IABP Rudolf Diesel – Strasse 5 CH-8404 Winterthur

Tel.: +41 52 213 95 95 Email: info@iabp.ch

www.iabp.ch



Forschungsbericht

Hygrothermische Analyse der energetischen Sanierung von historischem Mauerwerk durch Innendämmung mit konventionellen und aerogelhaltigen Hochleistungsdämmstoffen

Hygrothermal analysis of energy efficient retrofit of historical masonry with internally applied conventional and aerogel-based insulation materials

erstellt von

Dr. Karim Ghazi Wakili (IABP)
M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Thomas Stahl (IABP)
Dr. Walter Niederberger (Kantonale Denkmalpflege BL)

Mai 2018

Auftraggeber:
Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege
Winterthurerstrasse 69
CH-8006 Zürich

Zusammenfassung

In diesem Forschungsprojekt geht es um die energetische Sanierung von historischen Gebäuden durch den Einsatz von Innendämmungen. Dies bringt vielerlei Fragen mit sich, die im Einzelnen anhand umfangreicher hygrothermischer Simulationen untersucht wurden. Um aus diesen Simulationen möglichst realitätsnahe Resultate zu erhalten, wurden Baumaterialien aus einem historischen Gebäude auf deren hygrothermisches Verhalten hin untersucht. Die Messergebnisse flossen als Materialparameter in die Simulationen ein. Auch das Modell des Wandaufbaus wurde realitätsnah aus Stein und Mörtelschichten für 1D und 2D Berechnungen erstellt. Als Dämmstoffe wurden sowohl moderne aerogelhaltige als auch ein konventionelles Produkt berücksichtigt. Dies, um die Eignung moderner Materialien im Bereich der energetischen Sanierung historischer Gebäude aufzuzeigen. Um ein möglichst umfangreiches Bild erstellen zu können, wurde eine grosse Vielfalt an Randbedingungen für die Berechnungen in Betracht gezogen. Einer der wichtigsten dieser Parameter ist der Standort, der in der Schweiz mit einer zwar kleinen Fläche aber grossen klimatische Vielfalt auf drei Klimaregionen aufgeteilt werden muss. Ebenso spielt am jeweiligen Standort auch die Wandorientierung aufgrund der unterschiedlichen Schlagregenbelastung eine entscheidende Rolle bei der Funktionalität einer Innendämmung.

Im ersten Arbeitspaket wurden eindimensionale hygrothermische Simulationen für unterschiedlich Wandkonstruktionen mit identischem U-Wert ausgeführt. Dabei wurden kritische Grössen wie u.a. die relative Feuchte hinter der Innendämmung und Wassergehalte im ersten Zentimeter der Dämmung, genauer Untersucht. Im zweiten Arbeitspaket wurde ein Modell für ein historisches Gebäude erstellt. An diesem wurde der Einfluss einer Aussendämmung im Vergleich zu einer Innendämmung für zwei verschiedene Wandstärken bezüglich des energetischen Verhaltens bei unterschiedlichen Standorten (Zürich, Davos, Locarno) untereinander verglichen. Beim dritten Arbeitspaket lag das Hauptaugenmerk auf dem einbindenden Holzbalkenkopf in historischem Bruchsteinmauerwerk beim Einsatz der verschiedenen Innendämmungen an den drei klimatischen Standorten. Als weitere Parameter wurde der Einfluss einer künstlich erzeugten Wärmebrücke im Eckbereich, sowie einer Dämmung am Balkenkopf und einer Beheizung im Eckbereich auf die Temperatur, relative Feuchte und Wassergehalt am Balkenkopf analysiert. Zum Schluss wurde in einem vierten Arbeitspaket anhand eines simulierten Testraums (Museum / Ausstellung) mit einer grossen Fensterfassade der Einfluss der Innendämmung auf die thermische Behaglichkeit für Mensch und den Optimalbereich für Kulturgut mit und ohne Feuchtespeicherputz betrachtet und in sogenannten entsprechenden Behaglichkeitsdiagrammen dargestellt. Der Wissenstransfer aus den Untersuchungen wird in einem einfachen Planungsleitfaden für die Denkmalpflege, sowie zusammengefasst in einer Fachpublikation erscheinen.

Im Ergebnis kann gesagt werden, dass sich die untersuchten aerogelhaltigen Produkte sich nicht von dem konventionellen Produkt deutlich unterscheiden und somit zumindest aus bauphysikalischer Sichtweise problemlos eingesetzt werden können. Durch die günstigeren Dämmeigenschaften können sie häufig in dünneren Schichten ausgeführt werden. Da der Standort und die Bewitterung und demzufolge die Wasseraufnahme der äussersten Schicht massgeblich die Feuchte- und Temperaturverteilung in der Wand beeinflussen, ist beim Einsatz einer Innendämmung eine sorgfältige Planung unter Zuhilfenahme von hygrothermischen Simulationen zwingend erforderlich.

Stichwörter

Denkmalpflege; historische Gebäude; energetische Sanierung; Innendämmung; aerogelhaltige Dämmstoffe; Holzfaserdämmstoff; Feuchtespeicherputz; hygrothermische Simulation; Behaglichkeit; Risikobereiche für Kulturgut

Inhaltsverzeichnis

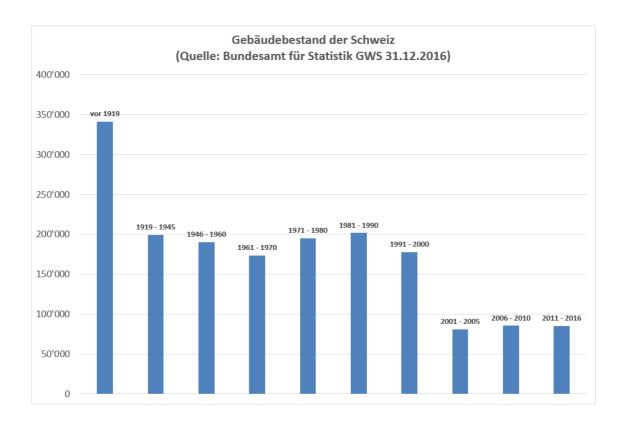
Zusar	nmenfassung	2
Inhalt	sverzeichnis	4
Einlei	itung	7
1	Materialuntersuchungen	8
1.1	Historisches Gebäude in der Gemeinde Rünenberg	
1.2	Bauphysikalische Untersuchungen	
1.2.1	Messung der Wärmleitfähigkeit	
1.2.2	Messung der Sorptionsisothermen	
2	Arbeitspaket 1: Hygrothermische Bauteilsimulationen mit WUFI 1	14
2.1	IST-Zustand: Wandaufbau, Materialzuordnung und klimatische Randbedingungen	14
2.2	Für die Simulation verwendete Dämmstoffe	19
2.2.1	Aerogel Hochleistungsdämmputz	19
2.2.2	Aerogel Matte	20
2.2.3	Holzfaserdämmung	21
2.2.4	Hygrothermische Eigenschaften	21
2.3	Innere Oberflächentemperaturen im Vergleich	21
2.4	Innere Oberflächenfeuchte im Vergleich	27
2.5	Temperatur und Feuchtezustand hinter den Dämmschichten	32
2.5.1	Zusatzvarianten mit Feuchtespeicherputz hinter der Innendämmung	36
2.6	Wassergehalte mit und ohne Innendämmungen	38
2.6.1	Gesamtwassergehalt der Wandkonstruktion	38
2.6.2	Wassergehalt im ersten Zentimeter der Innendämmung	39
2.7	Begrenzung der Wasseraufnahme von aussen	43
3	Arbeitspaket 2: Hygrothermische Gebäudesimulation des historischen Hauses in Rünenberg mit WUFI Plus	
3.1	Das Modell für WUFI Plus	45
3.2	Randbedingungen	47
3.3	Bruchsteinmauerwerk 60 cm	49
3.3.1	Aussendämmung mit Aerogel Matte	50
3.3.2	Innendämmung mit Aerogel Matte	50
3.4	Bruchsteinmauerwerk 80 cm	51
3.4.1	Aussendämmung mit Aerogel Matte	
3.4.2	Innendämmung mit Aerogel Matte	
3.4.3	Berechnete Summe der Heizenergie im Vergleich in kWh	
3.4.4	Komfortdiagramme Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte	54

4	Arbeitspaket 3: Detail Holzbalken und Ecke Wand/Boden im Bruchsteinmauerwerk (2D)	60
4.1	Ungedämmter IST-Zustand	61
4.2	Innendämmung mit Aerogel Dämmputz	67
4.2.1	Aerogel Dämmputz und Perlite Füllung im Balkenhohlraum	73
4.2.2	Aerogel Dämmputz und künstlich erzeugte Wärmebrücke mit Ziegel	79
4.2.3	Aerogel Dämmputz und Temperierung mit aufheizbarer Farbe	85
4.3	Innendämmung mit Aerogel Matte	91
4.3.1	Aerogel Matte und Perlite Füllung im Balkenhohlraum	97
4.3.2	Aerogel Matte und künstlich erzeugte Wärmebrücke mit Ziegel	103
4.3.3	Aerogel Matte und Temperierung mit aufheizbarer Farbe	109
4.4	Innendämmung mit Holzfaserplatte	115
4.4.1	Holzfaserplatte und Perlite Füllung im Balkenhohlraum	121
4.4.2	Holzfaserplatte und künstlich erzeugte Wärmebrücke mit Ziegel	127
4.4.3	Holzfaserplatte und Temperierung mit aufheizbarer Farbe	133
5		
5.1	Randbedingungen	139
5.2	Innendämmung mit Aerogel Matte ohne Feuchtespeicherputz	141
5.2.1		
5.2.2	Risikobereich für Holz und Leinwand	143
5.3	Innendämmung mit Aerogel Matte mit Feuchtespeicherputz	147
5.3.1	Behaglichkeit für Personen	147
5.3.2	Risikobereich für Holz und Leinwand	148
Litera	turverzeichnis	153
Dank	sagung	154
Innendämmung mit Aerogel Matte 4.3.1 Aerogel Matte und Perlite Füllung im Balkenhohlraum 4.3.2 Aerogel Matte und künstlich erzeugte Wärmebrücke mit Ziegel 4.3.3 Aerogel Matte und Temperierung mit aufheizbarer Farbe 4.4 Innendämmung mit Holzfaserplatte 4.4.1 Holzfaserplatte und Perlite Füllung im Balkenhohlraum 4.4.2 Holzfaserplatte und künstlich erzeugte Wärmebrücke mit Ziegel 4.4.3 Holzfaserplatte und Temperierung mit aufheizbarer Farbe 5. Arbeitspaket 4: Hygrothermische Raumsimulation zur Bestimmung des optimalen Raumklimas 5.1 Randbedingungen 5.2 Innendämmung mit Aerogel Matte ohne Feuchtespeicherputz 5.2.1 Behaglichkeit für Personen 5.2.2 Risikobereich für Holz und Leinwand 5.3 Innendämmung mit Aerogel Matte mit Feuchtespeicherputz 5.3.1 Behaglichkeit für Personen		

Einleitung

Gerade bei historischen und häufig denkmalgeschützten Gebäuden ist der Einsatz von Innendämmungen die einzige Möglichkeit, diese energetisch auf einen für die Bewohner akzeptablen Standard zu bringen. Der Anteil historischer Gebäude im Gesamtbestand der Schweiz ist recht bedeutend, wie das untere Bild eindrücklich zeigt. Um die Bausubstanz möglichst lange erhalten zu können, müssen diese auch bewohnt/benutzt werden. Die heutigen Anforderungen an den Wohnkomfort und Energieverbrauch sind aber deutlich verschieden als zu der Zeit. als die Gebäude erstellt wurden.

Moderne, leistungsfähige Dämmungen wie zum Beispiel aerogelhaltige Produkte gewinnen immer mehr an Bedeutung und Akzeptanz und müssen auch zukünftig im Denkmalbereich diskutiert werden. Oftmals bestehen bei der Einführung von neuartigen Materialien Unsicherheiten seitens der Planer und Anwender. Mit den folgenden bauphysikalischen Untersuchungen an aerogelhaltigen sowie an einem konventionellen Dämmstoffs soll diesen Unsicherheiten begegnet werden.



1 Materialuntersuchungen

Da es sich in diesem Forschungsprojekt fast ausschliesslich um Simulationen der Temperaturen und Feuchteverteilung in historischen Gebäuden und Wandkonstruktionen handelt, wurde Wert daraufgelegt, möglichst realitätsnahe Materialdaten zu verwenden.

Zu diesem Zweck wurden aus einem historischen Gebäude der Gemeinde Rünenberg (Kanton BL) Mörtelproben und Steinmuster entnommen und auf ihre bauphysikalischen Eigenschaften hin untersucht. Die Resultate aus diesen Untersuchungen flossen als Input-Daten in sämtliche Arbeitspakete dieses Forschungsvorhabens.

1.1 Historisches Gebäude in der Gemeinde Rünenberg

Das stattliche Bauernhaus im Zentrum von Rünenberg wurde 1787 im spätbarocken Stil erbaut und später mehrfach erweitert, dürfte aber ältere Bausubstanz enthalten. Es steht traufständig etwas erhöht an der Einmündung Alte Landstrasse in die Hauptstrasse. Das zweigeschossige Mitterstallhaus - der Stall liegt zwischen Wohnteil und Tenn - weist ein steiles Satteldach auf, das beim Wohnteil im oberen Drittel abgewalmt ist. Das Bauernhaus ist typologisch vergleichbar mit mehreren anderen entstandenen Bauernhäuser der Umgebung ähnlicher Zeitstellung. Das Gebäude ist im Zonenplan der Gemeinde als schützenswerter Bau eingestuft. Das fünfachsige Wohnhaus ist nach Süden ausgerichtet. Die Giebelseite des Wohnteils ist mit drei Fensterachsen gegliedert. Hier liegt auch - untypischerweise - der Hauseingang. Auf der Rückseite zieht sich eine durchgehende Laube über die ganze Länge des Wohnteils. Unter der westlichen Hälfte des Wohnteils liegt der alte Gewölbekeller, den man früher von aussen her betrat. Im Innern sind der Kachelofen und die historische Kücheneinrichtung schon vor dem letzten Umbau um 1970 eliminiert worden. Auf der Westseite schliesst das zweiteilige Ökonomiegebäude mit Satteldach und leicht niedrigerem First an sowie einem Konglomerat an kleineren An- und Zubauten. Tenn und Stall werden auf der Strassenseite mit einer durchlaufenden Schopflaube geschützt. Auf der Rückseite liegt eine Hocheinfahrt unter einem Quergiebel. Das Haus stand knapp zehn Jahre leer, bis 2015 ein erfolgreiches Projekt für einen Umbau die Sanierung einleitete. Als erster Schritt wurde ein Vorprojekt erstellt, um zu prüfen, ob die Ansprüche der Bauherrschaft in diese Liegenschaft umgesetzt werden können. Zusammen mit der Denkmalpflege wurden festgelegt, welche Bauteile erhalten werden sollten. Denn aufgrund seiner vielen Veränderungen im Laufe der Zeit präsentiere sich das Bauernhaus mit über zehn verschiedene Niveaus im Innern und verschiedenen Treppen. Bis zur Sanierung von 2015 dürfte das Haus bereits mindestens zwei grosse und mehrere kleinere Veränderungen erfahren haben. Der ursprüngliche Bau war deutlich kleiner als heute. Er befindet sich im Südwesten angrenzend an die Ökonomie. Diese Räume stammen vermutlich von einem schmalen Vorgängerbau. Im Erdgeschoss haben die Fenster noch alte Steingewände. Im Dachstock ist die ehemalige Giebelwand des schmaleren Hauses zu sehen. Der Dachstuhl aus dieser Zeit ist nicht mehr vorhanden. 1787 wurde der Bau nach Norden um eine Raumtiefe erweitert und erhielt ein komplett neues Dach. In der Erweiterung kam im Erdgeschoss die Küche zu liegen. Die damals errichtete Nordfassade fehlt heute wieder, denn bei einer symmetrischen Dachkonstruktion muss die Mauer weiter aussen gelegen haben als die heutige Küchenrückwand. Bei den nächsten beiden Erweiterungen des Hauses die beide in die Mitte des 19. Jh. zu datieren sind, wurde der Wohnteil um zwei Fensterachsen nach Osten hin und nach Norden um einen Werkstattanbau erweitert. Zusammen mit diesem Wohnraumanbau wurde auch der Dachstuhl nach Osten erweitert. Dieser Anbau nahm keine Rücksicht auf die bestehenden Geschosshöhen, obgleich es teilweise Durchgänge zum Bestand gab. Das fällt von aussen kaum auf, da an der Südseite die neuen Fenster die Höhenlage der alten übernahmen. Innen hingegen befinden sich die Südfenster im Anbau nur etwa 20 Zentimeter über dem Boden. Der Anbau nahm auch die neue Treppe auf. Die ursprüngliche Giebelwand wurde im Zug dieses Umbaus teilweise abgebrochen. Geblieben ist die alte Eingangstür mit der Jahreszahl 1787, die nun im Innern liegt. Der Anbau nach Norden wurde durch eine Verlängerung der Aufschieblinge des Daches gedeckt. Im diesem Anbau wurde im Erdgeschoss eine Werkstatt und darüber Zimmer eingerichtet. Abgesehen von dem Werkstattraum wurde der Anbau im 20. Jh. nochmals stark verändert. 1924 wurde der Dachstuhl teilweise erhöht und an dem Anbau eine Laube vorgesetzt. Die 2015 vorgefundene Bausubstanz war grösstenteils in einem schlechten Zustand. Undichte Stellen im Dach und Insektenbefall hatten den Dachstuhl der Erweiterung nach Osten zerstört. An mehreren Stellen wurden die Umbauten derart nachlässig durchgeführt, dass Einsturzgefahr bestand. Der kaputte Dachstuhl samt Decke auf der Ostseite musste komplett ersetzt werden, ebenso die Decke zum Estrich auf der Nordseite. Im Zentrum, das neu die Treppenanlage beherbergt, wurden verschiedene Deckenkonstruktionen, gefüllt mit bis zu 50 Zentimeter Schutt als Niveauausgleich, ebenfalls eine Massivholzdecke ersetzt. Erhalten wurde der Dachstuhl von 1787, der bis auf wenige Stellen noch intakt war. Das Haus wurde während den Bauarbeiten in den Rohbauzustand zurückversetzt. Nur noch die Mauern, die Balkendecken mit den Einschubböden und der noch intakte Teil des Dachstuhls standen. Wo das Bruchsteinmauerwerk nicht ohnehin schon sichtbar war, wurde der zerbröckelnde Verputz abgeschlagen und neu aufgebaut. Die Balkendecken wurden mit einer Massivholzschalung verstärkt, auf die anschliessend ein schwimmender Unterlagsboden mit Fussbodenheizung kam. Neue Zwischenwände und Treppen wurden als Holzkonstruktionen ausgeführt. Das Haus entspricht heute dem Minergie-Standard für Umbauten. Die Böden und die Decken zum weiterhin leerstehenden Dachraum wurden mit Dämmung ausgeblasen. Die Fassadendämmung folgt mit ausisolierten Holzrosten den ursprünglichen Unebenheiten. Die Südfassade weist dabei eine Dämmstärke von 10 Zentimeter auf, die übrigen eine von 24 Zentimeter. Als Dämmmaterial wurde Holzwolle verwendet. Holzfaserplatten dienen als Putzträger. Die alten hölzernen Fenstergewände wurden aufgedoppelt, so dass sie weiterhin über den Verputz vorstehen. Die zum Teil noch vorhandenen Fenster mit Einfachverglasung und Vorfenstern wurde mit den heute üblichen dreifach verglasten modernen Holzfenstern ersetzt. Auch nach der Sanierung zieren

einfache Bretterläden die Fassaden. Über dem Gewölbekeller wurde der Schutt, der als Ausgleichsfüllung diente, entfernt und mit Leichtbeton ersetzt. Alte und neue Betonböden, die direkt auf dem Erdreich liegen, erhielten eine harte Dämmung. Bis auf die Haustür im Norden und eine Gartentür, beides vergrösserte Fenster, sind die Öffnungen unverändert geblieben. Da die neue Zufahrt im Norden liegt, war es naheliegend, den Eingang auf die Nordseite in die ehemalige Werkstatt zu verlegen. Über eine Treppe gelangt man in das Zentrum des Hauses, in dem sich jetzt die Haupttreppe und eine kleine Nebentreppe für ein Zimmer und ein Bad im Norden befinden. Vom Zentrum gelangt man durch drei bestehende Öffnungen in den Koch-Ess-Wohn-Bereich. Eine davon ist die ehemalige Haustür. In der Scheune wurde bis auf den Einbau eines Heizraums mit einem 13 000 Liter fassenden Speicher alles beim Alten belassen. Eine 50-Kilowatt-Stückholzheizung erwärmt, unterstützt von 24 Quadratmeter thermischen Kollektoren, den Speicher. Bei durchschnittlichen winterlichen Temperaturen reicht es, einmal die Woche einzuheizen, um genügend Wärme und Warmwasser für die vierköpfige Familie zu erhalten.



Bilder 1.1 A und B Nordseite vor und nach der Sanierung



Bilder 1.1 C und D Südseite vor und nach der Sanierung

1.2 Bauphysikalische Untersuchungen

Die wichtigsten Materialparameter die für die Simulationen benötigt werden, sind die Wärmeleitfähigkeit und die feuchtebezogenen Eigenschaften, welche durch die Sorptionsisotherme abgebildet werden. Da es sich um zeitabhängige (instationäre) Simulationen handelt, werden auch die Dichte und die spezifische Wärmekapazität benötigt. Die Dichte wurde gemessen und die Wärmekapazität aus Literaturwerten übernommen, da diese für die meisten mineralische Baumaterialien zwischen 900 – 1000 J/(kg K) liegt. Der betrachtete Temperaturbereich liegt zwischen -10 bis +30 °C, daher können die erwähnten Materialparameter als konstant angenommen werden.

1.2.1 Messung der Wärmleitfähigkeit

Vom Naturstein (Hauptrogenstein) wurde die Wärmeleitfähigkeit an zugeschnittenen Proben (Bilder 1.2.1 A und 1.2.1 B) mit einem "Thermal Hot Bridge" Messgerät bestimmt.







Bild 1.2.1 B zugeschnittener Stein

Vom Mauermörtel konnte die Wärmeleitfähigkeit nicht ermittelt werden, da die Probe zu klein war (Bild 1.2.1 C) und keine in den benötigten Abmessungen entnommen werden konnte. Es wurde die Dichte bestimmt und die entsprechende Wärmeleitfähigkeit aus Literaturdaten entnommen. Dies ist näherungsweise zulässig, da bei mineralischen Baustoffen die Dichte mit der Wärmeleitfähigkeit eng zusammenhängt.



Bild 1.2.1 C entnommener Mauermörtel

Die Mess- und Literaturdaten sind der Tabelle 1.2.1 A zu entnehmen.

Bezeichnung	Dichte [kg/m³]	Wärmeleitf. [W/(m K)]		
Naturstein	2478	1.65 ± 0.02		
Mauermörtel	1600	0.70		

Tabelle 1.2.1 A: Thermische Materialkennwerte für die hygrothermische Simulation

1.2.2 Messung der Sorptionsisothermen

Die Sorptionsisotherme gibt die Feuchtemenge an, die das Material bei verschiedenen relativen Luftfeuchten im Gleichgewichtszustand aufnimmt. Für den Naturstein als Hauptbestandteil des untersuchten Mauerwerks ist dies im Bild 1.2.2 A dargestellt.

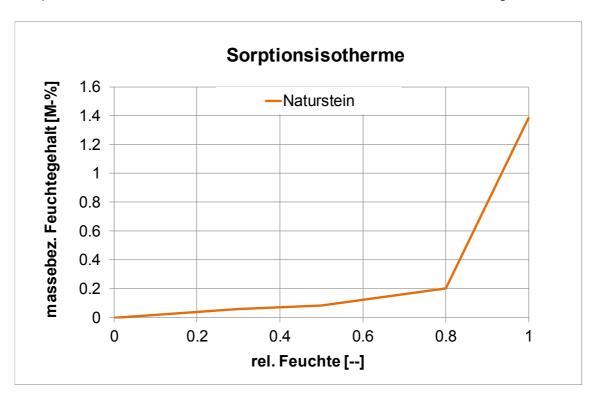


Bild 1.2.2 A Sorptionsisotherme des historischen Natursteins

Auch vom Mauermörtel wurde die Sorptionsisotherme im Labor bestimmt. Diese wird in Bild 1.2.2 B gezeigt.

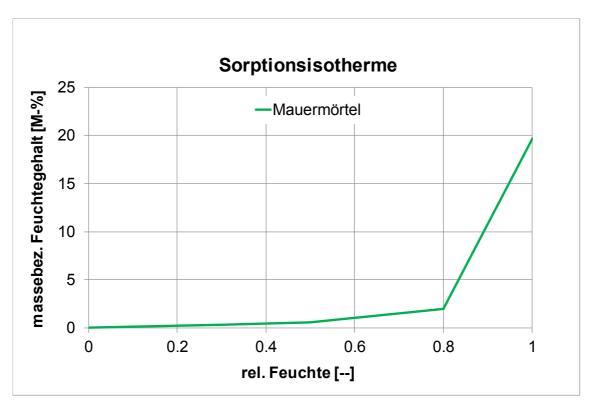


Bild 1.2.2 B Sorptionsisotherme des historischen Mauermörtels

2 Arbeitspaket 1: Hygrothermische Bauteilsimulationen mit WUFI 1D

Eine realitätsnahe Simulation der Feuchte- und Temperaturverteilung innerhalb von Konstruktionen, die einem zeitlich veränderlichen Klima unterworfen sind, kann nur unter Berücksichtigung einer instationären und gekoppelten Wärme- und Feuchtebilanz ausgeführt werden. Eine stationäre Betrachtung (z.B. Glaser), die keine Feuchtespeicherung und kapillare Verteilung berücksichtigt stellt eine sehr starke Vereinfachung dar und ist insbesondere für Innendämmungen völlig ungeeignet. Aus diesem Grund wurden die folgenden Betrachtungen mit der Software WUFI ausgeführt.

In der SIA 180:2014 wird als Mindestwärmeschutz ein U-Wert von 0.4 W/(m² K) gefordert. Für die folgenden Simulationen wurde ein etwas niedrigerer U-Wert als Zielvorgabe gewählt (0.35 W/(m² K)). Die Verfasser sind der Meinung, dass ein noch niedrigerer U-Wert bei innengedämmten historischen Gebäuden zu einer zu starken Abkühlung der Aussenwand führt und demzufolge das Schadensrisiko zunimmt. Sollen niedrigere U-Werte erreicht werden, so ist der Schlagregenschutz gezielt zu planen und gegebenenfalls zu verbessern. Dadurch muss verhindert werden, dass flüssiges Wasser in die nun kalte Mauer eindringt, weil diese nur noch erschwert austrocknen kann.

2.1 IST-Zustand: Wandaufbau, Materialzuordnung und klimatische Randbedingungen

Als Wandaufbau wurde ein Bruchsteinmauerwerk mit 0.6 m Dicke gewählt [1]. Dabei wurde ein Aufbau gemäss Bild 2.1 A gewählt. Als repräsentativ für das Verhältnis von Naturstein zu Mauermörtel wurde für das Simulationsmodell der Querschnitt entlang der roten Linie ausgewählt.

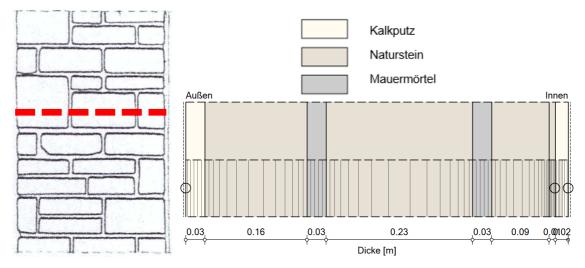


Bild 2.1 A Bruchsteinmauerwerk. Simulationsmodell entspricht dem Querschnitt entlang der roten Linie

Bezeichnung	zeichnung Wärmeleitf.		Dichte	w-Wert
	[W/(m K)]	[]	[kg/m³]	[kg/(m² √h]
Kalkputz	0.7	7	1600	3.0
Naturstein	1.7	34	2478	2.0
Mauermörtel	0.7	20	1600	4.0

Tabelle 2.1 A Input-Daten der Materialien des Mauerwerks für die hygrothermische Simulation

Der U-Wert der Wand im IST-Zustand beträgt ca. 1.66 W/(m² K). Ausgehend davon wurden U-Wert Berechnungen für drei verschiedene Materialien in Abhängigkeit der Dicke durchgeführt und im Bild 2.1 B dargestellt. Zur Auswahl kamen ein Aerogel Matten System ($\lambda_{10,dry}$ = 0.017 W/(m K)), ein Aerogel Hochleistungsdämmputz ($\lambda_{10,dry}$ = 0.027 W/(m K)) und eine Holzfaserplatte ($\lambda_{10,dry}$ = 0.044 W/(m K)). Um einen SOLL U-Wert von 0.35 W/(m² K) zu erreichen werden Dämmstoffdicken von 4, 6 und 10 cm benötigt (Schnittpunkt der rot gestrichelten Linie mit den Kurven in Bild 2.1 B).

