnavap 3000	183	Ja
17	Mineralwolle	0,16	0,16	Sucoflex 132	34,2	Sarnavap 1000	240	Ja
18	Mineralwolle	0,25	0,3	Sucoflex CB-2,0	300	Sisalex 518	1800	Ja
19	Mineralwolle	0,16	0,16	PVC - Dachbahn	33,36	Sarnavap 1000	240	Ja
20	Mineralwolle	0,16	0,16	Sarnafil TG 66-1,8	279	Insulex 714	655	Ja
21	Mineralwolle	0,22	0,22	Sarnafil TG 66-1,8	279	Sucovap PE / 0.25 RH	150	Ja
22	EPS	0,16	0,16	Sucoflex CB-1,8	270	Sarnavap 1000+ Elastovill E-KV-4	370	Ja
23	Mineralwolle	0,22	0,22	Elastovill E-KV-4+ Elastovill E-KV-5	280	Sarnavap 1000	240	Ja
24	Mineralwolle	0,04	0,08	Sarnafil TG	310	Sisalex 500	2	Ja
25	Mineralwolle	0,22	0,22	Elastovill E-KV-4+ Elastovill E-KV-5	280	Insulex 716	4500	Ja
<b>Dachhaut</b> Anzahl sd Wert 6000:					1			
Anzahl sd Wert 33 - 68:					6			
Anzahl sd Wert 279 - 310:					18			
<b>Dampfbremse</b> Anzahl sd Wert > 1700:					8			
Anzahl sd Wert 150 - 240:					8			
Anzahl sd Wert 370 - 655:					8			
Anzahl sd Wert 2:					1			

Tabelle 2.2 : Übersicht zu den Materialien der Bauteilaufbauten

### 3 Interview

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden einige vorarlberger Architekturbüros, Zimmerer-Betriebe und Sachverständige für Schadensgutachten kontaktiert.

Einerseits sollte dadurch eine möglichst repräsentative Auswahl an Dachaufbauten mit Multibox-Elementen (oder entsprechende Aufbauten ohne Vorfertigung) für die Region Vorarlberg erhoben werden.

Andererseits wurde mit den Betroffenen ein offenes Interview geführt, um Antworten auf den Fragekatalog in Anhang E zu erhalten. Aufgrund der geringen Anzahl der Interviewten und der zum Teil unbeantwortet gebliebenen Fragen werden die Ergebnisse der Befragung hier nur informativ zur näheren Beschreibung der untersuchten Aufbauten wiedergegeben. Auf keinen Fall können allgemeine Rückschlüsse gezogen werden.

Eine Übersicht zu den Antworten gibt ebenfalls Anhang E.

#### *Allgemeine Daten*

Das Erstellungsdatum des Großteils der erhobenen Bauteilaufbauten liegt zwischen 1996 und 2003. Nur drei Aufbauten wurden vor 1996 erstellt.

Als Grund für die Wahl eines vollgedämmten nicht hinterlüfteten Dachaufbaus wurde überwiegend der flache Dachaufbau angegeben. Für den größten Teil der Aufbauten konnte jedoch kein Grund erhoben werden.

Als Nutzung überwiegt der Wohnbau neben Bürogebäuden, Schulen (Kindergarten, Turnsaal), einem Gewerbebau und einem Kulturbau.

#### *Bauphysik*

Im Allgemeinen war den befragten Architekten, Zimmerer-Betrieben und Sachverständigen nicht bekannt, ob eine Berechnung zur Wasserdampfdiffusion durchgeführt wurde. Bei einigen konnte durch Nachforschungen bei den beauftragten Bauphysikern eruiert werden, ob bzw. welche Berechnung durchgeführt wurde.

Es konnte festgestellt werden, dass für manche Bauteilaufbauten keine Berechnung durchgeführt wurde.

Sofern eine Berechnung zur Dampfdiffusion durchgeführt wurde, wurde als Berechnungsmethode das Glaserverfahren angewandt.

#### *Dampfbremse /-sperre*

Bei der Befragung der Architekten und Zimmerer-Betriebe konnte ein Bewusstsein der Problematik von Durchdringungen des untersuchten Aufbaus festgestellt werden. Für die meisten Konstruktionen wurde versucht, die Durchdringungen des Aufbaus bzw. Durchdringungen der Dampfbremse /-sperre zu vermeiden.

Bei der Befragung zur Verklebung der Stösse der Dampfbremse /-sperre ist auffallend, dass von allen Architekten und Zimmerer-Betrieben die Verklebung bejaht wird. Von den Sachverständigen wurde in den meisten Fällen festgestellt, dass die Verklebung der Stösse nicht stattgefunden hat.

Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Sachverständigen ausschließlich mit Schadensfällen konfrontiert werden.

Nur für fünf Bauteilaufbauten wurde eine Luftdichtheitsmessung durchgeführt (für 12 Bauteilaufbauten keine Angabe). In allen fünf Fällen wurde eine Luftwechselrate  $n_{50}$  kleiner als  $0,8 \text{ m}^3/\text{h}$  gemessen. Für diese fünf Bauteilaufbauten liegt lt. Angabe der Befragten kein Schaden vor.

#### *Lagerung Dach*

Die Befragten konnten nur wenig Auskunft zur Zwischenlagerung des Daches auf der Baustelle geben. Vor allem die Sachverständigen hatten dazu keine Kenntnisse. Die Architekten und Zimmerer-Betriebe gaben überwiegend an, dass das Dach direkt aus dem Zimmerer-Betrieb und erst zum Einbau auf die Baustelle geliefert wurde.

### *Einbau*

Auch zum Einbau – Wetter beim Einbau und Zeit bis zum Aufbringen der Dachhaut – konnte von den Sachverständigen wenig Auskunft gegeben werden.

Von den Architekten und Zimmerer-Betrieben konnte nur für wenige Aufbauten die Zeitspanne zwischen Einbau des Daches und Aufbringen der Dachhaut angegeben werden. Die Befragten waren sich aber der Problematik einer provisorischen Abdichtung und der Durchnässung des Multibox-Elementes bewusst.

Von einigen Architekten und Zimmerer-Betrieben wurde auch angegeben, dass das Dach bei Regen eingebaut werden musste, weil die kurzen Bauzeiten kein Verschieben des Einbaudatums erlaubten.

### *Einbaufeuchte*

Zur Messung der Einbaufeuchte konnten ebenfalls nur von wenigen Architekten und Zimmerer-Betrieben Angaben gemacht werden.

Es scheint nur in wenigen Fällen eine Messung der Holzfeuchte durchgeführt zu werden. Als Zeitpunkt der Messung wurde einerseits kurz vor dem Aufbringen der Dachhaut und andererseits noch vor dem Einbau der Elemente angegeben.

### *Schadensfall*

Unter den erhobenen Bauteilaufbauten sind sowohl Schadensfälle als auch schadensfreie Konstruktionen.

Als Schadensbild wird in den meisten Schadensfällen eine Durchfeuchtung der Konstruktion, vor allem der äußeren Holzschalung und des oberen Bereiches des Trägers angegeben.

Die Feststellung des Schadens geht von Feuchtflecken an der Decke bis zu einem Dacheinsturz und zeigt, dass ein länger unentdeckter Schaden gefährlich für die Bewohner werden kann.

Die Zeitdauer zwischen Erstellung des Gebäudes und Schadensfall liegt für die Fälle mit Angabe zwischen 3 und 9 Jahren.

### *Bewegung der Träger*

Eine Verformung der Träger im Winter bzw. Sommer und eine dadurch bedingte Auf- bzw. Abwärtsbewegung des Daches zwischen den Auflagern wurde für 8 Konstruktionen bejaht. Nur für 3 Aufbauten wurde angegeben, dass keine Bewegung des Daches stattfindet. Für die restlichen 14 Bauteilaufbauten konnte keine Angabe dazu gemacht werden.

### *Allgemeine Anmerkungen*

Die Problematik der vollgedämmten Multibox-Konstruktionen ist unter den Architekten und Zimmerer-Betrieben in Vorarlberg bekannt.

Man ist sich einiger Problemstellen des Dachaufbaus durchaus bewusst und versucht, sie möglichst zu vermeiden.

Die Sachverständigen haben auch darauf hingewiesen, dass bisher keine Untersuchungen zu vollgedämmten Hohlkasten-Flachdächer verfügbar sind.



Abbildung 3.1: markante Ausführungsfehler

## 4 Rechnerische Untersuchungen des hygrothermischen Verhaltens von Multibox-Dächern

Für die vorliegende Arbeit wurden Informationen zu 25 in Vorarlberg ausgeführten Bauteilaufbauten gesammelt. Die Aufbauten wurden mit dem lt. ÖNORM B 8110-2 vorgeschriebenen Glaserverfahren und durch eine Simulation mit dem Programm WUFI (WUFI Pro 2005) untersucht. Als Klima wurden drei unterschiedliche Standorte in Vorarlberg angenommen, denen einerseits die Klimadaten lt. ÖNORM und andererseits langjährige Monatsmittelwerte zugrunde gelegt wurden. (siehe Kapitel 2.2)

In den folgenden Kapiteln wird zuerst das Feuchteverhalten anhand eines einzelnen Bauteilaufbaus beispielhaft analysiert.

Dann folgt eine Untersuchung der 25 Bauteilaufbauten gemäß ÖNORM: Die Aufbauten werden mit dem Glaserverfahren und den Klimadaten lt. ÖNORM B 8110-2 berechnet.

Weiters wird das Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten mit dem Programm WUFI simuliert. Dazu werden halbsynthetische Klimadatensätze aus langjährigen Monatsmittelwerten verwendet.

Anschließend erfolgt noch eine Untersuchung der Bauteilaufbauten mit dem Glaserverfahren unter Verwendung von Strahlungslufttemperaturen aus den langjährigen Monatsmittelwerten.

Zum besseren Verständnis werden in den nachfolgenden Kapiteln folgende Bezeichnungen vereinfacht ausgedrückt:

„für den untersuchten Klimastandort Bregenz / Bürs / Schröcken“ wird durch „für Bregenz / Bürs / Schröcken“ ersetzt. Statt des Ausdrucks „die dynamische Berechnung mit dem Programm WUFI“ wird verkürzt „die Berechnung mit WUFI“ verwendet.

Die Bezeichnung „Wassergehalte“ steht für die Gesamtwassergehalte der Bauteilaufbauten und die Wassergehalte der äußeren Holzschalung, der Dämmung und des Trägers.

Und die „äußere Holzschalung“ wird verkürzt nur als Holzschalung bezeichnet.

## 4.1 Diskussion der Ergebnisse eines ausgewählten Beispiels

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse eines ausgewählten Beispiels – Bauteilaufbau Nr. 03 – erörtert.

Der genaue Bauteilaufbau wird in Tabelle 2.2 angeführt, die verwendeten Materialkennwerte können aus Anhang A abgelesen werden. Die Ergebnisse aus der Berechnung nach dem Glaserverfahren und der dynamischen Berechnung für die Dämmebene und die Trägerebene sind in Anhang E angeführt.

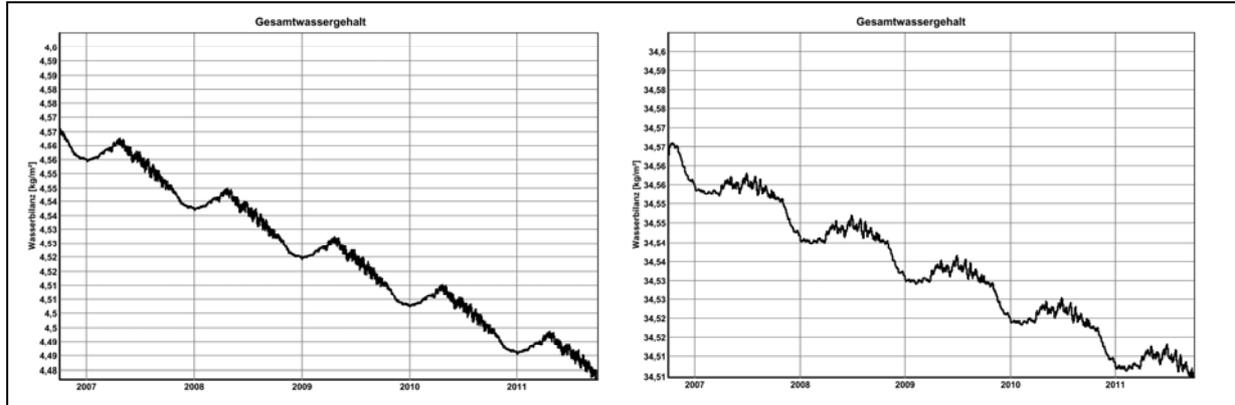
### 4.1.1 Berechnung nach dem Glaserverfahren – Bauteilaufbau Nr. 03

Für Bauteilaufbau Nr. 03 tritt bei den Glaserberechnungen für keinen der Standorte in keiner der beiden Ebenen Kondensat auf.

Der Bauteilaufbau entspricht demnach in Dämm- und Trägerebene in allen drei Klimazonen lt. Glaserberechnung den Anforderungen der ÖNORM B 8110-2 und würde somit lt. Norm als feuchtetechnisch geeigneter Bauteilaufbau gelten.

### 4.1.2 Dynamische Berechnung – Bauteilaufbau Nr. 03

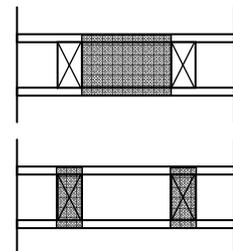
*Gesamtwassergehalt in der Dämmebene und in der Trägerebene*



**Diagramm 4.1: Gesamtwassergehalt in der Dämmebene (links) und in der Trägerebene (rechts) des Bauteilaufbaus Nr. 03 für den Standort Bürs**

Für den Bauteilaufbau Nr. 03 konnte für die Dämm- und für die Trägerebene ein längerfristig abnehmender Gesamtwassergehalt festgestellt werden. Die Abnahme beträgt in den letzten vier Jahren der Berechnung  $0,053 \text{ kg/m}^2$  in der Dämmebene und  $0,033 \text{ kg/m}^2$  in der Trägerebene.

Im Jahresverlauf wurde für beide Ebenen eine Schwankung des Gesamtwassergehaltes unter dem von der Norm vorgeschriebenen Maximalwert von  $0,5 \text{ kg/m}^2$  ermittelt. In beiden Ebenen findet in der warmen Jahreszeit ein Absinken und in der kalten Jahreszeit ein Ansteigen des Gesamtwassergehaltes statt.



### Wassergehalt der Dämmung

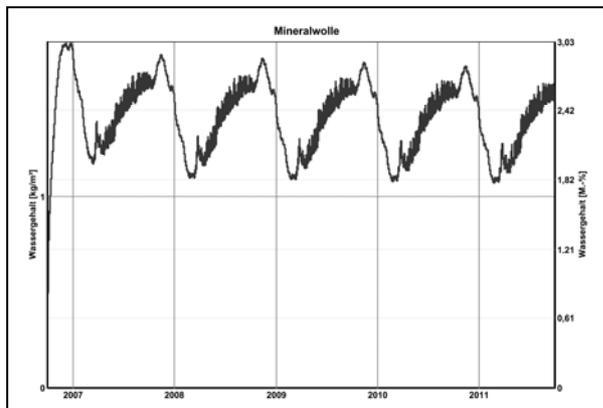
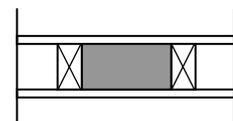


Diagramm 4.2: Wassergehalt der Dämmung des Bauteilaufbaus Nr. 03 für den Standort Bürs

Auch der Wassergehalt der Dämmung zeigt längerfristig eine Tendenz leicht abzunehmen.

Die Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung im Jahresverlauf ist im Vergleich zur längerfristigen Abnahme des Wassergehaltes stärker ausgebildet und prägt das Feuchteverhalten der Dämmung.



### Wassergehalt des Trägers

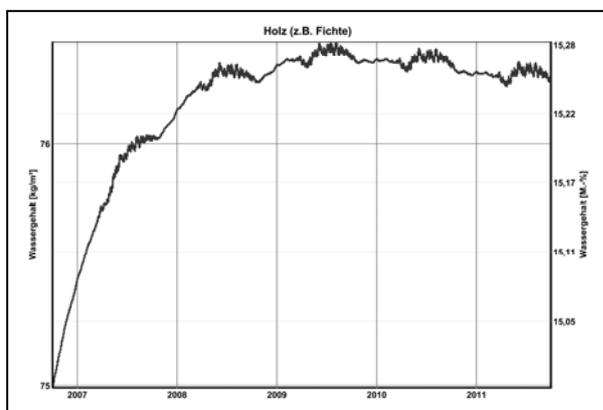
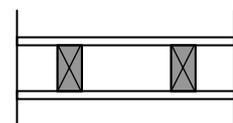


Diagramm 4.3: Wassergehalt des Trägers des Bauteilaufbaus Nr. 03 für den Standort Bürs

Der Wassergehalt des Trägers beträgt zu Beginn der Simulation 15,0 M-% und steigt innerhalb der ersten drei Jahre auf einen maximalen massebezogenen Feuchtegehalt von 15,25 M-%. Der maximale M-% des Trägers liegt somit unter dem Grenzwert von 20,0 M-%, ab dem lt. ÖNORM EN 335-1 das Wachstum von holzerstörerischen Pilzen möglich ist.



Ab dem dritten Jahr der Simulation beginnt der Wassergehalt des Trägers gleichmäßig abzunehmen. Die Schwankung im Jahresverlauf ist für den Wassergehalt des Trägers ab dem dritten Jahr sehr gering.

Es muss aber berücksichtigt werden, dass in der Abbildung die über den Querschnitt des Trägers gemittelten Wassergehalte abgebildet werden (siehe Kapitel 4.3.3)

### Wassergehalt der Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene

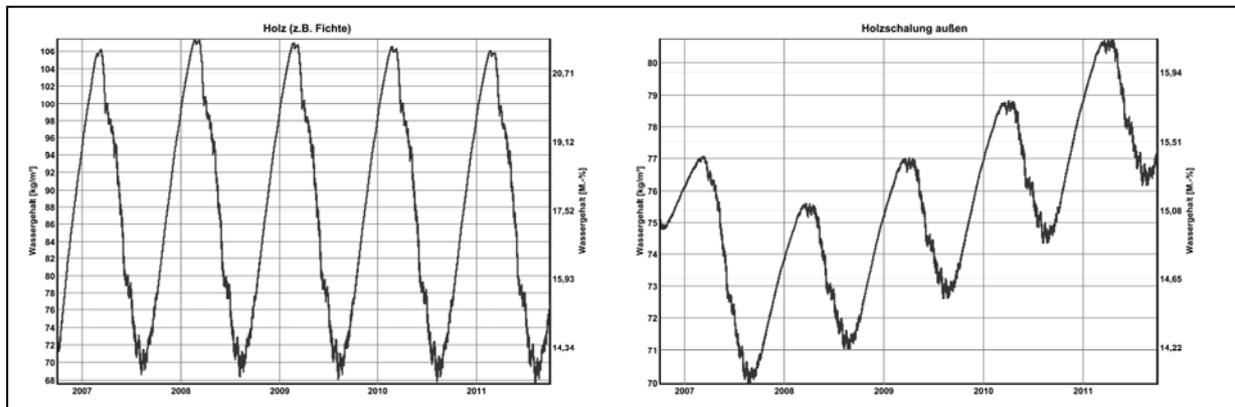
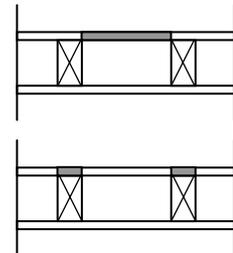


Diagramm 4.4: Wassergehalt der äußeren Holzschalung in der Dämmebene (links) und in der Trägerebene (rechts) des Bauteilaufbaus Nr. 03 für den Standort Bürs

Der Wassergehalt der Holzschalung in der Dämmebene zeigt ab dem zweiten Simulationsjahr eine leichte längerfristige Abnahme – der Wassergehalt der Holzschalung in der Trägerebene steigt dagegen ab dem zweiten Jahr stark an.

Die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf für die Holzschalung in der Dämmebene ist stark ausgeprägt und übersteigt den Grenzwert lt. ÖNROM B 8110-2 von  $0,5 \text{ kg/m}^2$ .



Für die Holzschalung in der Trägerebene ergibt sich eine geringere Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf, der auch unter dem von der Norm vorgeschriebenen Maximalwert liegt.

Der maximale massebezogene Feuchtegehalt erreicht durch die hohe Schwankung für die Holzschalung in der Dämmebene einen Wert von  $21,40 \text{ M-\%}$ . Lt. ÖNORM EN 335-1 ist die Entwicklung holzerstörerischer Pilze ab  $20,0 \text{ M-\%}$  möglich.

Für die Holzschalung in der Trägerebene liegt der maximale durch die Berechnung ermittelte massebezogene Feuchtegehalt bei  $16,16 \text{ M-\%}$ . Durch den langfristigen Anstieg des Wassergehaltes erreicht der massebezogene Feuchtegehalt nach mehreren Jahren voraussichtlich auch über  $20,0 \text{ M-\%}$ .

### Hygrothermische Zustände

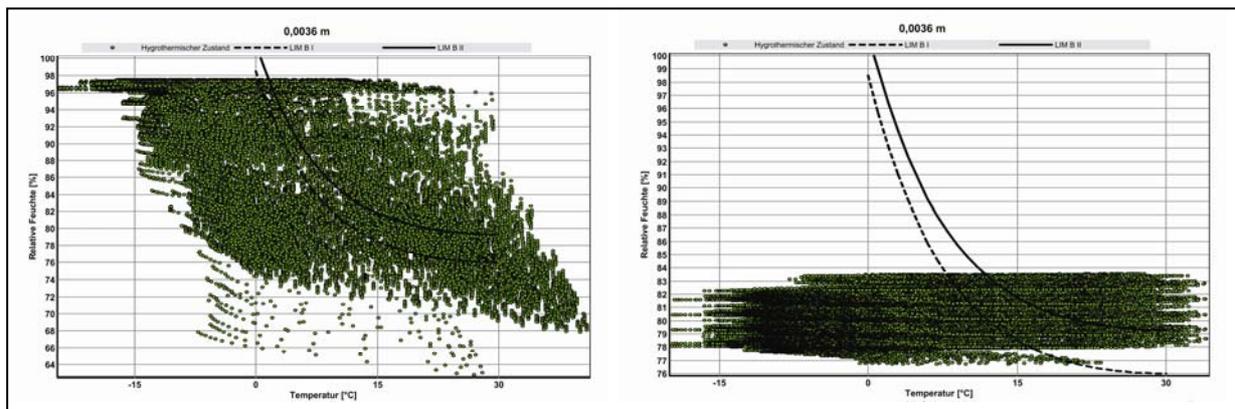
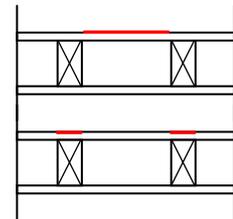


Diagramm 4.5: Hygrothermische Zustände an der äußeren Oberfläche der Holzschalung in der Dämmebene (links) und in der Trägerebene (rechts) des Bauteilaufbaus Nr. 03 für den Standort Bürs

Aufgrund des hohen Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene stellen sich an deren Außenseite hygrothermische Zustände ein, die weit über der Grenzisooplethe LIM B II liegen.

Die errechnete Zeit  $t_m$  (Zeitdauer bis Erreichen von Mould-Index 1, siehe Kapitel 1.2.2.5) beträgt an der Außenseite der Holzschalung in der Dämmebene 1,71 Stunden.

An der Außenseite der Holzschalung in der Trägerebene wurde eine Zeitdauer  $t_m$  von 10,4 Stunden ermittelt.



### Zusammenfassung

Im Gegensatz zur Berechnung nach Glaser zeigt die dynamische Berechnung mit WUFI klare Problempunkte des Bauteilaufbaus.

Vor allem die äußere Holzschalung scheint stark von den Feuchtigkeitseinflüssen belastet zu sein.

## 4.2 Resultate der Glaserberechnungen mit Klimadaten nach ÖNORM

In diesem Kapitel sollen die Resultate der Berechnung des Feuchteverhaltens der Bauteile mit dem Glaserverfahren unter Zugrundelegung der Klimadaten gemäß ÖNORM B 8110-2 erörtert werden.

Einerseits werden die Unterschiede der Berechnungsergebnisse nach Glaser für die drei Klimastandorte Bregenz, Bürs und Schröcken herausgearbeitet und andererseits wird das Verhalten von Dämm- und Trägerebene verglichen. Die Beurteilungskriterien sind in Kapitel 2.3 angeführt.

### 4.2.1 Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse

Die Glaserberechnung lt. ÖNORM B 8110-2 wurde für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken durchgeführt. Die zugrunde liegenden Klimadaten (Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurden nach dem Verfahren gemäß ÖNORM ermittelt.

Die Berechnung entspricht somit den Vorgaben der Norm.

#### Kondensatausfall und Verdunstung

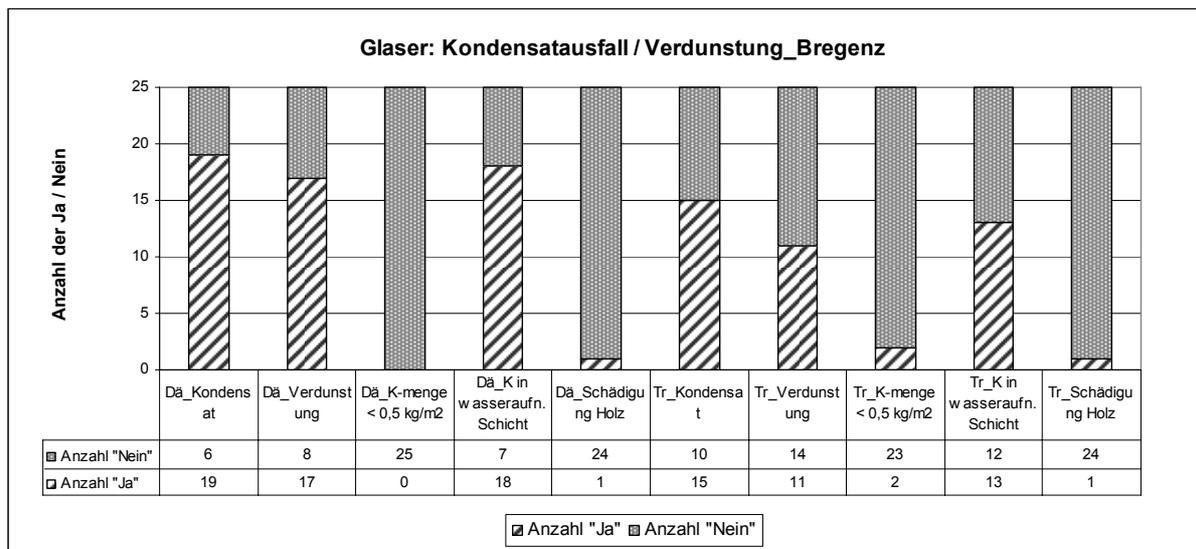


Diagramm 4.6: Kondensatausfall und Verdunstung nach der Glaserberechnung für den Standort Bregenz

Fortsetzung: Kondensatausfall und Verdunstung

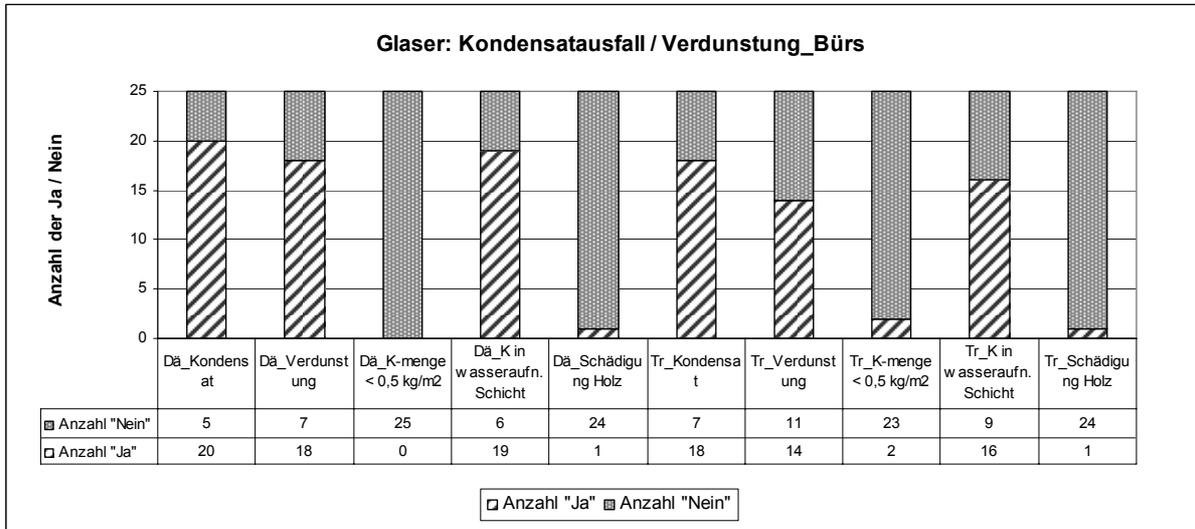


Diagramm 4.7: Kondensatausfall und Verdunstung nach der Glaserberechnung für den Standort Bürs

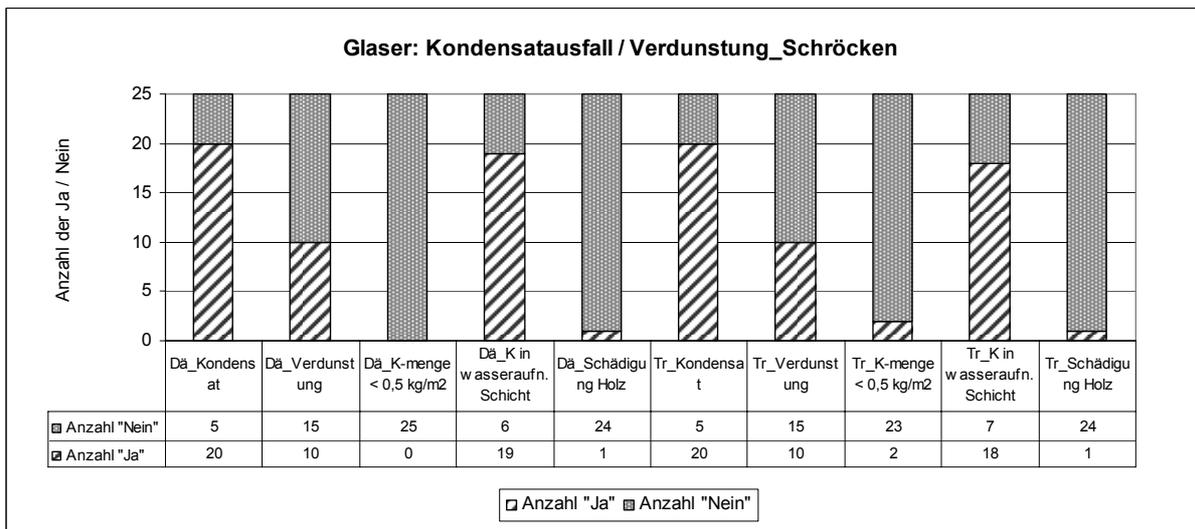


Diagramm 4.8: Kondensatausfall und Verdunstung nach der Glaserberechnung für den Standort Schröcken

**Kondensat**

Für den Standort Bregenz wurde in der Dämm- und Trägerebene bei weniger Bauteilaufbauten Kondensatausfall festgestellt als für die Standorte Bürs und Schröcken – für Bürs wiederum bei weniger Bauteilaufbauten als für Schröcken.

**Verdunstung**

Zur Beurteilung der Verdunstung ist immer die Differenz der Anzahl der Aufbauten mit Kondensat und der Anzahl der Verdunstungsfälle zu betrachten. Wo kein Kondensat auftritt, wurde auch keine Verdunstung gewertet.

Für die Standorte Bregenz und Bürs treten jeweils zwei (Dämmebene) bzw. vier (Trägerebene) Bauteilaufbauten auf, für die Kondensatausfall ermittelt wurde, aber keine ausreichende Verdunstung vorherrscht.

Für den Standort Schröcken weisen bedeutend mehr Bauteilaufbauten mit Kondensatausfall eine unzureichende Verdunstung auf.

**Kondensatausfall in wasseraufnahmefähiger Schicht**

Grundsätzlich ist festzustellen, dass der Kondensatausfall – sofern er auftritt – vorwiegend in wasseraufnahmefähigen Schichten stattfindet. Diese Schicht ist in allen Berechnungen und Klimazonen die äußere Holzschalung.

Kondensatmenge

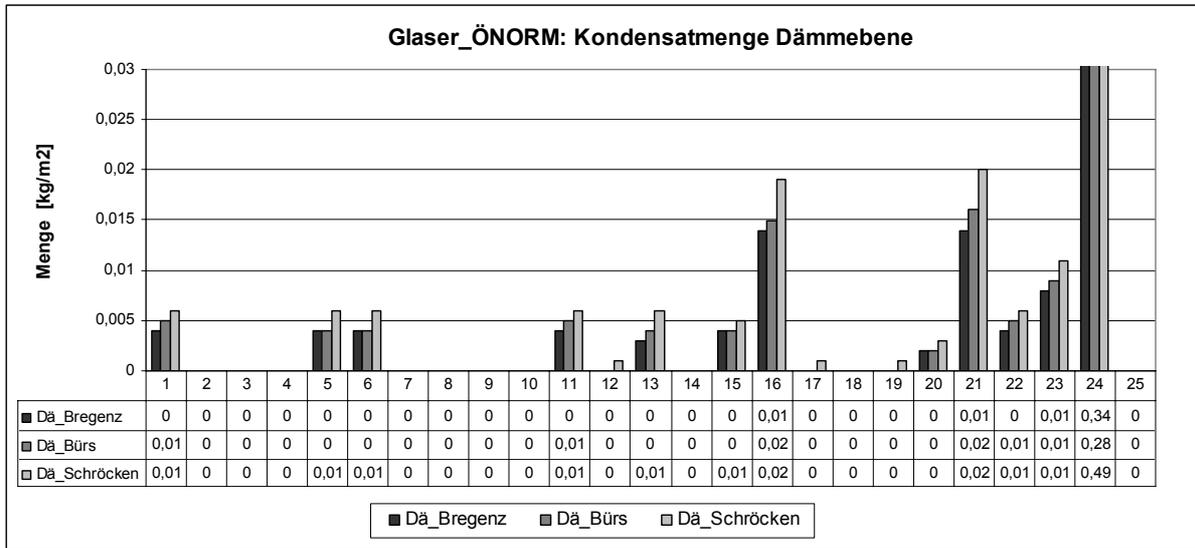


Diagramm 4.9: Kondensatmenge nach dem Glaserverfahren für die Dämmebene

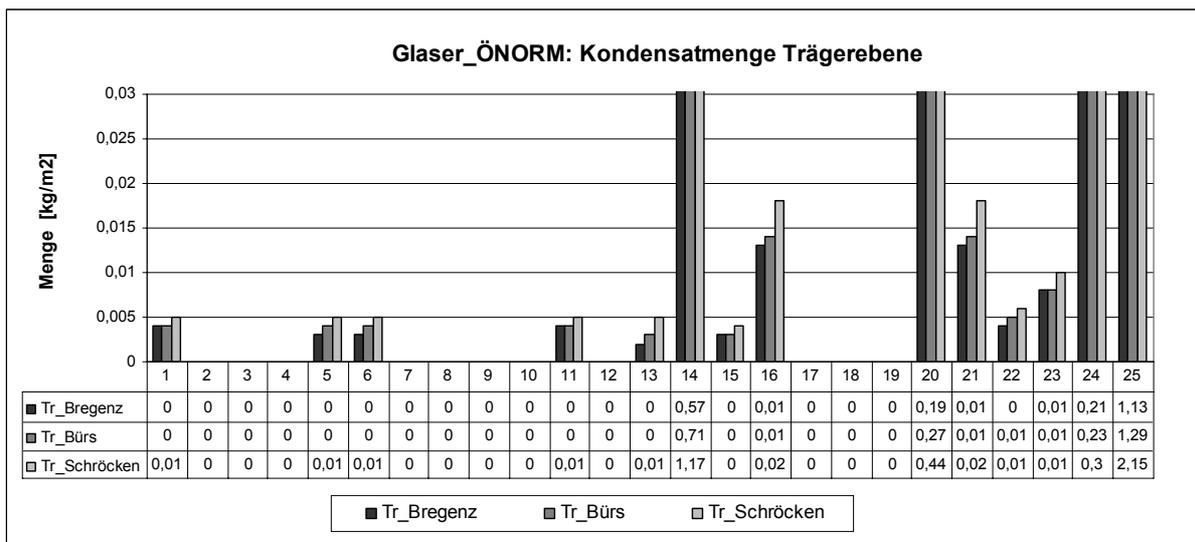
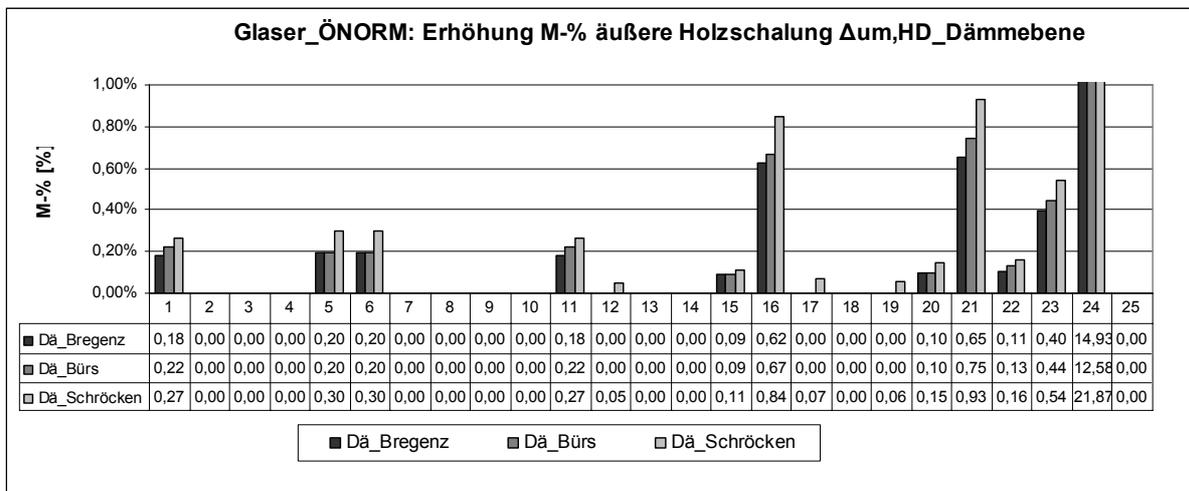


Diagramm 4.10: Kondensatmenge nach dem Glaserverfahren für die Trägerebene

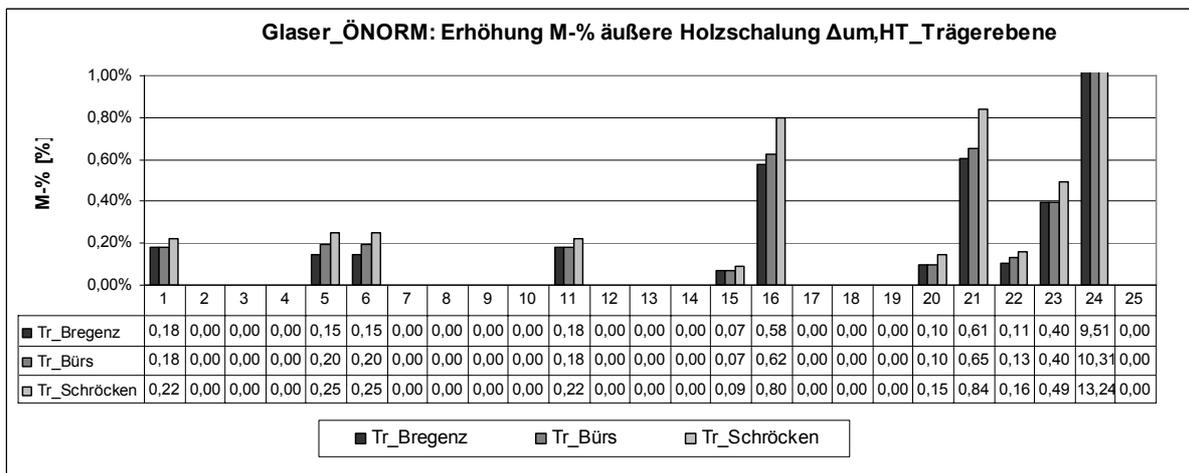
Bei der Glaserberechnung nach ÖNORM zeigt sich für den Standort Bregenz für alle untersuchten Bauteilaufbauten in der Dämm- und Trägerebene eine geringere Kondensatmenge als für Schröcken – für den Großteil der Aufbauten auch eine geringere Kondensatmenge als für Bürs. Für den Standort Bürs weisen alle untersuchten Bauteilaufbauten in der Dämm- und Trägerebene eine geringere Kondensatmenge auf als für den Standort Schröcken.

Die hohen Kondensatmengen der Bauteilaufbauten 14, 20 und 25 in der Trägerebene sind auf eine ausgedämmte Installationsebene raumseitig der Dampfsperre zurückzuführen. Bauteilaufbau 24 weist hohe Kondensatmengen auf, weil der sd-Wert der Dampfbremse nur bei 2,0 m liegt.

*Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes der äußeren Holzschalung  $\Delta u_{m,HD}$  und  $\Delta u_{m,HT}$*



**Diagramm 4.11: Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes M-% der äußeren Holzschalung in der Dämmebene**



**Diagramm 4.12: Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes M-% der äußeren Holzschalung in der Trägerebene**

Der Kondensatausfall findet in der Dämmebene ausschließlich und in der Trägerebene großteils nur in der äußeren Holzschalung statt.

Die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes im Jahresverlauf  $\Delta u_m$  in der äußeren Holzschalung zeigt daher ein ähnliches Bild wie der Kondensatausfall:

Für den Standort Bregenz sind  $\Delta u_{m,HD}$  und  $\Delta u_{m,HT}$  für alle untersuchten Bauteilaufbauten niedriger als für den Standort Schröcken und niedriger bzw. gleich hoch wie für den Standort Bürs.

Für Bürs ergeben sich für  $\Delta u_{m,HD}$  und  $\Delta u_{m,HT}$  bei allen untersuchten Bauteilaufbauten niedrigere Werte als für den Standort Schröcken.

### *Zusammenfassung*

Die Berechnung der Bauteilaufbauten mit dem Glaserverfahren und unter Zugrundelegung der Klimadaten gemäß ÖNORM B 8110-2 zeigt, dass für den Standort Bregenz im Mittel weniger Kondensat im Bauteilinneren anfällt als für die Standorte Bürs und Schröcken. Für Bürs wiederum ergibt sich weniger Kondensat als für Schröcken.

Diese Tendenz konnte aufgrund des Berechnungsverfahrens und der Klimadaten im Vorfeld erwartet werden:

Den einzigen Unterschied der Berechnungen stellen die Klimadaten dar, die gemäß ÖNORM B 8110-2 in Abhängigkeit von der Höhenlage und der Temperaturregion ermittelt werden. Die Höhenlage hat direkten Einfluss auf die mittlere monatliche Außenlufttemperatur  $t_a$ . ÖNORM B 8110-2 und bestimmt die Berechnungsergebnisse wesentlich. Die Außenlufttemperatur ist neben der relativen Luftfeuchtigkeit der einzige Klimaparameter, der in die Berechnung eingeht. Eine höhere Lage bedeutet niedriger mittlere monatliche Außentemperaturen, die in der Glaserberechnung einen höheren Kondensatausfall und weniger Austrocknung bewirken.

#### 4.2.2 Vergleich von Dämmebene und Trägerebene

Für die in dieser Arbeit untersuchten Bauteilaufbauten wurde jeweils eine Berechnung für die Dämmebene und für die Trägerebene durchgeführt. Im Folgenden wird auf das unterschiedliche Feuchteverhalten der Dämmebene und der Trägerebene nach der Glaserberechnung mit Klimadaten lt. ÖNORM eingegangen.

Zu den folgenden Analysen korrespondieren Diagramm 4.6 auf Seite 48, Diagramm 4.7 und Diagramm 4.8 auf Seite 49.

##### *Kondensat*

In der Dämmebene tritt für die Standorte Bregenz und Bürs häufiger ein Kondensatausfall auf als in der Trägerebene.

Für den Standort Schröcken ergibt sich in beiden Ebenen gleich häufig Kondensatausfall.

##### *Verdunstung*

Eine vollständige Verdunstung des angefallenen Kondensats in den Sommermonaten ist für die Standorte Bregenz und Bürs in der Dämmebene häufiger der Fall als in der Trägerebene. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass für die Aufbauten Nr. 14, 20 und 25 in der Trägerebene auch Kondensat auf der Innenraumseite der Dampfsperre (in der Installationsebene) ermittelt wurde, für das die vollständige Verdunstung in den Sommermonaten nicht gegeben ist.

Betrachtet man nur den Aufbau außerhalb der Dampfsperre, so ergibt sich in diesem Bereich auch für die drei angeführten Aufbauten eine vollständige Austrocknung.

Die Verdunstung in der Trägerebene ist somit in allen Klimazonen für etwa gleich viele Bauteilaufbauten gegeben wie für die Dämmebene.

##### *Kondenstatmenge größer als 0,5 kg/m<sup>2</sup>*

Es fällt auf, dass die Kondensatmenge in der Dämmebene immer unter 0,5 kg/m<sup>2</sup> liegt, wohingegen in der Trägerebene in allen Klimastandorten jeweils zwei Bauteilaufbauten eine Kondensatmenge über 0,5 kg/m<sup>2</sup> aufweisen. Diese hohe Kondensatmenge fällt in den Bauteilaufbauten Nr. 14 und 25 jeweils auf der Innenraumseite der Dampfsperre (in der Installationsebene) an. In beiden Aufbauten ergibt sich außerhalb der Dampfsperre nur wenig Kondensat.

Wie für die Verdunstung gilt bei einer Betrachtung der Aufbauten außerhalb der Dampfsperre, dass zwischen Dämm- und Trägereben kein augenscheinlicher Unterschied auszumachen ist.

Kondensatmenge

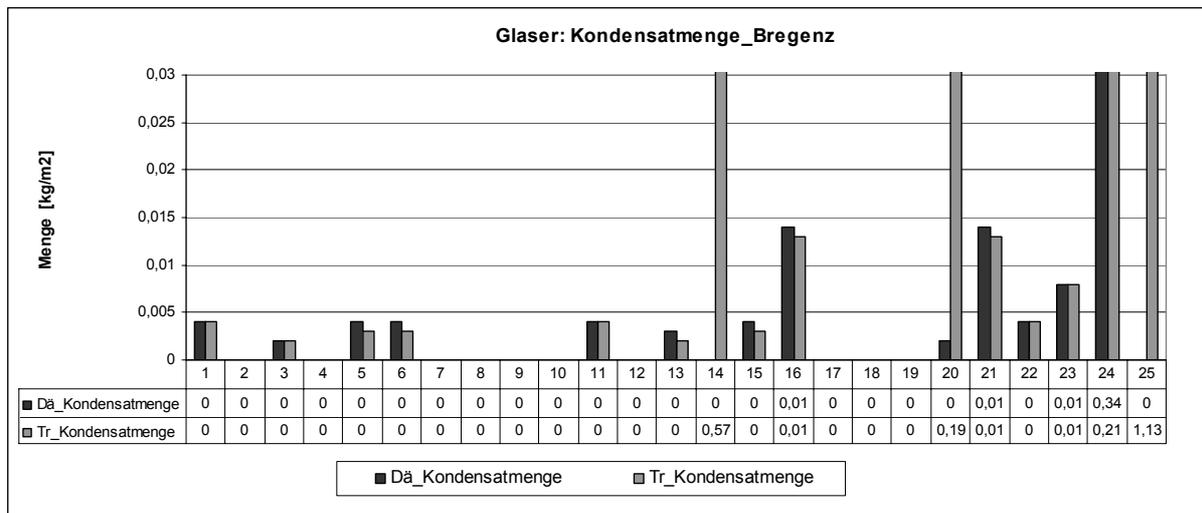


Diagramm 4.13: Kondensatmenge nach dem Glaserverfahren für den Standort Bregenz

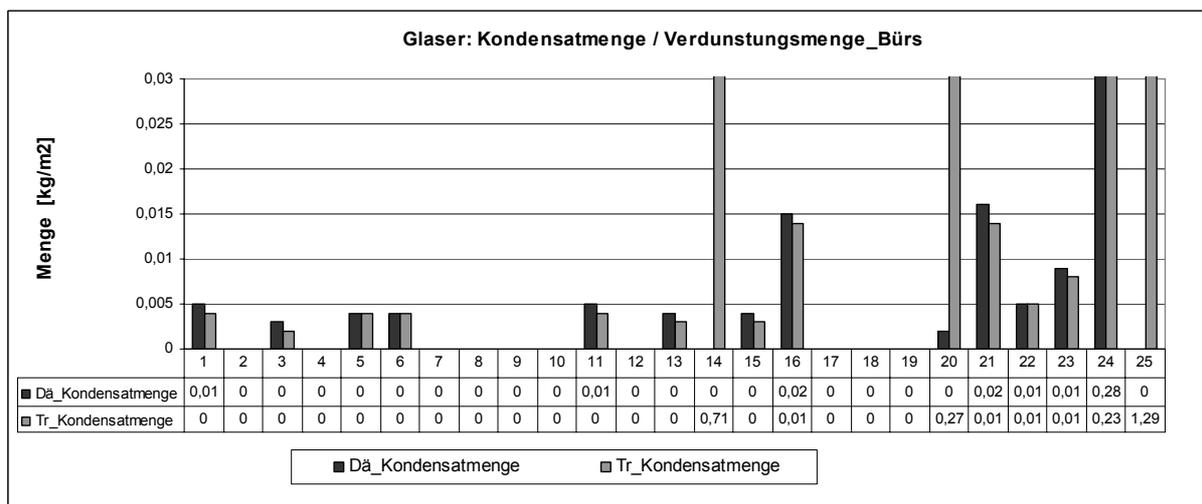


Diagramm 4.14: Kondensatmenge nach dem Glaserverfahren für den Standort Bürs

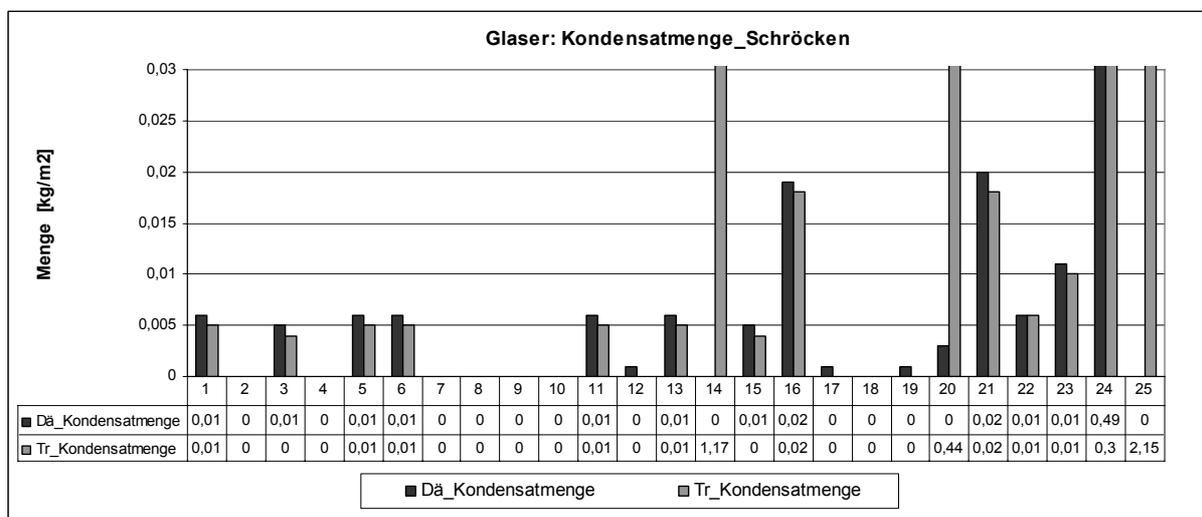


Diagramm 4.15: Kondensatmenge nach dem Glaserverfahren für den Standort Schröcken

#### *Fortsetzung Kondensatmenge*

Die ermittelte Kondensatmenge ist für die Mehrzahl der Aufbauten in der Dämmebene höher als in der Trägerebene.

Die extremen Kondensatmengen in der Trägerebene der Bauteilaufbauten Nr. 14, 20 und 25 sind wiederum auf den Kondensatanfall auf der Innenraumseite der Dampfsperre zurückzuführen.

Konzentriert man sich nur auf den Bauteilaufbau außerhalb der Dampfsperre, so ist festzustellen, dass der Unterschied der Kondensatmenge zwischen Dämm- und Trägerebene für den Standort Breznitz nicht so deutlich erkennbar ist wie für die Standorte Bürs und Schröcken.

#### *Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes der äußeren Holzschalung $\Delta u_{m,HD}$ und $\Delta u_{m,HT}$*

Analog zur höheren Kondensatmenge in der Dämmebene, ist auch die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes in der äußeren Holzschalung in der Dämmebene stärker ausgeprägt, weil der Kondensatausfall – sofern er außerhalb der Dampfsperre erfolgt – ausschließlich in der Holzschalung auftritt.

Eine Schädigung der äußeren Holzschalung durch Übersteigen der 3% Grenze für  $\Delta u_m$  gemäß ÖNORM B 8110-2 tritt bei den untersuchten Bauteilaufbauten für die Dämmebene trotzdem nicht häufiger auf als für die Trägerebene

#### *Zusammenfassung*

Bei der Berechnung nach dem Glaserverfahren können zwischen Dämm- und Trägerebene nur geringe Unterschiede festgestellt werden.

Die Wichtigkeit der Berechnung beider Ebenen lässt sich jedoch anhand der Aufbauten Nr. 14, 20 und 25 zeigen. Deren Aufbau ist zwar in der Dämmebene gemäß ÖNORM B 8110-2 geeignet, weist aber in der Trägerebene durch die Anordnung einer Dämmung in der Installationsebene zu hohen Kondensatausfall bzw. zu geringer Verdunstung auf.

### 4.2.3 Problemstellen der Aufbauten gemäß der Berechnung nach dem Glaserverfahren

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass gemäß den Ergebnissen der Berechnung nach dem Glaserverfahren und deren Beurteilung gemäß ÖNORM B 8110-2 Flachdächer im Holzbau mit in der Trägerebene angeordneter Dämmung zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut aus feuchtetechnischer Sicht geeignet sind.

Nur sehr selten kommt es lt. Glaserberechnung zu einer Schädigung von Materialien, welche bei einer Berechnung mit dem Glaserverfahren relativ einfach vermieden werden könnte, indem der  $s_D$ -Wert der Dampfsperre/-bremse angepasst wird.

Einen einzigen wirklichen Problempunkt stellt nach dieser Berechnungsmethode die innenraumseitig der Dampfsperre/-bremse angeordnete Dämmung in der Trägerebene dar.

Weiters wird durch die Bewertung der Höhenlage und deren direkten Einfluss auf die Außentemperatur gemäß ÖNORM B 8110-2 ein höherer Kondensatausfall bzw. eine geringere Verdunstung in höheren Regionen bewirkt.

### 4.3 Resultate der dynamischen Berechnungen

Die Ergebnisse der Berechnungen mit dem Programm WUFI wurden gemäß den festgelegten Kriterien (siehe Kapitel 2.3) ausgewertet und verglichen. Die Analyse der Ergebnisse befasst sich im Folgenden insbesondere mit dem Einfluss der klimatischen Randbedingungen auf das Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten, dem Unterschied zwischen Dämm- und Trägerebene und der Auswirkung der verschiedenen Materialien bzw. Materialeigenschaften auf die Berechnungsergebnisse.

Kapitel 4.3.5 enthält eine kurze stichwortartige Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse.

#### 4.3.1 Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse

Die ausgewählten Bauteilaufbauten wurden für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken untersucht. (siehe Kapitel 2.2)

##### 4.3.1.1 Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre $\Delta u'_m$

Die Tendenz des Verhaltens des Gesamtwassergehaltes der Bauteilaufbauten und der Wassergehalte der äußeren Holzschalung, der Dämmung und des Trägers wurde mit „nimmt ab“, „bleibt gleich“ und „steigt an“ bewertet. Als Grundlage für diese Bewertung dient die Differenz des Mittelwertes des 5. Jahres und des Mittelwertes des 2. Jahres der Berechnung (siehe Kapitel 2.3).

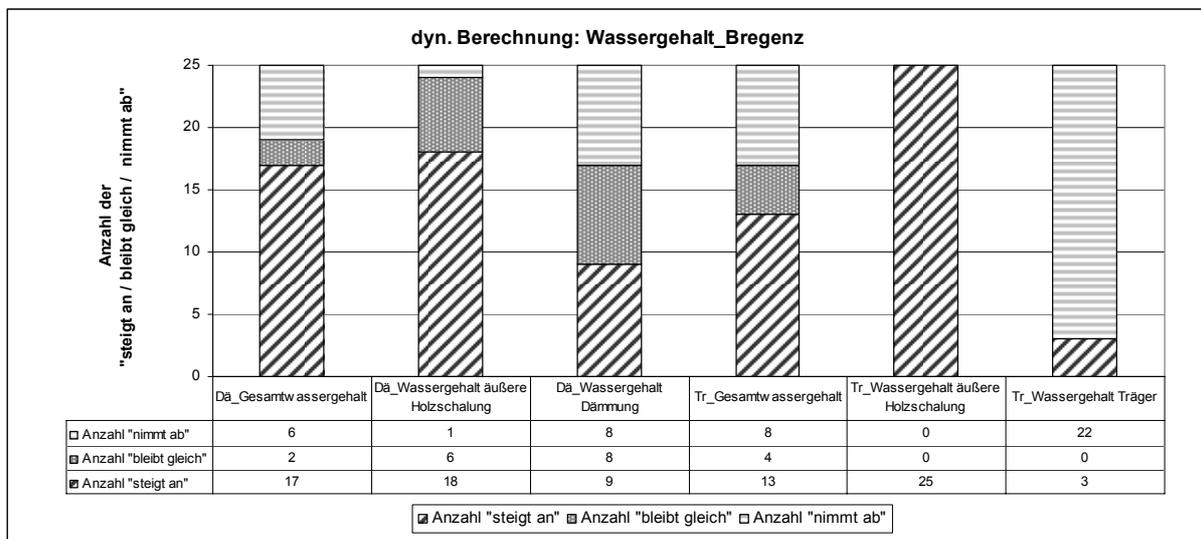


Diagramm 4.16: Tendenz des Verhaltens des Gesamtwassergehaltes für den Standort Bregenz (Berechnung mit WUFI)

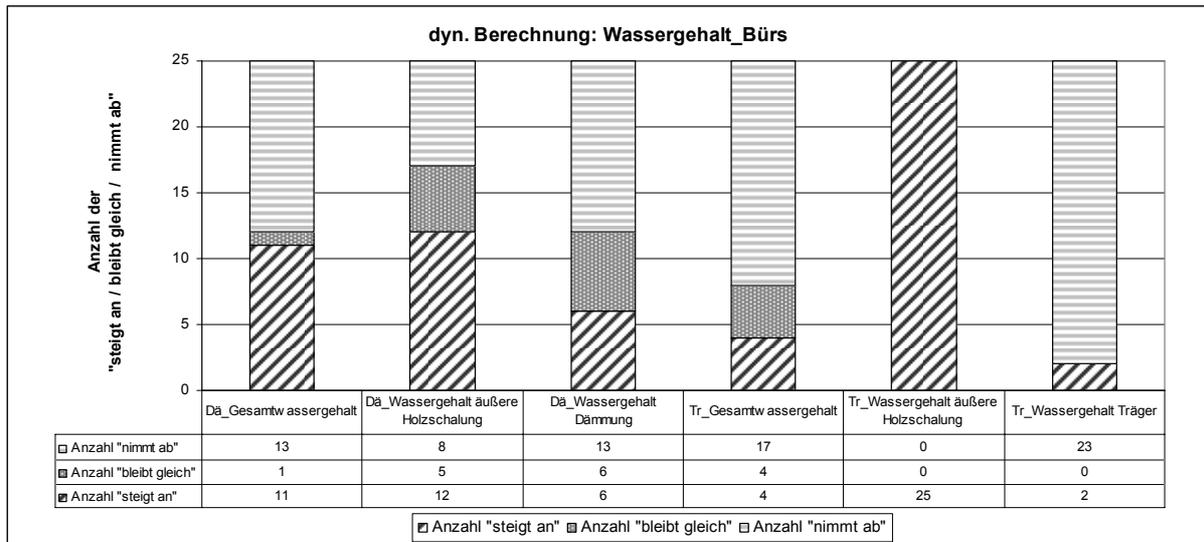


Diagramm 4.17: Tendenz des Verhaltens des Gesamtwassergehaltes für den Standort Bürs (Berechnung mit WUFI)

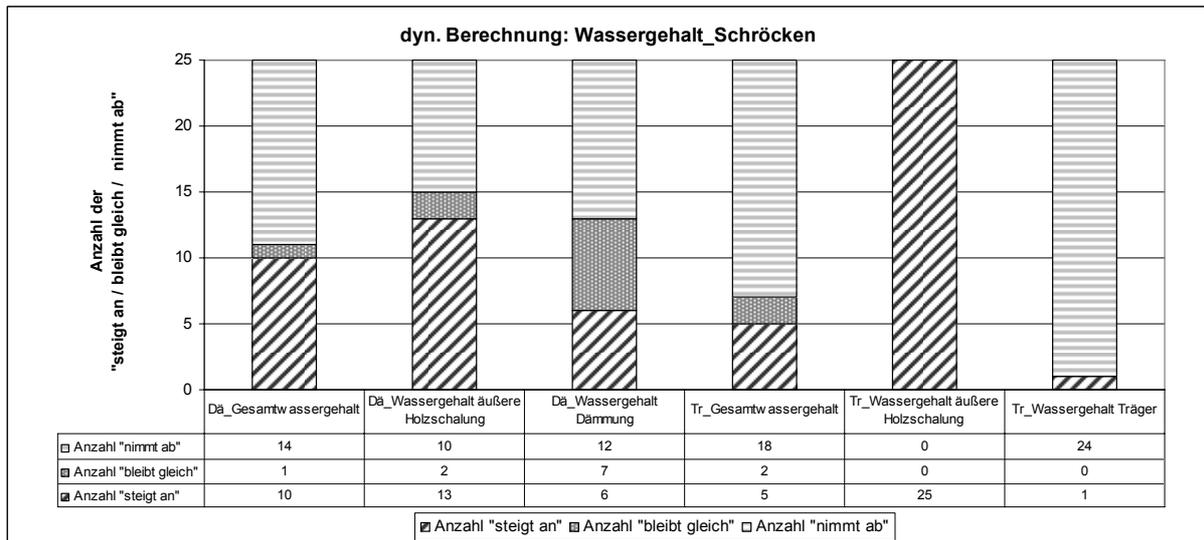


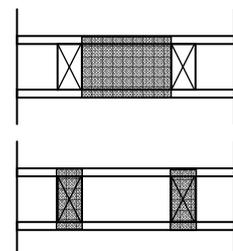
Diagramm 4.18: Tendenz des Verhaltens des Gesamtwassergehaltes für den Standort Schröcken (Berechnung mit WUFI)

*Verhalten des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u'_m$*

Für den Gesamtwassergehalt wurde mit der Berechnung mit WUFI für die Standorte Bürs und Schröcken jeweils für ca. doppelt so viele Bauteilaufbauten ein abnehmender Gesamtwassergehalt ermittelt wie für den Standort Bregenz. Dies gilt für die Dämmebene und für die Trägerebene.

Für Bregenz dagegen weisen deutlich mehr Bauteilaufbauten einen steigenden Gesamtwassergehalt auf: In der Dämmebene haben für Bregenz ungefähr ein Drittel mehr Bauteilaufbauten einen steigenden Gesamtwassergehalt als für Bürs und Schröcken - in der Trägerebene sind es mehr als doppelt so viele.

Die Standorte Bürs und Schröcken zeigen trotz des großen Unterschieds der Höhenlage sehr ähnliche Ergebnisse in Bezug auf das Verhalten des Gesamtwassergehaltes.



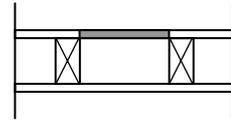
#### *Verhalten des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Dämmebene $\Delta u'_{m,HD}$*

Die Tendenz der  $\Delta u'_{m,HD}$  verhält sich ähnlich wie für den Gesamtwassergehalt der Dämmebene:

Die Ergebnisse für Bürs und Schröcken ähneln einander.

Für Bregenz weisen ungefähr ein Drittel mehr Bauteilaufbauten einen steigenden Gesamtwassergehalt auf als für Bürs und Schröcken.

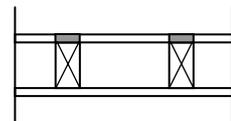
Ein Unterschied zum Verhalten des Gesamtwassergehaltes zeigt sich allerdings für die Anzahl der Bauteilaufbauten mit abnehmender  $\Delta u'_{m,HD}$ : Für den Standort Bregenz zeigt nur ein Bauteilaufbau eine abnehmende  $\Delta u'_{m,HD}$ . Für Bürs und Schröcken sind es acht bzw. zehn Mal so viele.



#### *Verhalten des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Trägerebene $\Delta u'_{m,HT}$*

Es wurden nur ansteigende  $\Delta u'_{m,HT}$  ermittelt.

Das bedeutet, dass in der Trägerebene sogar bei abnehmendem Gesamtwassergehalt der Wassergehalt der äußeren Holzschalung immer ansteigt.

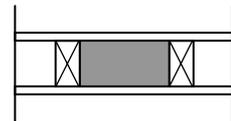


#### *Verhalten des Wassergehaltes der Dämmung $\Delta u'_{m,D}$*

Die Tendenz des  $\Delta u'_{m,D}$  ist für den Standort Bregenz bei einem Drittel mehr Bauteilaufbauten ansteigend als für die Standorte Bürs und Schröcken.

Für Bürs und Schröcken weisen jeweils ein Drittel mehr Bauteilaufbauten eine abnehmende  $\Delta u'_{m,D}$  auf als dies für Bregenz der Fall ist.

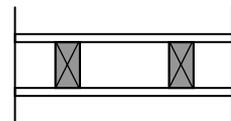
Für die Standorte Bürs und Schröcken ergeben sich auch für die  $\Delta u'_{m,D}$  ähnliche Ergebnisse.



#### *Verhalten des Wassergehaltes des Trägers $\Delta u'_{m,T}$*

Das Verhalten des Wassergehaltes des Trägers ist für alle drei untersuchten Klimastandorte sehr ähnlich:

Die  $\Delta u'_{m,T}$  zeigt für alle drei Standorte die Tendenz abzunehmen. Nur drei (Bregenz), zwei (Bürs) bzw. ein (Schröcken) Bauteilaufbau von 25 untersuchten Aufbauten weist eine steigende  $\Delta u'_{m,T}$  auf.



Neben den Tendenzen des Verhaltens der Wassergehalte wurde auch die Menge des Anstiegs/der Abnahme (die Veränderung) der Wassergehalte ermittelt. Sie bildet sich aus der Differenz des Mittelwertes des 5. Jahres und des Mittelwertes des 2. Jahres.

Ein positiver Wert bedeutet einen Anstieg, ein negativer Wert eine Abnahme des Wassergehaltes über die letzten vier Jahre der Berechnung.

Veränderung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u'_m$

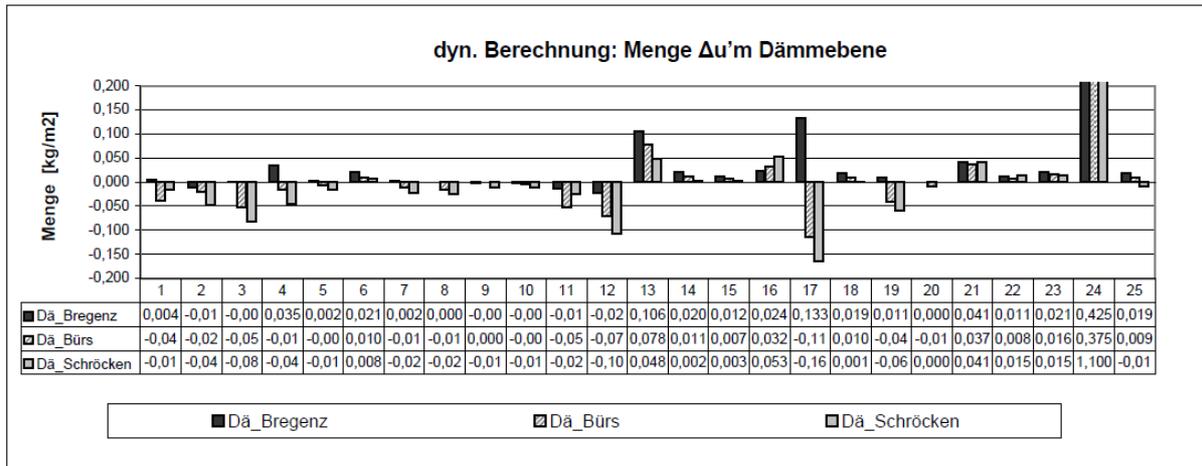


Diagramm 4.19: Veränderung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u'_m$  für die Dämmebene (Berechnung mit WUFI)

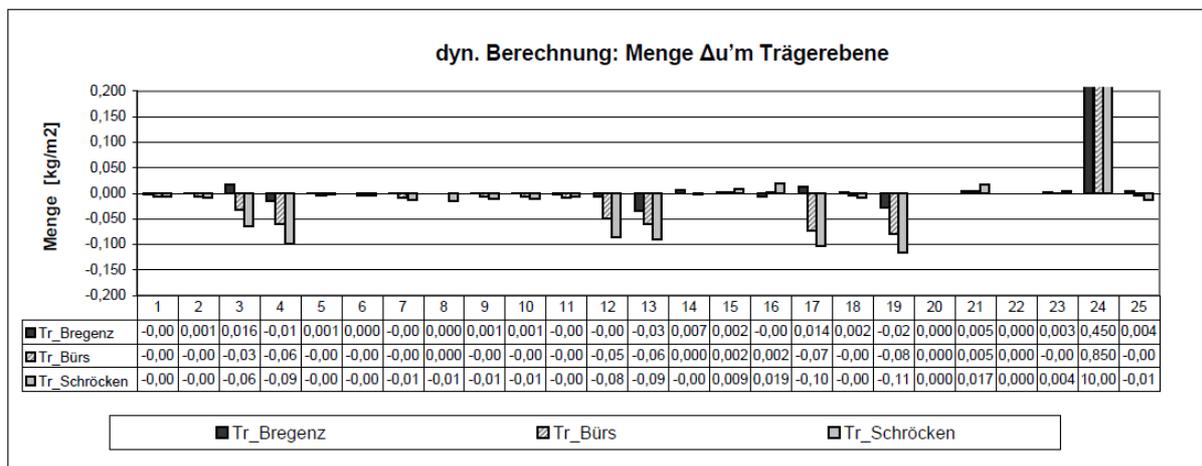
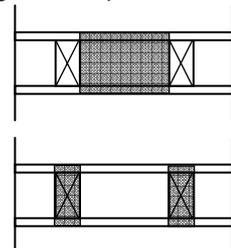


Diagramm 4.20: Veränderung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u'_m$  für die Trägerebene (Berechnung mit WUFI)

Es wurde bereits festgehalten, dass für den Standort Bregenz bei einer größeren Anzahl der untersuchten Bauteilaufbauten ein ansteigender Gesamtwassergehalt ermittelt wurde als für die Standorte Bürs und Schröcken. Bei der Untersuchung der Höhe der Veränderung konnte festgestellt werden, dass der Gesamtwassergehalt für den Standort Bregenz auch stärker zunimmt als für Bürs und Schröcken.