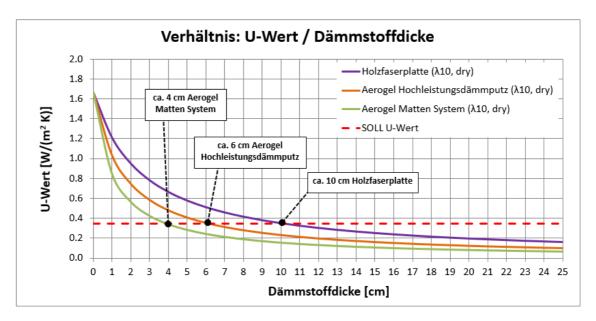
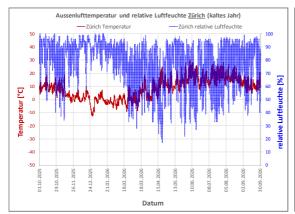


Bild 2.1 B U-Wert in Abhängigkeit der Dicke und der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs

Wie oben erwähnt stellen die Klimadaten die Randbedingung für Temperatur, relative Luftfeuchte, Strahlung und Regen auf der Aussenseite dar. Drei typische Klimastandorte der Schweiz (Zürich, Davos und Locarno) wurden für die folgenden Untersuchungen verwendet.



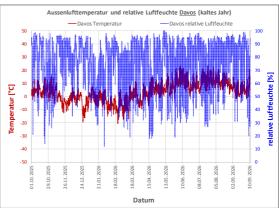
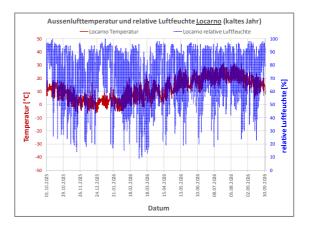


Bild 2.1 C Stundenmittelwerte der Temperaturen (rot) und der relativen Luftfeuchten (blau) über ein ganzes Jahr für die Standorte Zürich, Davos und Locarno (von links oben im Uhrzeigersinn)



Ein Vergleich der Monatsmittelwerte für die Aussenlufttemperaturen der drei Standorte Zürich, Davos und Locarno ist dem Bild 2.1 D zu entnehmen. Deutlich zeigt sich das wärmere Klima von Locarno und das viel kältere Klima von Davos, was sich in den Resultaten der Simulationen deutlich bemerkbar macht. Somit ist nicht automatisch gewährleistet, dass eine schadensfreie Konstruktion in z.B. Zürich auch in Davos oder Locarno schadensfrei bleibt. Eine standortbezogene Betrachtung ist somit notwendig.

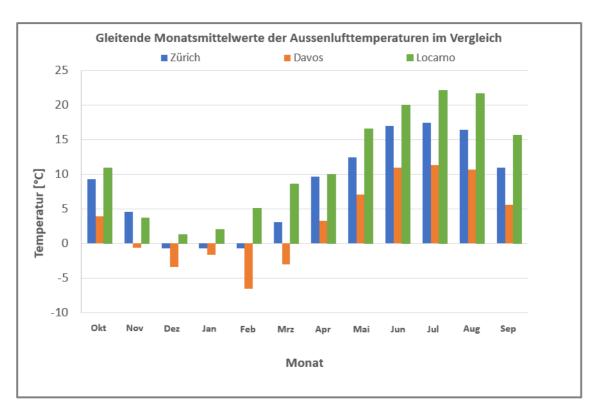


Bild 2.1 D Monatsmittelwerte der Aussenlufttemperatur für die drei Standorte im Vergleich

Markant ist auch der Unterschied der absoluten Feuchte der Aussenluft für die drei Klimastandorte, wie Bild 2.1 E zeigt. Dabei ist der absolute Feuchtegehalt von 9.7 g/m³, was einer Lufttemperatur von 22 °C und 50 % relativer Luftfeuchte als Referenz für einen Innenraum eingetragen (rote gestrichelte Linie), entspricht. Dabei wird deutlich, dass ab Monat Juni bis einschliesslich September die Aussenluft in Zürich bzw. Locarno mehr Feuchte beinhaltet als die Innenluft. Dies muss speziell bei der natürlichen Lüftung von historischen Gebäuden mit massiven Wänden berücksichtigt werden. Das kältere und trockenere Aussenklima von Davos hingegen erlaubt eine natürliche Lüftung ohne die Feuchte der Raumluft zu erhöhen.

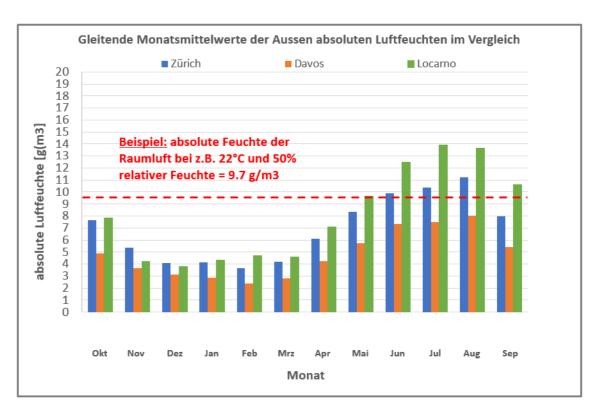


Bild 2.1 E Monatsmittelwerte der absoluten Feuchte der Aussenluft für die drei Standorte im Vergleich

Für innengedämmte Konstruktionen ist die Menge und Richtung des Schlagregens (Regen plus Windkomponente) von grosser Bedeutung. Dies im Hinblick auf die Wasseraufnahme der kälteren Fassaden und der schlechteren Austrocknungsmöglichkeit bedingt durch den unterbrochenen Wärmefluss durch die Innendämmung. Wie Bild 2.1. F verdeutlicht, besteht zum einen ein markanter Unterschied in der Regenmenge und ein noch grösserer in der jeweiligen Richtung des Schlagregens. Während in Zürich die Hauptwetterrichtung West bis Südwest ist, kommt in Davos der Regen von Nord bis Nordost. Locarno hat hingegen eine ausgeprägte Doppelrichtung, nämlich Ost und West. Für die folgenden Betrachtungen wurden aus diesem Grund folgende Hauptwetterrichtungen ausgewählt: Zürich = West, Davos = Nord und Locarno = Ost. Die jährliche mittlere solare Einstrahlung beträgt für Zürich West ca. 630 für Davos Nord ca. 500 und für Locarno Ost ca. 730 kWh/(m² a).

Die Resultate für die restlichen Orientierungen befinden sich im Anhang.

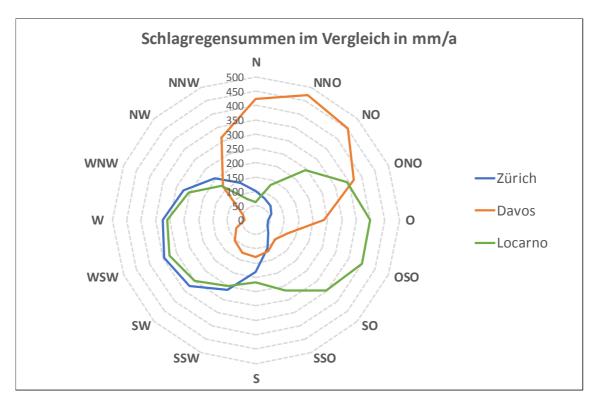


Bild 2.1 F Jährliche Schlagregensummen der drei Klimastandorte und deren Himmelsrichtung

2.2 Für die Simulation verwendete Dämmstoffe

Ziel des Arbeitspakets 1 war es, den Einfluss der Innendämmung auf den Wärme- und Feuchtehaushalt in einem historischen Mauerwerk zu bestimmen. In den letzten Jahren wurden hocheffiziente Dämmmaterialien entwickelt und auch verbreitet verwendet. Deshalb wurden für die Simulationen zwei aus dieser Gruppe ausgesucht. Dabei handelt es sich um einen Aerogel Hochleistungsdämmputz und um Aerogel Matten. Im Vergleich dazu wurde ein konventionelles Material als Vergleichsvariante ausgewählt. Hierbei handelt es sich um eine Holzfaserplatte, da sie eine hohe Wärmespeicherfähigkeit besitzt und auch vorteilhafte hygrische Speichereigenschaften aufweist.

2.2.1 Aerogel Hochleistungsdämmputz

Es handelt sich um einen kalkbasierten, kapillaraktiven Dämmputz mit Aerogel als Leichtzuschlag für den Innen- und Aussenbereich. Der Wandaufbau für die Simulation war wie folgt:

- Bestehender Untergrund innen
- Vorspritzmörtel
- Aerogel Hochleistungsdämmputz
- Spezial Einbettmörtel
- Mineralischer Deckputz



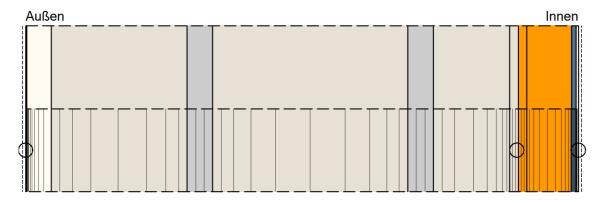


Bild 2.2.1 A Wandaufbau für die Simulation mit Aerogel Hochleistungsdämmputz

2.2.2 Aerogel Matte

Beim Aerogel Mattensystem handelt es sich um ein hochdämmendes Material aus Silica Aerogelen, eingebettet in einem Faserstützgerüst. Diese wird üblicherweise geklebt und zusätzlich mit speziellen Dübeln (im Modell vernachlässigt) im Untergrund befestigt. Zur Wärmebrückenvermeidung wird hierauf als zusätzliche Schicht ein herkömmlicher Dämmputz aufgebracht. Der verwendete Wandaufbau war:

- Bestehender Untergrund innen
- Mineralische Klebe- und Spachtelmasse
- Aerogel Matten
- Dämmputz
- Mineralischer Deckputz

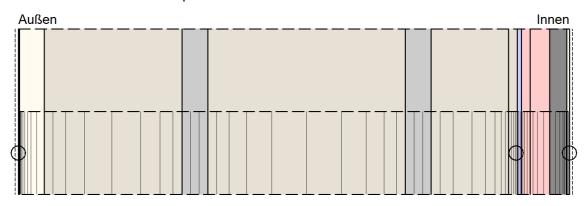


Bild 2.2.2 A Wandaufbau für die Simulation mit Aerogel Matte

2.2.3 Holzfaserdämmung

Bei der Holzfaserdämmung handelt es sich um eine ökologische, kapillaraktive, hygroskopische Holzfaserplatte. Der Wandaufbau war wie folgt:

- Bestehender Untergrund innen
- Mineralischer Klebespachtel
- Holzfaserplatte
- Mineralischer Einbettmörtel
- Mineralischer Deckputz



Bild 2.2.3 A Wandaufbau für die Simulation mit Holzfaserdämmung

2.2.4 Hygrothermische Eigenschaften

Die hygrothermischen Eigenschaften der drei verwendeten Innendämm – Materialien die für die Simulationen verwendet wurden sind in der Tabelle 2.2.4 A dargestellt.

Bezeichnung	nnung Wärmeleitf. μ-		Dichte	w-Wert	
[W/(m K)]		[] [kg/m³]		[kg/(m $^2 \sqrt{h}$]	
Aerogel Dämmputz	0.027	4	200	5.0	
Aerogel Matte	0.017	4.7	146	0.024	
Holzfaser	0.044	10	166	7.2	

Tabelle 2.2.4 A Input-Daten der Dämmmaterialien für die hygrothermische Simulation

2.3 Innere Oberflächentemperaturen im Vergleich

Im folgenden Kapitel werden die Temperaturen auf den inneren Oberflächen der ungedämmten mit den gedämmten Varianten verglichen. Betrachtet werden für die drei Standorte die jeweiligen Hauptwetterseiten (Zürich = West, Davos = Nord und Locarno = Ost). Bild 2.3 A zeigt die Situation für Zürich West. Im Winter sieht man klar die Erhöhung der Oberflächentemperatur durch das Anbringen der Innendämmungen über die

Wintermonate. Diese macht bis zu 5 °C aus, was die Behaglichkeit deutlich steigert. Zwischen den Dämmstoffen besteht ein Unterschied von ca. 0.5 – 1.0 °C in der Oberflächentemperatur. Wenn es nur um die konstante Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Dämmmaterialien ginge, müsste die Oberflächentemperatur für alle gleich sein. Weil die jeweilige Dicke so gewählt wurde das immer derselbe U-Wert resultiert. Da aus den Berechnungen trotzdem ein Unterschied resultiert, ist dies auf die verschiedenen Wärmeund Feuchtespeichereigenschaften der Dämmstoffe zurückzuführen. Die Holzfaserdämmung hat die höchste volumenbezogene Wärmespeicherkapazität und die Aerogel Matte die niedrigste Feuchteaufnahme (je niedriger die Feuchteaufnahme, desto niedriger die Wärmeleitfähigkeit). Durch seine geringere Dicke und der Zunahme seiner Wärmeleitfähigkeit mit der Feuchte ist die Zunahme der Oberflächentemperatur beim Aerogel Dämmputz etwas geringer. Im Sommer spielen die unterschiedlichen Eigenschaften der Dämmvarianten praktisch keine Rolle.

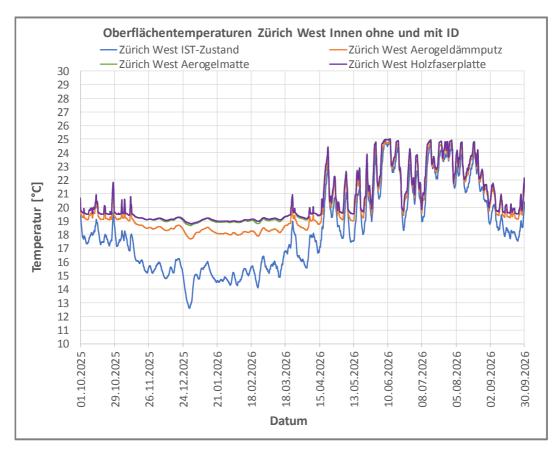


Bild 2.3 A Innere Oberflächentemperaturen Zürich West mit und ohne Innendämmung

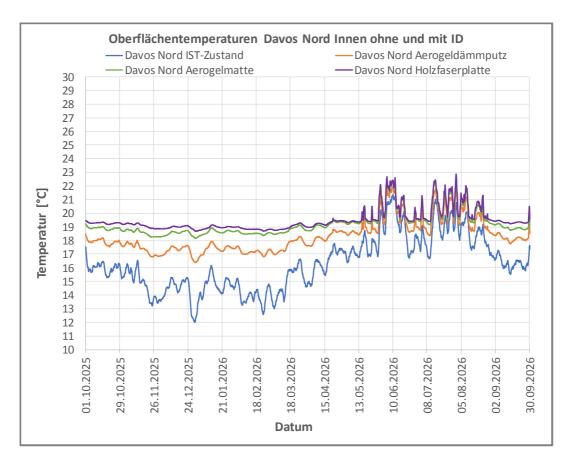


Bild 2.3 B Innere Oberflächentemperaturen Davos Nord mit und ohne Innendämmung

Für Davos (Bild 2.3 B) sieht man die viel längere Kälteperiode und dementsprechend auch den noch grösseren Nutzen einer Innendämmung als für die beiden anderen Standorte. Der Unterschied zwischen der Holzfaserdämmung und Aerogel Matte ist durch die trockenere Luft nur noch auf die Wärmespeicherkapazität des ersteren zurückzuführen.

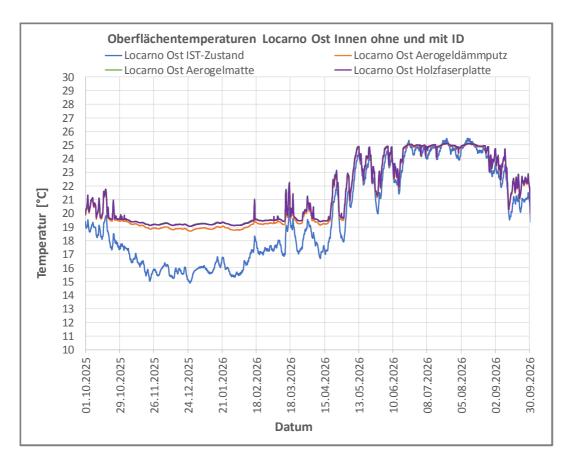


Bild 2.3 C Innere Oberflächentemperaturen Locarno Ost mit und ohne Innendämmung

Für Locarno (Bild 2.3 C) fällt der Unterschied zwischen den Dämmvarianten geringer aus, da die mittlere Jahrestemperatur und die Sonneneinstrahlung auf die entsprechende Orientierung am höchsten ist. Die Dauer der Winterperiode ähnelt wieder derjenigen von Zürich.

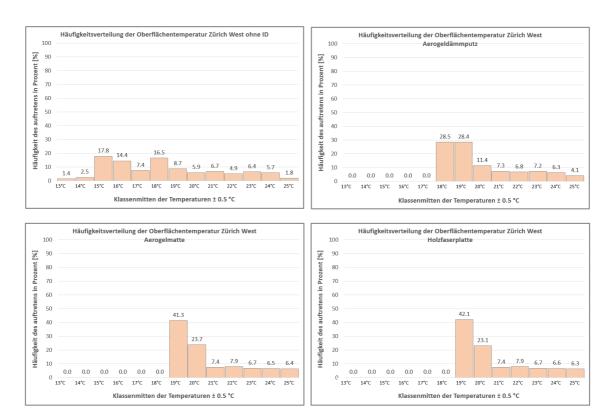


Bild 2.3 D Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen Zürich West ungedämmt und gedämmt

Die ungedämmte Variante Zürich West weist Oberflächentemperaturen, die hauptsächlich im Bereich zwischen $15-18\,^{\circ}$ C liegen. Bei allen gedämmten Varianten ist wie erwartet eine Verschiebung in der Häufigkeitsverteilung zu höheren Oberflächentemperaturen. Beim Aerogel Hochleistungsdämmputz liegen die Oberflächentemperaturen immer über 17 $^{\circ}$ C und mehrheitlich zwischen $18-19\,^{\circ}$ C. Nach der Anbringung der Aerogel Matte liegt die Oberflächentemperatur immer über $18\,^{\circ}$ C und mehrheitlich bei $19-20\,^{\circ}$ C. Bei der Holzfaserdämmung liegt die Oberflächentemperatur immer über $18\,^{\circ}$ C und mehrheitlich ebenfalls zwischen $19-20\,^{\circ}$ C.

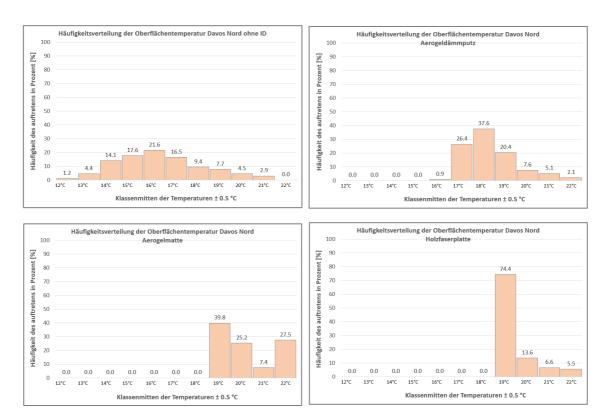


Bild 2.3 E Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen Davos Nord ungedämmt und gedämmt

Die ungedämmte Variante Davos Nord zeigt Oberflächentemperaturen die mehrheitlich zwischen 14 – 17 °C liegen. Durch das Anbringen von Aerogel Dämmputz verlagern sich die Oberflächentemperaturen deutlich nach oben und liegen mehrheitlich zwischen 17 – 19 °C. Bei der Aerogel Matte liegen die Oberflächentemperaturen mehrheitlich zwischen 19 – 20 °C. Bei der Holzfaserdämmung ist ein gleichmässiges Bild ohne grosse Schwankungen ersichtlich, was auf die höhere Wärmespeicherkapazität zurückzuführen ist. Dadurch liegt die Oberflächentemperatur zu fast 75 % bei 19 °C.

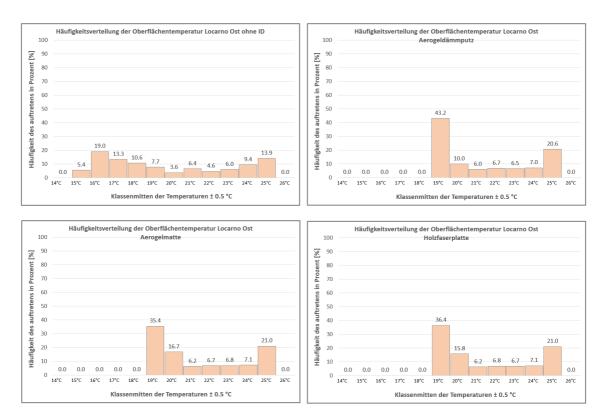


Bild 2.3 F Häufigkeitsverteilung der Oberflächentemperaturen Locarno Ost ungedämmt und gedämmt

Für das Klima Locarno mit Orientierung Ost ist die Oberflächentemperatur im ungedämmten Zustand breit gestreut. Mehrheitlich zwischen 16 - 17 °C (tendenziell Winter) und 24 - 25 °C (tendenziell Sommer). Durch die Innendämmung verschiebt sich der untere Teil bei allen Dämmvarianten auf über 19 °C.

2.4 Innere Oberflächenfeuchte im Vergleich

In diesem Kapitel werden die relativen Feuchten an den Innenoberflächen für jede Ausführung und Hauptwetterseite betrachtet (Worst Case Szenario). Für die folgenden Simulationen wurde eine Begrenzung in der Wasseraufnahme der Fassade von 0.5 kg/(m²√h) berücksichtigt. Selbst mit einer per Definition wasserhemmenden Oberfläche ist bei den Hauptwetterseiten und dem betrachteten Natursteinmauerwerk mit einer zeitweisen Auffeuchtung zu rechnen. Bild 2.4 A zeigt für Zürich West die über den Jahresverlauf auftretende relative Feuchte an der Innenoberfläche. Diese ist im ungedämmten Zustand (blaue Kurve) deutlich höher und erreicht sogar zeitweise im Winter über 80 % (gestrichelte rote Linie entspricht dem Schimmelpilzkriterium nach SIA 180:2014), was zu Schimmelpilzbefall führen kann. Für Davos ist die Situation aufgrund der höheren Schlagregensumme und tieferen Aussentemperaturen noch kritischer. Aber auch hier zeigt sich, dass durch die Innendämmung die relative Oberflächenfeuchte über das Jahr deutlich unter 75 % liegt.

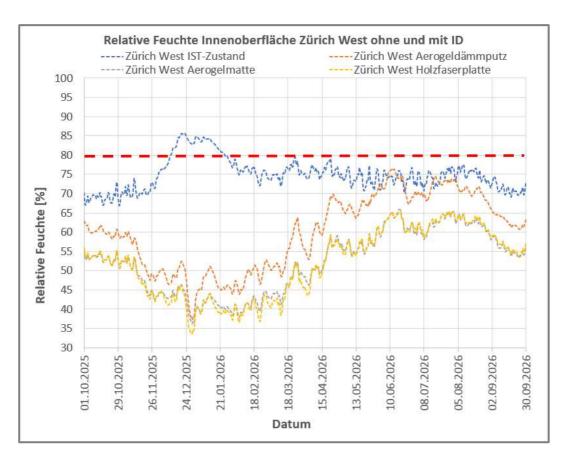


Bild 2.4 A Relative Feuchte an der Innenoberfläche Zürich West mit und ohne Innendämmung

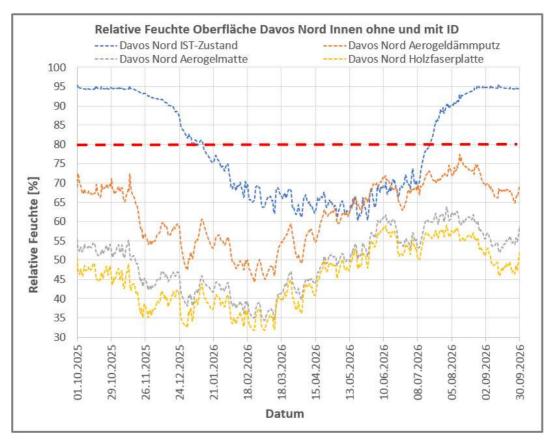


Bild 2.4 B Relative Feuchte an der Innenoberfläche Davos Nord mit und ohne Innendämmung

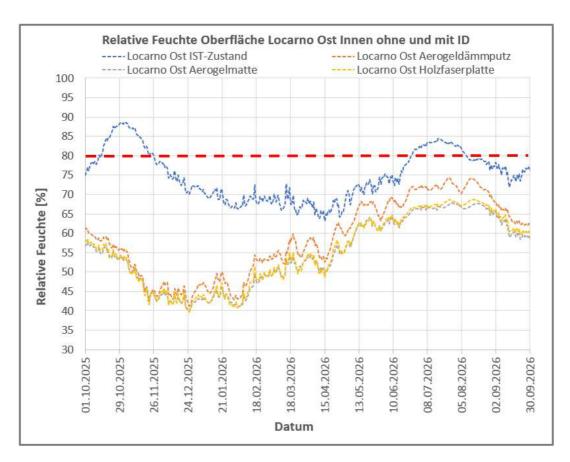


Bild 2.4 C Relative Feuchte an der Innenoberfläche Locarno Ost mit und ohne Innendämmung

In Locarno zeigt sich im Spätherbst und im Sommer eine leichte Erhöhung der Innenoberflächenfeuchte über das Schimmelpilzkriterium von 80 % (rote gestrichelte Linie). Dies ist auf die hohen relativen Aussenluftfeuchten zurückzuführen.

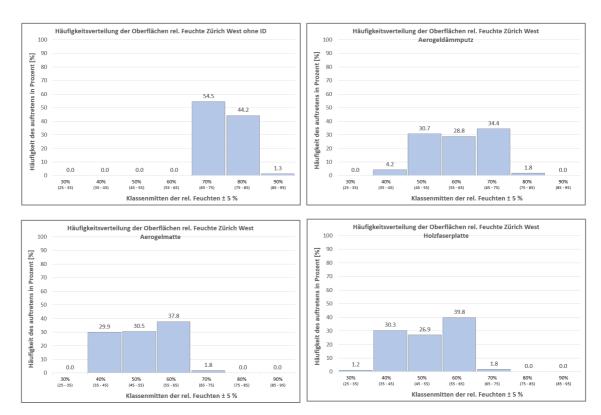


Bild 2.4 D Häufigkeitsverteilung der relativen Oberflächenfeuchte Zürich West ungedämmt und gedämmt

Die Häufigkeitsverteilung der auftretenden relativen Oberflächenfeuchte für Zürich West zeigt, dass im ungedämmten Zustand fast ausschliesslich Werte zwischen 65-85% vorkommen. Dies wäre auch bedenklich bezüglich eines Schimmelpilzrisikos. Bei den Dämmvarianten liegen je nach Ausführungstyp die relativen Oberflächenfeuchten mehrheitlich zwischen: Aerogel Dämmputz = 45-75%, Aerogel Matte und Holzfaserdämmung = 35-65%. Die unterschiedlichen Werte für die unterschiedlichen Dämmvarianten korrespondieren mit den entsprechenden Innenoberflächentemperaturen, die bereits in Kapitel 2.3 erklärt wurden.

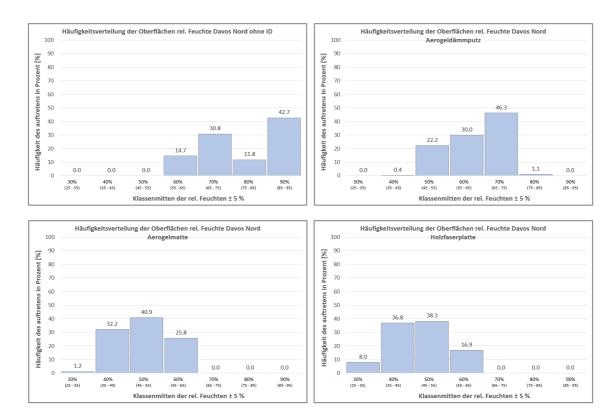


Bild 2.4 E Häufigkeitsverteilung der relativen Oberflächenfeuchte Davos Nord ungedämmt und gedämmt

In Davos liegt die Häufigkeit der vorkommenden relativen Oberflächenfeuchten fast zur Hälfte der Zeit zwischen 85-95 %. Dies wird durch die Dämmungen deutlich verringert. Bei den Dämmvarianten liegen je nach Ausführungstyp die relativen Oberflächenfeuchten mehrheitlich zwischen: Aerogel Dämmputz = 55-75 %, Aerogel Matte und Holzfaserdämmung = 35-55 %.