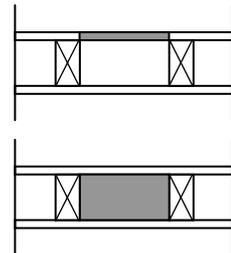


Für den Standort Bregenz weisen nur halb so viele Bauteilaufbauten einen abnehmenden Gesamtwassergehalt auf wie für Bürs oder Schröcken. Für die Bauteilaufbauten mit abnehmendem Gesamtwassergehalt für Bürs und Schröcken liegt außerdem eine stärkere Abnahme des Gesamtwassergehaltes vor als für die Bauteilaufbauten mit abnehmendem Gesamtwassergehalt für Bregenz.

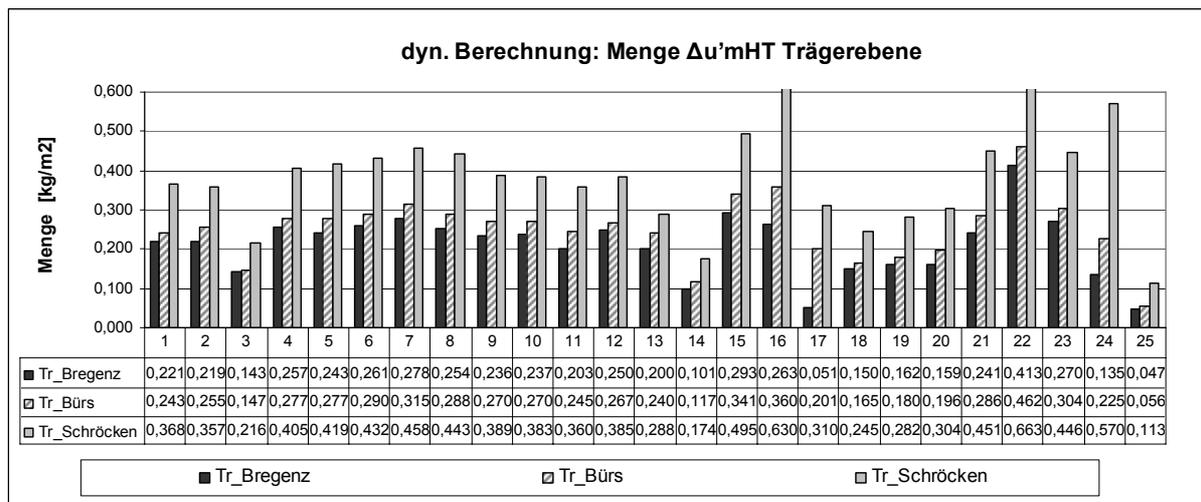
Bauteilaufbau Nr. 24 zeigt gegenüber den anderen Aufbauten einen extremen Anstieg des Gesamtwassergehaltes. Für diesen Aufbau steigt der Gesamtwassergehalt in Bürs stärker an als in Bregenz. Für Schröcken ist ein noch höherer Anstieg des Gesamtwassergehaltes zu vermerken. Das außergewöhnliche Verhalten dieses Bauteilaufbaus ist auf seine offene Dampfbremse zurückzuführen. (Einbausituation: unbeheizter Raum, siehe Kapitel 2.4)

**Veränderung des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u'_{m,HD}$  und der Dämmung  $\Delta u'_{m,D}$**

Die Berechnungsergebnisse der Veränderung des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u'_{m,HD}$  und der Veränderung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u'_{m,D}$  zeigen die gleichen Tendenzen wie die Ergebnisse für den Gesamtwassergehalt und werden nicht gesondert besprochen.



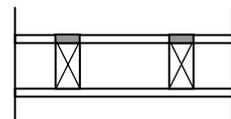
**Veränderung des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Trägerebene  $\Delta u'_{m,HT}$**



**Diagramm 4.21: Veränderung des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Trägerebene  $\Delta u'_{m,HT}$  (Berechnung mit WUFI)**

Das Verhalten der Holzschalung in der Trägerebene unterscheidet sich wesentlich von den Ergebnissen für die Holzschalung in der Dämmebene: Für die Trägerebene wurde bei allen Bauteilaufbauten für die untersuchten Klimastandorte ein Anstieg der  $\Delta u'_{m,HT}$  festgestellt.

Außerdem ist für die Holzschalung in der Trägerebene der Anstieg des Wassergehaltes für den Standort Schröcken höher als für den Standort Bürs – und für Bürs höher als für Bregenz. Für die Holzschalung in der Dämmebene wurde das Gegenteil festgestellt.



Ein weiterer Unterschied der  $\Delta u'_{m,HT}$  und der  $\Delta u'_{m,HD}$  liegt in der Höhe des Anstiegs des Wassergehaltes:

Für die Holzschalung in der Dämmebene liegt der Mittelwert der  $\Delta u'_{m,HD}$  zwischen  $0,040 \text{ kg/m}^2$  (Schröcken) und  $0,024 \text{ kg/m}^2$  (Bregenz). Für die Holzschalung in der Trägerebene liegt der Mittelwert der  $\Delta u'_{m,HT}$  für Bregenz bei  $0,211 \text{ kg/m}^2$ , für Bürs bei  $0,251 \text{ kg/m}^2$  und für Schröcken auf  $0,383 \text{ kg/m}^2$ . Der Anstieg der  $\Delta u'_{m,HT}$  ist bedeutend höher als der Anstieg der  $\Delta u'_{m,HD}$ .

Veränderung des Wassergehaltes des Trägers  $\Delta u'_{m,T}$

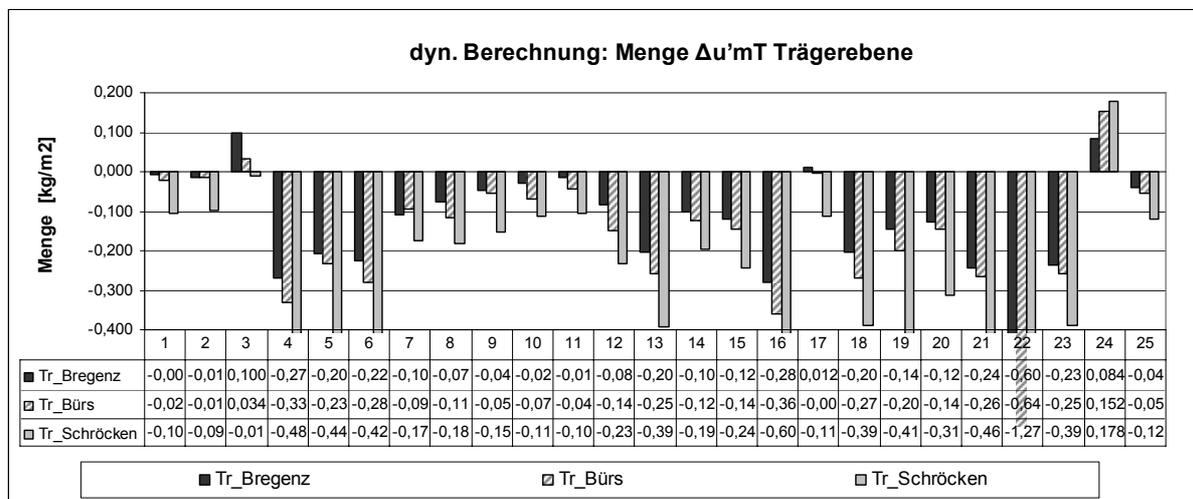
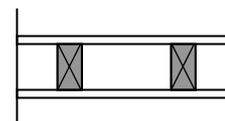


Diagramm 4.22: Veränderung des Wassergehaltes des Trägers  $\Delta u'_{m,T}$  (Berechnung mit WUFI)

Der Wassergehalt des Trägers ist für den Großteil der untersuchten Bauteilaufbauten in allen untersuchten Klimastandorten abnehmend. Die Abnahme ist für den Standort Schröcken höher als für Bürs – für Bürs höher als für Bregenz. Dies entspricht der Verteilung des Gesamtwassergehaltes.



**Zusammenfassung Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre**

Durch die Beurteilung der Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre können Tendenzen für das Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten für längere Zeiträume abgelesen werden.

Es zeigt sich, dass für den Standort Bregenz ein Anstieg des Gesamtwassergehaltes häufiger auftritt als für die Standorte Bürs und Schröcken.

Dies entspricht nicht dem ursprünglich erwarteten Ergebnis. Im Normalfall (vor allem bei Glaserberechnungen und Klimabedingungen nach ÖNORM) wird davon ausgegangen, dass höher gelegene Orte ein kühleres Klima und damit eine höhere Feuchteansammlung im Bauteilaufbau mit sich bringen.

(Siehe Ergebnisse der Glaserberechnung mit Klimabedingungen lt. ÖNORM B 8110-2)

Bei der dynamischen Berechnung mit WUFI werden aber als Klimabedingungen nicht nur die Außenlufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit berücksichtigt, sondern auch Wind- und Strahlungsdaten. Um zu analysieren, welcher dieser Faktoren die unterschiedlichen Ergebnisse bewirkt, werden die Klimadaten in Kapitel 4.3.1.5 verglichen.

### 4.3.1.2 Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf $\Delta u_m$

Die Anforderungen an den Feuchteschutz lt. ÖNORM B 8110-2 schreiben für die Glaserberechnung eine maximale Kondenswassermenge und einen maximalen Anstieg des Wassergehaltes der Materialien vor. Die Glaserberechnung berücksichtigt 12 Monate/ein Jahr. Für die Berechnung mit WUFI wird dieser Anstieg des Wassergehaltes in der Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf  $\Delta u_m$  dargestellt. Im Gegensatz zur Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre  $\Delta u'_m$  wird für die Schwankung  $\Delta u_m$  nur das Verhalten des Wassergehaltes für ein Jahr berücksichtigt (siehe Kapitel 2.3).

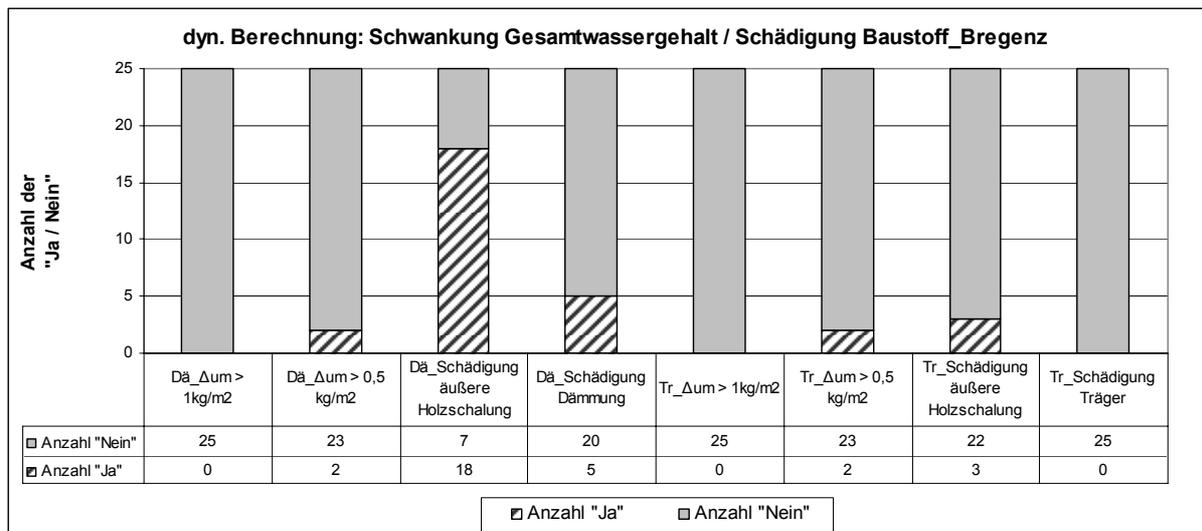


Diagramm 4.23: Schwankung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u_m$ , Schädigung der Materialien für den Standort Bregenz (Berechnung mit WUFI)

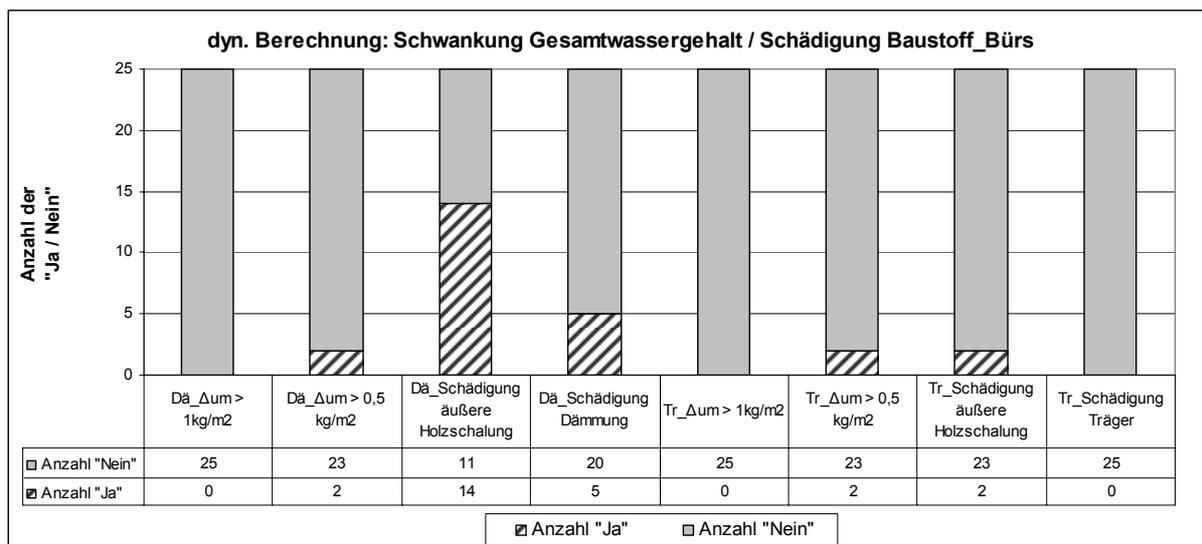
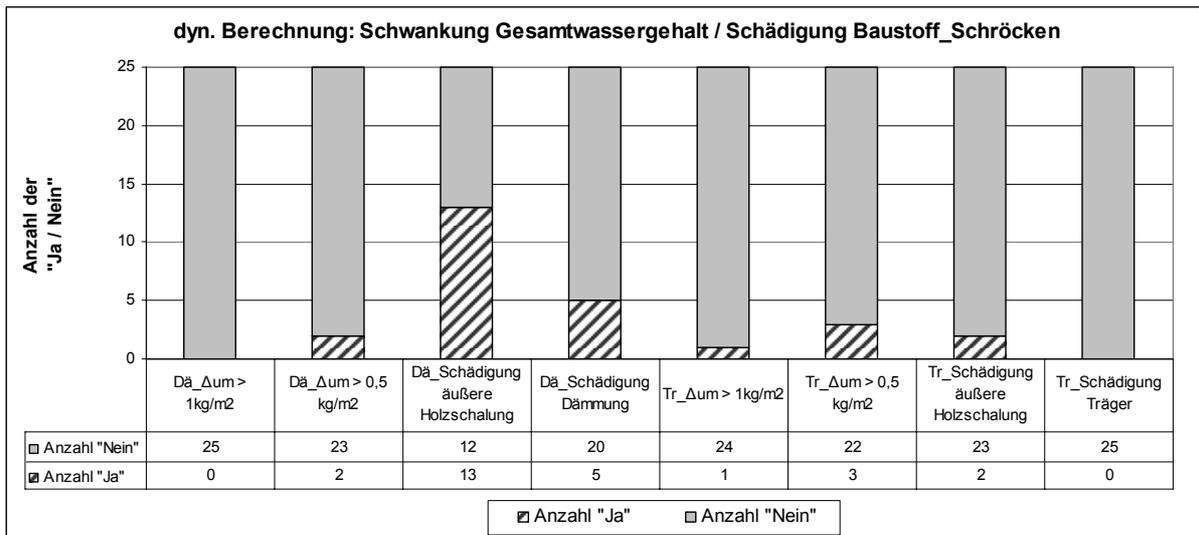


Diagramm 4.24: Schwankung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u_m$ , Schädigung der Materialien für den Standort Bürs (Berechnung mit WUFI)



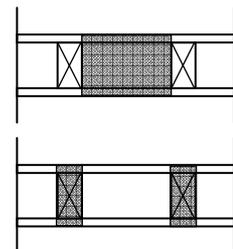
**Diagramm 4.25: Schwankung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u_m$ , Schädigung der Materialien für den Standort Schröcken (Berechnung mit WUFI)**

#### $\Delta u_m > 1,0 \text{ kg/m}^2/\text{a}$

Gemäß DIN 4108-3 ist für die Glaserberechnung eine Kondenswassermenge bis zu  $1,0 \text{ kg/m}^2$  an kapillar wasseraufnahmefähigen Schichten zulässig. Als kapillar wasseraufnahmefähige Schichten gelten Holz, Holzwerkstoffe, Zellulosedämmung etc.

Bei der Berechnung mit WUFI wurde für die Dämmebene bei keinem der Bauteilaufbauten für die untersuchten Standorte eine Schwankung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u_m$  über  $1,0 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  ermittelt.

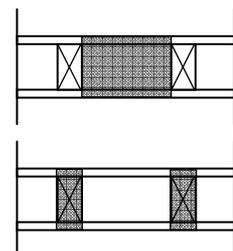
Für die Trägerebene wird der Grenzwert nur für den Standort Schröcken von einem Bauteilaufbau überschritten. Für die anderen Standorte liegen auch in der Trägerebene die Schwankungen der untersuchten Bauteilaufbauten unter dem Grenzwert.



#### $\Delta u_m > 0,5 \text{ kg/m}^2/\text{a}$

An kapillar nicht aufnahmefähigen Schichten gilt lt. ÖNORM B 8110-2 eine maximale Kondenswassermenge von  $0,5 \text{ kg/m}^2$ .

Beinahe alle untersuchten Bauteilaufbauten weisen für die ausgewählten Standorte in der Dämm- und Trägerebene eine Schwankung  $\Delta u_m$  unter  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  auf. Dies deutet auf eine grundsätzlich geringe Schwankung des Gesamtwassergehaltes hin.

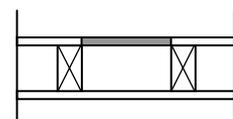


#### Schädigung der Holzschalung in der Dämmebene

Gemäß ÖNORM B 8110-2 tritt für Holz und Holzwerkstoffe eine Schädigung auf, sobald der massebezogene Feuchtigkeitsgehalt um mehr als 3% erhöht wird.

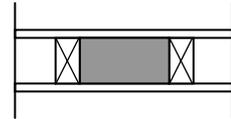
Für den Standort Bregenz wurde mit der WUFI-Berechnung bei einem Viertel mehr Bauteilaufbauten eine Schädigung der Holzschalung in der Dämmebene vorausgesagt als für die Standorte Bürs und Schröcken.

Für Bürs und Schröcken ergibt sich jeweils für etwas mehr als die Hälfte der untersuchten Aufbauten eine Schädigung der äußeren Holzschalung in der Dämmebene.



#### *Schädigung der Dämmung*

Die untersuchten Bauteilaufbauten weisen drei verschiedene Dämmmaterialien auf: Mineralwolle, Zellulose und EPS.

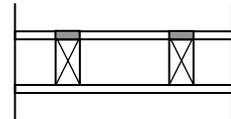


Für Mineralwolle und EPS werden von der Normung keine Grenzwerte der Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes vorgeschrieben. Zellulose wurde in dieser Arbeit als Holzwerkstoff eingestuft und somit der 3%-Regelung unterstellt (maximale Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes von 3%).

Für alle untersuchten Klimastandorte liegt bei jeweils fünf Bauteilaufbauten eine Schädigung der Dämmung vor. Diese fünf Schädigungsfälle entsprechen den fünf untersuchten Bauteilaufbauten mit Zelloosedämmung.

#### *Schädigung der Holzschalung in der Trägerebene*

Im vorangehenden Kapitel wurde das Verhalten des Wassergehaltes der Holzschalung über vier Jahre  $\Delta u'_{m,HT}$  untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass  $\Delta u'_{m,HT}$  bei allen untersuchten Bauteilaufbauten in den drei Klimastandorten ansteigt.



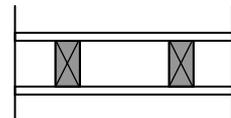
Bei der Beurteilung der Schwankung des Wassergehaltes  $\Delta u_{m,HT}$  zeigt sich aber nur für zwei (bzw. drei - für den Standort Bregenz) der untersuchten Bauteilaufbauten eine Schädigung der Holzschalung.

Die jährliche Schwankung des Wassergehaltes übersteigt also den Grenzwert lt. ÖNORM nur selten; über vier Jahre hinweg nimmt der Wassergehalt jedoch zu.

Um das Feuchteverhalten der Holzschalung beurteilen zu können, muss daher die Höhe der Schwankung und die daraus resultierenden massebezogenen Feuchtegehalte noch detaillierter untersucht werden.

#### *Schädigung des Trägers*

Für keinen der untersuchten Bauteilaufbauten wurde für die ausgewählten Klimastandorte eine Schädigung des Trägers nachgewiesen.



Höhe der Schwankung der Gesamtwassergehalte  $\Delta u_m$

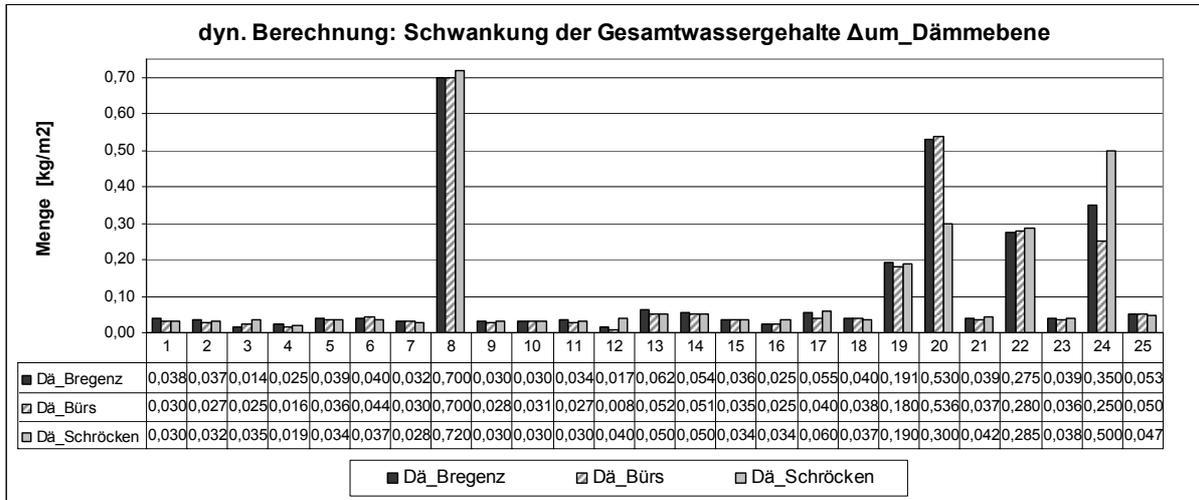


Diagramm 4.26: Schwankung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u_m$  für die Dämmebene (Berechnung mit WUFI)

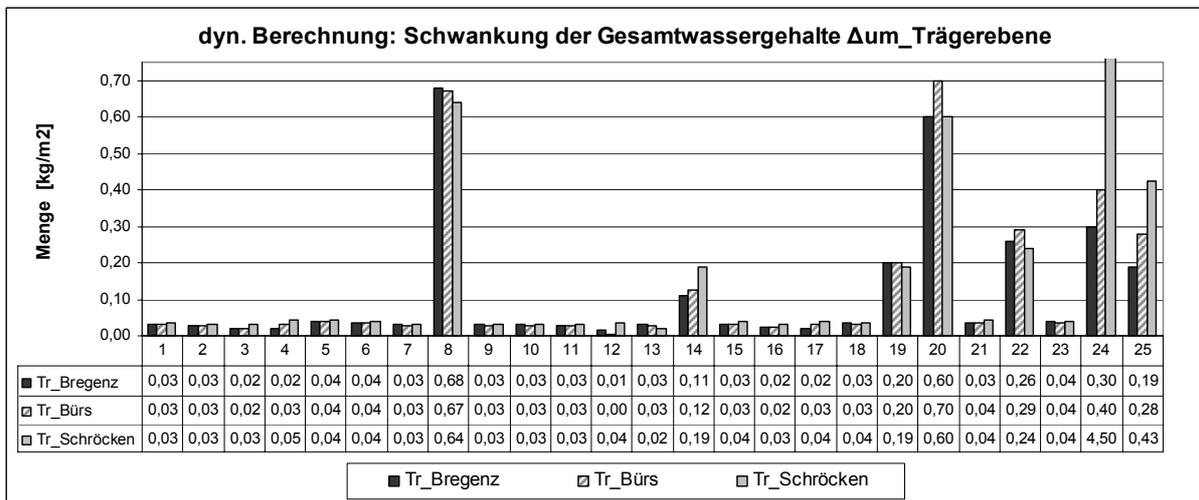
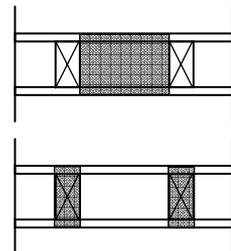


Diagramm 4.27: Schwankung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u_m$  für die Trägerebene (Berechnung mit WUFI)

Es wurde bereits festgestellt, dass die Schwankung des Gesamtwassergehaltes für den Großteil der Aufbauten unter  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  liegt.

Die Höhe der Schwankung der Gesamtwassergehalte liegt in der Dämmebene für 80% der untersuchten Bauteilaufbauten unter  $0,1 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  - in der Trägerebene gilt dies für mehr als 70% der Bauteilaufbauten.

Die höheren Schwankungen mancher Bauteilaufbauten sind auf folgende Umstände zurückzuführen: Bauteil Nr. 8 und Nr. 20 besitzen raumseitig der Dampfsperre Holzwoleleichtbauplatten, deren Wassergehalt stark schwankt und den Gesamtwassergehalt so beeinflussen. Bauteilaufbau Nr. 22 weist raumseitig der Dampfsperre eine OSB-Platte auf, deren Wassergehalt stark schwankt. Und die Schwankung des Gesamtwassergehaltes der Bauteilaufbauten Nr. 14 und Nr. 25 ist auf die raumseitig der Dampfsperre angeordnete Mineralwolle dämmung in der Installationsebene zurückzuführen.



Ein Vergleich der Schwankungen der Gesamtwassergehalte für die untersuchten Standorte ergibt keine eindeutigen Unterschiede.

Bei den meisten untersuchten Bauteilaufbauten ergeben sich für alle drei Standorte ähnliche Schwankungen des Gesamtwassergehaltes.

Das zeigt auch der Vergleich der Mittelwerte der Schwankung des Gesamtwassergehaltes: Für Bregenz liegt die Schwankung des Gesamtwassergehaltes in der Dämmebene im Mittel bei  $0,111 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ , für Bürs bei  $0,104 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  und für Schröcken bei  $0,109 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ .

Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u_{m,HD}$

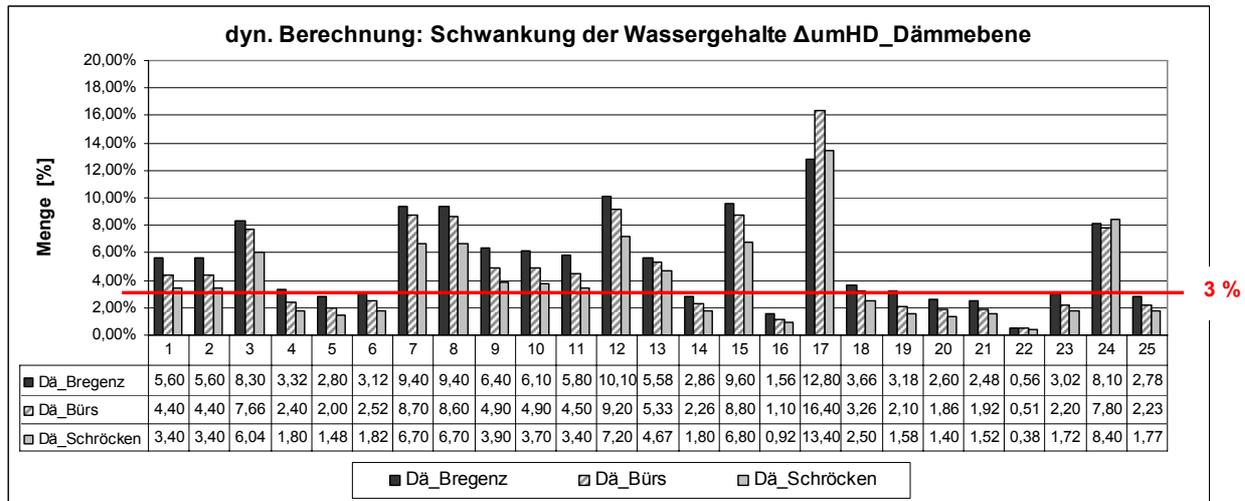
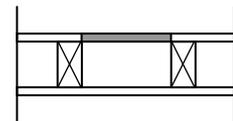


Diagramm 4.28: Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u_{m,HD}$  (Berechnung mit WUFI)

Für den Standort Bregenz ergibt sich in der Dämmebene bei 92% der untersuchten Bauteilaufbauten eine höhere Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung als für Bürs.

Für Bürs ist die Schwankung im Jahresverlauf bei 96% der Bauteilaufbauten höher als für den Standort Schröcken.

Der Großteil der Aufbauten zeigt für Schröcken die niedrigste  $\Delta u_{m,HD}$  – für Bregenz die höchste.



Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Trägerebene  $\Delta u_{m,HT}$

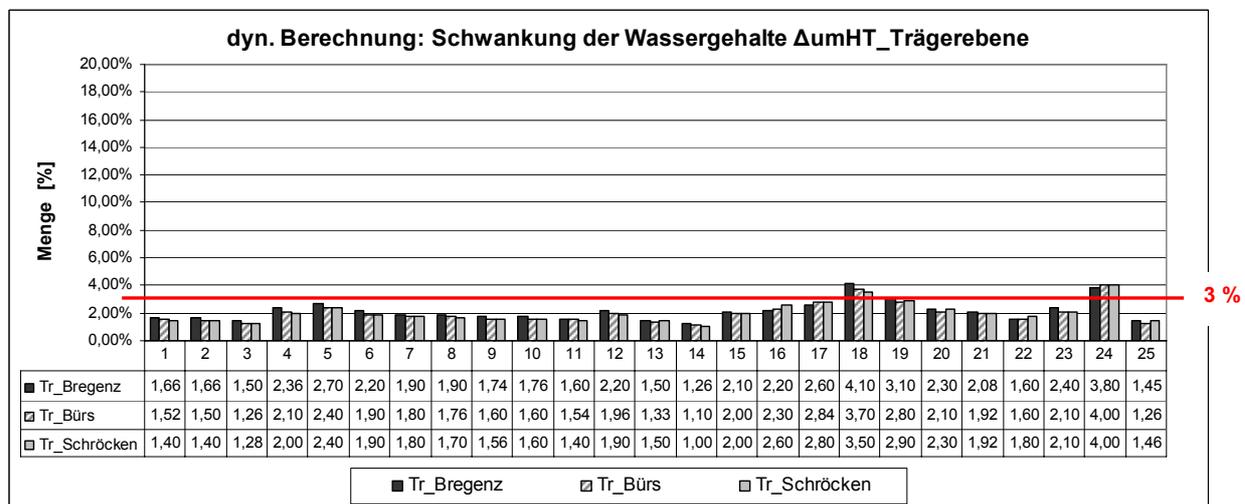
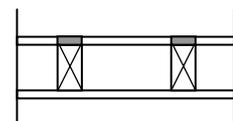


Diagramm 4.29: Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Trägerebene  $\Delta u_{m,HT}$  (Berechnung mit WUFI)

Die Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Trägerebene weist in den drei untersuchten Klimastandorten ähnliche Werte auf: Der Mittelwert der Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Trägerebene liegt für Bregenz bei 2,15%, für Bürs bei 2,00% und für Schröcken bei 2,01%.



Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u_{m,D}$

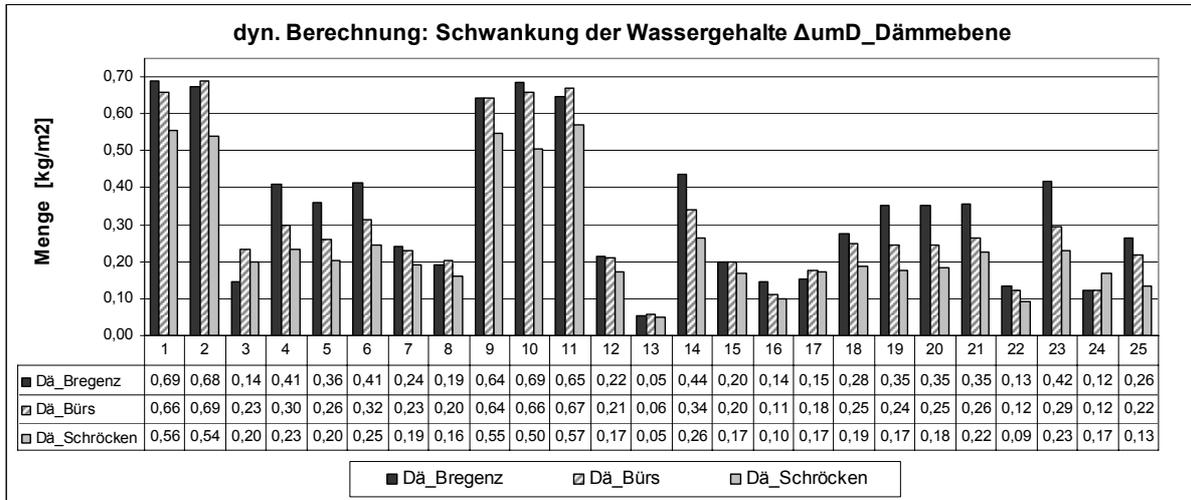
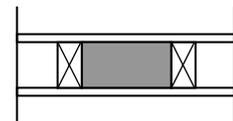


Diagramm 4.30: Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u_{m,D}$  (Berechnung mit WUFI)

Die Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u_{m,D}$  zeigt wie die Schwankung der Holzschalung in der Dämmebene für den Standort Bregenz höhere Werte wie für Bürs – für Bürs wiederum höhere Werte wie für Schröcken: Im Mittel beträgt die Schwankung der Dämmung für Bregenz  $0,343 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ , für Bürs liegt der Mittelwert niedriger bei  $0,309 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  und für Schröcken bei  $0,251 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ .



Zusammenfassung Schwankung  $\Delta u_m$

Im vorigen Kapitel wurde für das Verhalten der Wassergehalte über vier Jahre  $\Delta u'_m$  ein klarer Unterschied zwischen den Klimastandorten festgestellt: Es zeigte sich, dass die Wassergehalte für den Standort Bregenz vermehrt dazu neigen über den Zeitraum von vier Jahren anzusteigen. Für die höherliegenden Klimastandorte Bürs und Schröcken ergeben sich bei einer größeren Anzahl der Bauteilaufbauten über vier Jahre hinweg abnehmende Wassergehalte (siehe Kapitel 4.3.1.1).

Für die Ergebnisse der Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf  $\Delta u_m$  kann kein großer Unterschied zwischen den Klimastandorten festgestellt werden.

Nur die Holzschalung in der Dämmebene und die Dämmung zeigen unterschiedliche Schwankungshöhen für die untersuchten Klimastandorte.

Die Schwankung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u_m$  in der Dämmebene und der Wassergehalte der Trägerebene ( $\Delta u_m$ ,  $\Delta u_{mT}$ ,  $\Delta u_{m,HT}$ ) weist keine nennenswerten Unterschiede zwischen den untersuchten Standorten auf.

Die Schwankung der Gesamtwassergehalte erfüllt für die meisten der untersuchten Bauteilaufbauten die Anforderungen lt. ÖNORM B 8110-2. Auch die Schwankung der Wassergehalte der Dämmung, des Trägers und der Holzschalung in der Trägerebene liegt meist unter den Grenzwerten gemäß Norm.

Aber die Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u_{mHD}$  übersteigt für eine Vielzahl der Bauteilaufbauten den Maximalwert lt. ÖNORM B 8110-2.

Es wurde versucht, die Schwankung der Wassergehalte nach den Grenzwerten lt. ÖNORM und DIN zu beurteilen. Diese Grenzwerte wurden für die Bewertung der Glaserberechnung eingeführt. Zur Bewertung der Ergebnisse der WUFI-Berechnung sind auch andere Parameter zu betrachten: Neben der Beurteilung der Schwankung nach Anforderungen gemäß den Normen müssen auch die restlichen untersuchten Parameter berücksichtigt werden – siehe: Anstieg des Wassergehaltes über vier Jahre, maximaler massebezogener Feuchtegehalt und hygrothermische Zustände.

### 4.3.1.3 Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-%

Für die Berechnung mit WUFI wurde der massebezogene Feuchtegehalt der Holzbauteile zu Beginn der Rechnung auf 15 M-% festgelegt.

Als Höchstwert des massebezogenen Feuchtegehaltes von Unterkonstruktionen zum Zeitpunkt des Einbaus wird in den ÖNORMen B 2215, B 2217 und B 2320 18 M-% angegeben.

Ab einer Holzfeuchte von mehr als 20 M-% ist lt. ÖNORM EN 335-1 die Entwicklung holzzerstörerischer Pilze möglich.

Außerdem ist der Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeit zu beachten (siehe Kapitel 1.2.2.3).

#### Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% der Holzschalung in der Dämmebene

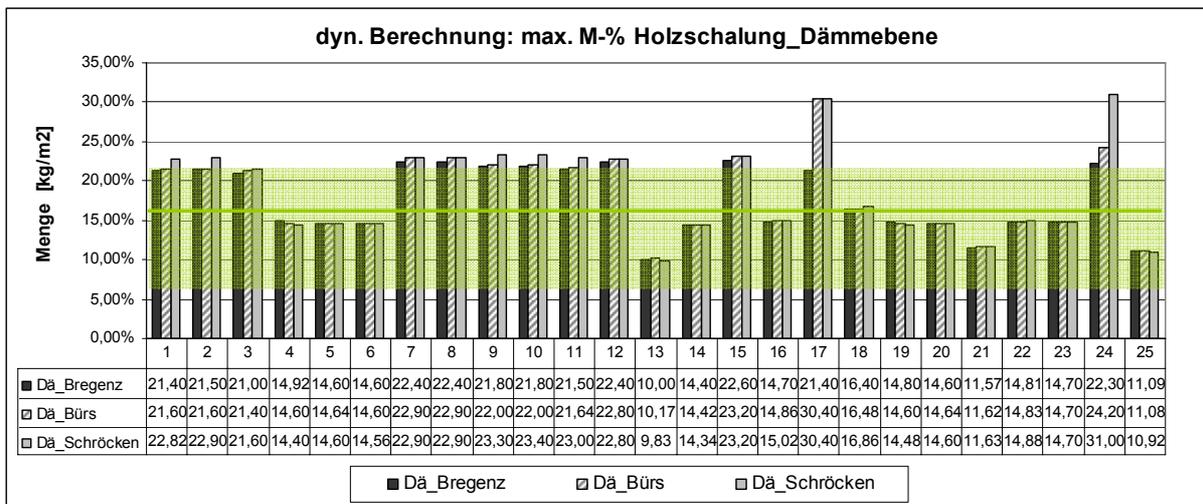
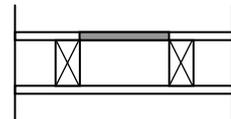


Diagramm 4.31: Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% der Holzschalung in der Dämmebene (Berechnung mit WUFI)

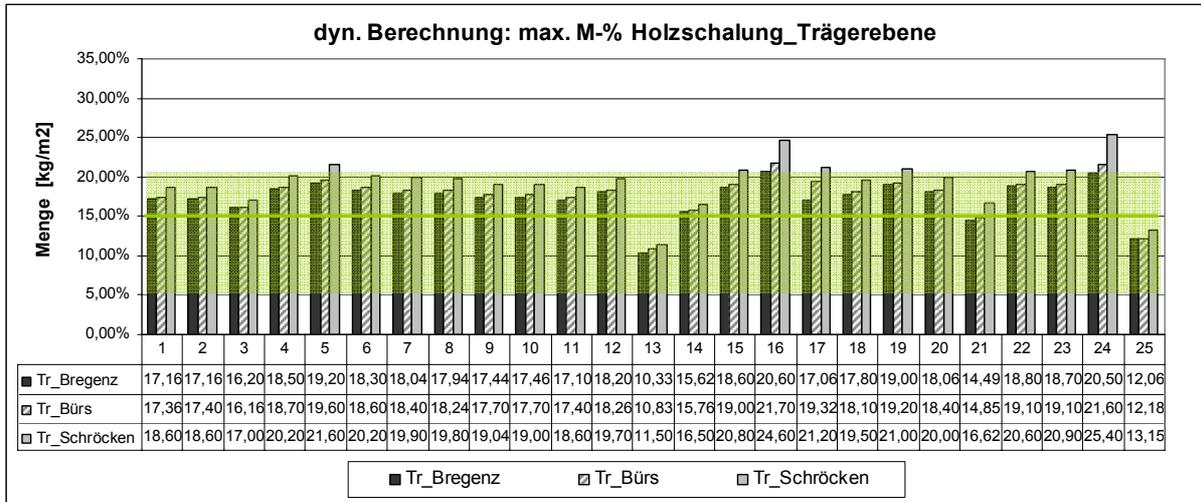
Es wurde für ungefähr die Hälfte der untersuchten Bauteilaufbauten ein maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% der Holzschalung der Dämmebene über 20 M-% ermittelt.

Tendenziell liegt der max. M-% der Holzschalung für Schröcken höher als für Bürs, für Bürs wiederum höher als für Bregenz.

Der Unterschied des max. M-% zwischen den Standorten ist für die meisten der untersuchten Bauteilaufbauten aber nur gering: Die Holzschalung der Dämmebene weist für Bregenz im Mittel einen maximalen massebezogenen Feuchtegehalt M-% von 17,75 M-% auf, für Bürs 18,31 M-% und für Schröcken 18,84 M-%.



**Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% der Holzschalung in der Trägerebene**



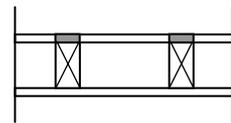
**Diagramm 4.32: Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% der Holzschalung in der Trägerebene (Berechnung mit WUFI)**

Für die Holzschalung der Trägerebene zeigt sich ein größerer standortabhängiger Unterschied des massebezogenen Feuchtegehaltes als für die Holzschalung der Dämmebene.

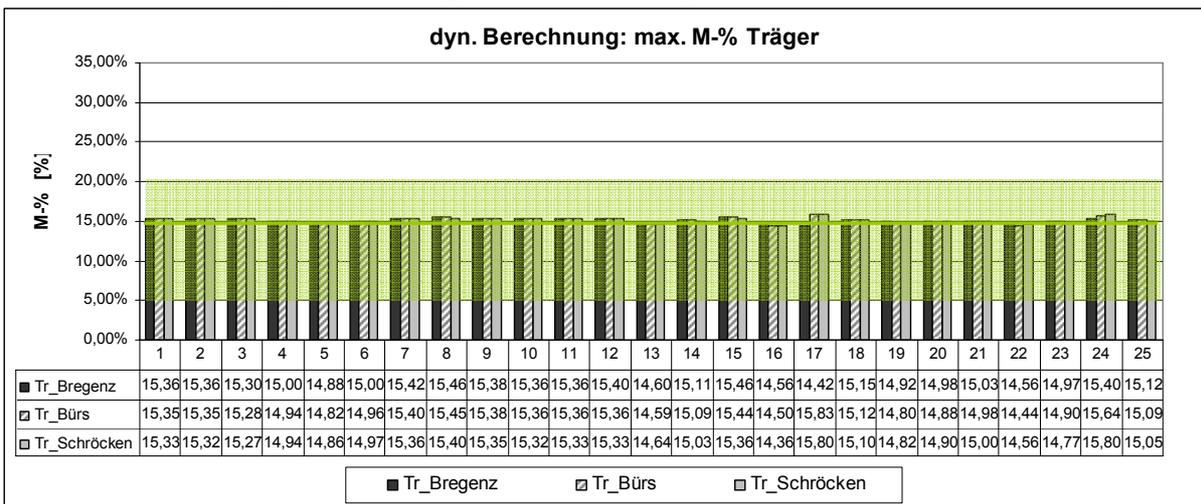
Die Standorte Bregenz und Bürs weisen nur einen geringen Unterschied für den max. M-% der Holzschalung auf - der Mittelwert für Bürs liegt mit 17,79 M-% um nur 0,5 M-% höher als der Mittelwert für Bregenz.

Für Schröcken wurde ein Mittelwert von 19,36 M-% des maximalen massebezogenen Feuchtegehaltes M-% der äußeren Holzschalung in der Trägerebene ermittelt.

Zwischen den Standorten Bregenz und Schröcken ergibt sich für den max. M-% ein mittlerer Unterschied von 2 M-%.

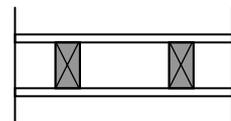


**Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% des Trägers**



**Diagramm 4.33: Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% des Trägers (Berechnung mit WUFI)**

Der massebezogene Feuchtegehalt des Trägers weist für die drei untersuchten Klimastandorte ähnliche Ergebnisdaten auf.



**Zusammenfassung M-%**

Die Differenz des massebezogenen Feuchtegehaltes der Holzbauteile zwischen den Standorten ist sehr gering.

Nur die Holzschalung in der Trägerebene lässt einen signifikant höheren M-% für den Standort Schröcken gegenüber den Standorten Bürs und Bregenz erkennen.

### 4.3.1.4 Hygrothermische Zustände

Die Schädigung von Holzbaustoffen durch Pilzwachstum ist nicht nur von der Holzfeuchte bzw. der Luftfeuchtigkeit abhängig sondern auch von der Temperatur.

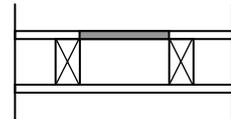
Um das Zusammentreffen der zum Pilzwachstum notwendigen Feuchte- und Temperaturbedingungen auswerten zu können, generiert WUFI ein Diagramm mit den hygrothermischen Zuständen an definierten Zonen im Bauteilaufbau.

Sedlbauer führt für dieses Diagramm die Grenzisoplethe LIM B II ein, über der das Pilzwachstum für den Baustoff Holz möglich ist (Sedlbauer 2001).

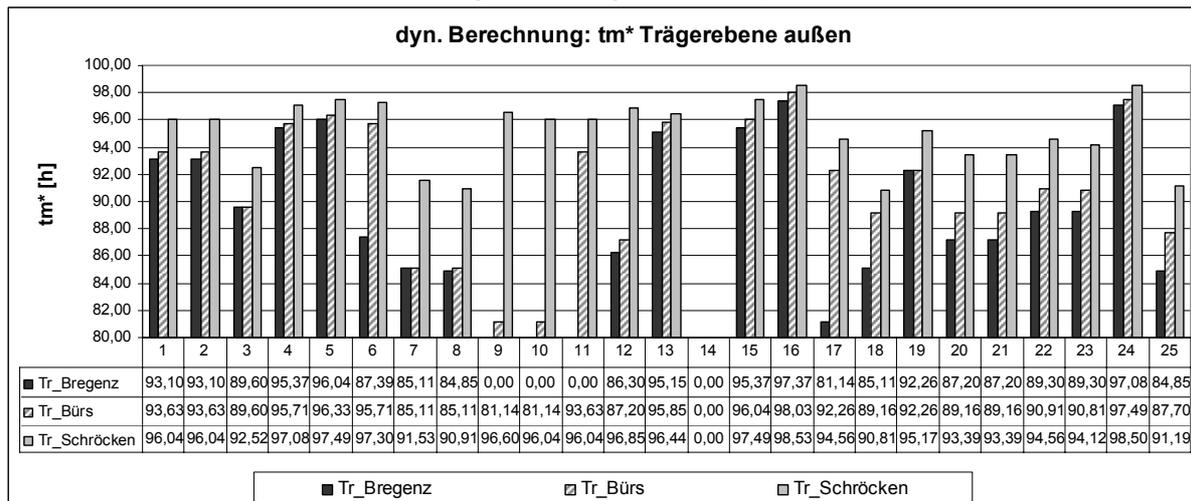
Mithilfe der hygrothermischen Ergebnisdaten wurden  $t_m$  und  $t_v$  für die ungünstigsten Fälle über LIM B II nach dem Modell von Hukka und Viitanen (Viitanen 2001) berechnet. Wobei  $t_m$  die Zeitdauer bis zum Erreichen von Mould-Index 1 (geringes Wachstum, nur unter dem Mikroskop sichtbar) ist und  $t_v$  die Zeitdauer darstellt bis das erste Myzelwachstum mit freiem Auge sichtbar wird (Viitanen 2001). (siehe Kapitel 1.2.2.5)

#### Außen- und Innenseite der Holzschalung in der Dämmebene – $t_v$ , $t_m$

Die Auswertung von  $t_v$  und  $t_m$  an der Außen- und Innenseite der Holzschalung in der Dämmebene ergibt keine nennenswerten Unterschiede für die untersuchten Klimastandorte.



#### Außen- und Innenseite der Holzschalung in der Trägerebene - $t_m$

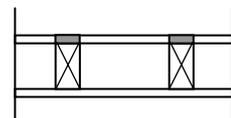


**Diagramm 4.34:**  $t_m^*$  an der Außenseite der Holzschalung in der Trägerebene ( $t_m^* = 100h - t_m$ . Die Darstellung von  $t_m$  als  $t_m^*$  wurde gewählt, um eine leichtere Lesbarkeit der Grafik zu gewährleisten: Je höher  $t_m^*$ , desto kürzer  $t_m$  und desto wahrscheinlicher ein Pilzbefall.)

Für den Standort Schröcken weist  $t_m$  an der Außen- und an der Innenseite der Holzschalung eine kürzere Dauer auf, als für den Standort Bürs.

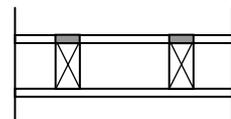
Für Bürs wurde eine kürzere Zeitdauer  $t_m$  ermittelt als für Bregenz, wobei die Differenz der beiden Werte geringer ist als zwischen Schröcken und Bürs:

Im Mittel ist das Myzelwachstum an der Außenseite der Holzschalung für den Standort Schröcken nach 4,89 h, für Bürs nach 8,32 h und für Bregenz nach 9,74 h unter dem Mikroskop sichtbar.



#### Außen- und Innenseite der Holzschalung in der Trägerebene – $t_v$

Für  $t_v$  ergeben sich längere Zeitdauern als für  $t_m$ . Die Tendenz der kürzeren Zeitdauer für den Standort Schröcken zeigt sich in den Ergebnisdaten für  $t_v$  aber in gleicher Weise wie für  $t_m$ .



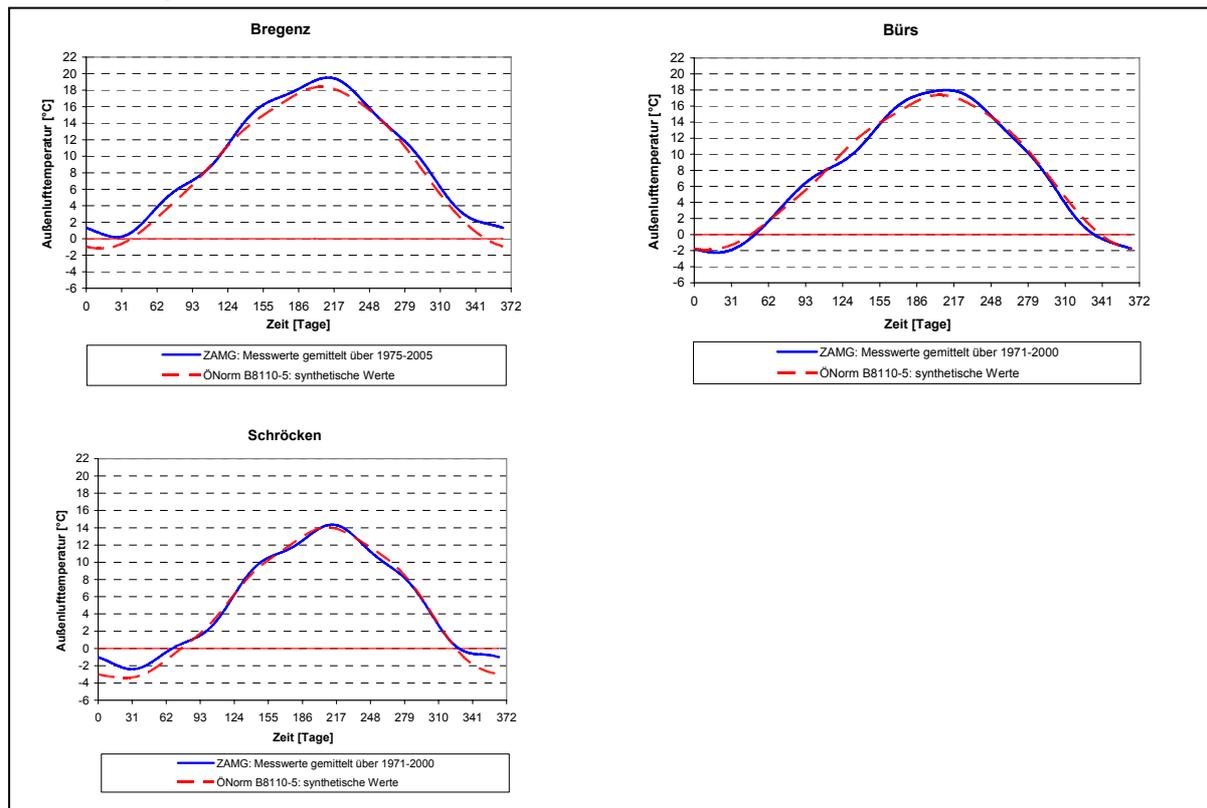
#### Zusammenfassung hygrothermische Zustände

Ein klimabeeinflusster Unterschied der Zeit  $t_m$  und  $t_v$  tritt nur für die Holzschalung in der Trägerebene auf. Die Holzschalung in der Dämmebene zeigt an den untersuchten Standorte ähnliche Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze.

### 4.3.1.5 Vergleich der Klimadaten

Der dynamischen Berechnung mit WUFI werden stündliche Werte der Außenlufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit, der Wind und Strahlungsdaten zugrunde gelegt. Die Werte für die Berechnungen in dieser Arbeit wurden von Prof. Krec als halbsynthetischer Klimadatensatz generiert, der auf langjährigen Monatsmittelwerten basiert. (siehe Kapitel 2.2.1). Der Vergleich der langjährigen Monatsmittelwerte der Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken soll Aufschluss über die Ursache der unterschiedlichen Berechnungsergebnisse geben.

#### Außenlufttemperatur



**Diagramm 4.35:** Langjährige Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur und Außenlufttemperaturen nach ÖNORM B 8110-5 für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken. Die Monatsmittelwerte werden mittels einer Fourier-Kontinuierung in geglätteten Verläufen dargestellt (Heindl, Kre Kreč 1985). In Anhang B sind die oben dargestellten Diagramme in voller Größe angeführt.

Die langjährigen Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur zeigen für die drei untersuchten Standorte ähnliche Unterschiede wie die gemäß ÖNORM ermittelten mittleren Monatswerte der Außenlufttemperatur: Für den Klimastandort Bregenz herrscht in allen Monaten eine höhere Lufttemperatur als in Bürs. Die langjährigen Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur in Schröcken liegt tiefer als in Bürs und Bregenz.

Diese Unterschiede der langjährigen Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur würden durch die höheren Temperaturen in Bregenz für diesen Klimastandort eine geringere Feuchteansammlung bzw. höhere Austrocknungsbereitschaft der untersuchten Bauteilaufbauten bedeuten.

Die Ursache für die hohe Austrocknungsbereitschaft der untersuchten Bauteilaufbauten für den Standort Bürs ist daher in anderen Klimaparametern zu suchen.

Relative Luftfeuchtigkeit

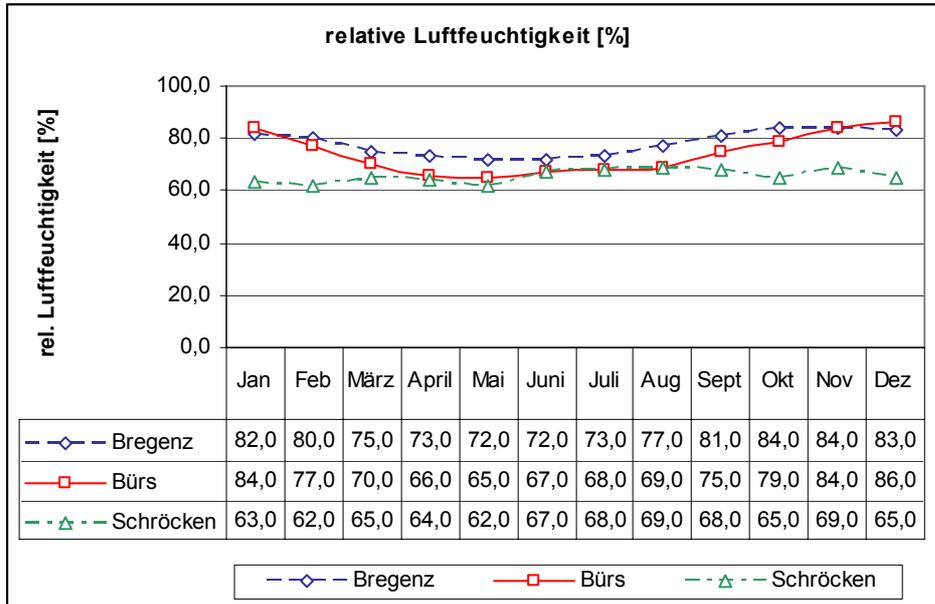


Diagramm 4.36: Langjährige Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken.

Beim Vergleich der langjährigen Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit der Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken zeigt sich, dass in Bürs in den Wintermonaten ähnliche Werte der Luftfeuchtigkeit auftreten wie in Bregenz. In den Sommermonaten ähneln die Werte von Bürs wiederum der relativen Luftfeuchtigkeit von Schröcken.

In Schröcken liegt das langjährige Mittel der relativen Luftfeuchtigkeit in allen Monaten unter der relativen Luftfeuchtigkeit in Bregenz.

Tagessummen der Globalstrahlung

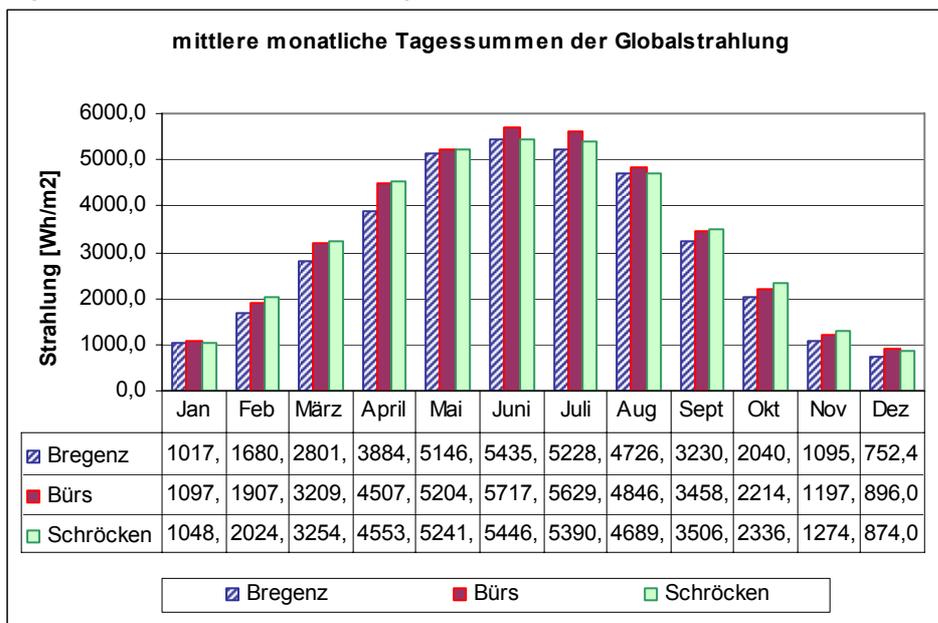


Diagramm 4.37: Langjährige Monatsmittelwerte der Tagessummen der Globalstrahlung für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken.

**Fortsetzung: Tagessummen der Globalstrahlung**

Für den Standort Bürs fallen in allen Monaten höhere langjährige Monatsmittelwerte der Tagessummen der Globalstrahlung an als für den Standort Bregenz. In den Monaten Juni, Juli und August herrscht für die drei Standorte in Bürs die höchste mittlere Energiezufuhr durch Sonneneinstrahlung pro Tag.

Auch der Standort Schröcken zeigt in allen Monaten – außer August – höhere mittlere monatliche Tagessummen der Globalstrahlung als Bregenz. Gegenüber Bürs fallen in Schröcken in den Wintermonaten höhere langjährige Monatsmittelwerte der Globalstrahlung an, in den Sommermonaten dagegen sind die langjährigen Mittelwerte der Tagessummen der direkten Sonneneinstrahlung niedriger als in Bürs – im August sogar niedriger als in Bregenz.

**Tagessummen der Himmelsstrahlung**

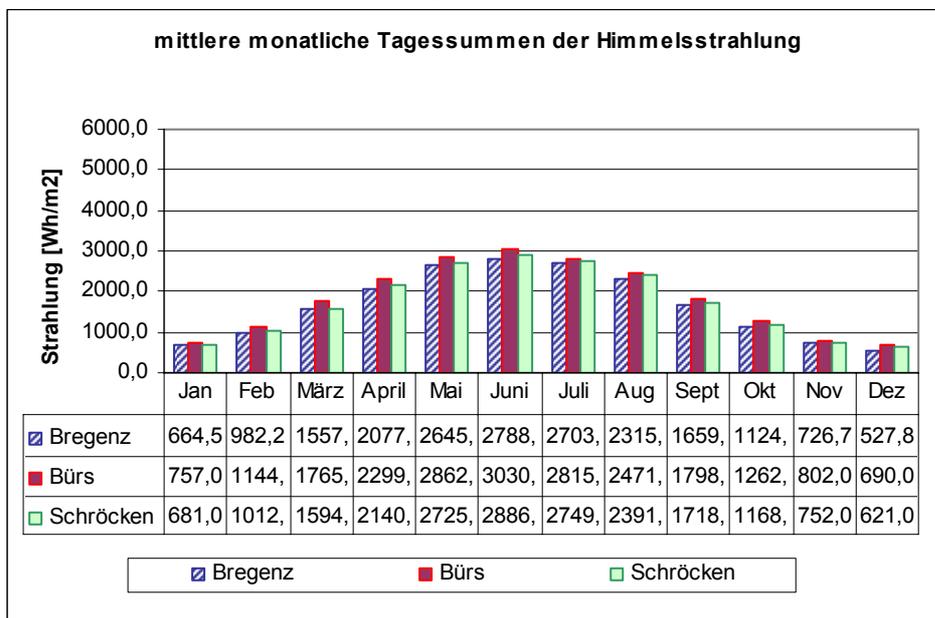


Diagramm 4.38: Langjährige Monatsmittelwerte der Tagessummen der Himmelsstrahlung für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken.

Für die diffuse Himmelsstrahlung weist Bürs von den drei Standorten in allen Monaten die höchsten langjährigen Monatsmittelwerte der Tagessummen auf. In Schröcken liegt der langjährige Mittelwert des Energieeintrag durch diffuse Strahlung pro Tag in allen Monaten höher als in Bregenz.

**Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlag**

Die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung und der Niederschlag gehen nicht in die Rechnung ein, weil ohne windabhängigem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten und ohne Regenwasserabsorption gerechnet wurde.

**Zusammenfassung zum Vergleich der Klimadaten**

Die Ursache zu den in der dynamischen Berechnung mit WUFI ermittelten Unterschieden in den Berechnungsergebnissen der drei Standorte ist in den Klimadaten zu suchen.

Vor allem die Werte der Strahlung – Globalstrahlung und Himmelsstrahlung – liegen für den Standort Bürs höher als für Bregenz und Schröcken und können das für Bürs höhere Austrocknungspotential der untersuchten Bauteilaufbauten bewirken.

#### 4.3.1.6 Zusammenfassung der Untersuchung der Klimastandorte

Beim Vergleich der Ergebnisdaten für die untersuchten Standorte fallen vor allem zwei Punkte auf:

1. *Der Unterschied zwischen  $\Delta u'_m$  für Bregenz und Bürs bzw. Schröcken*

Der eingeführte Wert  $\Delta u'_m$  charakterisiert das Verhalten des Wassergehaltes über einen längeren Zeitraum.

Lt. ÖNORM B 8110-2 muss unter anderem die Kondensatmenge geringer oder maximal gleich hoch sein wie die Verdunstungsmenge. Diese Forderung gilt für die Berechnung der Kondensatmenge nach Glaser, die nur für ein Jahr durchgeführt wird.

Bei der Berechnung mit WUFI wurde das Feuchteverhalten der Bauteile über fünf Jahre simuliert. So kann es für die Berechnungsergebnisse von WUFI vorkommen, dass der Wassergehalt einer geringen jährlichen Schwankung unterliegt, aber über einen längeren Zeitraum hinweg kontinuierlich ansteigt.

Bei Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Standorte wurde einerseits festgestellt, dass die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf für die drei Standorte keinen nennenswerten Unterschied aufweist.

Andererseits wurde aber für den Standort Bregenz ein im Durchschnitt höherer Anstieg des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre  $\Delta u'_m$  nachgewiesen wie für die Standorte Bürs und Schröcken.

Da als einzige unterschiedliche Berechnungsparameter die Klimadaten eingegangen sind, wurde die Ursache zu den unterschiedlichen Ergebnissen in den Klimadaten gesucht:

Für den Standort Bürs zeigen sich höhere Werte der langjährigen Monatsmittelwerte der Tagessummen der Strahlung (Globalstrahlung und Himmelsstrahlung). Das höhere Austrocknungspotential der untersuchten Bauteilaufbauten für den Standort Bürs wird auf die höhere Strahlungsenergie zurückgeführt.

2. *Das feuchtetechnische Verhalten der äußeren Holzschalung in der Dämm- und Trägerebene*

Die äußere Holzschalung wird durch Feuchtigkeit und Veränderungen der Außentemperatur gegenüber den anderen Bauteilschichten am stärksten angegriffen.

Die Holzschalung in der *Dämmebene* weist für den Standort Bregenz eine höhere Tendenz zum Anstieg des Wassergehaltes  $\Delta u'_{m,HD}$  auf als für die Standorte Bürs und Schröcken.

Weiters fällt in der Dämmebene vor allem die hohe Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung im Jahresverlauf  $\Delta u_{m,HD}$  auf. Für den Standort Bregenz wurde eine höhere Schwankung ermittelt als für den Standort Bürs, für Bürs wiederum eine höhere Schwankung als für Schröcken.

In der *Trägerebene* zeigt sich ein Anstieg des Wassergehaltes der Holzschalung  $\Delta u'_{m,HT}$  in allen untersuchten Fällen für alle untersuchten Standorte. Der Anstieg  $\Delta u'_{m,HT}$  ist für den Standort Schröcken höher als für den Standort Bürs – für Bürs höher als für Bregenz.

Außerdem ergibt sich für die Holzschalung in der Trägerebene für den Standort Schröcken ein höherer massebezogener Feuchtegehalt  $M\%$  als für Bürs, für Bürs ist er höher als für Bregenz. Was für Schröcken auch kürzere Zeiten  $t_m$  und  $t_v$  bewirkt.

Während für die Holzschalung in der Dämmebene die Bedingungen in Bregenz am schlechtesten und Schröcken am besten sind, erweisen sich für die Holzschalung in der Trägerebene die Bedingungen in Schröcken am schlechtesten und Bregenz am vorteilhaftesten.

### 4.3.2 Vergleich Dämmebene und Trägerebene

Die Bauteilaufbauten wurden mit dem Programm WUFI jeweils eindimensional für die Dämmebene und für die Trägerebene berechnet.

Eventuelle wechselseitige Feuchteinflüsse an der Grenze zwischen Dämm- und Trägerebene werden in den Berechnungsergebnissen daher nicht abgebildet.

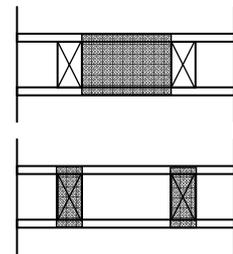
Im Folgenden soll ein Überblick über die Unterschiede im Feuchteverhalten von Dämm- und Trägerebene gegeben werden.

#### 4.3.2.1 Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre $\Delta u'_m$

Die Diagramme zu der nachfolgenden Diskussion sind auf Seite 56 und 57 zu finden (Diagramm 4.16, Diagramm 4.17, Diagramm 4.18)

##### *Verhalten des Gesamtwassergehaltes $\Delta u'_m$ der Dämmebene und der Trägerebene*

Die Dämmebene weist für alle untersuchten Standorte mehr Bauteilaufbauten mit ansteigendem Gesamtwassergehalt über vier Jahre auf als die Trägerebene. Für die Standorte Bürs und Schröcken ergeben sich für die Dämmebene jeweils ca. doppelt so viele Bauteilaufbauten mit ansteigender  $\Delta u'_m$  wie für die Trägerebene – für Bregenz wurden ein Viertel mehr Bauteilaufbauten mit ansteigender  $\Delta u'_m$  in der Dämmebene nachgewiesen als in der Trägerebene.

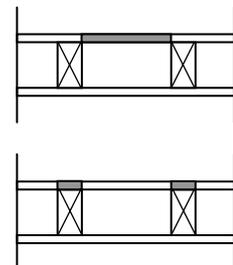


Der Gesamtwassergehalt der Trägerebene weist für alle untersuchten Standorte ein Viertel mehr Bauteilaufbauten mit abnehmender  $\Delta u'_m$  auf wie die Dämmebene.

##### *Verhalten des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene $\Delta u'_{m,HD}$ und in der Trägerebene $\Delta u'_{m,HT}$*

Die Holzschalung in der Trägerebene zeigt bei allen untersuchten Bauteilaufbauten für die drei Standorte einen ansteigenden  $\Delta u'_{m,HT}$ . In der Dämmebene ergibt sich für Bregenz auch bei rund drei Viertel der untersuchten Bauteilaufbauten ein ansteigender  $\Delta u'_{m,HD}$  – für Bürs und Schröcken wurde bei der Hälfte der untersuchten Aufbauten ein ansteigender  $\Delta u'_{m,HD}$  festgestellt.

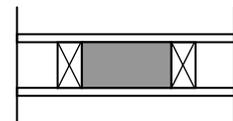
Es weisen aber vor allem für die Standorte Bürs und Schröcken auch ein Drittel der Bauteilaufbauten einen abnehmenden  $\Delta u'_{m,HD}$  auf.



##### *Verhalten des Wassergehaltes der Dämmung $\Delta u'_{m,D}$*

Für den Standort Bregenz lässt sich eine gleichmäßige Aufteilung der untersuchten Bauteilaufbauten mit ansteigender, abnehmender und gleichbleibender  $\Delta u'_{m,D}$  erkennen.

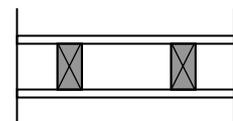
Für die Standorte Bürs und Schröcken überwiegen die Bauteilaufbauten mit abnehmender  $\Delta u'_{m,D}$  gegenüber den Aufbauten mit ansteigender  $\Delta u'_{m,D}$ .



##### *Verhalten des Wassergehaltes des Trägers $\Delta u'_{m,T}$*

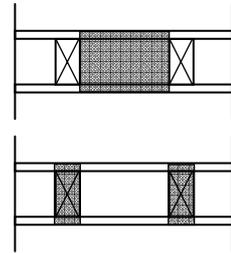
Der Wassergehalt des Trägers zeigt für alle untersuchten Standorte beim Großteil der Bauteilaufbauten die Tendenz abzunehmen.

Nur drei (Bregenz) / zwei (Bürs) / ein (Schröcken) Bauteilaufbauten weisen einen ansteigenden  $\Delta u'_{m,T}$  auf.



**Veränderung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u'_m$  in der Dämmebene und in der Trägerebene**  
(siehe Diagramm 4.19 und Diagramm 4.20, Seite 59)

Schon die Untersuchung der Tendenz vom  $\Delta u'_m$  in Dämm- und Trägerebene hat gezeigt, dass für die Dämmebene bei mehr Bauteilaufbauten ein Anstieg des Gesamtwassergehaltes ermittelt wurde.



Der Vergleich der Anstiegsmenge der Gesamtwassergehalte in der Dämmebene und der Trägerebene untermauert dies:

Die Mittelwerte der  $\Delta u'_m$  in der Dämmebene erweisen sich für alle untersuchten Standorte höher als die Mittelwerte der  $\Delta u'_m$  in der Trägerebene: Für Bürs wurde beispielsweise in der Dämmebene im Mittel eine  $\Delta u'_m$  von  $-0,01 \text{ kg/m}^2$  und in der Trägerebene eine mittlere  $\Delta u'_m$  von  $-0,017 \text{ kg/m}^2$  berechnet.

	Bregenz*	Bürs*	Schröcken*
Mittelwert $\Delta u'_m$ Dämmebene	$0,018 \text{ kg/m}^2$	$-0,010 \text{ kg/m}^2$	$-0,019 \text{ kg/m}^2$
Mittelwert $\Delta u'_m$ Trägerebene	$-0,002 \text{ kg/m}^2$	$-0,017 \text{ kg/m}^2$	$-0,025 \text{ kg/m}^2$

\* Mittelwerte ohne Berücksichtigung des Bauteilaufbaus Nr. 24. Die extremen Werte dieses Aufbaus verfälschen die Mittelwerte der restlichen Aufbauten.

Tabelle 4.1

**Veränderung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u'_{m,HD}$  und in der Trägerebene  $\Delta u'_{m,HT}$**

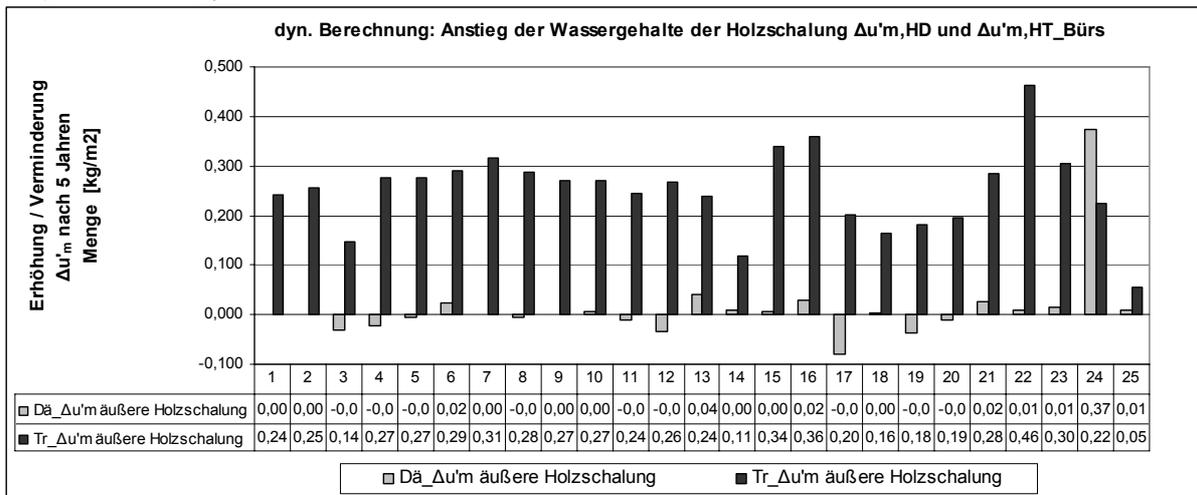
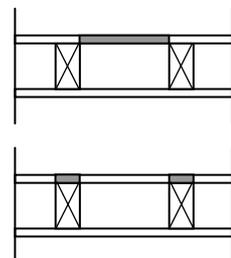


Diagramm 4.39: Veränderung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u'_{m,HD}$  und in der Trägerebene  $\Delta u'_{m,HT}$  für den Standort Bürs (Berechnung mit WUFI)

Die Untersuchung der Tendenz der Veränderung über vier Jahre zeigte bereits einen Unterschied zwischen der Holzschalung in der Dämmebene und der Holzschalung in der Trägerebene: In der Dämmebene ergibt sich für die Hälfte bis zu drei Viertel der Bauteilaufbauten ein Anstieg – in der Trägerebene ergibt sich für alle Bauteilaufbauten ein Anstieg des Wassergehaltes über vier Jahre.



Auch die Anstiegsmenge des Wassergehaltes über vier Jahre zeigt für die Dämmebene und die Trägerebene unterschiedliche Ergebnisse:

$\Delta u'_{m,HT}$  ist für alle untersuchten Bauteilaufbauten (Ausnahme Bauteilaufbau Nr. 24) wesentlich höher als  $\Delta u'_{m,HD}$ . In Diagramm 4.39 sind die Unterschiede beispielhaft für den Standort Bürs abgebildet. Für Bürs erreicht  $\Delta u'_{m,HT}$  einen Mittelwert von  $0,251 \text{ kg/m}^2$ ,  $\Delta u'_{m,HD}$  aber nur von  $0,013 \text{ kg/m}^2$ .

Bauteil 22 weist eine vergleichsweise große Anstiegsmenge des Wassergehaltes in der Holzschalung der Trägerebene auf. Dies ist auf die größere Stärke der Holzschalung dieses Aufbaus zurückzuführen.

Veränderung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u'_{m,D}$

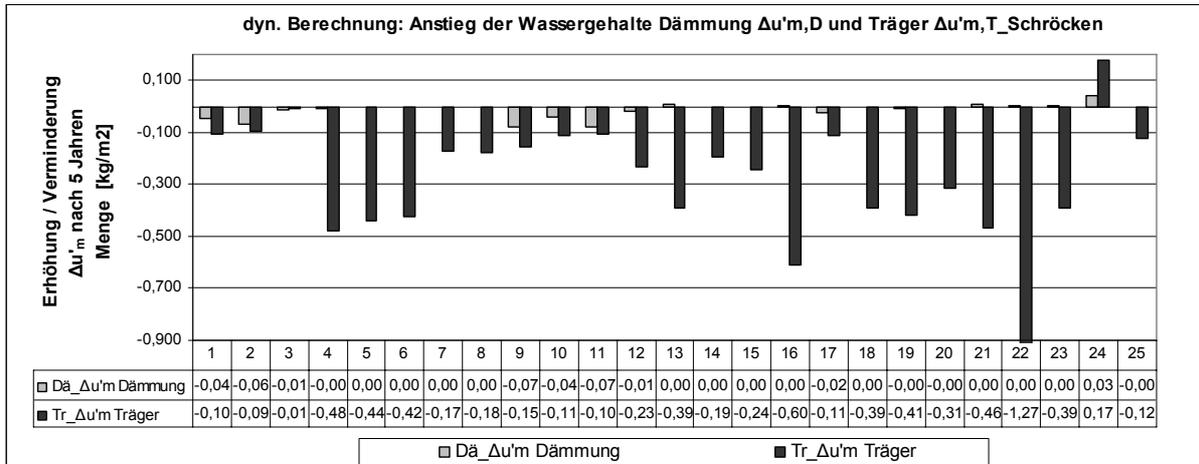
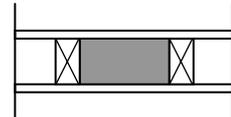


Diagramm 4.40: Veränderung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u'_{m,D}$  und des Trägers  $\Delta u'_{m,T}$  für den Standort Schräcken (Berechnung mit WUFI)

Der Anstieg des Wassergehaltes der Dämmung erscheint im Vergleich zum Anstieg des Wassergehaltes des Trägers auf den ersten Blick gering. Für die Dämmung ist jedoch zu beachten, dass sie je nach Material mehr oder weniger wasseraufnahmefähig ist.



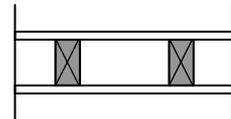
Es lässt sich eine stärkere Abnahme des Wassergehaltes für Zellulosedämmungen erkennen.

Die vergleichsweise große Abnahme des Wassergehaltes des Trägers für Bauteilaufbau Nr. 22 lässt sich auf die größere Stärke der äußeren Holzschalung zurückführen.

Veränderung des Wassergehaltes des Trägers  $\Delta u'_{m,T}$

(siehe Diagramm 4.40 bzw. auch Diagramm 4.20, Seite 59)

Bei der Analyse des Anstiegs des Wassergehaltes des Trägers und des Anstiegs des Wassergehaltes der Holzschalung in der Trägerebene fällt auf, dass deren Werte dem Anstieg des Gesamtwassergehaltes in der Trägerebene gar nicht ähneln:



$\Delta u'_{m,HT}$  steigt für alle Bauteilaufbauten an,  $\Delta u'_{m,T}$  weist für den Großteil der untersuchten Bauteilaufbauten eine abnehmende Tendenz auf.

Während die Werte der Veränderung des Gesamtwassergehaltes der Trägerebene sehr niedrig sind (für 95% der Bauteilaufbauten zwischen  $0,020 \text{ kg/m}^2$  und  $-0,115 \text{ kg/m}^2$ ), ist die Abnahme des  $\Delta u'_{m,T}$  höher.

Der Mittelwert von  $\Delta u'_{m,T}$  liegt für Bregenz bei  $-0,128 \text{ kg/m}^2$ , für Bürs bei  $-0,158 \text{ kg/m}^2$  und für Schräcken bei  $-0,291 \text{ kg/m}^2$ . Alle Mittelwerte für  $\Delta u'_{m,T}$  liegen unter dem niedrigsten Wert des Gesamtwassergehaltes der Trägerebene.

Die beiden Wassergehalte  $\Delta u'_{m,T}$  und  $\Delta u'_{m,HT}$  gehören zu den Wassergehalten, deren Summe den Gesamtwassergehalt in der Trägerebene bildet. Die Gesamtwassergehalte in der Trägerebene weisen eine sehr kompakte Verteilung um den Nullpunkt auf.  $\Delta u'_{m,T}$  und  $\Delta u'_{m,HT}$  dagegen zeigen sehr gegensätzliche Eigenschaften, die sich bei Summierung zum Gesamtwassergehalt aufheben.

Die Holzschalung, deren Wassergehalt ansteigt, berührt den Träger an seiner Oberseite direkt. Ein Feuchtigkeitsaustausch zwischen den beiden Materialien ist sehr wahrscheinlich.

Der Wassergehalt des Trägers ist ein Mittelwert über die ganze Querschnittsfläche. Es wird daher eine genauere Untersuchung der Feuchteverteilung im Träger vorgenommen (siehe Kapitel 4.3.3).

#### *Zusammenfassung Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre*

Der Vergleich zwischen dem Verhalten des Wassergehaltes der Dämmebene und der Trägerebene über einen längeren Zeitraum verdeutlicht, dass nur die Betrachtung der Gesamtwassergehalte nicht ausreichen kann:

Die Gesamtwassergehalte von Dämmebene und Trägerebene weisen nur kleine Unterschiede auf. Für die Dämmebene wurde für etwas mehr Bauteilaufbauten ein Anstieg des Gesamtwassergehaltes ermittelt als für die Trägerebene. Außerdem wurde festgestellt, dass der Anstieg für die Dämmebene im Mittel etwas höher liegt als für die Trägerebene.

Der Vergleich zwischen dem Verhalten der Wassergehalte der Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene zeigt aber wesentlich größere Unterschiede als für den Gesamtwassergehalt. Für die Holzschalung der Trägerebene ergeben sich nur ansteigende Wassergehalte. Die ermittelten Wassergehalte in der Trägerebene liegen außerdem weit über den mittleren Werten für  $\Delta u'_{m,HD}$ .

Bei der Beurteilung der Holzschalung ist zu berücksichtigen, dass die beiden Ebenen – Dämmebene und Trägerebene – vollkommen unabhängig voneinander mit einem eindimensionalen Verfahren berechnet wurden. Eventuelle Einflüsse von seitlich angrenzenden Materialien wurden in der Berechnung daher nicht berücksichtigt.

Der Feuchtigkeitsaustausch zwischen der Holzschalung in der Trägerebene und der Holzschalung in der Dämmebene oder zwischen der Dämmung und dem Träger gehen nicht in die Berechnungsergebnisse ein.

Weiters fällt bei der Beurteilung der Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre das Feuchteverhalten des Trägers und der Holzschalung in der Trägerebene auf.

Für die Holzschalung in der Trägerebene ergibt sich immer ein ansteigender Wassergehalt, für den Träger großteils ein abnehmender Wassergehalt.

Da die Wassergehalte der Materialien – insbesondere des Trägers – Mittelwerte über den Querschnitt darstellen, wird die Trägerebene nochmals gesondert untersucht. Dabei soll die Feuchteverteilung über den Querschnitt des Trägers betrachtet werden. Das Ansteigen des Wassergehaltes der Holzschalung lässt vermuten, dass auch der obere Bereich des Trägers hohe Wassergehalte aufweist (siehe Kapitel 4.3.3).

#### 4.3.2.2 Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf $\Delta u_m$

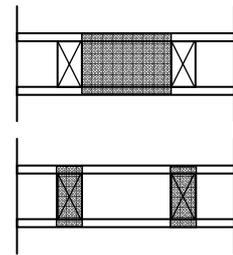
Wie bereits erwähnt, stellt die Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf  $\Delta u_m$  die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Wassergehalt eines Jahres dar. Sie erlaubt im Gegensatz zu  $\Delta u'_m$  (Veränderung des mittleren Wassergehaltes über vier Jahre) die kurzzeitige Feuchteeinwirkung auf die Bauteilaufbauten und Materialien zu beurteilen.

Die zu den nachfolgenden Erläuterungen korrespondierenden Diagramme (Diagramm 4.23, Diagramm 4.24 und Diagramm 4.25) sind auf Seite 62 und Seite 63 zu finden.

$\Delta u_m > 1,0 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ ,  $\Delta u_m > 0,5 \text{ kg/m}^2/\text{a}$

Die Beurteilung der Schwankungshöhe der untersuchten Bauteilaufbauten mit  $\Delta u_m > 1,0$  bzw.  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  geht auf die Anforderungen lt. DIN 4108-3 und ÖNORM B 8110-2 zurück. Diese Normen fordern für die Glaserberechnung einen maximalen Kondensatausfall von  $1,0 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  an kapillar wasseraufnahmefähigen Schichten bzw.  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  an nicht kapillar wasseraufnahmefähigen Schichten.

Für die Dämmebene und die Trägerebene ergeben sich jeweils ca. gleich viele Bauteilaufbauten, deren Schwankung des Gesamtwassergehaltes die Grenzwerte überschreiten. Grundsätzlich liegt die  $\Delta u_m$  des Großteils der Bauteilaufbauten innerhalb dem von der Norm festgelegten Rahmen.

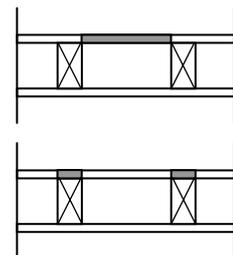


#### Schädigung der Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene

Eine Schädigung der Holzschalung tritt lt. ÖNORM B 8110-2 auf, wenn der massebezogene Feuchtigkeitsgehalt aufgrund der Schwankung des Wassergehaltes um mehr als 3% erhöht wird.

Für die Holzschalung in der Dämmebene wurde bei einer größeren Anzahl der untersuchten Bauteilaufbauten eine Schädigung nachgewiesen als für die Holzschalung der Trägerebene: Für den Standort Bregenz tritt bei rund drei Viertel, für die Standorte Bürs und Schröcken bei der Hälfte der Bauteilaufbauten eine Schädigung der Holzschalung in der Dämmebene auf.

Die Holzschalung der Trägerebene weist für knapp 10% der Bauteilaufbauten eine Schädigung auf.



Im Gegensatz dazu wurde im vorherigen Kapitel festgehalten, dass für die Holzschalung in der Trägerebene in allen untersuchten Fällen ein Anstieg des Wassergehaltes über vier Jahre stattfindet. Für die Holzschalung in der Dämmebene ist dies nur für die Hälfte (Bürs, Schröcken) bzw. drei Viertel (Bregenz) der Fall.

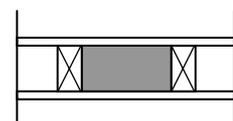
Es wird bereits ersichtlich, dass sich die Holzschalung in den beiden Ebenen unterschiedlich verhält. Zur genaueren Beurteilung des Feuchteverhaltens muss aber auch die Höhe der Schwankung und der massebezogenen Feuchtegehalt  $M\%$  beurteilt werden.

#### Schädigung der Dämmung

Die lt. ÖNORM maximale Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes von 3% gilt für Holzbaustoffe.

Für die Dämmung weisen die untersuchten Bauteilaufbauten die Materialien Mineralwolle, Zellulose und EPS auf. Nur die Zellulosedämmung wurde als Holzwerkstoff eingestuft.

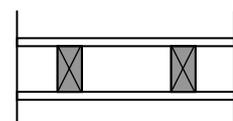
Von den fünf untersuchten Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung tritt bei allen eine Schädigung der Dämmung auf.



#### Schädigung des Trägers

Es wurde für keinen der untersuchten Bauteilaufbauten eine Schädigung des Trägers nach der Beurteilung gemäß ÖNORM B 8110-2 ermittelt.

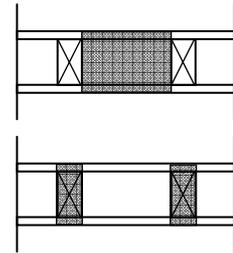
Die Schwankung des Wassergehaltes ist wie  $\Delta u'_m$  auch ein Mittelwert über den Querschnitt des Trägers. Eine nähere Untersuchung dieses Querschnitts erfolgt in Kapitel 4.3.3.



#### Höhe der Schwankung der Gesamtwassergehalte

Der Großteil der untersuchten Bauteilaufbauten weist eine Schwankung des Gesamtwassergehaltes unter  $0,5 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  auf.

Die Analyse der Werte der  $\Delta u_m$  zeigt, dass die meisten Werte auch unter  $0,1 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  liegen: In der Dämmebene besitzen rund 80 % der untersuchten Bauteilaufbauten eine  $\Delta u_m$  unter  $0,1 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ , in der Trägerebene sind es über 70 % der untersuchten Bauteilaufbauten.



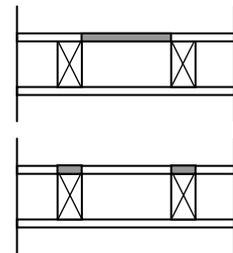
Auch die Analyse der Mittelwerte zeigt, dass die Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Vergleich zu den Anforderungen lt. ÖNORM relativ niedrig ist: In der Dämmebene wurde für Bregenz eine mittlere Schwankung des Gesamtwassergehaltes von  $0,111 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  ermittelt, für Bürs  $0,104 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  und für Schröcken im Mittel  $0,109 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ . Es fällt auch auf, dass die mittlere Schwankung in der Dämmebene für alle Standorte niedriger ist als in der Trägerebene. Der Unterschied zwischen den beiden Ebenen ist jedoch nur gering: Der mittleren Schwankung in der Dämmebene für Bregenz von  $0,111 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  steht eine mittlere Schwankung von  $0,114 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  in Trägerebene gegenüber. (siehe auch Diagramm 4.26 und 4.27, Seite 65)

#### Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene $\Delta u_{m,HD}$ und in der Trägerebene $\Delta u_{m,HT}$

(siehe Diagramme 4.28 und 4.29 auf Seite 66)

Für die Holzschalung der Dämmebene tritt nicht nur bei einer größeren Anzahl der untersuchten Bauteilaufbauten eine Schädigung auf, sondern auch eine höhere Schwankung des Wassergehaltes als für die Holzschalung in der Trägerebene:

Die Mittelwerte der  $\Delta u_{m,HD}$  liegen für alle untersuchten Standorte deutlich höher als die Mittelwerte der  $\Delta u_{m,HT}$ . Am geringsten ist die Differenz der Mittelwerte für den Standort Schröcken, wo für die Dämmebene eine mittlere  $\Delta u_{m,HD}$  von 3,86% und für die Trägerebene eine mittlere  $\Delta u_{m,HT}$  von 2,01% festgestellt wurde.



Außerdem ist zu erkennen, dass für die Holzschalung in der Dämmebene die Mittelwerte von  $\Delta u_{m,HD}$  für alle untersuchten Standorte über dem Grenzwert der ÖNORM liegen (maximale Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes von 3%).

Die Holzschalung in der Trägerebene hingegen weist für alle Standorte Mittelwerte von  $\Delta u_{m,HT}$  unter dem Maximalwert lt. ÖNORM auf.

	<b>Bregenz</b>	<b>Bürs</b>	<b>Schröcken</b>
Mittelwert $\Delta u_{m,HD}$	5,39 %	4,80 %	3,86 %
Mittelwert $\Delta u_{m,HT}$	2,15 %	2,00 %	2,01 %

Tabelle 4.2

Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u_{m,D}$  und des Trägers  $\Delta u_{m,T}$

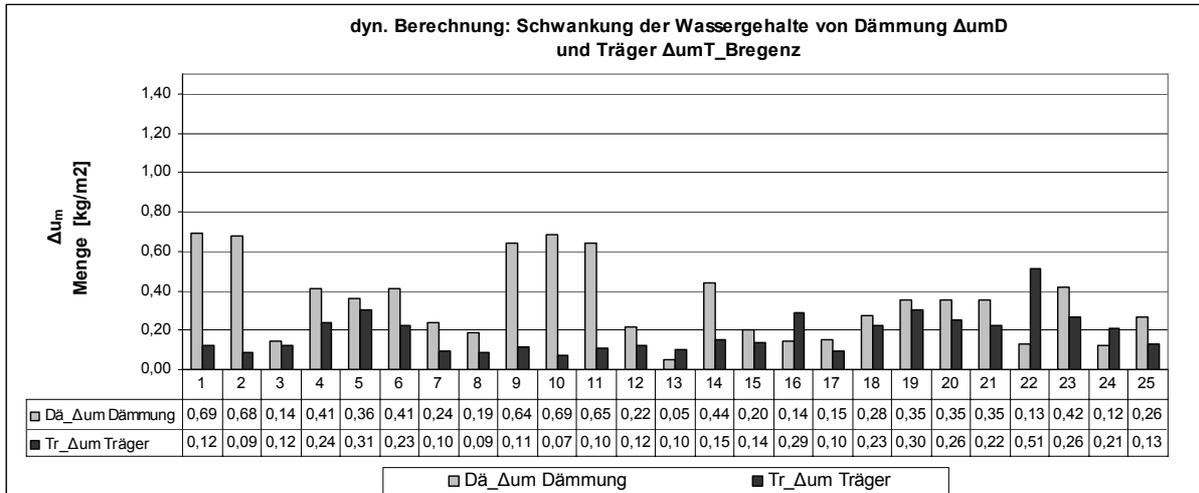


Diagramm 4.41: Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung und des Trägers in  $\text{kg/m}^2$  für den Standort Bregenz (Berechnung mit WUFI)

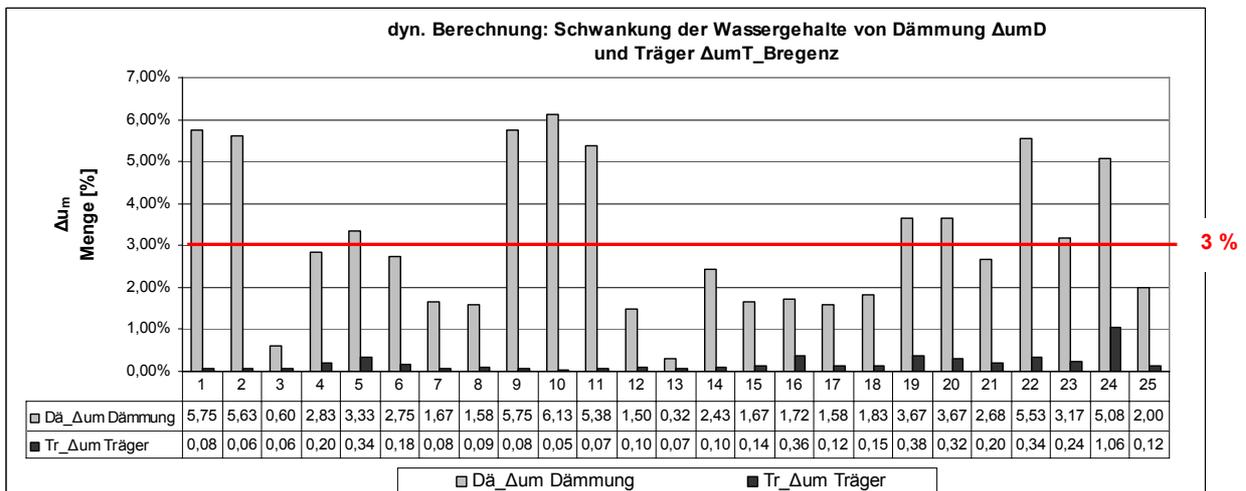
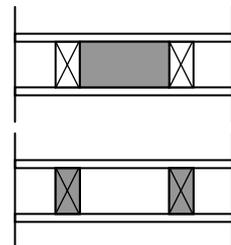


Diagramm 4.42 Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung und des Trägers in  $\Delta M$ -% für den Standort Bregenz (Berechnung mit WUFI)

Beim Vergleich der Schwankungsmenge  $[\text{kg/m}^2/\text{a}]$  des Wassergehaltes der Dämmung und des Trägers wird festgestellt, dass tendenziell die Schwankung für die Dämmung höher ausfällt als für den Träger.

So ergibt sich zum Beispiel für den Standort Bregenz ein Mittelwert von  $0,343 \text{ kg/m}^2/\text{a}$  für die Schwankung der Dämmung gegenüber einer mittleren Schwankung des Wassergehaltes des Trägers von  $0,184 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ .



Wird die Schwankungsmenge des Wassergehaltes auf die Erhöhung der massebezogenen Feuchtigkeit umgerechnet, fällt die Differenz zwischen den beiden Ebenen noch stärker auf: Für den Standort Bregenz zeigt die Dämmebene eine mittlere Erhöhung der massebezogenen Feuchtigkeit von 3,13%, die Trägerebene ein Mittelwert von 0,20%. Im Verhältnis zur Rohdichte und zur Ausgangsfeuchte steigt die Feuchtigkeit in der Dämmung sehr viel stärker an als im Träger.

Für die fünf Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung wurde gegenüber den Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung und EPS-Dämmung eine starke Schwankung des Wassergehaltes festgestellt (Zellulosedämmung: Aufbau Nr. 1,2,9,10,11). Das Verhalten der Dämmmaterialien infolge von Feuchtigkeitseinwirkung ist zu berücksichtigen.

Der Träger unterliegt der Verformung durch Schwinden und Quellen. Eine genaue Untersuchung der Verteilung der Feuchtigkeit über den Querschnitt des Trägers wird daher im Kapitel 4.3.3 vorgenommen.

#### *Zusammenfassung Schwankung $\Delta u_m$*

Im vorigen Kapitel wurde bereits festgestellt, dass die Betrachtung der Gesamtwassergehalte ohne die Untersuchung der Wassergehalte der einzelnen Schichten zu falschen Schlussfolgerungen führen kann. Dasselbe gilt für die Analyse der Schwankung der Wassergehalte:

Die Schwankung des Gesamtwassergehaltes ist grundsätzlich sehr niedrig und liegt im Rahmen der von der Norm festgelegten Werte. Zwischen den Ergebnissen für die Dämmebene und die Trägerebene sind nur geringe Unterschiede feststellbar.

Bei der Betrachtung der Wassergehalte der Holzschalung, der Dämmung und des Trägers lassen sich hingegen größere Unterschiede zwischen den Ebenen erkennen.

Für die Holzschalung in der Dämmebene und die Dämmung zeigt sich eine deutlich höhere Schwankung der Wassergehalte als für die Holzschalung in der Trägerebene und den Träger.

Bei der Untersuchung der Holzschalung in der Dämmebene wurde festgestellt, dass die Mittelwerte der Schwankung der Wassergehalte für die drei untersuchten Standorte den in der ÖNORM B 8110-2 vorgeschriebenen Maximalwert überschreiten.

Für die Holzschalung in der Trägerebene wurden niedrigere Mittelwerte der Schwankung nachgewiesen.

Im vorigen Kapitel wurde aber für die Holzschalung in der Trägerebene bei allen untersuchten Bauteilaufbauten ein Anstieg des Wassergehaltes über vier Jahre ermittelt.

Für die Dämmung wurde eine höhere Schwankung nachgewiesen als für den Träger. Besonders fällt die hohe Schwankung der Dämmung für die Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung auf.

Die Bewertung einer Schädigung der Baustoffe wurde mit den Grenzwerten gemäß ÖNORM und DIN vorgenommen. Diese Werte wurden für Berechnungen mit dem Glaserverfahren eingeführt und können nur bedingt auf die Ergebnisse aus WUFI-Berechnungen umgelegt werden.

Für eine Beurteilung des Feuchteverhaltens der Bauteilaufbauten und der Materialien müssen auch die anderen ausgewerteten Parameter zu berücksichtigen werden: das Feuchteverhalten über einen längeren Zeitraum, die massebezogene Feuchtigkeit und die hygrothermischen Zustände.

### 4.3.2.3 Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-%

Die Untersuchung des maximalen massebezogenen Feuchtegehaltes M-% ist vor allem für die Holzbauteile interessant. Für die Bewertung von M-% für Holzbauteile werden in den Normen die folgenden Grenzwerte angegeben: Lt. ÖNORM B 2215, B 2217 und B 2320 gilt als Maximalwert für die Einbaufeuchte 18 M-%. In ÖNORM EN 335-1 wird der Beginn der Entwicklung holzerstörerischer Pilze mit 20 M-% angegeben.

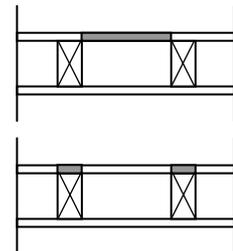
Für die Berechnung wurde der massebezogene Feuchtegehalt der Holzbauteile zum Einbauzeitpunkt auf 15 M-% festgelegt.

#### *Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% der Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene*

(siehe Diagramm 4.31 und Diagramm 4.32 auf Seite 68 und Seite 69)

Für die Standorte Bregenz und Bürs liegt der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Holzschalung in der Dämmebene bei einer bedeutend größeren Anzahl der untersuchten Bauteilaufbauten über 20 M-% als dies für die Holzschalung in der Trägerebene der Fall ist.

Für den Standort Schröcken überschreitet der massebezogene Feuchtegehalt der Holzschalung in der Dämm- und Trägerebene bei ähnlich vielen Bauteilaufbauten die 20 M-% – Grenze.



In den Mittelwerten spiegelt sich der Unterschied zwischen Dämm- und Trägerebene nur bedingt wider, weil für die Dämmebene eine größere Streuung der Werte vorliegt als für die Trägerebene: Für die Holzschalung in der Dämmebene wurden zwar zum Teil sehr hohe Feuchtegehalte nachgewiesen, andererseits weisen einige Bauteilaufbauten auch relativ niedrige Feuchtegehalte in der Holzschalung auf.

Die Werte der maximalen Feuchtigkeit in der Holzschalung der Trägerebene liegen zum Großteil über 15 M-%.

<b>Max. M-% Holzschalung</b>	<b>Bregenz</b>	<b>Bürs</b>	<b>Schröcken</b>
Mittelwert Dämmebene	17,75 %	18,31 %	18,84 %
Mittelwert Trägerebene	17,37 %	17,79 %	19,36 %

**Tabelle 4.3**

### 4.3.2.4 Hygrothermische Zustände

Für das Wachstum von Schimmelpilz sind vor allem die Feuchte- und Temperaturbedingungen relevant. Zur besseren Beurteilung der Zustände wurden von Sedlbauer (Sedlbauer 2001) die beiden Isoplethen Lim B I und Lim B II eingeführt. Bei Überschreiten der Grenzisoplethen liegen ideale Bedingungen für Schimmelpilze vor (siehe Kapitel 1.2.2.5).

Für die Auswertung der Berechnungsergebnisse wurde einerseits das Auftreten von hygrothermischen Zuständen über Lim B II an der Außen- bzw. Innenoberfläche der Holzschalung bewertet. Andererseits wurden bei Überschreitung der Isoplethe für den ungünstigsten Fall die Zeitdauern  $t_m$  und  $t_v$  nach Hukka und Viitanen berechnet.

#### Hygrothermische Zustände über Lim B II an der Außenoberfläche der Holzschalung in Dämmebene und Trägerebene

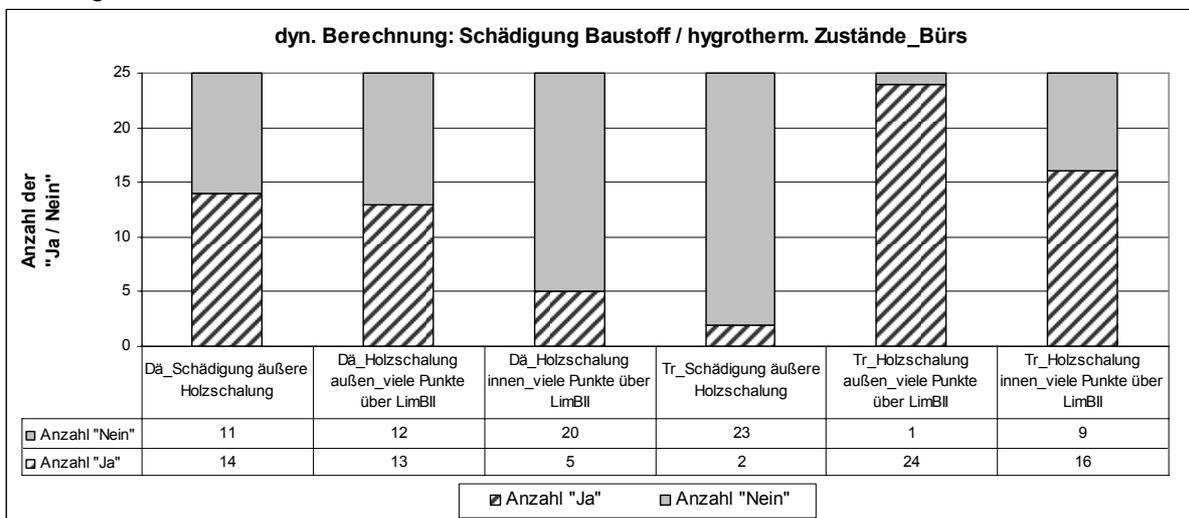
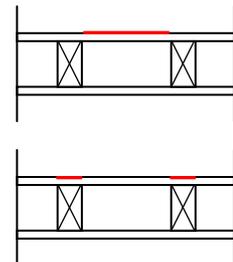


Diagramm 4.43: Schädigung Baustoff, hygrothermische Zustände über LIM B II an der Außen- und Innenoberfläche der Holzschalung in Dämm- und Trägerebene. Beispielhaft für den Standort Bürs (Berechnung mit WUFI)

In der Dämmebene wurden für die drei Standorte jeweils für ungefähr die Hälfte der untersuchten Bauteilaufbauten an der Außenoberfläche der Holzschalung hygrothermische Zustände über Lim B II festgestellt.

An der Außenoberfläche der Holzschalung in der Trägerebene ergaben sich für alle drei Standorte bei fast allen untersuchten Bauteilaufbauten hygrothermische Zustände über Lim B II.



Da das Auftreten von hygrothermischen Zuständen über Lim B II für Holzbauteile eine mögliche Schädigung durch Pilzwachstum bedeutet, wird es mit der

Beurteilung einer Schädigung der Holzschalung gemäß ÖNORM B 8110-2 verglichen.

Für die Dämmebene zeigt sich, dass für alle Standorte die Anzahl der Bauteilaufbauten, deren Holzschalung gemäß ÖNORM eine Schädigung aufweist, in etwa der Anzahl der Bauteilaufbauten mit hygrothermischen Zuständen über Lim B II an der Außenoberfläche der Holzschalung entspricht.

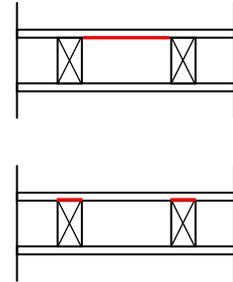
Für die Trägerebene kann keine Übereinstimmung festgestellt werden: Gemäß ÖNORM wurde nur bei maximal 12% der untersuchten Bauteilaufbauten eine Schädigung der Holzschalung festgestellt.

Wohingegen für alle Standorte bei mindestens 88% der untersuchten Bauteilaufbauten an der Außenoberfläche der Holzschalung ein Überschreiten von Lim B II durch die hygrothermischen Zustände ermittelt wurde.

**Hygrothermische Zustände über Lim B II an der Innenseite der Holzschalung in Dämmebene und Trägerebene**

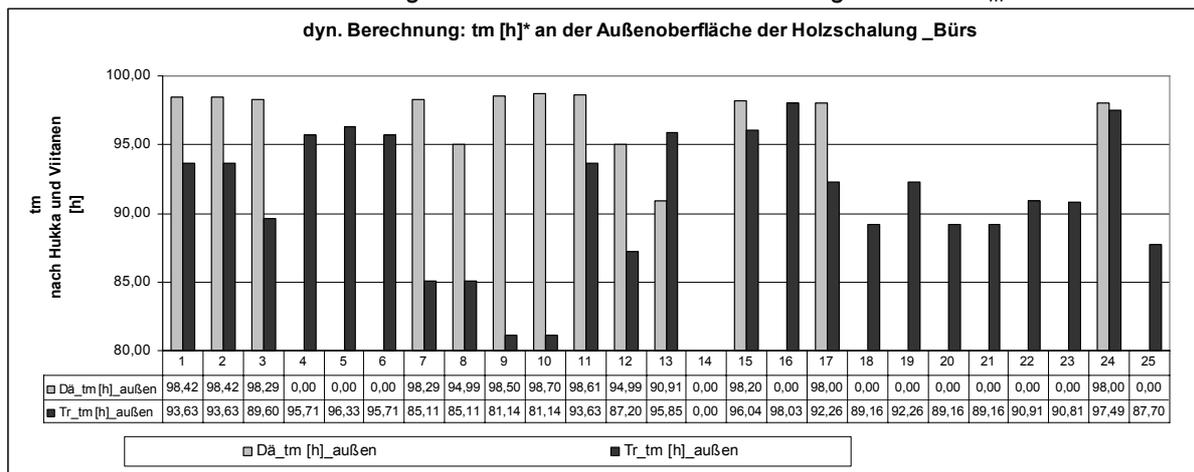
An der Innenoberfläche der Holzschalung wurden für die Dämmebene und die Trägerebene jeweils bei einer geringeren Anzahl der untersuchten Bauteilaufbauten hygrothermische Zustände über Lim B II festgestellt als für die Außenoberfläche.

An der Innenoberfläche der Holzschalung weisen für die Dämmebene weniger Bauteilaufbauten ein Überschreiten der Feuchte- und Temperaturzustände über Lim B II auf als für die Trägerebene.



Ein Vergleich mit der Beurteilung der Berechnungsergebnisse für die Holzschalung nach ÖNORM B 8110-2 zeigt keine Übereinstimmung: Für die Dämmebene wurde bei mehr Bauteilaufbauten eine Schädigung der Holzschalung nach ÖNORM vorausgesagt als Bauteilaufbauten mit hygrothermischen Zuständen über Lim B II an der Innenoberfläche der Holzschalung ermittelt wurden. Für die Trägerebene ist das Gegenteil der Fall: Mit der Bewertung der hygrothermischen Zustände wurde bei weitaus mehr Bauteilaufbauten Schimmelpilzwachstum an der Innenoberfläche der Holzschalung vorausgesagt als Bauteilaufbauten mit Schädigung der Holzschalung gemäß ÖNORM ermittelt wurden.

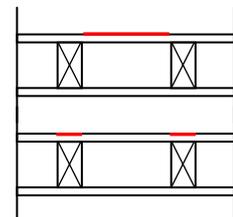
**Außenoberfläche der Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene –  $t_m$**



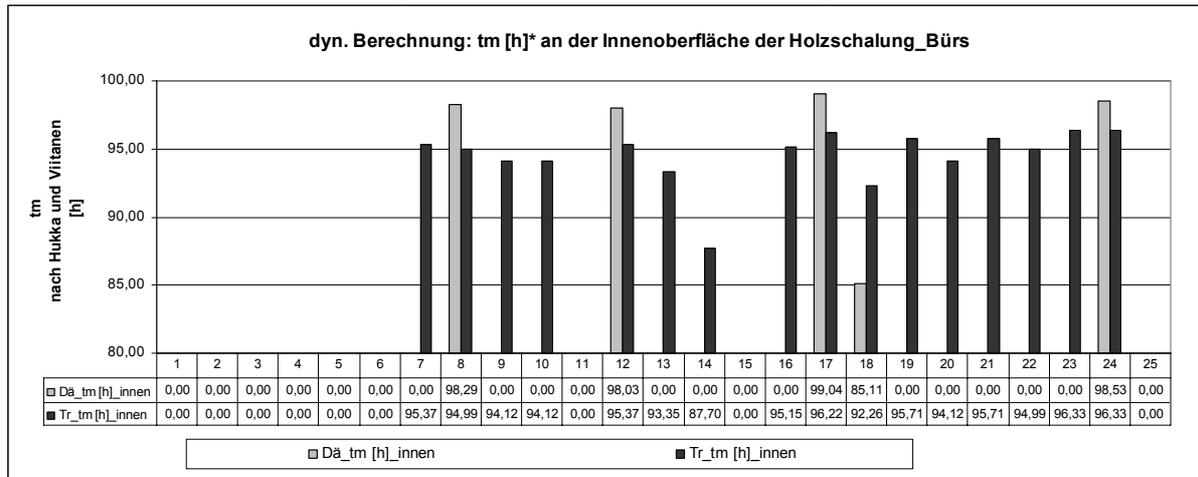
**Diagramm 4.44:**  $t_m$ \* an der Außenseite der Holzschalung für den Standort Bürs ( $t_m^* = 100h - t_m$ . Die Darstellung von  $t_m$  als  $t_m^*$  wurde gewählt, um eine leichtere Lesbarkeit der Grafik zu gewährleisten: Je höher  $t_m^*$ , desto kürzer  $t_m$  und desto wahrscheinlicher ein Pilzbefall.)

Für die Außenoberfläche der Holzschalung in der Dämmebene wurde bei einer geringeren Anzahl der untersuchten Bauteilaufbauten Schimmelpilzwachstum vorhergesagt als für die Außenoberfläche der Holzschalung in der Trägerebene. Beim Vergleich der Zeitdauer bis zum Erreichen von Mould-Index 1 ( $t_m$ ) kann festgestellt werden, dass die Zeitdauer  $t_m$  für die Außenoberfläche der Holzschalung in der Dämmebene kürzer ausfällt als für die Trägerebene. Das gilt nur sobald die hygrothermischen Zustände an der Außenoberfläche der Holzschalung in der Dämmebene die Grenzisoplethe Lim B II überschreiten, weil ansonsten keine Zeitdauer  $t_m$  ermittelt wird.

Es wurden also für die Außenseite der Holzschalung in der Dämmebene weniger oft passende Zustände für Pilzwachstum vorausgesagt – sobald diese eintreten, reichen allerdings Zeitspannen von nur wenigen Stunden aus, bis das Myzelwachstum unter dem Mikroskop nachweisbar ist ( $t_m$ ). An der Außenseite der Holzschalung in der Trägerebene treten zwar öfter Feuchte- und Temperaturbedingungen über Lim B II auf, die dazu ermittelten Zeitdauern  $t_m$  sind zum Großteil jedoch länger als  $t_m$  für die Holzschalung in der Dämmebene.



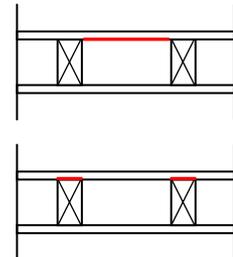
Innenoberfläche der Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene –  $t_m$



**Diagramm 4.45:**  $t_m$ \*an der Innenseite der Holzschalung für den Standort Bürs ( $t_m^* = 100h - t_m$ . Die Darstellung von  $t_m$  als  $t_m^*$  wurde gewählt, um eine leichtere Lesbarkeit der Grafik zu gewährleisten: Je höher  $t_m^*$ , desto kürzer  $t_m$  und desto wahrscheinlicher ein Pilzbefall.)

Gegenüber der Außenoberfläche tritt an der Innenoberfläche der Holzschalung in beiden Ebenen weniger oft ein Überschreiten der Grenzisoplethe durch die Feuchte- und Temperaturzustände auf.

Es zeigt sich das gleiche Bild wie für die Außenoberfläche: Für die Dämmebene werden bei weniger Bauteilaufbauten hygrothermische Bedingungen über der Lim B II ermittelt wie für die Trägerebene. Sobald diese Zustände auftreten, ergibt sich für die Dämmebene aber eine kürzere Zeitdauer  $t_m$ .



**Zusammenfassung hygrothermische Zustände**

Die Beurteilung der Schädigung von Holzbauteilen gemäß ÖNORM B 8110-2 und das Auftreten hygrothermischer Zustände über Lim B II zeigen nur für die Außenoberfläche der Holzschalung in der Dämmebene ähnliche Ergebnisse.

Die Bewertung nach ÖNORM berücksichtigt nur die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes im Jahresverlauf. Für die Beurteilung mittels der Grenzisoplethe Lim B II werden die hygrothermischen Zustände für jeden Zeitpunkt der Berechnung berücksichtigt (Berechnung über fünf Jahre).

Im Allgemeinen ist die Anwendung der Beurteilung der Schädigung von Holzbauteilen gemäß ÖNORM auf die Berechnungsergebnisse von WUFI daher nicht zu empfehlen.

Die ÖNORM geht nur auf die Schwankungen im Jahresverlauf ein. WUFI dagegen rechnet über mehrere Jahre und berücksichtigt auch kapillaren Feuchtetransport und Sorption. Eine Analyse der hygrothermischen Zustände und der massebezogenen Feuchtigkeit der Holzbauteile kann daher bessere Aufschlüsse zum Feuchteverhalten geben.

Der Vergleich der ermittelten Zeitdauer  $t_m$  für die Holzschalung in der Dämm- und Trägerebene zeigt für die Dämmebene weniger häufig das Auftreten adäquater Temperatur- und Feuchtebedingungen für Pilzwachstum als für die Trägerebene. Sobald diese auftreten, liegt die Zeitspanne bis zum Mould Index 1 jedoch deutlich niedriger als für die Trägerebene. (Mould Index 1 = Myzelwachstum unter dem Mikroskop sichtbar)

#### 4.3.2.5 Zusammenfassung Vergleich Dämmebene und Trägerebene

Der Vergleich von Dämmebene und Trägerebene erweist sich vor allem für die Holzschalung als interessant.

Für die Gesamtwassergehalte zeigen sich für beide Ebenen nur geringe Unterschiede. Der Vergleich der Wassergehalte der Dämmung und des Trägers ist nur bedingt möglich, weil es sich um verschiedene Materialien mit verschiedenen Eigenschaften handelt.

Die äußere Holzschalung liegt über dem Träger und der Dämmung. Bei der Ausführung des Bauteilaufbaus wird sie aus Latten oder Platten gebildet, die beide Ebenen überspannen. Für die eindimensionale Berechnung mit WUFI wird jedoch jede Ebene – Dämm- und Trägerebene – einzeln betrachtet und der eventuelle Feuchteaustausch innerhalb der Holzplatte daher nicht berücksichtigt.

Bei der Analyse der Unterschiede zwischen der Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene wurde folgendes festgestellt:

Die Holzschalung in der Dämmebene unterliegt eher einem kurzfristigen Anstieg des Wassergehaltes. Die Holzschalung in der Trägerebene tendiert dagegen eher zu einem langfristigen Anstieg des Wassergehaltes.

Dieses Verhalten spiegelt sich in den ausgewerteten Parametern wider:

Für das Verhalten über vier Jahre zeigt die Holzschalung in der Trägerebene bei allen untersuchten Bauteilaufbauten nur ansteigende Wassergehalte.

Für die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes im Jahresverlauf – oder die Schwankung des Wassergehaltes – wurden für die Holzschalung in der Dämmebene höhere Werte ermittelt als für die Trägerebene.

Der kurzfristige Anstieg des Wassergehaltes bewirkt ein höheres Maximum des massebezogenen Feuchtegehaltes – der maximale M-% der Holzschalung in der Dämmebene ist höher als für die Holzschalung in der Trägerebene.

Dementsprechend zeigen sich bei der Untersuchung der hygrothermischen Zustände für die Holzschalung in der Dämmebene seltener Bedingungen für Pilzwachstum als für die Holzschalung in der Trägerebene. Sobald diese an der Holzschalung in der Dämmebene aber auftreten, sind die Feuchte- und Temperaturbedingungen aber so ideal, dass das Pilzwachstum schneller vor sich geht.

Weiters konnte gezeigt werden, dass die Anwendung der Grenzwerte für die Glaserberechnung gemäß ÖNORM B 8110-2 für die Berechnung nach WUFI nicht ausreichen.

Die Kriterien lt. ÖNORM beziehen sich nur auf ein Jahr. Für die Berechnungen mit WUFI zeigt sich bereits bei der Auswertung des Feuchteverhaltens über vier Jahre die Wichtigkeit der längerfristigen Betrachtung.

Außerdem zeigen die Anzahl der Bauteilaufbauten mit Schädigungen der Holzbauteile bei einer Beurteilung nach ÖNORM und die Anzahl der Bauteilaufbauten mit hygrothermischen Zuständen für Pilzwachstum keine Übereinstimmung.

Für die Beurteilung des Feuchteverhaltens nach ÖNORM wird nur ein Jahr und nur die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes M-% berücksichtigt. Für die Beurteilung des Auftretens einer Schädigung von Holzbauteilen ist aber die prozentuelle Erhöhung weniger aufschlussreich als der tatsächliche Feuchtegehalt.

Noch besser lässt sich dies beurteilen, wenn Feuchte- und Temperaturzustände gleichzeitig abgebildet werden – wie dies in den Isoplethendiagrammen von Sedlbauer der Fall ist.

Das Festlegen von Anforderungen in den Normen für die Berechnungsergebnisse für Holzbauteile in dynamischen Berechnungen könnte über die Grenzisoplethen Lim B I und Lim B II (Sedlbauer 2001) bzw. über die Zeitdauern  $t_m$  und  $t_v$  nach Hukka und Viitanen (Viitanen 2001) passieren.

### 4.3.3 Untersuchung der Feuchteverteilung in Träger und Holzschalung der Trägerebene

Zur detaillierteren Analyse des Feuchteverhaltens der Trägerebene wurden zwei Bauteilaufbauten ausgewählt, deren Trägerquerschnitt in sieben kleinere Segmente unterteilt wurde, um nähere Aufschlüsse zur Feuchteverteilung zu erhalten.

Die Untersuchung wurde für Bauteil Nr. 03 mit 40 cm Trägerhöhe – Segmenthöhen von 3 cm, 5 cm, 5 cm, 14 cm, 5 cm, 5 cm, 3 cm – und Bauteil Nr. 10 – Segmenthöhen 2 cm, 3,5 cm, 3,5 cm, 10 cm, 3,5 cm, 3,5 cm, 2 cm – vorgenommen.

Für die untersuchten Segmente wurden die gleichen Werte wie für die Holzschalung bzw. den Träger ausgewertet.

Verhalten der Wassergehalte über vier Jahre  $\Delta u'_m$

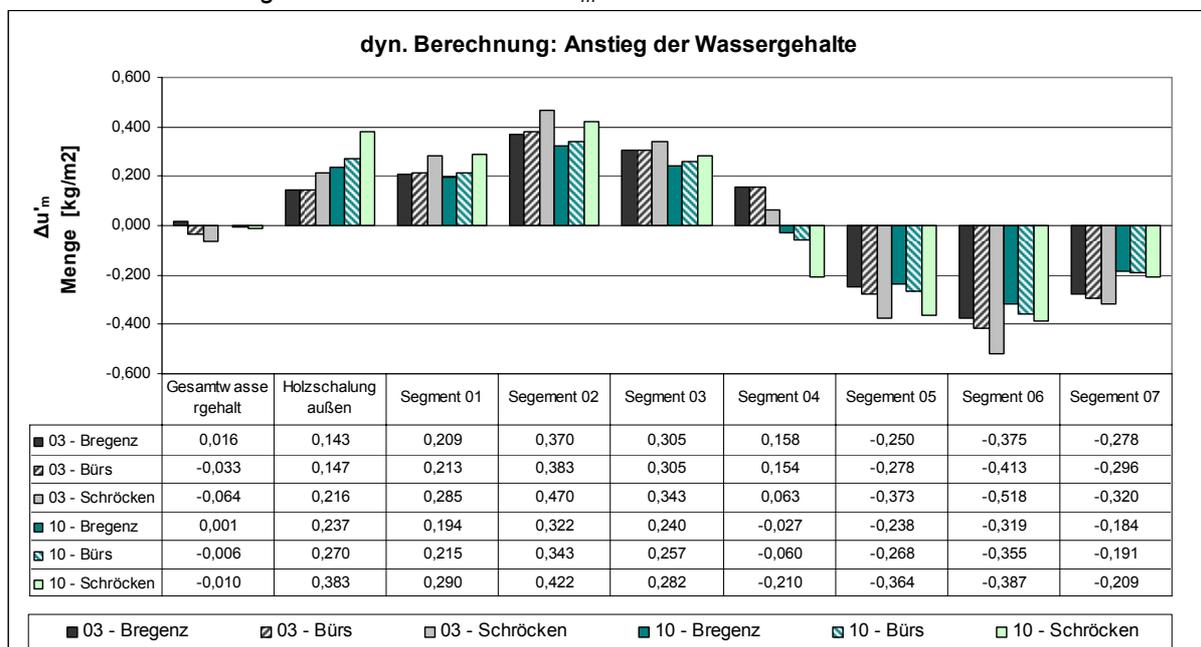


Diagramm 4.46: Verhalten der Wassergehalte der Segmente für die Bauteilaufbauten Nr. 03 und Nr. 10 (Berechnung mit WUFI)

Bereits in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 wurde der große Unterschied des Feuchteverhaltens der Holzschalung und des Trägers angesprochen. Da sich Holzschalung und Träger an dessen äußerer Oberfläche berühren, erscheint der Unterschied des Feuchteverhaltens erstaunlich. Bei der detaillierten Betrachtung zeigt sich aber, dass die Werte des Trägers durch die Mittelung über den Querschnitt einen falschen Eindruck vermitteln.

Es wurde festgestellt, dass sich die äußeren Segmente (Segment 01 bis 03) ähnlich verhalten wie die Holzschalung. Die inneren Segmente (Segment 05 bis 07) weisen ein konträres Verhalten auf.

Für die äußeren Segmente wurde in allen Klimastandorten ein ansteigendes  $\Delta u'_m$  ermittelt, für die inneren Segmente ergab sich ein abnehmendes  $\Delta u'_m$ .

Das mittlere Segment (04) weist für die beiden untersuchten Bauteilaufbauten jeweils unterschiedliche Tendenzen auf.

### Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre $\Delta u'_m$

Noch eindrucksvoller zeigt sich die ungleiche Feuchte-Verteilung über den Querschnitt bei Betrachtung der Menge von  $\Delta u'_m$ .

Für die Holzschalung und die äußeren drei Segmente (Segment 01 bis 03) des Trägers ergeben sich immer positive Werte (d.h. ein Anstieg des Wassergehaltes über vier Jahre). Es zeigt sich, dass die Höhe von  $\Delta u'_m$  für Segment 02, also zwei bis drei Zentimeter unter der äußeren Oberfläche des Trägers, am höchsten ist. Da Segment 02 aber einen breiteren Querschnitt besitzt als Segment 01 und hier die absoluten Werte betrachtet werden (keine prozentuellen Werte), ist dieses Bild noch mit dem massebezogenen Feuchtegehalt M-% der Segmente zu vergleichen.

Für die inneren drei Segmente (Segment 05 bis 07) ergeben sich negative Werte. Auch hier sind die Werte von  $\Delta u'_m$  für den Bereich von zwei bis drei Zentimetern unter der Oberfläche am stärksten ausgeprägt. Es gilt jedoch das gleiche wie an der Außenseite: Die Werte müssen mit den prozentuellen Werten aus M-% verglichen werden, weil der Querschnitt der Segmente variiert.

### Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf $\Delta u_m$

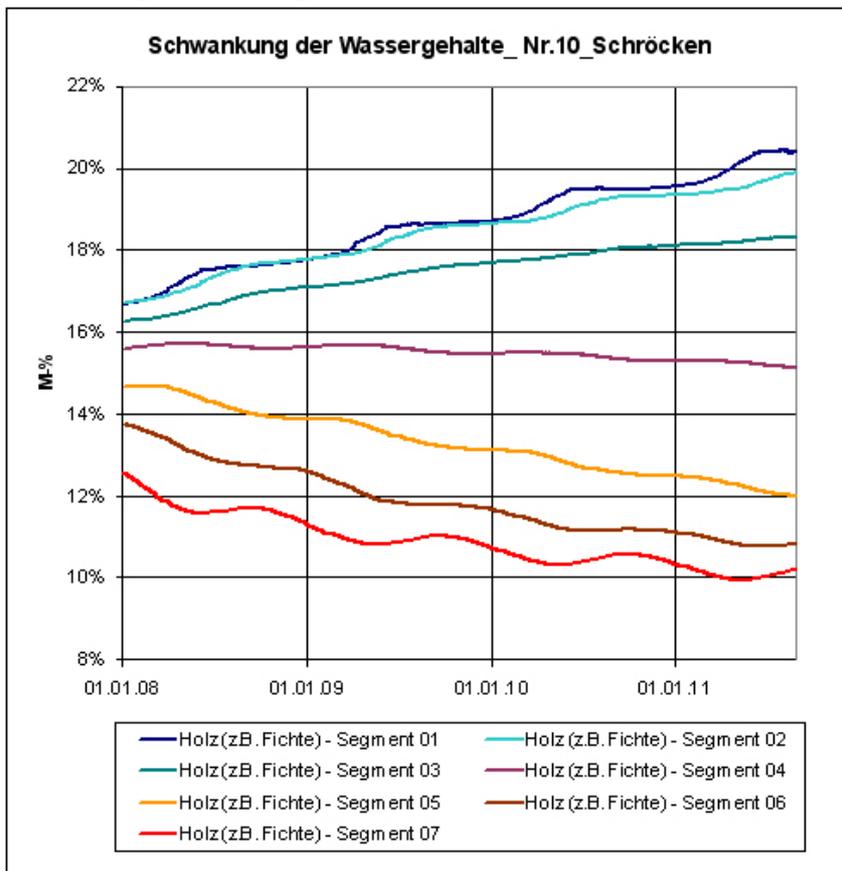


Diagramm 4.47: Schwankung der Wassergehalte der Segmente für Bauteilaufbau Nr. 10, beispielhaft für den Standort Schröcken (Berechnung mit WUFI)

*Fortsetzung: Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf  $\Delta u_m$*

Der Vergleich der Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf  $\Delta u_m$  der Segmente zeigt für die oberflächennahen Segmente (Segment 01 und 07) höhere Werte als für die Bereiche im Inneren des Trägers.

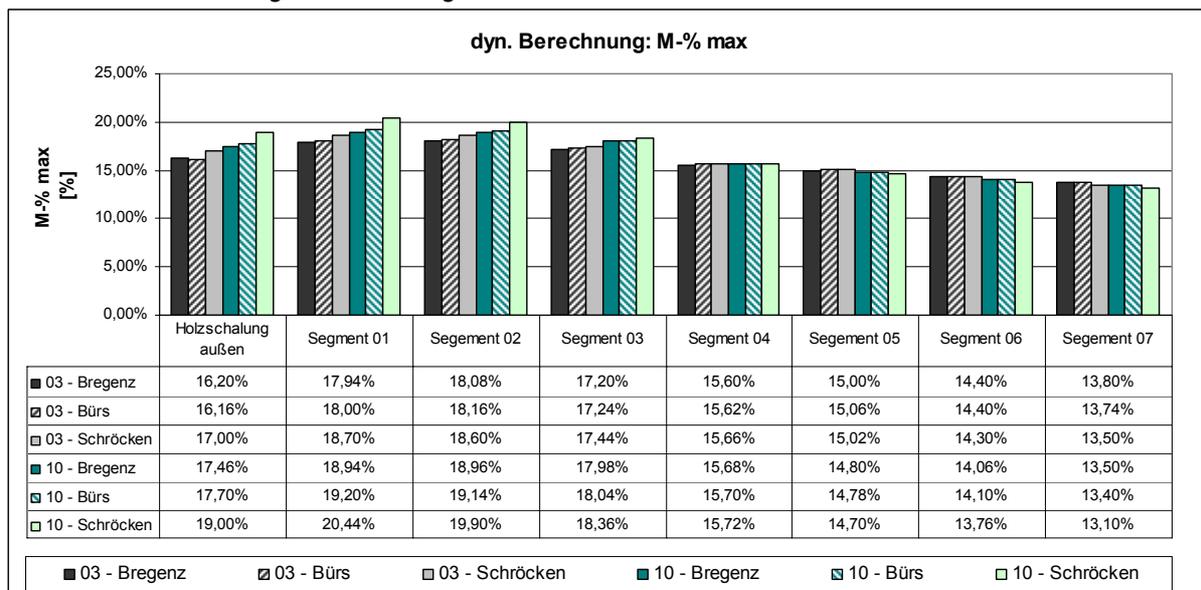
Der Träger muss also in den oberflächennahen Bereichen höhere Feuchteschwankungen aufnehmen als in der Mitte.

Weiters fällt auf, dass gleichzeitig mit dem Anstieg des Wassergehaltes im äußeren Segment (01) ein Absinken des Wassergehaltes im inneren Segment (07) auftritt und umgekehrt.

In den kühleren Monaten kommt es in Segment 01 (außen) zu einem Anstieg der Feuchtigkeit, in Segment 07 (innen) sinkt dagegen im gleichen Zeitraum der Wassergehalt. Während der wärmeren Jahreszeit tritt in Segment 07 (innen) ein Anstieg auf; gleichzeitig zeigt Segment 01 (außen) einen gleichbleibenden bzw. abnehmenden Wassergehalt.

Außerdem zeigt Diagramm 4.47 nochmals das unterschiedliche Langzeitverhalten der Wassergehalte der Segmente. Der Wassergehalt betrug zu Beginn der Rechnung für alle abgebildeten Segmente 15 M-%. Die äußeren Segmente tendieren zu einem Anstieg, die innenliegenden Segmente zu einer Abnahme des Wassergehaltes.

*Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-%*

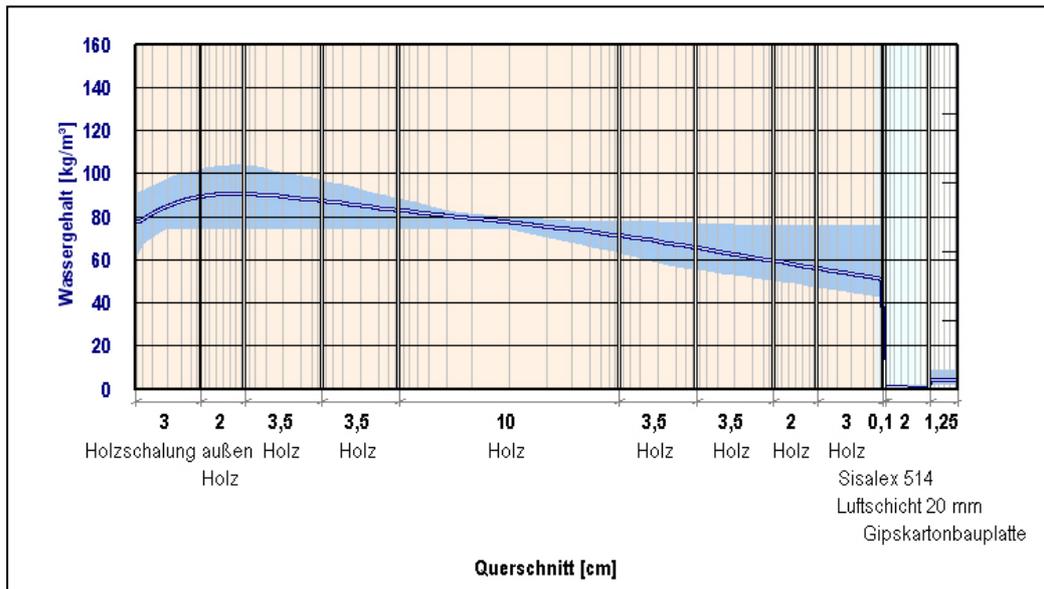


**Diagramm 4.48: Maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% der Segmente für die Bauteilaufbauten Nr. 03 und Nr. 10 (Berechnung mit WUFI)**

Der maximale massebezogene Feuchtegehalt weist in den untersuchten Segmenten zum Teil große Unterschiede auf. Für die außenliegenden Bereiche (Segment 01 bis 03) ergeben sich massebezogene Feuchtegehalte M-% zwischen 17,0 M-% und 20,0 M-%. Der Feuchtegehalt von Segment 01 von Bauteilaufbau Nr. 10 übersteigt für den Standort Schröcken sogar 20,0 M-%. Ab einer Holzfeuchte von 20,0 M-% ist lt. ÖNORM EN 335-1 die Entwicklung holzerstörerischer Pilze möglich. In den äußeren Segmenten – vor allem Segment 01 und 02 – stellen sich für beiden die untersuchten Bauteilaufbauten zum Teil Holzfeuchten ein, die nahe an diesen Grenzwert herankommen bzw. ihn übersteigen.

Die innenliegenden Bereiche (Segment 05 bis 07) weisen niedrigere Werte auf. Der massebezogene Feuchtegehalt M-% liegt hier zwischen 15,0 M-% und 13,0 M-%.

### Feuchteverteilung über den Querschnitt



**Abbildung 4.1: Verteilung des Wassergehaltes über den Querschnitt. Mittelwertkurve für Bauteilaufbau Nr. 10, Standort Schröcken. (Berechnung mit WUFI)**

Die Verteilung des Wassergehaltes über den Querschnitt zeigt ebenfalls die höheren Werte für die äußeren Bereiche (Holzschalung, Segment 01, Segment 02, Segment 03).