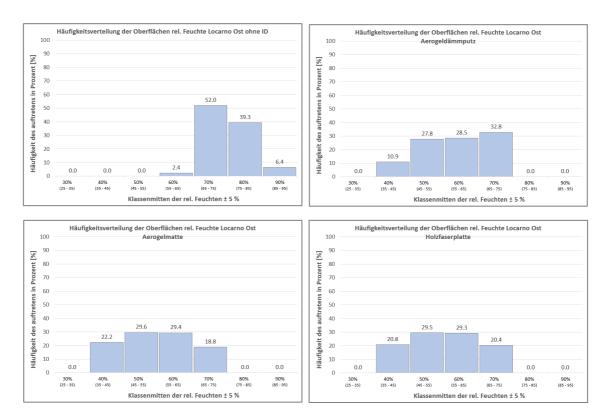


Bild 2.4 F Häufigkeitsverteilung der relativen Oberflächenfeuchte Locarno Ost ungedämmt und gedämmt

Die Häufigkeit der vorkommenden relativen Oberflächenfeuchten liegt in Locarno zwischen 65-85 %. Durch die Innendämmungen liegen die relativen Oberflächenfeuchten je nach Ausführungstyp mehrheitlich zwischen: Aerogel Dämmputz = 45-75 %, sowie bei der Aerogel Matte und der Holzfaserdämmung zwischen 35-65 %.

2.5 Temperatur und Feuchtezustand hinter den Dämmschichten

Um eine Schadensanfälligkeit ausschliessen zu können sollen die Temperatur und die relative Feuchte hinter der Dämmschicht den Wert von -5 °C (rot gestrichelte Linie in den Bildern 2.5 B bis D) und 95 % nicht unter- bzw. überschreiten.

Gemäss WTA Merkblatt 6-4: Ausgabe 05.2009/D soll der Wassergehalt des Baustoffs bei einer Gleichgewichtsfeuchte den Wert von 95 % r. F. nicht überschreiten. In der Simulation wurde der Temperatur- und Feuchteverlauf hinter der Innendämmung über das ganze Jahr ermittelt (Bild 2.5 A). Dieser stellt den kritischsten Punkt in Bezug auf die Temperatur und relative Feuchte auf der Warmseite des Kalksteins dar.



Bild 2.5 A Monitorposition zur Bestimmung der Temperatur und relativen Feuchte hinter der Innendämmung

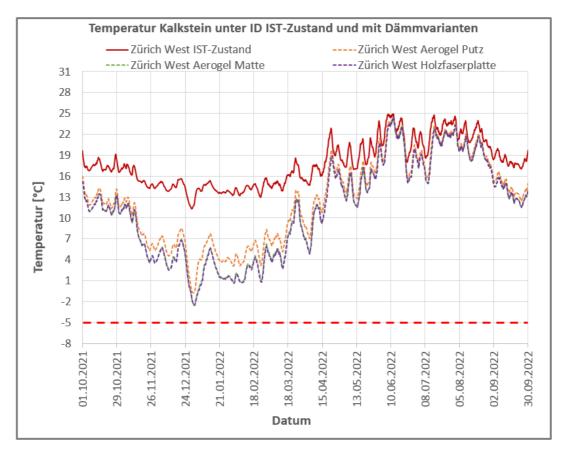


Bild 2.5 B Temperaturen auf der Innenseite des Kalksteins Zürich West vor und nach der Innendämmung

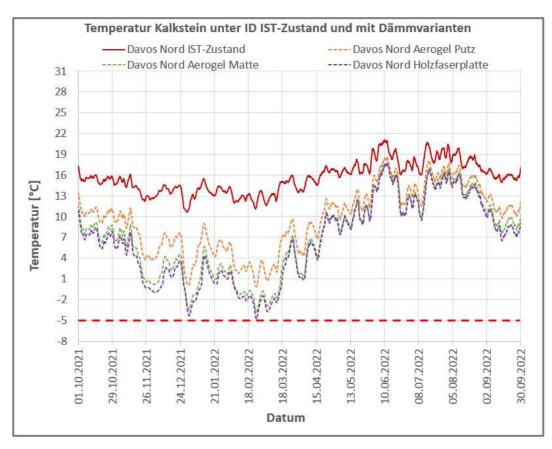


Bild 2.5 C Temperaturen auf der Innenseite des Kalksteins Davos Nord vor und nach der Innendämmung

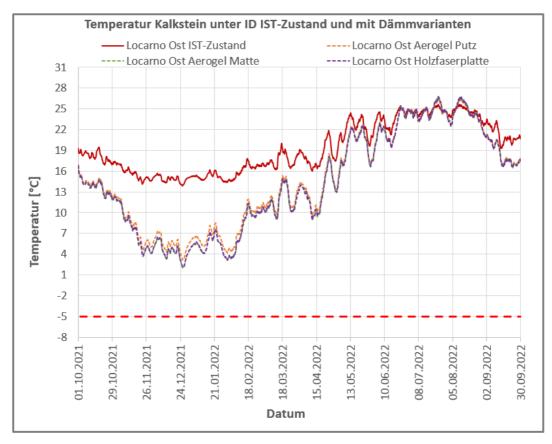


Bild 2.5 D Temperaturen auf der Innenseite des Kalksteins Locarno Ost vor und nach der Innendämmung

Die Temperaturen sind bei allen drei Standorten und Dämmvarianten zwar deutlich unterhalb des IST-Zustands, was für Innendämmung typischerweise zu erwarten ist, aber immer noch oberhalb der kritischen Temperatur von -5 °C. Für die Winterperiode von Zürich und besonders Davos ist die Situation kritischer als für Locarno. Es ist bei der Planung einer Innendämmung dementsprechend wichtig die Lokalität und die Orientierung zu berücksichtigen. Der Unterschied zwischen den einzelnen Dämmvarianten ist am grössten in Davos und Zürich. Der Aerogel Dämmputz zeigt die höchsten Temperaturen an dieser Stelle, weil er noch am meisten Wärme in das Mauerwerk lässt. Die höhere Wärmespeicherkapazität der Holzfaserdämmung und die sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit der Aerogel Matte führen zu niedrigeren Temperaturen bis 6 K Unterschied. Durch das insgesamt wärmere Aussenklima in Locarno fällt dieser Unterschied fast weg.

			_		, ,		
	Aerogel Dämmputz	Nord	<u>•</u>	Davos	Aerogel Dämmputz	Nord	
		Ost	<u>•</u>			Ost	
		Süd	<u>•</u>		Acroger barringutz	Süd	<u>•</u>
		West	<u></u>			West	\odot
		Nord	<u> </u>		Aerogel Matte	Nord	<u></u>
Zürich	Aerogel Matte	Ost	<u>•</u>			Ost	<u>•</u>
Zuricii	Aeroger Watte	Süd	\odot			Süd	<u> </u>
		West	<u> </u>			West	<u> </u>
		Nord	<u> </u>			Nord	
	Holzfaserdämmung	Ost	<u> </u>		Holzfaserdämmung	Ost	<u></u>
	noiziaseruammung	Süd	\odot		noiziaseruammung	Süd	\odot
		West				West	\odot
		Nord	\odot				
	Aerogel Dämmputz	Ost	<u></u>	Begrenzung der relativen Feuchte hinter der			
	Aeroger Danninputz	Süd	<u>•</u>	Innendämmung für alle drei Standorte und alle			
		West	=	Ausrichtungen.			
	o Aerogel Matte	Nord	\odot				
Locarno		Ost		Rot bedeutet: eine relative Luftfeuchte von über 95%			
Locarno		Süd	•	über das ganze Jahr. Das bedeutet, dass die Wasser-			
		West	<u> </u>	aufnahme über die Fassade mit geeigneten Massnahmen			
	Holzfaserdämmung	Nord	\odot	begrenzt werden muss.			
		Ost	<u></u>				
		Süd	<u>•</u>	Grün bedeutet: eine relative Luftfeuchte von unter 95%			unter 95%
		West	<u></u>	über das ganze Jahr und somit unkritisch.			

Tabelle 2.5 A Bewertung der relativen Feuchte hinter der Innendämmung für sämtliche Parameter

2.5.1 Zusatzvarianten mit Feuchtespeicherputz hinter der Innendämmung

Um den Einfluss eines Feuchtespeicherputzes hinter der Innendämmung auf die gesamte Feuchteverteilung zu quantifizieren, wurden folgende Simulationen durchgeführt. Hierbei wird die Auswertung auf der Kalksteinoberfläche unmittelbar unter dem Feuchtespeicherputz betrachtet.

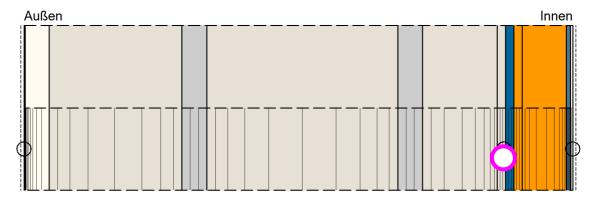


Bild 2.5.1 A Monitorposition zur Bestimmung der relativen Feuchte hinter der Innendämmung mit Feuchtespeicherputz

Durch das Anbringen des Feuchtespeicherputzes von 1 cm dicke ändern sich die Temperaturen hinter der Innendämmung praktisch nicht. Weil die Wärmeleitfähigkeit des Feuchtespeicherputzes bei ca. 0.6 W/(m K) liegt. Wohl aber ändert sich die Feuchteverteilung hinter dem Dämmstoff welche deshalb im Folgenden näher betrachtet wird.

Wie auf den Bildern 2.5.1 B zu sehen ist, bringt ein Feuchtespeicherputz unter der Innendämmung auf der Wetterseite mit Schlagregen (Ost und West) keine Vorteile. Hingegen wird es bei einer Nordorientierung im Winter etwas trockener und aber im Sommer etwas feuchter. Im Winter diffundiert die Feuchte von der Innenseite nach aussen und bleibt im Feuchtespeicherputz, dadurch ist der Kalkstein an dieser Stelle trockener, als wenn kein Feuchtespeicherputz da wäre. Im Sommer wo die Feuchte von aussen kommt, wird der Kalkstein hingegen aufgefeuchtet und die zusätzlich eingespeicherte Feuchte aus dem Feuchtespeicherputz führt zu einem leicht höheren Wert.

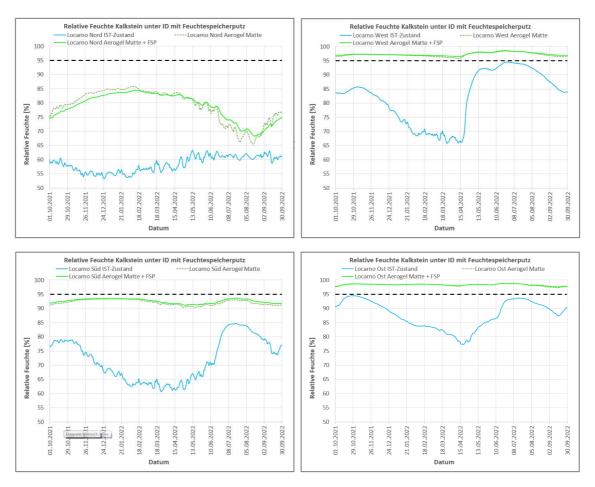
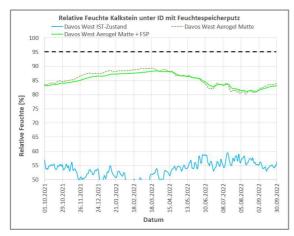


Bild 2.5.1 B Relative Feuchte auf der Innenseite des Kalksteins Locarno N, W, O, S mit und ohne Feuchtespeicherputz und Aerogel Matte

Für die anderen beiden Dämm-Materialien sind die oben dargestellten Effekte noch geringer, da sie selbst über Feuchtespeichereigenschaften verfügen. Für die anderen Standorte ändert sich das Bild. Die Seite mit am wenigsten Schlagregen zeigt jeweils den grössten Effekt in Bezug auf den Feuchtespeicherputz (wie z.B. Locarno Nord im Bild 2.5.1 B). Die entsprechenden Orientierungen für Zürich und Davos sind in Bild 2.5.1 C abgebildet.



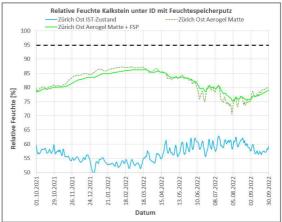


Bild 2.5.1 C Relative Feuchte auf der Innenseite des Kalksteins Davos West und Zürich Ost mit und ohne Feuchtespeicherputz und Aerogel Matte

Die obigen Simulationen zeigten, dass der grundsätzliche Einsatz eines Feuchtespeicherputzes hinter der Innendämmung für die untersuchte Wandkonstruktion nicht sinnvoll ist. Im Winter konnte ein geringer Effekt (etwas trockener) für die nicht Schlagregen belasteten Seiten festgestellt werden. Für die anderen Orientierungen ändert sich durch den Einsatz eines Feuchtespeicherputzes praktisch nichts.

2.6 Wassergehalte mit und ohne Innendämmungen

Der Gesamtwassergehalt ist eine massgebliche Grösse zur Beurteilung von Feuchteansammlungen in Baudetails. Da das Anbringen einer Innendämmung den äusseren Teil der Wand in einen tieferen Temperaturbereich verschiebt, steigt dadurch automatisch deren Feuchtegehalt und somit auch der Gesamtwassergehalt der Konstruktion.

Ein kritischer Punkt bei der Innendämmung selbst ist der Wassergehalt des ersten Zentimeters unmittelbar auf der Innenoberfläche der alten Wand. Da dieser im Winter die kälteste Stelle der Innendämmung darstellt.

2.6.1 Gesamtwassergehalt der Wandkonstruktion

Der Vergleich der Gesamtwassergehalte in kg/m² zeigt für die Hauptwetterseiten wie erwartet eine Zunahme für alle Dämmvarianten. Diese ist im Falle von Davos am ausgeprägtesten, da die Schlagregensumme am höchsten ist (Bild 2.1 F). Gleichzeitig ist die Jahresmitteltemperatur am geringsten. Das heisst, dass bei der Planung von Innendämm Massnahmen bei Davoser Klima besondere Vorsicht geboten ist.

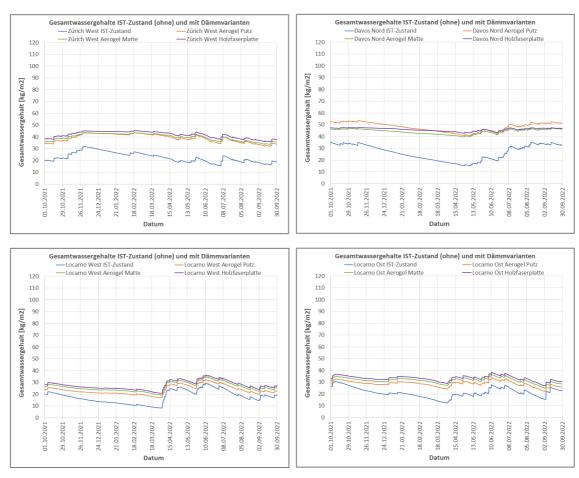


Bild 2.6.1 A Gesamtwassergehalte der Wandkonstruktion mit und ohne Innendämmung an den Hauptwetterseiten (Zürich West, Davos Nord, Locarno Ost und Locarno West, im Uhrzeigersinn)

2.6.2 Wassergehalt im ersten Zentimeter der Innendämmung

Der erste Zentimeter der Innendämmung in Richtung ehemaliger Innenoberfläche ist der Bereich der Innendämmung mit dem höchsten Feuchtegehalt und ist deswegen am kritischsten.

Im Folgenden wird der Feuchtegehalt in kg/m³ für alle Dämmvarianten, Orientierungen und die drei Standorte Zürich, Davos und Locarno gezeigt.



Bild 2.6.2 A Beispiel des kritischen Bereichs (erster Zentimeter der Innendämmung) markiert durch einen grünen Pfeil

Für den Standort Zürich ergeben sich für alle Seiten/Orientierungen ausser für die Wetterseite (Diagramm grau hinterlegt) ein fast identisches Bild. Die beiden Aerogel Dämmungen (Putz und Matte) weisen über das ganze Jahr einen Wert von ca. 10 kg/m³ auf, während die Holzfaserplatte auch einen konstanten aber höheren Wert von ca. 25 – 35 kg/m³ aufweist. Die Feuchte kommt hier nicht vom Schlagregen, sondern ist vor allem auf den Diffusionsstrom von innen nach aussen zurückzuführen. Bei der Holzfaserplatte wird die Feuchte gleichmässig verteilt, bei den anderen beiden Aerogel Dämmungen bleibt die Feuchte hauptsächlich in der dem Raum zugewandten Schichten "hängen".

Für die Hauptwetterseite (grau hinterlegtes Diagramm) im Bild 2.6.2 B liegt der Wassergehalt für alle drei höher. Bei der Aerogel Matte ist dies nur während der Winterperiode sichtbar, da es sich um ein stark hydrophobes Material handelt. Der auftretende Kapillarstrom im Winter nach innen, sorgt aber trotzdem für eine gewisse Auffeuchtung.

Bei der Holzfaserplatte ist der Wassergehalt höher als bei der Aerogel Matte und die Zunahme im Winter abgeflachter. Dies ist auf die höhere Feuchtespeicherkapazität und die grössere Dicke (10 cm) der Holzfaserplatte zurückzuführen.

Der kapillaraktive Aerogel Dämmputz weist an der Hauptwetterseite den höchsten Wassergehalt auf, weil der auftretende Kapillarstrom nach innen zu einer Auffeuchtung führt und die Feuchte sich auf nur 6 cm dicke verteilen muss bei gleichzeitig niedrigerer Feuchtespeicherkapazität.

Dies zeigt die Wichtigkeit der Begrenzung der Wasseraufnahme durch Schlagregen auf der Hauptwetterseite durch geeignete Massnahmen (Anstrich, Bekleidung, etc.).

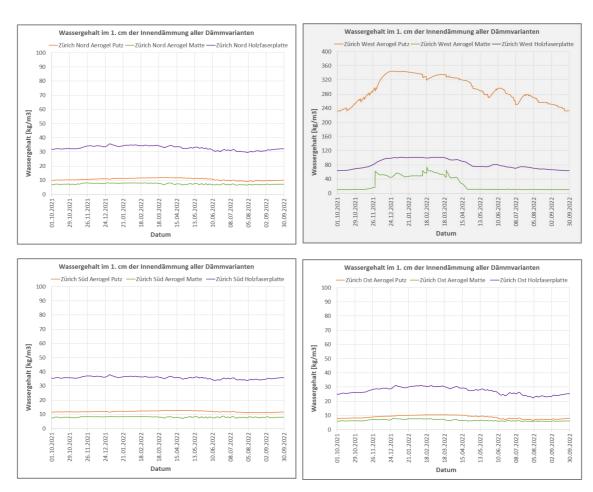


Bild 2.6.2 B Wassergehalte im kritischen Zentimeter der Innendämmung für Zürich Nord, West, Ost und Süd (im Uhrzeigersinn)

Für Davos sind die Orientierungen Nord (Hauptwetterseite) und Ost (auch beregnet) die mit den höchsten Feuchtegehalten im ersten Zentimeter des Dämmstoffs (Bild 2.6.2 C, grau hinterlegt). Die beiden anderen Orientierungen sind unproblematisch und verhalten sich fast identisch zu denen aus Zürich. Die Gründe für die höheren Feuchtegehalte, je nach Orientierung wurden bereits oben erwähnt.

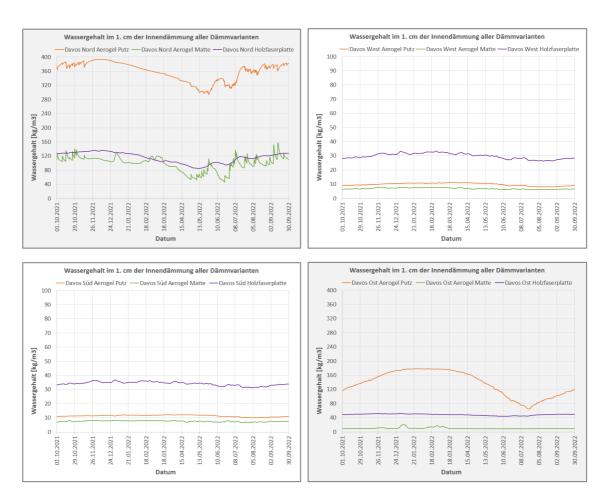


Bild 2.6.2 C Wassergehalte im kritischen Zentimeter der Innendämmung für Davos Nord, West, Ost und Süd (im Uhrzeigersinn)

Die Berechnungen für Locarno zeigen für die Orientierung West und Ost (grau hinterlegte Diagramme) die höchsten Feuchtegehalte im ersten Zentimeter der Dämmungen. Für die Seiten ohne Schlagregen zeigen ebenfalls die Aerogel Dämmungen die geringsten Feuchtegehalte. Die Gründe hierfür wurden bereits oben erläutert.

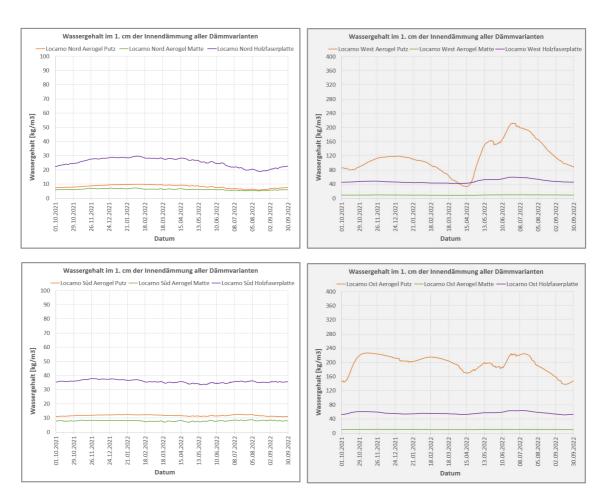


Bild 2.6.2 D Wassergehalte im kritischen Zentimeter der Innendämmung für Locarno Nord, West, Ost und Süd (im Uhrzeigersinn)

2.7 Begrenzung der Wasseraufnahme von aussen

Die bisherigen Untersuchungen haben bestätigt, wie wichtig eine Begrenzung der Wasseraufnahme von aussen an den Hauptwetterseiten ist. Für die Schweiz ist dabei die Berücksichtigung der Standorte unablässlich, da diese stark variieren. Eine Konstruktion, die in Zürich problemlos funktioniert, kann in Davos oder Locarno zu Schäden führen. Häufig sind kleine Änderungen in der Konstruktion notwendig (z.B. Dämmstärke, Dampfdurchlässigkeit, Wärmeleitfähigkeit), um diese vorzubeugen. Hygrothermische Simulationen sind bei Innendämmungen daher ein absolutes Muss, da man mit stationären Verfahren (z.B. Glaser) nicht zum Ziel kommt.

Bei der Überlegung zu einer Innendämmung ist daher zu empfehlen, entweder die Hauptwetterseite durch eine Verkleidung zu schützen, oder wasserabweisende aber dampfdurchlässige Putze bzw. Anstriche einzusetzen. Das Diagramm in Bild 2.7 A zeigt daher wie die Eigenschaften sein sollten. Es wird empfohlen, den s_d -Wert (diffusionsäquivalente Luftschichtdicke) auf maximal 1.0 m und den w-Wert auf 0.2 kg/(m² \sqrt{h}) zu begrenzen. Das Produkt aus beiden Werten soll dabei nicht höher als 0.1 kg/(m \sqrt{h} betragen.

Beispiel:

Somit optimal als Möglichkeit zur Begrenzung der Wasseraufnahme beim Einsatz einer Innendämmung geeignet.

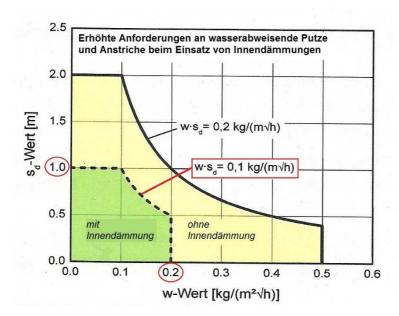


Bild 2.7 A Erhöhte Anforderungen an wasserabweisende Putze und Anstriche beim Einsatz von Innendämmungen (entnommen und angepasst aus: Buch Aussenputze früher und heute von Helmut Künzel, 2015)

3 Arbeitspaket 2: Hygrothermische Gebäudesimulation des historischen Hauses in Rünenberg mit WUFI Plus

Mit der Software WUFI Plus können neben den hygrothermischen Gegebenheiten im Bauteil auch das Raumklima simuliert werden. Somit können auch Fragen zum Komfort und Energiebedarf beantwortet werden. Ausserdem sind damit unter Berücksichtigung des Aussenklimas und der Nutzung, Antworten zur situationsabhängigen Quantifizierung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Bauteil und im Gebäude möglich. Die Simulation der Interaktion von Gebäude, Nutzer/Nutzung und Anlagentechnik erlaubt die integrale Beurteilung von Raumklima, hygienischen Bedingungen, thermischem Komfort, der Raumluftqualität sowie der Schadensfreiheit aller Bauteile in Abhängigkeit der dafür notwendigen Heiz- und Kühlenergie sowie des Be- und Entfeuchtungsaufwands [2].

3.1 Das Modell für WUFI Plus

Um eine möglichst realitätsnahe Aussage über die Gebäudesimulation eines historischen Hauses machen zu können, wurde das Haus in Rünenberg (Kapitel 1.1) gewählt. In Bild 3.1 A sind die Pläne der Gebäudeansichten dargestellt.

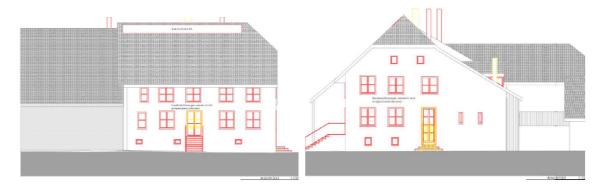


Bild 3.1 A Südostansicht (links) und Nordostansicht (rechts) des historischen Hauses Rünenberg

Die entsprechenden Grundrisse des Gebäudes sind im Bild 3.1 B zusammengefasst. Die roten Teile stellen Änderungen dar, die im Altzustand nicht vorhanden waren und die auch im Modell nicht berücksichtigt wurden.



Bild 3.1 B Grundrisse im Uhrzeigersinn (UG, EG, OG 1 und OG 2) ohne Scheune

Basierend auf den Ansichten und Grundrissen wurde ein vereinfachtes Modell für die Simulation erstellt. Dabei wurde das im Original vorhandene Krüppelwalmdach als Zeltdach modelliert. Dies hat aber auf die Berechnungen keinen merkbaren Einfluss, da es als eine Nachbarzone in Bezug auf die Hauptzone berücksichtigt wird. Des Weiteren ist auch die Scheune im Simulationsmodell unberücksichtigt (Bild 3.1 C, rechte Seite, Wand ohne Fenster). Eine weitere Vereinfachung betrifft das UG. Der Kellerraum wurde hierbei auf die ganze Fläche erweitert.

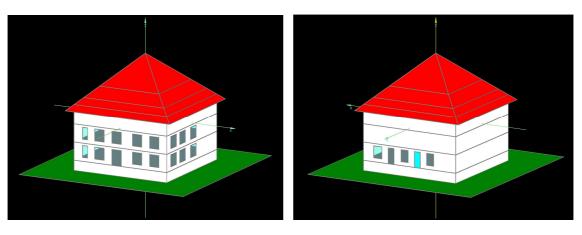


Bild 3.1 C Angepasstes WUFI Plus Modell des Hauses in verschiedenen Ansichten

3.2 Randbedingungen

Die von WUFI Plus simulierte Zone ist in Bild 3.2 A farblich hervorgehoben. Die Kellerzone sowie auch der Dachraum sind als unbeheizte Nachbarzonen berücksichtigt, die aber nicht in die Energiebilanz eingebunden sind. An den restlichen Oberflächen der

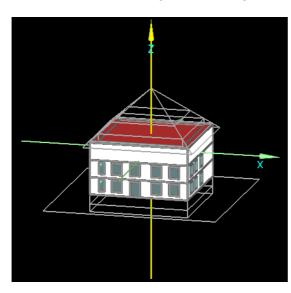


Bild 3.2 A Simulierte Zone des Hauses Rünenberg

simulierten Zone wird das jeweilige Aussenklima angelegt (Zürich, Davos, Locarno). Für die HLK sind eine kontinuierlich verfügbare Leistung von 60 kW für das Heizen und 50 kW für das Kühlen definiert. Die Belegung und die internen Lasten wurden für zwei vierköpfige Familien angenommen. Der tägliche Verlauf über 24 Stunden ist Bild 3.2 B zu entnehmen. Oben links ist der konvektive und oben rechts der strahlungsbedingte Wärmegewinn zu sehen. Die Feuchte- und CO₂ Belastung ist unten links bzw. unten rechts dargestellt.

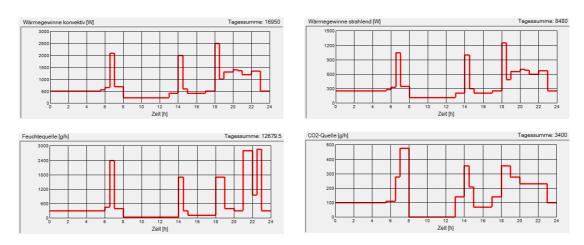


Bild 3.2 B Profile der internen Belastungen (entspricht 2 Familien zu je 4 Personen)

Als Auslegungsbedingungen wurden T_{min} = 20 °C, T_{max} = 27 °C, r.F._{min} = 40 % und r.F._{max} = 70 % gewählt.