Das mittlere Segment (04) weist an der äußeren Seite höhere und an der inneren Seite niedrigere Wassergehalte auf.

Nach innen bis zur Dampfsperre (Sisalex 514) ergeben sich in Segment 05, Segment 06, Segment 07 und der inneren Holzschalung immer niedrigere Wassergehalte.

### *Zusammenfassung Trägerebene*

Zusammenfassend können durch detaillierte Analyse des Feuchteverhaltens der Trägerebene zwei wesentliche Punkte festgehalten werden:

1. *Wassergehalt im außenliegenden Randbereich des Trägers steigt an*

Es wurde festgestellt, dass in den äußeren Segmenten des Trägers ein langfristiger Anstieg des Wassergehaltes stattfindet. Dementsprechend ergeben sich auch hohe Werte für den massebezogenen Feuchtegehalt dieser Segmente.

Die innenliegenden Segmente weisen dagegen eine Tendenz zur längerfristigen Abnahme des Wassergehaltes auf. Der massebezogene Feuchtegehalt bleibt in den lt. ÖNORM zulässigen Bereichen.

2. *Schwankung des Wassergehaltes findet innen und außen gegengleich statt und ist in den Randbereichen des Trägers ausgeprägter*

Die Schwankung des Wassergehaltes findet an den oberflächennahen Bereichen außen und innen gegengleich statt. In den kühleren Monaten steigt der Wassergehalt im äußeren Segment (01) an und sinkt gleichzeitig im inneren Segment (07) ab. Während der warmen Jahreszeit kehrt sich diese Tendenz um.

Außerdem fällt auf, dass die Schwankung des Wassergehaltes in den Randbereichen (Segment 01 – außen, Segment 07 – innen) stärker ausgeprägt ist als in den in der Trägermitte liegenden Segmenten.

Holzbauteile reagieren auf Schwankungen der Holzfeuchte mit Formänderungen durch Schwinden und Quellen (Schulze 2005). Für die untersuchte Konstruktion wurde ein gleichzeitiger Anstieg des Wassergehaltes der äußeren Segmente mit der Abnahme des Wassergehaltes der inneren Segmente festgestellt. Das führt zu einer positiven Längenänderung des oberen Bereichs des Trägers und einer negativen Längenänderung im unteren Bereich.

Diese Verformung des Trägers erklärt die von Fachleuten beobachtete „Bewegung“ des untersuchten Dachaufbaus: In den Wintermonaten verformt sich die Konstruktion – im mittleren Bereich zwischen den Auflagern wölbt sich die Konstruktion nach oben. Dadurch kann der starre Anschluss von nichttragenden Zwischenwänden an die Innenoberfläche des Flachdachs reißen. Gonin, Weber und Blaser (Gonin et al. 2003) stellen bei ihrer Untersuchung eine Verformung von 10 – 15 mm bei einer Spannweite von 5,0 m fest.

#### 4.3.4 Einfluss der Materialeigenschaften auf die Berechnungsergebnisse

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss der Materialeigenschaften der Dämmung, der Dampfsperre und der Dachhaut auf die Berechnungsergebnisse untersucht.

Bei den untersuchten Aufbauten handelt es sich um ausgeführte Flachdächer – es wurde keine systematische Untersuchung mit unterschiedlichen Materialzusammenstellungen durchgeführt. Die Materialien wurden in den entsprechenden Zusammenstellungen ausgeführt. Bei der Auswertung wird versucht, durch die Materialkennwerte beeinflusste Zusammenhänge hervorzuheben.

Eine Zusammenfassung der Einflüsse der Materialien befindet sich in Kapitel 4.3.4.5.

##### 4.3.4.1 Dämmmaterial

Für die untersuchten Bauteilaufbauten wurden drei verschiedene Dämmstoffe verwendet: Mineralwolle (Überbegriff für Steinwolle und Glaswolle), Zellulose und EPS (expandiertes Polystyrol).

Das Material Mineralwolle ist für die untersuchten Aufbauten das häufigste verwendete Dämmmaterial – es wurden 19 Bauteilaufbauten mit diesem Dämmstoff ausgeführt.

Fünf Aufbauten wurden mit Zellulosedämmung ausgeführt.

Das Dämmmaterial EPS wurde nur für einen der untersuchten Bauteilaufbauten verwendet. Es ist grundsätzlich nicht empfehlenswert, die Dämmung zwischen Trägern bzw. Stehern im Holzleichtbau mit diesem Material auszuführen, weil es aufgrund seiner Steifigkeit die Verformungen des Holztragwerkes nicht mitmacht und daher zwischen Holz und Dämmung ungedämmte Spalten entstehen können (Schulze 2005). Aus diesen Gründen wurde der Einfluss des Dämmmaterials EPS nicht näher untersucht.

Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre  $\Delta u'_m$

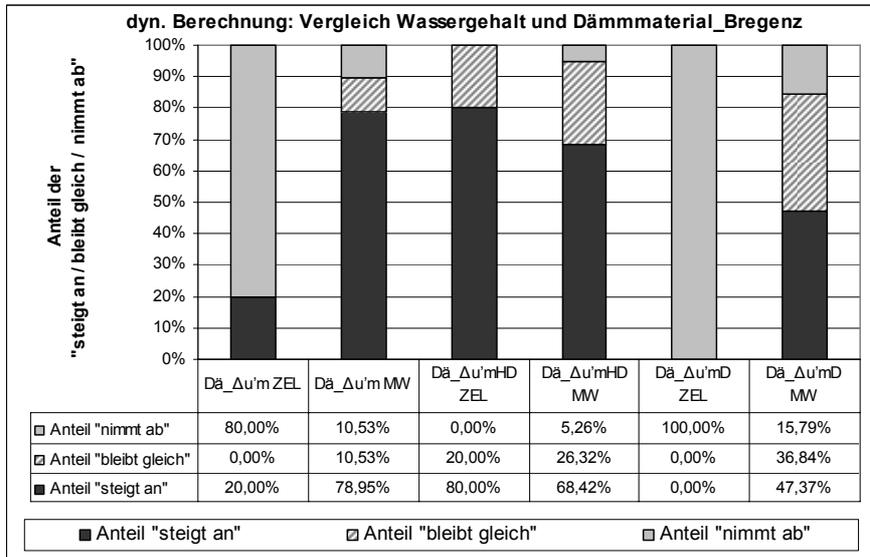


Diagramm 4.49

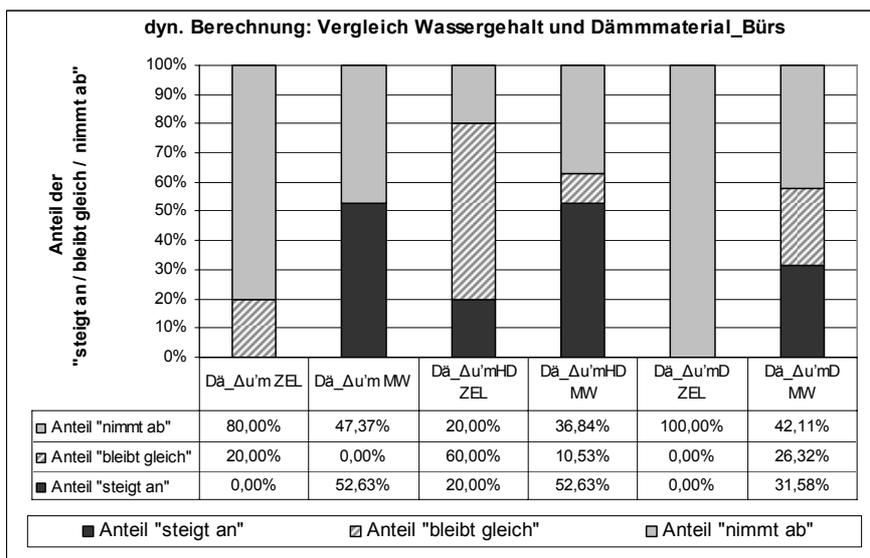


Diagramm 4.50

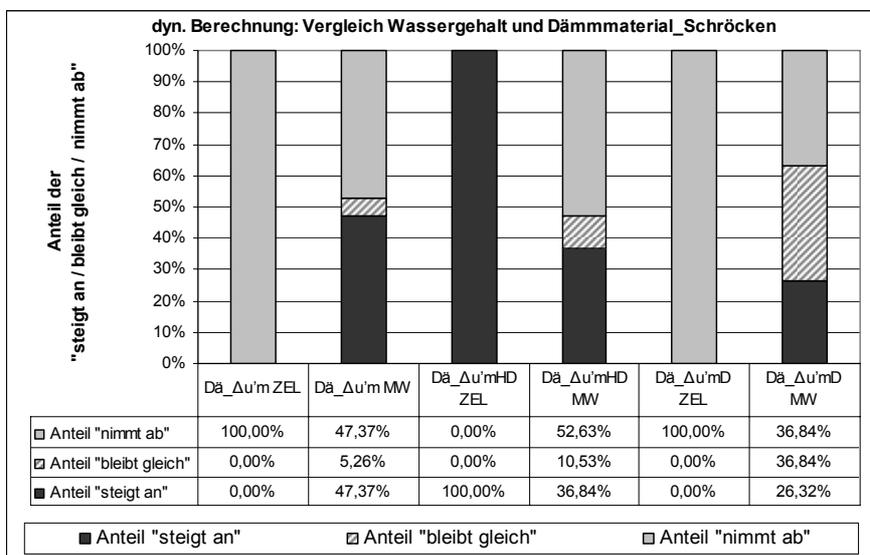


Diagramm 4.51

### Verhalten des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre $\Delta u'_m$

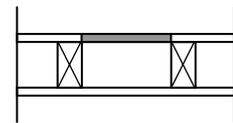
Für den Standort Bregenz zeigt einer der Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung einen Anstieg von  $\Delta u'_m$  ( $D\ddot{a}\_ \Delta u'_m$  ZEL). Die anderen vier untersuchten Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung weisen einen abnehmenden Gesamtwassergehalt über vier Jahre auf.

Von den Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung zeigen beinahe 80% einen Anstieg von  $\Delta u'_m$  ( $D\ddot{a}\_ \Delta u'_m$  MW) für den Standort Bregenz. Nur jeweils ca. 10% der untersuchten Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung weisen einen gleichbleibenden bzw. abnehmenden  $\Delta u'_m$  auf.

Für die Standorte Bürs und Schröcken ergibt sich – unter Berücksichtigung der Tatsache, dass grundsätzlich für mehr Bauteilaufbauten ein abnehmender Gesamtwassergehalt über vier Jahre ermittelt wurde – ein ähnliches Bild: Der  $\Delta u'_m$  zeigt für Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung eine abnehmende Tendenz – für Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung ergibt sich für ca. die Hälfte der Aufbauten eine Abnahme und für die Hälfte ein Anstieg von  $\Delta u'_m$ .

### Verhalten des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung über vier Jahre $\Delta u'_{m,HD}$

Die äußere Holzschalung zeigt für Bregenz bei ca. 80% der Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung ( $D\ddot{a}\_ \Delta u'_{m,HD}$  ZEL) und bei ca. 70% der Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung ( $D\ddot{a}\_ \Delta u'_{m,HD}$  MW) einen Anstieg des Wassergehaltes über vier Jahre auf.



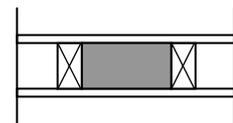
Für den Standort Bürs ergibt sich bei mehr als der Hälfte der Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung ein gleichbleibender  $\Delta u'_{m,HD}$ . Für die Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung erweist sich der  $\Delta u'_{m,HD}$  bei mehr als die Hälfte der untersuchten Aufbauten ansteigend.

Für den Standort Schröcken weisen alle untersuchten Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung einen über vier Jahre ansteigenden Wassergehalt der Holzschalung auf. Für die Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung ergibt sich nur bei knapp 37% der Aufbauten ein ansteigender  $\Delta u'_{m,HD}$ .

Es muss berücksichtigt werden, dass das Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung auch von den Materialeigenschaften der Dachhaut und der Dampfsperre beeinflusst werden kann. Für einen Rückschluss der Eigenschaften des Dämmmaterials auf das Feuchteverhalten der Holzschalung sind daher noch andere Parameter zu analysieren.

### Verhalten des Wassergehaltes der Dämmung über vier Jahre $\Delta u'_{m,D}$

Die Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung zeigen bei allen untersuchten Bauteilaufbauten für die drei Standorte einen abnehmenden  $\Delta u'_{m,D}$  ( $D\ddot{a}\_ \Delta u'_{m,D}$  ZEL).



Für die Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung wurde für den Standort Bregenz bei knapp der Hälfte der Aufbauten ein ansteigender  $\Delta u'_{m,D}$  ermittelt ( $D\ddot{a}\_ \Delta u'_{m,D}$  MW). Für Bürs und Schröcken ergibt sich mit ca. 30% bzw. ca. 26% bei weniger Aufbauten mit Mineralwolldämmung ein Anstieg des Wassergehaltes der Mineralwolldämmung über vier Jahre.

### Zusammenfassung Verhalten der Wassergehalte über vier Jahre

Es wurde festgestellt, dass die Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung in allen drei Klimastandorten tendenziell einen abnehmenden Gesamtwassergehalt und einen abnehmenden Wassergehalt der Dämmung über vier Jahre aufweisen.

Für die Standorte Bregenz und Schröcken ergab sich für prozentuell mehr Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung ein ansteigender Wassergehalt der Holzschalung über vier Jahre als für die untersuchten Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung.

Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf  $\Delta u_m$

Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u_{m,D}$

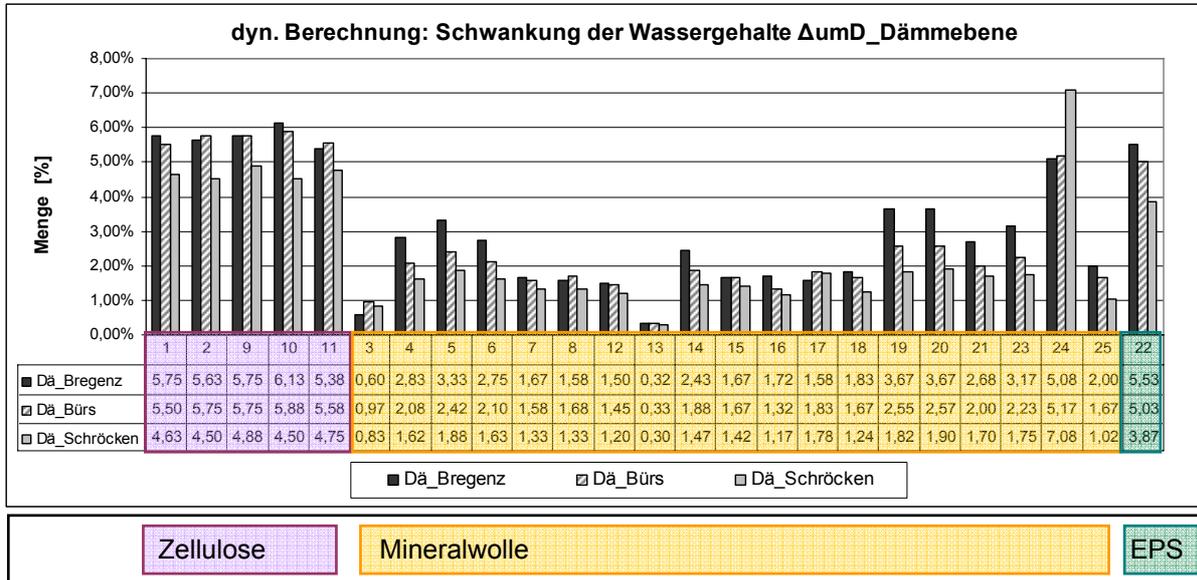
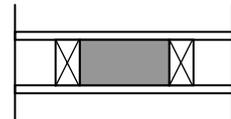


Diagramm 4.52: Schwankung der Wassergehalte der Dämmung  $\Delta u_{m,D}$  (Berechnung mit WUFI)

Die Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung im Jahresverlauf  $\Delta u_{m,D}$  liegt bei allen Bauteilaufbauten mit Zellsulosedämmung für alle Standorte über dem Grenzwert von 3,0 % gemäß ÖNORM B 8110-2.

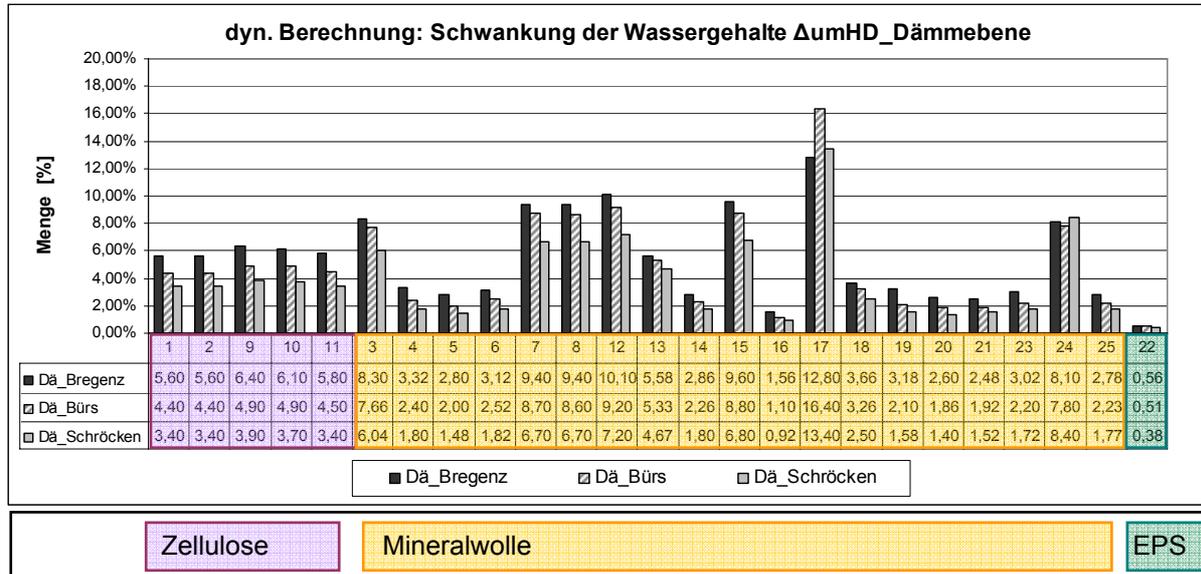
Auch von den Bauteilaufbauten mit Mineralwoll dämmung überschreiten einige den Grenzwert von 3%. Die Schwankung  $\Delta u_{m,D}$  liegt jedoch für alle Standorte bei mehr als 70% der untersuchten Bauteilaufbauten unter der 3% – Marke.



Krus und Sedlbauer (Krus, Sedlbauer 2004) stellten fest, dass Mineralwolle zu höheren Schwankungen im Jahresverlauf tendiert als Zellulose. Durch die Feuchtepufferung reagiert Zellulose träger als Mineralwolle.

Die hier festgestellte geringere Schwankungshöhe des Wassergehaltes der Mineralwoll dämmung gegenüber der Zellsulosedämmung in nicht hinterlüfteten Flachdachaufbauten im Holzbau ist umso bedeutender.

**Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u_{m,HD}$**

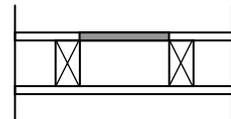


**Diagramm 4.53: Schwankung der Wassergehalte der Holzschalung in der Dämmebene  $\Delta u_{m,HD}$  (Berechnung mit WUFI)**

Die Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung  $\Delta u_{m,HD}$  liegt bei allen untersuchten Bauteilaufbauten mit Zellsulosedämmung für alle Standorte über 3 %.

Für die Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung liegt  $\Delta u_{m,HD}$  je nach Standort bei 30,0 % bis 57,0 % der Aufbauten unter 3 %.

Für die Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung, die den Grenzwert gemäß ÖNORM B 8110-2 überschreiten, ergeben sich jedoch zum Teil sehr hohe Werte für  $\Delta u_{m,HD}$ .



Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-%

Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Dämmung

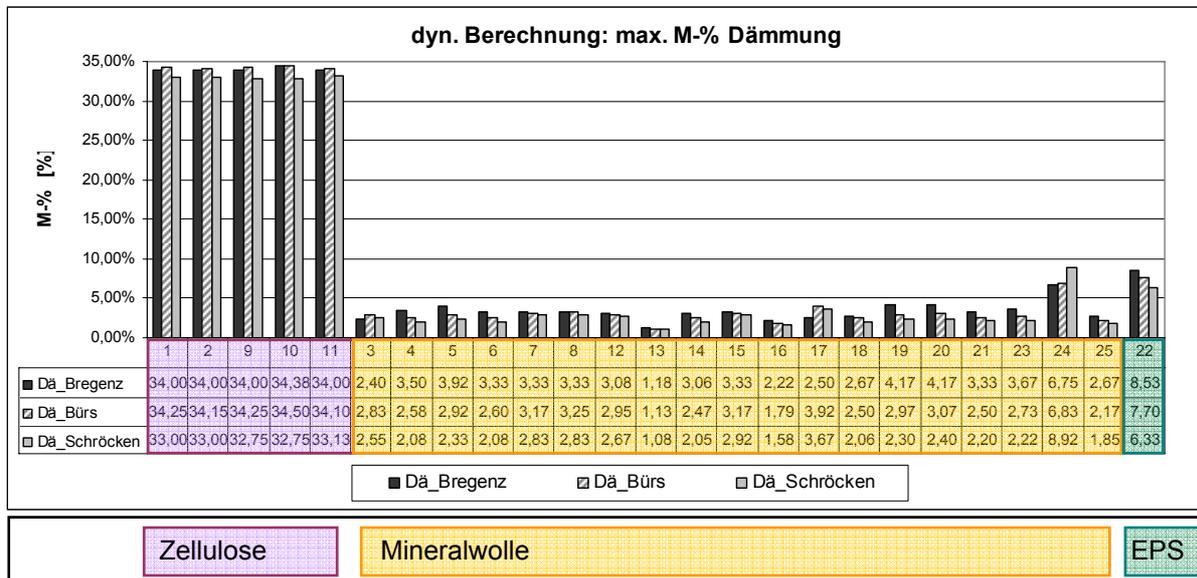
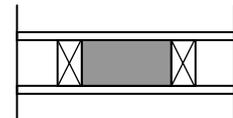


Diagramm 4.54: Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Dämmung (Berechnung mit WUFI)

Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Zellulosedämmung erreicht für alle untersuchten Bauteilaufbauten Werte über 30,0 %. Dies entspricht gemäß der Sorptionsisotherme von Zellulose einer relativen Luftfeuchtigkeit über 80,0%. Für fast alle Schimmelpilzarten herrschen somit ausreichende Wachstumsbedingungen (Reiß 1988).

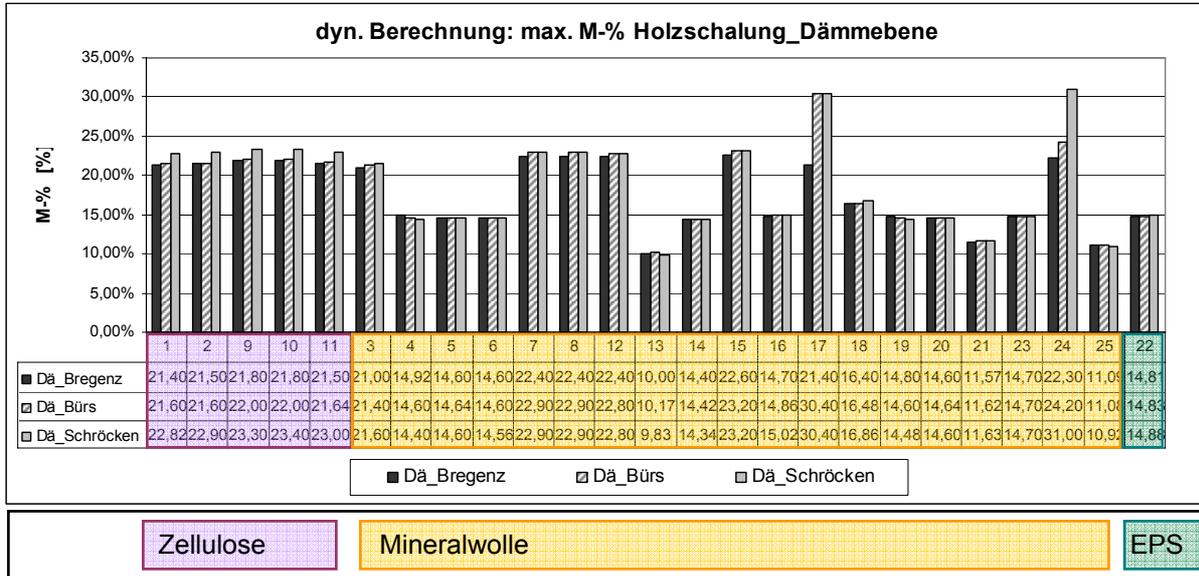


Für die Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung ergeben sich wesentlich niedrigere massebezogene Feuchtegehalte für das Dämmmaterial. Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt jedoch wie für die Zellulosedämmung häufig über 80,0%.

Die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Hohlkastenelements ist nicht direkt vom Dämmmaterial abhängig. Bei der Auswahl des Dämmstoffes sollte aber auf dessen Verhalten im Fall einer hohen Feuchtebelastung und seine Schimmelresistenz geachtet werden.

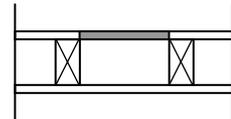
Zu der gleichen Empfehlung kommen auch Gonin, Weber und Blaser (Gonin et al. 2003) bei ihrer Untersuchung von Hohlkastenelementen.

### Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Holzschalung

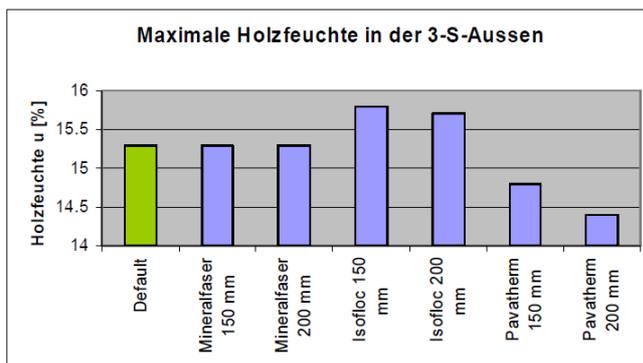


**Diagramm 4.55: Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Holzschalung in der Dämmebene (Berechnung mit WUFI)**

Gemäß ÖNORM EN 335-1 ist ab einem massebezogenen Feuchtegehalt von Holzbauteilen von 20 M-% die Entwicklung holzerstörerischer Pilze möglich. Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Holzschalung beträgt bei allen Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung für alle Standorte mehr als 20 M-%.



Für die Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung ergibt sich für alle Standorte jeweils nur bei ca. 40 % der Aufbauten ein maximaler massebezogener Feuchtegehalt M-% der Holzschalung über 20 M-%. Der max. M-% der Holzschalung liegt somit bei ca. 60% der Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung innerhalb des lt. ÖNORM zulässigen Bereichs.



**Diagramm 4.56: Abbildung 16 aus: (Gonin et al. 2003, p 49)**

Auch Gonin, Weber und Blaser haben bei ihrer Untersuchung festgestellt, dass die maximale Holzfeuchte der äußeren Holzschalung für Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung über den Werten für Mineralwolle liegt (Gonin et al. 2003).

### *Zusammenfassung Dämmmaterial*

Der Unterschied der Berechnungsergebnisse für Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung und Bauteilaufbauten mit Mineralwolldämmung ist vor allem für die Dämmschicht sehr ausgeprägt:

Für die Bauteilaufbauten mit Zellulosedämmung wurde zwar für den Wassergehalt eine Tendenz festgestellt, längerfristig abzunehmen. Die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf liegt bei diesem Dämmmaterial aber für alle Standorte über dem lt. Norm zulässigen Wert. Dadurch stellt sich auch ein hoher massebezogener Feuchtegehalt ein.

Es wurde auch festgestellt, dass der massebezogene Feuchtegehalt der Holzschalung über Zellulosedämmung für alle untersuchten Aufbauten den lt. Norm zulässigen Grenzwert überschreitet.

Unter Verwendung des Dämmmaterials Mineralwolle stellen sich für das längerfristige Verhalten des Wassergehaltes, für die Schwankung des Wassergehaltes und für den massebezogenen Feuchtegehalt unterschiedliche Ergebnisse ein. Auch die Holzschalung über der Mineralwolldämmung verhält sich verschieden. Es wird davon ausgegangen, dass dieses Verhalten von anderen Materialeigenschaften (Dachhaut, Dampfsperre) verursacht wird.

Für die Auswahl des Dämmmaterials wird empfohlen, auf das Verhalten des Materials unter Feuchtebelastung und auf seine Schimmelresistenz zu achten.

#### 4.3.4.2 $s_d$ -Wert der Dampfsperre

In der vorliegenden Arbeit wurden 25 ausgeführte Bauteilaufbauten untersucht. Für die Aufbauten wurden verschiedenste Dampfsperren /-bremsen verwendet. Im Folgenden soll der Einfluss des  $s_d$ -Wertes der Dampfsperre auf das Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus untersucht werden.

Von den 25 Aufbauten wurden 24 mit Dampfsperren ausgebildet – ÖNORM B 7220 schreibt für Dächer mit Abdichtungen einen  $s_d$ -Wert  $\geq 130\text{m}$  vor. (Definition Dampfsperre bzw. Dampfbremse siehe Kapitel 2.1)

Zur leichteren Vergleichbarkeit wurden die Bauteilaufbauten in Gruppen nach  $s_d$ -Wert der Dampfsperre /-bremse eingeteilt:

Gruppe a:  $s_d$ -Wert über 1700m

Gruppe b:  $s_d$ -Wert zwischen 370m und 655m

Gruppe c:  $s_d$ -Wert zwischen 150m und 240m

Gruppe d:  $s_d$ -Wert unter 10m

Gruppe d wird nicht detaillierter untersucht, weil nur ein Aufbau (Dachaufbau Nr. 24) über die entsprechenden Werte verfügt.

Verhalten des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre  $\Delta u'_m$

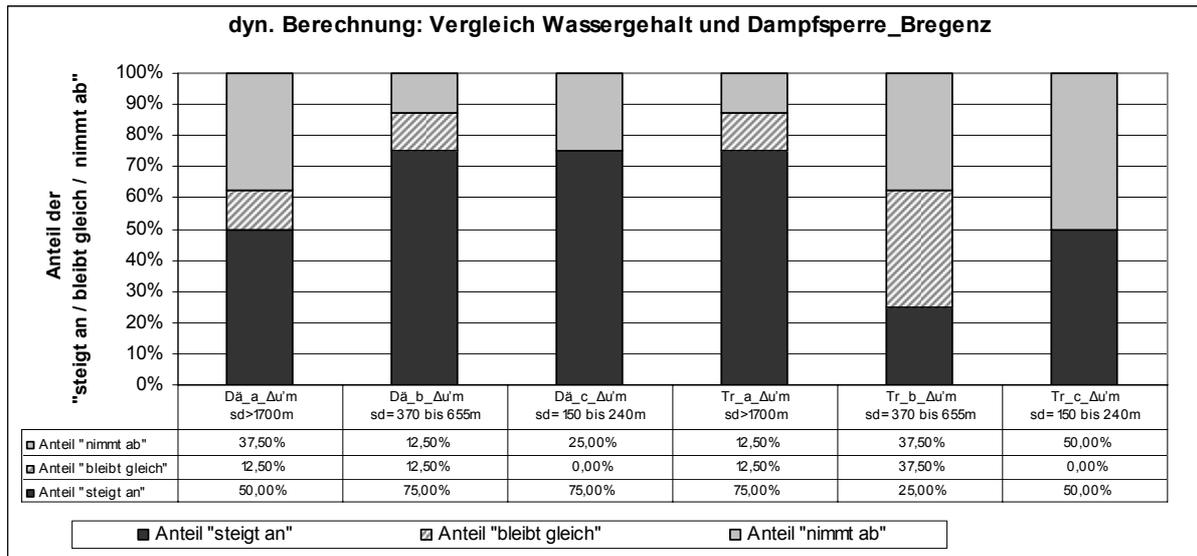


Diagramm 4.57: Verhalten des Gesamtwassergehaltes der Bauteilaufbauten je nach Dampfsperre für den Standort Bregenz (Berechnung mit WUFI)

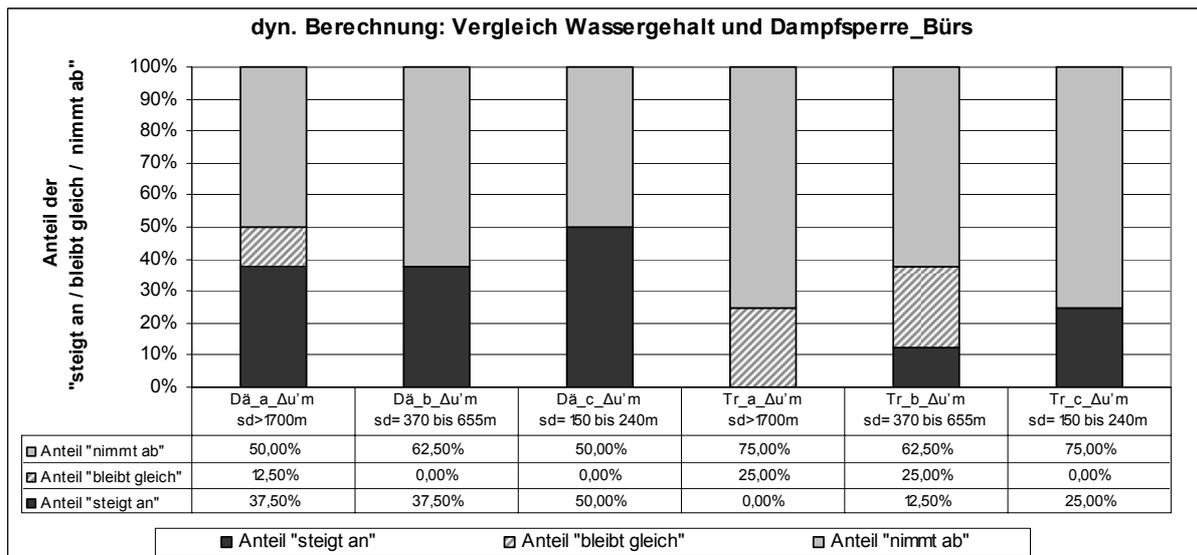


Diagramm 4.58: Verhalten des Gesamtwassergehaltes der Bauteilaufbauten je nach Dampfsperre für den Standort Bürs (Berechnung mit WUFI)

Für den Standort Bregenz zeigt sich in der Dämmebene bei den Bauteilaufbauten der Gruppe a ein stärkeres Austrocknungspotential als bei den Bauteilaufbauten mit niedrigeren  $s_d$ -Werten. In der Trägerebene dagegen weisen für den Standort Bregenz mehr Bauteilaufbauten aus Gruppe a einen Anstieg des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre auf als Bauteilaufbauten aus Gruppe b und c.

Auch für den Standort Bürs zeichnet sich kein eindeutiger Einfluss der Dampfsperre auf die langfristige Veränderung des Gesamtwassergehaltes ab:

Es ergeben sich zwar für die Bauteilaufbauten der Gruppe a in beiden Ebenen weniger ansteigende Gesamtwassergehalte  $\Delta u'_m$  als für Gruppe b bzw. Gruppe c. Die Differenz zwischen den Gruppen ist jedoch gering und könnte auch durch andere Materialeigenschaften hervorgerufen werden.

Veränderung des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre  $\Delta u'_m$

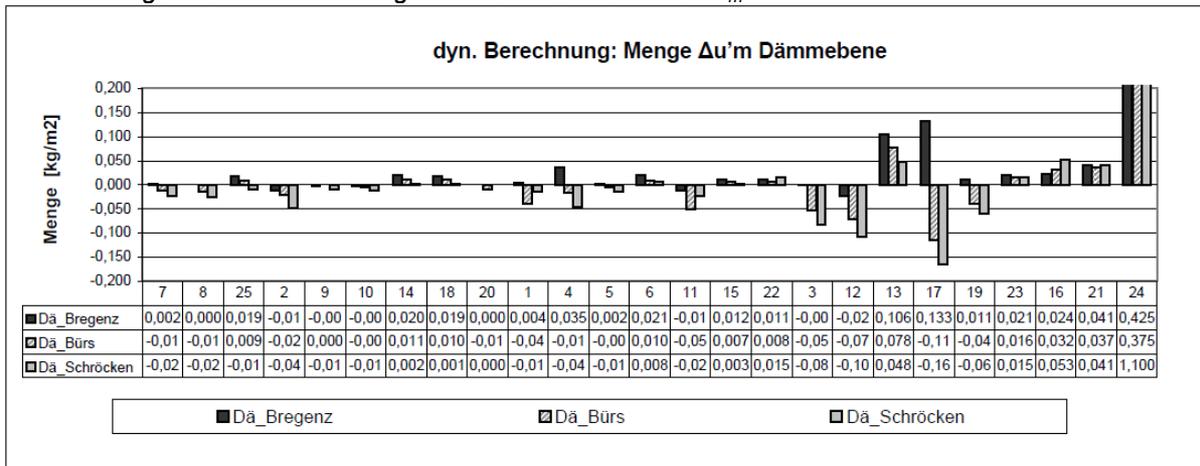


Diagramm 4.59: Veränderung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u'_m$  in der Dämmebene geordnet nach dem  $s_d$ -Wert der Dampfsperre /-bremse vom höchsten zum niedrigsten Wert.

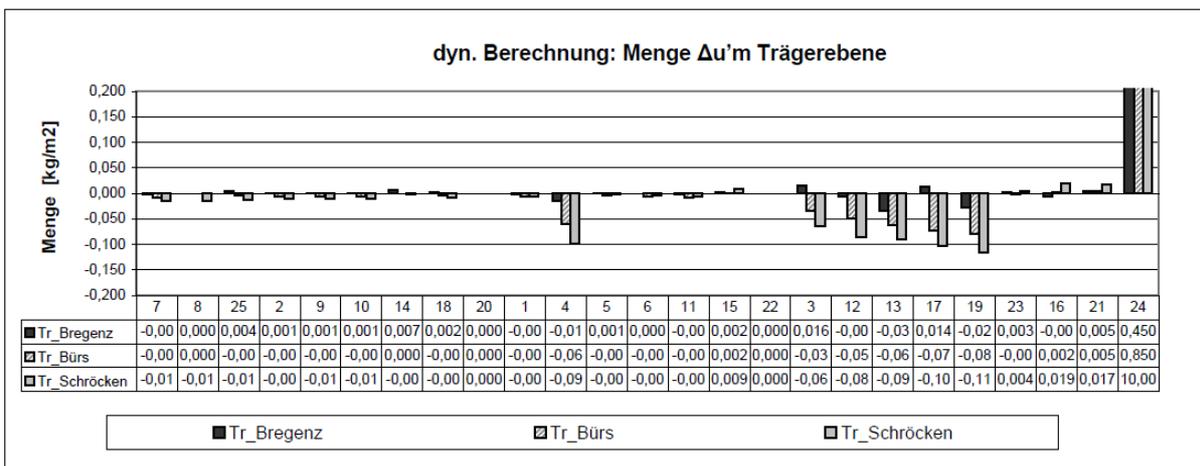


Diagramm 4.60: Veränderung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u'_m$  in der Trägerebene geordnet nach dem  $s_d$ -Wert der Dampfsperre /-bremse vom höchsten zum niedrigsten Wert.

Wie bereits oben analysiert, kann keine eindeutige Einflussnahme des  $s_d$ -Wertes der Dampfsperre auf das langfristige Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten festgestellt werden.

Bei Analyse der Menge der Veränderung des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre fällt auf, dass die Anstiegsmenge bzw. die Menge der Abnahme für Bauteile mit geringeren  $s_d$ -Werten der Dampfsperre tendenziell höher ist.

Bauteil Nr. 24 ist der einzige Aufbau in Gruppe d und wurde aufgrund der speziellen Einbausituation und der daraus resultierenden Eigenheiten bei der Analyse nicht berücksichtigt.

Es konnte kein direkter Zusammenhang zwischen dem  $s_d$ -Wert der Dampfsperre/-bremse und der Schwankung, dem M-% max und den hygrothermischen Zuständen festgestellt werden. Andere Materialkomponenten spielen eine größere Rolle, die untersuchten Bauteilaufbauten liefern keine eindeutige Aussage.

#### *Zusammenfassung $s_d$ -Wert der Dampfsperre*

Die Analyse des Feuchteverhaltens und des  $s_d$ -Wertes der Dampfsperre ergibt für die untersuchten Bauteil提高bauten keinen signifikanten Zusammenhang.

Gonin, Weber und Blaser (Gonin et al. 2003) stellten in ihrem Forschungsbericht zu Hohlkastenelementen jedoch fest, dass für eine gedämmte Hohlkastenkonstruktion als Flachdach bei einem sehr niedrigen  $s_d$ -Wert der inneren Bauteilschicht eine Veränderung des  $s_d$ -Wertes dieser Schicht eine starke Auswirkung auf das Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus bewirkt. Die Untersuchung von Gonin, Weber und Blaser bezieht sich auf  $s_d$ -Werte der inneren Bauteilschicht zwischen 2,0 m und 12,0 m.

ÖNORM B 7220 schreibt für Dächer mit Abdichtungen einen  $s_d$ -Wert  $\geq 130$  m vor.

Die Frage nach dem  $s_d$ -Wert der Dampfsperre /-bremse ist nach wie vor unbeantwortet. Die Einführung einer möglichst auf die Dachhaut abgestimmten Dampfsperre erscheint sinnvoll. Dadurch werden aber relativ hohe  $s_d$ -Werte für die Dampfsperre erreicht, die ein Austrocknen der Konstruktion nach innen vermindern.

In Kapitel 5 wird das Feuchteverhalten von Multibox-Dachkonstruktionen unter Verwendung von feuchtevariablen und feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremsen untersucht.

#### 4.3.4.3 $s_d$ -Wert der Dachhaut

Als Materialien für die Dachhaut können bituminöse Abdichtungen, EPDM (Kautschuk), Kunststoffbahnen und Metallabdichtungen unterschieden werden. Die Kunststoffbahnen werden in polyolefine Abdichtungen und Abdichtungen aus PVC unterteilt.

Da der  $s_d$ -Wert eine der Materialeigenschaft der Dachhaut mit der hauptsächlichen Auswirkung auf die Berechnung ist und bei der Eingabe des Materials im Programm WUFI nur der  $s_d$ -Wert berücksichtigt wurde, wird die Einteilung der Dachhaut nach dem  $s_d$ -Wert vorgenommen und nicht nach dem Folienmaterial.

Grundsätzlich ist jedoch anzumerken, dass die Kunststoffbahnen aus PVC niedrige  $\mu$ -Werte aufweisen (durchschnittliches  $\mu=18.538,46$ , entspricht bei  $d=0,0018$  m einem  $s_d$ -Wert von 33,37 m). Kunststoffbahnen aus Polyolefinen haben dagegen höhere  $\mu$ -Werte (durchschnittliches  $\mu=151.578,95$ , entspricht bei  $d=0,0018$  m einem  $s_d$ -Wert von 272,84 m). (Siehe Anhang A2, A3) Die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  der Abdichtungen aus EPDM hängt vor allem von den weiteren Bestandteilen der Dachhaut ab und variiert je nach Hersteller. Die bituminösen Abdichtungen weisen niedrige  $\mu$ -Werte auf – durch die zweilagige Ausführung und die erreichte Schichtdicke erlangen sie jedoch  $s_d$ -Werte im Bereich von 280,00 m.

Eine weitere Gruppe von Abdichtungen bilden Dachabdichtungen aus Blech, deren  $\mu$  und  $s_d$ -Werte im Vergleich zu den anderen Abdichtungen sehr hoch sind. Da in dieser Arbeit nur ein Bauteilaufbau mit Kupferblech untersucht wurde, wird auf die Analyse des Einflusses dieser Abdichtungsart auf die Berechnungsergebnisse verzichtet.

Für die Untersuchung des Einflusses der Dachhaut auf die Berechnungsergebnisse werden die Bauteilaufbauten in drei Gruppen unterteilt:

Gruppe 1:  $s_d$ -Wert der Dachhaut 33 m bis 70 m

Gruppe 2:  $s_d$ -Wert der Dachhaut 279 m bis 310 m

Gruppe 3:  $s_d$ -Wert der Dachhaut 6000 m

Gruppe 3 wird nicht untersucht, weil nur ein Bauteilaufbau in diese Gruppe fällt (Kupferblech). Für die Bereiche des  $s_d$ -Wertes der Dachhaut unter 33 m bzw. zwischen 70 m und 279 m liegen keine untersuchten Bauteilaufbauten vor.

Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre  $\Delta u'_m$

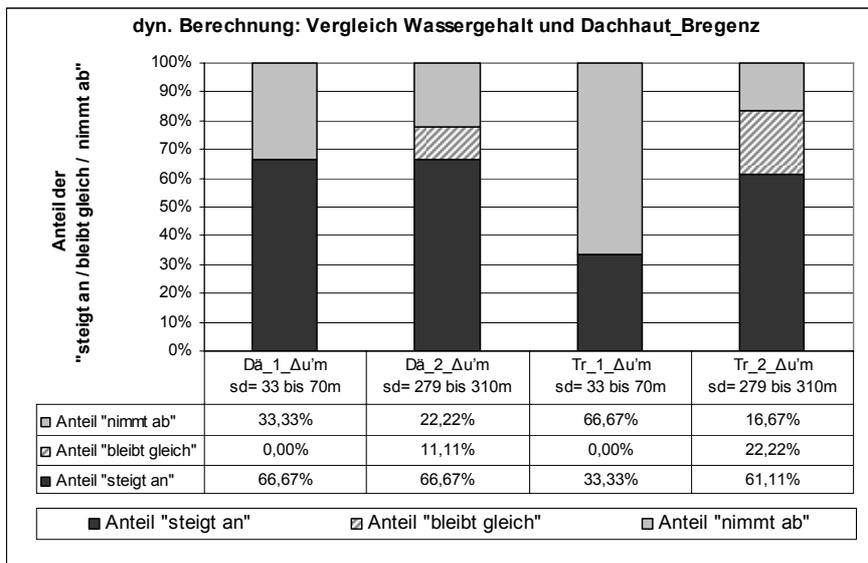


Diagramm 4.61

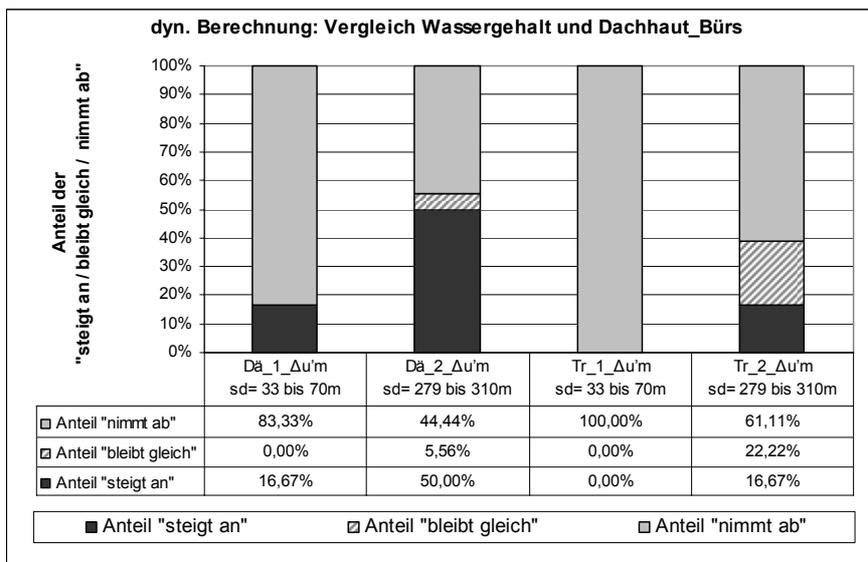


Diagramm 4.62

**Verhalten des Gesamtwassergehaltes in der Dämmebene über vier Jahre  $\Delta u'_m$**

Für den Standort Bregenz ergeben sich in der Dämmebene für Gruppe 1 und Gruppe 2 bei ca. 67 % der Bauteilaufbauten ansteigende Gesamtwassergehalte.

Für den Standort Bürs haben grundsätzlich weniger Bauteilaufbauten einen langfristig ansteigenden Gesamtwassergehalt.

Eine deutlich geringere Anzahl der Bauteilaufbauten mit ansteigendem  $\Delta u'_m$  zeigt sich aber für Gruppe 1 in der Dämmebene:

Während Gruppe 2 für Bürs nur eine etwas geringere Anzahl von Bauteilaufbauten mit ansteigendem  $\Delta u'_m$  aufweist (Bregenz 67 %, Bürs 50 %), ergeben sich in Gruppe 1 für den Standort Bürs nur bei 17 % der Bauteilaufbauten ansteigende  $\Delta u'_m$  (Bregenz 67 %).

Die Ursache dafür muss einerseits aus den Klimabedingungen herrühren und andererseits direkt mit dem  $s_d$ -Wert der Dachhaut in Verbindung stehen.

In Kapitel 4.3.1 wurde bereits festgestellt, dass ein wesentlicher Unterschied der Klimadaten in den Strahlungssummen liegt. Das lässt den Rückschluss zu, dass bei geringerem  $s_d$ -Wert der Außenoberfläche des Bauteilaufbaus die Austrocknung nach außen durch die Einwirkung der Strahlung stärker erfolgen kann.

### Verhalten des Gesamtwassergehaltes in der Trägerebene über vier Jahre $\Delta u'_m$

In der Trägerebene weisen am Standort Bregenz in Gruppe 1 nur halb so viele Bauteilaufbauten einen ansteigenden Gesamtwassergehalt über vier Jahre auf wie in Gruppe 2.

Für den Standort Bürs wird für die Trägerebene in beiden Gruppen ebenfalls eine geringere Anzahl an Bauteilaufbauten mit ansteigendem Gesamtwassergehalt festgestellt.

In Gruppe 1 wurden am Standort Bregenz bei 33 % der Bauteilaufbauten ansteigende  $\Delta u'_m$  ermittelt. Für Bürs ergaben sich in der gleichen Gruppe ausschließlich Bauteilaufbauten mit abnehmendem Gesamtwassergehalt über vier Jahre.

Gruppe 2 verhält sich in der Trägerebene ähnlich wie in der Dämmebene: Es ergeben sich für den Gesamtwassergehalt für Bregenz bei 61 % der Bauteilaufbauten ansteigende  $\Delta u'_m$  und für Bürs bei 17 % der Bauteilaufbauten.

Um die Tendenz des abnehmenden oder ansteigenden Gesamtwassergehaltes besser einschätzen zu können, wird für die Trägerebene auch die Menge der Veränderung analysiert.

### Veränderung des Gesamtwassergehaltes in der Trägerebene über vier Jahre $\Delta u'_m$

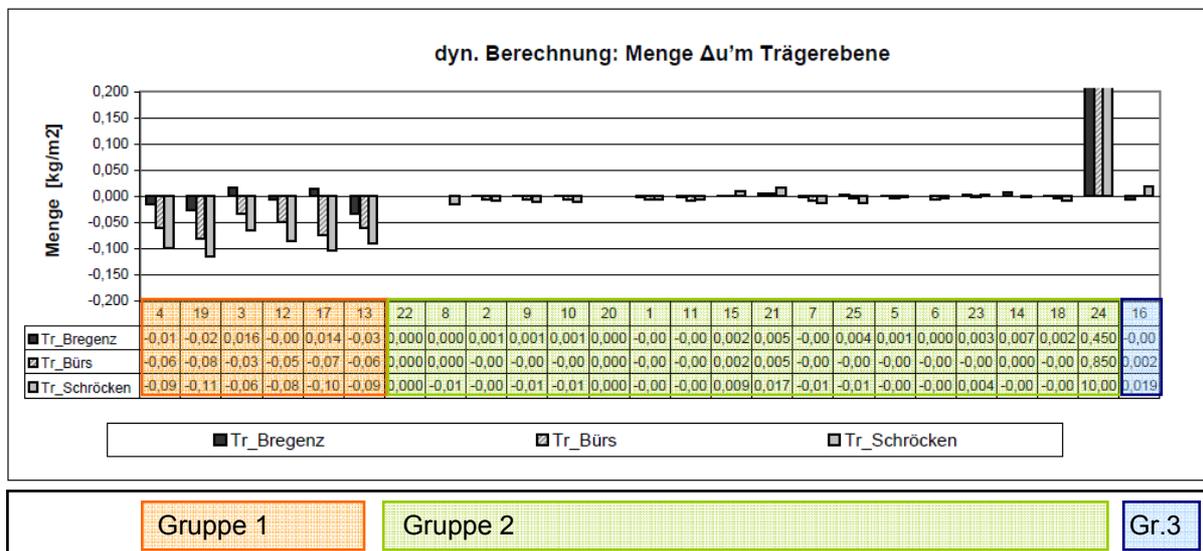


Diagramm 4.63: Veränderung des Gesamtwassergehaltes  $\Delta u'_m$  in der Trägerebene geordnet nach dem  $s_d$ -Wert der Dachhaut vom niedrigsten zum höchsten Wert.

In Gruppe 1 ( $s_d$ -Wert zwischen 33 m und 70 m) zeigt die Veränderung des Gesamtwassergehaltes der Trägerebene über vier Jahre  $\Delta u'_m$  für den Standort Bürs deutlich niedrigere Werte als für den Standort Bregenz.

In Gruppe 2 bewegen sich die Werte von  $\Delta u'_m$  in der Trägerebene eng um den Nullpunkt: Die Werte für einen langfristigen Anstieg sowie die Werte für eine Abnahme des Gesamtwassergehaltes sind vergleichsweise niedrig. Bauteilaufbau Nr. 24 stellt wieder eine Ausnahme aufgrund des  $s_d$ -Wertes der Dampfbremse dar und wird daher bei der Analyse nicht berücksichtigt.

Der Vergleich der Höhe der Veränderung des Gesamtwassergehaltes der Trägerebene über vier Jahre  $\Delta u'_m$  von Gruppe 1 und Gruppe 2 zeigt für Bürs in Gruppe 1 deutlich höhere Abnahmen als in Gruppe 2.

Es kann daher für die Trägerebene die gleiche Aussage getroffen werden, wie für die Dämmebene: Aufgrund der höheren Strahlungssummen für den Standort Bürs erfolgt bei einem niedrigeren  $s_d$ -Wert der Dachhaut vermehrt eine Austrocknung des Bauteilaufbaus nach außen.

#### Zusammenfassung $s_d$ -Wert / Dachhaut

Für Bauteilaufbauten mit einer Dachhaut mit niedrigem  $s_d$ -Wert wurde eine stärkere Tendenz eines längerfristig abnehmenden Gesamtwassergehaltes festgestellt.

Für die Ausführung der Dachhaut des untersuchten Aufbaus wird daher empfohlen ein Material mit niedrigem  $s_d$ -Wert zu verwenden, um die Austrocknung des Bauteilaufbaus nach außen zu erleichtern.

#### 4.3.4.4 Strahlungsabsorption und -emission der Dachhaut

Neben dem  $s_d$ -Wert ergeben sich aufgrund anderer Materialeigenschaften der Folien unterschiedliche Strahlungsabsorptions- und Strahlungsemissionszahlen.

Der Absorptionsgrad  $\alpha$  wird vorwiegend von der Oberflächenfarbe beeinflusst, während der Strahlungsemissionsgrad  $\epsilon$  vor allem von der Oberflächenbeschaffenheit (glänzend, matt) abhängt.

Da von den Herstellern keine Angaben zu diesen Werten vorliegen, in DIN V 4108-6 nur Angaben zum Strahlungsabsorptionsgrad einiger Baustoffe gemacht werden und für Strahlungsemissionszahlen in der Literatur nur wenige Angaben gefunden werden können (siehe Kapitel 1.2.3.4), wurden für alle Berechnungen einheitliche Werte verwendet:

- kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl: 0,4
- langwellige Strahlungsemissionszahl: 0,9

Im Folgenden werden die Berechnungen, denen die oben angeführten Absorptions- und Emissionswerte zugrunde liegen, als *Variante A* bezeichnet.

Es wurde bereits in Kapitel 4.3.1 festgestellt, dass die Außenklimabedingungen einen großen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben. Von den Klimafaktoren Temperatur, Feuchte, Strahlung und Wind beeinflusst insbesondere die Strahlung das Feuchteverhalten der untersuchten Bauteilaufbauten.

Zur genaueren Analyse des Einflusses der Strahlung auf das Feuchteverhalten der untersuchten Konstruktion, wurde für die Bauteilaufbauten Nr. 03 und Nr. 10 eine zweite Berechnung mit geänderten Strahlungsabsorptions- und Strahlungsemissionszahlen durchgeführt.

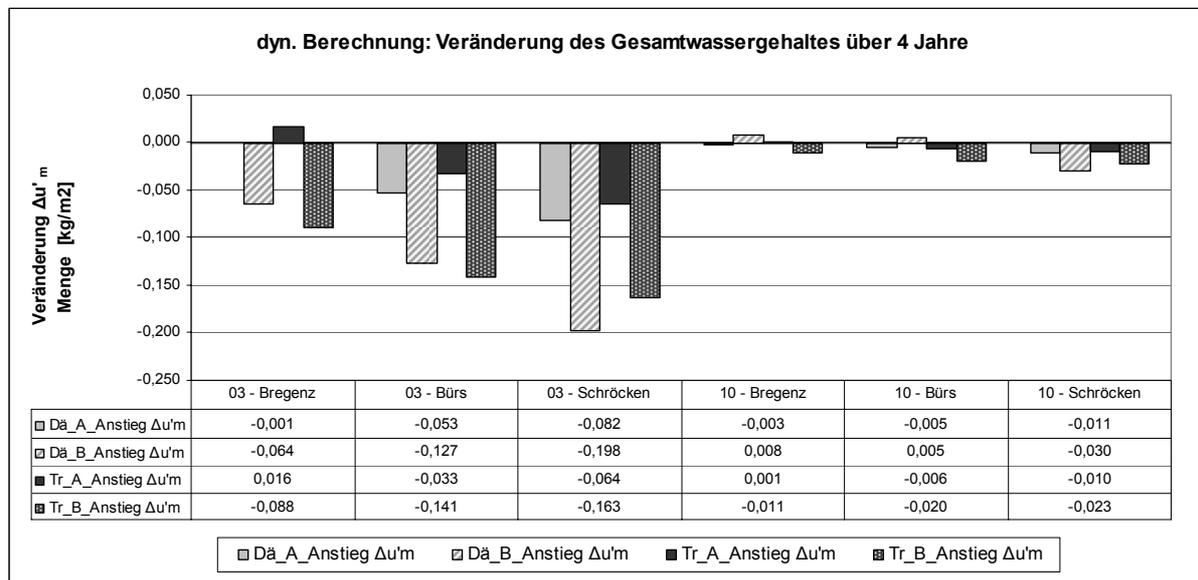
Die geänderten Werte entsprechen den höchsten in der DIN V 4108-6 und der Literatur angeführten Werten für die Strahlungsabsorption und -emission:

- kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl: 0,8
- langwellige Strahlungsemissionszahl: 0,97

Die Berechnungen mit diesen Werten für die Absorption und Emission werden im Folgenden *Variante B* genannt.

Veränderung der Wassergehalte über vier Jahre  $\Delta u'_m$

Veränderung des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre  $\Delta u'_m$



**Diagramm 4.64: Veränderung des Gesamtwassergehaltes von Bauteilaufbau Nr. 03 und Nr. 10 für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken (Berechnung mit WUFI)**

Für den Gesamtwassergehalt der untersuchten Bauteilaufbauten wurde bei verstärkter Strahlungsabsorption und Strahlungsemission der äußersten Bauteilschicht (Dachhaut) ein stärkeres Abnehmen über einen Zeitraum von vier Jahren festgestellt.

Das zeigt sich vor allem für die Gesamtwassergehalte des Bauteilaufbaus Nr. 03 in der Dämmebene und in der Trägerebene.

Bauteilaufbau Nr. 03 und Nr. 10 unterscheiden sich durch das Dämmmaterial und die Dachhaut: Aufbau Nr. 03 wurde mit Mineralwolle gedämmt, die Dachhaut weist einen  $s_d$ -Wert der Gruppe 1 ( $s_d$ -Wert der Dachhaut 33 m bis 70 m) auf.

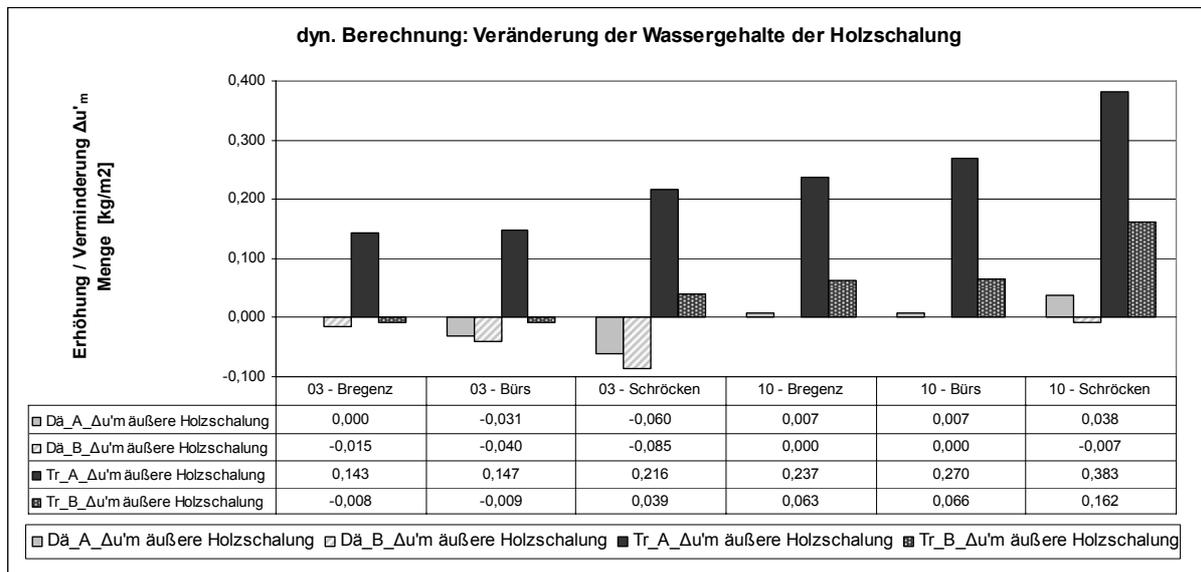
Aufbau Nr. 10 besitzt eine Dämmung aus Zellulose und eine Dachhaut der Gruppe 2 ( $s_d$ -Wert der Dachhaut 279 m bis 310 m).

Aufgrund des ähnlichen Verhaltens von Dämmebene und Trägerebene wird der verstärkte Einfluss der veränderten Strahlungs-Randbedingungen auf die Berechnungsergebnisse für Aufbau Nr. 03 auf den niedrigen  $s_d$ -Wert der Dachhaut zurückgeführt.

Auch für Bauteilaufbau Nr. 10 zeigt sich bei der zweiten Berechnung für den Standort Schröcken und für die Standorte Bregenz und Bürs in der Trägerebene ein verstärktes Abnehmen des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre.

Aufgrund des höheren  $s_d$ -Wertes der Dachhaut bleibt die Abnahme jedoch gering.

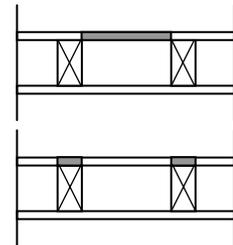
### Veränderung der Wassergehalte der Holzschalung über vier Jahre $\Delta u'_{m,HD}$ und $\Delta u'_{m,HT}$



**Diagramm 4.65: Veränderung des Wassergehaltes der Holzschalung von Bauteilaufbau Nr. 03 und Nr. 10 für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken (Berechnung mit WUFI)**

Das Verhalten des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung zeigt sowohl in der Dämmebene als auch in der Trägerebene eine starke Reaktion auf die geänderte Strahlungsabsorption und -emission:

Die Werte von Variante B für  $\Delta u'_{m,HD}$  und  $\Delta u'_{m,HT}$  liegen für die beiden untersuchten Bauteilaufbauten für alle Standorte unter den Werten für Variante A.



Für die Dämmebene ergeben sich bei Variante B für alle Standorte abnehmende bzw. gleichbleibende Wassergehalte über vier Jahre  $\Delta u'_{m,HD}$ .

Bei Bauteilaufbau 03 kann für die Standorte Bregenz und Bürs auch in die Trägerebene ein negativer Wert für  $\Delta u'_{m,HT}$  festgestellt werden.

Für den Standort Schröcken weist die Holzschalung von Aufbau 03 jedoch auch für Variante B einen über vier Jahre ansteigenden Wassergehalt auf.

Bauteilaufbau 10 zeigt für die Trägerebene zwar für die Berechnung mit geänderter Strahlungsabsorptionszahl und Strahlungsemissionszahl positive Werte für  $\Delta u'_{m,HT}$  – der Anstieg ist aber wesentlich geringer als für die erste Berechnung.

Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf  $\Delta u_m$

Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf  $\Delta u_m$

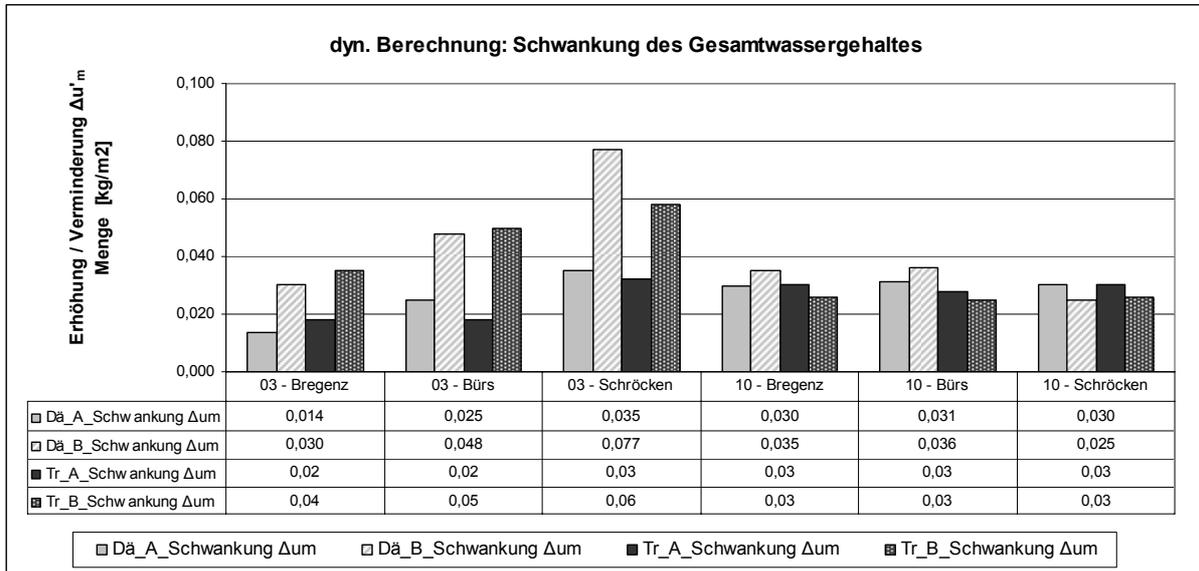


Diagramm 4.66: Schwankung des Gesamtwassergehaltes von Bauteilaufbau Nr. 03 und Nr. 10 für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken (Berechnung mit WUFI)

Die Schwankung des Gesamtwassergehaltes zeigt für den Bauteilaufbau mit niedrigem  $s_d$ -Wert der Dachhaut (Bauteilaufbau Nr. 03) für die Berechnung mit erhöhter Strahlungsabsorptions- und Strahlungsemissionszahl deutlich höhere Werte.  
Bauteilaufbau Nr. 10 weist für Variante B nur eine geringe Änderung der Schwankungen auf.

Zur Bewertung der Veränderung der Schwankung wird auch die Feuchteverteilung über den Querschnitt herangezogen (siehe unten).

Der maximale massebezogene Feuchtegehalt  $M\%$  max der äußeren Holzschalung

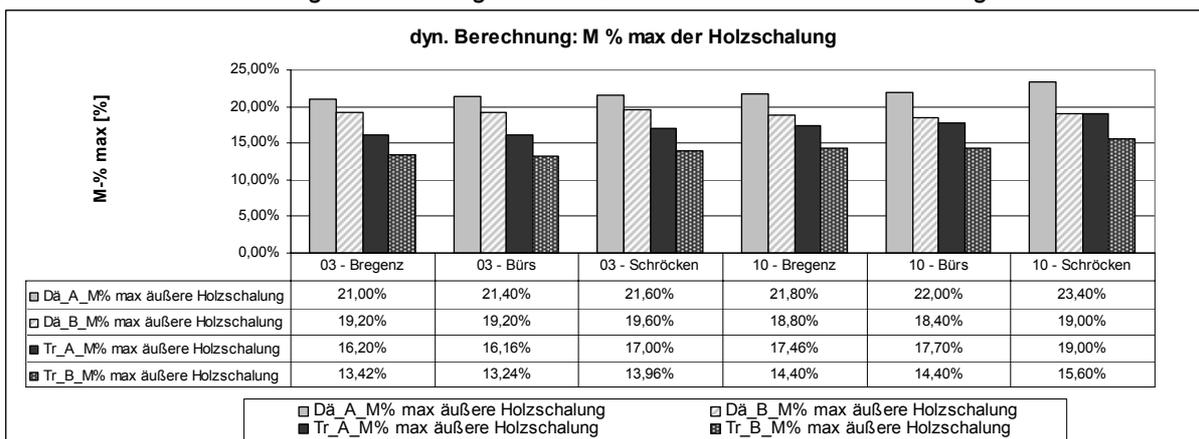
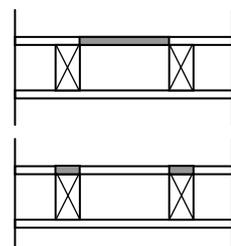


Diagramm 4.67: Der maximale massebezogene Feuchtegehalt  $M\%$  der äußeren Holzschalung der Bauteilaufbauten Nr. 03 und Nr. 10 für die Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken (Berechnung mit WUFI)

Die Gegenüberstellung der maximalen massebezogenen Feuchtigkeit  $M\%$  der äußeren Holzschalung für Variante A und B zeigt, dass die max.  $M\%$  bei einer stärkeren Strahlungsabsorption und -emission niedriger liegt.  
Für die grenzwertigen Feuchtegehalte der Holzschalung in der Dämmebene von Variante A wurden mit Variante B in allen Fällen Werte unter 20  $M\%$  erreicht.