Bei den Wärmebrücken wurde der Anschluss Bodenplatte mit einem Psi-Wert von 0.06 W/(m K) über einen Umfang von 52 m berücksichtigt. Für den Dachrandabschluss wurde ein Psi-Wert von 0.05 W/(m K) bei einem Umfang von 52 m angenommen. Die Gebäudeecken wurden mit einem Psi-Wert von 0.02 W/(m K) und einer Länge von 24 m berücksichtigt.

Eine weitere Randbedingung betrifft die Temperaturen und rel. Feuchten auf der Oberfläche des Kellerbodens. Dieser wurde als Sinusfunktion für die Temperatur mit einem Mittelwert von 14 °C für Zürich, 10 °C für Davos und 16 °C für Locarno und einer konstanten relativen Feuchte von 70 % angenommen.

Für die Lüftung wurde das Profil in Bild 3.2 C über den Tagesverlauf für alle Wochentage gleich angenommen. Im Tagesmittel bedeutet das einen Luftwechsel von 0.26 1/h

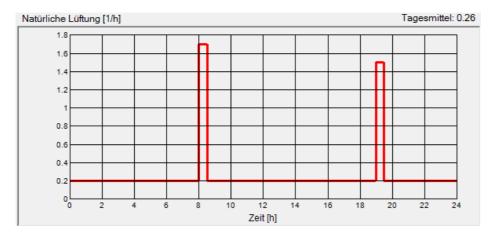
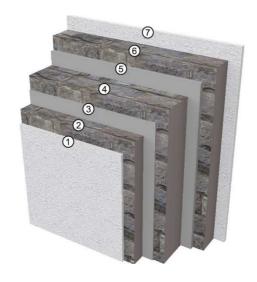


Bild 3.2 C Tagesverlauf der natürlichen Lüftung

Sämtliche Fenster wurden mit einem U-Wert von 2.7 W/(m² K) angenommen. Dies entspricht einer unbeschichteten Doppelverglasung. Ein Sonnenschutz wurde nicht berücksichtigt.

3.3 Bruchsteinmauerwerk 60 cm

Als ungedämmter IST-Zustand wurde für die ganze Fassade ein Bruchsteinmauerwerk von 60 cm dicke entsprechend Kapitel 2.1 gewählt (Bild 3.3 A).



1 und 7: Kalkputz

2, 4 und 6: Kalkstein

3 und 5: Mauermörtel

Bild 3.3 A Wandaufbau des 60 cm Bruchsteinmauerwerks für die Simulation ohne Dämmschichten

In folgender Tabelle werden die minimalen und maximalen Werte der Oberflächentemperatur und den entsprechenden relativen Oberflächenfeuchten für die drei Standorte zusammengefasst.

			T_{min}	T _{max}	r.F. _{min}	r.F. _{max}
IST – Zustand ungedämmt	Zürich	Nord	6.3	24.1	20.6	77.6
		Süd	6.3	24.2	20.6	77.6
	Davos	Nord	3.4	20.4	16.7	70.1
		Süd	3.4	20.4	16.7	70.1
	Locarno	Nord	9.0	26.5	23.8	83.3
		Süd	9.0	26.4	23.9	83.1

Tabelle 3.3 A IST-Zustand ungedämmt minimale und maximale Temp. und rel. Feuchten

3.3.1 Aussendämmung mit Aerogel Matte

Als eine erste Variante wurde eine Aerogel Matte als Aussendämmung betrachtet. Die minimalen und maximalen Temperaturen und relativen Oberflächenfeuchten zeigt Tabelle 3.3.1 A für die drei Standorte mit je zwei Ausrichtungen (Nord und Süd).

			T_{min}	T _{max}	r.F. _{min}	r.F. _{max}
Aussendämmung mit Aerogelmatte	Zürich	Nord	9.2	24.7	21.1	75.2
		Süd	9.2	24.9	21.1	75.1
	Davos	Nord	6.5	21.4	17.2	67.1
		Süd	6.5	21.5	17.0	67.0
	Locarno	Nord	11.1	27.0	23.6	81.6
		Süd	11.1	27.0	23.6	81.3

Tabelle 3.3.1 A Aussengedämmt mit Aerogelmatte minimale und maximale Temp. und rel. Feuchten

3.3.2 Innendämmung mit Aerogel Matte

Als eine zweite Variante wurde eine Aerogel Matte als Innendämmung betrachtet. Die minimalen und maximalen Temperaturen und relativen Oberflächenfeuchten zeigt Tabelle 3.3.2 A für die drei Standorte mit je zwei Ausrichtungen (Nord und Süd).

			T_{min}	T _{max}	r.F. _{min}	r.F. _{max}
Innendämmung mit Aerogelmatte	Zürich	Nord	8.7	26.3	20	75.6
		Süd	8.7	26.7	20	75.5
	Davos	Nord	6.0	22.2	16.1	67.3
		Süd	6.0	22.1	16.1	67.2
	Locarno	Nord	10.8	27.0	23.1	81.8
		Süd	10.8	27.0	23.3	81.6

Tabelle 3.3.2 A Innengedämmt mit Aerogelmatte minimale und maximale Temp. und rel. Feuchten

Die minimalen Temperaturen befinden sich auf der Glasoberfläche. Diese wurden in der Simulation nicht energetisch optimiert (alte Zweifachverglasung), um den reinen Einfluss der Dämmvarianten auf die Auswertungen nicht zu beeinträchtigen.

3.4 Bruchsteinmauerwerk 80 cm

Als ungedämmter IST-Zustand wurde für die ganze Fassade ein Bruchsteinmauerwerk von 80 cm dicke gewählt (Bild 3.4 A).



1 und 7: Kalkputz

2, 4 und 6: Kalkstein

3 und 5: Mauermörtel

Bild 3.4 A Wandaufbau des 80 cm Bruchsteinmauerwerks für die Simulation ohne Dämmschichten

In folgender Tabelle werden die minimalen und maximalen Werte der Oberflächentemperatur und den entsprechenden relativen Oberflächenfeuchten für die drei Standorte zusammengefasst.

			T _{min}	T _{max}	r.F. _{min}	r.F. _{max}
IST – Zustand ungedämmt	Zürich	Nord	7.1	24.0	20.8	77.3
		Süd	7.1	24.1	20.8	77.3
	Davos	Nord	4.3	20.5	16.9	69.5
		Süd	4.3	20.3	16.7	69.5
	Locarno	Nord	9.5	26.6	23.8	83.1
		Süd	9.5	26.5	23.9	83.0

Tabelle 3.4 A IST-Zustand ungedämmt minimale und maximale Temp. und rel. Feuchten

3.4.1 Aussendämmung mit Aerogel Matte

Als eine weitere Variante wurde eine Aerogel Matte als Aussendämmung betrachtet. Die minimalen und maximalen Temperaturen und relativen Oberflächenfeuchten zeigt Tabelle 3.4.1 A für die drei Standorte mit je zwei Ausrichtungen (Nord und Süd).

			T_{min}	T _{max}	r.F. _{min}	r.F. _{max}
Aussendämmung mit Aerogelmatte	Zürich	Nord	9.4	24.4	21.1	75.2
		Süd	9.4	24.5	21.1	75.0
	Davos	Nord	6.7	21.4	17.2	66.9
		Süd	6.8	21.5	17.2	66.9
	Locarno	Nord	11.1	27.0	23.4	81.4
		Süd	11.2	27.0	23.6	81.3

Tabelle 3.4.1 A Aussengedämmt mit Aerogelmatte minimale und maximale Temp. und rel. Feuchten

3.4.2 Innendämmung mit Aerogel Matte

Als eine letzte Variante wurde eine Aerogel Matte als Innendämmung betrachtet. Die minimalen und maximalen Temperaturen und relativen Oberflächenfeuchten zeigt Tabelle 3.4.2 A für die drei Standorte mit je zwei Ausrichtungen (Nord und Süd).

			T_{min}	T _{max}	r.F. _{min}	r.F. _{max}
Innendämmung mit Aerogelmatte	Zürich	Nord	8.9	26.2	20.8	75.5
		Süd	8.9	26.5	20.6	75.2
	Davos	Nord	6.3	22.2	16.7	67.2
		Süd	6.3	22.1	16.7	67.0
	Locarno	Nord	10.9	27.0	23.3	81.6
		Süd	10.9	27.0	23.4	81.3

Tabelle 3.4.2 A Innengedämmt mit Aerogelmatte minimale und maximale Temp. und rel. Feuchten

Auch hier befinden sich die minimalen Temperaturen auf der Glasoberfläche. Diese wurden in der Simulation nicht energetisch optimiert (alte Zweifachverglasung), um den reinen Einfluss der Dämmvarianten auf die Auswertungen nicht zu beeinträchtigen.

3.4.3 Berechnete Summe der Heizenergie im Vergleich in kWh

Die Rechnungen zeigen einen deutlichen Unterschied des Heizenergieverbrauchs je nach Klimastandort. Im ungedämmten Zustand kommt der Wanddicke eine messbare Rolle zu. Die wiederum je nach Klimastandort mehr oder weniger deutlich ausfällt. Erwartungsgemäss ist dieser Unterschied bei kälterem Aussenklima grösser als bei wärmerem. Durch die Dämmung – unabhängig ob innen oder aussen – verschwindet der Einfluss der Wanddicke. Der Heizenergieverbrauch vermindert sich durch eine Dämmung auf rund 47 % bei einem Zielwert von 0.35 W/(m² K) des U-Wertes. Bei der Simulation wurden konstruktive Wärmebrücken mit Ausnahme der Fenster berücksichtigt.

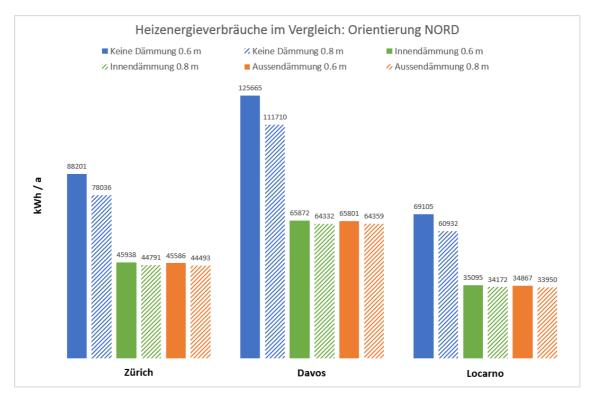


Bild 3.4.3 A Heizenergieverbräuche für die drei Standorte Ausrichtung NORD

Für die Südorientierung ist erwartungsgemäss der Heizenergieverbrauch etwas geringer. Dieser wird auch hier durch die Innendämmung um rund 48 % reduziert. Wenn man ein Gebäude rechnen würde mit Fenstern nur auf der Nord- oder Südseite, wäre der Einfluss auf den Heizenergieverbrauch etwas grösser. Beim betrachteten Beispiel (Beschrieb Kapitel 3.1) ist ein Einfluss zwar da, aber nur gering ausgeprägt.

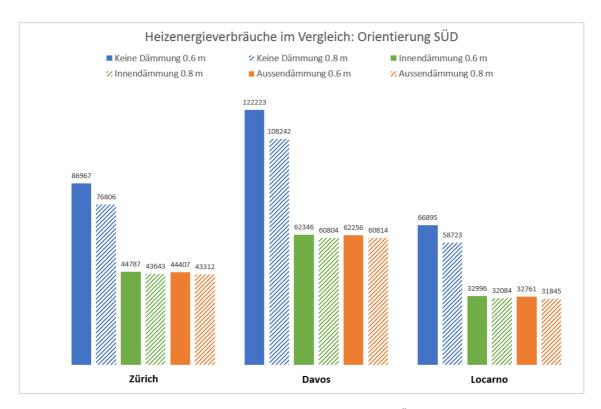


Bild 3.4.3 B Heizenergieverbräuche für die drei Standorte Ausrichtung SÜD

3.4.4 Komfortdiagramme Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte

Ein Komfortdiagramm beschreibt den als optimal behaglichen Bereich (hellgrün) und den noch akzeptablen Bereich (hellgelb) in Bezug auf Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft.

In Bild 3.4.4 A sind die beiden Komfortdiagramme für Zürich Nord und Süd ohne Dämmung dargestellt. Die in einer Linie dargestellten Datenpunkte stellen die minimal erlaubte Innenlufttemperatur dar, die durch die Heizungsanlage sichergestellt wird (definierte Randbedingung). Die Heizungsanlage sorgt dafür, dass keine zu kalten Temperaturen erreicht und die Datenpunkte nicht in den unkomfortablen Bereich fallen. Die Punktewolke ist erwartungsgemäss für Zürich Süd zu leicht höheren Temperaturen verschoben.

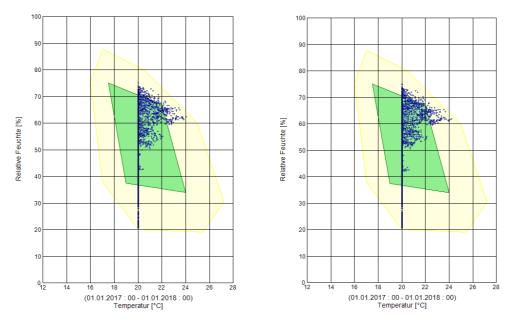


Bild 3.4.4 A Komfort-Diagramm (Temperatur-relative Feuchte) für Zürich Nord und Süd ohne Dämmung

Bei der Anbringung einer Innendämmung ändert sich die Punktewolke merklich (Bild 3.4.4 B). Die Datenpunkte im optimal komfortablen Bereich nehmen zu. Es ist aber auch eine deutliche Verschiebung zu höheren Temperaturen, speziell im noch akzeptablen Bereich erkennbar. Der Unterschied zwischen Nord und Süd ist geringfügig höher für Süd, bei leicht höheren Temperaturen.

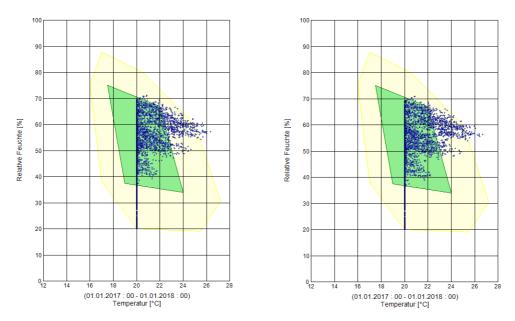


Bild 3.4.4 B Komfort-Diagramm (Temperatur-relative Feuchte) für Zürich Nord und Süd mit Innendämmung

Die Situation bei der Anbringung einer Aussendämmung (Bild 3.4.4 C) ist vom Komfort her betrachtet günstiger, da es die Datenpunkte mehrheitlich im Optimal Bereich konzentriert (weniger Datenpunkte im noch akzeptablen, hellgelben Bereich). Auch hier gibt es zwischen Nord und Süd einen kleinen Unterschied, hauptsächlich verursacht durch die höheren Temperaturen im Sommer (etwas wärmer und deshalb auch trockener).

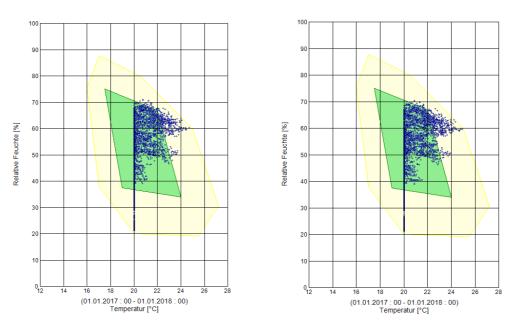


Bild 3.4.4 C Komfort-Diagramm (Temp. und relative Feuchte) für Zürich Nord und Süd mit Aussendämmung

In Davos ist bedingt durch das kältere Klima die Temperatur in einem ungedämmten Gebäude nur mittels einer Heizung auf 20 °C zu halten (Bild 3.4.4 D). Deshalb konzentrieren sich praktisch alle Datenpunkte auf diesen Bereich (blaue Linie). Im Winter würde sich ohne Heizung die Datenwolke auf den unkomfortablen Bereich der tiefen Temperaturen und trockenen Luftfeuchten verschieben.

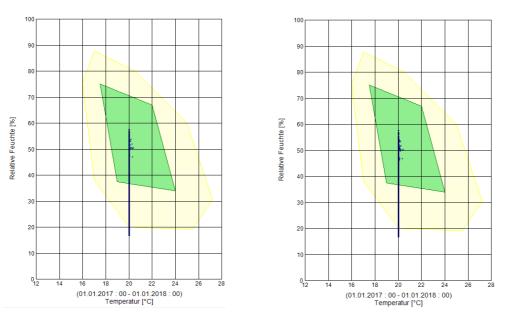


Bild 3.4.4 D Komfort-Diagramm für Davos (Temp. und r.F.) Nord und Süd ohne Dämmung

Durch die Innendämmung (Bild 3.4.4 E) verschieben sich einige Datenpunkte zu höheren Temperaturen in den optimal komfortablen Bereich. Jedoch ist auch hier ohne eine Heizung ein komfortabler Betrieb nicht möglich. Durch das trockene Aussenklima fallen die relativen Luftfeuchten im Winter zum Teil unter den noch akzeptablen Bereich.

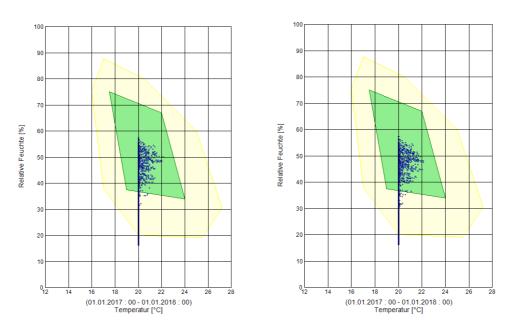


Bild 3.4.4 E Komfort-Diagramm (Temperatur-relative Feuchte) für Davos Nord und Süd mit Innendämmung

Die Aussendämmung sorgt zu einer Konzentration der Datenpunkte in einem engeren, optimalen Temperaturbereich (Bild 3.4.4 F). Allerdings ist auch hier ein komfortabler Betrieb ohne Heizung nicht möglich.

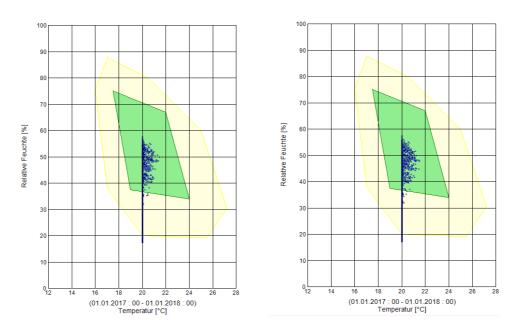


Bild 3.4.4 F Komfort-Diagramm (Temperatur-relative Feuchte) für Davos Nord und Süd mit Aussendämmung

Am Standort Locarno ist auf Grund der wärmeren und feuchteren Aussenluft die Datenwolke für das ungedämmte Gebäude zu einem grossen Teil in den unkomfortablen Bereich der hohen Temperaturen und Feuchten verschoben (Bild 3.4.4 G).

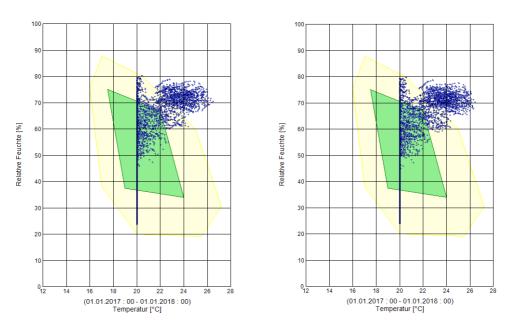


Bild 3.4.4 G Komfort-Diagramm (Temperatur-relative Feuchte) für Locarno Nord und Süd ohne Dämmung

Durch die Innendämmung verschiebt sich die Datenwolke etwas mehr in den optimalen und noch akzeptablen Komfortbereich (Bild 3.4.4 H). Trotz der Innendämmung gibt es immer noch Datenpunkte im unkomfortablen Bereich. Es reicht nicht, die gesetzte obere Grenze der Randbedingung (Kühlung) auf 27 °C zu begrenzen, ohne gleichzeitig die Raumluft zu entfeuchten.

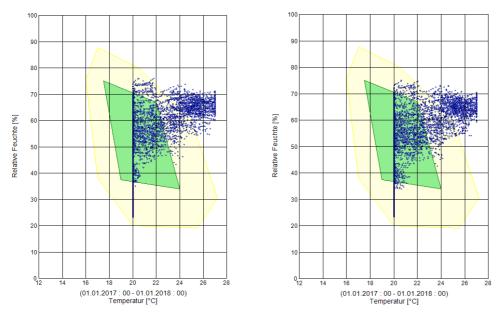
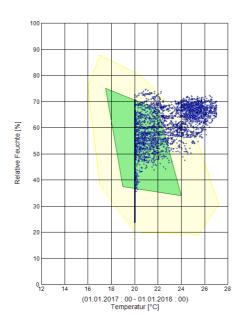


Bild 3.4.4 H Komfort-Diagramm (Temperatur-relative Feuchte) für Locarno Nord und Süd mit Innendämmung

Für den Fall der Aussendämmung am Standort Locarno (Bild 3.4.4 I) werden mehr Datenpunkte in den optimalen und noch akzeptablen Behaglichkeitsbereich verschoben. Ein Grund dafür ist, dass bei der Aussendämmung die innenliegende Wand bei der Feuchteaufnahme und -abgabe mitwirkt. Durch die Innendämmung mit der Aerogelmatte (sehr geringe Feuchteaufnahme) ist eine solche Mitwirkung der Wand praktisch ausgeschlossen.



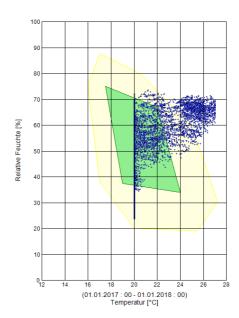


Bild 3.4.4 I Komfort-Diagramm (Temperatur-relative Feuchte) für Locarno Nord und Süd mit Aussendämmung

4 Arbeitspaket 3: Detail Holzbalken und Ecke Wand/Boden im Bruchsteinmauerwerk (2D)

Es wurde ein Bruchsteinmauerwerk wie in Bild 2.1 A (0.6 m dick) mit einem Eichenholzbalkenkopf, der 35 cm im Mauerwerk aufliegt mit einzeln modellierten Bruchsteinen als Modell für eine zweidimensionale Wärme- und Feuchteanalyse (WUFI 2D) verwendet. Als Innentemperatur wurde 20 °C und für die Aussenklimabedingungen wieder die drei Standorte Zürich, Davos und Locarno gewählt. Die Berechnungen wurden für jeden Standort ohne Dämmung, mit Aerogel Dämmputz, mit Aerogel Matte und mit Holzfaserplatte als Innendämmung durchgeführt. Vor dem Holzbalkenkopf befindet sich ein 2 cm dicker Lufthohlraum über den ganzen Querschnitt des Holzbalkens. Als Boden- bzw. Deckenaufbau wurden Holzdielen auf Lehmschüttung bzw. Kalkputz verwendet. Als Innenputz und Aussenputz wurde ein Kalkputz genommen. Die Wasseraufnahme des Aussenputzes betrug für die Simulationen 0.5 kg/(m² √h).

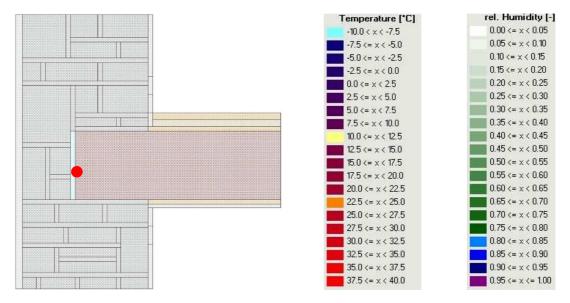


Bild 4 A: Betrachteter Punkt (rot) am Balkenkopf

Bild 4 B: Temperatur und rel. Feuchte Profil für die hygrothermischen Simulationen

4.1 Ungedämmter IST-Zustand

In diesem Kapitel ist die momentane Zeitaufnahme der relativen Feuchte- und der Temperaturverteilung im Wandquerschnitt am 31. Januar und am 31. Juli für die ungedämmte Wand dargestellt.

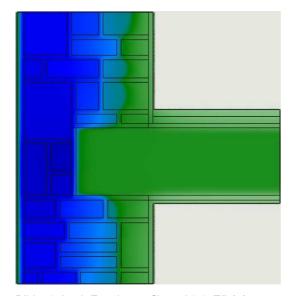


Bild 4.1 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

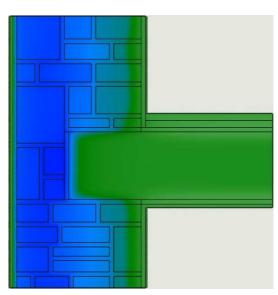


Bild 4.1 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

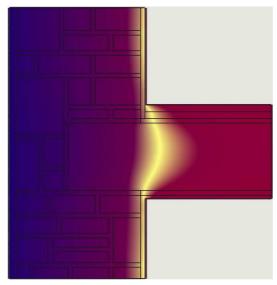


Bild 4.1 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

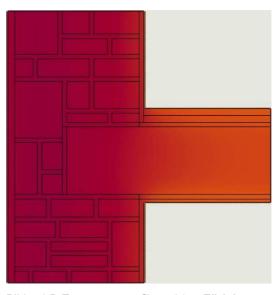
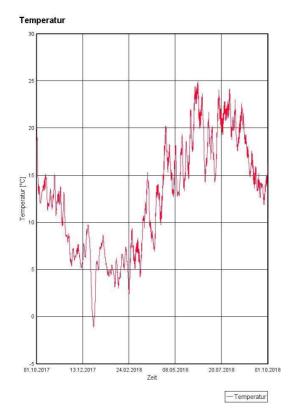


Bild 4.1 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Am Standort Zürich ist im Winter der Feuchtunterschied im Wandquerschnitt zwischen Innen und Aussen grösser als im Sommer (Bilder 4.1 A und 4.1 B). Die Raumwärme kommt in die ungedämmte Konstruktion und sorgt in den ersten Zentimetern für einen trockeneren Zustand (grün). Der Unterschied der Temperaturen ist viel stärker zwischen Winter und Sommer. Der taupunktbedingte, kritische Temperaturbereich zwischen 10 und 12,5 °C wurde gelblich hervorgehoben (Bild 4.1 C)



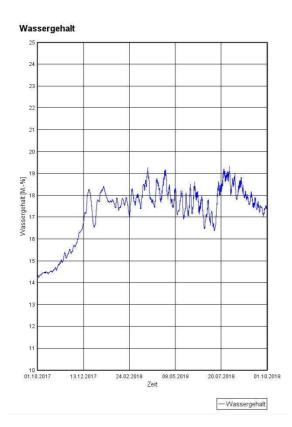
Relative Feuchte

100
95
90
885
70
605
01.10.2017 13.12.2017 24.02.2018 Zeit 08.05.2018 20.07.2018 01.10.2018

Relative Feuchte

Bild 4.1 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.1 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich



Die Bilder 4.1 E bis 4.1 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich. Die Temperatur schwankt zwischen 0 – 25 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang unter 85 %. Der Wassergehalt ist auf einem unkritischen Niveau unter 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind unkritisch.

Bild 4.1 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

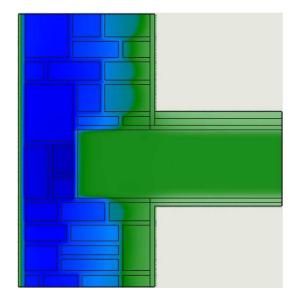


Bild 4.1 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

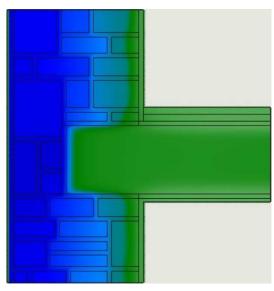


Bild 4.1 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

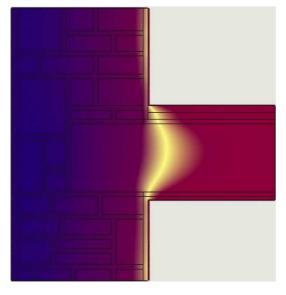


Bild 4.1 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

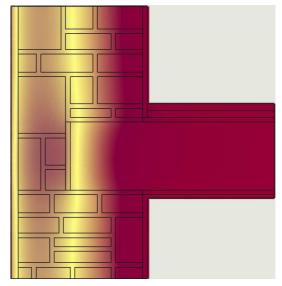


Bild 4.1 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Für den Standort Davos ist der Feuchtezustand selbst im Sommer etwas höher. Dies bedingt durch die Hauptwetterrichtung (Nord), tiefere Temperaturen und den höheren Niederschlag. Raumwärme kommt auch hier in die ungedämmte Konstruktion und sorgt in den ersten Zentimetern für einen trockeneren Zustand (grün). Selbst im Sommer bleibt die Wand relativ kühl, wie der taupunktbedingte kritische Bereich zeigt (gelblich).

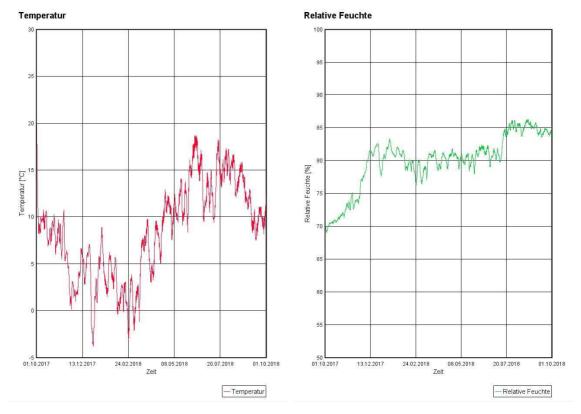


Bild 4.1 L Temperatur Balkenkopf **Davos**

Bild 4.1 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

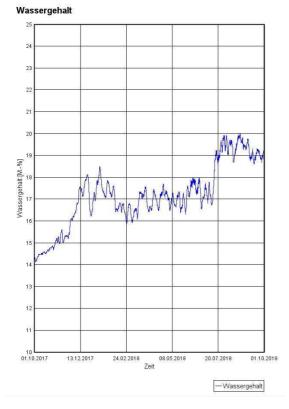


Bild 4.1 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.1 L bis 4.1 N zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Davos. Die Temperatur schwankt zwischen -4 bis 18 °C. Die relative Feuchte übersteigt nach einem Einschwingvorgang geringfügig die 85 % Marke. Der Wassergehalt ist knapp unterhalb des kritischen Niveaus von 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind gerade noch unkritisch.

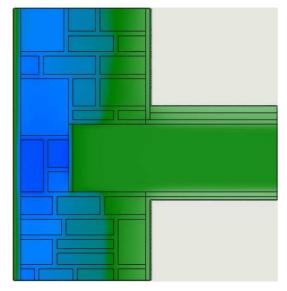


Bild 4.1 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

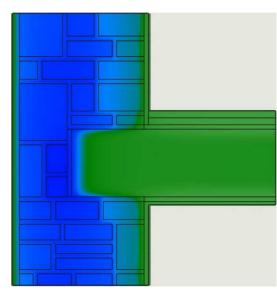


Bild 4.1 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

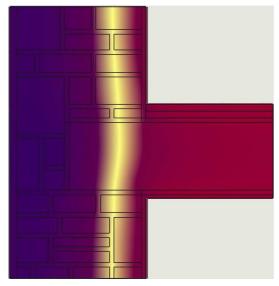


Bild 4.1 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

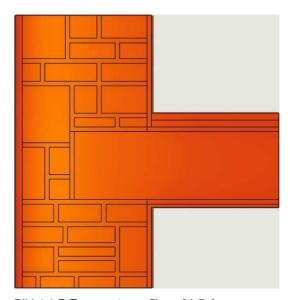


Bild 4.1 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

In Locarno macht sich das feuchtere Wetter im Sommer auch in der Wand bemerkbar. Die Feuchten im Mauerwerk sind höher als im Winter (dunkelblau). Raumwärme kommt zwar auch hier in die ungedämmte Konstruktion, sorgt aber im Sommer für einen weniger trockenen Zustand (grün) als in Zürich und Davos. Die Temperaturen sind insgesamt wärmer und die Wand heizt sich im Sommer auf Temperaturen von über 25 °C auf.

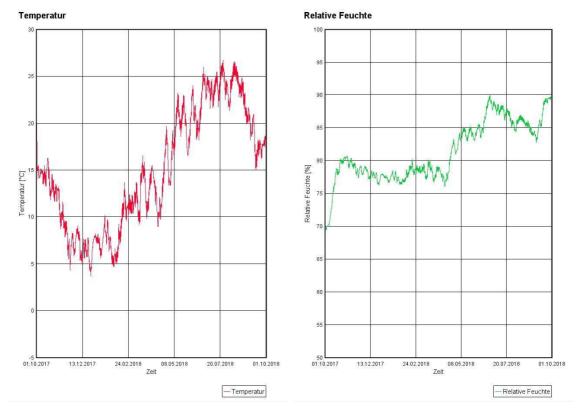


Bild 4.1 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.1 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

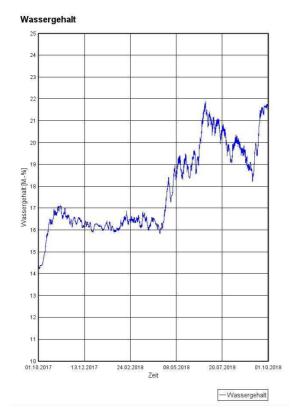


Bild 4.1 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.1 S bis 4.1 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno. Die Temperatur schwankt zwischen 4 bis 27 °C. Die relative Feuchte steigt nach einem Einschwingvorgang bis auf 90 %. Der Wassergehalt liegt während ca. 1/3 des Jahres über dem kritischen Niveau von 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind unter den angenommenen Randbedingungen bereits als kritisch zu bewerten.

4.2 Innendämmung mit Aerogel Dämmputz

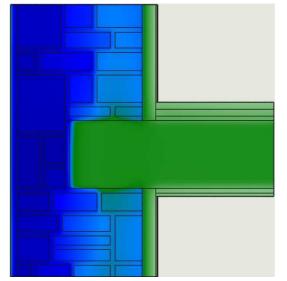


Bild 4.2 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

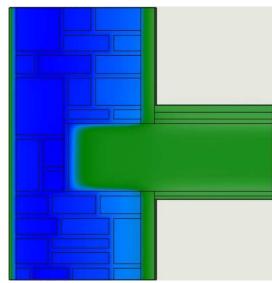


Bild 4.2 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

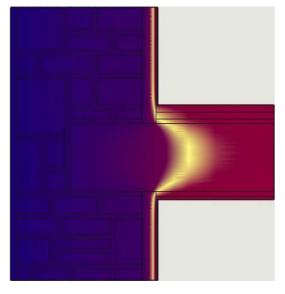


Bild 4.2 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

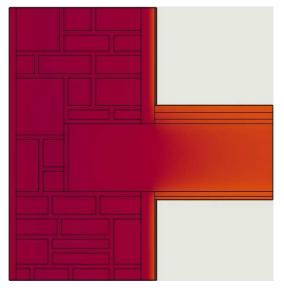


Bild 4.2 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Die Anbringung des Aerogel Dämmputzes sorgt wie erwartet für kältere und damit feuchtere Bedingungen hinter der Dämmschicht. Raumwärme kann weniger in die Konstruktion eindringen. Der kritische, taupunktbedingte Bereich verschiebt sich durch die Dämmung im Balken mehr in Richtung Innenraum. Auch im Sommer ist die Wand durch die Innendämmung vom Raumklima abgekoppelt und wird deshalb etwas wärmer, d.h. sie folgt mehr der Aussenluft.

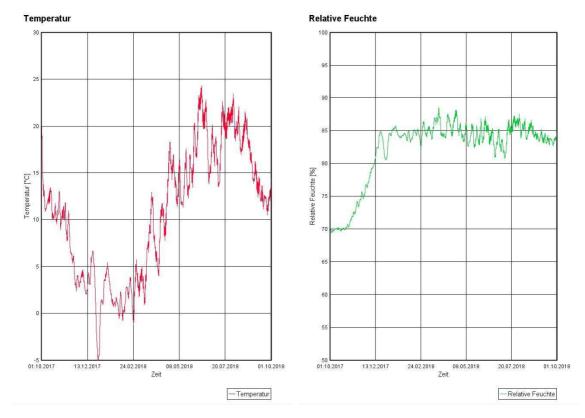
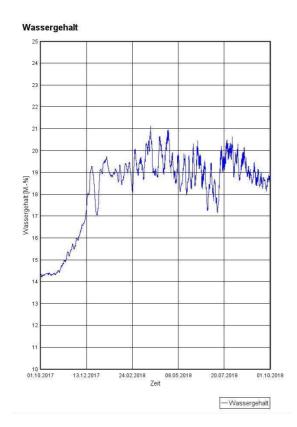


Bild 4.2 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.2 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich



Die Bilder 4.2 E bis 4.2 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Aerogel Dämmputz als Innendämmung.

Die Temperatur schwankt zwischen -5 bis 24 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang über 85 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich bei ca. 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch.

Bild 4.2 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

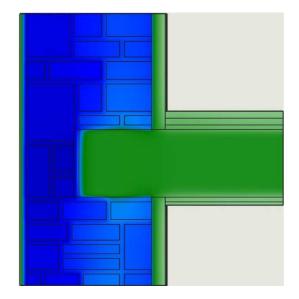


Bild 4.2 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

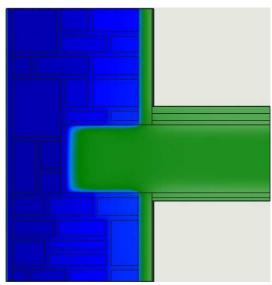


Bild 4.2 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

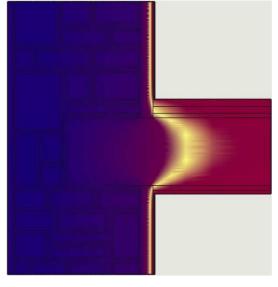


Bild 4.2 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

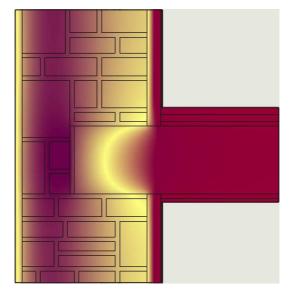


Bild 4.2 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Für Davos ergeben sich mit Aerogel Dämmputz höhere Feuchtigkeiten als im ungedämmten Zustand (siehe Bilder 4.1 H und I). Die taupunktbedingte kritische Temperatur (gelb) verschiebt sich Winter und im Sommer mehr in Richtung Innenraum (siehe zum Vergleich Bilder 4.1 J und K).

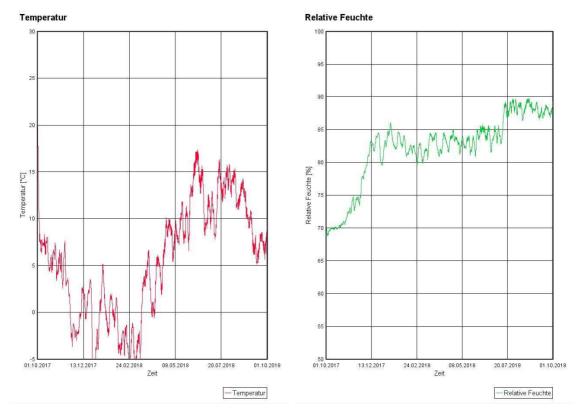


Bild 4.2 L Temperatur Balkenkopf Davos

Bild 4.2 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

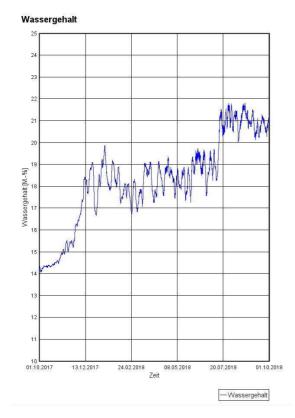


Bild 4.2 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.2 L bis 4.2 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Aerogel Dämmputz als Innendämmung. Die Temperatur schwankt zwischen -7,5 bis 17 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich zwischen 80 - 85 %. Bei rund ¼ der Zeit zwischen 85 – 90 % Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%. Für rund ¼ der Zeit aber oberhalb 20 M.-% Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch.

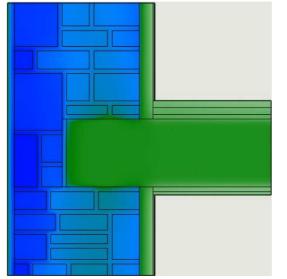


Bild 4.2 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

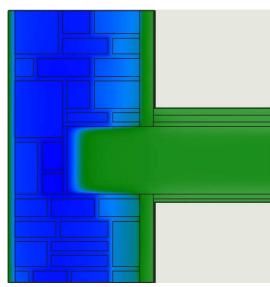


Bild 4.2 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

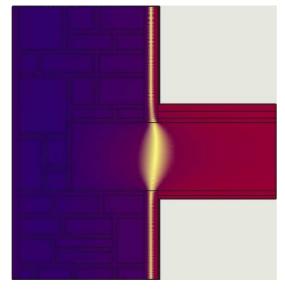


Bild 4.2 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

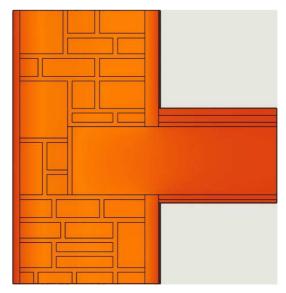


Bild 4.2 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

In Locarno ist die Wand mit Aerogel Dämmputz im Winter eher trockener. Jedoch im Sommer dafür etwas feuchter, aber auch wärmer. Der taupunktbedingte kritische Bereich verschiebt sich in Richtung Raum, allerdings nicht so stark wie in Zürich und Davos.

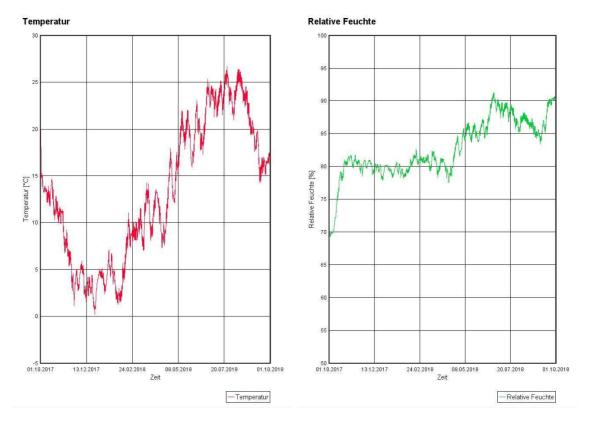


Bild 4.2 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.2 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

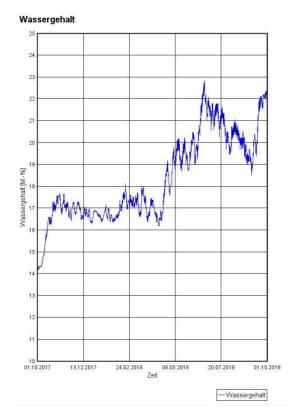


Bild 4.2 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.2 S bis 4.2 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Aerogel Dämmputz als Innendämmung. Die Temperatur schwankt zwischen 0 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst bei 80 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis über 90 %. Der Wassergehalt liegt ca. die Hälfte des Jahres über 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch.

4.2.1 Aerogel Dämmputz und Perlite Füllung im Balkenhohlraum

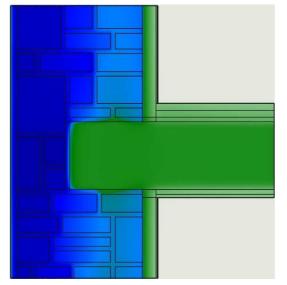


Bild 4.2.1 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

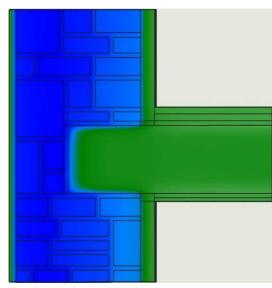


Bild 4.2.1 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

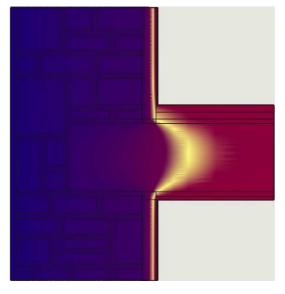


Bild 4.2.1 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

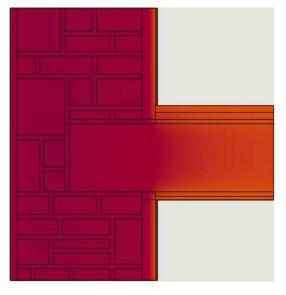


Bild 4.2.1 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Der Balkenhohlraum wurde nun mit Perlite verfüllt, um die Holzoberfläche zu dämmen. Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich nur ein geringer Unterschied (Vergleich mit den Bildern 4.2 A - D).

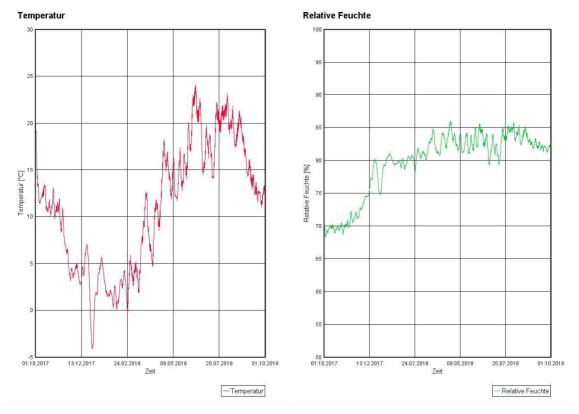


Bild 4.2.1 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.2.1 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

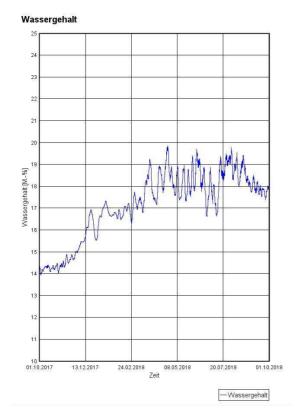


Bild 4.2.1 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.2.1 E bis 4.2.1 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Aerogel Dämmputz und Perlite Füllung.

Die Temperatur schwankt zwischen -4 bis 24 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zwischen 80 - 85 %. Der Wassergehalt bleibt unterhalb von 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf bleiben eher unkritisch.

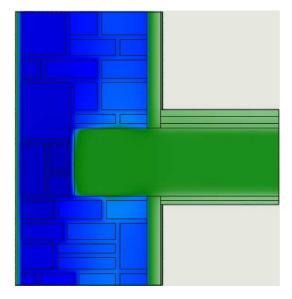


Bild 4.2.1 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

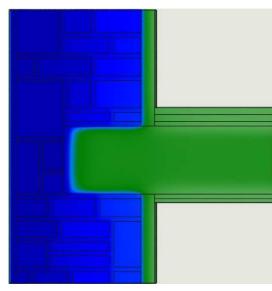


Bild 4.2.1 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

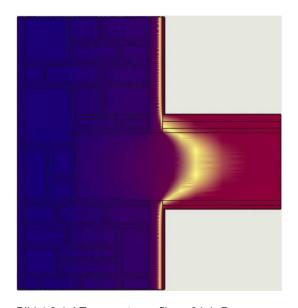


Bild 4.2.1 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

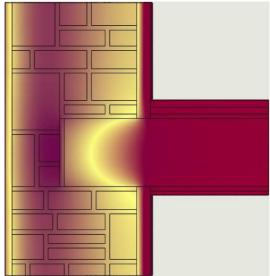


Bild 4.2.1 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich auch für Davos ein geringer Unterschied (Vergleich mit den Bildern $4.2~\mathrm{H}-\mathrm{K}$).

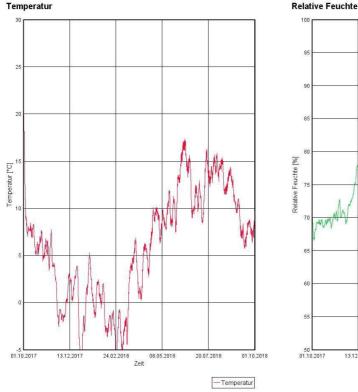
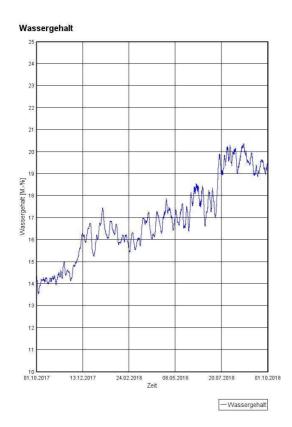


Bild 4.2.1 L Temperatur Balkenkopf Davos

Bild 4.2.1 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos



Die Bilder 4.2.1 L bis 4.2.1 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Aerogel Dämmputz und Perlite. Die Temperatur schwankt zwischen -7 bis 17 °C. Die relative Feuchte steigt über das Jahr auf über 85 %. Der Wassergehalt steigt auch über das ganze Jahr und erreicht den kritischen Wert von 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf schaukeln sich trotz Perlite im Hohlraum auf kritische Werte auf.

Bild 4.2.1 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

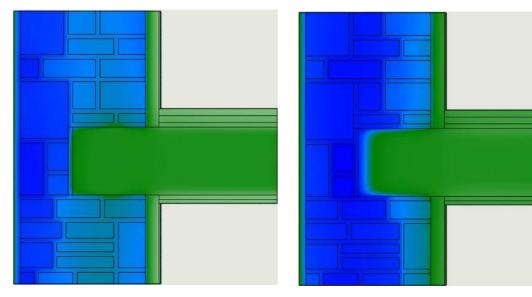


Bild 4.2.1 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.2.1 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

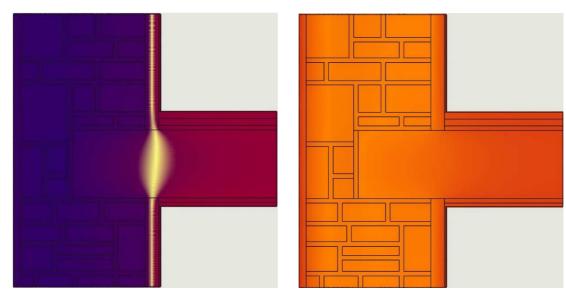


Bild 4.2.1 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.2.1 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich für Locarno ebenfalls ein geringer Unterschied in der Temperatur und relativen Luftfeuchte (Vergleich mit den Bildern $4.2 \, \mathrm{O} - \mathrm{R}$).

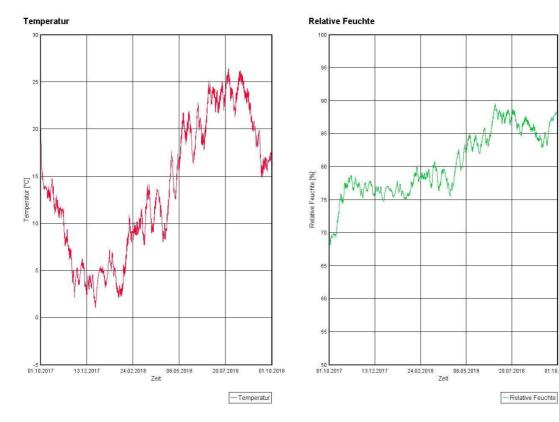


Bild 4.2.1 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.2.1 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

01.10.2018

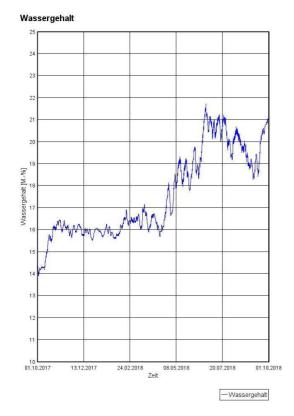


Bild 4.2.1 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.2.1 S bis 4.2.1 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Aerogel Dämmputz und Perlite. Die Temperatur schwankt zwischen 2 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst bei 78 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis über 85 %. Der Wassergehalt liegt die Hälfte des Jahres zwischen 18 - 21 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch trotz Perlite.

4.2.2 Aerogel Dämmputz und künstlich erzeugte Wärmebrücke mit Ziegel

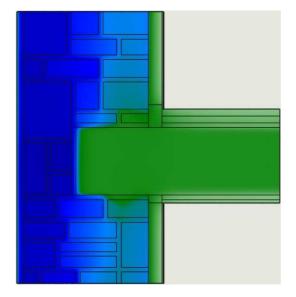


Bild 4.2.2 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

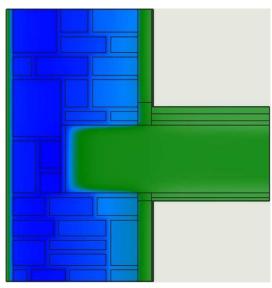


Bild 4.2.2 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

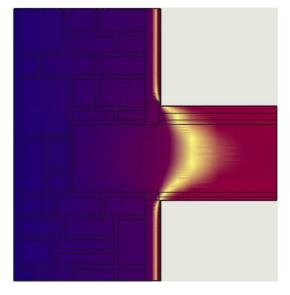


Bild 4.2.2 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

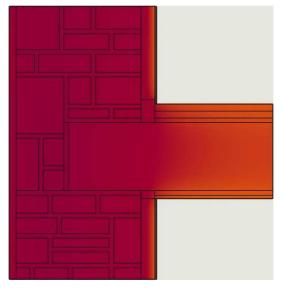


Bild 4.2.2 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Für die künstliche Wärmebrücke wurde ein Ziegelstein (anstatt Dämmstoff) bei der Ecke im Boden- und Deckenbereich eingebaut. Diese soll durch ihre viel höhere Wärmeleitfähigkeit als der Dämmstoff (ca. 0.6 W/(m K)) dabei helfen, die Wärme aus dem Raum hinter die Innendämmung und Richtung Balkenkopf weiterzuleiten.

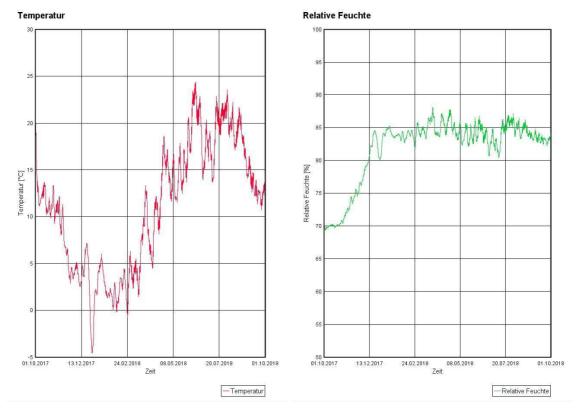


Bild 4.2.2 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.2.2 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

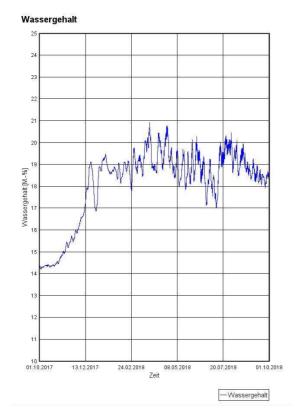


Bild 4.2.2 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.2.2 E bis 4.2.2 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Aerogel Dämmputz und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen -5 bis 24 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang im Mittel bei 85 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich zwischen 19 - 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch und es zeigt sich kein signifikanter Vorteil durch die künstliche Wärmebrücke.

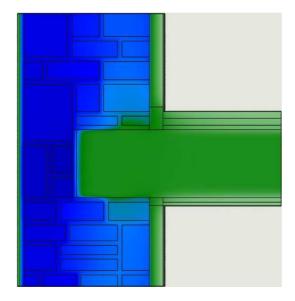


Bild 4.2.2 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

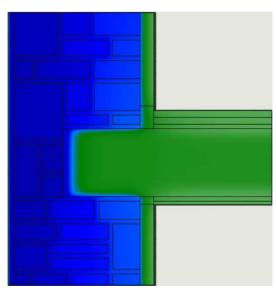


Bild 4.2.2 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

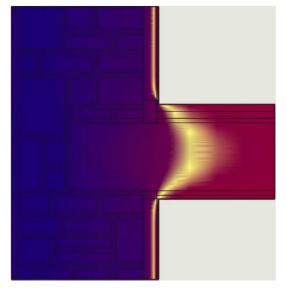


Bild 4.2.2 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

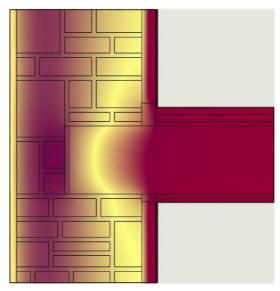


Bild 4.2.2 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Auch für Davos zeigt sich kein signifikanter Unterschied in der Feuchte der Wand. Lediglich im Bereich der Wärmebrücke ist es etwas trockener, durch das Eindringen der Wärme über die künstliche Wärmebrücke. Bei der Temperatur ist zu erkennen, dass durch die künstliche Wärmebrücke die Oberflächentemperatur in der Ecke des Bodens im Winter etwas kälter wird. Dies kann unter Umständen bereits zu einem mikrobiellen Befall führen und muss bei einer solchen Konstruktion genauestens geprüft werden.

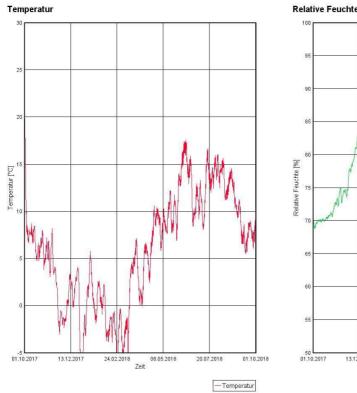


Bild 4.2.2 L Temperatur Balkenkopf **Davos**

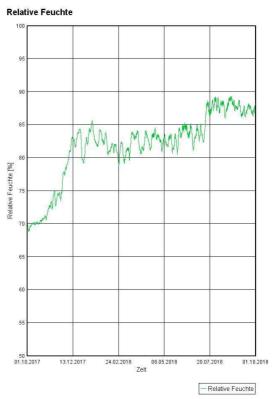


Bild 4.2.2 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

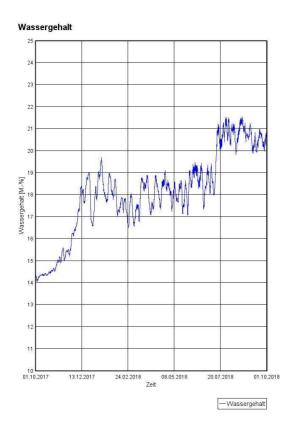


Bild 4.2.2 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.2.2 L bis 4.2.2 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Aerogel Dämmputz und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen -7,5 bis 17 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich zwischen 80 - 85 %. Bei rund ¼ der Zeit zwischen 85 – 90% Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%. Für rund ¼ der Zeit aber oberhalb 20 M.-% Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch.