### Feuchteverteilung über den Querschnitt

#### Feuchteverteilung über den Querschnitt in der Dämmebene – Aufbau Nr. 03

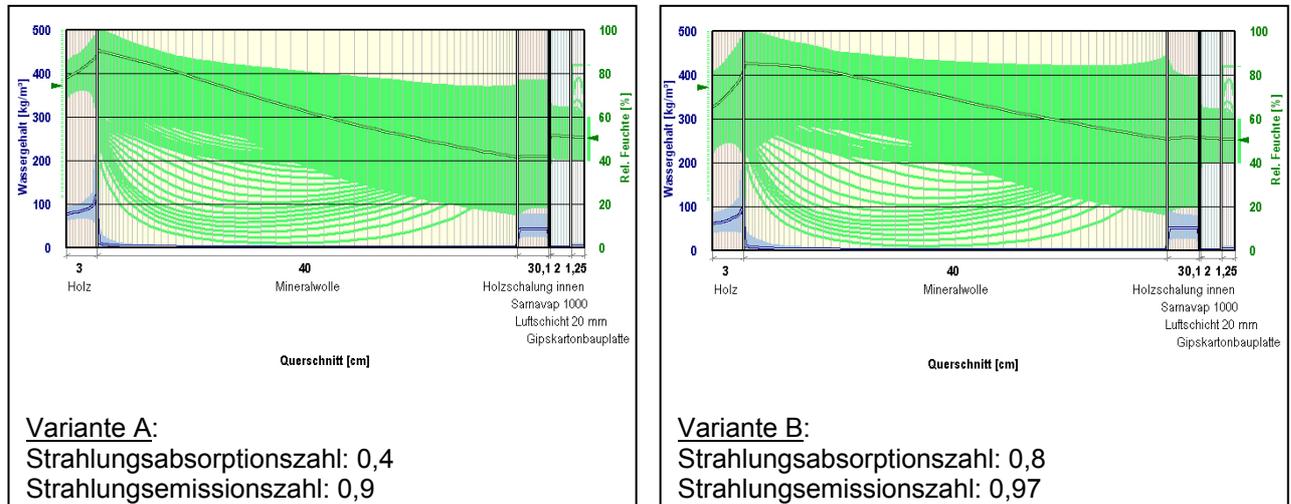
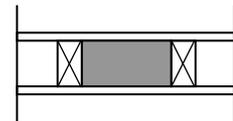


Abbildung 4.2: Mittelwertkurven über das Bauteilprofil, Dämmebene, Aufbau Nr. 03 (Berechnung mit WUFI)

Bauteilaufbau Nr. 03 ist mit einer 40cm starken Dämmschicht aus Mineralwolle gedämmt und hat eine Dachhaut der Gruppe 1 ( $s_d$ -Wert der Dachhaut 33 m bis 70 m).



Die Änderung der Strahlungsabsorptionszahl und der Strahlungsemissionszahl bewirkt vor allem im äußeren Bereich des Bauteilaufbaus ein geändertes Feuchteverhalten. Die äußere Holzschalung weist an der äußeren Oberfläche geringere Maximalwerte des Wassergehaltes auf. Für die Mineralwolldämmung ergibt sich für Variante B eine flachere Mittelwertkurve über das Bauteilprofil.

### Feuchteverteilung über den Querschnitt in der Dämmebene – Aufbau Nr. 10

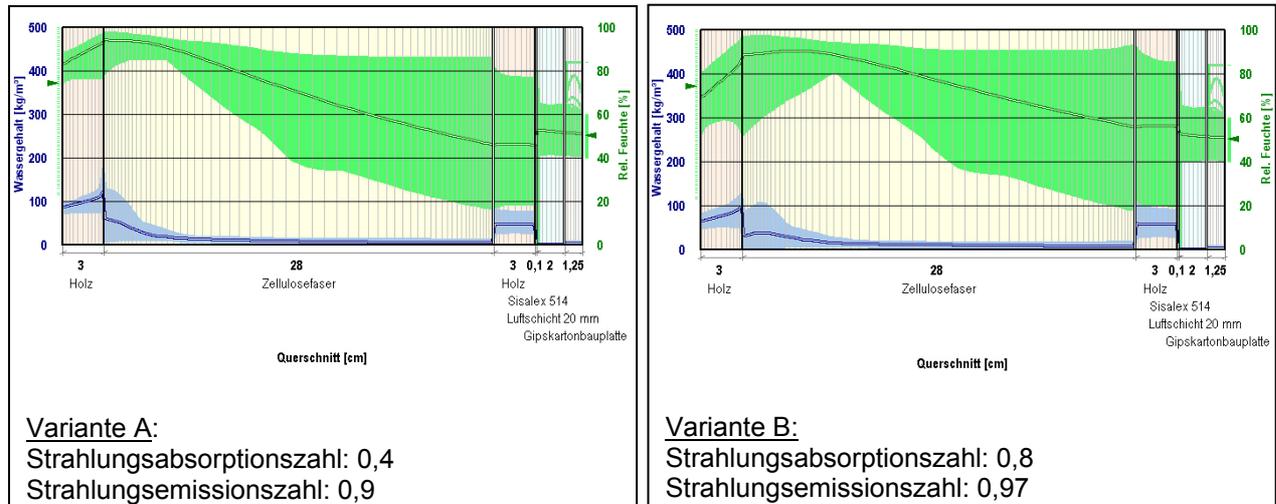
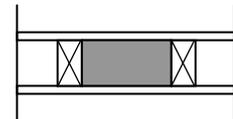


Abbildung 4.3: Mittelwertkurven über das Bauteilprofil, Dämmebene, Aufbau Nr. 10 (Berechnung mit WUFI)

Für Bauteilaufbau Nr. 10 wurde Zellulosedämmung verwendet. Die Dachhaut entspricht Gruppe 2 ( $s_d$ -Wert der Dachhaut 279m bis 310m).



Auch für Aufbau Nr. 10 zeigt sich in der Profildarstellung eine unterschiedliche Feuchteverteilung für die Berechnung mit geänderter Strahlungsabsorptions- und Strahlungsemissionszahl. Die äußeren Bereiche des Bauteilaufbaus sind am stärksten von der veränderten Feuchteverteilung betroffen.

Die äußere Holzschalung weist vor allem im äußeren Oberflächenbereich einen niedrigeren Wassergehalt auf. Der Mittelwert des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung liegt auch aufgrund der niedrigeren Minimalwerte für Variante B deutlich niedriger.

Die Zellulosedämmung zeigt aufgrund der höheren Sorptionsfähigkeit und Feuchtespeicherung vor allem im Bauteilinneren geringere Feuchteschwankungen als die Mineralwolldämmung. (Krus, Sedlbauer 2004)

Bei geänderten Rahmenbedingungen der Strahlungsabsorption und -emission ergibt sich auch für die Zellulosedämmung eine flachere Mittelwertkurve der relativen Feuchte über den Bauteilquerschnitt. Außerdem fällt auf, dass für die Zellulosedämmung für Variante B im äußeren Randbereich auch ein geringerer mittlerer Wassergehalt auftritt als für Variante A.

### Feuchteverteilung über den Querschnitt in der Trägerebene

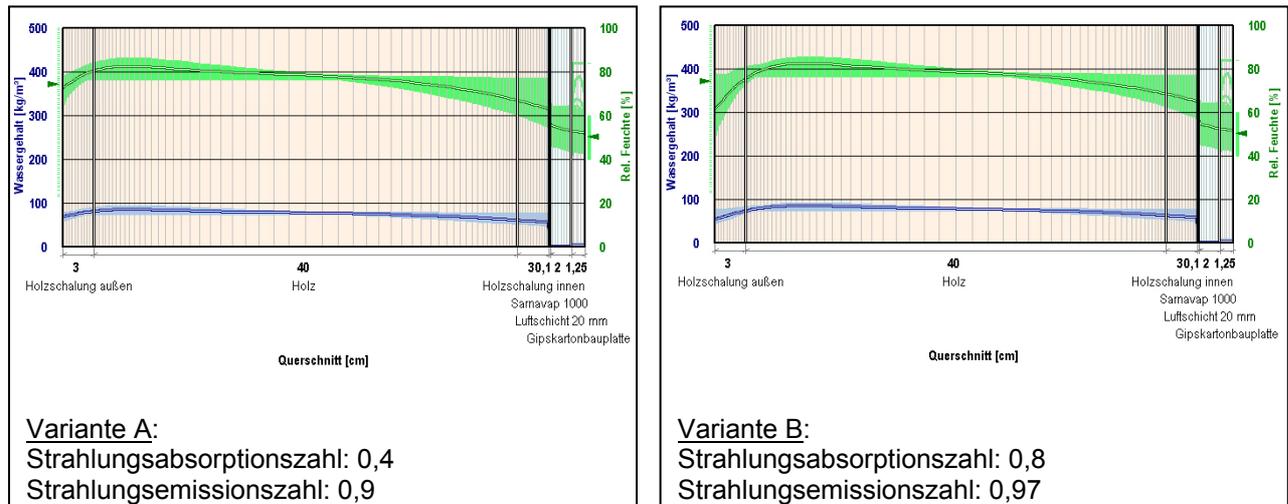
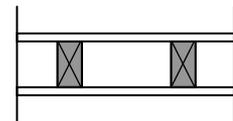


Abbildung 4.4: Mittelwertkurven über das Bauteilprofil, Trägerebene, Aufbau Nr. 03 (Berechnung mit WUFI)

Für die Feuchteverteilung über den Bauteilquerschnitt in der Trägerebene ergeben sich bei geänderter Strahlungsabsorption und -emission ähnliche Veränderungen wie für die Dämmebene:



Die Schwankungsbreite des Wassergehaltes im äußeren Randbereich der äußeren Holzschalung ist deutlich höher. Die Maximalwerte von Variante A werden jedoch nicht überschritten, sondern es ergeben sich für den Feuchtegehalt auch niedrigere Werte als für Variante A. Die Mittelwertkurve der relativen Feuchte über den Querschnitt des Trägers fällt für Variante B flacher aus. Vor allem an der Berührungsfläche mit der äußeren Holzschalung treten niedrigere Werte für die relative Feuchte auf.

Es kann festgestellt werden, dass für die Berechnungen mit geänderten Strahlungs-Rahmenbedingungen zwar höhere Schwankungen der Feuchte auftreten. Die Maximalwerte werden jedoch nicht überschritten. Es findet eine Verschiebung der Minimalwerte statt.

### Überwiegt der Einfluss der Absorption oder der Emission?

Es wurde gezeigt, dass die Veränderung der beiden Parameter Strahlungsabsorption und Strahlungsemission der äußeren Bauteiloberfläche einen wesentlichen Einfluss auf das Feuchteverhalten von Multibox-Aufbauten hat. Dabei ist nicht klar, ob die Ursache an der Absorptionsfähigkeit der Dachhaut oder an ihrer Emissionszahl liegt.

Um zu eruieren, welcher Faktor den Haupteinfluss hat, wurde die Einwirkung des Absorptionsgrades  $\alpha$  und des Emissionsgrades  $\epsilon$  auf die Strahlungslufttemperaturen verglichen. Abbildung 4.5 und 4.6 zeigen die exemplarische Berechnung von Tagesverläufen von Strahlungslufttemperaturen für Bregenz im Januar und im Juli basierend auf unterschiedlichen Absorptionsgraden  $\alpha$  und des Emissionsgraden  $\epsilon$  der Oberfläche.

Es zeigt sich, dass der Emissionsgrad  $\epsilon$  nur eine geringe Verschiebung der Strahlungslufttemperatur bewirkt. Eine Änderung des Absorptionsgrades  $\alpha$  hingegen verursacht entscheidende Veränderungen der Strahlungslufttemperatur. Im Januar kann in Bregenz die Oberflächenfarbe der Dachhaut (bestimmt den Absorptionsgrad  $\alpha$ ) eine Verschiebung der maximalen Strahlungslufttemperatur eines Tages von 3,0 K bewirken. Die Oberflächenstruktur (Emissionsgrad  $\epsilon$ ) dagegen kann nur eine Verschiebung von 0,3 K bewirken.

Im Sommermonat Juli liegt die Einflussnahme der Oberflächenstruktur (Emissionsgrad  $\epsilon$ ) ebenfalls bei 0,3 K. Der Absorptionsgrad  $\alpha$  kann im Juli in Bregenz die Strahlungslufttemperatur sogar um 14,0 K verändern.

Die hauptsächliche Einflussnahme der Strahlung wird also vom Absorptionsgrad  $\alpha$  bestimmt, der je nach Farbe der Oberfläche variiert. Der Absorptionsgrad  $\alpha$  bestimmt im Bauwesen die Absorption der Strahlung im energetisch wirksamen Spektrum der solaren Strahlung.

Das Feuchteverhalten der untersuchten Multibox-Aufbauten wird einerseits von der Oberflächenfarbe Dachhaut und andererseits von der Menge der auftreffenden solaren Strahlung beeinflusst. Die Abstrahlung durch Emission im langwelligen Spektrum hat dagegen nur eine geringere Einwirkung auf das hygrothermische Verhalten.

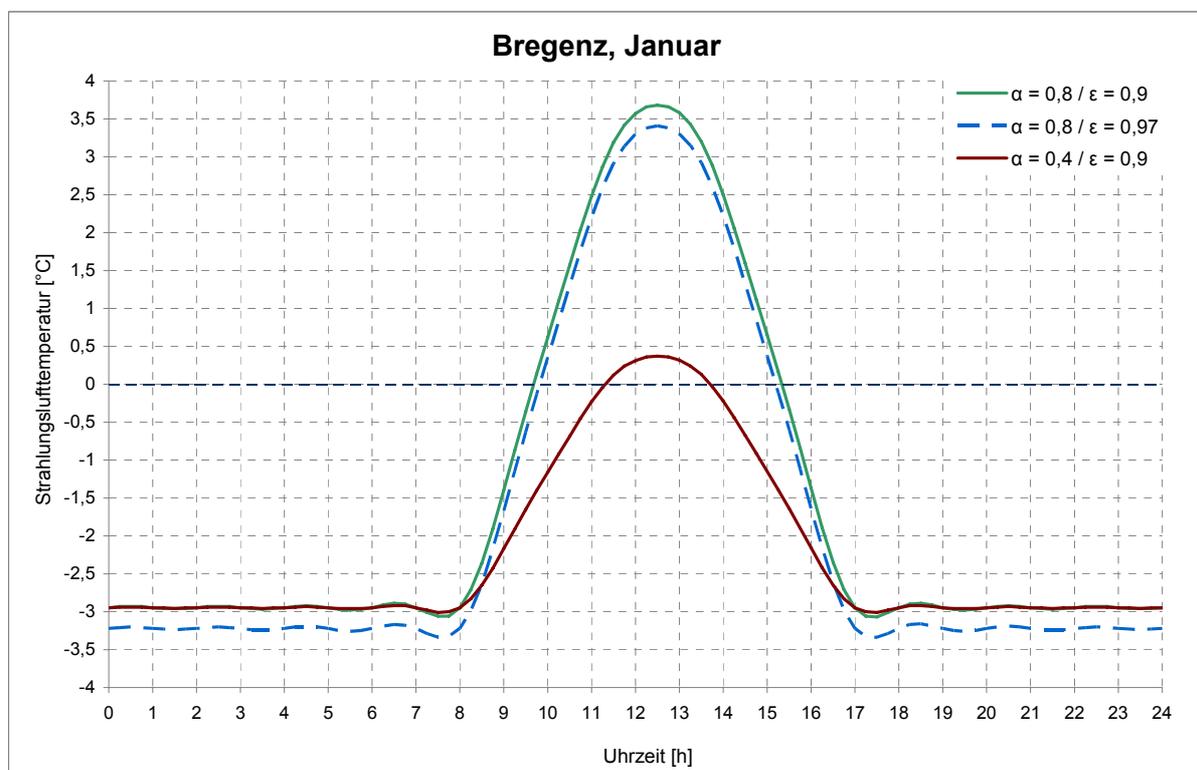


Abbildung 4.5: Strahlungslufttemperatur für Bregenz im Januar mit unterschiedlichen Absorptionsgraden  $\alpha$  und Emissionsgraden  $\epsilon$ .

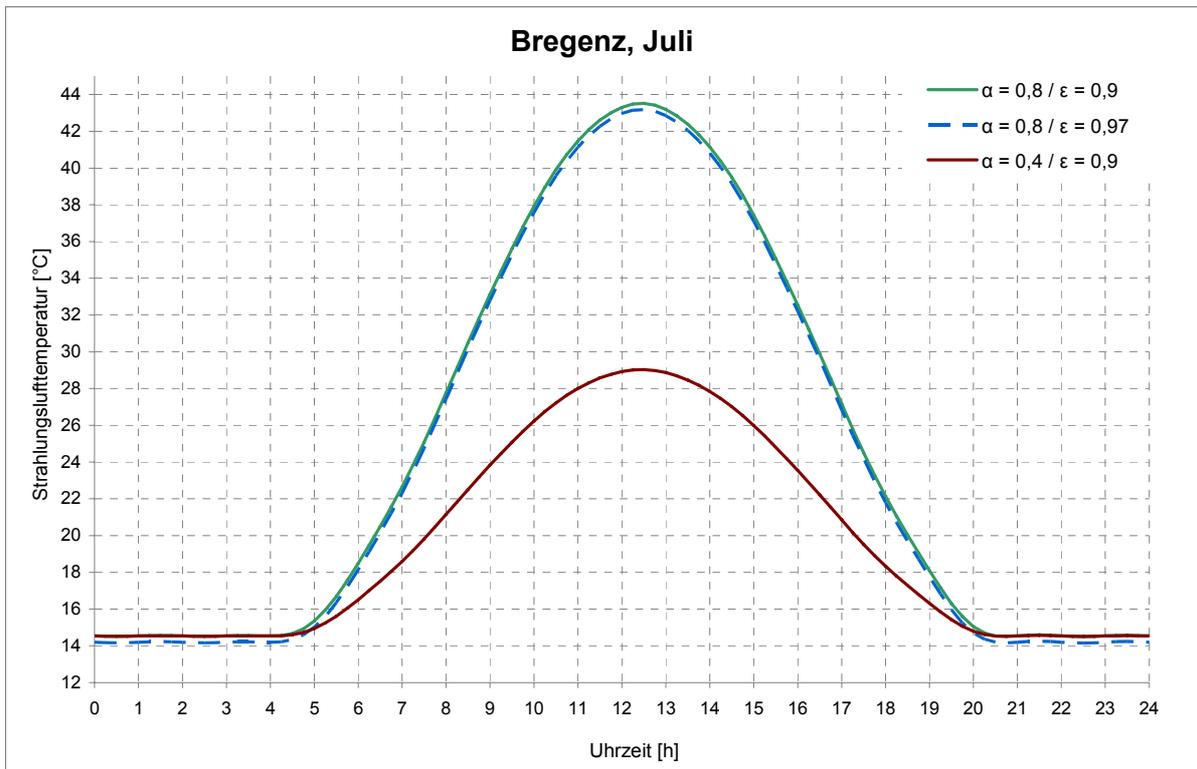


Abbildung 4.6: Strahlungslufttemperatur für Bregenz im Juli mit unterschiedlichen Absorptionsgraden  $\alpha$  und Emissionsgraden  $\epsilon$ .

### *Zusammenfassung Strahlungsabsorption und –emission / Dachhaut*

Es konnte festgestellt werden, dass die Änderung der Strahlungsabsorptionszahl und der Strahlungsemissionszahl eine deutliche Auswirkung auf die Berechnungsergebnisse hat: Der Gesamtwassergehalt der Konstruktion weist für Variante B höheres Austrocknungspotential auf. Der Feuchtegehalt der äußeren Holzschalung in der Dämmebene liegt für Variante B unter dem Grenzwert von 20 M-% (Entwicklung holzerstörerischer Pilze ab 20 M-% (ÖNORM EN 335-1)). Die Mittelwertkurve über das Bauteilprofil verläuft für Variante B flacher. Nur die Schwankung im Jahresverlauf zeigt eine stärkere Ausprägung, wobei die Maximalwerte nicht überschritten werden, sondern die Schwankung zu niedrigeren Werten ausschlägt.

Weiters konnte durch den Vergleich der Auswirkung des Absorptiongrades  $\alpha$  und des Emissionsgrades  $\epsilon$  auf Strahlungslufttemperaturen gezeigt werden, dass der wesentliche Einfluss durch den Wert der Absorptionszahl entsteht. Nur durch kleine Unterschiede in der Bewertung der Farbe der Dachhaut (Absorptionszahl) kann großer Einfluss auf die Berechnungsergebnisse genommen werden.

In der Norm werden nur für wenige Baustoffe Werte für die Strahlungsabsorption angegeben – in der Literatur sind darüber hinaus die Absorptionswerte für etwas mehr Baustoffe auffindbar. Für Dachfolien aus PVC oder FPO fehlen die Angaben jedoch gänzlich. Die Verwendung der Strahlungsabsorptionszahl erfolgt daher nur aufgrund einer Schätzung. Da diese Werte eine bedeutende Auswirkung auf die Berechnungsergebnisse haben, ist ihre Ermittlung bzw. eine Festlegung in einer Norm dringend erforderlich. Nur dadurch kann eine einheitliche, vergleichbare Berechnung dieser Konstruktion erfolgen, die auch für die Bewertung von Einzelfällen nach den Grenzwerten der Norm herangezogen werden kann.

Durch die Veränderung der Absorptionszahl und der Emissionszahl kann die Berechnung der untersuchten Konstruktion in WUFI fast beliebig manipuliert werden:

In der vorliegenden Arbeit wurde für den Gesamtwassergehalt sehr häufig eine ansteigende Tendenz festgestellt (Variante A).

Im Gegensatz dazu weist der Gesamtwassergehalt der Berechnungen einer ähnlichen Konstruktion von Gonin, Weber und Blaser (Gonin et al. 2003) vorwiegend eine längerfristige Abnahme auf. Außerdem weisen die im Forschungsbericht von Gonin untersuchten Bauteilaufbauten moderate Feuchtegehalte auf. In Zusammenarbeit mit Herrn Weber konnte festgestellt werden, dass neben den unterschiedlichen Klimastandorten vor allem die beiden Parameter Strahlungsabsorptionszahl und Strahlungsemissionszahl diesen Unterschied bewirken.

Ein in dieser Arbeit nicht berücksichtigter Parameter ist die Überdeckung der Dachhaut mit einer Kiesschüttung (Auflast). Für alle untersuchten Bauteilaufbauten wurde die Dachhaut als äußerste Bauteilschicht eingegeben.

Aufgrund des hohen Einflusses der Strahlung auf das Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus erscheint eine Untersuchung dieses Parameters wichtig. Bei weiteren Untersuchungen sollte der Einfluss einer Kiesschüttung auf das Austrocknungsverhalten des Bauteilaufbaus berücksichtigt werden.

Gonin, Weber und Blaser (Gonin et al. 2003) geben an, bei Holzfeuchtemessungen festgestellt zu haben, dass die Abdeckung der Dachhaut mit Gartenplatten die Austrocknung nicht erheblich beeinflusst. Weiters gehen sie auf den Einfluss von Gründächern bzw. einer Kiesschüttung auf die Temperatur oberhalb der Dachhaut ein: Durch die hohe Speicherkapazität der Gründächer bleibt die Temperaturkurve unter dem Gründachaufbau flach und nähert sich nur in den Sommermonaten den Außenlufttemperaturen an. Unter der Kiesschüttung stellen sich in den Sommermonaten Temperaturen ein, die weit über der Außenlufttemperatur liegen.

Ähnliches ermittelte Künzel in einer Untersuchung zu den Temperaturen unter der Deckschicht (gepflastert, bekiest, begrünt). Er stellte fest, dass die Temperatur unter Gründächern im Winter weit über der Außenlufttemperatur bleibt. Das erklärt er durch die Schmelzwärme beim Übergang von Wasser zu Eis und die wärmespeichernde Wirkung des Substrats. Dadurch kann ein Absinken der Temperatur unter dem Substrat bis zum Gefrierpunkt verhindert werden (Künzel 1999).

#### 4.3.4.5 Zusammenfassung Materialien

##### *Dämmmaterial*

Es wurden die beiden Dämmmaterialien Zellulose und Mineralwolle anhand der untersuchten Bauteilaufbauten verglichen.

Für den Gesamtwassergehalt weist das Material **Zellulose** ein längerfristiges Abnehmen auf. Dagegen wurde aber für Bauteilaufbauten mit Zelloosedämmung eine höhere Schwankung im Jahresverlauf  $\Delta u_m$  und eine höhere maximale massebezogene Feuchtigkeit  $M\%$  für die Dämmung und die Holzschalung festgestellt als für Bauteilaufbauten mit Mineralwolle.

Die Bauteilaufbauten mit **Mineralwolldämmung** zeigen große Unterschiede hinsichtlich des Feuchteverhaltens, die auf den Einfluss anderer Materialien (Dampfsperre, Dachhaut) zurückgeführt werden.

Bei der Auswahl des Dämmmaterials für die untersuchte Dachkonstruktion wird empfohlen, auf dessen Verhalten unter Feuchteeinwirkung und die Schimmelresistenz der Dämmung zu achten.

##### *$s_d$ -Wert der Dampfsperre*

Bei der Untersuchung des Feuchteverhaltens von nicht hinterlüfteten Flachdächern im Holzbau konnte **kein signifikanter Einfluss** des  $s_d$ -Wertes der Dampfsperre festgestellt werden.

Die in dieser Arbeit untersuchten Bauteilaufbauten weisen aufgrund der Anforderung lt.

ÖNORM B 7220 zum Großteil eine Dampfsperre mit einem  $s_d$ -Wert über 130 m auf.

Für  $s_d$ -Werte der inneren Bauteilschicht zwischen 2 m und 12 m stellten Gonin, Weber und Blaser (Gonin et al. 2003) jedoch Auswirkungen auf das Feuchteverhalten von Hohlkastenelementen fest.

##### *$s_d$ -Wert der Dachhaut*

Es wurde festgestellt, dass ein **niedriger  $s_d$ -Wert** (zwischen 33 m und 70 m) das Austrocknungsverhalten des Bauteilaufbaus fördert.

Bei der Auswahl der Dachhaut wird daher empfohlen, möglichst Dachabdichtungen mit niedrigem  $s_d$ -Wert einzusetzen.

##### *Strahlungsabsorption und –emission der Dachhaut*

Die Strahlungsabsorptionszahl und die Strahlungsemissionszahl der äußeren Bauteilschicht hängen vor allem von der Beurteilung der Farbe und der Oberflächenbeschaffenheit der Bauteilschicht ab.

In der Norm und der Literatur liegen nur wenige Werte für Strahlungsabsorptionszahlen und Strahlungsemissionszahlen vor. Für Dachabdichtungsfolien werden keine Angaben gemacht.

Der Berechnung werden daher geschätzte Werte zugrunde gelegt.

Es wurde festgestellt, dass vor allem der Strahlungsabsorptionsgrad  $\alpha$  einen **entscheidenden Einfluss** auf die Berechnungsergebnisse der untersuchten Bauteilaufbauten hat. Je nach Änderung der Absorptionszahl können die Bauteilaufbauten die Anforderungen lt. ÖNORM erfüllen oder nicht erfüllen.

Die Strahlungsabsorptionszahlen sollten daher von der Normung bindend festgelegt werden, um Berechnungen von Einzelfällen nach den festgelegten Grenzwerten bewerten zu können.

In dieser Arbeit wurde für alle Bauteilaufbauten die Dachhaut als äußere Bauteilschicht gewertet. Aufgrund des großen Einflusses der Strahlung sollte bei weiteren Untersuchungen der Einfluss der Strahlung auf eine Schicht über der Dachhaut (Kiesschüttung, Gartenplatten, Gründach, etc.) und deren Auswirkung auf das Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus ermittelt werden.

## 4.3.5 Übersicht über die Erkenntnisse aus der Berechnung mit WUFI

### Vergleich der Klimastandorte (Kapitel 4.3.1)

- Anstieg des Gesamtwassergehaltes für Bregenz höher als für Bürs und Schröcken
- Holzschalung ist am stärksten von Feuchte- und Temperaturveränderungen betroffen

### Vergleich Dämmebene und Trägerebene (Kapitel 4.3.2)

- die Holzschalung in Dämm- und Trägerebene verhält sich unterschiedlich:  
Dämmebene: starker kurzfristiger Anstieg des Wassergehaltes (Schwankung  $\Delta u_m$ )  
Trägerebene: tendiert zu längerfristigem Anstieg des Wassergehaltes ( $\Delta u'_m$ )
- Grenzen der Bewertung der Berechnungsergebnisse aus WUFI gemäß den Anforderungen lt. ÖNORM

### Trägerebene (Kapitel 4.3.3)

- Der Wassergehalt im oberen Randbereich des Trägers steigt an
- Die Schwankung des Wassergehaltes findet innen und außen gegengleich statt und ist in den Randbereichen des Trägers ausgeprägter

### Materialien (Kapitel 4.3.4)

- Dämmung: Bei Auswahl des Dämmstoffes sollte auf dessen Verhalten unter hoher Feuchtebelastung und auf seine Schimmelresistenz geachtet werden
- $s_d$ -Wert Dampfsperre: Für die lt. ÖNORM vorgeschriebenen hohen  $s_d$ -Werte der Dampfsperre konnte kein signifikanter Einfluss auf das Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus festgestellt werden.
- $s_d$ -Wert Dachhaut: Es wird empfohlen eine Dachhaut mit möglichst niedrigem  $s_d$ -Wert einzusetzen.
- Die Strahlungsabsorption und –emission der Dachhaut hat einen entscheidenden Einfluss auf das Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus. Die Strahlungsabsorptionszahlen und die Strahlungsemissionszahlen sollten daher ermittelt und von der Normung bindend festgelegt werden.

#### 4.4 Resultate der Glaserberechnungen mit Strahlungslufttemperaturen aus langjährigen Monatsmittelwerten

Bei der Untersuchung der Bauteilaufbauten mit WUFI wurde festgestellt, dass vor allem der Einfluss der solaren Strahlung eine große Auswirkung auf das Feuchteverhalten der untersuchten Konstruktion hat.

Für die 25 untersuchten Bauteilaufbauten erfolgten auch Berechnungen nach dem Glaserverfahren mit Strahlungslufttemperaturen, die aus den langjährigen Monatsmittelwerten der Außenlufttemperaturen errechnet wurden.

Sollte das Glaserverfahren fähig sein, die Auswirkung der Strahlung auf die untersuchte Konstruktion zu berücksichtigen, so müssten die Ergebnisse in ihrer Tendenz den WUFI-Ergebnissen ähnlich sein und in Klimastandorten mit hoher Strahlungseinwirkung weniger hohe Feuchteansammlungen bzw. ein höheres Austrocknungspotential zeigen.

Für die relative Feuchtigkeit wurden für diese Berechnung die langjährigen Monatsmittelwerte verwendet.

##### 4.4.1 Einfluss der Klimadaten auf die Berechnungsergebnisse

###### *Kondensatausfall und Verdunstung*

Im Folgenden sind die Auswertungen zur Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen abgebildet. Die entsprechenden Diagramme zur Glaserberechnung mit Außenlufttemperaturen gemäß ÖNORM B 8110-2 sind in Kapitel 4.2 zu finden (Diagramm 4.6, 4.7 und 4.8)

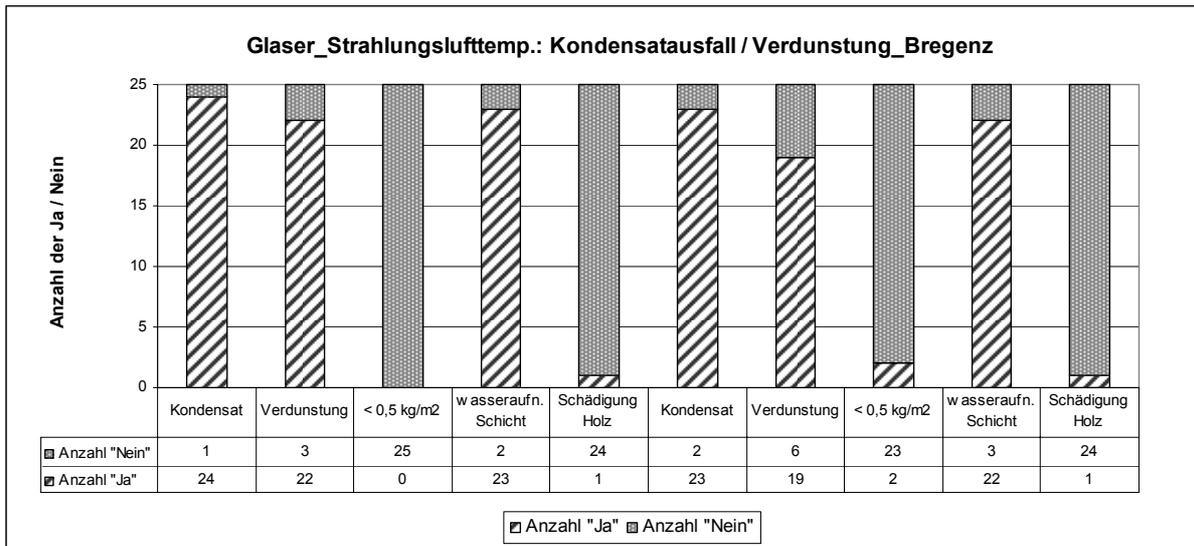
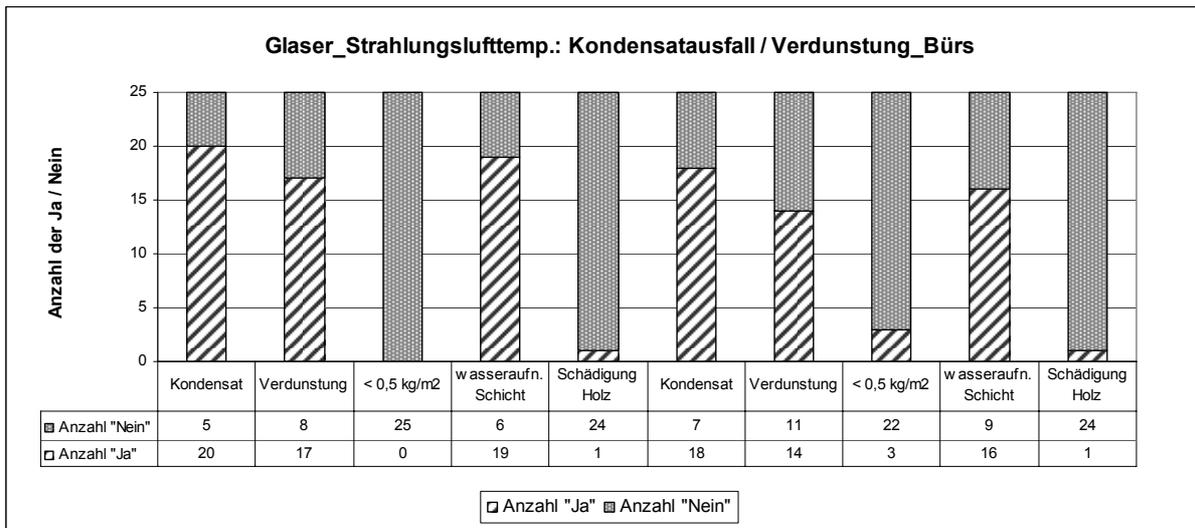
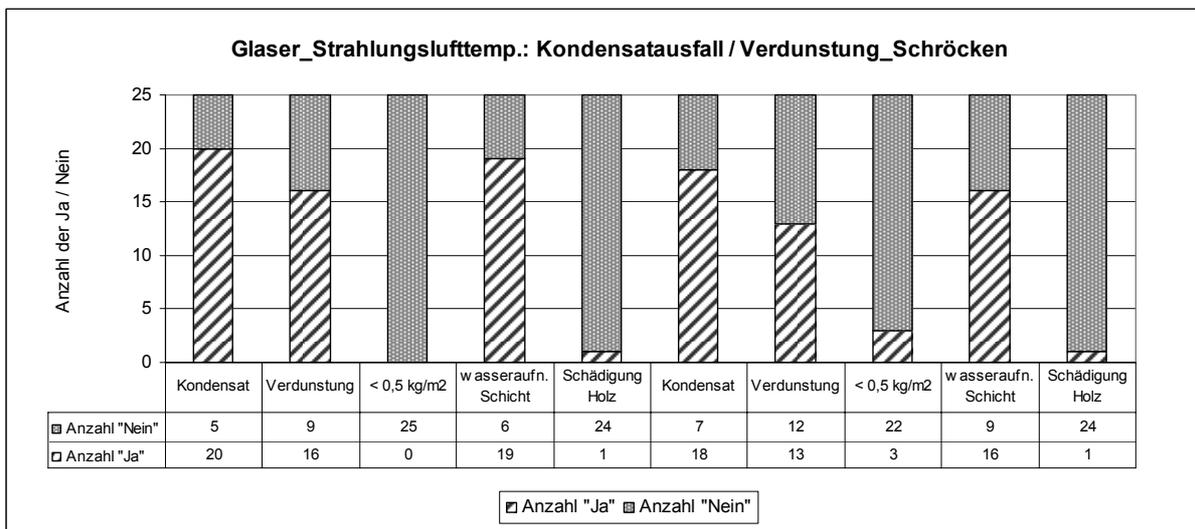


Diagramm 4.68: Kondensatausfall, Verdunstung nach der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen für den Standort Bregenz



**Diagramm 4.69: Kondensatausfall, Verdunstung nach der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen für den Standort Bürs**



**Diagramm 4.70: Kondensatausfall, Verdunstung nach der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen für den Standort Schröcken**

### Kondensat

Mit der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen wurde für die Dämm- und die Trägerebene für den Standort Bregenz häufiger Kondensatausfall ermittelt als für die Standorte Bürs und Schröcken.

Für Bürs und Schröcken ergibt sich die gleiche Häufigkeit des Kondensatausfalls in beiden Ebenen.

Im Vergleich zur Berechnung mit den Außenlufttemperaturen gemäß ÖNORM wurde mit den Strahlungslufttemperaturen für den Standort Bregenz in der Dämmebene häufiger Kondensatausfall ermittelt.

Die Trägerebene weist bei der Berechnung mit den Strahlungslufttemperaturen für die Standorte Bregenz und Schröcken häufigeren Kondensatausfall auf als die Berechnung lt. ÖNORM.

### **Verdunstung**

Zur Bewertung der Verdunstung muss die Differenz zwischen der Anzahl der Bauteilaufbauten mit Kondensatausfall und der Anzahl der Bauteilaufbauten mit vollständiger Verdunstung betrachtet werden, die die Anzahl der Bauteilaufbauten mit nicht ausreichender Austrocknung in den Sommermonaten angibt.

Wie für die Glaserberechnung lt. ÖNORM ergeben sich auch für die Berechnung mit Strahlungslufttemperaturen die meisten Bauteilaufbauten mit unzureichender Austrocknung für den Standort Schröcken.

Für die Glaserberechnung lt. ÖNORM konnte für die Hälfte der Bauteilaufbauten mit Kondensatausfall im Standort Schröcken keine vollständige Verdunstung ermittelt werden. Dagegen ergibt sich bei der Berechnung mit den Strahlungslufttemperaturen in der Dämm- und Trägerebene für mehr als 70% der Bauteilaufbauten mit Kondensatausfall in Schröcken eine vollständige Austrocknung.

Für die Standorte Bregenz und Bürs zeigt sich mit beiden Klimagrundlagen ungefähr die gleiche Anzahl an Bauteilaufbauten mit unzureichender Austrocknung.

### **Kondensatausfall in wasseraufnahmefähiger Schicht**

Auch bei der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen tritt der Kondensatausfall hauptsächlich in wasseraufnahmefähigen Schichten auf. Für den Großteil der Bauteilaufbauten tritt das Kondensat in der Dämm- und Trägerebene in der äußeren Holzschalung auf.

Kondensatmenge

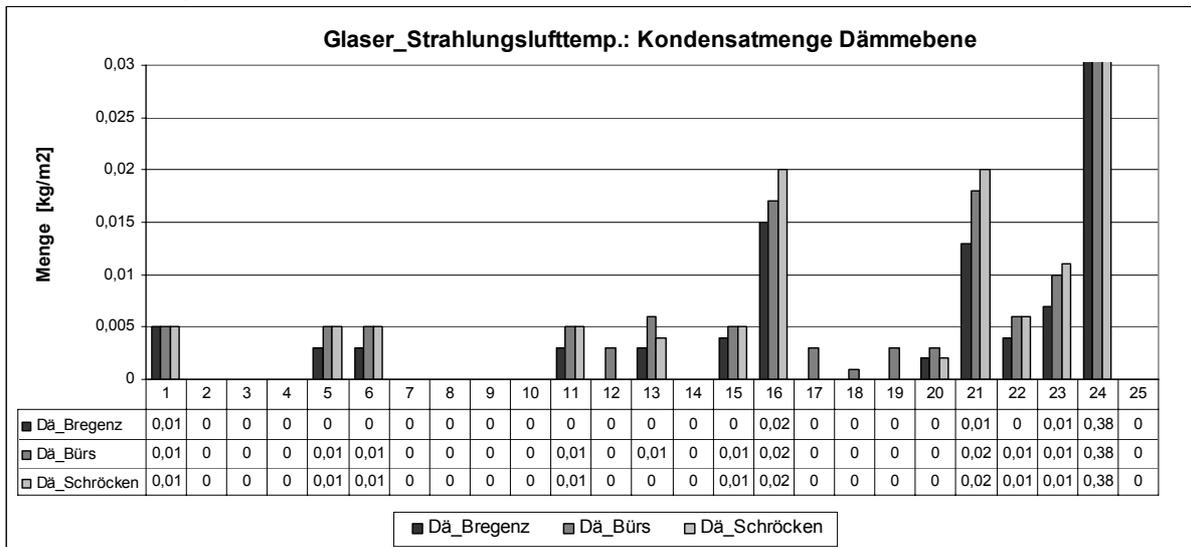


Diagramm 4.71: Kondensatmenge nach der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen für die Dämmebene

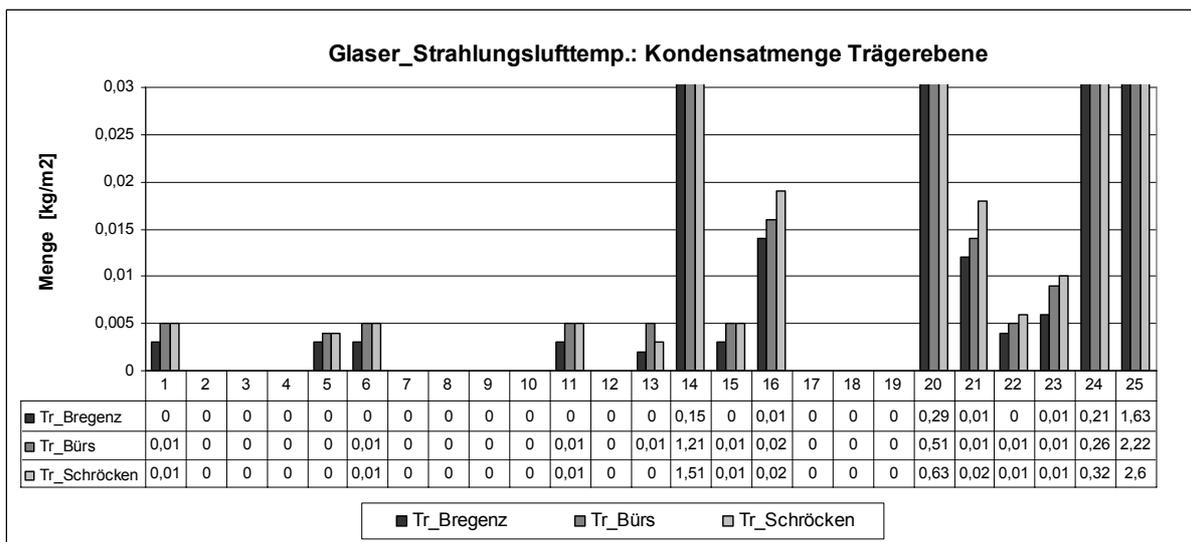


Diagramm 4.72: Kondensatmenge nach der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen für die Trägerebene

Auch bei der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen weisen die untersuchten Bauteilaufbauten in Dämm- und Trägerebene im Mittel für den Standort Bregenz eine geringere Kondensatmenge auf als für die Standorte Bürs und Schröcken.

Für den Standort Bürs fällt in Dämm- und Trägerebene im Mittel auch weniger Kondensat an als für den Standort Schröcken.

Im Vergleich zur Glaserberechnung nach ÖNORM fällt bei der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen auf, dass die Kondensatmenge für die Standorte Bürs und Schröcken zum Teil gleich hoch ist: Für Bürs wurde für die untersuchten Bauteilaufbauten mit der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen im Mittel eine höhere Kondensatmenge festgestellt wie bei der Glaserberechnung nach ÖNORM.

Für den Standort Schröcken ergibt sich unter Verwendung der Strahlungslufttemperatur im Durchschnitt eine geringere Kondensatmenge.

Im Vergleich zur Glaserberechnung nach ÖNORM wurde bei dieser Berechnung für den Standort Bregenz im Durchschnitt eine höhere Kondensatmenge ermittelt.

Anmerkung: Die große Kondensatmenge von Aufbau Nr. 24 ist auf den geringen sd-Wert der Dampfbremse zurückzuführen. Bauteilaufbau Nr. 14, Nr. 20 und Nr. 25 weisen in der Trägerebene Kondensatausfall innerhalb der Dampfsperre (in der Installationsebene) auf.

### *Schlussfolgerung*

Bei der Glaserberechnung mit der Strahlungslufttemperatur wurde im Vergleich zur Berechnung nach ÖNORM folgendes festgestellt:

- Bregenz: höhere Kondensatmenge
- Bürs: höhere Kondensatmenge
- Schröcken: geringere Kondensatmenge und mehr Austrocknung

Trotz der höheren Kondensatmenge ergibt sich für den Standort Bregenz auch bei der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen eine geringere Kondensatmenge als für Bürs und Schröcken.

Auch die Austrocknungskapazität ist in Bregenz und Bürs bei der Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen höher als in Schröcken, wenn auch für Schröcken unter diesen Temperaturen bessere Ergebnisse ermittelt wurden als mit den Außenlufttemperaturen nach ÖNORM.

Die Strahlungslufttemperatur kann in den Berechnungsergebnissen nach Glaser nicht das mit WUFI festgestellte Austrocknungspotential infolge der Sonneneinstrahlung abbilden.

Der Einfluss der Strahlung auf die Austrocknung des Bauteils wirkt nicht über eine Reduzierung des Kondensatausfalls infolge der höheren Außentemperatur sondern über die Sorptionseigenschaften der Materialien und den kapillaren Feuchtetransport im Bauteil.

#### 4.4.2 Vergleich der Klimadaten nach ÖNORM und der Strahlungslufttemperaturen aus langjährigen Monatsmittelwerten

##### Außenlufttemperatur

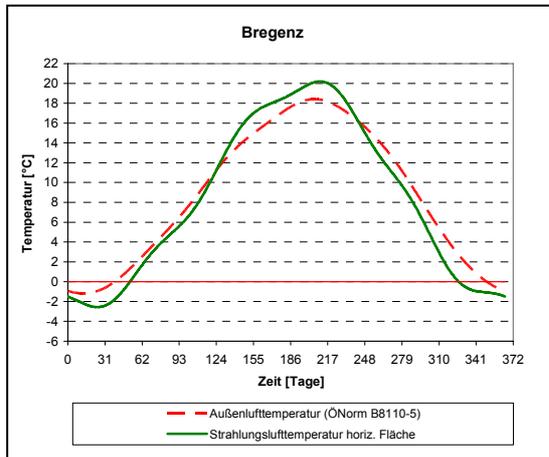


Diagramm 4.73: Bregenz

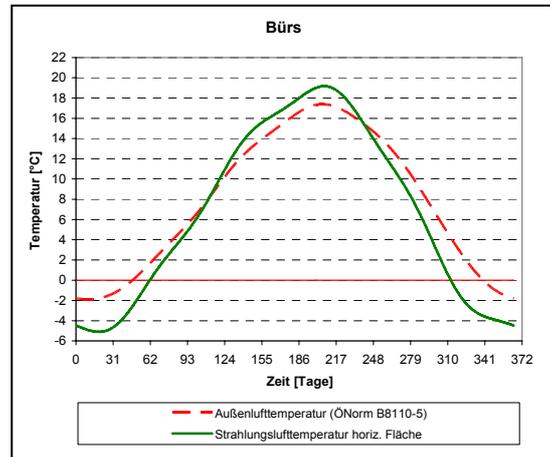


Diagramm 4.74: Bürs

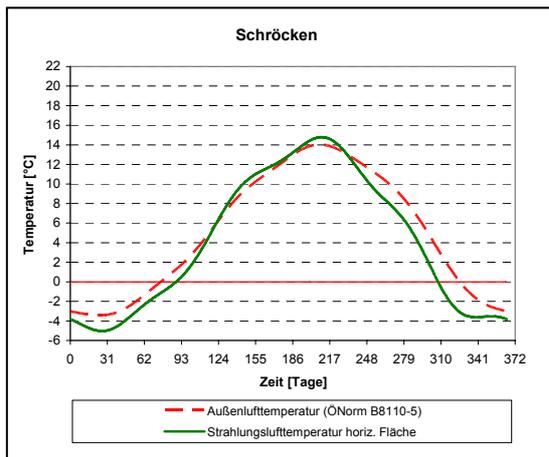


Diagramm 4.75: Schröcken

Diagramm 4.73, 4.74 und 4.75 zeigen die Außenlufttemperatur nach ÖNORM B 8110-5 und die Strahlungslufttemperatur. Die Monatsmittelwerte werden mittels einer Fourier-Kontinuierung in geglätteten Verläufen dargestellt (Heindl, Kreč 1985).

In Anhang B sind die Diagramme in voller Größe angeführt.

Die Verteilung der Außenlufttemperatur der drei Standorte zeigt für beide Varianten das gleiche Bild: Bregenz weist in allen Monaten die höchsten monatlichen Mittelwerte auf, gefolgt von Bürs und in etwas größerem Abstand von Schröcken.

Ein wesentlicher Unterschied zeigt sich jedoch für die Werte der Strahlungslufttemperatur in den Wintermonaten. Im Dezember und Jänner liegt die Außenlufttemperatur unter Berücksichtigung der Strahlung für Bürs unter den Werten von Schröcken. Auch die Strahlungslufttemperatur für Bregenz liegt in den Wintermonaten unter den Werten lt. ÖNORM. Die niedrigen Monatsmittelwerte der Strahlungslufttemperatur in den Wintermonaten verursachen die höhere Kondensatmenge für die Standorte Bregenz und Bürs.

Grundsätzlich weist die Strahlungslufttemperatur in den Wintermonaten geringere Werte und in den Sommermonaten höhere Werte auf als die Außenlufttemperatur lt. ÖNORM.

### Relative Luftfeuchtigkeit

Luftfeuchtigkeit %	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Quelle
Bregenz ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Bregenz statistische Werte	82,0	80,0	75,0	73,0	72,0	72,0	73,0	77,0	81,0	84,0	84,0	83,0	ZAMG 2006a
Bürs ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Bürs statistische Werte	84,0	77,0	70,0	66,0	65,0	67,0	68,0	69,0	75,0	79,0	84,0	86,0	ZAMG 2006c
Schröcken ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Schröcken statistische Werte	63,0	62,0	65,0	64,0	62,0	67,0	68,0	69,0	68,0	65,0	69,0	65,0	ZAMG 2006b

**Tabelle 4.4**

Für den Standort Bregenz weisen die langjährigen Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit nur geringe Abweichungen von den lt. ÖNORM B 8110-2 vorgegebenen Werten auf.

Für Bürs ergeben sich im langjährigen Mittel vor allem in den Sommermonaten wesentlich niedrigere Monatsmittelwerte der relativen Feuchtigkeit als die Werte lt. ÖNORM.

Schröcken weist im langjährigen Mittel für alle Monate wesentlich niedriger relative Luftfeuchtigkeiten auf als die lt. ÖNORM vorgegebenen Werte. Die niedrige Luftfeuchtigkeit kann die Berechnungsergebnisse für Schröcken trotz der im Winter niedrigen Strahlungslufttemperatur derart beeinflussen, dass weniger Kondensat ausfällt. Die hohen Strahlungsaußenlufttemperaturen im Sommer bewirken für Schröcken ein höheres Austrocknungspotential.

## 4.5 Vergleich der Glaserberechnungen und der Berechnung mit WUFI

Es wurden drei unterschiedliche Untersuchungen der 25 Bauteilaufbauten für jeweils drei Standorte (Bregenz, Bürs und Schröcken) durchgeführt:

1. Glaserberechnung mit Klimadaten lt. ÖNORM
2. Berechnung mit WUFI (halbsynthetischer Klimadatensatz aus langjährigen Monatsmittelwerten)
3. Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen aus langjährigen Monatsmittelwerten und langjährigen Monatsmittelwerten der relativen Luftfeuchte

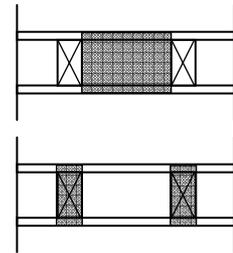
Im Folgenden wird versucht einen Vergleich der Berechnungsergebnisse anzustellen.

### Verhalten des Gesamtwassergehaltes $\Delta u'_m$

Die Glaserberechnung berücksichtigt nur ein Jahr – die Berechnung mit WUFI wurde über einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt.

Für die Berechnung mit WUFI wurde für die Bewertung des Feuchteverhaltens der Wert  $\Delta u'_m$  eingeführt, der den langfristigen Anstieg bzw. die langfristige Abnahme des Wassergehaltes abbildet.

Um einen Vergleich mit den Ergebnissen aus der Glaserberechnung zu ermöglichen, wird bei einer langfristigen Abnahme oder bei Gleichbleiben des Wassergehaltes von einer „vollständigen Verdunstung“ ausgegangen. Bei langfristigem Ansteigen des Wassergehaltes kann die im Jahresverlauf angefallene Feuchtigkeit nicht ausreichend austrocknen.



Anzahl der Bauteilaufbauten mit unzureichender Verdunstung	1. Glaser ÖNORM	2. WUFI	3. Glaser Str*
Bregenz Dämmebene	2	17	2
Bregenz Trägerebene	4	13	4
Bürs Dämmebene	2	11	3
Bürs Trägerebene	4	4	4
Schröcken Dämmebene	10	10	4
Schröcken Trägerebene	10	5	5

Tabelle 4.5: Anzahl der Bauteilaufbauten mit unzureichender Verdunstung (\*Str = Strahlungslufttemperatur)

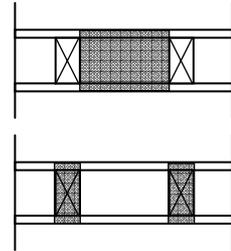
Die mit dem Glaserverfahren ermittelte Austrocknungsfähigkeit ergibt für die Standorte Bregenz und Bürs für beide Klimagrundlagen (Berechnungsmodus 1 und 3) ähnliche Ergebnisse. Für Schröcken wurde unter Zugrundelegung der Strahlungslufttemperatur und der langjährigen Monatsmittelwerte der relativen Luftfeuchte (Berechnungsmodus 3) eine wesentlich häufigere vollständige Verdunstung ermittelt als mit den Klimadaten lt. ÖNORM.

Die mit WUFI ermittelte Austrocknungsfähigkeit zeigt nur für die Trägerebene im Standort Bürs eine Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Glaserberechnung. Der große Unterschied der Berechnungsergebnisse entsteht aus den verschiedenen Berechnungsverfahren und den unterschiedlichen Einflussgrößen, die berücksichtigt werden.

**Schwankung der Gesamtwassergehalte  $\Delta u_m$**

Die mit WUFI ermittelte Schwankung der Gesamtwassergehalte im Jahresverlauf  $\Delta u_m$  wird mit dem Kondensatausfall lt. Glaserverfahren verglichen.

Für die beiden Berechnungen nach Glaser wurden nur geringfügig unterschiedliche Kondensatmengen ermittelt. (Die hohe Kondensatmenge in der Trägerebene für Bürs und Schröcken und deren relativ große Differenz zwischen Berechnungsmodus 1 und 3 wird durch den Kondensatausfall auf der Innenraumseite der Dampfsperre (in der gedämmten Installationsebene) der Aufbauten Nr. 14 und Nr. 25 verursacht.)



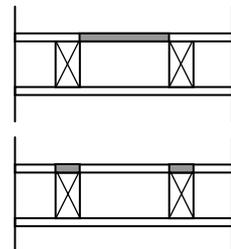
Die Berechnungsergebnisse aus WUFI zeigen für die untersuchten Bauteilaufbauten deutlich höhere Schwankungen der Gesamtwassergehalte.

Schwankung / Kondensat [kg/m <sup>2</sup> ]	1. Glaser ÖNORM	2. WUFI	3. Glaser Str*
Bregenz Dämmebene	0,016	0,111	0,018
Bregenz Trägerebene	0,086	0,114	0,093
Bürs Dämmebene	0,014	0,104	0,019
Bürs Trägerebene	0,102 0,024**	0,127	0,171 0,037**
Schröcken Dämmebene	0,024	0,109	0,019
Schröcken Trägerebene	0,165 0,035**	0,297	0,205 0,045**

Tabelle 4.6: Mittelwert der Höhe der Schwankung im Jahresverlauf und Mittelwert der Höhe des Kondensatausfalls (\*Str = Strahlungslufttemperatur, \*\*Mittelwerte ohne Berücksichtigung von Bauteilaufbau Nr. 14 und Nr. 25)

**Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung  $\Delta u_{m,HD}$  und  $\Delta u_{m,HT}$  / Schädigung der Holzschalung**

Gemäß ÖNORM B 8110-2 tritt bei einer Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes über 3 % im Jahresverlauf für Holzbauteile eine Schädigung auf. Die Bewertung der Schädigung der Holzschalung nach der Glaserberechnung wird hier mit der Anzahl der Bauteilaufbauten verglichen, deren massebezogener Feuchtegehalt der Holzschalung im Jahresverlauf über 3 % erhöht wird.



Die Berechnungsergebnisse aus den beiden Berechnungen nach Glaser stimmen überein. Für die Berechnung mit WUFI ergibt sich jedoch in allen Standorten vor allem in der Dämmebene für sehr viel mehr Bauteilaufbauten eine Schädigung der äußeren Holzschalung.

Anzahl der Bauteilaufbauten mit Schädigung der Holzschalung	1. Glaser ÖNORM	2. WUFI	3. Glaser Str*
Bregenz Dämmebene	1	18	1
Bregenz Trägerebene	1	3	1
Bürs Dämmebene	1	14	1
Bürs Trägerebene	1	2	1
Schröcken Dämmebene	1	13	1
Schröcken Trägerebene	1	2	1

Tabelle 4.7: Anzahl der Bauteilaufbauten, deren äußere Holzschalung einer Schädigung unterliegt, weil ihr massebezogener Feuchtegehalt im Jahresverlauf mehr als 3% ansteigt (\*Str = Strahlungslufttemperatur)

*Schädigung der Holzschalung / hygrothermische Zustände*  
siehe Kapitel 4.3.2.4

*Schlussfolgerung*

Die Berechnungsergebnisse aus der Glaserberechnung und der Simulation mit WUFI weisen große Unterschiede auf.

Da mit WUFI festgestellt wurde, dass die Strahlung einen großen Einfluss auf das Feuchteverhalten der untersuchten Bauteilaufbauten hat, wurde eine zweite Glaserberechnung mit Strahlungslufttemperaturen durchgeführt.

Auch unter Berücksichtigung der Strahlungslufttemperaturen ist die Berechnung nach Glaser nicht fähig, realistische Ergebnisse für die untersuchte Konstruktion zu liefern.

Da WUFI die realen Einflüsse auf das Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus (kapillarer Feuchtetransport, Sorptionsverhalten, Strahlungsabsorption, etc.) im Vergleich zur Glaserberechnung größtenteils berücksichtigt, kann davon ausgegangen werden, dass die Berechnungsergebnisse mit WUFI das reale Feuchteverhalten der Konstruktion besser abbilden als die Glaserberechnung. Eine Überprüfung der Berechnungsergebnisse von WUFI für nicht hinterlüftete Flachdachaufbauten im Holzbau sollte bei weiteren Untersuchungen mit Messungen an gebauten Objekten stattfinden.

## 5 Untersuchung von Verbesserungsvorschlägen

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten zur Verbesserung des Feuchteverhaltens der Holzbauteile der Konstruktion untersucht.

Es erfolgt eine Berechnung mit den vorgeschlagenen Änderungen der Konstruktion, die anschließend mit der Ausgangssituation verglichen wird. Die Untersuchung findet nur für den Standort Bürs statt.

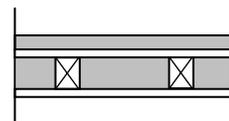
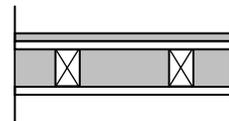
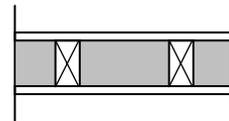
Aufgrund der in Kapitel 4.3.4.4. gezeigten Abhängigkeit des Feuchteverhaltens der Konstruktion von der Strahlungsabsorption und –emission der äußeren Bauteilschicht kann nur ein Vergleich des Verhaltens der Konstruktion unter Einbeziehung von Verbesserungsvorschlägen mit der Ausgangssituation vorgenommen werden. Eine absolute Bewertung der Konstruktion ist wegen der unbekannt realen Situation nicht möglich.

### 5.1 Dämmung über der äußeren Holzschalung

Um festzustellen, wie sich eine Dämmschicht über der Holzschalung (innerhalb der Dachhaut) auf das Feuchteverhalten der untersuchten Konstruktion auswirkt, wurde dies für Bauteilaufbau Nr. 03 für den Standort Bürs untersucht.

Dazu wurden folgende Berechnungen durchgeführt:

- Berechnung 00  
Bauteilaufbau Nr. 03, gesamte Dämmung von 40,0 cm zwischen den Trägern
- Berechnung 01  
Bauteilaufbau Nr. 03, Aufteilung der Dämmung: 4,0 cm außerhalb der Holzschalung, 36,0 cm zwischen den Trägern
- Berechnung 02  
Bauteilaufbau Nr. 03, Aufteilung der Dämmung: 10,0 cm außerhalb der Holzschalung, 30,0 cm zwischen den Trägern



Feuchteverhalten der Dämmebene

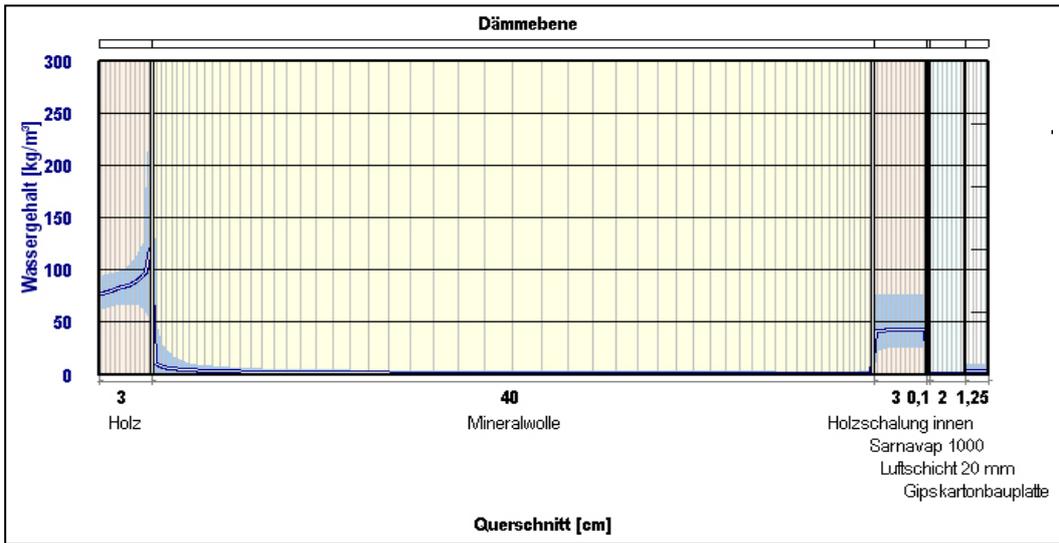


Abbildung 5.1: Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Dämmebene, Berechnung 00

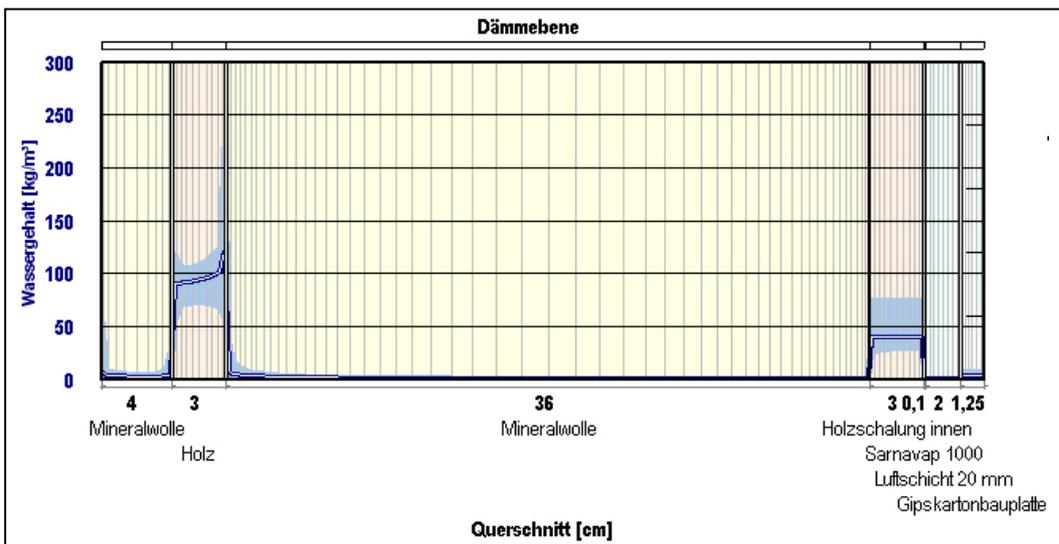


Abbildung 5.2: Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Dämmebene, Berechnung 01

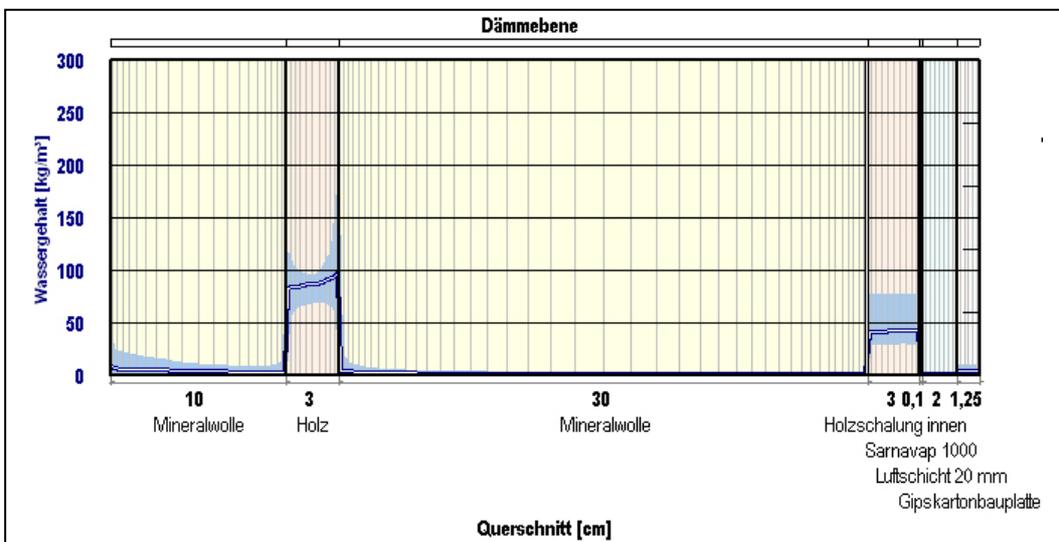


Abbildung 5.3: Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Dämmebene, Berechnung 02

Der Verlauf des Wassergehaltes über den Bauteilquerschnitt zeigt deutlich, dass sich abhängig von der äußeren Dämmung vor allem für die äußere Holzschalung ein unterschiedliches Feuchteverhalten ergibt.

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die Berechnungsergebnisse für die äußere Holzschalung mit unterschiedlicher Anordnung einer äußeren Überdämmung der Holzschalung.

<b>Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung bei unterschiedlich hoher Überdämmung</b>	<b>00</b> 0,0 cm Außendämmung	<b>01</b> 4,0 cm Außendämmung	<b>02</b> 10,0 cm Außendämmung
Verhalten des Wassergehaltes	nimmt ab	steigt an	bleibt gleich
Anstieg des Wassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_{m, Holz} [kg/m^2]$	-0,03	0,090	0,000
Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m, Holz} [kg/m^2]$	1,15	0,87	0,35
Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja	Ja	Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	7,66%	5,80%	2,30%
maximaler Wassergehalt M%	21,40%	22,40%	18,20%
maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	21,20%	22,40%	18,20%

**Tabelle 5.1 : Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung in der Dämmebene bei unterschiedlicher Außendämmung.**

Der Verlauf des Wassergehaltes über den Bauteilquerschnitt zeigt, dass sich für Berechnung 00 (ohne Außendämmung) an der Innenseite der Holzschalung ein wesentlich höherer Wassergehalt ergibt als an der Außenseite. Die Berechnungen mit Außendämmung weisen auch zur Außenseite der Holzschalung hin einen höheren Wassergehalt auf, wodurch sich vor allem für Berechnung 02 (10,0 cm Außendämmung) eine flachere Mittelwertkurve ergibt.

Während der maximale Wassergehalt der Holzschalung von Berechnung 00 und Berechnung 01 ähnliche Werte aufweist, zeigt die Holzschalung für Berechnung 02 niedrigere Höchstwerte. Dies spiegelt sich auch in der Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung im Jahresverlauf wider, die für die Holzschalung mit 10,0 cm Außendämmung wesentlich niedriger ausfällt als bei keiner bzw. geringer Außendämmung.

Die niedrigeren Höchstwerte des Wassergehaltes bei einer 10,0 cm starken Überdämmung der Holzschalung zeigen sich auch im maximalen massebezogenen Feuchtegehalt M-%, der für die Holzschalung in Berechnung 02 unter dem Grenzwert von 20,0 M-% bleibt. Gemäß ÖNORM EN 335-1 ist ab einem massebezogenen Feuchtegehalt von Holz von 20,0 M-% mit Schimmelbildung zu rechnen.

Beim Vergleich der maximalen massebezogenen Feuchtegehalte der Holzschalung fällt auf, dass die höchsten Werte für Berechnung 01 ermittelt wurden.

Auch das Verhalten des Wassergehaltes der Holzschalung über 4 Jahre zeigt für Berechnung 01 die höchsten Werte: Während bei Berechnung 00 sogar eine langfristige Abnahme des Wassergehaltes auftritt (Einfluss der Strahlungsabsorption und -emission), steigt der Wassergehalt der Holzschalung für Berechnung 01 langfristig an. Bei einer Außendämmung von 10,0cm (Berechnung 02) wurde im langjährigen Mittel ein gleichbleibender Wassergehalt festgestellt.

Das Aufbringen einer Außendämmung führt nicht immer zur Verringerung der Feuchtebelastung der äußeren Holzschalung in der Dämmebene. Es ist eine individuelle Untersuchung des Bauteilaufbaus notwendig, um die Dämmstoffdicke dementsprechend anzupassen.

Feuchteverhalten der Trägerebene

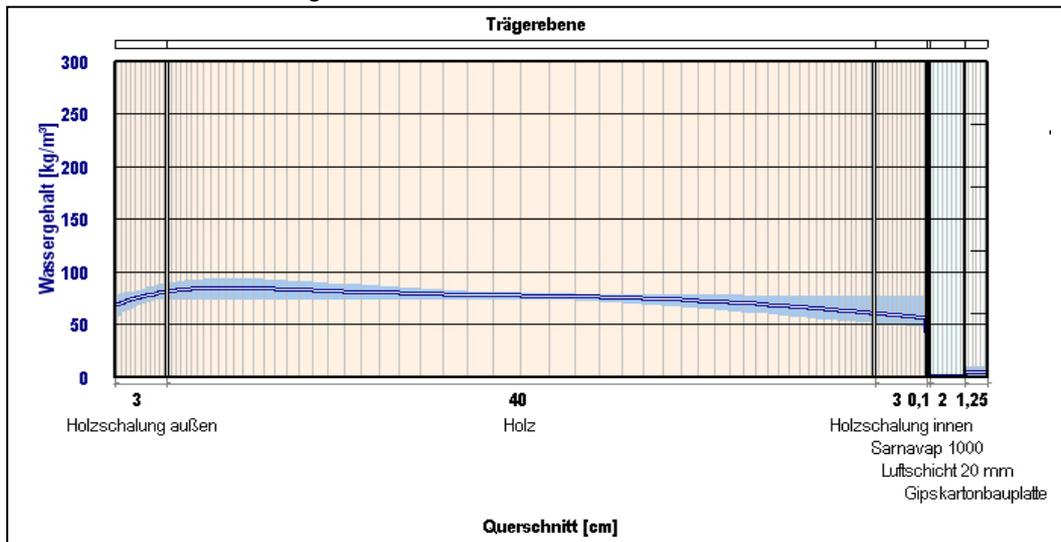


Abbildung 5.4: Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Trägerebene, Berechnung 00

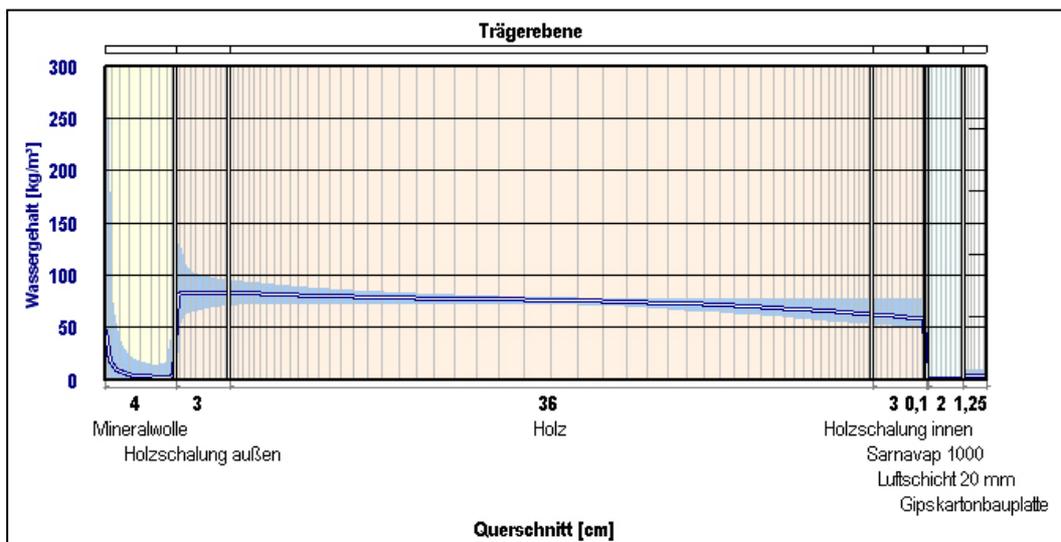


Abbildung 5.5: Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Trägerebene, Berechnung 01

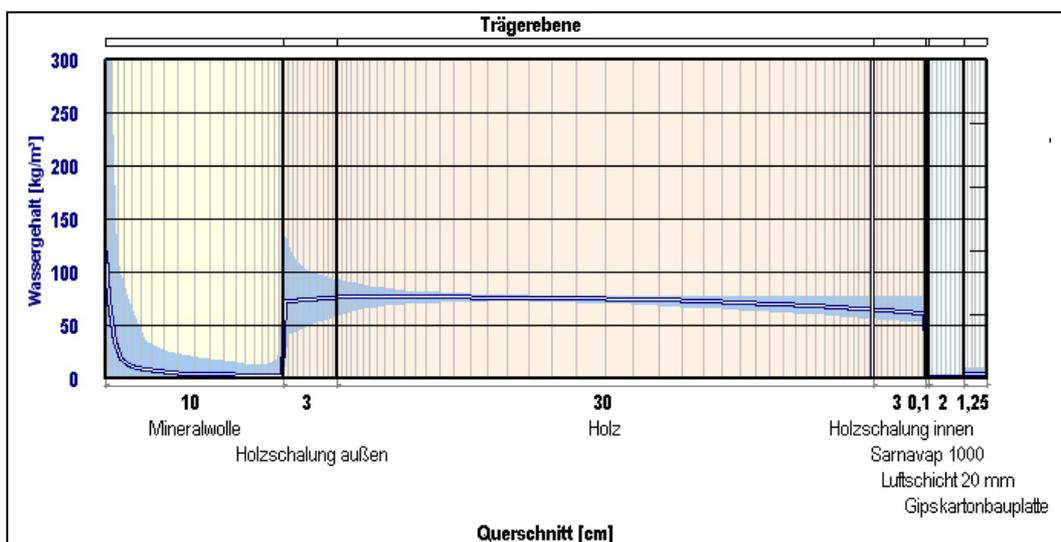


Abbildung 5.6: Mittelwertkurve über das Bauteilprofil, Trägerebene, Berechnung 02

Der Vergleich der Darstellungen des Wassergehaltsverlaufes über das Bauteilprofil zeigt auch in der Trägerebene für die Holzschalung den deutlichsten Unterschied zwischen den Berechnungen. Aber auch die Unterschiede im Feuchteverhalten des Trägers sollen untersucht werden.

#### Feuchteverhalten der Holzschalung in der Trägerebene

<b>Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung bei unterschiedlich hoher Überdämmung</b>	<b>00</b> 0,0 cm Außendämmung	<b>01</b> 4,0 cm Außendämmung	<b>02</b> 10,0 cm Außendämmung
Verhalten des Wassergehaltes	steigt an	steigt an	steigt an
Anstieg des Wassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_{m, Holz} [kg/m^2]$	0,15	0,285	0,210
Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m, Holz} [kg/m^2]$	0,19	0,63	1,32
Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes unzulässig)	Nein	Ja	Ja
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	1,26%	4,20%	8,80%
maximaler Wassergehalt M%	16,16%	19,80%	20,20%
maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	16,16%	19,80%	20,20%

**Tabelle 5.2 : Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung in der Trägerebene bei unterschiedlicher Außendämmung.**

Für die äußere Holzschalung fällt bei der Darstellung des Wassergehaltes über das Bauteilprofil auf, dass die Schwankungsbreite des Wassergehaltes für die Berechnungen mit Außendämmung höher ist als ohne Außendämmung. Vor allem an der Außenseite der Holzschalung ist die Schwankungsbreite deutlich höher.

Die Mittelwertkurve des Wassergehaltes über den Querschnitt der Holzschalung ist hingegen für die Berechnungen mit Außendämmung flacher ausgeprägt. Für Berechnung 02 liegt die Mittelwertkurve niedriger als für Berechnung 01.

Die breite Streuung der Wassergehalte im Bauteilprofil ist auch in der Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf abgebildet: Die Schwankung ist für die mit 10,0 cm überdämmte Holzschalung (Berechnung 02) am höchsten und übersteigt die lt. ÖNORM B 8110-2 zulässige Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffes.

Aufgrund der hohen Schwankung liegt auch für Berechnung 02 der höchste maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% vor. Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% der Holzschalung liegt für den Bauteilaufbau ohne Außendämmung und den Aufbau mit 4,0 cm Außendämmung unter 20,0 M-%. Für Berechnung 02 übersteigt der massebezogene Feuchtegehalt den Grenzwert gemäß ÖNORM EN 335-1, ab dem mit Schimmelbildung zu rechnen ist.

Bei allen drei Berechnungen wurde für den Wassergehalt der äußeren Holzschalung ein längerfristiger Anstieg ermittelt. Der Anstieg ist mit Außendämmung höher als ohne Dämmung über der Holzschalung. Bei einer Außendämmung von 10,0cm wurde jedoch ein weniger ausgeprägter langfristiger Anstieg des Wassergehaltes ermittelt als bei einer Außendämmung von 4,0cm.

### Feuchteverhalten des Trägers

<b>Feuchteverhalten des Trägers bei unterschiedlich hoher Überdämmung</b>	<b>00</b> 0,0 cm Außendämmung	<b>01</b> 4,0 cm Außendämmung	<b>02</b> 10,0 cm Außendämmung
Verhalten des Wassergehaltes	steigt an	nimmt ab	nimmt ab
Anstieg des Wassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u_{m, Holz} [kg/m^2]$	0,03	-0,246	-0,750
Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m, Holz} [kg/m^2]$	0,11	0,23	0,64
Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein	Nein	Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	0,05%	0,11%	0,32%
maximaler Wassergehalt M%	15,28%	14,93%	14,87%
maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	15,26%	14,93%	14,50%

**Tabelle 5.3 : Feuchteverhalten des Trägers bei unterschiedlicher Außendämmung.**

Der Verlauf des Wassergehaltes über das Bauteilprofil zeigt ein unterschiedliches Feuchteverhalten des Trägers für die drei Berechnungen.

Die im äußeren Randbereich nach unten weisende Mittelwertkurve des Wassergehaltes des Trägers für Berechnung 00 weist für die Berechnungen mit Außendämmung einen flacheren Verlauf in diesem Bereich auf.

Die Schwankungsbreite des Wassergehaltes ist vor allem am äußeren Randbereich des Trägers für die Berechnungen mit Außendämmung wesentlich breiter als für die Berechnung ohne Außendämmung. Diese Tendenz spiegelt sich in der Schwankung im Jahresverlauf wider: Der Wassergehalt des Trägers unterliegt bei der dickeren Außendämmung einer höheren Schwankung. Ohne Außendämmung ergibt sich für die Schwankung des Wassergehaltes des Trägers die niedrigste Schwankungsbreite der drei Berechnungen.

Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% hingegen weist für den Träger der Berechnung 02 den tiefsten Wert für die drei Berechnungen auf. Es zeigt sich, dass der Wassergehalt des Trägers trotz der höheren Schwankung für Berechnung 02 nicht grundsätzlich höher ist. Der Maximalwert des Wassergehaltes des Trägers der Berechnung 02 liegt unter dem Maximalwert von Berechnung 01 und 00.

Für den Träger wurde ohne Aufbringen einer Außendämmung ein längerfristiger Anstieg des Wassergehaltes festgestellt. Der Wassergehalt des Trägers nimmt für beide Berechnungen mit Außendämmung längerfristig ab. Für Berechnung 02 wurde eine stärkere Abnahme des Wassergehaltes ermittelt als für Berechnung 01.

### *Schlussfolgerung*

Das Aufbringen einer Außendämmung führt nicht unbedingt zur Verringerung der Feuchtebelastung der äußeren Holzschalung in der Dämmebene. Je nach Dämmstoffdicke kann sich die Außendämmung positiv oder negativ auf die Holzschalung auswirken.

In der Trägerebene erhöht sich die Feuchtebelastung der Holzschalung durch das Aufbringen einer Außendämmung.

Die Wechselwirkung zwischen der Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene wurde bei der eindimensionalen Berechnung nicht berücksichtigt. Bei großen Unterschieden des Wassergehaltes der Holzschalung in den beiden Ebenen kann durch Kapillartransport und Sorption die Feuchte in den trockeneren Bereich transportiert werden.

Die Feuchtebelastung für den Träger verringert sich durch eine Außendämmung. Es ist jedoch zu beachten, dass der Träger dadurch höheren Feuchteschwankungen unterliegt.

Grundsätzlich kann durch die Anordnung einer Dämmung über der äußeren Holzschalung durchaus eine Verbesserung der Feuchtebelastung der Holzbauteile bewirkt werden. Abhängig von der Dämmstoffdicke der Außendämmung kann die Feuchtebelastung für die äußere Holzschalung aber auch verstärkt werden.

Eine individuelle Untersuchung des Bauteilaufbaus ist notwendig, um die Dämmstoffdicke dementsprechend anzupassen.

Eine weitergehende Studie könnte Proportionen der Außendämmung zur Dämmung zwischen den Trägern untersuchen. Außerdem könnte der Einfluss des  $s_d$ -Wertes der äußeren Dämmung auf das Feuchteverhalten der Holzbauteile untersucht werden, um Aussagen zum Dämmmaterial machen zu können. In der vorliegenden Untersuchung wurde für die äußere Dämmung Mineralwolle verwendet. Aus Kostengründen und wegen des Bauablaufs könnte die Verwendung von EPS (expandiertes Polystyrol), XPS (extrudiertes Polystyrol) oder PU (Polyurethan) interessant sein. Diese Materialien unterscheiden sich bauphysikalisch vor allem durch ihren  $s_d$ -Wert und die Feuchtespeicherisotherme von Mineralwolle.

## 5.2 Feuchtevariable Dampfbremse

Die Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse in der untersuchten Konstruktion gilt im Allgemeinen als notwendige Maßnahme bzw. als einzige Lösung zur Vermeidung der Feuchteakkumulation im Bauteilinneren.

Feuchtevariable Dampfbremsen weisen einen  $s_d$ -Wert auf, der sich je nach Feuchte der Umgebung verändert. Dadurch wird der Feuchteeintrag in die Konstruktion in der kalten Jahreszeit gebremst, obwohl gleichzeitig bei umgekehrter Dampfdrucklage in den Sommermonaten eine Austrocknung nach innen erfolgen kann.

feuchtevariable Dampfbremsen	Dicke d [mm]	Dichte [g/m <sup>2</sup> ]	$s_d$ – Wert [m]
Ampack – Resano (Ampack 2009)	0,37	130	0,90 – 6,0
Icopal – Icovario (Icopal 2009)	0,20	120	0,20 – 7,0
Isover – Vario KM (Isover 2009a)	0,05	k.A.	0,20 – 5,0
Isover – Vario KM Duplex (Isover 2009b)	0,20	k.A.	0,30 – 5,0
Pro clima – Intello (Proclima 2009)	0,20	k.A.	0,25 – 10,0

Tabelle 5.4 : Liste einiger gängiger feuchtevariabler Dampfbremsen

Im Folgenden wurde für den Bauteilaufbau Nr. 03 eine Untersuchung des Feuchteverhaltens bei Einbau einer feuchtevariable Dampfbremse anstatt der tatsächlich eingebauten Dampfsperre Sarnavap 1000 ( $s_d$ -Wert: 240m) vorgenommen.

Bei der Voruntersuchung wurde bereits ein großer Einfluss der Strahlungsabsorption und –emission auf das Feuchteverhalten der Konstruktion mit feuchtevariabler Dampfbremse festgestellt. Aus diesem Grund wurde eine Variante A mit den Absorptions- und Emissionszahlen, die allen Simulationen zugrunde liegt, und eine Variante B mit den geänderten Absorptions- und Emissionszahlen wie in Kapitel 4.3.4.4. durchgeführt.

Übersicht Varianten	Variante A	Variante B
Strahlungsabsorptionszahl	0,4	0,8
Strahlungsemissionszahl	0,9	0,97
Ausgangssituation: Bauteil Nr. 03 mit Dampfsperre Sarnavap 1000 ( $s_d$ -Wert: 240m)	00a	00b
Bauteil Nr. 03 mit Dampfbremse <i>Icovario</i>	04a	04b
Bauteil Nr. 03 mit Dampfbremse <i>Intello</i>	05a	05b
Bauteil Nr. 03 mit Dampfbremse <i>Vario KM Duplex</i>	06a	06b

Tabelle 5.5 : Übersicht zu den untersuchten Varianten

### Verhalten der Wassergehalte über 4 Jahre

#### Verhalten der Wassergehalte in der Dämmebene

Verhalten WG	Dä_A_Ges amtwasserg ehalt	Dä_A_WG Holzschalung	Dä_A_WG Dämmung
Variante 00a	nimmt ab	nimmt ab	nimmt ab
Variante 04a	steigt an	steigt an	steigt an
Variante 05a	steigt an	steigt an	steigt an
Variante 06a	steigt an	steigt an	steigt an

**Tabelle 5.6 : Verhalten der Wassergehalte in der Dämmebene für Variante A**

Verhalten WG	Dä_B_Ges amtwasser gehalt	Dä_B_WG Holzschalung	Dä_B_WG Dämmung
Variante 00b	nimmt ab	nimmt ab	nimmt ab
Variante 04b	nimmt ab	nimmt ab	nimmt ab
Variante 05b	nimmt ab	nimmt ab	nimmt ab
Variante 06b	nimmt ab	nimmt ab	nimmt ab

**Tabelle 5.7 : Verhalten der Wassergehalte in der Dämmebene für Variante B**

Das Verhalten der Wassergehalte in der Dämmebene zeigt große Unterschiede zwischen den beiden Varianten A und B mit unterschiedlicher Strahlungsabsorption und –emission:

Für Variante A ergibt sich für die Aufbauten mit feuchtevariabler Dampfbremse für den Gesamtwassergehalt in der Dämmebene (Dä\_A\_Gesamtwassergehalt), den Wassergehalt der Holzschalung in der Dämmebene (Dä\_A\_WG Holzschalung) und den Wassergehalt der Dämmung (Dä\_A\_WG Dämmung) ein längerfristiger Anstieg.

Dagegen weisen die gleichen Bauteilaufbauten unter veränderten Strahlungskennwerten für den Gesamtwassergehalt in der Dämmebene (Dä\_B\_Gesamtwassergehalt), den Wassergehalt der Holzschalung in der Dämmebene (Dä\_B\_WG Holzschalung) und den Wassergehalt der Dämmung (Dä\_B\_WG Dämmung) eine längerfristige Abnahme auf.

Auffällig ist, dass bei geringer Strahlungsabsorption und -emission (Variante A) für den Aufbau mit Dampfsperre (00) eine längerfristige Abnahme der Wassergehalte ermittelt wurde. Unter den gleichen Randbedingungen wurde für den Aufbau mit feuchtevariabler Dampfbremse (04, 05, 06) jedoch ein Anstieg der Wassergehalte festgestellt.

Zur genaueren Beurteilung wird das Verhalten der Wassergehalte anhand der Veränderung der Wassergehalte näher untersucht.

### Veränderung des Gesamtwassergehaltes über vier Jahre

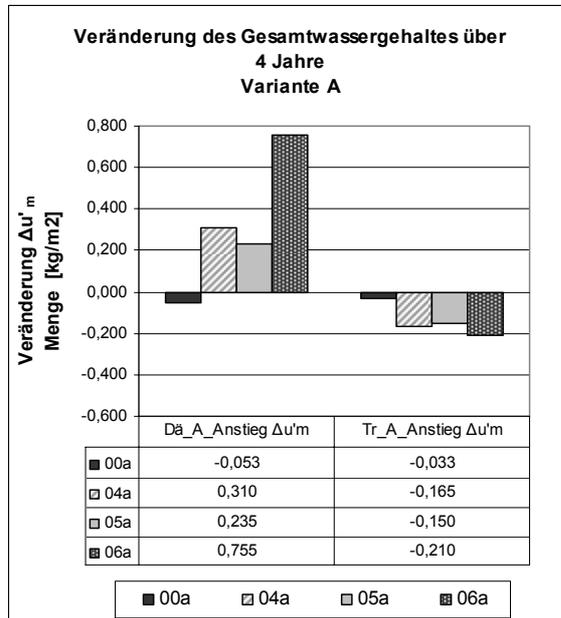


Diagramm 5.1: Variante A

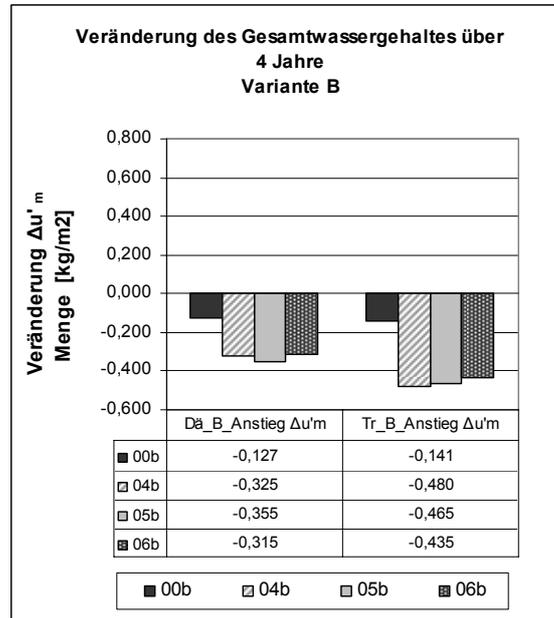
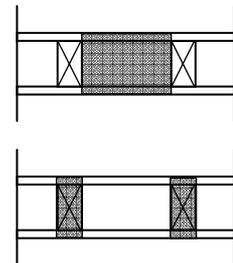


Diagramm 5.2 : Variante B

Für Variante A wurde für die Dämmebene für die Aufbauten mit feuchtevariabler Dampfbremse ein längerfristiger Anstieg ermittelt. Unter Einsatz einer herkömmlichen Dampfsperre wurde bei den gleichen Randbedingungen eine geringe Abnahme des Gesamtwassergehaltes in der Dämmebene festgestellt. Für die Varianten 04a, 05a und 06a zeigt sich nicht nur ein geringes Abweichen vom Feuchteverhalten der Variante 00a, sondern ein deutlicher Anstieg des Gesamtwassergehaltes in der Dämmebene über vier Jahre.

Für die gleiche Variante kann in der Trägerebene eine stärkere längerfristige Abnahme festgestellt werden.



### Veränderung des Wassergehaltes der Holzschalung $\Delta u'_{m,HD}$ und $\Delta u'_{m,HT}$

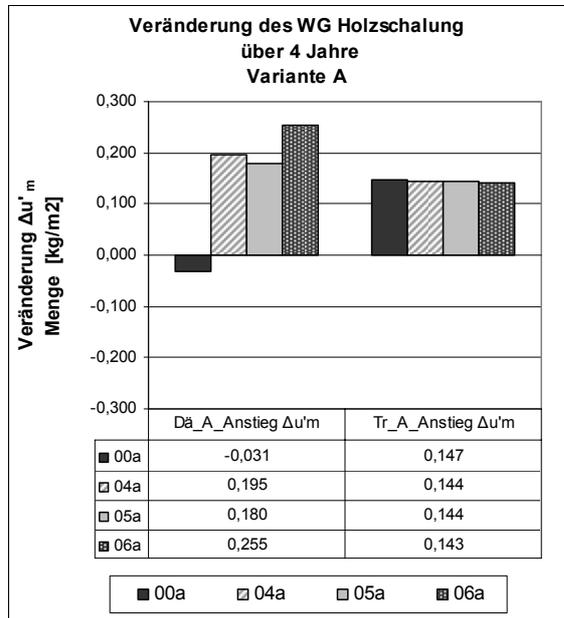


Diagramm 5.3 : Variante A

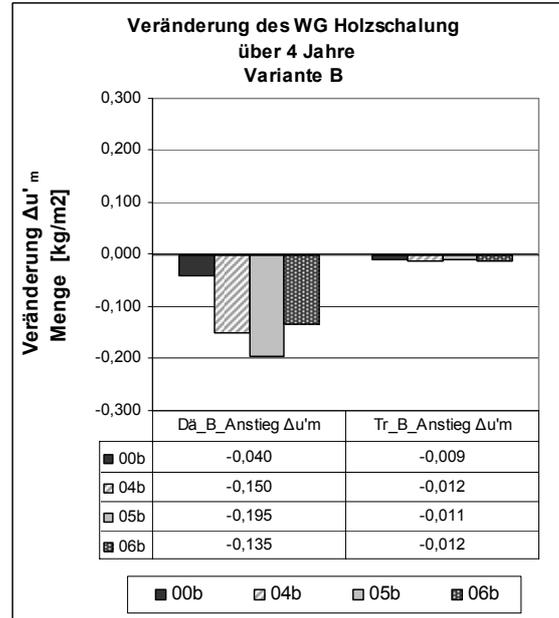
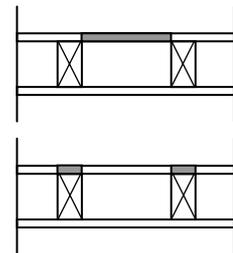


Diagramm 5.4 : Variante B

Für Variante A wurde ein unterschiedliche Auswirkungen durch den Einfluss der feuchtevariablen Dampfbremse auf das Feuchteverhalten des Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene festgestellt:

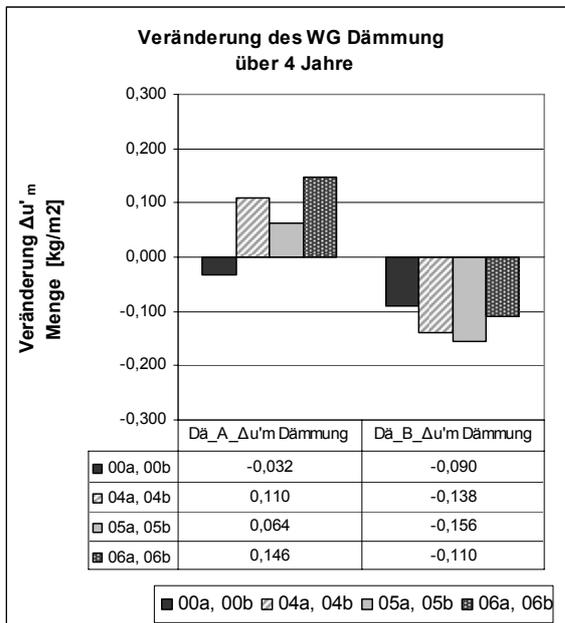
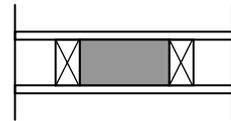
In der Dämmebene ergibt sich ein großer Unterschied des langfristigen Feuchteverhaltens der Holzschalung je nach Anordnung einer Dampfsperre oder einer feuchtevariablen Dampfbremse. Für Aufbauten mit feuchtevariablen Dampfbremse wurde bei Variante A in der Dämmebene ein markanter Anstieg des Wassergehaltes der Holzschalung festgestellt. Der Aufbau mit Dampfsperre weist dagegen eine geringe Abnahme des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene auf.



In der Trägerebene wird das Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung durch die Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse statt einer Dampfsperre nicht wesentlich beeinflusst.

Bei erhöhter Strahlungsabsorption und -emission der äußeren Bauteilschicht (Variante B) ergibt sich in der Dämmebene eine deutlich stärkere Abnahme des Wassergehaltes der Holzschalung bei Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse statt einer Dampfsperre.

### Veränderung des Wassergehaltes der Dämmung $\Delta u'_{m,D}$



Der Wassergehalt der Dämmung weist bei einer geringen Strahlungsabsorption und –emission der äußeren Bauteilschicht (Variante A) ein unterschiedliches Verhalten je nach Anordnung einer Dampfsperre (00a) oder einer feuchtevariablen Dampfbremse (04a, 05a, 06a) auf:

Während für Variante 00a (Dampfsperre) eine geringe Abnahme des Wassergehaltes der Dämmung prognostiziert wird, ergibt sich für die Varianten 04a, 05a und 06a (feuchtevariable Dampfbremse) jeweils ein deutlicher Anstieg des Wassergehaltes der Dämmung.

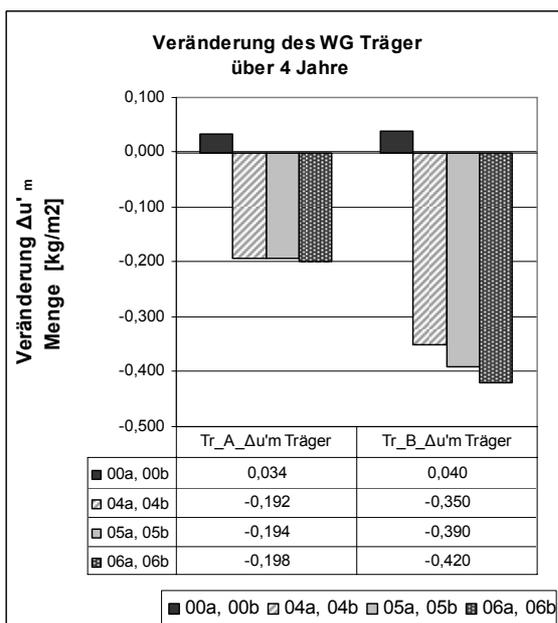
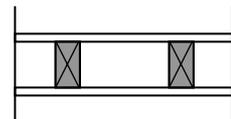
Für Variante B (erhöhte Strahlungsabsorption und –emission der äußeren Bauteilschicht) zeigt sich die Tendenz zu einer höheren Abnahme des Wassergehaltes der Dämmung bei Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse.

Diagramm 5.5 : Variante A und B

Beim Vergleich der Ergebnisse von Variante A und B lässt sich für den Aufbau 00 eine stärkere Abnahme des Wassergehaltes der Dämmung für Variante B feststellen. Die Differenz der Zu- / Abnahme des Wassergehaltes der Dämmung zwischen Variante A und B fällt für die Bauteilaufbauten mit feuchtevariablen Dampfsperre wesentlich höher aus.

Bei Anordnung einer feuchtevariablen Dampfsperre wirkt sich der Einfluss der Strahlungsabsorption und –emission stärker auf das Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus aus, als bei Anordnung einer Dampfsperre.

### Veränderung des Wassergehaltes des Trägers $\Delta u'_{m,T}$



Der Wassergehalt des Trägers für den Bauteilaufbau mit Dampfsperre (00a, 00b) steigt bei beiden Varianten an.

Bei Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse ergibt sich für beide untersuchten Strahlungsabsorptions- und –emissions-Situationen eine deutliche längerfristige Abnahme des Wassergehaltes des Trägers.

Für Variante B wurde eine stärkere Abnahme des Wassergehaltes des Trägers ermittelt.

Diagramm 5.6 : Variante A und B

*Schwankung der Wassergehalte im Jahresverlauf*

**Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung  $\Delta u_{m,HD}$  und  $\Delta u_{m,HT}$  im Jahresverlauf**

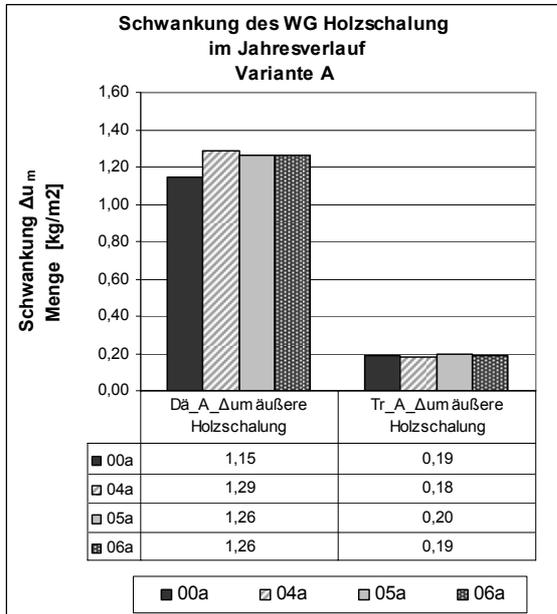


Diagramm 5.7 : Variante A

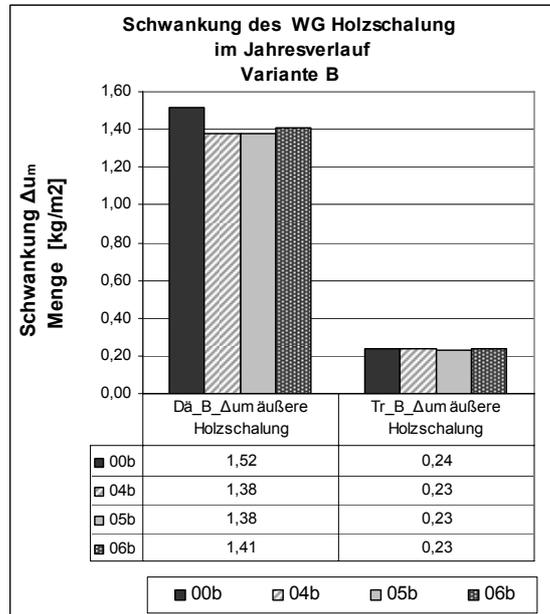
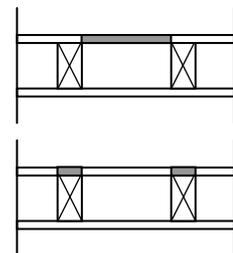


Diagramm 5.8 : Variante B

Für Variante A weist die Holzschalung in der Dämmebene bei Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse (04a, 05a, 06a) eine geringfügig höhere Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf auf als bei Anordnung einer Dampfsperre (00a).

In der Trägerebene ergibt sich für Variante A und Variante B kein wesentlicher Unterschied der Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung.

Für Variante B weisen die Bauteilaufbauten mit feuchtevariablen Dampfbremse tendenziell geringere Schwankungen des Wassergehaltes im Jahresverlauf auf.



### Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung $\Delta u_{m,D}$ im Jahresverlauf

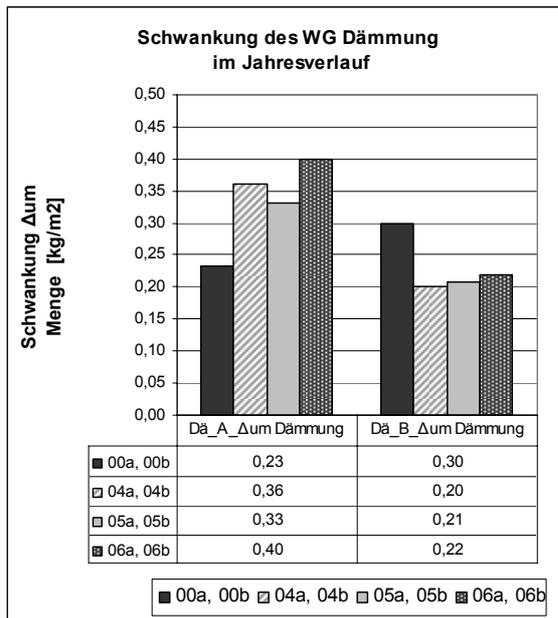


Diagramm 5.9 : Variante A und B

Für Variante A ergibt sich bei Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse eine höhere Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung im Jahresverlauf als bei Anordnung einer Dampfsperre.

Für Variante B zeigt sich das gegenteilige Bild: Die Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung im Jahresverlauf ist bei Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse geringer als bei Anordnung einer Dampfsperre.

Ein Vergleich von Variante A und B zeigt, dass der Bauteilaufbau mit Dampfsperre (00a, 00b) bei erhöhten Strahlungsabsorptions- und -emissionszahlen (Variante B) eine höhere Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung aufweist als für Variante A.

Die Bauteilaufbauten mit feuchtevariablen Dampfbremse (04, 05, 06) zeigen für Variante A wesentlich höhere Schwankungen des Wassergehaltes der Dämmung als für Variante B.

### Schwankung des Wassergehaltes des Trägers $\Delta u_{m,T}$ im Jahresverlauf

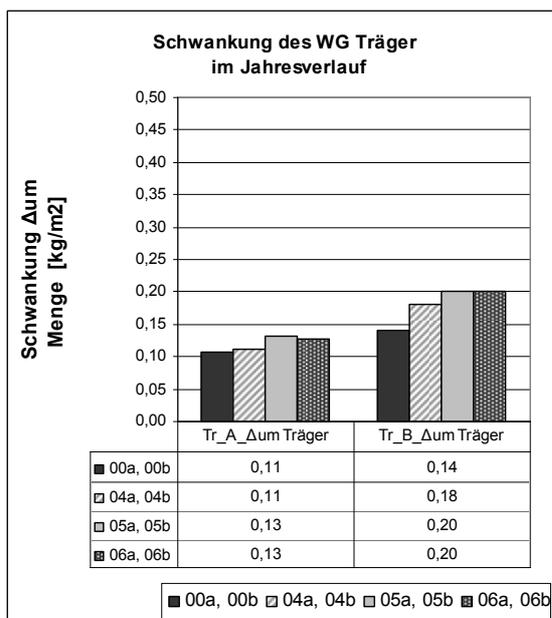


Diagramm 5.10 : Variante A und B

Die Schwankung des Wassergehaltes des Trägers erweist sich für den untersuchten Bauteilaufbau mit feuchtevariablen Dampfbremse für Variante A als nur geringfügig höher als mit Dampfsperre.

Für Variante B ergibt sich für die Aufbauten mit feuchtevariablen Dampfbremse (04b, 05b, 06b) im Vergleich zum Bauteilaufbau mit Dampfsperre eine höhere Schwankung des Wassergehaltes des Trägers im Jahresverlauf.

Der maximale massebezogene Feuchtegehalt  $M\%$  max im 5. Jahr

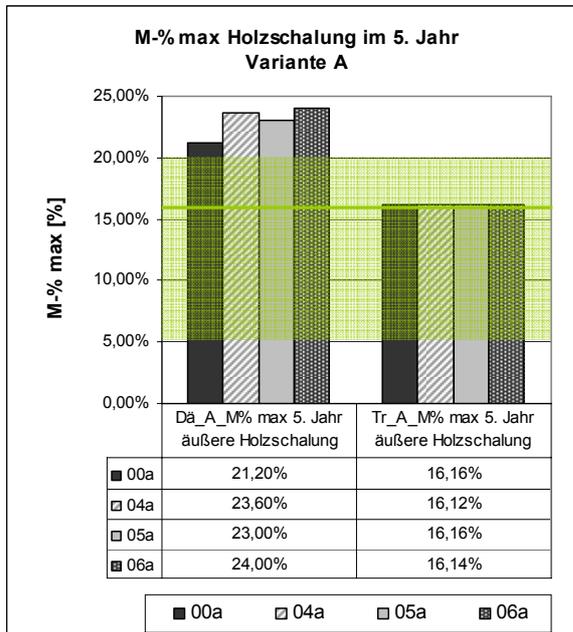


Diagramm 5.11 : Variante A

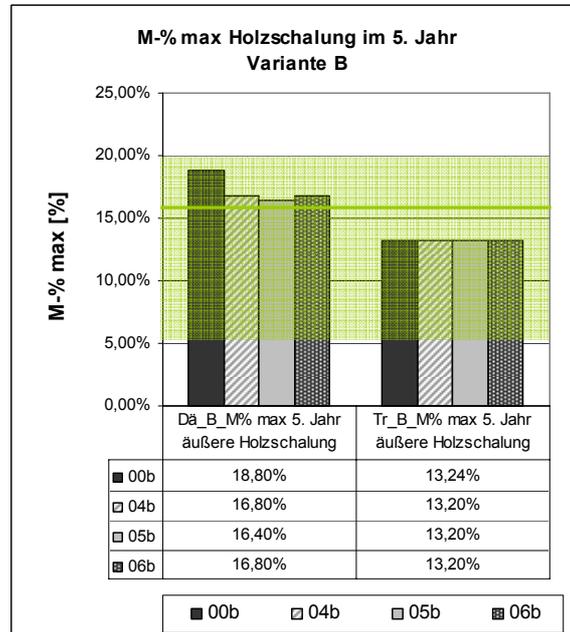


Diagramm 5.12 : Variante B

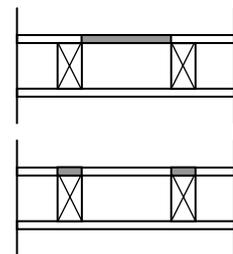
Für Variante A liegt der max.  $M\%$  der Holzschalung in der Dämmebene im 5. Jahr für die untersuchten Bauteilaufbauten mit feuchtevariabler Dampfbremse höher als für den Bauteilaufbau mit Dampfsperre.

Der maximale massebezogene Feuchtegehalt der Holzschalung in der Dämmebene im 5. Jahr übersteigt in allen untersuchten Fällen die 20  $M\%$  Grenze, ab der lt. ÖNORM EN 335-1 mit Pilzwachstum zu rechnen ist.

Bei erhöhter Strahlungsabsorption und -emission (Variante B) zeigt sich in der Dämmebene für die Bauteilaufbauten mit feuchtevariabler Dampfbremse (04b, 05b, 06b) ein niedrigerer max.  $M\%$  im 5. Jahr als für den Aufbau mit Dampfsperre.

Ausserdem liegt der maximale massebezogene Feuchtegehalt der Holzschalung im 5. Jahr für alle untersuchten Bauteilaufbauten der Variante B unter 20  $M\%$ .

Der Vergleich der Berechnungen mit den Randbedingungen nach A und B ergibt eine deutlich höhere Differenz zwischen den Berechnungsergebnissen für die Bauteilaufbauten mit feuchtevariabler Dampfbremse. Der Einfluss der Strahlungsabsorption und -emission der äußeren Bauteilschicht erweist sich für die Bauteilaufbauten 04, 05 und 06 als größer als für 00.



### *Schlussfolgerung feuchtevariable Dampfbremsen*

Die Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse bringt nach den Ergebnissen aus der Berechnung mit WUFI nicht automatisch ein günstigeres Feuchteverhalten des Bauteilaufbaus. Für die mit den Randbedingungen nach Variante A untersuchten Bauteilaufbauten ergibt sich in der Dämmebene ein Anstieg des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes der Holzschalung und des Wassergehaltes der Dämmung über 4 Jahre. Weiters erhöht sich die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf für die Holzschalung, die Dämmung und den Träger. Außerdem liegt der massebezogene Feuchtegehalt der Holzschalung in der Dämmebene bei Anordnung einer feuchtevariablen Dampfbremse über dem für Variante 00a errechneten Wert und über der 20 M-% – Grenze.

Findet die Berechnung der gleichen Aufbauten jedoch mit erhöhter Strahlungsabsorption und –emission der äußeren Bauteilschicht (Variante B) statt, so lässt sich feststellen, dass sich für fast alle untersuchten Parameter ein günstigeres Feuchteverhalten ergibt. Die einzige Ausnahme bildet die höhere Schwankung des Wassergehaltes des Trägers im Jahresverlauf.

Der Einfluss der Strahlungsabsorption und der –emission zeigt sich bei der Berechnung des Feuchteverhaltens der Bauteilaufbauten mit feuchtevariabler Dampfbremse noch stärker als mit Dampfsperre.

Zur realistischen Beurteilung der Bauteilaufbauten ist der Einsatz von realistischen Strahlungsabsorptionszahlen und Strahlungsemissionszahlen unbedingt notwendig.

### 5.3 Feuchtigkeitsaustrocknende Dampfbremse

Zu den feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremsen gehören die beiden Folien „Hygrodiode 20“ und „Hygrodiode 100“ von Icopal.

Die feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremsen werden gesondert von den feuchtevariablen Dampfbremsen behandelt, da sie sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Sie unterscheiden sich in ihrer Wirkungsart von den feuchtevariablen Dampfbremsen dahingehend, dass ihr  $s_d$ -Wert sich nicht abhängig von der Feuchte der Umgebung verändert. Der Feuchtedurchgang durch die Folie wird durch die Anordnung eines saugfähigen Kunststoff-Faservlieses zwischen sich überlappenden Folienstreifen aus Polyethylen bewirkt. Der Feuchtedurchgang erfolgt durch kapillaren Feuchtetransport in der Vliesschicht.

Durch diese Technik weisen die Folien „Hygrodiode 20“ und „Hygrodiode 100“ vor allem im Bereich von 0% bis 95% relativer Luftfeuchtigkeit einen markant höheren  $s_d$ -Wert auf als die feuchtevariablen Dampfbremsen.

Hygrodiode Dampfbremsen	Dicke d [mm]	Dichte [g/m <sup>2</sup> ]	$s_d$ – Wert* [m]
Icopal – Hygrodiode 20 (Icopal 2009)	0,42	140	20,0
Icopal – Hygrodiode 100 (Icopal 2009)	0,50	230	126,0

\*  $s_d$ -Wert bei 50% rel. Luftfeuchte

**Tabelle 5.8 : Übersicht über feuchtigkeitsaustrocknende Dampfbremsen**

Wie bei der Untersuchung des Feuchteverhaltens der Konstruktion mit feuchtevariabler Dampfbremse wurde auch für die Untersuchung des Feuchteverhaltens mit feuchtigkeitsaustrocknender Dampfbremse eine Berechnung für Bauteilaufbau Nr. 03 vorgenommen.

Der Aufbau mit der tatsächlich ausgeführten Dampfsperre Sarnavap 1000 ( $s_d$ -Wert: 240m) wird in den Varianten 07 und 08 mit der feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse Hygrodiode 20 und Hygrodiode 100 untersucht.

Aufgrund des hohen Einflusses der Strahlungsabsorption und –emission wird auch für die feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremsen eine Variante A und eine Variante B der Berechnung durchgeführt. In Variante A werden die Absorptions- und Emissionszahlen berücksichtigt, die allen vorhergehenden Simulationen in dieser Arbeit zugrunde liegen; Variante B wird mit erhöhten Strahlungsabsorptionszahlen und –emissionszahlen gemäß Kapitel 4.3.4.4. durchgeführt.

Übersicht Varianten	Variante A	Variante B
Strahlungsabsorptionszahl	0,4	0,8
Strahlungsemissionszahl	0,9	0,97
Ausgangssituation: Bauteil Nr. 03 mit Dampfsperre Sarnavap 1000 ( $s_d$ -Wert: 240m)	00a	00b
Bauteil Nr. 03 mit Dampfbremse <i>Hygrodiode 20</i>	07a	07b
Bauteil Nr. 03 mit Dampfbremse <i>Hygrodiode 100</i>	08a	08b

**Tabelle 5.9 : Übersicht zu den untersuchten Varianten**

Veränderung des Wassergehaltes der Holzschalung  $\Delta u'_{m,HD}$  und  $\Delta u'_{m,HT}$

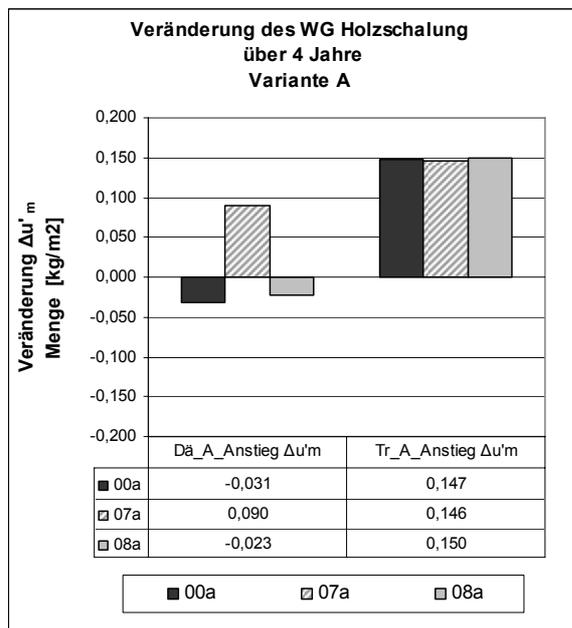


Diagramm 5.13 : Variante A

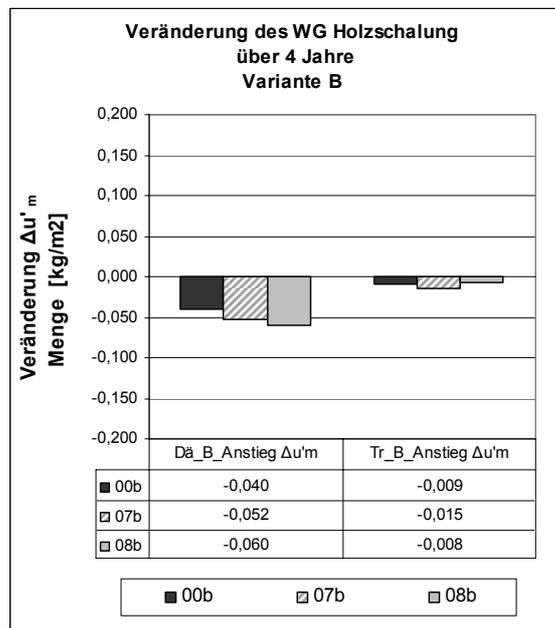


Diagramm 5.14 : Variante B

Die Veränderung des Wassergehaltes der Holzschalung über vier Jahre zeigt vor allem für Variante A in der Dämmebene einen markanten Unterschied zwischen den Bauteilaufbauten mit herkömmlicher Dampfsperre, mit feuchtigkeitsaustrocknender Dampfbremse mit einem  $s_d$ -Wert von 20 m und mit einem  $s_d$ -Wert von 126 m.

Für den Bauteilaufbau mit einer feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse mit einem  $s_d$ -Wert von 20 m (Hygrodiode 20, Variante 07a) wurde ein deutlicher Anstieg des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene über vier Jahre ermittelt.

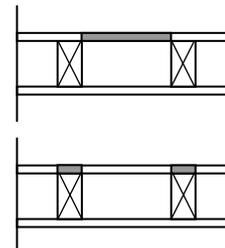
Die Varianten 00a und 08a ( $s_d$ -Wert: 126 m) weisen dagegen einen abnehmenden Wassergehalt der Holzschalung in der Dämmebene auf.

In der Trägerebene ergibt sich kein wesentlicher Unterschied der Veränderung des Wassergehaltes der Holzschalung über vier Jahre für die Varianten 00, 07 und 08.

Für Variante B zeigt sich in der Dämmebene eine etwas stärkere Abnahme des Wassergehaltes der Holzschalung über vier Jahre.

Der Einfluss der Strahlungsabsorption und -emission ist in der Differenz des Anstiegs / der Abnahme des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene deutlich sichtbar. Die Strahlung wirkt sich auf die Bauteilaufbauten mit feuchtigkeitsaustrocknender Dampfbremse stärker aus als auf den Bauteilaufbau 00.

Im Vergleich zu den Bauteilaufbauten mit feuchtigkeitsaustrocknender Dampfbremse, weisen auch die untersuchten Bauteilaufbauten mit feuchtevariabler Dampfsperre (Kapitel 5.2) für Variante A in der Dämmebene einen ansteigenden Wassergehalt der Holzschalung auf. Für Variante B zeigen auch sie einen abnehmenden Wassergehalt der Holzschalung in der Dämmebene. Bei niedrigem  $s_d$ -Wert der Dampfbremse wirkt sich der Einfluss der Strahlungsabsorption und -emission stärker auf das Feuchteverhalten der äußeren Holzschalung aus, als bei einem  $s_d$ -Wert ab ca. 100 m.



Veränderung des Wassergehaltes der Dämmung  $\Delta u'_{m,D}$

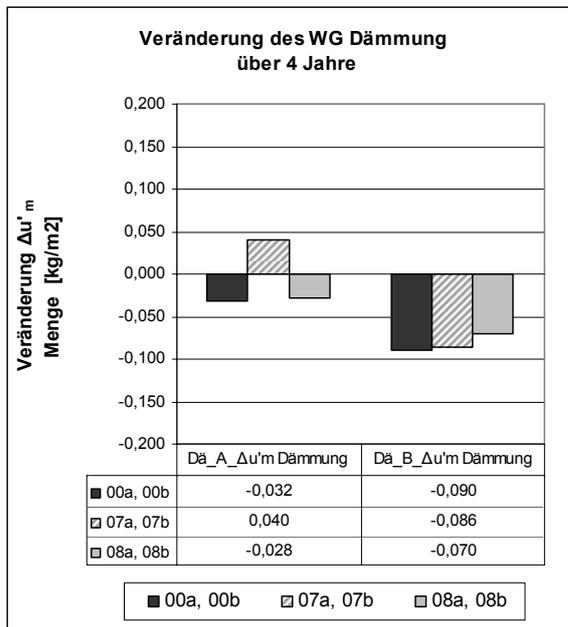
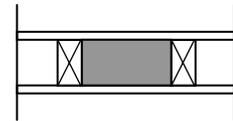


Diagramm 5.15 : Variante A und B



Der Wassergehalt der Dämmung zeigt bei Anordnung der feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse Hygrodiode 20 (07a und 07b) ein ähnliches Verhalten wie die Bauteilaufbauten mit feuchtevariablen Dampfbremsen: Für Variante A wurde ein Anstieg des Wassergehaltes über vier Jahre festgestellt. Für Variante B ergibt sich eine Abnahme des Wassergehaltes.

Für den Bauteilaufbau mit der feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse Hygrodiode 100 (08a und 08b) zeigt sich ein geringerer Einfluss der Strahlung als für die Ausgangsvariante (00a und 00b).

Veränderung des Wassergehaltes des Trägers  $\Delta u'_{m,T}$

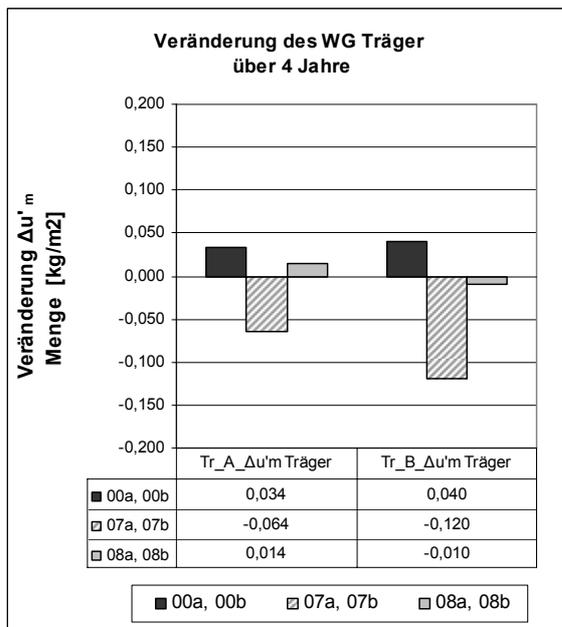
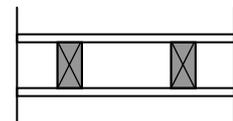


Diagramm 5.16 : Variante A und B



Auch für das Verhalten des Wassergehaltes des Trägers weist der Bauteilaufbau mit der feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse Hygrodiode 20 (07a, 07b) ein ähnliches Verhalten auf wie die Bauteilaufbauten mit feuchteadaptiver Dampfbremse.

Für den mit der Dampfbremse Hygrodiode 100 untersuchten Bauteilaufbau (08a, 08b) wurde eine Entlastung des Trägers gegenüber der Ausgangsvariante (00a, 00b) festgestellt. Trotzdem ergibt sich für den Wassergehalt des Trägers bei Anordnung der Dampfbremse Hygrodiode 20 (07a, 07b) oder einer feuchtevariablen Dampfbremse (04a, 04b, 05a, 05b, 06a, 06b) eine höhere Abnahme.

Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung  $\Delta u_{m,HD}$  und  $\Delta u_{m,HT}$  im Jahresverlauf

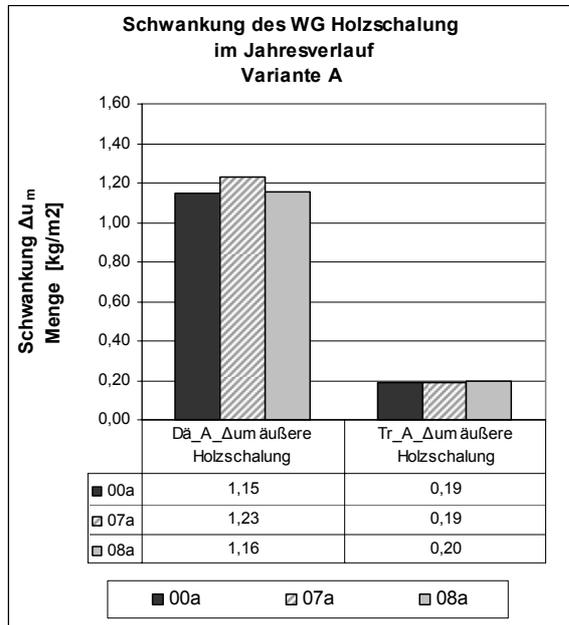


Diagramm 5.17 : Variante A

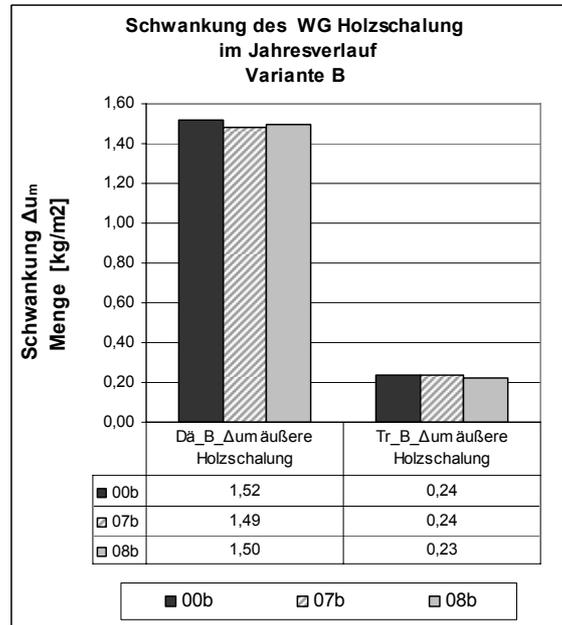
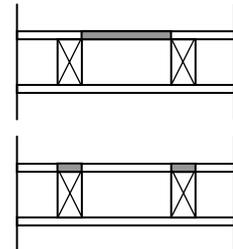


Diagramm 5.18 : Variante B

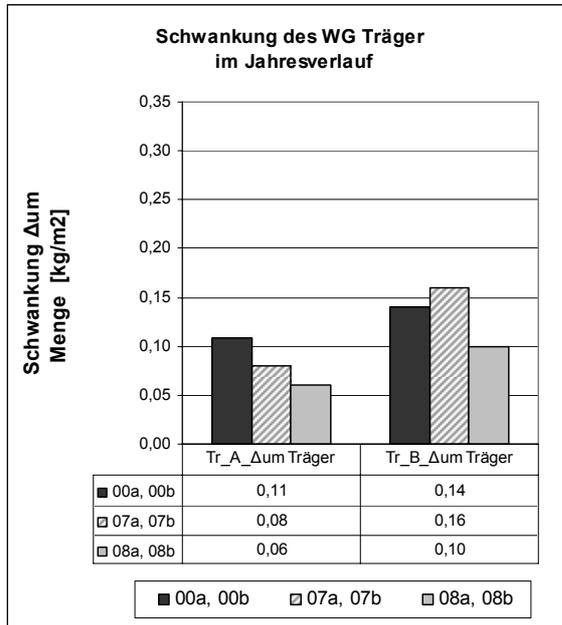
Die Holzschalung in der Dämmebene weist für Variante 07a (Hygrodiode 20) eine etwas höhere Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf auf als für Variante 00a (Sarnavap 1000).

Für Variante B zeigt sich in der Dämmebene kein wesentlicher Einfluss der Eigenschaften der Dampfbremse /-sperre auf die Schwankung des Wassergehaltes der Holzschalung.

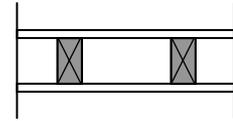
In der Trägerebene ergibt sich für Variante A und B kein markanter Einfluss der Eigenschaften der Dampfbremse /-sperre auf die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf.



*Schwankung des Wassergehaltes des Trägers  $\Delta u_{m,T}$  im Jahresverlauf*



**Diagramm 5.19 : Variante A und B**



Der Träger weist unter den Randbedingungen nach Variante A bei Einsatz einer feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse (07a, 08a) eine geringere Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf auf als bei Anordnung einer Dampfsperre (00a).

Bei erhöhter Strahlungsabsorption und –emission ergibt sich für die Dampfbremse Hygrodiode 20 (07b) eine etwas höhere und für die Dampfbremse Hygrodiode 100 (08b) eine etwas geringere Schwankung des Wassergehaltes des Trägers als bei Anordnung einer Dampfsperre (00b).

*Der maximale massebezogene Feuchtegehalt M-% max im 5. Jahr*

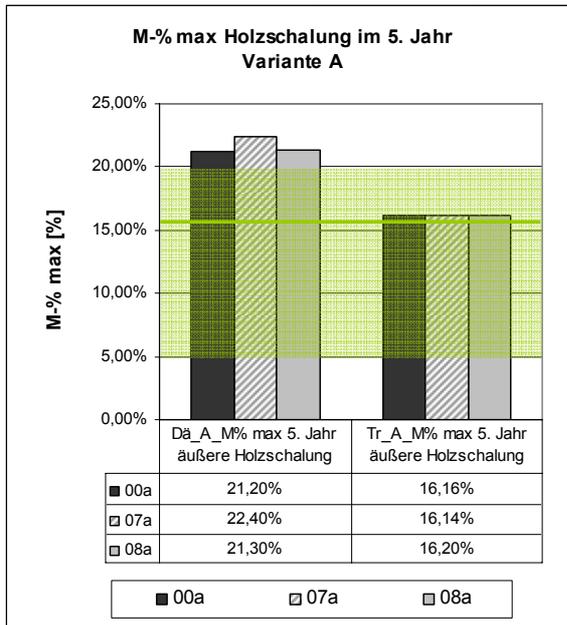


Diagramm 5.20 : Variante A

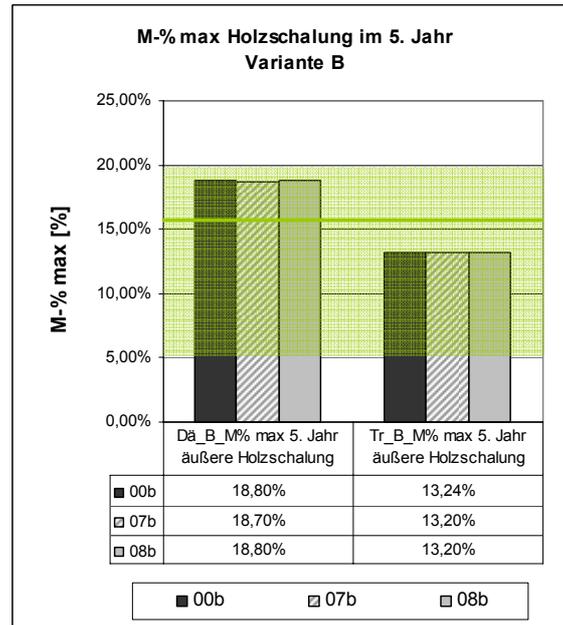
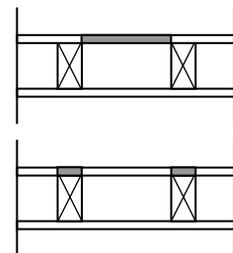


Diagramm 5.21 : Variante B

Die Holzschalung in der Dämmebene weist für Variante A bei Anordnung einer feuchtigkeitsabsorbierenden Dampfbremse mit niedrigem  $s_d$ -Wert (07a) einen geringfügig höheren maximalen massebezogenen Feuchtegehalt M-% im 5. Jahr auf als bei Anordnung einer Dampfsperre (00a) oder einer feuchtigkeitsabsorbierenden Dampfbremse mit höherem  $s_d$ -Wert (08a).

In der Trägerebene ergibt sich für Variante A kein wesentlicher Einfluss der feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremsen auf den maximalen massebezogenen Feuchtegehalt M-% der Holzschalung im 5. Jahr.



Für Variante B wurde weder in der Dämmebene noch in der Trägerebene ein maßgeblicher Einfluss der feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse auf den maximalen massebezogenen Feuchtegehalt M-% max der Holzschalung festgestellt.

Wie für die feuchtevariablen Dampfbremsen zeigt sich auch bei Anordnung feuchtigkeitsaustrocknender Dampfbremsen, dass der max. M-% der Holzschalung in der Dämmebene für Variante A für alle untersuchten Dampfbremsen über der 20 M-% Grenze liegt. Ab 20 M-% ist lt. ÖNORM EN 335-1 mit dem Wachstum holzerstörerischer Pilze zu rechnen.

**Schlussfolgerung**

Die Anordnung einer feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse anstatt einer herkömmlichen Dampfsperre wirkt sich je nach  $s_d$ -Wert der Dampfbremse unterschiedlich auf das Feuchteverhalten des Bauteils aus.

Für die untersuchte Variante 07 mit der feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse Hygrodiode 20 mit einem  $s_d$ -Wert von 20 m ergibt sich ein ähnliches Feuchteverhalten der Konstruktion wie mit den untersuchten feuchtevariablen Dampfbremsen, deren  $s_d$ -Werte ebenfalls unter 20 m liegen. Auch auf diese Variante kann ein großer Einfluss der Strahlungsabsorption und -emission der äußeren Bauteilschicht festgestellt werden.

Die Untersuchung des Feuchteverhaltens des Bauteilaufbaus mit der feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse Hygrodiode 100 ( $s_d$ -Wert: 126 m, Variante: 08a, 08b) zeigt einen weniger starken Einfluss der Strahlungsabsorption und -emission, aber der Einfluss wirkt sich trotzdem deutlich auf das Feuchteverhalten des Bauteils aus.

## 5.4 Multibox-Element zur Verbesserung der Raumakustik

(Vorschlag des Büros DI Dr. Lothar Künz ZT GmbH, Hard, Vorarlberg)

Ein Hauptgrund für den Erfolg der Multibox-Elemente besteht in der Möglichkeit der Vorfabrizierung der Elemente in der Werkstatt, wodurch einerseits eine höhere Arbeitseffizienz und andererseits eine höhere Genauigkeit erzielt werden können. Ein weiterer Vorteil dieser Elemente besteht in der vergleichsweise niedrigen Trägerhöhe, die sich durch die Plattenwirkung der äußeren und/oder inneren Holzschalung verringern lässt.

Diese beiden Prinzipien lassen sich auch mit einem „Multibox-Element zur Verbesserung der Raumakustik“ umsetzen: Die Elemente können genauso vorgefertigt werden; die Dampfsperre kann als Notdach auf der Baustelle dienen; die Plattenwirksamkeit der Holzschalungen und die damit niedrigeren Trägerhöhen bleiben gleich. Die innere Holzschalung wird gelocht ausgeführt und im Hohlraum mit einer dünnen Dämmlage hinterlegt, wodurch eine Verbesserung der Raumakustik in den darunterliegenden Räumen erreicht werden kann. Der einzige konstruktive Nachteil besteht im höheren Dachaufbau. Dafür bringt diese Konstruktion aus bauphysikalischer Sicht einen wesentlichen Vorteil: Zwischen der Dachhaut und der Dampfsperre /-bremse befindet sich keine kapillar wasseraufnahmefähige Schicht (z.B.: Holz, pflanzliche Baustoffe, etc.).