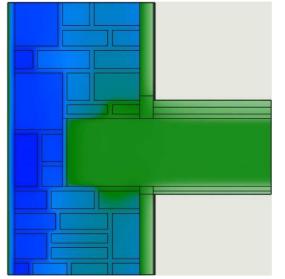
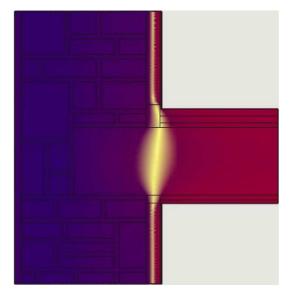


Bild 4.2.2 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.2.2 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno



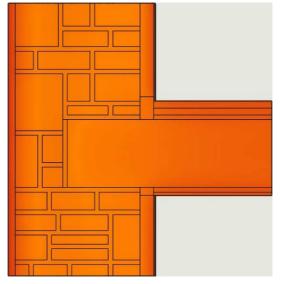


Bild 4.2.2 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.2.2 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Locarno zeigt ein gleiches Verhalten im Bereich der künstlichen Wärmebrücke wie Zürich und Davos. Das heisst, das Anbringen einer künstlichen Wärmebrücke ist nicht zielführend und hat sogar einen negativen Einfluss auf die minimale innere Oberflächentemperatur in der Ecke.

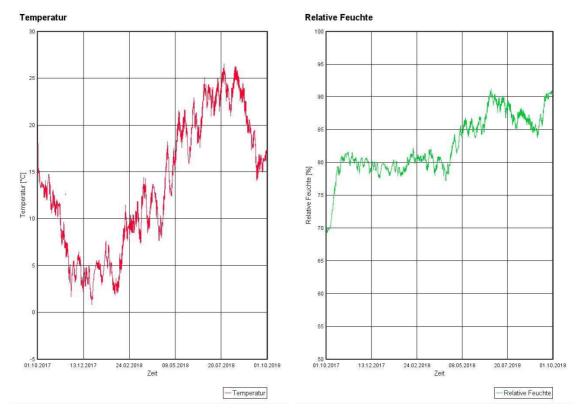


Bild 4.2.2 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.2.2 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

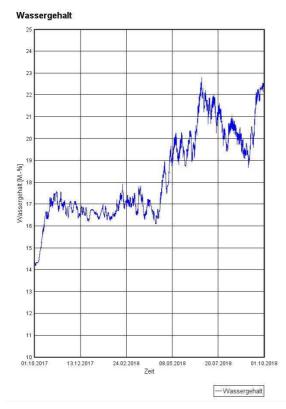


Bild 4.2.2 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.2.2 S bis 4.2.2 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Aerogel Dämmputz und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen 1 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst bei 80 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis knapp 90 % Der Wassergehalt liegt für ca. 1/3 des Jahres über 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch.

4.2.3 Aerogel Dämmputz und Temperierung mit aufheizbarer Farbe

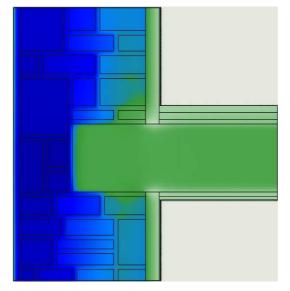


Bild 4.2.3 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

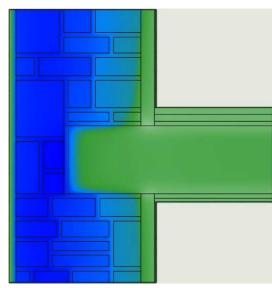


Bild 4.2.3 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

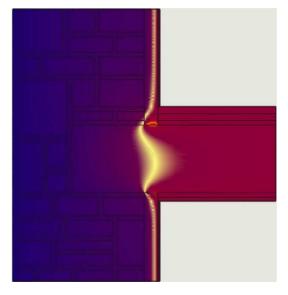


Bild 4.2.3 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

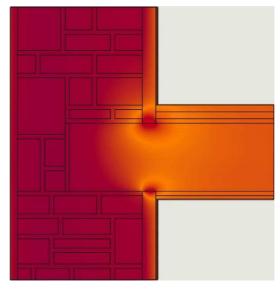


Bild 4.2.3 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

In den Eckbereichen des Bodens und der Decke wurde ein ca. 60 mm breiter Streifen einer neuartigen aufheizbaren Farbe simuliert. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass ab 1. November während den Wintermonaten mit 5 W/m und während dem Rest des Jahres mit 2.5 W/m geheizt wird. Dieser Wert wurde deshalb zugrunde gelegt, um in diesen Bereich Temperaturen grösser als 35 °C zu vermeiden, da bei langanhaltenden höheren Temperaturen Schäden an Baustoffen nicht ausgeschlossen werden können.

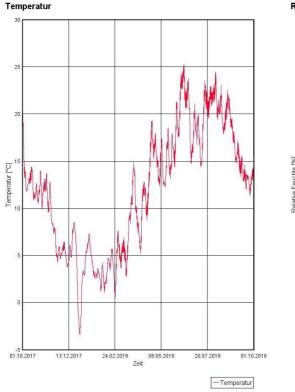


Bild 4.2.3 E Temperatur Balkenkopf Zürich

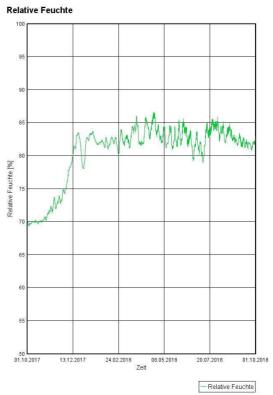


Bild 4.2.3 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

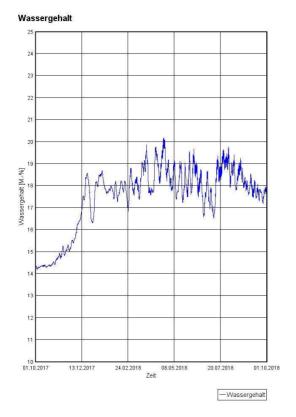


Bild 4.2.3 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.2.3 E bis 4.2.3 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Aerogel Dämmputz und Heizfarbe. Die Temperatur schwankt zwischen -3 bis 25 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zwischen 80 - 85 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich zwischen 18 - 19 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf können durch eine Beheizung in der Ecke verbessert werden.

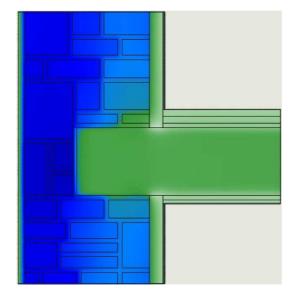


Bild 4.2.3 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

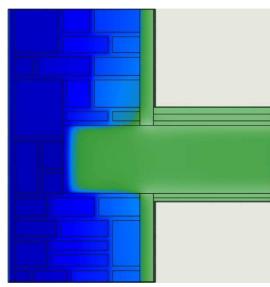


Bild 4.2.3 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

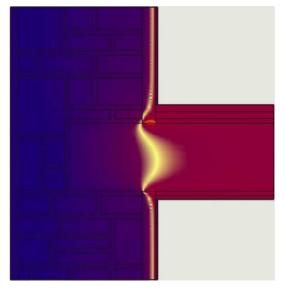


Bild 4.2.3 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

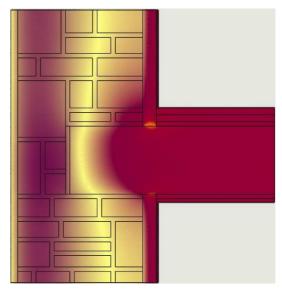


Bild 4.2.3 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Im beheizten Eckbereich ist erwartungsgemäss die Feuchte tiefer als ohne Beheizung. Die taupunktbedingte kritische Temperatur (gelber Bereich) ist mehr in das Wandinnere verschoben.

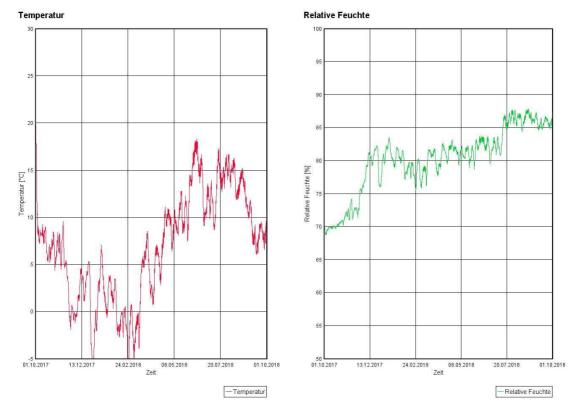


Bild 4.2.3 L Temperatur Balkenkopf Davos

Bild 4.2.3 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

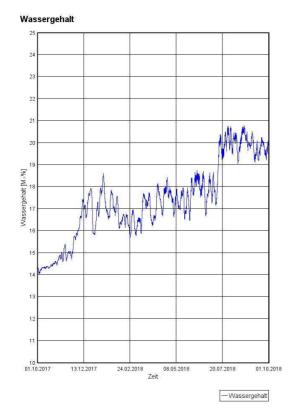


Bild 4.2.3 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.2.3 L bis 4.2.3 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Aerogel Dämmputz Heizfarbe. Die Temperatur und schwankt zwischen -6 bis 18 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich unter 85 % und bei rund 1/5 der Zeit zwischen 85 - 90 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%, aber für rund 1/5 der Zeit oberhalb 20 M.-% Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind immer noch leicht kritisch.

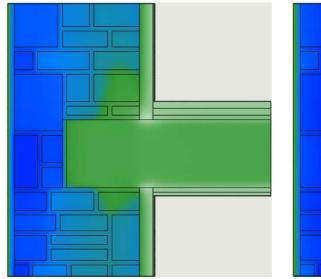
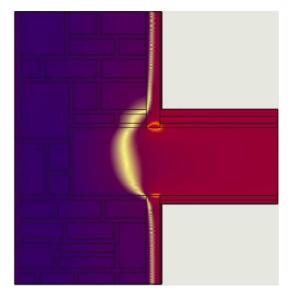


Bild 4.2.3 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.2.3 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno



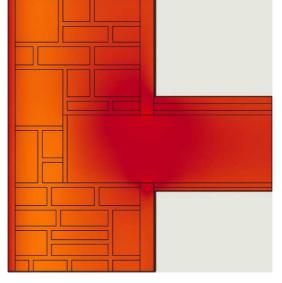


Bild 4.2.3 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.2.3 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Im Bild 4.2.3. O sieht man deutlich den Einfluss der Heizfarbe auf die Feuchte in den Eckbereichen ober und unterhalb des Balkens. Dies ist im Winter deutlicher als im Sommer (Bild 4.2.3 P). Ähnlich verhält es sich auch mit der Temperaturverteilung. Der taupunktbedingte kritische Bereich ist mehr nach aussen verlagert (Bild 4.2.3. Q).

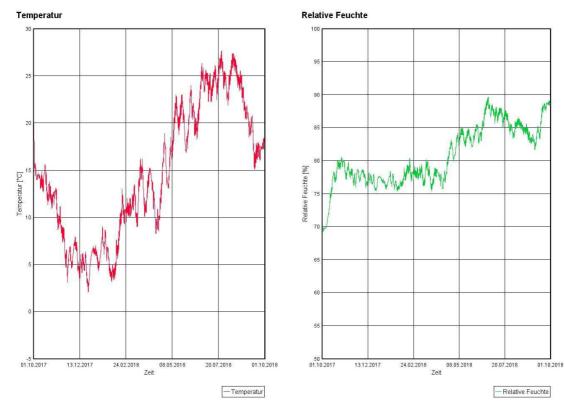


Bild 4.2.3 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.2.3 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

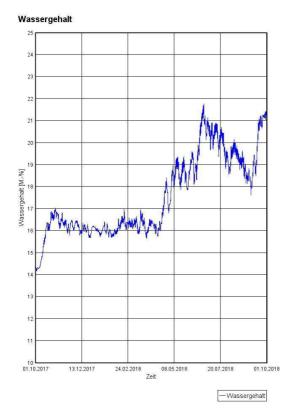


Bild 4.2.3 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.2.3 S bis 4.2.3 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Aerogel Dämmputz und Heizfarbe. Die Temperatur schwankt zwischen 3 bis 27 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst unter 80 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis auf 90 %, trocknet aber wieder aus. Der Wassergehalt liegt die Hälfte des Jahres unter 17 M.-% steigt aber bis über 20 M.-%. In der zweiten Jahreshälfte sind die Werte kritisch.

4.3 Innendämmung mit Aerogel Matte

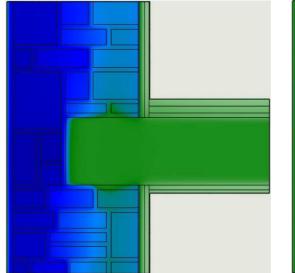


Bild 4.3 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

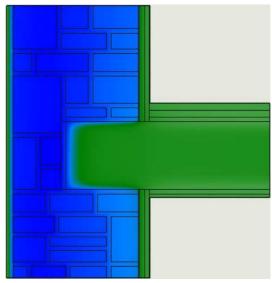


Bild 4.3 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

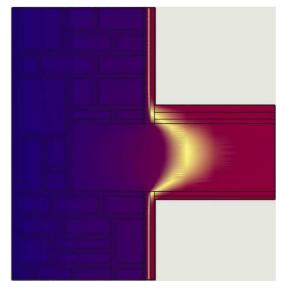


Bild 4.3 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

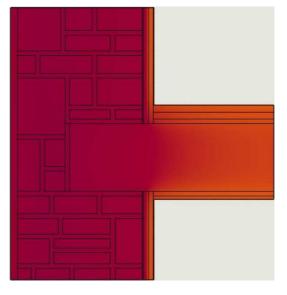


Bild 4.3 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Feuchtetechnisch verhält sich die Aerogel Matte ähnlich wie der Aerogel Dämmputz. Der kritische, taupunktbedingte Bereich verschiebt sich durch die Aerogel Matte im Balken mehr in Richtung Innenraum. Auch im Sommer ist die Wand durch die Innendämmung vom Raumklima abgekoppelt und wird deshalb der Aussenluft folgend etwas wärmer.

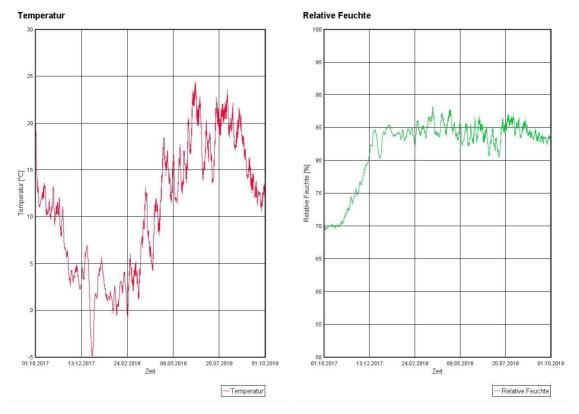


Bild 4.3 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.3 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

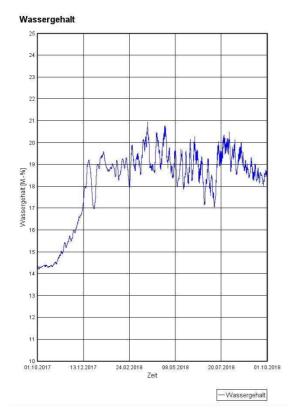


Bild 4.3 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.3 E bis 4.3 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Aerogel Matte als Innendämmung. Die Temperatur schwankt zwischen -5 bis 24 °C. Die relative Feuchte pendelt nach einem Einschwingvorgang um die 85 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich zwischen 19 - 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits etwas kritisch.

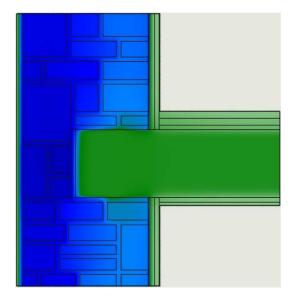


Bild 4.3 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

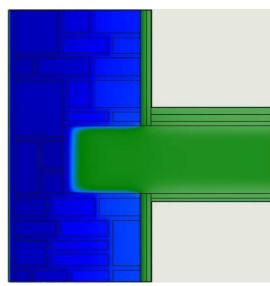


Bild 4.3 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

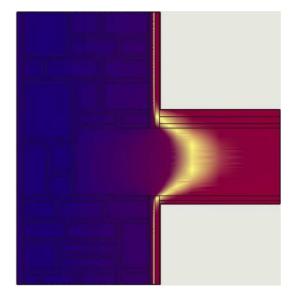


Bild 4.3 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

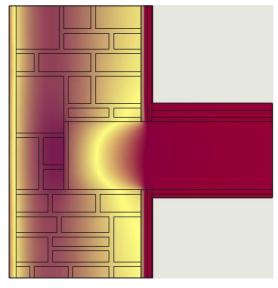


Bild 4.3 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Für Davos ergeben sich mit der Aerogel Matte höhere Feuchtigkeiten als im ungedämmten Zustand. Die taupunktbedingte kritische Temperatur (gelb) verschiebt sich Winter und im Sommer mehr in Richtung Innenraum (siehe Bilder 4.3 J und K). Die Temperatur am Balkenkopf ist gegenüber den beiden anderen Dämmvarianten geringfügig tiefer, bedingt durch die besseren Dämmeigenschaften der Aerogel Matte.

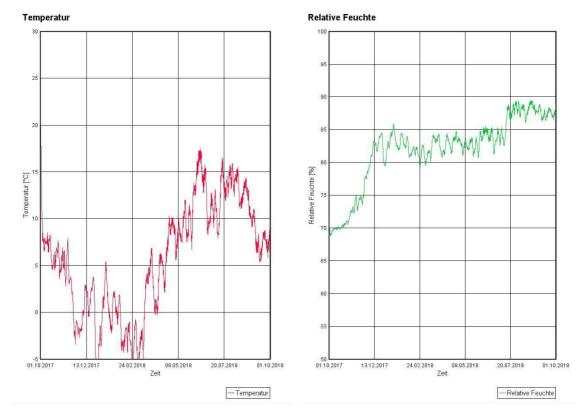


Bild 4.3 L Temperatur Balkenkopf Davos

Bild 4.3 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

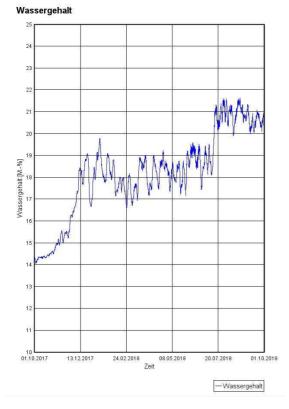


Bild 4.3 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.3 L bis 4.3 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit der Aerogel Matte als Innendämmung. Die Temperatur schwankt zwischen -8.5 bis 17 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich zwischen 80 - 85 %. Bei rund ¼ der Zeit zwischen 85 – 90%. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%. Für rund 1/4 der Zeit aber oberhalb 20 M.-% Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch.

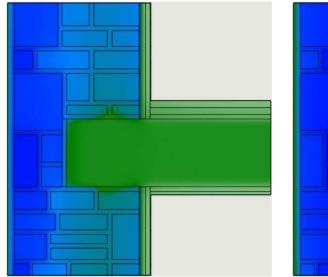


Bild 4.3 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

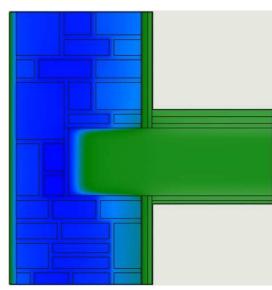


Bild 4.3 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

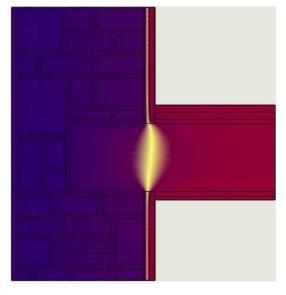


Bild 4.3 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

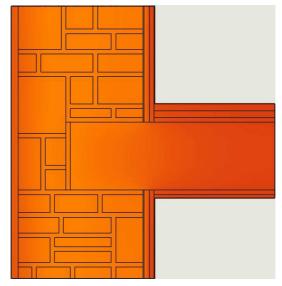


Bild 4.3 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

In Locarno ist die Wand mit der Aerogel Matte im Winter eher trockener. Jedoch im Sommer dafür etwas feuchter, aber auch wärmer. Der taupunktbedingte kritische Bereich verschiebt sich in Richtung Raum, allerdings nicht so stark wie in Zürich und Davos.

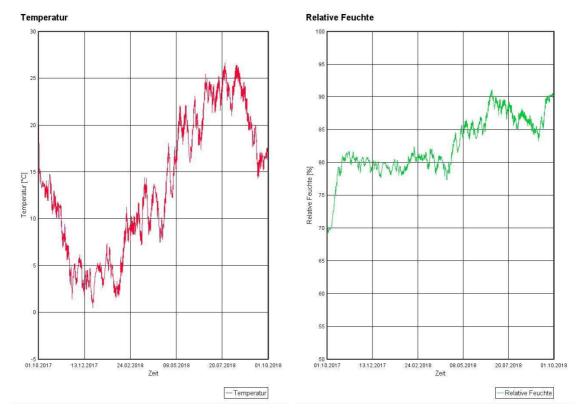


Bild 4.3 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.3 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

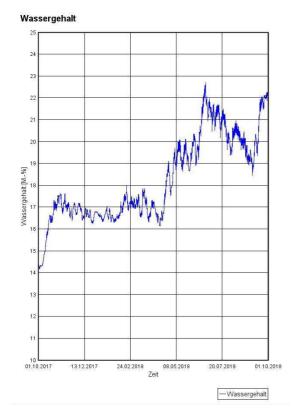


Bild 4.3 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.3 S bis 4.3 U zeigen die Temp., relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit der Aerogel Matte. Die Temperatur schwankt zwischen 1 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst bei 80 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis an die 90 %. Der Wassergehalt liegt ca. die Hälfte des Jahres unter 18 M.-%, danach steigt sie auf über 22 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch.

4.3.1 Aerogel Matte und Perlite Füllung im Balkenhohlraum

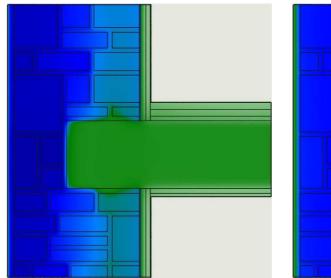


Bild 4.3.1 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

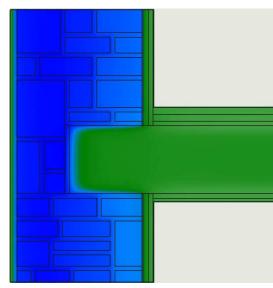


Bild 4.3.1 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

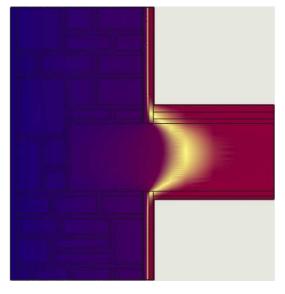


Bild 4.3.1 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

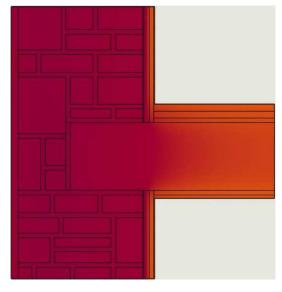


Bild 4.3.1 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Der Balkenhohlraum wurde mit Perlite verfüllt, um die Holzoberfläche zu dämmen. Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich nur ein geringer Unterschied (Vergleich mit den Bildern 4.3~A-D).

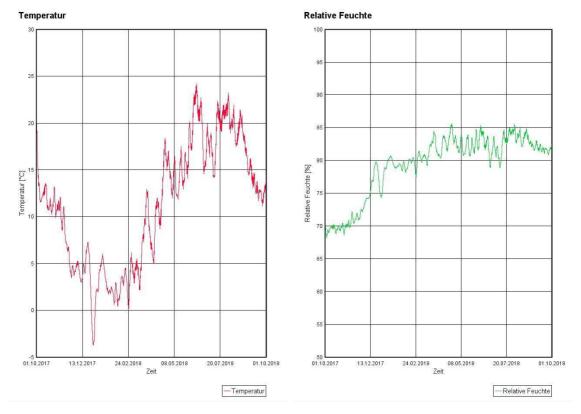


Bild 4.3.1 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.3.1 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

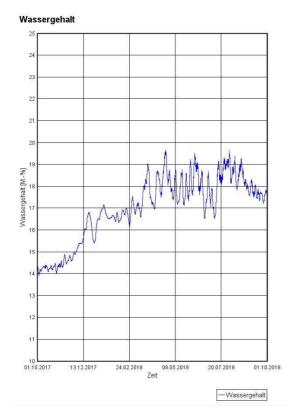


Bild 4.3.1 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.3.1 E bis 4.3.1 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Aerogel Matte und Perlite Füllung. Die Temperatur schwankt zwischen -4 bis 24 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zwischen 80 - 85 %. Der Wassergehalt bleibt unterhalb von 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf bleiben eher unkritisch.

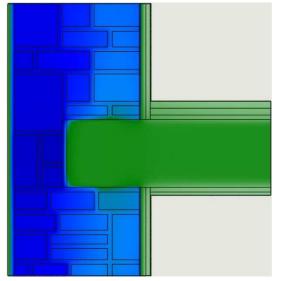


Bild 4.3.1 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

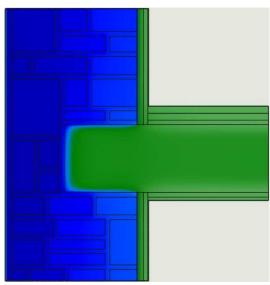


Bild 4.3.1 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

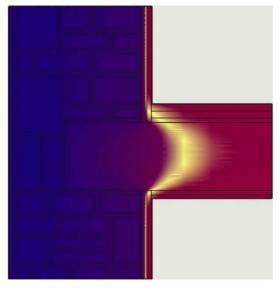


Bild 4.3.1 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

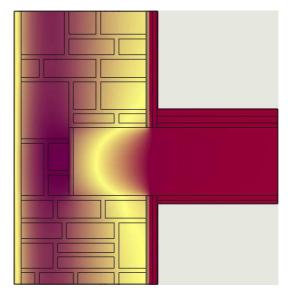


Bild 4.3.1 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich auch für Davos nur ein geringer Unterschied (Vergleich mit den Bildern 4.3.~H-K).

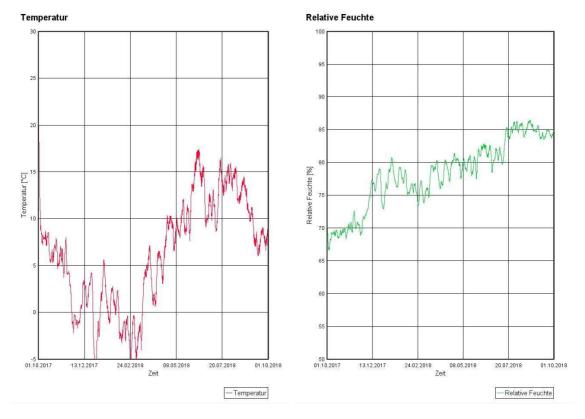


Bild 4.3.1 L Temperatur Balkenkopf Davos

Bild 4.3.1 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

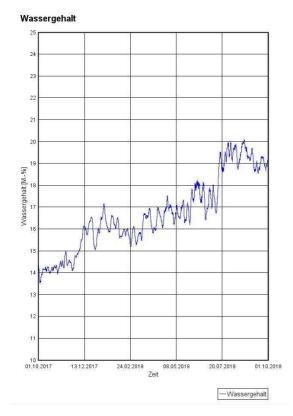


Bild 4.3.1 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.3.1 L bis 4.3.1 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Aerogel Matte und Perlite. Die Temperatur schwankt zwischen -7,5 bis 17 °C. Die relative Feuchte steigt kontinuierlich über das Jahr auf über 85 %. Der Wassergehalt steigt auch über das ganze Jahr und erreicht den kritischen Wert von 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf schaukeln sich trotz Perlite im Hohlraum auf kritische Werte auf.

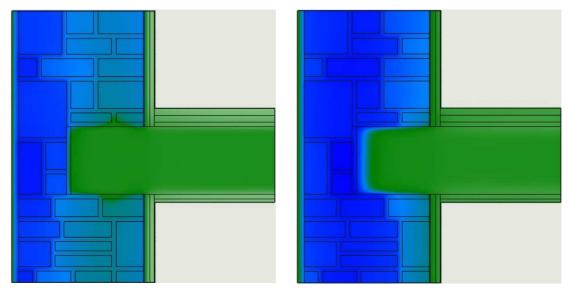


Bild 4.3.1 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.3.1 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

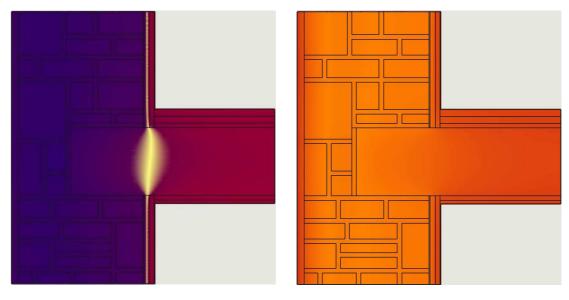


Bild 4.3.1 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.3.1 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich für Locarno ebenfalls ein geringer Unterschied in der Temperatur und relativen Luftfeuchte (Vergleich mit den Bildern 4.3.00 O - R).

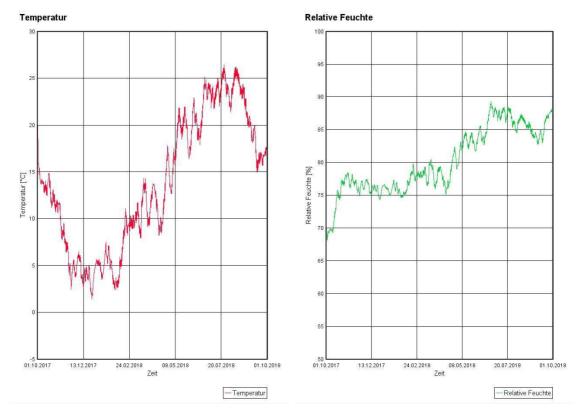


Bild 4.3.1 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.3.1 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

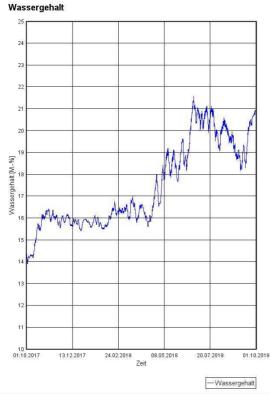


Bild 4.3.1 U Wassergehalt Balkenkopf **Locarno**

Die Bilder 4.3.1 S bis 4.3.1 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Aerogel Matte und Perlite. Die Temperatur schwankt zwischen 2 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst bei 78 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis über 85 %. Der Wassergehalt liegt die Hälfte des Jahres zwischen 16 - 18 M.-%, später bei 20 - 21 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch trotz Perlite.

4.3.2 Aerogel Matte und künstlich erzeugte Wärmebrücke mit Ziegel

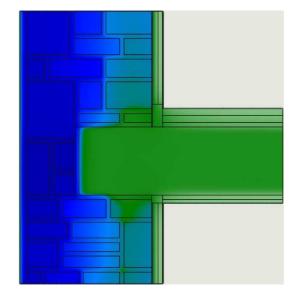


Bild 4.3.2 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

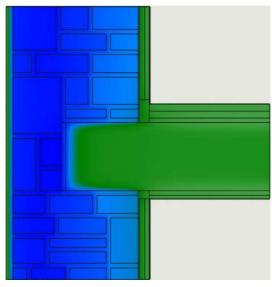


Bild 4.3.2 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

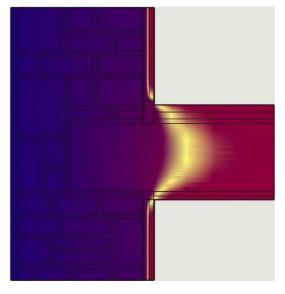


Bild 4.3.2 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

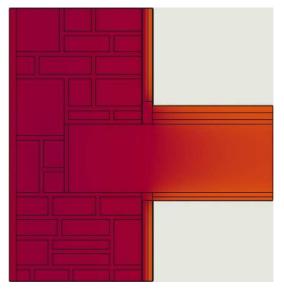


Bild 4.3.2 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Auch in diesem Fall wurde für die künstliche Wärmebrücke ein Ziegelstein bei der Ecke im Boden- und Deckenbereich eingebaut. Diese soll durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Ziegels dabei helfen, die Wärme aus dem Raum hinter die Innendämmung und Richtung Balkenkopf weiterzuleiten.

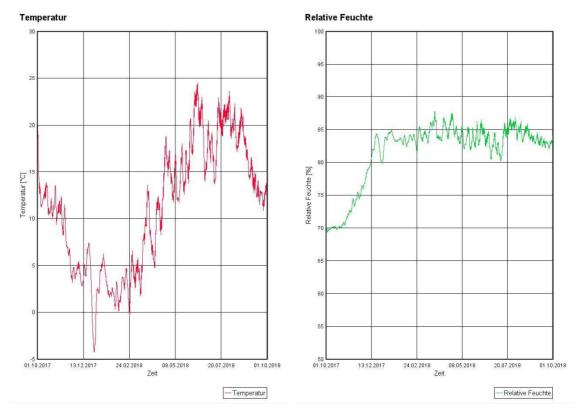


Bild 4.3.2 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.3.2 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

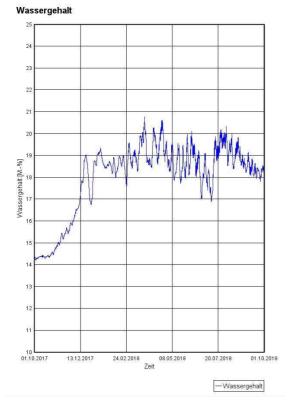


Bild 4.3.2 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.3.2 E bis 4.3.2 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Aerogel Matte und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen -4 bis 24 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang im Mittel bei 85 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich zwischen 18 - 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch und es zeigt sich kein signifikanter Vorteil durch die künstliche Wärmebrücke.

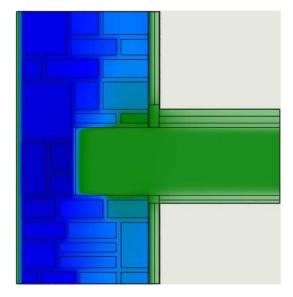


Bild 4.3.2 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

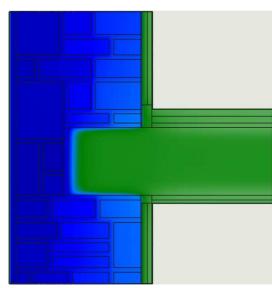


Bild 4.3.2 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

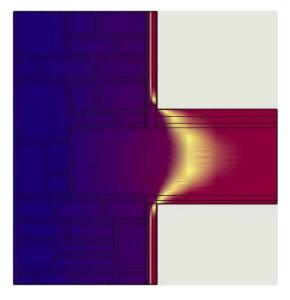


Bild 4.3.2 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

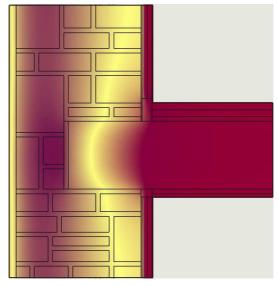


Bild 4.3.2 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Auch für Davos zeigt sich kein signifikanter Unterschied in der Feuchte der Wand. Lediglich im Bereich der Wärmebrücke ist es durch das Eindringen der Wärme etwas trockener. Bei der Temperatur ist zu erkennen, dass durch die künstliche Wärmebrücke die Oberflächentemperatur in der Ecke des Bodens im Winter etwas kälter wird. Dies kann unter Umständen bereits zu einem mikrobiellen Befall führen und muss bei einer solchen Konstruktion genauestens geprüft werden.

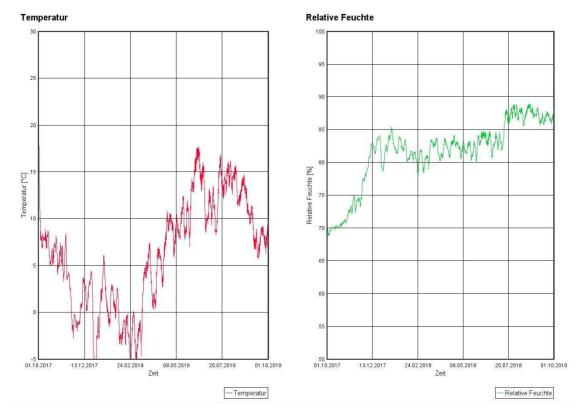


Bild 4.3.2 L Temperatur Balkenkopf Davos

Bild 4.3.2 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

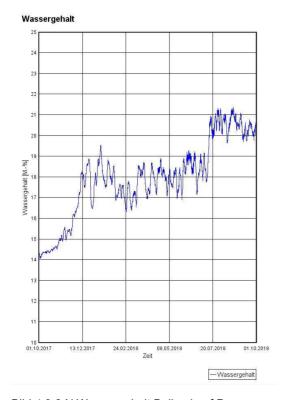


Bild 4.3.2 N Wassergehalt Balkenkopf **Davos**

Die Bilder 4.3.2 L bis 4.3.2 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Aerogel Matte und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen -7,5 und 17 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich zwischen 80 - 85 %. Bei rund ¼ der Zeit zwischen 85 - 90 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%, aber für rund ¼ der Zeit aber oberhalb 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch.

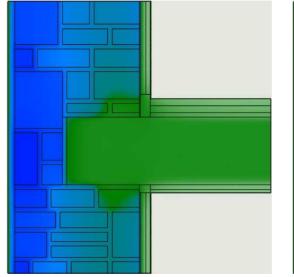


Bild 4.3.2 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

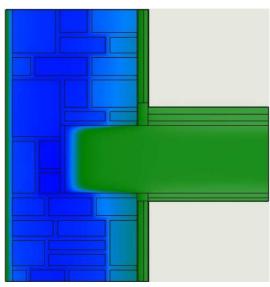
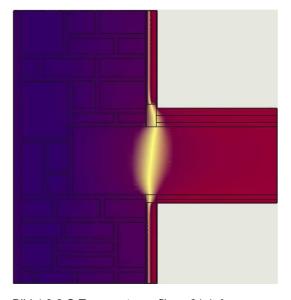


Bild 4.3.2 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno





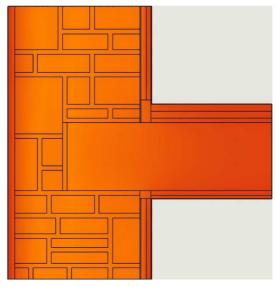


Bild 4.3.2 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Locarno zeigt ein gleiches Verhalten im Bereich der künstlichen Wärmebrücke wie Zürich und Davos. Das heisst, das Anbringen einer künstlichen Wärmebrücke ist nicht zielführend und hat auch in diesem Fall einen negativen Einfluss auf die minimale innere Oberflächentemperatur in der Ecke.

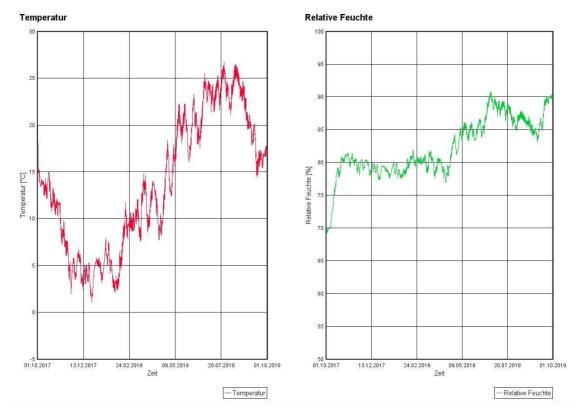


Bild 4.3.2 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.3.2 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

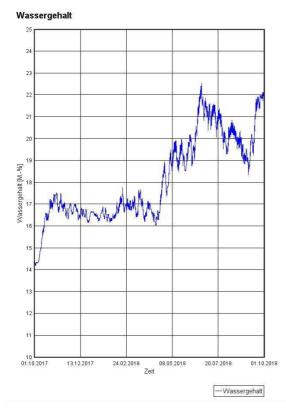


Bild 4.3.2 U Wassergehalt Balkenkopf **Locarno**

Die Bilder 4.3.2 S bis 4.3.2 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Aerogel Matte und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen 2 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst bei 80 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis knapp 90 %. Der Wassergehalt liegt für ca. 1/3 des Jahres über 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch.

4.3.3 Aerogel Matte und Temperierung mit aufheizbarer Farbe

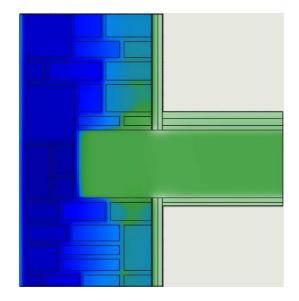


Bild 4.3.3 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

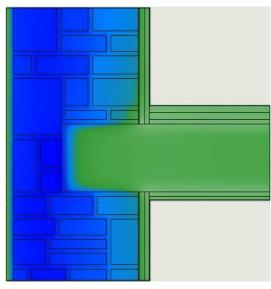


Bild 4.3.3 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

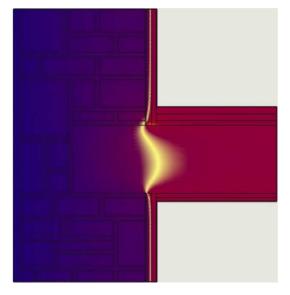


Bild 4.3.3 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

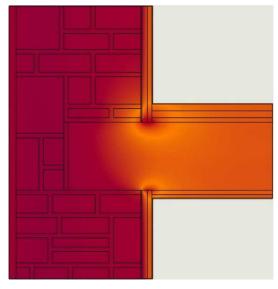


Bild 4.3.3 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

In den Eckbereichen des Bodens und der Decke wurde ein ca. 60 mm breiter Streifen einer neuartigen aufheizbaren Farbe simuliert. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass ab 1. November während den Wintermonaten mit 5 W/m und während dem Rest des Jahres mit 2.5 W/m geheizt. Dieser Wert wurde deshalb zugrunde gelegt, um in diesen Bereich Temperaturen grösser als 35 °C zu vermeiden, weil bei langanhaltend höheren Temperaturen Schäden an Baustoffen nicht ausgeschlossen werden können. Man sieht, dass es in den Eckbereichen dadurch trockener bleibt (grün).

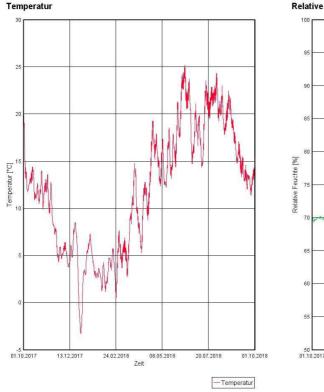


Bild 4.3.3 E Temperatur Balkenkopf Zürich

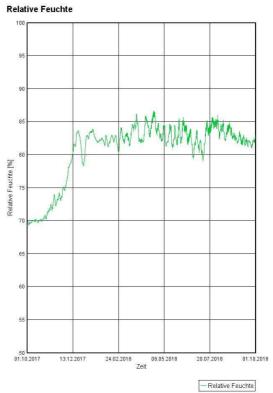


Bild 4.3.3 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

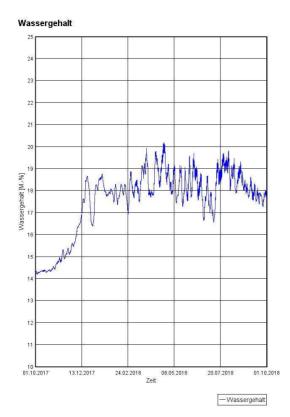


Bild 4.3.3 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.3.3 E bis 4.3.3 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Aerogel Matte und Heizfarbe. Die Temperatur schwankt zwischen -3 und 25 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zwischen 80 - 86 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf können durch eine Beheizung verbessert werden.

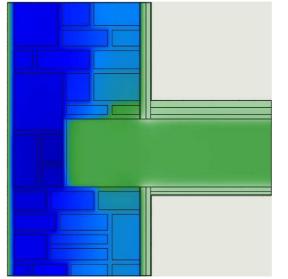


Bild 4.3.3 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

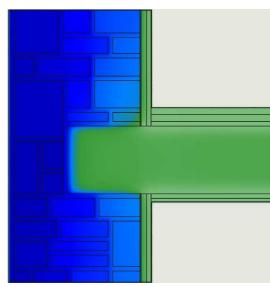


Bild 4.3.3 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

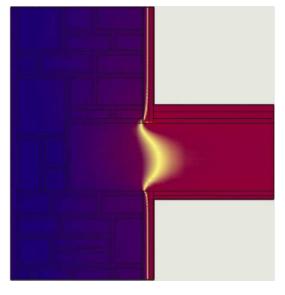


Bild 4.3.3 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

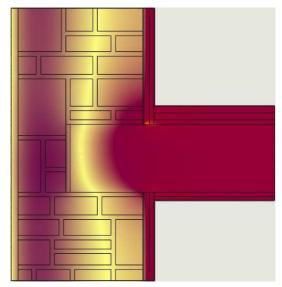


Bild 4.3.3 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Im beheizten Eckbereich ist erwartungsgemäss die Feuchte tiefer als ohne Beheizung. Die taupunktbedingte kritische Temperatur (gelber Bereich) ist mehr in das Wandinnere verschoben.

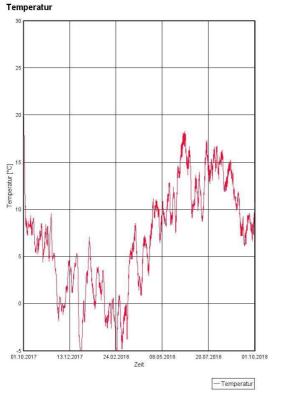


Bild 4.3.3 L Temperatur Balkenkopf Davos

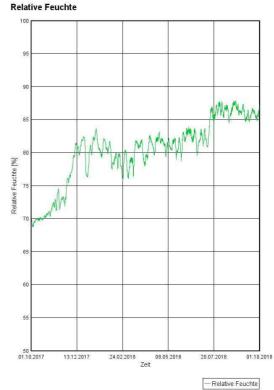


Bild 4.3.3 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

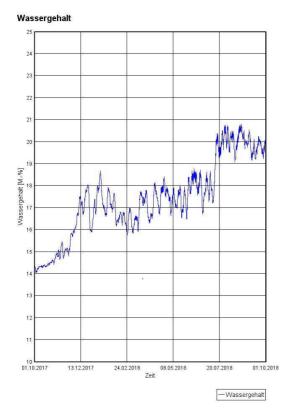


Bild 4.3.3 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.3.3 L bis 4.3.3 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Aerogel Matte und Heizfarbe. Die Temperatur schwankt zwischen -7 bis 18 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich unter 85 %. Bei rund 1/5 der Zeit zwischen 85 – 90 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%. Für rund 1/5 der Zeit aber oberhalb 20 M.-% Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind immer noch leicht kritisch.

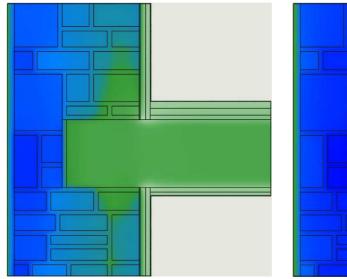


Bild 4.3.3 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

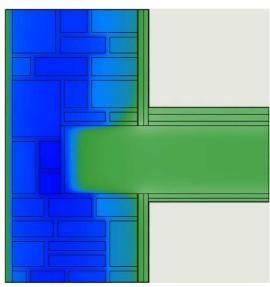


Bild 4.3.3 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

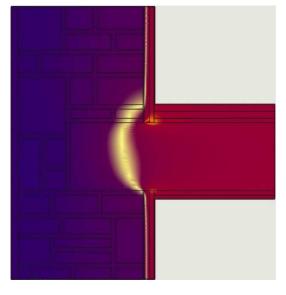


Bild 4.3.3 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

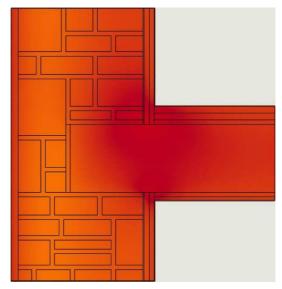


Bild 4.3.3 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Im Bild 4.3.3. O sieht man deutlich den Einfluss der Heizfarbe auf die Feuchte in den Eckbereichen ober und unterhalb des Balkens und im Winter deutlicher als im Sommer (Bild 4.3.3 P). Ähnlich verhält es sich auch mit der Temperaturverteilung. Der taupunktbedingte kritische Bereich ist mehr nach aussen verlagert (Bild 4.3.3. Q).

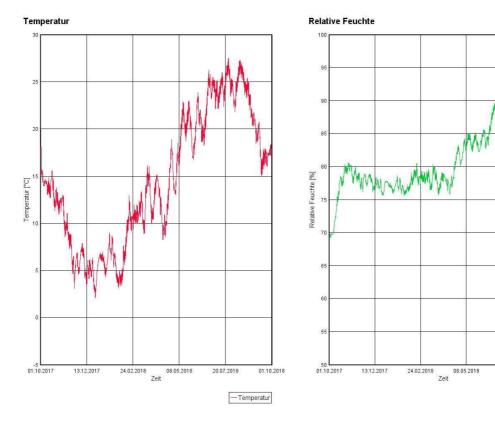


Bild 4.3.3 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.3.3 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

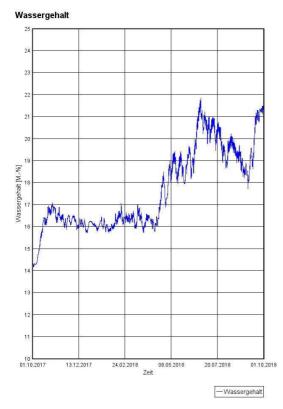


Bild 4.3.3 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.3.3 S bis 4.3.3 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Aerogel Matte und Heizfarbe. Die Temperatur schwankt zwischen 3 bis 27 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst unter 80 % und steigt ab der zweiten Jahreshälfte bis auf 90 %, trocknet aber wieder aus. Der Wassergehalt liegt die Hälfte des Jahres unter 17 M.-% steigt aber bis über 21 M.-%. In der zweiten Jahreshälfte sind die Werte kritisch.

01.10.2018

-Relative Feuchte

4.4 Innendämmung mit Holzfaserplatte

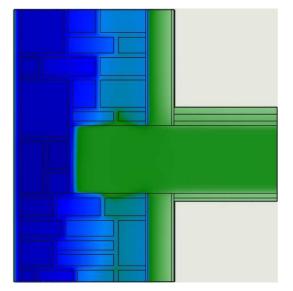


Bild 4.4 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

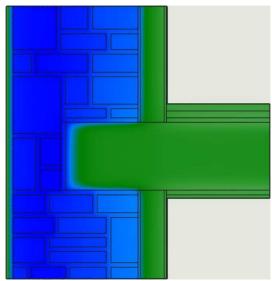


Bild 4.4 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

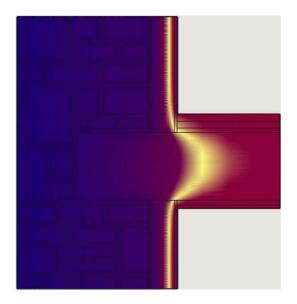


Bild 4.4 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

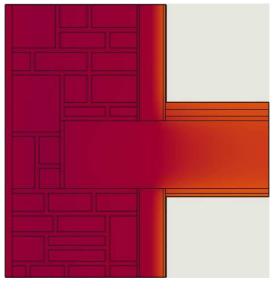


Bild 4.4 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Der kritische, taupunktbedingte Bereich verschiebt sich auch durch die Innendämmung mit der Holzfaserplatte im Balken mehr in Richtung Innenraum. Auch im Sommer ist die Wand durch die Innendämmung vom Raumklima abgekoppelt und wird deshalb etwas wärmer.

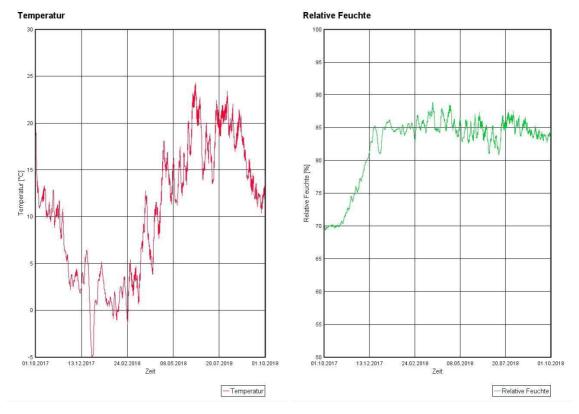


Bild 4.4 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.4 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

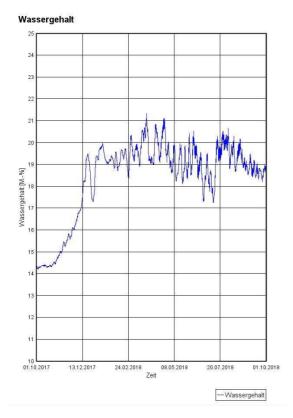


Bild 4.4 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.4 E bis 4.4 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Holzfaserplatte als Innendämmung. Die Temperatur schwankt zwischen -5 bis 24 °C. Die relative Feuchte pendelt nach einem Einschwingvorgang um die 85 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich zwischen 19 - 21 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch.

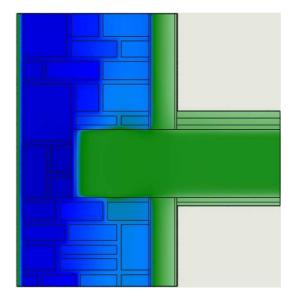


Bild 4.4 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

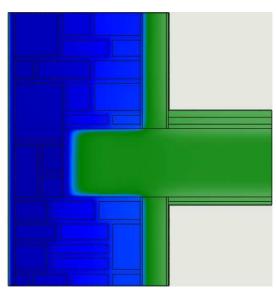


Bild 4.4 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

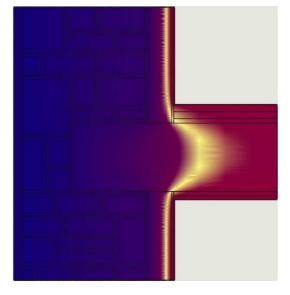


Bild 4.4 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

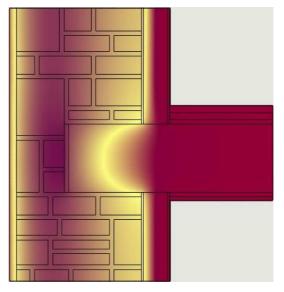


Bild 4.4 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Für Davos ergeben sich mit der Holzfaserplatte höhere Feuchtigkeiten als im ungedämmten Zustand. Die taupunktbedingte kritische Temperatur (gelb) verschiebt sich im Winter und im Sommer mehr in Richtung Innenraum (siehe Bilder 4.4.J und K). Im Vergleich zu den beiden anderen Dämmvarianten mit Aerogel zeigen sich keine signifikanten Unterschiede bezüglich Feuchte und Temperatur am Balkenkopf.

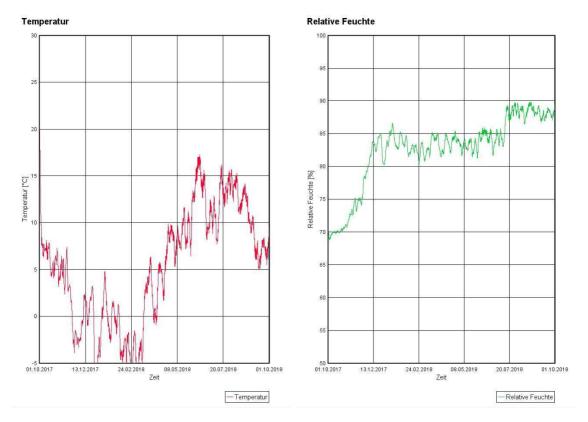


Bild 4.4 L Temperatur Balkenkopf Davos

Bild 4.4 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

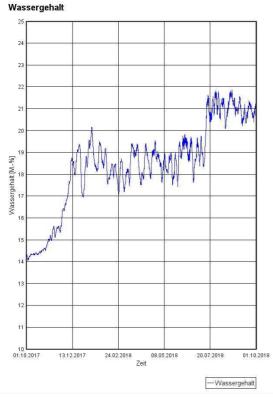


Bild 4.4 N Wassergehalt Balkenkopf **Davos**

Die Bilder 4.4 L bis 4.4 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit der Holzfaserplatte als Innendämmung. Die Temperatur schwankt zwischen -8.5 bis 17 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich zwischen 80 - 86 %. Bei rund ¼ der Zeit zwischen 86 – 90%. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%. Für rund 1/5 der Zeit aber oberhalb 21 M.-% Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch.