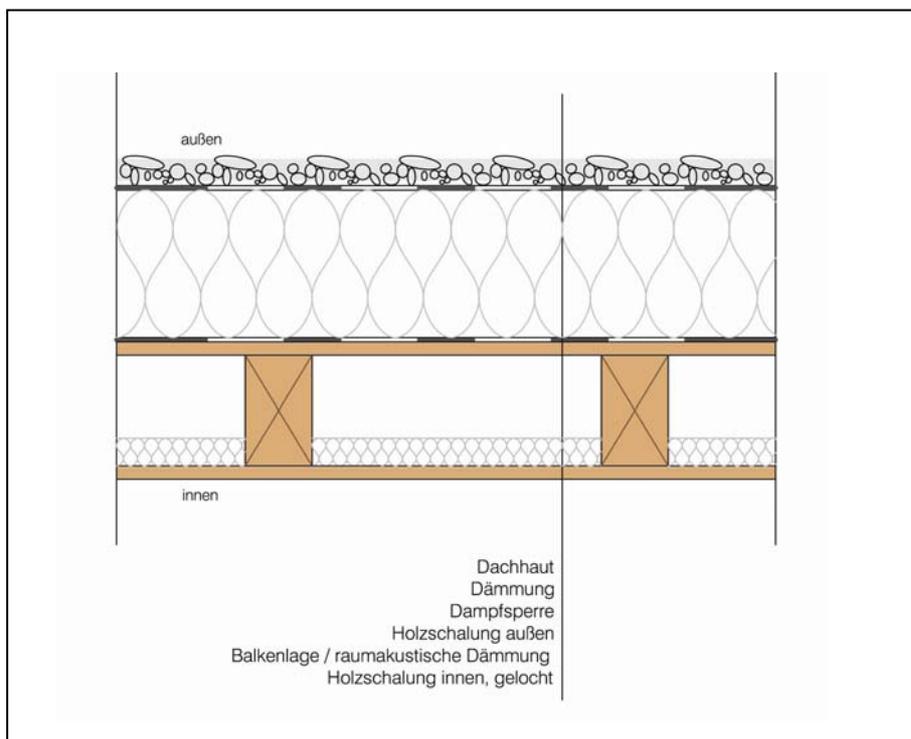


Abbildung 5.7: Systemskizze des Multibox-Elementes zur Verbesserung der Raumakustik

### Feuchteverhalten der Trägerebene

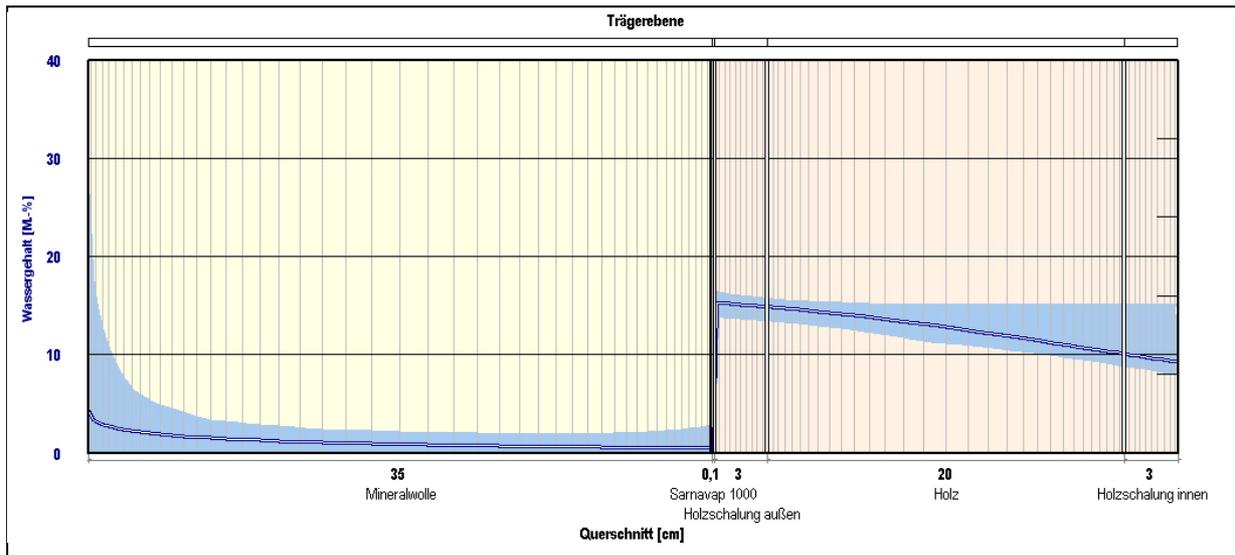
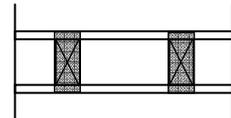


Abbildung 5.8: Mittelwertkurve über das Bauteilprofil des Multibox-Elementes zur Verbesserung der Raumakustik, Trägerebene

Der Träger und die Holzschalung befinden sich innerhalb der Dampfsperre in direktem Kontakt mit dem Raumklima. Ihr Feuchteverhalten ist dementsprechend an das Innenraumklima angepasst. Den Berechnungen in dieser Arbeit wurde ein normales Innenraumklima mit normaler Feuchtebelastung (20 – 22°C, 40 – 60% rel. Luftfeuchte) zugrunde gelegt.



Der Wassergehalt der Holzbauteile (äußere und innere Holzschalung, Träger) bleibt über den gesamten Berechnungszeitraum immer unter der 20 M-% Grenze, ab der lt. ÖNORM EN 335-1 das Wachstum holzerstörerischer Pilze möglich ist.

### Wassergehalt äußere Holzschalung Dämmebene und Trägerebene

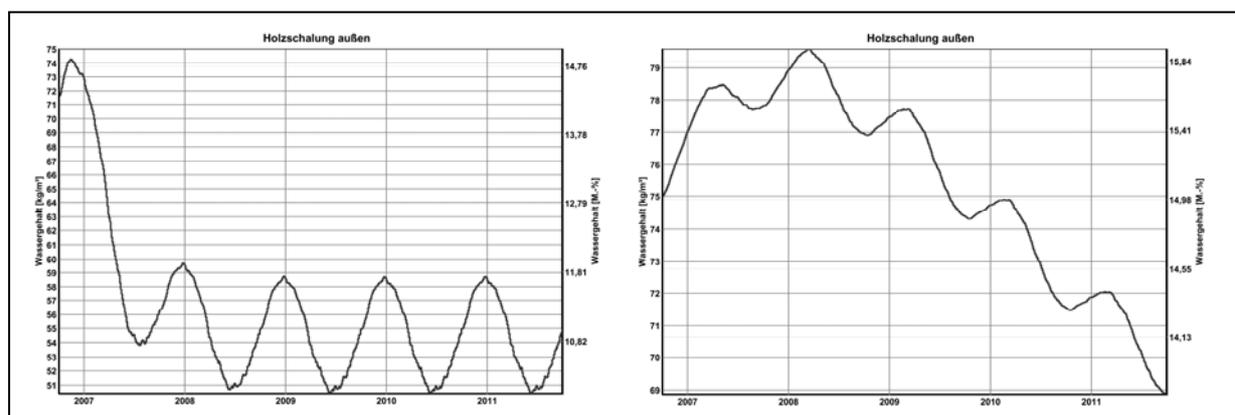
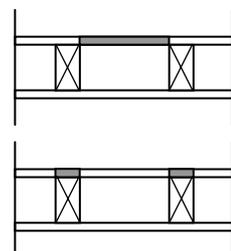


Abbildung 5.9: Wassergehalt der äußeren Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene des Multibox-Elementes zur Verbesserung der Raumakustik

Die äußere Holzschalung in der Dämmebene und in der Trägerebene weist einen über vier Jahre (Berechnungszeitraum: Ende 2007 – Ende 2011) hinweg abnehmenden Wassergehalt auf.

Die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf liegt für die äußere Holzschalung in beiden Ebenen unter 3 M-% und hält somit die Anforderung lt. ÖNORM B 8110-2 ein.

Der Wassergehalt liegt im gesamten Berechnungszeitraum zwischen 9,0 und 16,0 M-%.



### Wassergehalt Träger

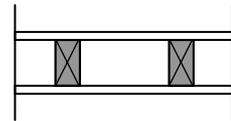
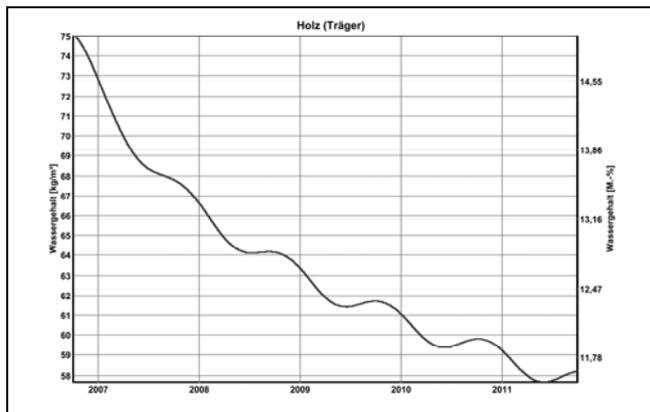


Abbildung 5.10: Wassergehalt des Trägers des Multibox-Elementes zur Verbesserung der Raumakustik

Der Wassergehalt des Trägers nimmt über vier Jahre ab. Die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf beträgt weniger als 3 M-% und erfüllt daher die Anforderung lt. ÖNORM B 8110-2 für Holz und Holzwerkstoffe.

Der massebezogene Feuchtegehalt des Trägers liegt am Ende der Simulation bei ca. 11,7 M-% und überschreitet zu keinem Zeitpunkt 15 M-%. Es liegen keine ausreichenden Feuchtebedingungen für holzerstörerischen Pilzwachstum vor.

Durch die reduzierte Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf kann auch die Formveränderung aufgrund des unterschiedlichen Feuchtegehaltes der inneren und äußeren Trägerschicht verringert werden.

#### *Schlussfolgerung Multibox-Element zur Verbesserung der Raumakustik*

Durch die Anordnung des Großteils der Dämmung und der Dampfsperre über dem Multibox-Element ergibt sich für die Holzbauteile ein entspannteres Feuchteverhalten.

Ein großer Nachteil dieses Bauteilaufbaus liegt in der zusätzlich notwendigen Aufbauhöhe. Neben den bauphysikalischen Aspekten weist der Aufbau jedoch zwei weitere Vorteile auf: Einerseits kann das Multibox-Element zur Verbesserung der Raumakustik genutzt werden und andererseits kann der Arbeitsaufwand für den gleitenden Anschluss von nichttragenden Zwischenwänden reduziert werden.

## 6 Wege der Vermeidung von Schäden bei Flachdächern im Holzbau, Hinweise für Planung und Normung

In der vorliegenden Arbeit konnten wesentliche Eigenschaften von Multibox-Dächern herausgearbeitet werden, durch deren Kenntnisse ein maßgeblicher Beitrag zur Vermeidung von Schäden bei Flachdächern im Holzbau geleistet wird.

Dazu wurde das Feuchteverhalten von 25 nicht hinterlüfteten Flachdachaufbauten im Holzleichtbau untersucht. Es wurde eine Berechnung nach Glaser und eine dynamische Berechnung des hygrothermischen Verhaltens mit dem Programm WUFI (WUFI Pro 2005) durchgeführt. Im Folgenden werden zusammenfassend die Erkenntnisse für die Planung und die Normung angeführt. Außerdem werden Vorschläge zu weiterführenden Untersuchungen gemacht.

### 6.1 Berechnung nach Glaser

Die Glaserberechnung wurde mit Klimadaten nach ÖNORM B 8110-5 für die drei unterschiedlichen Klimastandorte Bregenz, Bürs und Schröcken durchgeführt. Die Auswertung der Berechnungsergebnisse der Glasermethode zeigen, dass kein feuchtetechnisches Problem für die Aufbauten zu erwarten ist. Wie vor der Berechnung bereits erwartet wurde, ergibt sich für den tiefer gelegenen Standort Bregenz eine geringere Kondensatmenge als für den höher gelegenen Standort Schröcken. Dies ist auf den höheren Monatsmittelwert der Außenlufttemperatur für Bregenz gegenüber Schröcken zurückzuführen.

Der einzige Problempunkt, der mit der Berechnung nach Glaser eruiert wurde, ist eine raumseitig der Dampfsperre /-bremse angeordnete Dämmung in der Installationsebene.

### 6.2 Dynamische Simulation

Die Berechnung des hygrothermischen Verhaltens der Bauteilaufbauten mit dem Programm WUFI wurde ebenfalls für die drei Standorte Bregenz, Bürs und Schröcken durchgeführt.

Aus der Analyse der Simulationsergebnisse konnten mehrere Erkenntnisse gewonnen werden:

#### *Einfluss der Klimadaten auf das Feuchteverhalten*

Das Verhalten des Gesamtwassergehaltes der Bauteilaufbauten an den drei Standorten wurde verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass am Standort Bregenz tendenziell mehr Bauteilaufbauten einen ansteigenden Gesamtwassergehalt aufweisen als an den Standorten Bürs und Schröcken. Außerdem ist die Anstiegsmenge des Gesamtwassergehaltes der Aufbauten für Bregenz im Durchschnitt höher als für Bürs und Schröcken.

Bei der dynamischen Berechnung mit WUFI zeigt sich die gegenteilige Tendenz wie bei der Glaserberechnung: Während bei der Berechnung nach Glaser für Bregenz günstigere Bedingungen für das Feuchteverhalten der Bauteilaufbauten herrschen, werden bei der dynamischen Simulation für denselben Standort im Vergleich zu Bürs und Schröcken ungünstigere Bedingungen für die Flachdachaufbauten festgestellt.

Als Ursache für die Simulationsergebnisse wurden bei der Analyse der Klimadaten die Tagessummen der solaren Strahlung (Globalstrahlung und Himmelsstrahlung) erkannt. Die höheren Tagessummen an den Standorten Bürs und Schröcken fördern das Austrocknungspotential der Bauteilaufbauten, während in Bregenz bei weniger auf dem Bauteil auftreffender Strahlung weniger Austrocknung und somit mehr Anstieg des Gesamtwassergehaltes stattfindet.

Das Klima hat einen entscheidenden Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Multibox-Dächer. Als wesentlicher Klimaparameter konnte die solare Strahlung ermittelt werden.

Der Leitsatz, die Errichtung von nicht hinterlüfteten Multibox-Dächern in höher gelegenen Regionen zu vermeiden, kann damit widerlegt werden. Gerade höher gelegene Regionen weisen oft höhere Strahlungssummen auf. Orte in Tälern und niedrigen Lagen haben oft ein feuchtes Klima mit viel Bewölkung und Nebelbildung, was sich negativ auf den Gesamtwassergehalt in nicht hinterlüfteten Multibox-Dächern auswirkt.

Da bei Simulationen mit dem Programm WUFI selten die Klimadaten für den künftigen Standort zur Verfügung stehen, wird für die Berechnung im Normalfall der nächste verfügbare Klimastandort bzw. ein als ungünstig eingeschätztes Klima verwendet.

Bei der Entscheidung bzgl. der zu verwendenden Klimadaten ist bei künftigen Simulationen vor allem auf die solare Strahlung zu achten.

#### *Hygrothermisches Verhalten der äußeren Holzschalung*

Die äußere Holzschalung besteht aus plattenförmigen Holzwerkstoffen oder Holzlatten, die die Dämmung und den Träger überspannen. Für die eindimensionale Berechnung mit WUFI wurden die beiden Bereiche – Dämmebene und Trägerebene – einzeln berechnet. Der eventuelle Feuchteaustausch innerhalb der Holzschalung konnte daher nicht berücksichtigt werden.

Der Vergleich der Simulationsergebnisse für die äußere Holzschalung gibt Aufschluss über die unterschiedlichen hygrischen Beanspruchungen in den beiden Bereichen.

Es wurde festgestellt, dass die Holzschalung in der Trägerebene zu langfristig ansteigenden Wassergehalten tendiert.

Die Holzschalung in der Dämmebene dagegen ist eher starken kurzfristigen Schwankungen des Wassergehaltes ausgesetzt. Die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf ist für die Holzschalung in der Dämmebene stärker ausgeprägt als in der Trägerebene.

Durch den kurzfristigen Anstieg des Wassergehaltes stellen sich höhere Werte für den maximalen massebezogenen Feuchtegehalt der Holzschalung in der Dämmebene ein.

Dementsprechend unterscheidet sich auch die Vorhersage von Schimmelpilz auf der Holzschalung im Gefachbereich von der Holzschalung in der Trägerebene. Für die Schalung in der Dämmebene wurden weniger hygrothermische Zustände mit Idealbedingungen für Schimmelpilzwachstum festgestellt. Sobald diese Zustände jedoch eintreten, herrschen für Pilzwachstum derart ideale Bedingungen, dass er schneller vor sich geht als in der Trägerebene.

#### *Die Grenzen der normativen Anforderungen*

Für die Berechnung nach Glaser werden in der ÖNORM B 8110-2, in der DIN 4108-3 und in SIA 180 Grenzwerte vorgegeben. Insbesondere die Anforderung an die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes von Holz und Holzwerkstoffen spielt bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse von Multibox-Dächern mit der Glasermethode eine Rolle. Für die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes von Holz und Holzwerkstoffen sind maximal 3 % zulässig (5 % für Holz nach DIN 4108-3).

In der Simulation mit WUFI wird die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes der Holzbauteile über die Schwankung des Wassergehaltes ermittelt. Gleichzeitig wurden die Bedingungen für Schimmelpilzwachstum für die äußere Holzschalung bewertet.

Es konnte festgestellt werden, dass keine Übereinstimmung der Anzahl von Bauteilaufbauten mit Schädigung der Holzschalung unter Beurteilung nach den Grenzwerten der Norm und der Anzahl der Bauteilaufbauten mit hygrothermischen Zuständen für Schimmelpilzwachstum vorliegt.

Für die Beurteilung der Simulationsergebnisse kann die Betrachtung der Grenzwerte nach Norm einen ersten Schritt darstellen, reicht aber nicht aus, um ein um das hygrothermische Verhalten beurteilen zu können.

Weitere betrachtete Parameter müssen der tatsächliche Feuchtegehalt von Holzbauteilen (nicht nur die Schwankung im Jahresverlauf) und die hygrothermischen Zustände an kritischen Punkten sein.

Normative Festlegungen von Grenzwerten für Berechnungsergebnisse von Holzbauteilen in dynamischen Berechnungen könnten durch die Grenzisoplethen Lim B I und Lim B II (Sedlbauer 2001) oder durch die Zeitdauern  $t_m$  und  $t_v$  nach Hukka und Viitanen (Viitanen 2001) erreicht werden.

### *Die Eigenheiten des hygrothermischen Verhaltens der Trägerebene*

Das Feuchteverhalten der Trägerebene wurde anhand von zwei Bauteilaufbauten detaillierter untersucht. Dadurch konnten zwei wesentliche Eigenheiten des hygrothermischen Verhaltens der Trägerebene ermittelt werden.

### **Anstieg des Wassergehaltes im außenliegenden Randbereich des Trägers**

Im äußeren Bereich des Trägers findet ein langfristiger Anstieg des Wassergehaltes statt. In diesem Bereich ergeben sich dementsprechend höhere Werte für den massebezogenen Feuchtegehalt. An der Innenseite des Trägers wurde hingegen eine langfristige Abnahme des Wassergehaltes festgestellt. Die maximalen Werte des massebezogenen Feuchtegehaltes bleiben niedriger im Vergleich zum äußeren Bereich des Trägers.

Bei der Ausbildung von Trägern (insbesondere Brettschicht-Träger) ist daher vor allem auf die Holzeigenschaften und Behandlung der äußeren Bereiche zu achten.

### **Schwankung des Wassergehaltes innen und außen gegengleich**

Die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf findet im Träger an den oberflächennahen Bereichen innen und außen gegengleich statt. Während der kühleren Wintermonate steigt der Wassergehalt im äußeren Bereich an und sinkt im raumseitigen Bereich ab. In den warmen Sommermonaten findet das Gegenteil statt: Der Wassergehalt im äußeren Trägerbereich sinkt und im innenseitigen Trägerbereich steigt er an.

Außerdem wurde festgestellt, dass die Schwankung im Jahresverlauf für die Randbereiche stärker ausgeprägt ist als in der Trägermitte.

Die Schwankungen der Holzfeuchte werden bei Holzbauteilen mit Formveränderungen durch Schwinden und Quellen begleitet. Der gleichzeitige Anstieg der Holzfeuchte im äußeren Bereich und das Sinken des Feuchtegehaltes im raumseitigen Bereich führen zu einer positiven Längenänderung oben und einer negativen Längenänderung unten. Dadurch entsteht in den kühlen Wintermonaten eine Wölbung des Trägers nach oben, in den Sommermonaten ergibt sich der gegenteilige Effekt mit einer Wölbung nach unten.

Bei der Planung sollte dieses Verhalten berücksichtigt werden. Einerseits werden dadurch gleitende Deckenanschlüsse von nichttragenden Zwischenwänden bedingt. Andererseits ist auch bei der Ausbildung der Dampfsperre /-bremse darauf zu achten, dass diese die Formänderungen ohne Aufreißen der Verklebungen aufnehmen können.

Der Träger und die darüberliegende Holzschalung sind starken hygrischen Beanspruchungen ausgesetzt. Bei der Planung kann dies berücksichtigt werden, indem bevorzugt schlanke Träger eingesetzt werden. Dadurch können die Bereiche der hohen Beanspruchung für die Holzschalung gering gehalten werden.

### *Vergleich der Ergebnisse aus den Glaserberechnungen und der dynamischen Simulation*

Die Ergebnisse aus der Glaserberechnung und der dynamischen Simulation mit WUFI weisen große Unterschiede auf.

Mit der dynamischen Simulation wurde festgestellt, dass die solare Strahlung einen großen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der untersuchten Bauteilaufbauten ausübt. Um festzustellen, ob dieser Einfluss auch mit einer Berechnung nach Glaser abgebildet werden kann, wurden in einer zweiten Berechnung mit der Glasermethode Strahlungslufttemperaturen eingesetzt.

Auch unter Berücksichtigung der solaren Strahlung können mit der Glasermethode keine Ergebnisse für die untersuchten Konstruktionen erzielt werden, die den Simulationsergebnissen aus WUFI entsprechen.

Das Simulationsprogramm WUFI berücksichtigt im Vergleich zur Glaserberechnung großteils die realen Einflüsse auf das hygrothermische Verhalten der Bauteilaufbauten (kapillarer Feuchtetransport, Sorptionsverhalten, Strahlungsabsorption, etc.). Die Berechnungsergebnisse aus dem Programm WUFI bilden daher das reale Feuchteverhalten besser ab als eine Berechnung nach Glaser.

### 6.3 Einfluss und Verhalten einzelner Materialien

Der Einfluss auf das hygrothermische Verhalten der Bauteilaufbauten und das Verhalten der Dämmung, Dampfsperre /-bremse und der Dachhaut wurde anhand der Simulationsergebnisse aus dem Programm WUFI näher untersucht.

#### *Dämm-Material*

Anhand der untersuchten Bauteilaufbauten wurden die beiden Materialien Zellulose und Mineralwoll-Dämmung verglichen.

Dabei wurde festgestellt, dass für Zellulose-Dämmung die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf für alle untersuchten Aufbauten über den lt. Norm zulässigen Werten liegt. Außerdem weisen die Bauteile mit Zellulosedämmung einen hohen massebezogene Feuchtegehalt für die Dämmung auf.

Bauteilaufbauten mit Mineralwoll-Dämmung zeigen große Unterschiede in ihrem hygrothermischen Verhalten, die auf andere Materialeigenschaften (Dampfsperre /-bremse, Dachhaut, etc.) zurückgeführt werden.

Es wird empfohlen bei der Auswahl des Dämm-Materials für ein Multibox-Element auf dessen Verhalten unter Feuchteeinwirkung und seine Schimmelresistenz zu achten.

#### *Dampfsperre /-bremse*

Die vorliegende Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von nicht hinterlüfteten Flachdachaufbauten im Holzbau basiert auf ausgeführten Aufbauten, für die vorwiegend Dampfsperren mit einem lt. ÖNORM vorgeschriebenen  $s_d$ -Wert  $\geq 130\text{m}$  verwendet wurden.

Es konnte kein signifikanter Einfluss des  $s_d$ -Wertes der Dampfsperre /-bremse auf das Feuchteverhalten der Bauteile festgestellt werden.

Dagegen stellten Gonin, Weber und Blaser (Gonin et al. 2003) in ihrem Forschungsbericht zu Hohlkastenelementen fest, dass die Änderung des  $s_d$ -Wertes der inneren Bauteilschicht eine starke Auswirkung auf das Feuchteverhalten des Bauteils bewirkt. Ihre Untersuchung bezieht sich jedoch auf  $s_d$ -Werte der inneren Bauteilschicht von 2,0 m bis 12,0 m.

Die Auswirkungen des  $s_d$ -Wertes der Dampfsperre /-bremse und die Sinnhaftigkeit von hohen  $s_d$ -Werten sollten in weiteren Studien untersucht werden.

#### *Dachhaut: $s_d$ -Wert*

Der Vergleich der untersuchten Bauteilaufbauten zeigte, dass Aufbauten mit einem niedrigen  $s_d$ -Wert der Dachhaut (zwischen 33 m und 70 m) ein höheres Austrocknungspotential aufweisen als Dächer, deren Dachhaut einen hohen  $s_d$ -Wert hat.

Für nicht hinterlüftete Flachdächer im Holzleichtbau wird daher empfohlen auf Dachfolien mit niedrigem  $s_d$ -Wert zurückzugreifen. Neben den ökologisch ungünstig eingestuften Dachbahnen aus PVC weisen zum Teil auch Dachfolien aus Kautschuk niedrige  $s_d$ -Werte auf.

#### *Dachhaut: Farbe und Oberflächenbeschaffenheit*

Durch eine Simulation mit geänderten Absorptions- und Emissionszahlen konnte der entscheidende Einfluss der Absorptions- und Emissionsfähigkeit der äußeren Bauteiloberfläche (Dachhaut) auf das hygrothermische Verhalten von Multibox-Dächern ermittelt werden.

Der Absorptionsgrad  $\alpha$ , der durch die Oberflächenfarbe bestimmt wird, spielt dabei eine größere Rolle als der Emissionsgrad  $\epsilon$ , der von der Oberflächenbeschaffenheit (glänzend, matt) abhängt. Durch den Absorptionsgrad  $\alpha$  wird das Verhältnis der absorbierten Strahlung zur auftreffenden Strahlung im energetisch wirksamen Spektrum des Sonnenlichts beschrieben. Je dunkler die Oberfläche, desto höher ist die Absorptionsfähigkeit.

Da für den Absorptionsgrad  $\alpha$  im Normalfall keine Herstellerangaben vorliegen, erfolgt seine Ermittlung über die Einschätzung der Oberflächenfarbe und in der Literatur vorhandene Angaben. Bereits geringe Unterschiede in der Bewertung der Farbe können einen entscheidenden Einfluss auf die Simulationsergebnisse bewirken.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Dachhaut als äußere Bauteilschicht für alle Aufbauten angenommen. In weiteren Untersuchungen könnte die Auswirkung einer Kiesauflage, einer Abdeckung der Dachhaut durch Betonplatten oder der Ausbildung eines Gründaches eruiert werden.

## 6.4 Vorschläge zur Verbesserung des hygrothermischen Verhaltens von nicht hinterlüfteten Multibox-Dachaufbauten

Den Abschluss dieser Arbeit bildet die Untersuchung von Vorschlägen zur Verbesserung des hygrothermischen Verhaltens von nicht hinterlüfteten Flachdachaufbauten im Holzleichtbau. Dazu wurde die Auswirkung einer Außendämmung und von feuchtevariablen oder feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremsen analysiert. Weiters wurde eine Änderung des Aufbaus vorgeschlagen, die eine geringere Feuchtebelastung von Holzbauteilen bewirkt.

### *Außenliegende Zusatzdämmung*

Die Anbringung einer Zusatzdämmung über der äußeren Holzschalung bewirkt nicht immer eine Verbesserung der hygrothermischen Bedingungen für die Holzbauteile. Je nach Dämmstoffdicke kann die Feuchtebelastung der äußeren Holzschalung verstärkt oder verringert werden. Eine individuelle Berechnung des betreffenden Bauteilaufbaus ist notwendig, um die Dämmstoffdicke zu dimensionieren.

In weiterführenden Studien könnten die Proportionen der Dämmstoffdicken der Zusatzdämmung zur Gefachdämmung unter Berücksichtigung der Dämmstoffeigenschaften eruiert werden. Für die außenliegende Zusatzdämmung könnten durchaus andere Dämm-Materialien als die in der vorliegenden Studie untersuchte Mineralwoll-Dämmung interessant sein: EPS (expandiertes Polystyrol), XPS (extrudiertes Polystyrol), PU (Polyurethan), etc.

### *Feuchtevariable und feuchtigkeitsaustrocknende Dampfbremse*

Feuchtevariable Dampfbremsen sind Folien, deren  $s_d$ -Wert sich je nach Feuchtegehalt der Umgebung ändert. Feuchtigkeitsaustrocknende Dampfbremsen funktionieren durch den kapillaren Feuchtetransport über ein saugfähiges Kunststoff-Faservlies zwischen sich überlappenden Folienstreifen aus Polyethylen.

Es wurde gezeigt, dass die Verwendung einer feuchtevariablen oder feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse nicht automatisch eine Verbesserung der Feuchtebelastung der Holzbauteile eines nicht hinterlüfteten Flachdachs bewirkt. Je nach  $s_d$ -Wert kann sich mit diesen Dampfbremsen ein höherer Anstieg des Gesamtwassergehaltes in der Dämmebene, ein höherer Anstieg des Wassergehaltes der Holzschalung in der Dämmebene und ein höherer Anstieg des Wassergehaltes der Dämmung ergeben als mit einer herkömmlichen Dampfsperre.

Weiters wurde gezeigt, dass das Feuchteverhalten von Bauteilaufbauten mit einer feuchtevariablen oder einer feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremse sensibler auf die Änderung der Strahlungsabsorptionseigenschaften der äußeren Bauteilschicht reagiert als Bauteilaufbauten mit Dampfsperre.

Bei der Verwendung von feuchtevariablen und feuchtigkeitsaustrocknenden Dampfbremsen wird daher empfohlen, eine dynamische Simulation durchzuführen.

### *Multibox-Element zur Verbesserung der Raumakustik*

Als Variante zum ausgedämmten Multibox-Element wird in dieser Arbeit das Multibox-Element zur Verbesserung der Raumakustik vorgeschlagen: Die Wärmedämmung wird über dem Multibox-Element angeordnet. Das Element selbst ist mit einer gelochten unterseitigen Schalung und einer Dämmung (ca. 5cm) ausgestattet, die zur Verbesserung der Raumakustik beitragen.

Die Holzbauteile in diesem Aufbau liegen raumseitig und werden nicht zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut eingeschlossen. Daher können sich entspannte hygrische Zustände in den Holzbauteilen einstellen.

## 6.5 Empfehlungen für die Normung

Für die Normung im Bereich Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz (ÖNORM B 8110-2), Holzbau (ÖNORM EN 335-1) und Dächer mit Abdichtungen (ÖNORM B 7220) werden aufgrund dieser Arbeit folgende Empfehlungen gegeben:

- **dynamische Berechnung:**  
Es wird empfohlen eine dynamische Berechnung des Feuchteverhaltens von Dachaufbauten ohne Hinterlüfungsebene vorzuschreiben.  
Die dynamische Berechnung sollte einerseits die stündlichen Werte der Außenklimabedingungen und andererseits die feuchteabhängigen Materialeigenschaften der Bauteilkomponenten berücksichtigen.
- **Grenzwerte:**  
Mit der Einführung der dynamischen Berechnung in der Norm sollte ein Überdenken der Grenzwerte für den Feuchtegehalt von Baustoffen stattfinden.  
Die aktuellen Grenzwerte beziehen sich auf die Erhöhung des massebezogenen Feuchtegehaltes der gesamten Konstruktion während eines Jahres (ÖNORM B 8110-2).  
Mit der dynamischen Berechnung über mehrere Jahre ist es notwendig, Grenzwerte für die Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf, Grenzwerte für den mittleren Anstieg des Wassergehaltes über mehrere Jahre und Grenzwerte für die maximale massebezogene Feuchtigkeit einer Bauteilschicht festzulegen.  
Für Holzbauteile könnte die Bestimmung von Grenzwerten beispielsweise über das Isoplethenmodell von Sedlbauer (Sedlbauer 2001) oder das Modell von Hukka und Viitanen (Viitanen 2001) erfolgen.
- **Strahlungsabsorption und –emission:**  
Solange keine ausreichenden Kennwerte der Strahlungsabsorption und -emission für Dachhautmaterialien vorliegen, erscheint es sinnvoll diese Werte in der Norm für die Berechnungen bindend vorzugeben, um unrealistischen Berechnungen vorzubeugen und vergleichbare Ergebnisdaten zu erhalten.

## 6.6 weiterführende Forschung

Weiterführend zur vorliegenden Arbeit werden folgende Forschungsthemen vorgeschlagen:

- Bestimmung der Kennwerte für Dachhautprodukte (Strahlungsabsorption und –emission):  
Für die gängigen Dachhautprodukte sollten Strahlungsabsorptionszahlen ermittelt werden.
- Dachhaut mit Auflast (Kiesschüttung oder Gründach):  
Der Einfluss der Deckschichten – deren Strahlungseigenschaften, Wärmespeicherkapazität, etc. – auf das Verhalten des Dachaufbaus könnte in einer weiteren Untersuchung bestimmt werden.
- Untersuchung der optimalen Proportionen einer Zusatzdämmung  
In der vorliegenden Arbeit wurde aufgezeigt, dass eine Zusatzdämmung auf dem Multibox-Element bei unglücklicher Dimensionierung zu hoher Feuchtebelastung für die äußere Holzschalung führen kann. In einer weiterführenden Untersuchung könnte eine Faustformel zur Dimensionierung der Zusatzdämmung erarbeitet werden.
- Untersuchung an gebauten Objekten  
Durch Feuchtigkeitsmessungen an gebauten Multibox-Elementen können eventuell Rückschlüsse auf weitere Problemstellen dieses Aufbaus gezogen werden und die Berechnungsergebnisse verifiziert werden.

## 7 Übersicht über Zeichen und Einheiten

Zeichen	Einheit	Größe
Dä	-	Dämmebene
Tr	-	Trägerebene
$\mu$	-	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl
$s_d$	m	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke ( $s_d = \mu \cdot d$ )
d	m	Schichtdicke
$\Delta u_m$	kg/m <sup>2</sup> , %	Schwankung des Gesamtwassergehaltes des Bauteils im Jahresverlauf
$\Delta u_{m,i}$	kg/m <sup>2</sup>	Schwankung des Wassergehaltes der Bauteilschicht i im Jahresverlauf
$\Delta u_{m,HD}$	kg/m <sup>2</sup>	Schwankung des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Dämmebene im Jahresverlauf
$\Delta u_{m,D}$	kg/m <sup>2</sup>	Schwankung des Wassergehaltes der Dämmung im Jahresverlauf
$\Delta u_{m,HT}$	kg/m <sup>2</sup>	Schwankung des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Trägerebene im Jahresverlauf
$\Delta u_{m,T}$	kg/m <sup>2</sup>	Schwankung des Wassergehaltes des Trägers im Jahresverlauf
$\Delta u'_m$	kg/m <sup>2</sup>	Veränderung des Gesamtwassergehaltes des Bauteils über 4 Jahre
$\Delta u'_{m,i}$	kg/m <sup>2</sup>	Veränderung des Wassergehaltes der Bauteilschicht i über 4 Jahre
$\Delta u'_{m,HD}$	kg/m <sup>2</sup>	Veränderung des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Dämmebene über 4 Jahre
$\Delta u'_{m,D}$	kg/m <sup>2</sup>	Veränderung des Wassergehaltes der Dämmung über 4 Jahre
$\Delta u'_{m,HT}$	kg/m <sup>2</sup>	Veränderung des Wassergehaltes der äußeren Holzschalung in der Trägerebene über 4 Jahre
$\Delta u'_{m,T}$	kg/m <sup>2</sup>	Veränderung des Wassergehaltes des Trägers über 4 Jahre
$M_{a,max}$	kg/m <sup>2</sup>	Maximale Kondenswassermenge
$M_a$	kg/m <sup>2</sup>	Kondenswassermenge
M-%	%	Massebezogener Feuchtigkeitsgehalt

## 8 Literaturverzeichnis

### *Literatur:*

- bauen mit holz. Special. 1995. Moderne, tragende Werkstoffe aus Holz. 1995. Bruderverlag. Karlsruhe.
- Black, Christopher David. 2006. Mould resistance of full scale Wood Frame Wall Assemblies. Master-  
Thesis. Waterloo. Ontario. Canada. 2006.
- Block, S.S. 1953. Humidity requirements for mold growth. Applied Microbiology 1. H. 6, p 267 ff. zitiert  
bei: (Sedlbauer 2001)
- Bonk, Michael. Arndt, Newen. 2004. Unbelüftete Flachdächer mit Vollsparrendämmung.  
Unzureichende Berücksichtigung der Baufeuchte. In: Zimmermann, G. Schuhmacher, R.  
(Hrsg). 2004. Bauschadensfälle. Band 6. Tauwasserbildung in Dächern und Wänden.  
Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart. p 104 - 109
- Borsch-Laaks, Robert. 2004. Belüftet oder lieber doch nicht? Tauwasserschutz bei flach geneigten  
Dächern in Holzbauweise. In: die neue Quadriga. 5/2004. p 17 – 22 [http://www.naturbau-  
oh.de/D-loads\\_Links\\_Filme/Dacher\\_Beluftet\\_oder\\_lieber\\_doch\\_nicht.pdf](http://www.naturbau-oh.de/D-loads_Links_Filme/Dacher_Beluftet_oder_lieber_doch_nicht.pdf). (abgerufen:  
24.09.2009)
- Bruckner, Heinrich. Schneider, Ulrich. 1997. Wiener Baustofflehre Blätter. Holz. Schriftenreihe des  
Instituts für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz.
- Galiläa, Klaus J. Walloschke, Ralph. Wossnig, Peter. 1997. Holzbau für Architekten. Aktuelles  
Planungshandbuch für Konstruktion, bauphysikalische Anforderungen und Sanierung mit  
Projektbeispielen. WEKA Baufachverlage GmbH. Augsburg. ISBN 3-8277-4848-8
- Geissler, Susanne. Winter, Wolfgang. 2000. Institut für Tragwerkslehre, TU Wien. Studienunterlagen  
Holzbau für Architekten. 2000. Mehrgeschossiger Holzbau in Österreich: Ökologie.
- Gonin, Marc-André. Weber, Heinz. Blaser, Christoph. 2003. Hohlkastenelemente als Tragkonstruktion  
für Dächer. Forschungsbericht. Nr. 2613-HB-01. Schweizerische Hochschule für die  
Holzwirtschaft, SH-Holz, Biel.
- Halász, R. (Hrsg). 1986. Grundlagen. Entwurf und Konstruktionen. Holzbau-Taschenbuch. 8. Auflage.  
Band 1. Berlin. ISBN 3-433-00990-2. zitiert bei: Praktische Hinweise zur Entwicklung von  
Tragwerken. Studienunterlagen Holzbau für Architekten. 2000. Institut für Tragwerkslehre, TU  
Wien.
- Haustein, Tilo. 2007. Schäden an Dächern. Ursachen, Bewertung und Sanierung. In: Tagungsband.  
42. Bausachverständigen-Tag im Rahmen der Frankfurter Bautage 2007. Fraunhofer IRB  
Verlag. Stuttgart. p 41 – 52.
- Heindl, W. Kornicki, T. Sigmund, A. 1990. Erstellung halbsynthetischer Klimadatensätze für  
meteorologische Messstationen. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für  
Wissenschaft und Forschung (GZ. 70.630/18-25/88) und des Amtes der NÖ - Landesregierung  
(Zl. NC 23-1988/1989). Wien. 1990
- Heindl, W. Kreč, Klaus. 1985. Interpolation und Kontinuierung. Forschungsbericht im Auftrag des  
BMWF. 1985
- Hinrichs, Jan Peter. Holm, Andreas. 2008. Thermische Untersuchungen an einem Metaldach mit  
Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle und Holzfaserdämmplatten. In: wksb. Zeitschrift  
für Wärmeschutz – Kälteschutz – Schallschutz – Brandschutz. 2008. Heft 60. p 31 - 36

- Hohmann, Rainer. Setzer, Max J. Wehling, Martin. 2004. Bauphysikalische Formeln und Tabellen: Wärmeschutz – Feuchteschutz – Schallschutz. Werner Verlag. München/Unterschleißheim. ISBN 3-8041-2096-2.
- Holm, Andreas H. Künzel, Hartwig M. 2000. Feuchtetechnisches Verhalten von Holzsparren bei einer Dachsanierung von außen. IBP-Mitteilung 370. Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Stuttgart.  
[http://www.hoki.ibp.fhg.de/ibp/publikationen/ibp\\_mitteilungen/ibp370.pdf](http://www.hoki.ibp.fhg.de/ibp/publikationen/ibp_mitteilungen/ibp370.pdf) (abgerufen: 23.09.2009)
- Holm, Andreas H. 2001. Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Dissertation.
- Hukka, A. Viitanen, H. A. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology Nr. 33. 1999.p 457 - 485.
- Icopal 2009. Produktinformationen der Firma Icopal. Produktionformation Hygrodiode 20 Classic (20007-12). Magistrat der Stadt Wien, MA 39: Prüfbericht über die Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit, 04.10.1990. Leistungskurven im Vergleich Produktinformation Hygrodiode 100 (20007-12). Magistrat der Stadt Wien, MA 39: Prüfbericht über die Wasserdampfdurchlässigkeit einer Hygrodiode, 02.02.2006
- Kapfinger, Otto. 2003. Konstruktive Provokation. Neues Bauen in Vorarlberg. Vorarlberger Architekturinstitut. Verlag Anton Pustet. Salzburg. ISBN 3-7025-0474-5
- Karagiozis, Achilles. 2002. A North American Research Approach to Moisture Design by Modelling. Building Physics 2002 – 6<sup>th</sup> Nordic Symposium. Session 15: Effects of moisture 2. p 643 – 650.
- Koch, H.A. Pechinger, U. 1977. Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Sonnen- und Wärmestrahlungseinflüssen auf Gebäudeoberflächen. Gesundheits-Ingenieur 98. 1977. H 10. p 265-280.
- Krus, M. Sedlbauer, K. 2004. Vorteile und Einsatzgrenzen von Dämmstoffen. In: Gänßmantel. Ökonomie und Ökologie in der Bauwerkserhaltung. Sonderheft Denkmal 2004. WTA – Schriftenreihe. WTA-Publications. München. ISBN 978-3-937066-02-8 | WTA. p 99 – 117, [www.ibp.fhg.de/literatur/fachz/04-Vorteile\\_NachwachsendeDaemmstoffeWTA.pdf](http://www.ibp.fhg.de/literatur/fachz/04-Vorteile_NachwachsendeDaemmstoffeWTA.pdf) (abgerufen 23.04.2009)
- Künzel, Hartwig M. 1994. Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Stuttgart. Universität. Dissertation. 1994. zitiert bei: (Hohmann et al. 2004)
- Künzel, Hartwig M. Großkinsky, Theo. 1998. Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an! In: wksb. Zeitschrift für Wärmeschutz – Kälteschutz – Schallschutz – Brandschutz. 1998. Heft 42. p 22 - 27
- Künzel, Hartwig M. 1999. Einfluß der Deckschicht auf die Temperaturverhältnisse in Flachdächern. IBP-Mitteilung, 354. Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Stuttgart.
- Künzel, Hartwig M. Zirkelbach, Daniel. 2006. Feuchtebeurteilung von Holzkonstruktionen durch ein- oder zweidimensionale Simulation? WTA-Almanach 2006 „Bauinstandsetzen und Bauphysik“. p 397 – 411. [http://www.hoki.ibp.fhg.de/ibp/publikationen/fachzeitschriften/WTA-Almanach\\_2006.pdf](http://www.hoki.ibp.fhg.de/ibp/publikationen/fachzeitschriften/WTA-Almanach_2006.pdf) (abgerufen: 23.09.2009)
- Künzel, Hartwig M. Sedlbauer, Klaus. 2007. Reflektierende Flachdächer - sommerlicher Wärmeschutz kontra Feuchteschutz. IBP-Mitteilung, 482. Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Stuttgart.

- Lignatec 2001. EMPA / Lignum-Richtlinie. 14/2001. Holzzerstörende Pilze und Insekten. Analyse – Prognose – Bekämpfung. Schück Söhne AG, Rüschlikon. ISSN 1 42 1-0320
- Lutz, Jenisch, Richard. Klopfer, Heinz. Freymuth, Hanns. Krampf, Petzold, Karl. 2002. Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. B.G. Teubner GmbH. Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden. ISBN 3-519-45014-3.
- Niemz, Peter. 1993. Holz. Anatomie – Chemie – Physik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. DRW-Verlag. Leinfelden-Echterdingen. ISBN 3-87181-324-9.
- pro:Holz. Information. 2002. Mehrgeschossiger Holzbau in Österreich. Holzskelett- und Holzmassivbauweise. ISSN 1680-4252.
- Reiß, J. 1988. Schimmelpilze – Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 2. Auflage. Springer-Verlag. Heidelberg. zitiert bei: (Sedlbauer 2001)
- Rode, C. 1990. Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions. TU of Denmark. Dissertation. 1990. zitiert bei: (Hohmann et al. 2004)
- Schulze, Horst. 2005. Holzbau. Wände-Decken-Bauprodukte-Dächer-Konstruktionen-Bauphysik-Holzschutz. B.G.Teubner Verlag. Wiesbaden. ISBN 3-519-25258-9.
- Sedlbauer, Klaus. Großkinsky, Theo. 1999. Freilanduntersuchung über das winterliche Feuchteverhalten eines belüfteten Flachdaches. IBP-Mitteilung, 349. Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Stuttgart.
- Sedlbauer, Klaus. 2001. Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation. <http://www.hoki.ibp.fhg.de/indexd.html> (abgerufen: 18.12.2006)
- Sedlbauer, Klaus. Großkinsky, Theo. 2002. Freilanduntersuchungen bestätigen: auch gering belüftete Flachdächer trocknen aus! IBP-Mitteilung, 400. Neue Forschungsergebnisse, kurz gefaßt. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. Stuttgart.
- Snow, D. 1949. The germination of mould spores at controlled humidities. Annuals of Applied Biology. Vol. 36. H. 1, p 1ff. zitiert bei: (Sedlbauer 2001)
- Sperzel, Nicole. 2004. Energieeffiziente Häuser aus regionalem Holz im Alpenraum. CIPRA International (Hrsg). [http://www.cipra.org/pdfs/249\\_de/at\\_download/file](http://www.cipra.org/pdfs/249_de/at_download/file) (abgerufen: 23.09.2009)
- SVDW = Schweizerischer Verband Dach und Wand – Technische Kommission Flachdach. 2007. Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise. Merkblatt FD 2/07. Dezember 2007. [http://www.sarnafil.ch/merkblatt\\_holzbau\\_im\\_flachdach.pdf](http://www.sarnafil.ch/merkblatt_holzbau_im_flachdach.pdf) (abgerufen: 23.09.2009)
- Trendelenburg, R. 1955. Holz als Rohstoff. Hanser. München 1955. zitiert bei: (Niemz 1993)
- Viitanen, Hannu. 2001. Factors affecting mould growth on kiln dried wood. 3<sup>rd</sup> Workshop on softwood drying to specific end uses. Helsinki 2001. Cost Action E 15, Advances in the drying of wood (VTT, Otawood). 4. p 1 – 8. [http://www.byv.kth.se/utb/1D4257/filer/viitanen\\_factors.pdf](http://www.byv.kth.se/utb/1D4257/filer/viitanen_factors.pdf) (abgerufen: 02.12.2007), <http://www1.uni-hamburg.de/cost/e15/papers/helsinki/helsinki-paper0103.pdf> (abgerufen: 08.10.2009)
- Viitanen, Hannu. Ritschkoff, Anne-Christine. Ojanen, Tuomo. Salonvaara, Mikael. 2003. Moisture conditions and biodeterioration risk of building materials and structure. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium ILCDES 2003. Integrated Lifetime Engineering of Buildings and Civil Infrastructures. Kuopio 2003. p 151 – 156.

Wimmer, H. 1991. Beziehungen zwischen Holzstruktur und Holzeigenschaften bei Kiefer (*Pinus silvestris*) im Nahbereich eines Fluoremittenten. Universität für Bodenkultur. Wien. Dissertation. 1991. zitiert bei: (Niemz 1993)

Winter, Wolfgang. 1997. Mauern oder zimmern? Holzbau zwischen Öko-logik und Marktrealität: Eine Standortbeschreibung des Holzbaus. In: *architektur*. 05/1997. zitiert bei: Studienunterlagen Holzbau für Architekten. 2000. Institut für Tragwerkslehre, TU Wien.

ZAMG = Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. 2006a. Wien – Hohe Warte. Auf Bestellung für Bregenz am 30. 8. 2006 gelieferter Datensatz. Mittelungen für das Zeitintervall zwischen 1. 1. 1976 und 31. 12. 2005

ZAMG = Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. 2006b. Langjährige Monatsmittelwerte Schröcken: Klimadaten von Österreich 1971 – 2000. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Wien – Hohe Warte. [www.zamg.ac.at](http://www.zamg.ac.at). Zweig „langjährige Klimadaten“

ZAMG = Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. 2006c. Wien – Hohe Warte. Auf Bestellung für Buers am 30. 8. 2006 gelieferter Datensatz. Mittelungen für das Zeitintervall zwischen 1. 1. 1971 und 31. 12. 2000

Zschokke, Walter (Hrsg). 2002. Hermann Kaufmann – Christian Lenz. Architektur und Struktur. Springer Verlag Wien New York. ISBN 3-211-83309-9

#### *Internetquellen:*

Ampack. 2009. [http://www.ampack.ch/media/Datenblatt\\_Resano\\_CHd.pdf](http://www.ampack.ch/media/Datenblatt_Resano_CHd.pdf) (abgerufen: 07.06.2009)

dataholz. 2009. <http://www.dataholz.com/de/> (abgerufen: 25.09.2009)

Icopal. 2009. <http://www.icopal.at/upload/icopalat/datenblatt%20icovario%202008-11%20s.pdf> (abgerufen: 07.06.2009)

Isover. 2009a. [http://www.isover.at/fileadmin/downloads/produktdatenblatt/alle/VARIO\\_KM-Produktdatenblatt.pdf](http://www.isover.at/fileadmin/downloads/produktdatenblatt/alle/VARIO_KM-Produktdatenblatt.pdf) (abgerufen: 07.06.2009)

Isover. 2009b. [http://www.isover.at/fileadmin/downloads/produktdatenblatt/alle/VARIO\\_KM\\_Duplex-Produktdatenblatt.pdf](http://www.isover.at/fileadmin/downloads/produktdatenblatt/alle/VARIO_KM_Duplex-Produktdatenblatt.pdf) (abgerufen: 07.06.2009)

HTS-Träger. 2009. <http://www.htstraeger.com/produktion.html> (abgerufen: 25.09.2009)

Proclima. 2009. [http://download.proclima.com/de/Beileger/INTELLO\\_2s.pdf](http://download.proclima.com/de/Beileger/INTELLO_2s.pdf) (abgerufen: 07.06.2009)

PVGIS, Solar Irradiation Data, © European Communities, 2001 – 2007, <http://re.jrc.europa.eu/pvgis>

Studer. Strauss. 2002. Merkblatt Flachdach im Holzbau. [http://isocell.ch/pdf/bauphysik/Merkblatt\\_Flachdach.pdf](http://isocell.ch/pdf/bauphysik/Merkblatt_Flachdach.pdf) (abgerufen: 05.07.2006)

*Normen:*

- DIN 1052-1. 1988. Holzbauwerke. Berechnung und Ausführung
- DIN 1052. 2000. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.
- DIN 4108-3. 2001. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- DIN V 4108-4. 2002. Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs
- DIN V 4108-6. 2003. Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs
- DIN 68 800. 1974. Holzschutz im Hochbau. Allgemeines. Blatt 1.
- DIN 68 800-2. 1996. Holzschutz. Teil 2. Vorbeugende bauliche Massnahmen im Hochbau.
- EN ISO 13788. 2001. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788:2001)
- ÖNORM EN 12524. 2000. Baustoffe und –produkte: Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften: Tabellierte Bemessungswert
- ÖNORM B 8110–2. 2003. Wärmeschutz im Hochbau. Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz
- ÖNORM B 8110–5. 2007. Wärmeschutz im Hochbau. Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile
- ÖNORM EN 335-1. 1992. Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Definition der Gefährdungsklassen für einen biologischen Befall. Allgemeines
- ÖNORM B 2215. 1998. Zimmermeister- und Holzbauarbeiten. Werkvertragsnorm.
- ÖNORM B 2217. 1999. Bautischlerarbeiten. Werkvertragsnorm.
- ÖNORM B 2320. 2000. Wohnhäuser aus Holz. Technische Anforderungen.
- ÖNORM B 7220. 2002. Dächer mit Abdichtungen - Verfahrensnorm
- SIA 180. 1999. Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau.

*Programme:*

- ArchiPHYSIK. 2007. Version 6.1.7. Build Nr. W 6142083. A-NULL EDV GmbH. Wien.
- WUFI Pro. 2005. Version 4.0. Release 4.0.0.190.DB.23.10. Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen. Fraunhofer Institut Bauphysik.

Baustoffe aus ÖNORM EN 12524		Daten gemäß ÖNORM EN 12524:2000 bzw. DIN V 4108-4, Tabelle 2			
		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit trocken $\lambda$ [W/mK]	spez. Wärme c [J/kgK]	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$ trocken
Dämmstoffe	Polyurethanhartschaum	41	0,03	1400	60
	EPS	15	0,04	1450	60
	Mineralwolle	60	0,04	1030	1
	Holzwoleleichtbauplatten	450	0,08	1470	5
	Holzfaserdämmplatten	150	0,04	1400	10
	lose Mineralwolle	15	0,04	1030	1
	lose Zellulosefasern	40	0,04	1600	1
Holz und Holzwerkstoffe	Holz (z.B. Fichte)	500	0,13	1600	50
	Holz (z.B. Eiche)	700	0,18	1600	200
	Sperrholz	300	0,09	1600	150
	Sperrholz	500	0,13	1600	200
	Sperrholz	700	0,17	1600	220
	Sperrholz	1000	0,24	1600	250
	Holzspanplatten	300	0,1	1700	50
	Holzspanplatten	600	0,14	1700	50
	Holzspanplatten	900	0,18	1700	50
	OSB-Platten	650	0,13	1700	50
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	250	0,07	1700	5
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	400	0,1	1700	10
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	600	0,14	1700	20
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	800	0,18	1700	30
Einzelbaustoffe	Gipskartonbauplatten	900	0,25	1000	10
	Beton (mittlere Rohdichte)	1800	1,15	1000	100
	Erdreich (Ton, Schlack, Schlamm)	1000	1,5	1670	50
	Bitumen	1050	0,17	1000	50.000*
	Bitumenbahnen	110	0,23	1000	50.000*
	Polyethylen /hoher Dichte	980	0,5	1800	100.000*
	Polyethylen /niedriger Dichte	920	0,33	2200	100.000*
	PVC hart	1390	0,17	900	50.000*
	PVC-P + 40% Weichmacher	1200	0,14	1000	100.000*
	PVC - Dachbahn	1.192*	0,16	1500	18.538*
	Polypropylen	910*	0,22	1800	10.000*
	Polypropylen mit 25% Glasfasern	1.200*	0,25	1800	10.000*
	Naturkautschuk	910	0,13	1100	10.000*
	EPDM (Ethylenpropylen, monomer)	1150	0,25	1000	6.000*
	Polyolefine **	1.057*	2,4	1500	151.578*
	Papier	120*	0,42	1500	2.000*
	Kupfer	8900	380	380	1.000.000
Luft	Luft	1,23	0,025	1008	1
	Luft 5 mm	1,3	0,047	1000	0,79
	Luft 10 mm	1,3	0,071	1000	0,73
	Luft 20 mm	1,3	0,13	1000	0,56
	Luft 25 mm	1,3	0,155	1000	0,51
	Luft 30 mm	1,3	0,18	1000	0,46
	Luft 40 mm	1,3	0,23	1000	0,38
	Luft 50 mm	1,3	0,28	1000	0,32

* es werden die Werte lt. Herstellerangaben eingesetzt	** Bezeichnung in der WUFI-Datenbank: Spun Bonded Polyolefine Membrane (SBP)	Werte wurden im von der ÖNORM EN 12524 vorgegebenen Bereich festgelegt.	Baustoffe wurden gegenüber der ÖNORM EN 12524 umbenannt.
	vom Autor eruiert mittlerer Wert aus den Herstellerangaben	Werte aus Hohmann et al. 2004	Werte aus der WUFI-Datenbank (WUFI Pro 2005)

Baustoffe aus ÖNORM EN 12524		Daten gemäß ÖNORM EN 12524:2000 bzw. DIN V 4108-4, Tabelle 2				
		Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl $\mu$ feucht	Feuchtegehalt bei 23°C, 50% relativer Luftfeuchte U [kg/kg]	Feuchtegehalt bei 23°C, 50% relativer Luftfeuchte $\Psi$ [m3/m3]	Feuchtegehalt bei 23°C, 80% relativer Luftfeuchte U [kg/kg]	Feuchtegehalt bei 23°C, 80% relativer Luftfeuchte $\Psi$ [m3/m3]
Dämmstoffe	Polyurethanhartschaum	60	-	0,00	-	0,00
	EPS	60	-	0,00	-	0,00
	Mineralwolle	1	-	0,00	-	0,00
	Holzwoolleleichtbauplatten	3	-	0,03	-	0,05
	Holzfaserdämmplatten	5	0,10	-	0,16	-
	lose Mineralwolle	1	-	0,00	-	0,00
	lose Zellulosefasern	1	0,11	-	0,18	-
Holz und Holzwerkstoffe	Holz (z.B. Fichte)	20	0,15			
	Holz (z.B. Eiche)	50	0,15			
	Sperrholz	50	0,15			
	Sperrholz	70	0,15			
	Sperrholz	90	0,15			
	Sperrholz	110	0,15			
	Holzspanplatten	10	0,15			
	Holzspanplatten	15	0,15			
	Holzspanplatten	20	0,15			
	OSB-Platten	30	0,15			
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	2	0,15			
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	5	0,15			
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	12	0,15			
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	20	0,15			
Einzelbaustoffe	Gipskartonbauplatten	4	0,02			
	Beton (mittlere Rohdichte)	60	0,13			
	Erdreich (Ton, Schlack, Schlamm)	50				
	Bitumen	50.000*				
	Bitumenbahnen	50.000*				
	Polyethylen /hoher Dichte	100.000*				
	Polyethylen /niedriger Dichte	100.000*				
	PVC hart	50.000*				
	PVC-P + 40% Weichmacher	100.000*				
	PVC - Dachbahn					
	Polypropylen	10.000*				
	Polypropylen mit 25% Glasfasern	10.000*				
	Naturkautschuk	10.000*				
	EPDM (Ethylenpropylen, monomer)	6.000*				
	Polyolefine **					
	Papier					
Kupfer						
Luft	Luft	1				
	Luft 5 mm					
	Luft 10 mm					
	Luft 20 mm					
	Luft 25 mm					
	Luft 30 mm					
	Luft 40 mm					
	Luft 50 mm					

* es werden die Werte lt. Herstellerangaben eingesetzt	** Bezeichnung in der WUFI-Datenbank: Spun Bonded Polyolefine Membrane (SBP)	Werte wurden im von der ÖNORM EN 12524 vorgegebenen Bereich festgelegt.	Baustoffe wurden gegenüber der ÖNORM EN 12524 umbenannt.
	vom Autor eruieter mittlerer Wert aus den Herstellerangaben	Werte aus Hohmann et al. 2004	Werte aus der WUFI-Datenbank (WUFI Pro 2005)

Dissertation DI Julia Bachinger

Baustoffe aus ÖNORM EN 12524		umgerechneter Wert aus EN 12524 bzw. DIN V 4108-4 Tabelle 2		WUFI-Datenbank	
		Feuchtegehalt bei 23°C, 50% relativer Luftfeuchte $\Psi$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Feuchtegehalt bei 23°C, 80% relativer Luftfeuchte $\Psi$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosität [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeitszuschlag [%/M.-%]
Dämmstoffe	Polyurethanhartschaum	0,00	0,00	0,95	-
	EPS	0,00	0,00	0,95	-
	Mineralwolle	0,00	0,00	0,95	-
	Holzwoleleichtbauplatten	30,00	50,00	0,55	2,5
	Holzfaserdämmplatten	15,00	24,00	0,999	1,5
	lose Mineralwolle	0,00	0,00	0,95	-
	lose Zellulosefasern	4,40	7,20	0,95	1,0
Holz und Holzwerkstoffe	Holz (z.B. Fichte)	75		0,73	1,3
	Holz (z.B. Eiche)	105		0,72	1,3
	Sperrholz	45		0,5	1,5
	Sperrholz	75		0,5	1,5
	Sperrholz	105		0,5	1,5
	Sperrholz	150		0,5	1,5
	Holzspanplatten	45		0,74	1,5
	Holzspanplatten	90		0,74	1,5
	Holzspanplatten	135		0,74	1,5
	OSB-Platten	98		0,61	1,5
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	38		0,8	1,5
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	60		0,8	1,5
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	90		0,8	1,5
	Holzfaserverplatte, einschließlich MDF	120		0,8	1,5
Einzelbaustoffe	Gipskartonbauplatten	18		0,65	8
	Beton (mittlere Rohdichte)	234		0,18	8
	Erdreich (Ton, Schlack, Schlamm)				
	Bitumen			0,001	-
	Bitumenbahnen			0,001	-
	Polyethylen /hoher Dichte			0,001	-
	Polyethylen /niedriger Dichte			0,001	-
	PVC hart				
	PVC-P + 40% Weichmacher			0,0002	-
	PVC - Dachbahn			0	-
	Polypropylen			0,086	-
	Polypropylen mit 25% Glasfasern				
	Naturkautschuk				
	EPDM (Ethylenpropylen, monomer)				
	Polyolefine **			0,001	-
	Papier			0,6	-
Kupfer					
Luft	Luft			0,999	-
	Luft 5 mm			0,999	-
	Luft 10 mm			0,999	-
	Luft 20 mm			0,999	-
	Luft 25 mm			0,999	-
	Luft 30 mm			0,999	-
	Luft 40 mm			0,999	-
	Luft 50 mm			0,999	-

* es werden die Werte lt. Herstellerangaben eingesetzt	** Bezeichnung in der WUFI-Datenbank: Spun Bonded Polyolefine Membrane (SBP)	Werte wurden im von der ÖNORM EN 12524 vorgegebenen Bereich festgelegt.	Baustoffe wurden gegenüber der ÖNORM EN 12524 umbenannt.
	vom Autor eruiert mittlerer Wert aus den Herstellerangaben	Werte aus Hohmann et al. 2004	Werte aus der WUFI-Datenbank (WUFI Pro 2005)

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Flächengewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
Sarnafil G 410 - 15	1,50	1900	1266,67	15000	22,5	PVC	I
Sarnafil S 327 - 15	1,50	1800	1200,00	15000	22,5	PVC	I
Sarnafil G 410 - 18	1,80	2300	1277,78	15000	27	PVC	I
Sarnafil S 327 - 18	1,80	2200	1222,22	15000	27	PVC	I
Sarnafil G 441 - 24 EL	2,40	3200	1333,33	15000	36	PVC	I
Sarnafil S 327 - 24	2,40	3000	1250,00	15000	36	PVC	I
Sikaplan - 18 D	1,80	2340	1300,00	18000		PVC	XIV
Sucoflex 132/1.5	1,50	1950	1300,00	19000	28,5	PVC	II
Sucoflex M127/1.5	1,50	1950	1300,00	19000	28,5	PVC	II
Sucoflex 132/1.8	1,80	2300	1277,78	19000	34,2	PVC	II
Sucoflex M127/1.8	1,80	2300	1277,78	19000	34,2	PVC	II
Sucoflex 132/2.0	2,00	2600	1300,00	19000	38	PVC	II
Sucoflex M127/2.0	2,00	2600	1300,00	19000	38	PVC	II
Sikaplan - 15 G	1,50	1860	1240,00	20000	30	PVC	XIV
Sikaplan - 15 VG	1,50	1880	1253,33	20000	30	PVC	XIV
Sikaplan - 18 G	1,80	2300	1277,78	20000	36	PVC	XIV
Sikaplan - 18 VG	1,80	2250	1250,00	20000	36	PVC	XIV
Sikaplan - 20 G	2,00	2500	1250,00	20000	40	PVC	XIV
Sikaplan - 24 G	2,40	3000	1250,00	20000	48	PVC	XIV
Trocal SBV	1,70	1200	705,88	20000	34	PVC	XIV
Trocal SGmA 1,5 mm	1,50	1900	1266,67	20000	30	PVC	XIV
Trocal SGmA 1,8 mm	1,80	2270	1261,11	20000	36	PVC	XIV
Trocal SGmA 2,0 mm	2,00	2520	1260,00	20000	40	PVC	XIV
Trocal SGK 2,4 mm	2,40	1500	625,00	20000	48	PVC	XIV
Trocal TB 2,0 mm	2,00	2520	1260,00	20000	40	PVC	XIV
Trocal TB 1,5 mm	1,50	1890	1260,00	20000	30	PVC	XIV
BauderTHERMOFOL D 15	1,50					PVC	X
BauderTHERMOFOL M 12	1,20					PVC	X
BauderTHERMOFOL M 15	1,50					PVC	X
BauderTHERMOFOL M 18	1,80					PVC	X
BauderTHERMOFOL M 20	2,00					PVC	X

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Flächengewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
BauderTHERMOFOL U 15	1,50					PVC	X
BauderTHERMOFOL U 15 V	2,50					PVC	X
BauderTHERMOFOL U 18	1,80					PVC	X
BauderTHERMOFOL U 20	2,00					PVC	X
BauderTHERMOFOL U 24	2,40					PVC	X
Sikaplan - 12 Schutz	1,20	1600	1333,33			PVC	XIV
Sikaplan - 15 Schutz DIA	1,50	2000	1333,33			PVC	XIV
Sikaplan Walkway	2,00	2700	1350,00			PVC	XIV

Mittelwert	1,81	2.144,33	<b>1.192,73</b>	<b>18.538,46</b>	32,71		
Maximum	2,50	3.000,00	1.350,00	20.000,00	48		
Minimum	1,20	1.200,00	625,00	15.000,00	22,5		

Bei Vergleich aller aufgelisteten PVC - Produkte kann festgestellt werden, dass der μ - Wert zwischen 15.000,00 und 20.000,00 liegt. Der mittlere μ - Wert liegt bei 18.536,46.

Bei Vergleich aller aufgelisteten PVC - Produkte kann festgestellt werden, dass die Dichte [kg/m<sup>3</sup>] zwischen 625,00 und 1.350,00 liegt. Bei den Berechnungen wird die mittlere Dichte von 1.192,73 kg/m<sup>3</sup> eingesetzt, sofern vom Hersteller keine Dichte angegeben wird oder nicht bekannt ist welches Produkt verwendet wurde.

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Flächengewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
Sarnafil TG 66 - 12	1,20	1200	1000,00	155000	186	FPO	I
Sarnafil TG 76 - 12 FELT	1,20	1520	1266,67	155000	186	FPO	I
Sarnafil TS 77 - 12	1,20	1230	1025,00	155000	186	FPO	I
Villaplan Color L-2,0	2,00			100000	200	FPO	VIII
Villaplan Color MF-2,0	2,00			100000	200	FPO	VIII
Sarnafil TG 66 - 15	1,50	1500	1000,00	155000	233	FPO	I
Sarnafil TG 76 - 15 FELT	1,50	1850	1233,33	155000	233	FPO	I
Sarnafil TS 77 - 15	1,50	1650	1100,00	155000	233	FPO	I
Sucoflex CB 1.6	1,60	1500	937,50	150000	240	TPO	II
Sucoflex CM 1.5	1,50	1650	1100,00	175000	262,5	TPO	II
Sucoflex CB 1.8	1,80	1650	916,67	150000	270	TPO	II
Sarnafil TG 66 - 18	1,80	1800	1000,00	155000	279	FPO	I
Sarnafil TG 76 - 18 FELT	1,80	2080	1155,56	155000	279	FPO	I
Sarnafil TS 77 - 18	1,80	1980	1100,00	155000	279	FPO	I
Sucoflex CB 2.0	2,00	1850	925,00	150000	300	TPO	II
Sarnafil TG 66 - 20	2,00	2000	1000,00	155000	310	FPO	I
Sarnafil TS 77 - 20	2,00	2200	1100,00	155000	310	FPO	I
Sucoflex CM 1.8	1,80	2000	1111,11	175000	315	TPO	II
Sucoflex CM 2.0	2,00	2200	1100,00	175000	350	TPO	II
BauderTHERMOPLAN-T SV 12	1,20					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T SV 15	1,50					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T TL 15	1,50					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T SV 18	1,80					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T SV 20	2,00					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T SV 15 V	2,50					FPO	X

Mittelwert	1,64	1.756,47	<b>1.062,99</b>	<b>151.578,95</b>	255,34		
Maximum	1,20	2.200,00	1.266,67	100.000,00	350,00		
Minimum	2,50	1.200,00	316,67	175.000,00	186,00		

Bei Vergleich aller aufgelisteten TPO/FPO - Produkte kann festgestellt werden, dass der μ - Wert zwischen 100.000,00 und 175.000,00 liegt. Der mittlere μ - Wert liegt bei 151.578,95.

Bei Vergleich aller aufgelisteten TPO/FPO - Produkte kann festgestellt werden, dass die Dichte [kg/m<sup>3</sup>] zwischen 316,67 und 1.266,67 liegt. Bei den Berechnungen wird die mittlere Dichte von 1.062,99 kg/m<sup>3</sup> eingesetzt, sofern vom Hersteller keine Dichte angegeben wird oder nicht bekannt ist welches Produkt verwendet wurde.

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	Flächengewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
Sarnafil TG 66 - 12	1,20	1200	1000,00	155000	186	FPO	I
Sarnafil TG 76 - 12 FELT	1,20	1520	1266,67	155000	186	FPO	I
Sarnafil TS 77 - 12	1,20	1230	1025,00	155000	186	FPO	I
Villaplan Color L-2,0	2,00			100000	200	FPO	VIII
Villaplan Color MF-2,0	2,00			100000	200	FPO	VIII
Sarnafil TG 66 - 15	1,50	1500	1000,00	155000	233	FPO	I
Sarnafil TG 76 - 15 FELT	1,50	1850	1233,33	155000	233	FPO	I
Sarnafil TS 77 - 15	1,50	1650	1100,00	155000	233	FPO	I
Sucoflex CB 1.6	1,60	1500	937,50	150000	240	TPO	II
Sucoflex CM 1.5	1,50	1650	1100,00	175000	262,5	TPO	II
Sucoflex CB 1.8	1,80	1650	916,67	150000	270	TPO	II
Sarnafil TG 66 - 18	1,80	1800	1000,00	155000	279	FPO	I
Sarnafil TG 76 - 18 FELT	1,80	2080	1155,56	155000	279	FPO	I
Sarnafil TS 77 - 18	1,80	1980	1100,00	155000	279	FPO	I
Sucoflex CB 2.0	2,00	1850	925,00	150000	300	TPO	II
Sarnafil TG 66 - 20	2,00	2000	1000,00	155000	310	FPO	I
Sarnafil TS 77 - 20	2,00	2200	1100,00	155000	310	FPO	I
Sucoflex CM 1.8	1,80	2000	1111,11	175000	315	TPO	II
Sucoflex CM 2.0	2,00	2200	1100,00	175000	350	TPO	II
BauderTHERMOPLAN-T SV 12	1,20					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T SV 15	1,50					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T TL 15	1,50					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T SV 18	1,80					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T SV 20	2,00					FPO	X
BauderTHERMOPLAN-T SV 15 V	2,50					FPO	X

Mittelwert	1,64	1.756,47	<b>1.062,99</b>	<b>151.578,95</b>	255,34		
Maximum	1,20	2.200,00	1.266,67	100.000,00	350,00		
Minimum	2,50	1.200,00	316,67	175.000,00	186,00		

Bei Vergleich aller aufgelisteten TPO/FPO - Produkte kann festgestellt werden, dass der μ - Wert zwischen 100.000,00 und 175.000,00 liegt. Der mittlere μ - Wert liegt bei 151.578,95.

Bei Vergleich aller aufgelisteten TPO/FPO - Produkte kann festgestellt werden, dass die Dichte [kg/m<sup>3</sup>] zwischen 316,67 und 1.266,67 liegt. Bei den Berechnungen wird die mittlere Dichte von 1.062,99 kg/m<sup>3</sup> eingesetzt, sofern vom Hersteller keine Dichte angegeben wird oder nicht bekannt ist welches Produkt verwendet wurde.

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
Villas Elastovill E-GG-4	4,0 mm	4500		130	Elastomerbitumen mit Glasgewebe-Trägereinlage	VIII
Villas Elastovill E-KV-4	4,0 mm	4500		130	Elastomerbitumen mit Polyestervlies-Trägereinlage	VIII
Villas Elastovill E-KV-4S	4,0 mm	4600		130	Elastomerbitumen mit Polyestervlies-Trägereinlage, oberseitig Schieferabstreuerung	VIII
Villas Elastovill E-KV-5	5,0 mm	5500		150	Elastomerbitumen mit Polyestervlies-Trägereinlage	VIII
Villas Elastovill E-KV-5S	5,0 mm	5600		150	Elastomerbitumen mit Polyestervlies-Trägereinlage, oberseitig Schieferabstreuerung	VIII
Villas Plastovill P-GG-4	4,0 mm	4400		150	Plastomerbitumen mit Glasgewebe-Trägereinlage	VIII
Villas Plastovill P-KV-4	4,0 mm	4300		150	Plastomerbitumen mit Polyestervlies-Trägereinlage	VIII
Villas Plastovill P-KV-4S	4,0 mm	4600		150	Plastomerbitumen mit Polyestervlies-Trägereinlage, oberseitig Schieferabstreuerung	VIII
Villas Plastovill P-KV-5	5,0 mm	5500		180	Plastomerbitumen mit Polyestervlies-Trägereinlage	VIII
Villas Plastovill P-KV-5S	5,0 mm	5800		180	Plastomerbitumen mit Polyestervlies-Trägereinlage, oberseitig Schieferabstreuerung	VIII
Villas Vedapoint U	3,3 mm			75	Elastomerbitumen mit reissfester Trägereinlage	VIII
Villas Villaplan L/T 2,0	ca. 2,0 mm			ca. 200	ECB	VIII
Villas Villaplan MF 2,0	ca. 2,0 mm			ca. 200	ECB	VIII
Villas Villatop DUO blank	5,0 mm			ca. 160	Plastomerbitumen (Oberseite), Polyestervlies-Trägereinlage, Elastomerbitumen (Unterseite)	VIII
Villas Villatop DUO dolom	ca. 5,2 mm			ca. 160	Plastomerbitumen (Oberseite), Polyestervlies-Trägereinlage, Elastomerbitumen (Unterseite)	VIII
Villas Villatop S5 TOP	≥ 5,2 mm			ca. 155	Elastomerbitumen mit Polyestervlies - Trägereinlage	VIII
Villas Villaverde E-CU-5	5,0 mm	6000		ca. 1500	Elastomerbitumen mit geprägter Kupferfolie als Trägereinlage	VIII
Villas Villaverde E-KV (E-f	4,5 mm	5000		135	Elastomerbitumen mit Polyestervlies - Trägereinlage	VIII
Villas Villaverde E-KV-4 w	4,0 mm	4700		ca. 120	Elastomerbitumen mit Polyestervlies - Trägereinlage	VIII
Villas Villaverde WS-I	4,5 mm	5600		135	Elastomerbitumen mit kupferbedampfter Polyestervlies - Trägereinlage	VIII

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
Villas Villaverde WS-I-5S	5,2 mm	6000		155	Elastomerbitumen mit kupferbedampfter Polyestervlies - Trägereinlage	VIII
Sika Carisma CI	2,00 mm	1950	90000	180	Ethylencopolymerisat- Bitumen (ECB-T2-E-GV) mit Glasvlieseinlage	XV
Sika Carisma CIK	3,00 mm	2150	90000	270	Ethylencopolymerisat- Bitumen (ECB-T2-E-GV- K-PV) mit Glasvlieseinlage und Kunststoffvlies	XV
Sika Sikaplan 14.6	2,00 mm	2150	90000	270	Ethylencopolymerisat- Bitumen (ECB-T2-E-GV- K-PV) mit Glasvlieseinlage und Kunststoffvlies	XV
Phoenix Resitrix classic	3.1 mm	3500	90000	279	EPDM und Bitumen	IV
Phoenix Resitrix MB	3.1 mm	3500	90000	279	EPDM und Bitumen	IV
Phoenix Resitrix SK	2.5 mm	2750	90000	225	EPDM und Bitumen	IV
Phoenix Resitrix SK W	2.5 mm	2750	90000	225	EPDM und Bitumen	IV
Euphalt EPDM 1,2	1.2 mm		45000	54	EPDM	V
Euphalt EPDM 1,3	1.3 mm		45000	58,5	EPDM	V
Euphalt EPDM 1,5	1.5 mm		45000	67,5	EPDM	V

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
Sisalex 500	0.23 mm	175	8700	2,00	Papier	III
Sisalex 303	0.25 mm	188	17560	4,39	Papier	III
Ampatex DB 2	0.23 mm	100	10632	2,00	PP-Fasern	III
Ampatex DB 90	0.33 mm	90	68800	23,00	Polypropylen	III
Sisalex 514	0.26 mm	268	nicht mehr messbar	>1.800,00	Papier mit Aluminiumkaschierung	III
Sisalex 518	0.28 mm	298	nicht mehr messbar	> 1.800,00	Papier mit Alu/PE-Kaschierung	III
Ampack - Resano	0,37 mm	130		0,90 - 6,00 m		XVII
Insulex 714				655,00		XVI
Insulex 716				< 4.500,00		XVI
Insulex 718				2.450,00		XVI
Insulex 911				120,00		XVI
Insulex 963				160,00		XVI
Stamisol ABS	0.4 mm	80		16,00	Polypropylenvlies mit Beschichtung	IX
Stamisol SD 70	0.5 mm	210		70,00	Polyethylen	IX
Sucovap PE / 0.2 RH	0.2 mm	210	400000	80,00	Polyethylen	II
Sucovap PE / 0.25 RH	0.25 mm	240	≥ 600000	150,00	Polyethylen	II
Sucovap PE / 0.4 RH	0.4 mm	370	≥ 800000	320,00	Polyethylen	II
Sarnavap 1000 E	0.2 mm	190	1.200.000,00	240,00	HD/LDPE	XI
Sarnavap 2000 E	0.2 mm	190	2.000.000,00	> 400,00		XI
Sarnavap 3000 M	0.4 mm	400	1.250.000,00	500,00	HD/LDPE	XI
Sarnavap 3000	0.25 mm	250	730.000,00	185,00	HD/LDPE	XI
Sarnavap 1000	0.22 mm	180	1.090.000,00	240,00	HD/LDPE	XI
Sarnavap 1000R	0.22 mm	220	500.000,00	110,00	LDPE	XI
Sarnavap intra	0.3 mm	100	63.000,00	19,00	Laminat aus flexiblen Polyolefinen	XI
Omega Dampfbremse		140		ca. 3,00		VI
Öko natur Dampfbremse		185		ca. 6,45		VI
Elosave Dampfbremse		185		6,14		VI
Clima super Dampfbremse B2		185		6,45		VI
Airstop Dampfbremse		90		ca. 18,00		VI
Airstop Vap Dampfbremse		184		ca. 120,00		VI
Airstop Alu Dampfbremse		280		ca. 200,00		VI
FH Vliesdampfbremse		90		ca. 3,00		VI
FH Dampfbremse "fadenverstärkt"		175		ca. 6,45		VI

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
Villas GV 45 E	ca. 4,0	ca. 4600		130,00	elastifiziertes Bitumen mit Glasvlieseinlage	VIII
Villox B 611 (AL 17)		1700		1.500,00	Oxidationsbitumen mit Aluminiumeinlage	VIII
Villox GV 35	ca. 3,0	ca. 3500		110,00	Oxidationsbitumen mit Glasvlieseinlage	VIII
Villox GV 45	ca. 3,8	ca. 4500		125,00	Oxidationsbitumen mit Glasvlieseinlage	VIII
Villox RP 350/21	ca. 1,9	ca. 2100		90,00	Oxidationsbitumen mit Rohpappeneinlage	VIII
Villox RP 450/23	ca. 2,1	ca. 2300		99,00	Oxidationsbitumen mit Rohpappeneinlage	VIII
Villasub Vario	< 0,6	105		10,00	PP - Spinnvliesverbund mit einer modifizierten Beschichtung	VIII
Villox ALGV-45E	ca. 3,8			> 1.500,00	elastifiziertes Bitumen mit Aluminium-Kombieinlage	VIII
Villox ALGV-45	ca. 4,0			> 1.500,00	Oxidationsbitumen mit Glasvlieseinlage und Aluminium-Kombiträger	VIII
Villaself SK	ca. 1,5			> 1.500,00	Elastomerbitumen mit Aluminium-Kombiauflage	VIII
Villaself SK-Plus	ca. 2,4			> 1.500,00	Elastomerbitumen mit Aluminium-Kombiauflage	VIII
Villaself SKB-Plus	ca. 2,7			> 1.500,00	Elastomerbitumen mit Aluminium-Kombiauflage	VIII
BauderTOP Select				bei abgezogener Folie ≤ 0,10 m mit Folie ≤ 4,60 m		X
BauderTHERM DS 1 DUO	ca. 4 mm			≥1.500,00	mit Aluminium-Polyesterkombination/Glasvlies als Trägereinlage	X
BauderTEC KCD DUO	ca. 1,5 mm			≥1.500,00	Elastomerbitumen mit Glasvlies - Trägereinlage	X
BauderTEC KCD	ca. 1,5 mm			≥1.500,00	Elastomerbitumen mit Glasvlies - Trägereinlage	X
BauderTEC DBR DUO	ca. 0,5 mm			≥1.500,00	mit Kombispezialträger	X
BauderTHERM DS 2	ca. 4,0 mm			≥1.500,00	Elastomerbitumen mit Aluminium-Polyesterkombination/Glasvlies als Trägereinlage	X
Bauder Super AL-E	ca. 3,5 mm			≥1.500,00	mit Aluminiumfolie und Glasvlies als Trägereinlage	X
Bauder EGV 3 t	ca. 3,0 mm			≥100,00	Elastomerbitumen mit Aluminiumfolie und Glasvlies als Trägereinlage	X
Bauder AG 5	ca. 5,0 mm			≥1.500,00	mit Aluminiumband und Glasgewebe als Trägereinlage	X
Bauder AG 4	ca. 4,0 mm			≥1.500,00	mit Aluminiumband und Glasgewebe als Trägereinlage	X
Bauder VA 4	ca. 4,0 mm			≥1.500,00	mit Aluminiumband und Glasgewebe als Trägereinlage	X
BauderKOMPAKT DSK	ca. 2,5 mm			≥1.500,00	mit Aluminiumband und Glasgewebe als Trägereinlage	X

Dissertation DI Julia Bachinger

Bezeichnung	Dicke [mm]	Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	μ - Wert	sD - Wert [m]	Material	Quelle
pro clima DB+	0,23 mm	185	10000	2,30	2 Lagen Baupapier, Polyethylenfilm, Armierung: Glasseidengelege	XII
pro clima DB	0,23 mm	180	10000	2,30	2 Lagen Baupapier, Polyethylenfilm	XII
pro clima DB+ SPEZIAL	0,25 mm	200	40000	10,00	2 Lagen Baupapier, Polyethylenfilm, Armierung: Glasseidengelege	XII
pro clima INTELLO	0,20 mm	100	37500	0,25 bis über 10,00 m	Polypropylenvlies, Polyethylen-Copolymerfilm	XII
pro clima INTELLO plus	0,20 mm	125	37500	0,25 bis über 10,00 m	Polypropylenvlies, Polyethylen-Copolymerfilm	XII
pro clima DASATOP	0,25 mm	70	6400	0,05 bis 1,60 m	PP-Vlies mit Polyethylen-Copolymer	XII
pro clima DA	0,45 mm	130	5000	2,30	2 Polypropylenvliese, Polyethylenfilm	XII
Vario KM	0,15 mm			0,20 bis 5,00 m	Polyamid	XIII
Vario KM Duplex	0,2 mm			0,30 bis 5,00 m	Polyamid mit Spezialvlies	XIII
Icopal - Icovario	0,20 mm	120		0,20 - 7,00 m	PE, Plastfilm, Polyamid	XVIII
Icopal - Hygrodiode 20	0,42 mm	140		20,00	PE, Vlies	XIX
Icopal - Hygrodiode 100	0,50 mm	230		126,00	PE, Vlies	XIX

<b>Quellenangaben zu den Materialkennwerten von Dachabdichtungen und Dampfbremsen /-sperrern</b>	
I	Sarnafil 2006a. <a href="http://www.sarnafil.de/sarnafil_t.htm">http://www.sarnafil.de/sarnafil_t.htm</a> (abgerufen: 03.07.2006)
II	Sucoflex 2006. <a href="http://www.sucoflex.ch/flachdach-produkte.htm">http://www.sucoflex.ch/flachdach-produkte.htm</a> (abgerufen: 03.07.2006)
III	Ampack 2006. <a href="http://www.ampack.de/de_dt/produkte.php?group_id=9">http://www.ampack.de/de_dt/produkte.php?group_id=9</a> (abgerufen: 04.07.2006)
IV	Resitrix 2006. <a href="http://www.phoenix-ag.com/statisch/DocMan/745436PDT_RESITRIX_allgemein_DE.pdf">www.phoenix-ag.com/statisch/DocMan/745436PDT_RESITRIX_allgemein_DE.pdf</a> (abgerufen: 05.07.2006)
V	Euphant 2007. <a href="http://www.euphant.at/indexstart.htm">http://www.euphant.at/indexstart.htm</a> (abgerufen: 05.07.2007)
VI	Isocell 2006. <a href="http://www.isocell.at/index1.htm">http://www.isocell.at/index1.htm</a> (abgerufen: 05.07.2006)
VII	Icopal 2006. <a href="http://www.icopal.at/">http://www.icopal.at/</a> (abgerufen: 23.09.2006)
VIII	Villas 2006. <a href="http://www.villas.at/DE/index.htm/">http://www.villas.at/DE/index.htm/</a> (abgerufen: 29.08.2006)
IX	Stamisol 2006. <a href="http://www.stamisol.com/">http://www.stamisol.com/</a> (abgerufen: 17.09.2006)
X	Bauder 2006. <a href="http://www.bauder.de/deutsch/produkte/content_art.asp?Menuid=3&amp;subid=31&amp;Sub2ID=2&amp;bid=produkte">http://www.bauder.de/deutsch/produkte/content_art.asp?Menuid=3&amp;subid=31&amp;Sub2ID=2&amp;bid=produkte</a> (abgerufen: 18.09.2006)
XI	Sarnafil 2006b. <a href="http://www.sarnafil.ch">http://www.sarnafil.ch</a> (abgerufen: 23.09.2006)
XII	pro clima 2006. <a href="http://www.proclima.de/">http://www.proclima.de/</a> (abgerufen: 23.09.2006)
XIII	Isover 2006. <a href="http://www.isover.de/PortalData/1/Resources//produkte/vario/technische_datenblaetter/TD_vario_km.pdf">http://www.isover.de/PortalData/1/Resources//produkte/vario/technische_datenblaetter/TD_vario_km.pdf</a> (abgerufen: 23.09.2006)
XIV	Sika 2006a. <a href="http://w112www638.webland.ch/tm/html/techdoku_de.htm#alphabet_sika_m">http://w112www638.webland.ch/tm/html/techdoku_de.htm#alphabet_sika_m</a> (abgerufen: 20.09.2006)
XV	Sika 2006b. <a href="http://www.sika.at/suche.asp">http://www.sika.at/suche.asp</a> (abgerufen: 20.09.2006)
XVI	Materialdaten auf Anfrage von Christoph Köck (Verkaufsleiter Ampack Handels GmbH) am 09.07.2006 erhalten.
XVII	Ampack 2009. <a href="http://www.ampack.ch/media/Datenblatt_Resano_CHd.pdf">http://www.ampack.ch/media/Datenblatt_Resano_CHd.pdf</a> (abgerufen: 07.06.2009)
XVIII	Icopal 2009a. <a href="http://www.icopal.at/upload/icopalat/datenblatt%20icovario%202008-11%20s.pdf">http://www.icopal.at/upload/icopalat/datenblatt%20icovario%202008-11%20s.pdf</a> (abgerufen: 07.06.2009)
XIX	Icopal 2009b. Produktinformationen der Firma Icopal. Produktionformation Hygrodiode 20 Classic (20007-12). Magistrat der Stadt Wien, MA 39: Prüfbericht über die Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit, 04.10.1990. Leistungskurven im Vergleich. Produktinformation Hygrodiode 100 (20007-12). Magistrat der Stadt Wien, MA 39: Prüfbericht über die Wasserdampfdurchlässigkeit einer Hygrodiode, 02.02.2006

Dissertation DI Julia Bachinger

Außenlufttemperatur °C	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Quelle
Bregenz ÖNORM	-1,05	0,70	4,30	8,52	12,95	16,05	18,12	17,38	14,25	9,31	3,87	0,10	ÖNORM B 8110-2
Bregenz Strahlungslufttemp	-2,20	-0,80	3,60	7,70	14,00	17,80	19,60	18,60	13,10	7,70	1,30	-1,10	errechnet aus statistischen Temp.
Bregenz langjährige Mittelwerte	0,60	1,60	5,50	8,60	13,70	17,00	18,90	18,40	14,40	10,20	4,70	1,90	ZAMG 2006a
Bürs ÖNORM	-1,76	-0,08	3,42	7,48	11,93	15,01	17,10	16,35	13,41	8,61	3,04	-0,86	ÖNORM B 8110-2
Bürs Strahlungslufttemp	-4,90	-2,70	2,30	7,30	13,20	16,50	18,70	17,30	12,10	5,90	-1,10	-3,90	errechnet aus statistischen Temp.
Bürs langjährige Mittelwerte	-2,10	-0,50	3,90	7,70	10,80	15,50	17,70	17,10	13,20	8,30	2,20	-1,00	ZAMG 2006c
Schröcken ÖNORM	-3,28	-2,63	0,04	3,56	8,12	11,32	13,61	13,19	10,75	6,78	1,16	-2,33	ÖNORM B 8110-2
Schröcken Strahlungslufttemp	-4,60	-3,90	-1,10	2,80	8,70	11,80	14,10	13,30	9,00	4,30	-2,00	-3,60	errechnet aus statistischen Temp.
Schröcken langjährige Mittelwerte	-1,80	-1,70	0,50	3,20	8,40	11,20	13,50	13,40	10,20	6,60	1,30	-0,70	ZAMG 2006b

Luftfeuchtigkeit %	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Quelle
Bregenz ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Bregenz langjährige Mittelwerte	82,0	80,0	75,0	73,0	72,0	72,0	73,0	77,0	81,0	84,0	84,0	83,0	ZAMG 2006a
Bürs ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Bürs langjährige Mittelwerte	84,0	77,0	70,0	66,0	65,0	67,0	68,0	69,0	75,0	79,0	84,0	86,0	ZAMG 2006c
Schröcken ÖNORM	80,0	80,0	80,0	80,0	75,0	75,0	75,0	75,0	80,0	80,0	80,0	80,0	ÖNORM B 8110-2
Schröcken langjährige Mittelwerte	63,0	62,0	65,0	64,0	62,0	67,0	68,0	69,0	68,0	65,0	69,0	65,0	ZAMG 2006b

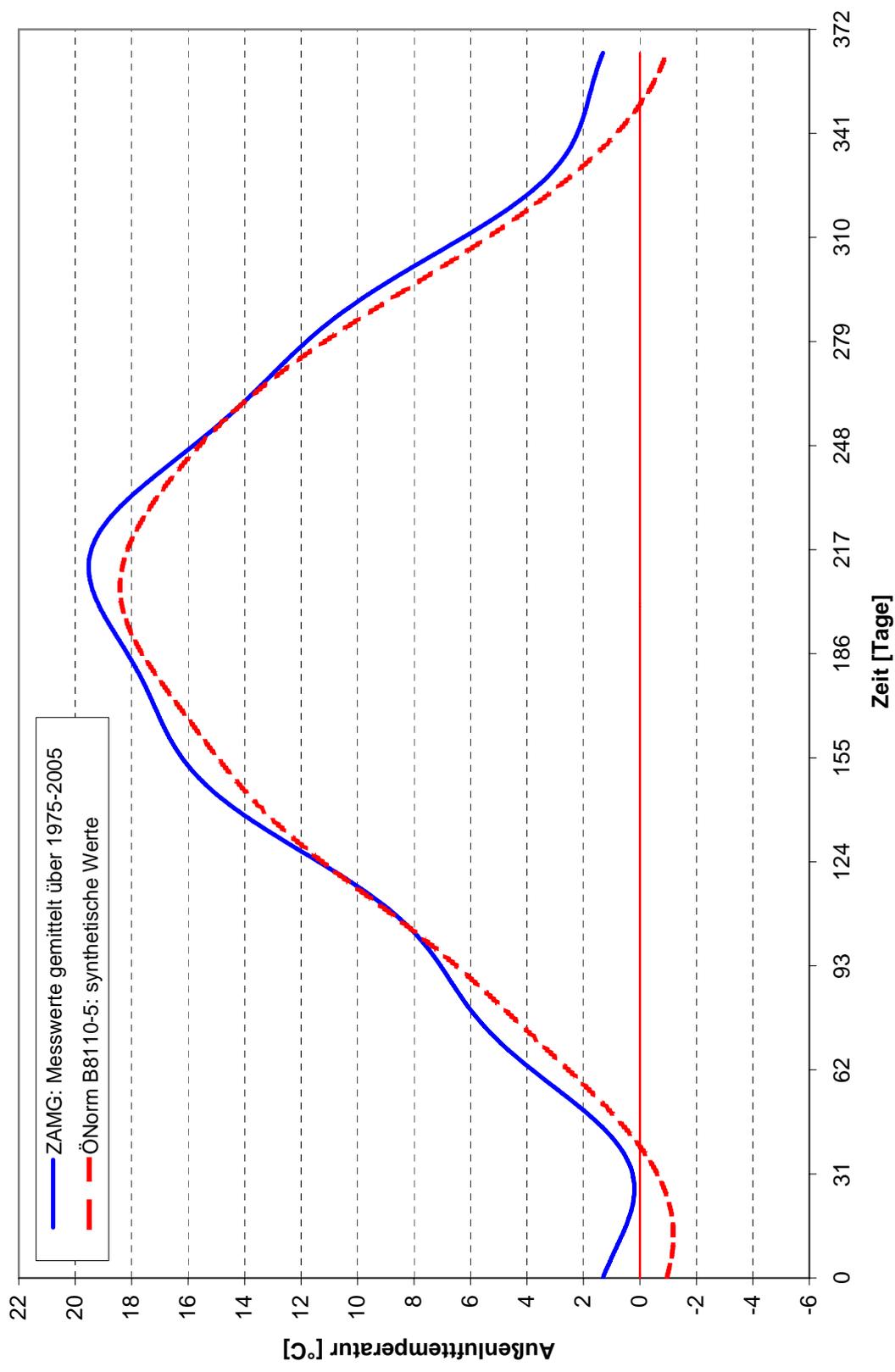
Globalstrahlung Wh/m2	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Quelle
Bregenz langjährige Mittelwerte	1017,5	1680,1	2801,3	3884,1	5146,5	5435,0	5228,6	4726,3	3230,7	2040,6	1095,7	752,4	ZAMG 2006a
Bürs langjährige Mittelwerte	1097,0	1907,0	3209,0	4507,0	5204,0	5717,0	5629,0	4846,0	3458,0	2214,0	1197,0	896,0	pvgis
Schröcken langjährige Mittelwerte	1048,0	2024,0	3254,0	4553,0	5241,0	5446,0	5390,0	4689,0	3506,0	2336,0	1274,0	874,0	pvgis

Himmelstrahlung Wh/m2	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Quelle
Bregenz langjährige Mittelwerte	664,5	982,2	1557,6	2077,9	2645,5	2788,3	2703,0	2315,9	1659,8	1124,0	726,7	527,8	pvgis
Bürs langjährige Mittelwerte	757,0	1144,0	1765,0	2299,0	2862,0	3030,0	2815,0	2471,0	1798,0	1262,0	802,0	690,0	pvgis
Schröcken langjährige Mittelwerte	681,0	1012,0	1594,0	2140,0	2725,0	2886,0	2749,0	2391,0	1718,0	1168,0	752,0	621,0	pvgis

Windgeschwindigkeit m/s	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez	Quelle
Bregenz langjährige Mittelwerte	1,7	1,7	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7	ZAMG 2006a
Bürs langjährige Mittelwerte	0,4	0,4	0,5	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	ZAMG 2006c
Schröcken langjährige Mittelwerte	2,2	2,0	1,9	1,9	1,9	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7	2,0	2,0	ZAMG 2006b

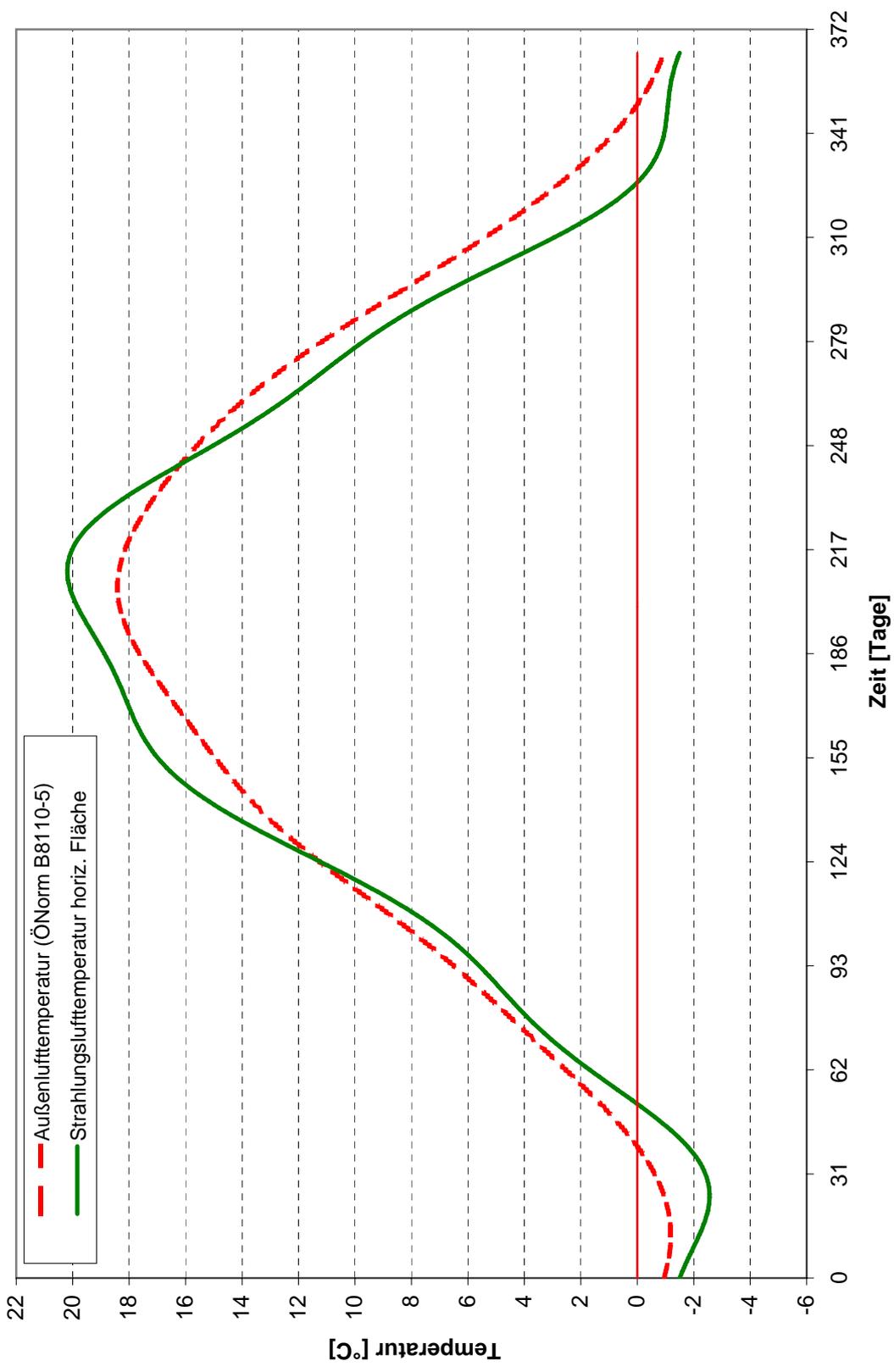
Dissertation DI Julia Bachinger

## Bregenz



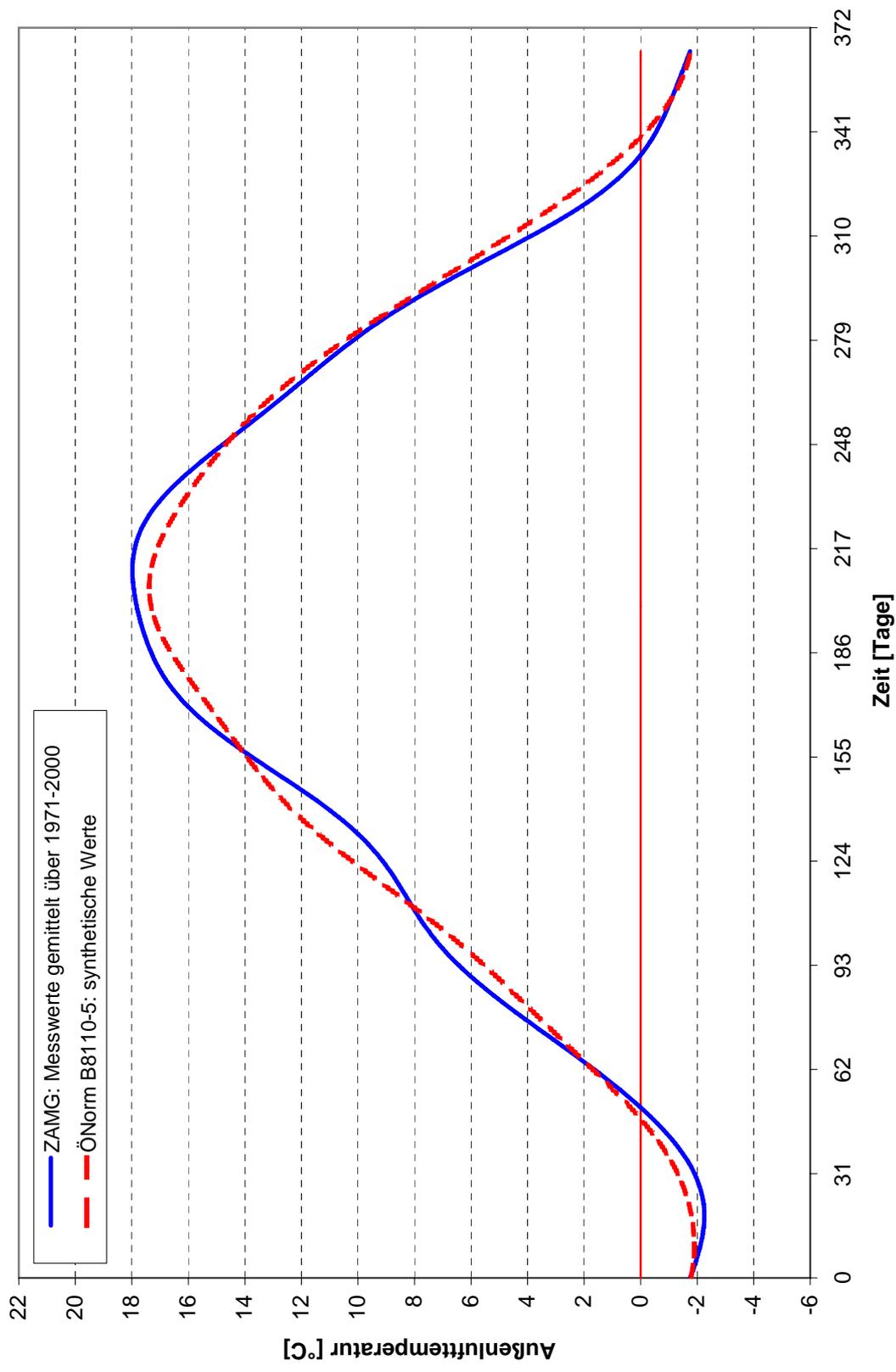
Dissertation DI Julia Bachinger

### Bregenz



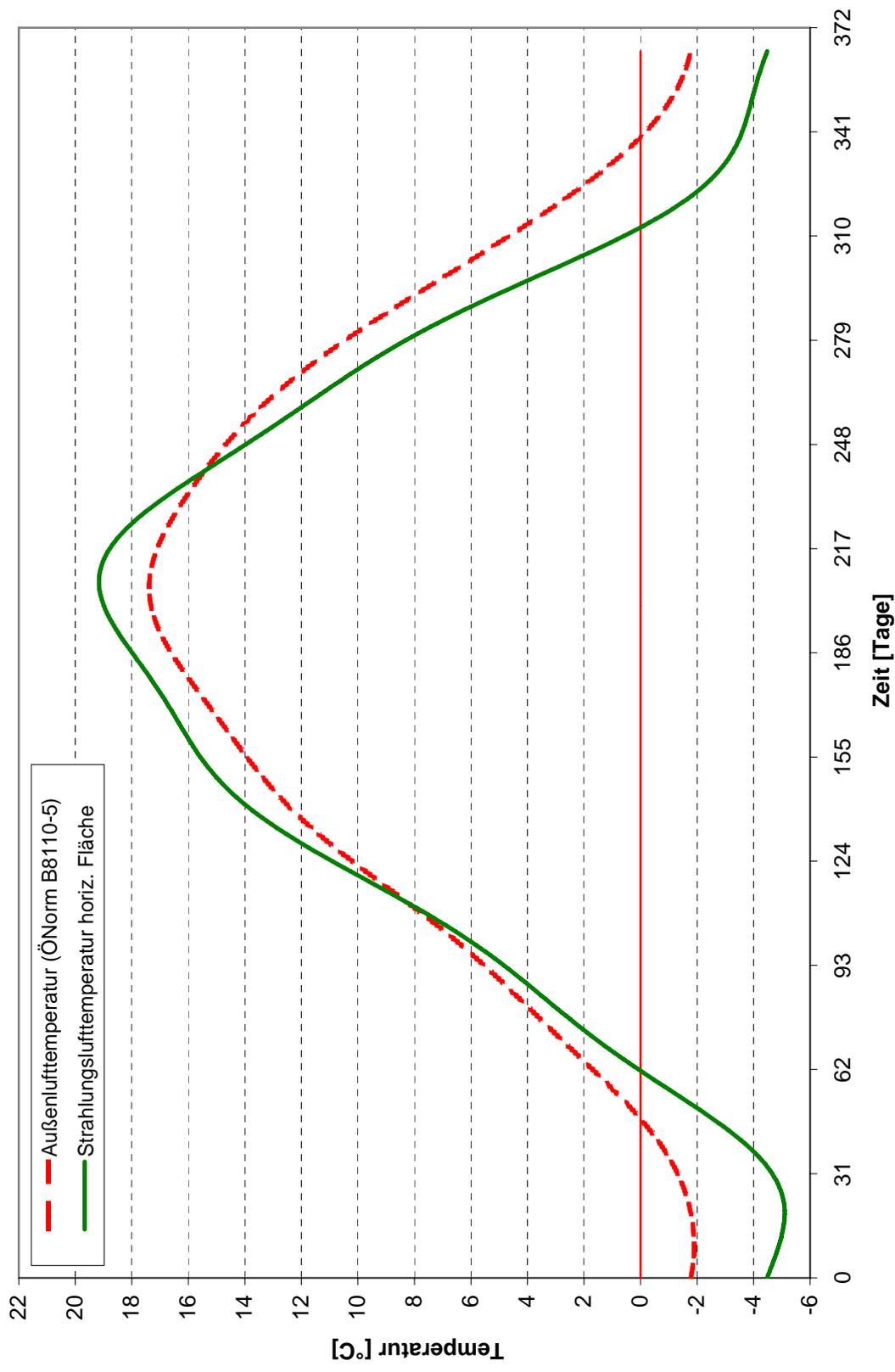
Dissertation DI Julia Bachinger

## Bürs



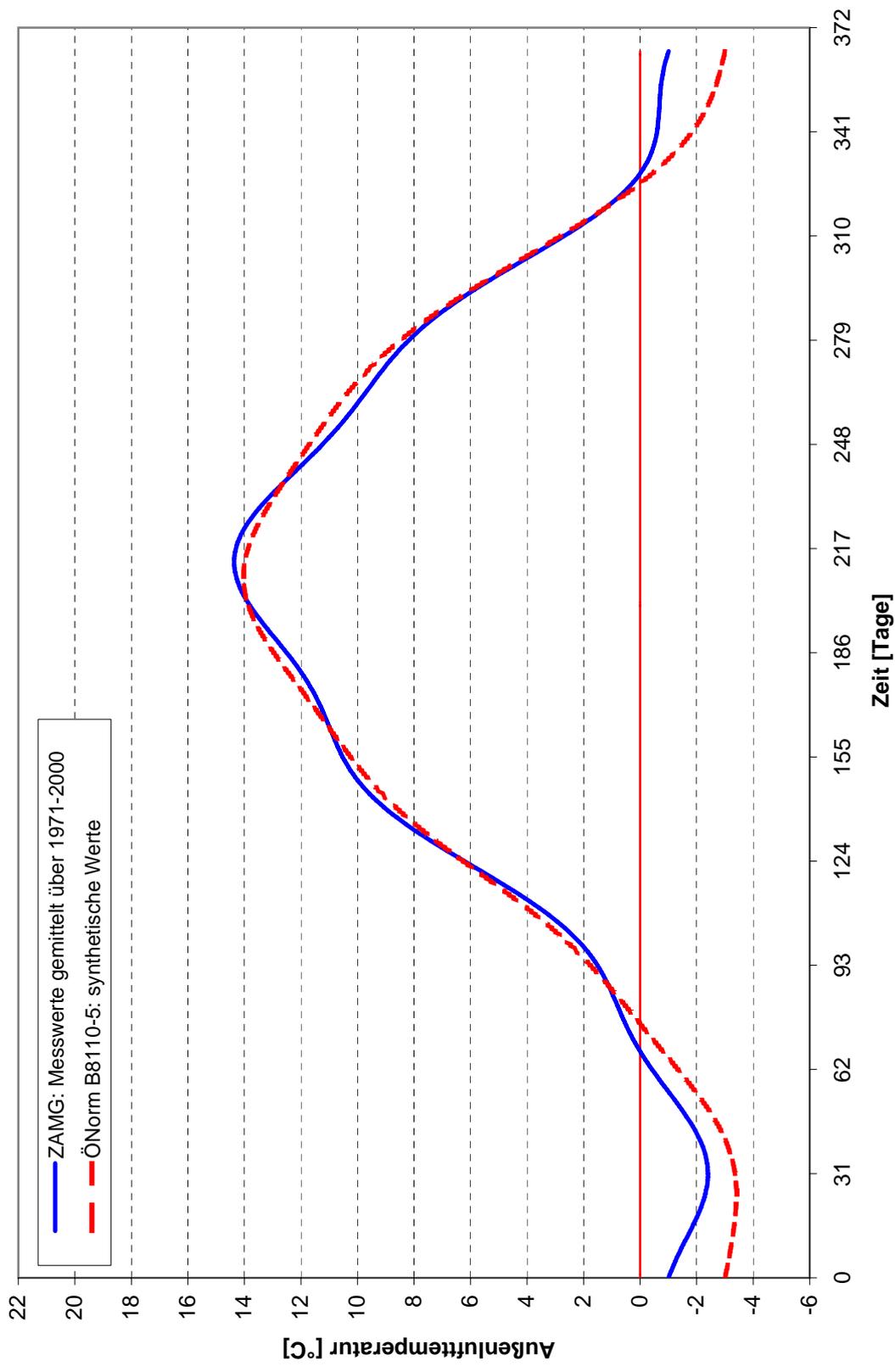
Dissertation DI Julia Bachinger

## Bürs



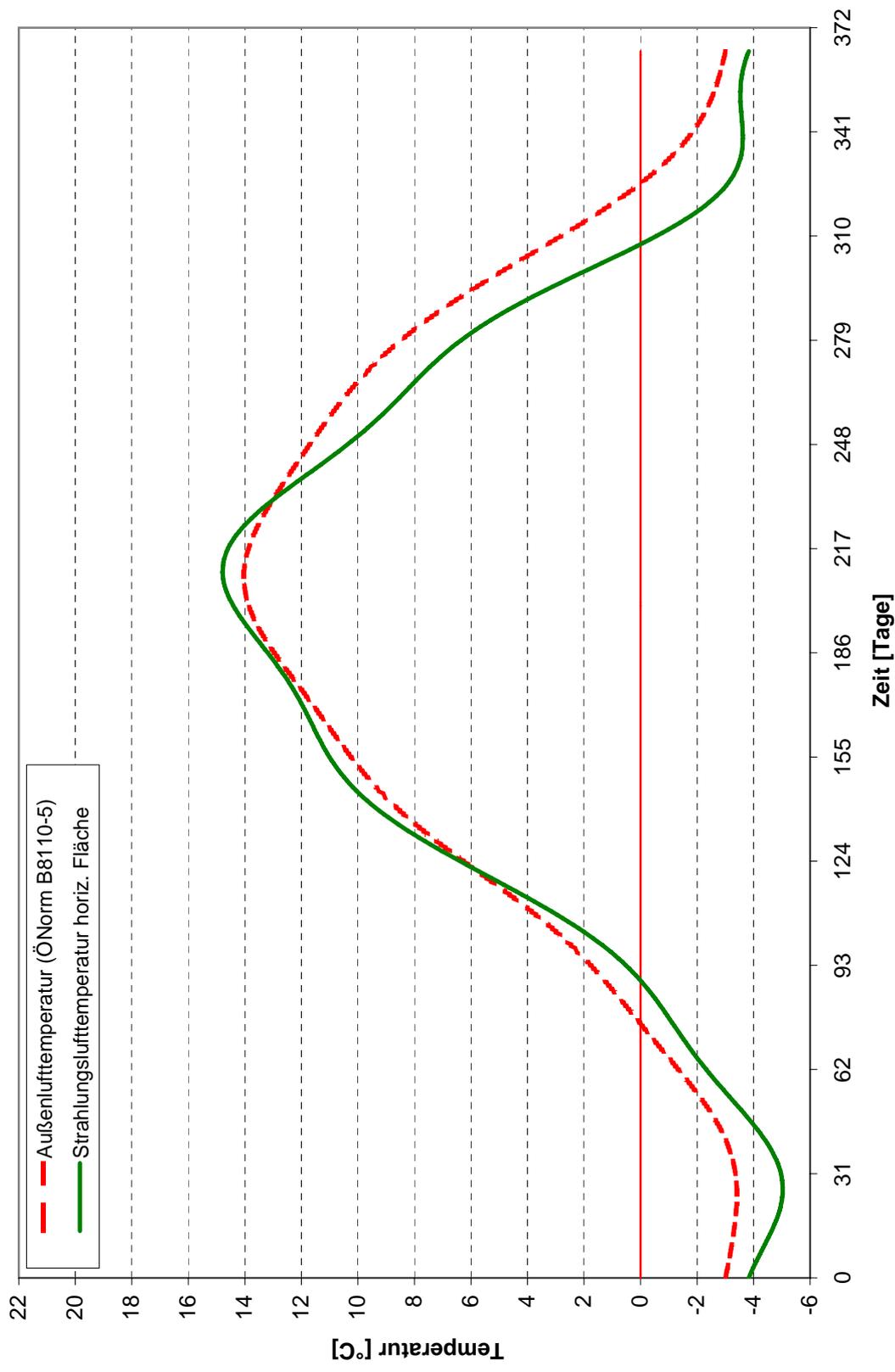
Dissertation DI Julia Bachinger

## Schröcken



Dissertation DI Julia Bachinger

## Schröcken



**Berechnung nach dem Glaserverfahren: Dämmebene**

Kondenswasser tritt auf	Ja/Nein
Vollständige Verdunstung in den Sommermonaten	Ja/Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \leq 1,0 \text{ kg/m}^2$	Ja/Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Ja/Nein
kapillar wasseraufnahmefähige Schicht	Ja/Nein
Kondenswassermenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	
Verdunstungsmenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	
Schädigung der betroffenen Baustoffe (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja/Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes der Holzschicht in %	
Wärmeschutz um mehr als 10% vermindert	Ja/Nein
Verminderung des Wärmeschutzes in %	

**Berechnung nach dem Glaserverfahren: Trägerebene**

Kondenswasser tritt auf	Ja/Nein
Vollständige Verdunstung in den Sommermonaten	Ja/Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \leq 1,0 \text{ kg/m}^2$	Ja/Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Ja/Nein
kapillar wasseraufnahmefähige Schicht	Ja/Nein
Kondenswassermenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	
Verdunstungsmenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	
Schädigung der betroffenen Baustoffe (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja/Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes der Holzschicht in %	
Wärmeschutz um mehr als 10% vermindert	Ja/Nein
Verminderung des Wärmeschutzes in %	

**dynamische Berechnung (WUFI): Dämmebene**

<b>A. Beurteilung des Feuchteverhaltens</b>	Gesamter Bauteil	Gesamtwassergehalt	steigt an/bleibt gleich/nimmt ab
		Anstieg des Gesamtwassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Erhöhung des Gesamtwassergehalts $\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup> a	Ja/Nein
		Erhöhung des Gesamtwassergehalts $\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	Ja/Nein
		Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Anstieg des Wassergehaltes in kapillar wasseraufnahmefähiger Schicht	Ja/Nein
	Holzschalung außen	Wassergehalt Holzschalung außen	steigt an/bleibt gleich/nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,HD}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,HD}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja/Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	
		maximaler Wassergehalt M%	
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	
	Dämmung	Wassergehalt Dämmung	steigt an/bleibt gleich/nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,D}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,D}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja/Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	
		maximaler Wassergehalt M%	
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	
	<b>B. Schimmelpilzwachstum</b>	Holzschalung außen, Außenoberfläche	Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe
viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)			Ja/Nein
$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			
$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			
$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			
Holzschalung außen, Innenoberfläche		Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe	Ja/Nein
		viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)	Ja/Nein
		$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	
		$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	
		$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	

**dynamische Berechnung (WUFI): Trägerebene**

<b>A. Beurteilung des Feuchteverhaltens</b>	Gesamter Bauteil	Gesamtwassergehalt	steigt an/bleibt gleich/nimmt ab
		Anstieg des Gesamtwassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Erhöhung des Gesamtwassergehalts $\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup> a	Ja/Nein
		Erhöhung des Gesamtwassergehalts $\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	Ja/Nein
		Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Anstieg des Wassergehaltes in kapillar wasseraufnahmefähiger Schicht	Ja/Nein
	Holzschalung außen	Wassergehalt Holzschalung außen	steigt an/bleibt gleich/nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,HT}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,HT}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja/Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	
		maximaler Wassergehalt M%	
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	
	Träger	Wassergehalt Holzträger	steigt an/bleibt gleich/nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,T}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,T}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja/Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	
		maximaler Wassergehalt M%	
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	
	<b>B. Schimmelpilzwachstum</b>	Holzschalung außen, Außenoberfläche	Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe
viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)			Ja/Nein
$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			
$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			
$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			
Holzschalung außen, Innenoberfläche		Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe	Ja/Nein
		viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)	Ja/Nein
		$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	
		$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	
		$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	

1 allg. Daten	1.1	Wann wurde das Gebäude gebaut?
	1.2	Aus welchen Gründen wurde dieses Gebäude mit einem Multibox – Dach geplant und ausgeführt?
	1.3	Welche Nutzung hat das Gebäude?
2 Bauphysik	2.1	Wurde eine bauphysikalische Berechnung in Bezug auf Wasserdampfdiffusion durchgeführt?
	2.2	Mit welchem Programm / Berechnungsverfahren wurde die Berechnung durchgeführt?
	2.3	Wurde der Dachaufbau mit den bei der Berechnung vorgegebenen Materialien (Dampfsperre, Dachhaut) und Aufbau ausgeführt?
3 Dampfsperre	3.1	Wurden Installationen im Dachaufbau verlegt? Gibt es Durchdringungen des gesamten Dachaufbaus (Kamin, Abluft oder ähnliches)?
	3.2	Gibt es in diesem Gebäude Durchdringungen der Dampfsperre durch Installationen oder tragende Zwischenwände?
	3.3	Wurde die Dampfsperre an den Stößen, Durchdringungen und an den Anschlüssen zu anderen Bauteilen verklebt?
	3.4	Wurde eine Luftdichtheitsmessung durchgeführt?
	3.5	Falls eine Luftdichtheitsmessung durchgeführt wurde, wie hoch war der n50 - Wert (Luftwechselrate pro Stunde)?
4 Lagerung Dach	4.1	Wurde das Dach auf der Baustelle zwischengelagert?
	4.2	Wurde das Holz während der Zwischenlagerung geschützt?
	4.3	Wie wurde das Holz geschützt?
5 Einbau	5.1	Wie war das Wetter beim Einbau der Multibox - Decke?
	5.2	Wie viele Tage lagen zwischen dem Einbau der Multibox – Decke und dem Aufbringen der Dachabdichtung?
	5.3	Wie war das Wetter zwischen Einbau und Aufbringen der Dachabdichtung? (Oder Angabe des genauen Datums)
6 Einbaufeuchte	6.1	Wurde die Einbaufeuchte des Holzes gemessen?
	6.2	Wann wurde die Einbaufeuchte des Holzes gemessen?
	6.3	Wie hoch war die Feuchte des Holzes vor Aufbringen der Dachhaut?
7 Schadensfall	7.1	Ist bei diesem Dach bis jetzt ein Schaden aufgetreten?
	7.2	Welcher Schaden ist aufgetreten?
	7.3	Wie wurde der Schaden bemerkt?
	7.4	Wodurch wurde der Schaden Ihrer Meinung nach verursacht?
	7.5	Wie viel Zeit lag zwischen der Erstellung des Gebäudes und dem Schadensfall?
8	8	Wissen Sie, ob sich die Balken des Daches durch wechselnde Feuchtigkeitsbelastung im Sommer und Winter bewegen (Auf- bzw. Abwärtsbewegung in der Mitte des Daches)?

Nr	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1*	3.2*	3.3	3.4	3.5	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3
1	2001-2002	flacherer Dachaufbau	Bürogebäude	Ja	Glaserverfahren	Ja	1 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Ja	<0,8	Nein	-	-	Sonne	0 Tage	-
2	1996	flacherer Dachaufbau	Wohnbau	Nein	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Ja	<0,8	-	-	-	-	-	-
3	1997	hoher Vorfertigungsgrad/Bauzeit	Wohnbau/Bürogebäude	Ja	Glaserverfahren	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	-	Ja	<0,8	Nein	-	-	-	-	-
4	1999	flacherer Dachaufbau, Kosten	Bürogebäude	Ja	Glaserverfahren	Ja	0 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Nein	-	Nein	-	-	Sonne	1 Tag	Sonne
5	1998	flacherer Dachaufbau	Schule	Ja	Glaserverfahren	Ja	0 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Nein	-	Nein	-	-	-	-	-
6	1999	flacherer Dachaufbau, unsichtbare Tragkonstruktion	Turnsaal	Ja	Glaserverfahren	Ja	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Nein	-	-	-	-	-	-	-
7	2000-2001	-	-	Ja	Glaserverfahren	Ja	0 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Nein	-	Nein	-	-	Regen	0 Tage	-
8	2001	-	Gewerbe	Ja	Glaserverfahren	Ja	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	-	Nein	-	Nein	-	-	Regen	0 Tage	-
9	1998	-	Wohnbau	-	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Ja	<0,8	-	-	-	Regen	0 Tage	-
10	1997-1998	-	Wohnbau	-	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Ja	<0,8	Nein	-	-	-	0 Tage	-
11	1999	-	Bürogebäude	Nein	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	Nein	-	Nein	-	-	Sonne	-	-
12	1996	-	Gewerbe	Ja	Glaserverfahren	-	0 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	zum Teil nicht verklebt	Nein	-	-	-	-	Regen	-	-
13	2003	-	Wohnbau	-	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	zum Teil nicht verklebt	Nein	-	-	-	-	Sonne	-	-
14	1998-1999	-	Kindergarten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	2001	-	Wohnbau	-	-	-	0 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1994	-	Wohnbau	-	-	-	-	-	zum Teil nicht verklebt	-	-	-	-	-	-	-	-
17	1996	-	Wohnbau	-	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	zum Teil nicht verklebt	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	Wohnbau	-	-	-	-	-	zum Teil nicht verklebt	-	-	-	-	-	-	-	-
19	1993	-	Wohnbau	-	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	zum Teil nicht verklebt	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	Wohnbau	-	-	-	0 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	Stöße verklebt	-	-	-	-	-	-	-	-
21	2000	-	Wohnbau	-	-	-	1 D./m <sup>2</sup>	1 D./m <sup>2</sup>	zum Teil nicht verklebt	-	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-	-	zum Teil nicht verklebt	-	-	-	-	-	-	-	-
23	-	-	Schule	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	1994	-	Kulturbau	-	-	-	0 D./m <sup>2</sup>	0 D./m <sup>2</sup>	nicht verklebt	-	-	-	-	-	-	-	-
25	1998	-	Wohnbau	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* D./m<sup>2</sup> = Durchdringung/m<sup>2</sup>

Nr	6.1	6.2	6.3	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	8
1	Ja	Vor Aufbringen Dachhaut	< 16%	Nein	-	-	-	-	Ja
2	Ja	Vor Aufbringen Dachhaut	< 16%	Nein	-	-	-	-	Ja
3	-	-	-	Nein	-	-	-	-	Nein
4	Nein	-	nicht bekannt	Nein	-	-	-	-	Ja
5	Nein	-	nicht bekannt	Ja	-	Dach hat sich durchgebogen	Loch in der Dachhaut	6 Jahre	vielleicht
6	Nein	-	nicht bekannt	Nein	-	-	-	-	vielleicht
7	Ja	-	< 16%	Nein	-	-	-	-	Nein
8	Nein	-	nicht bekannt	Nein	-	-	-	-	Nein
9	Nein	-	nicht bekannt	Nein	-	-	-	-	Ja
10	Nein	-	nicht bekannt	Nein	-	-	-	-	Ja
11	Ja	vor Einbau der Holzelemente	< 16%	Nein	-	-	-	-	Ja
12	Nein	-	nicht bekannt	Ja	-	Dachbewegung	-	5 Jahre	vielleicht
13	-	-	-	Nein	-	-	-	-	vielleicht
14	-	-	-	Nein	-	-	-	-	Ja
15	-	-	-	Nein	-	-	-	-	vielleicht
16	-	-	-	Ja	Durchfeuchtung der Konstruktion, äußere Holzschalung verfault	Feuchtflecken an der Decke	-	4 Jahre	-
17	-	-	-	Ja	Durchfeuchtung der Konstruktion, äußere Holzschalung zum Teil verfault, Schimmel Untersicht äußere Holzschalung	-	nicht verklebte Dampfsperre	4 Jahre	-
18	-	-	-	Ja	äußere Holzschalung verfault, oberer Bereich des Trägers verfault	-	-	-	-
19	-	-	-	Ja	äußere Holzschalung feucht/verfault, oberer Bereich des Trägers feucht/verfault	Durchsacken der äußeren Holzschalung	nicht verklebte Dampfsperre	9 Jahre	-
20	-	-	-	Ja	Feuchtigkeit im oberen Bereich der Dämmung und Balken, Durchfeuchtung äußere Holzschalung	Durchsacken der Decke	Loch in der Dachhaut	-	-
21	-	-	-	Ja	Durchfeuchtung der Konstruktion	-	nicht verklebte Dampfsperre	3 Jahre	-
22	-	-	-	Ja	Abfaulen des oberen Bereichs des Balkens	-	-	-	-
23	-	-	-	Ja	verfaulte äußere Holzschalung	-	-	-	-
24	-	-	-	Ja	Fäulnis der Balken	Dacheinsturz	fehlerhafte Verklebung Dampfsperre durch Bewegung der Dachbalken	9 Jahre	-
25	-	-	-	Ja	Decke hebt sich, Spalt über Innenwand	sichtbar	-	4 Jahre	Ja

### 03\_Bregenz

#### Dämmebene

Kondenswasser tritt auf	Nein
Vollständige Verdunstung in den Sommermonaten	Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \geq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Nein
kapillar wasseraufnahmefähige Schicht	Nein
Kondenswassermenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Verdunstungsmenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Schädigung der betroffenen Baustoffe (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes der Holzschicht in %	0,00%
Wärmeschutz um mehr als 10% vermindert	Nein
Verminderung des Wärmeschutzes in %	0,00%

#### Trägerebene

Kondenswasser tritt auf	Nein
Vollständige Verdunstung in den Sommermonaten	Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \geq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Nein
kapillar wasseraufnahmefähige Schicht	Nein
Kondenswassermenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Verdunstungsmenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Schädigung der betroffenen Baustoffe (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes der Holzschicht in %	0,00%
Wärmeschutz um mehr als 10% vermindert	Nein
Verminderung des Wärmeschutzes in %	0,00%

### 03\_Bürs

#### Dämmebene

Kondenswasser tritt auf	Nein
Vollständige Verdunstung in den Sommermonaten	Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \geq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Nein
kapillar wasseraufnahmefähige Schicht	Nein
Kondenswassermenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Verdunstungsmenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Schädigung der betroffenen Baustoffe (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes der Holzschicht in %	0,00%
Wärmeschutz um mehr als 10% vermindert	Nein
Verminderung des Wärmeschutzes in %	0,00%

#### Trägerebene

Kondenswasser tritt auf	Nein
Vollständige Verdunstung in den Sommermonaten	Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \geq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Nein
kapillar wasseraufnahmefähige Schicht	Nein
Kondenswassermenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Verdunstungsmenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Schädigung der betroffenen Baustoffe (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes der Holzschicht in %	0,00%
Wärmeschutz um mehr als 10% vermindert	Nein
Verminderung des Wärmeschutzes in %	0,00%

### 03\_Schröcken

#### Dämmebene

Kondenswasser tritt auf	Nein
Vollständige Verdunstung in den Sommermonaten	Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \geq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Nein
kapillar wasseraufnahmefähige Schicht	Nein
Kondenswassermenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Verdunstungsmenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Schädigung der betroffenen Baustoffe (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes der Holzschicht in %	0,00%
Wärmeschutz um mehr als 10% vermindert	Nein
Verminderung des Wärmeschutzes in %	0,00%

#### Trägerebene

Kondenswasser tritt auf	Nein
Vollständige Verdunstung in den Sommermonaten	Nein
Kondenswassermenge $M_{a,max} \geq 0,5 \text{ kg/m}^2$	Nein
kapillar wasseraufnahmefähige Schicht	Nein
Kondenswassermenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Verdunstungsmenge [ $\text{kg/m}^2\text{a}$ ]	0
Schädigung der betroffenen Baustoffe (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes der Holzschicht in %	0,00%
Wärmeschutz um mehr als 10% vermindert	Nein
Verminderung des Wärmeschutzes in %	0,00%

03\_Bregenz

dynamische Berechnung (WUFI): Dämmebene

A. Beurteilung des Feuchteverhaltens	Gesamter Bauteil	Gesamtwassergehalt	nimmt ab
		Anstieg des Gesamtwassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,001
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,014
		Anstieg des Wassergehaltes in kapillar wasseraufnahmefähiger Schicht	Ja
	Holzschalung außen	Wassergehalt Holzschalung außen	bleibt gleich
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,HD}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,000
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,HD}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	1,25
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	8,30%
		maximaler Wassergehalt M%	21,00%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	21,00%
	Dämmung	Wassergehalt Dämmung	bleibt gleich
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,D}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,000
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,D}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,14
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	0,60%
		maximaler Wassergehalt M%	2,40%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	2,40%
	B. Schimmelpilzwachstum	Holzschalung außen, Außenoberfläche	Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe
viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)			Ja
$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			80,00%
$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			1,60
$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			2,95
Holzschalung außen, Innenoberfläche		Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe	Ja
		viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)	Ja
		$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	80,48%
		$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	2,29
		$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	4,36

03\_Bregenz

dynamische Berechnung (WUFI): Trägerebene

A. Beurteilung des Feuchteverhaltens	Gesamter Bauteil	Gesamtwassergehalt	steigt an
		Anstieg des Gesamtwassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,016
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,018
		Anstieg des Wassergehaltes in kapillar wasseraufnahmefähiger Schicht	Nein
	Holzschalung außen	Wassergehalt Holzschalung außen	steigt an
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,HT}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,143
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,HT}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,23
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	1,50%
		maximaler Wassergehalt M%	16,20%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	16,20%
	Träger	Wassergehalt Holzträger	steigt an
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,T}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,100
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,T}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,12
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	0,06%
		maximaler Wassergehalt M%	15,30%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	15,30%
	B. Schimmelpilzwachstum	Holzschalung außen, Außenoberfläche	Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe
viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)			Ja
$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			80,00%
$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			10,40
$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			15,79
Holzschalung außen, Innenoberfläche		Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe	Ja
		viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)	Ja
		$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	80,00%
		$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	10,40
		$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	15,79

03\_Bürs

dynamische Berechnung (WUFI): Dämmebene

A. Beurteilung des Feuchteverhaltens	Gesamter Bauteil	Gesamtwassergehalt	nimmt ab
		Anstieg des Gesamtwassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,053
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,025
		Anstieg des Wassergehaltes in kapillar wasseraufnahmefähiger Schicht	Ja
	Holzschalung außen	Wassergehalt Holzschalung außen	nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,HD}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,03
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,HD}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	1,15
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	7,66%
		maximaler Wassergehalt M%	21,40%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	21,20%
	Dämmung	Wassergehalt Dämmung	nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,D}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,03
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,D}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,23
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	0,97%
		maximaler Wassergehalt M%	2,83%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	2,75%
	B. Schimmelpilzwachstum	Holzschalung außen, Außenoberfläche	Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe
viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)			Ja
$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			80,04%
$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			1,71
$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			3,17
Holzschalung außen, Innenoberfläche		Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe	Nein
		viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)	Nein
		$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-
		$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-
		$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-

03\_Bürs

dynamische Berechnung (WUFI): Trägerebene

A. Beurteilung des Feuchteverhaltens	Gesamter Bauteil	Gesamtwassergehalt	nimmt ab
		Anstieg des Gesamtwassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,033
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,018
		Anstieg des Wassergehaltes in kapillar wasseraufnahmefähiger Schicht	Nein
	Holzschalung außen	Wassergehalt Holzschalung außen	steigt an
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,HT}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,15
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,HT}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,19
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	1,26%
		maximaler Wassergehalt M%	16,16%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	16,16%
	Träger	Wassergehalt Holzträger	steigt an
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,T}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,03
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,T}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,11
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	0,05%
		maximaler Wassergehalt M%	15,28%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	15,26%
	B. Schimmelpilzwachstum	Holzschalung außen, Außenoberfläche	Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe
viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)			Ja
$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			80,00%
$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			10,40
$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			15,79
Holzschalung außen, Innenoberfläche		Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe	Nein
		viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)	Nein
		$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-
		$t_m$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-
		$t_v$ [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-

03\_Schröcken

dynamische Berechnung (WUFI): Dämmebene

A. Beurteilung des Feuchteverhaltens	Gesamter Bauteil	Gesamtwassergehalt	nimmt ab
		Anstieg des Gesamtwassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,082
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,035
		Anstieg des Wassergehaltes in kapillar wasseraufnahmefähiger Schicht	Ja
	Holzschalung außen	Wassergehalt Holzschalung außen	nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,HD}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,06
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,HD}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,91
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Ja
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	6,04%
		maximaler Wassergehalt M%	21,60%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	21,16%
	Dämmung	Wassergehalt Dämmung	nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,D}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,02
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,D}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,20
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	0,83%
		maximaler Wassergehalt M%	2,55%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	2,42%
	B. Schimmelpilzwachstum	Holzschalung außen, Außenoberfläche	Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe
viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)			Ja
$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			80,00%
tm [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			1,58
tv [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			2,87
Holzschalung außen, Innenoberfläche		Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe	Nein
		viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)	Nein
		$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-
		tm [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-
		tv [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-

03\_Schröcken

dynamische Berechnung (WUFI): Trägerebene

A. Beurteilung des Feuchteverhaltens	Gesamter Bauteil	Gesamtwassergehalt	nimmt ab
		Anstieg des Gesamtwassergehaltes über 5 Jahre $\Delta u'_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,064
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Erhöhung des Gesamtwassergehaltes $\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	Nein
		Schwankung des Gesamtwassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_m$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,032
		Anstieg des Wassergehaltes in kapillar wasseraufnahmefähiger Schicht	Nein
	Holzschalung außen	Wassergehalt Holzschalung außen	steigt an
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,HT}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,22
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,HT}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,19
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	1,28%
		maximaler Wassergehalt M%	17,00%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	17,00%
	Träger	Wassergehalt Holzträger	nimmt ab
		Veränderung des Wassergehaltes über 4 Jahre $\Delta u'_{m,T}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	-0,01
		Schwankung des Wassergehaltes im Jahresverlauf $\Delta u_{m,T}$ [kg/m <sup>2</sup> ]	0,18
		Schädigung des betroffenen Baustoffs (Holz $\geq 3\%$ Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehalts unzulässig)	Nein
		Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes des Baustoffs in %	0,09%
		maximaler Wassergehalt M%	15,27%
		maximaler Wassergehalt M% im 5. Jahr	15,24%
	B. Schimmelpilzwachstum	Holzschalung außen, Außenoberfläche	Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe
viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)			Ja
$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			80,00%
tm [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			7,48
tv [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen			11,68
Holzschalung außen, Innenoberfläche		Punkte hygrothermischen Zustands über Grenzisoplethe	Nein
		viele hygrothermische Zustände über der Grenzisoplethe ( $\geq 30$ Punkte)	Nein
		$\phi_{krit}$ [%] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-
		tm [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-
		tv [h] nach dem Modell von Hukka und Viitanen	-

# CURRICULUM VITAE

*Julia Bachinger*

## PERSÖNLICHE DATEN

Avenue de Châtelaine 85  
1219 Châtelaine – GE  
Schweiz

\* 09.05.1980 in Ried im Innkreis, Österreich

## AUSBILDUNG

- März|06 – Mai|10      Doktoratsstudium an der Technischen Universität Wien (Österreich)
- 2006 – 2009      Seminare:  
- Minergie, Minergie-P, Minergie-ECO  
- Programm PHPP (Passivhausprojektierungspaket)  
- Simulation von Wärmebrücken (Programm Antherm)  
- Programm WUFI am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen
- Okt|98 – Nov|04      Architekturstudium an der Technischen Universität Wien
- 1990 – 1998      Bundesgymnasium Ried / I (Österreich)

## BERUFLICHE ERFAHRUNGEN

- Seit Juni|09      Bauphysiker, Projektleiter  
Büro Gartenmann Engineering SA in Lausanne (Schweiz)  
Verantwortlichkeiten : Projektleitung, Bauphysik, Energie, Akustik, etc.
- Aug|07 – Dez|08      Architekt, Projektleiter  
Büro « atba » – l'atelier, bureau d'architecte SA in Genf (Schweiz)  
Verantwortlichkeiten : Projektleitung, Vorentwurf, Entwurf, Baubewilligung,  
Ausführungsplanung, Ausschreibung, Bauleitung
- Feb|05 – Juli|07      Bauphysiker, Projektleiter  
Büro DI Dr. Lothar Künz ZT GmbH in Hard (Vorarlberg, Österreich)  
Verantwortlichkeiten : Bauphysik, Akustik, Bauleitung, Projektleitung,  
Ausschreibung, Ausarbeitung von Details, etc.
- März|02 – Jan|05      EDV – Tutorin an der Universität für Bodenkultur in Wien
- April|04 – Mai|04      Praktikum im Architekturbüro Liszt in Bad Vöslau (Österreich)  
Verantwortlichkeiten : Ausführungspläne und Ausschreibungen
- Sept|03, Aug|01      Praktikum im Architekturbüro Bauböck in Ried i.I. (Österreich)  
Sept|00, Juli|99      2003 : Wettbewerbsentwurf Sanierung und Umbau Altenheim Ried i.I.  
2001 : Bauaufnahmen und Einreichplanung