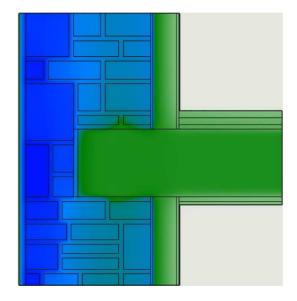


Bild 4.4 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

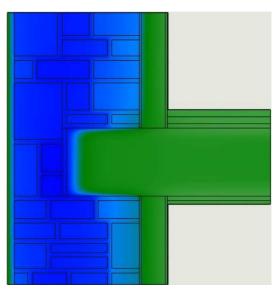


Bild 4.4 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

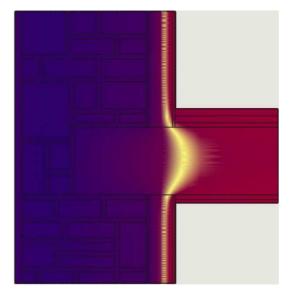


Bild 4.4 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

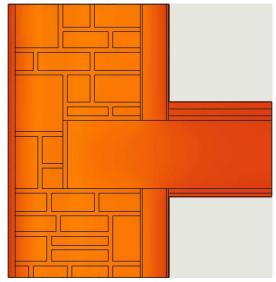


Bild 4.4 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

In Locarno ist die Wand mit der Holzfaserplatte im Winter eher trockener, jedoch im Sommer dafür etwas feuchter, aber auch wärmer. Der taupunktbedingte kritische Bereich verschiebt sich in Richtung Raum, allerdings nicht so stark wie in Zürich und Davos.

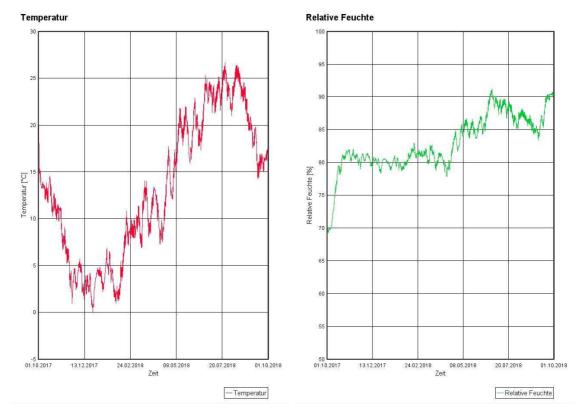


Bild 4.4 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.4 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

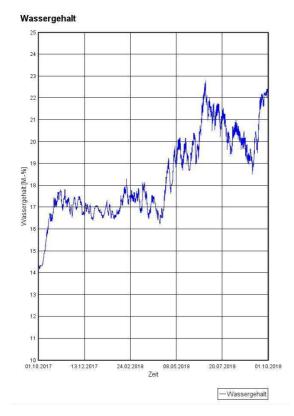


Bild 4.4 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.4 S bis 4.4 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit der Holzfaserplatte. Die Temperatur schwankt zwischen 0 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst um die 80 % und steigt ab der zweiten Jahreshälfte bis 90 %. Der Wassergehalt liegt ca. die Hälfte des Jahres unter 18 M.-%, danach steigt sie auf über 22 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind eindeutig kritisch.

4.4.1 Holzfaserplatte und Perlite Füllung im Balkenhohlraum

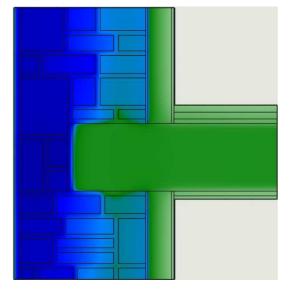


Bild 4.4.1 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

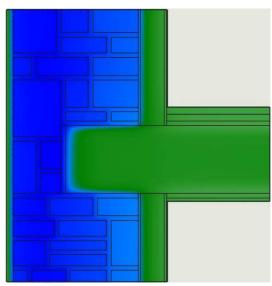


Bild 4.4.1 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

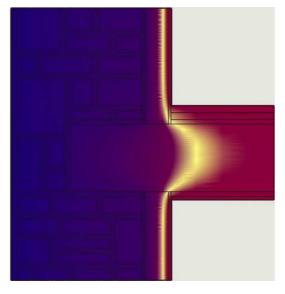


Bild 4.4.1 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

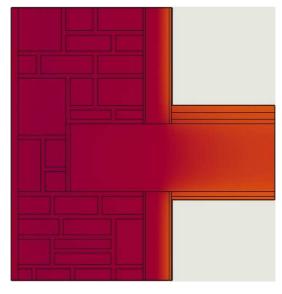


Bild 4.4.1 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Der Balkenhohlraum wurde mit Perlite verfüllt, um den Holzbalkenkopf zu dämmen. Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich ein geringer Unterschied (Vergleich mit den Bildern $4.4.\ A-D$).

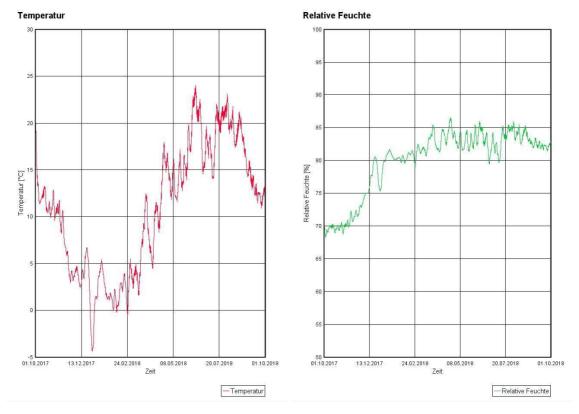


Bild 4.4.1 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.4.1 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

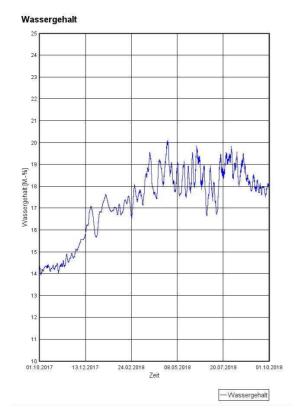


Bild 4.4.1 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.4.1 E bis 4.4.1 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Holzfaserplatte und Perlite Füllung. Die Temperatur schwankt zwischen -4 bis 24 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zwischen 80 - 86 %. Der Wassergehalt bleibt unterhalb von 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf bleiben eher unkritisch.

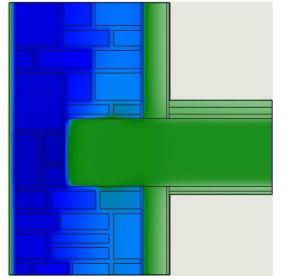


Bild 4.4.1 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

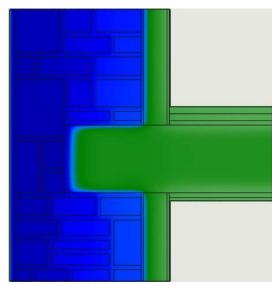


Bild 4.4.1 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

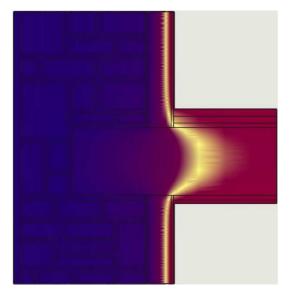


Bild 4.4.1 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

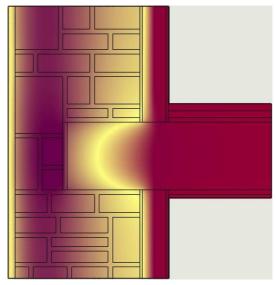


Bild 4.4.1 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich auch für Davos nur ein geringer Unterschied (Vergleich mit den Bildern 4.4. H-K).

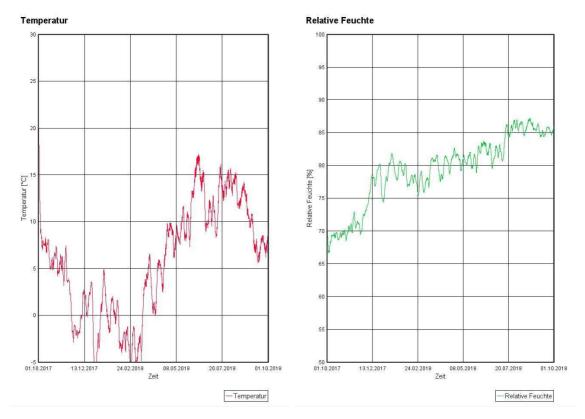


Bild 4.4.1 L Temperatur Balkenkopf Davos

Bild 4.4.1 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

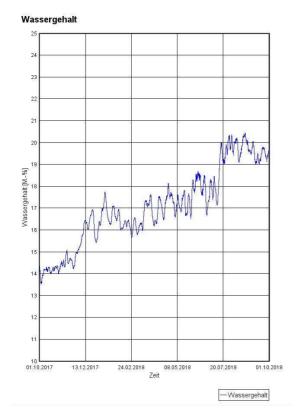


Bild 4.4.1 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.4.1 L bis 4.4.1 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Holzfaserplatte und Perlite. Die Temperatur schwankt zwischen -7,5 bis 17 °C. Die relative Feuchte steigt kontinuierlich über das Jahr auf über 85 %. Der Wassergehalt steigt auch über das ganze Jahr und erreicht den kritischen Wert von 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf schaukeln sich trotz Perlite im Hohlraum auf kritische Werte auf.

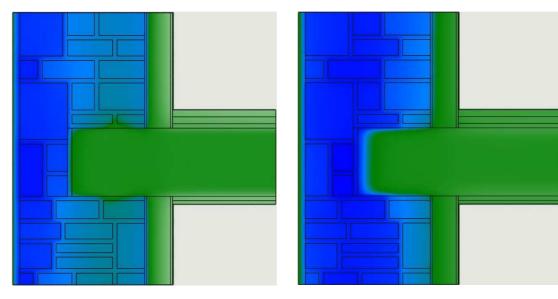


Bild 4.4.1 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.4.1 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

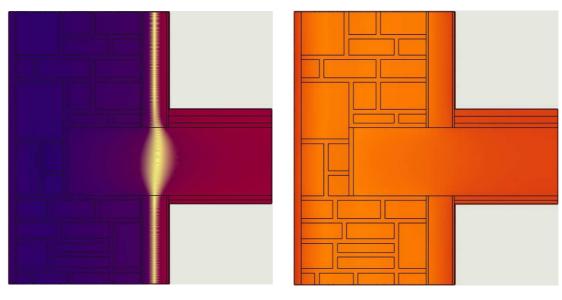


Bild 4.4.1 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

Bild 4.4.1 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Im Vergleich mit dem luftgefüllten Hohlraum zeigt sich für Locarno ebenfalls ein geringer Unterschied in der Temperatur und relativen Luftfeuchte (Vergleich mit den Bildern 4.4.00 C - R).

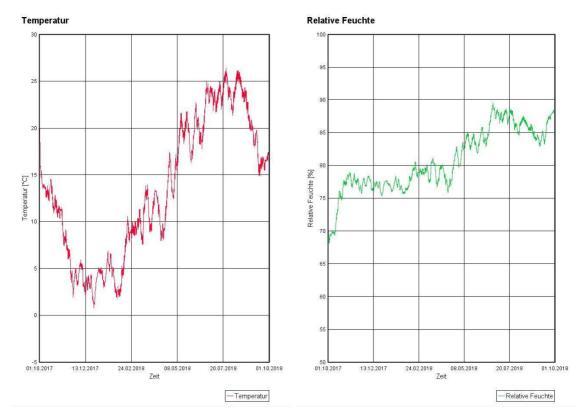


Bild 4.4.1 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.4.1 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

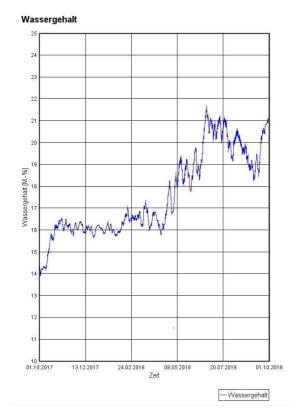


Bild 4.4.1 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.4.1 S bis 4.4.1 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Holzfaserplatte und Perlite. Die Temperatur schwankt zwischen 2 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst bei 78 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis über 85 % Der Wassergehalt liegt die Hälfte des Jahres zwischen 16 - 18 M.-%, später bei 19 - 21 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch trotz Perlite.

4.4.2 Holzfaserplatte und künstlich erzeugte Wärmebrücke mit Ziegel

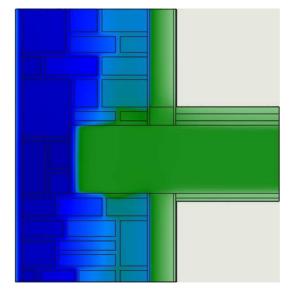


Bild 4.4.2 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

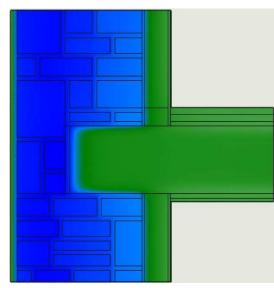


Bild 4.4.2 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

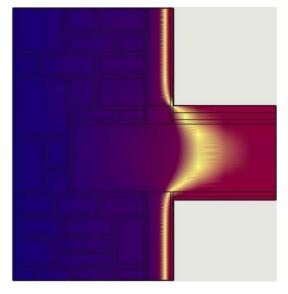


Bild 4.4.2 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

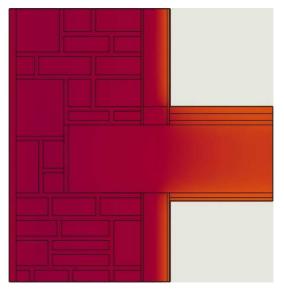


Bild 4.4.2 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

Auch in diesem Fall wurde für die künstliche Wärmebrücke ein Ziegelstein bei der Ecke im Boden- und Deckenbereich eingebaut. Diese soll dabei helfen, die Wärme aus dem Raum hinter die Innendämmung und Richtung Balkenkopf weiterzuleiten.

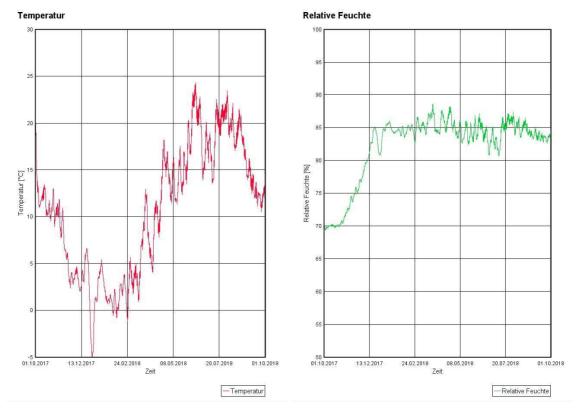


Bild 4.4.2 E Temperatur Balkenkopf Zürich

Bild 4.4.2 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

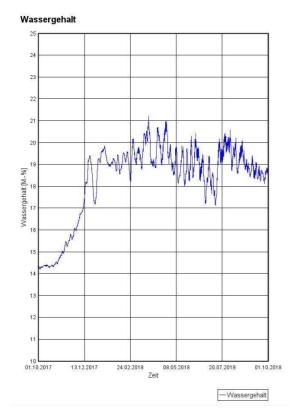


Bild 4.4.2 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.4.2 E bis 4.4.2 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Holzfaserplatte und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen -5 und 24 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang im Mittel bei 85 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich zwischen 19 - 21 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch und es zeigt sich kein signifikanter Vorteil durch die künstliche Wärmebrücke.

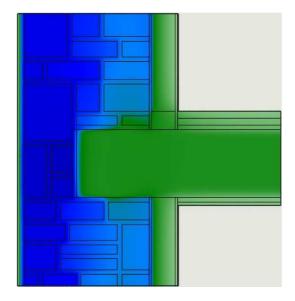


Bild 4.4.2 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

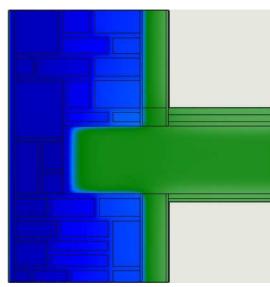


Bild 4.4.2 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

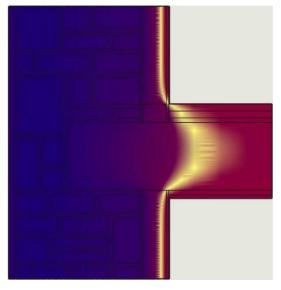


Bild 4.4.2 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

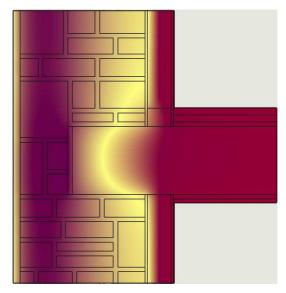


Bild 4.4.2 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Auch für Davos zeigt sich kein signifikanter Unterschied in der Feuchte der Wand. Lediglich im Bereich der Wärmebrücke ist es etwas trockener, durch das Eindringen der Wärme. Bei der Temperatur ist zu erkennen, dass durch die künstliche Wärmebrücke die Oberflächentemperatur in der Ecke des Bodens im Winter etwas kälter wird. Dies kann unter Umständen bereits zu einem mikrobiellen Befall führen und muss bei einer solchen Konstruktion genauestens geprüft werden.

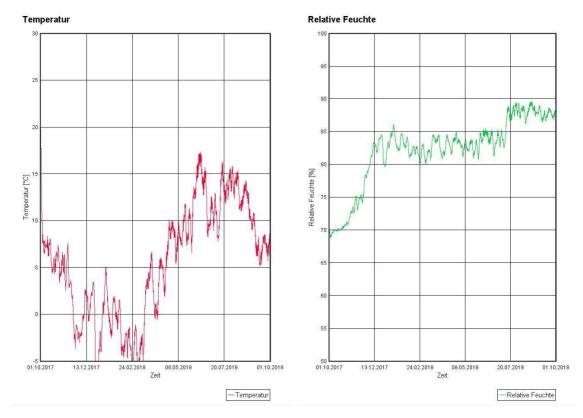


Bild 4.4.2 L Temperatur Balkenkopf **Davos**

Bild 4.4.2 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

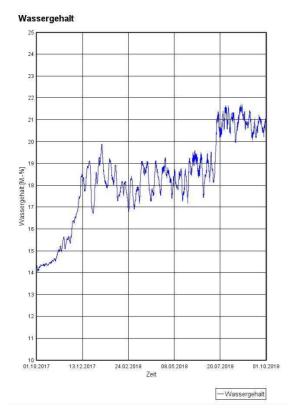


Bild 4.4.2 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.4.2 L bis 4.4.2 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Holzfaserplatte und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen -7,5 bis 17 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich zwischen 80 - 85 %. Bei rund ¼ der Zeit zwischen 85 – 90%. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%. Für rund 1/4 der Zeit aber oberhalb 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind bereits kritisch.

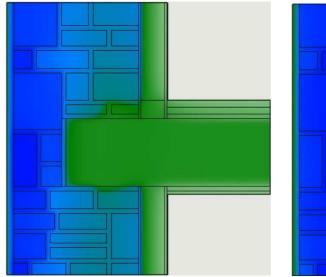


Bild 4.4.2 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

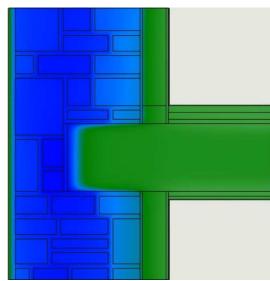


Bild 4.4.2 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

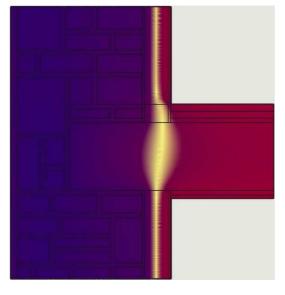


Bild 4.4.2 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

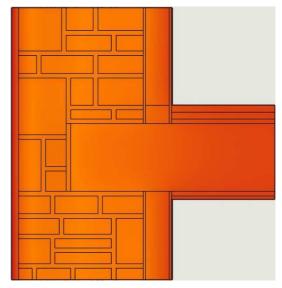


Bild 4.4.2 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Locarno zeigt ein gleiches Verhalten im Bereich der künstlichen Wärmebrücke wie Zürich und Davos. Das heisst, das Anbringen einer künstlichen Wärmebrücke ist nicht zielführend und hat sogar einen Einfluss auf die minimale innere Oberflächentemperatur in der Ecke.

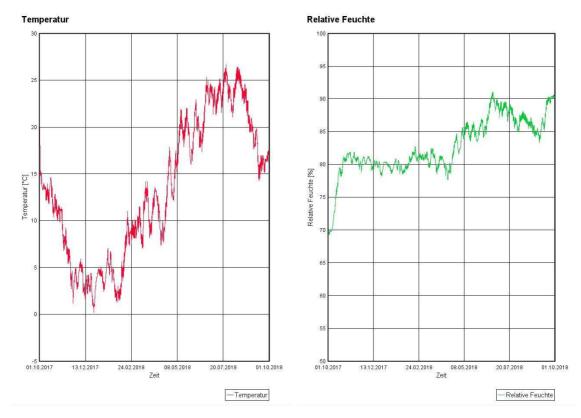
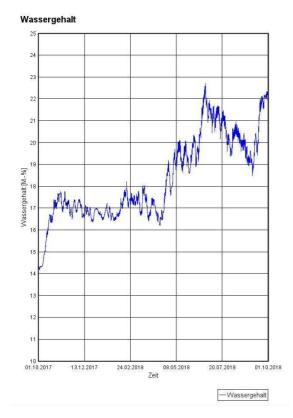


Bild 4.4.2 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.4.2 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.4.2 S bis 4.4.2 U zeigen die



Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Holzfaserplatte und Wärmebrücke. Die Temperatur schwankt zwischen 0 bis 26 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst bei 80 % und steigt ab der zweiten Jahreshälfte bis knapp 90 %. Der Wassergehalt liegt für ca. 1/3 des Jahres über 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind kritisch.

Bild 4.4.2 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

4.4.3 Holzfaserplatte und Temperierung mit aufheizbarer Farbe

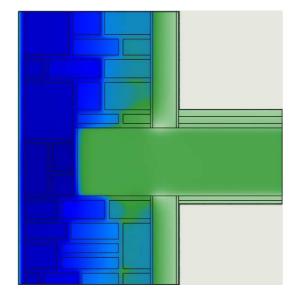


Bild 4.4.3 A rel. Feuchteprofil am 31.1. Zürich

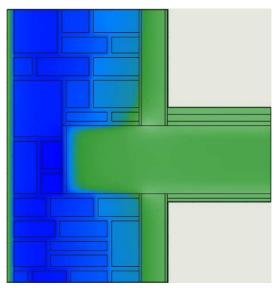


Bild 4.4.3 B rel. Feuchteprofil am 31.7. Zürich

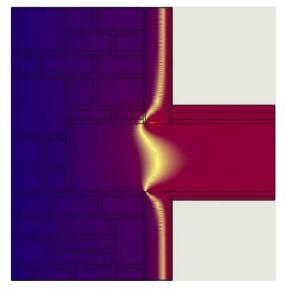


Bild 4.4.3 C Temperaturprofil am 31.1. Zürich

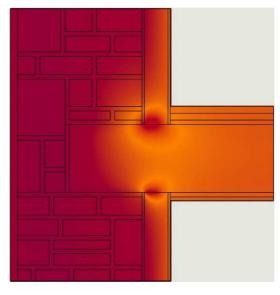


Bild 4.4.3 D Temperaturprofil am 31.7. Zürich

In den Eckbereichen des Bodens und der Decke wurde ein ca. 60 mm breiter Streifen einer neuartigen aufheizbaren Farbe simuliert. Dabei wurde die Annahme getroffen, dass ab 1. November während den Wintermonaten mit 5 W/m und während dem Rest des Jahres mit 2.5 W/m geheizt. Dieser Wert wurde deshalb zugrunde gelegt, um in diesen Bereich Temperaturen grösser als 35 °C zu vermeiden. Weil bei langanhaltenden höheren Temperaturen Schäden an Baustoffen nicht ausgeschlossen werden können. Man sieht, dass es in den Eckbereichen dadurch trockener bleibt (grün).

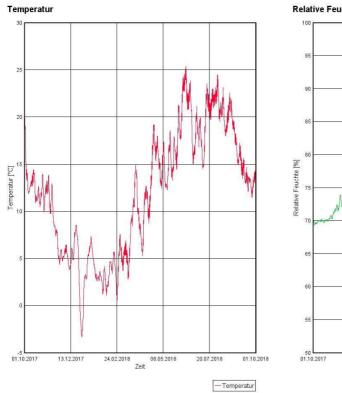


Bild 4.4.3 E Temperatur Balkenkopf Zürich

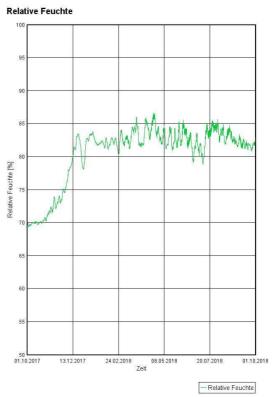


Bild 4.4.3 F rel. Feuchte Balkenkopf Zürich

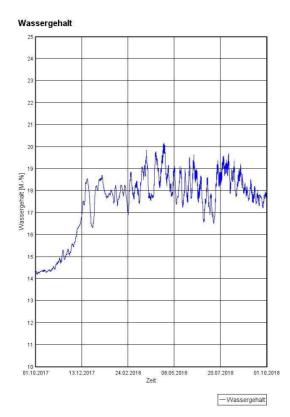


Bild 4.4.3 G Wassergehalt Balkenkopf Zürich

Die Bilder 4.4.3 E bis 4.4.3 G zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Zürich mit Holzfaserplatte und Heizfarbe. Die Temperatur schwankt zwischen -3 bis 25 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zwischen 80 - 86 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 20 M.-%.

Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf können durch eine Beheizung verbessert werden.

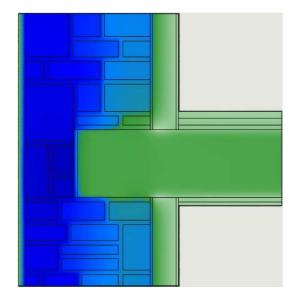


Bild 4.4.3 H rel. Feuchteprofil am 31.1. Davos

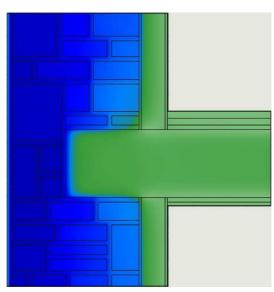


Bild 4.4.3 I rel. Feuchteprofil am 31.7. Davos

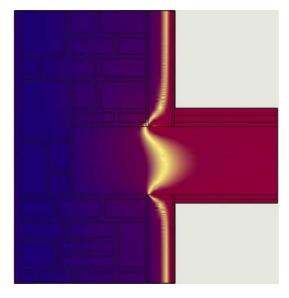


Bild 4.432 J Temperaturprofil am 31.1. Davos

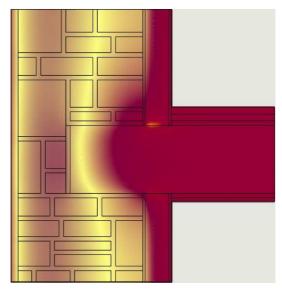


Bild 4.4.3 K Temperaturprofil am 31.7. Davos

Im beheizten Eckbereich ist erwartungsgemäss die Feuchte tiefer als ohne Beheizung. Die taupunktbedingte kritische Temperatur (gelber Bereich) ist mehr in das Wandinnere verschoben.

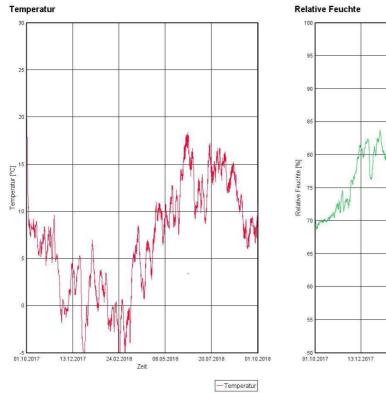


Bild 4.4.3 L Temperatur Balkenkopf Davos

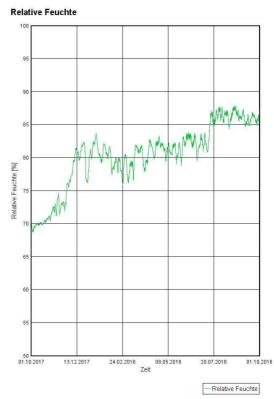


Bild 4.4.3 M rel. Feuchte Balkenkopf Davos

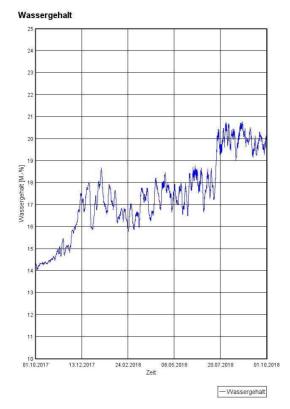


Bild 4.4.3 N Wassergehalt Balkenkopf Davos

Die Bilder 4.4.3 L bis 4.4.3 N zeigen die Temp., rel. Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für Davos mit Holzfaserplatte und Heizfarbe. Die Temperatur schwankt zwischen -7 bis 18 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang mehrheitlich unter 85 %. Bei rund 1/5 der Zeit zwischen 85 – 90 %. Der Wassergehalt liegt mehrheitlich unter 19 M.-%. Für rund 1/5 der Zeit aber oberhalb 20 M.-%. Die hygrothermischen Bedingungen am Balkenkopf sind immer noch leicht kritisch.

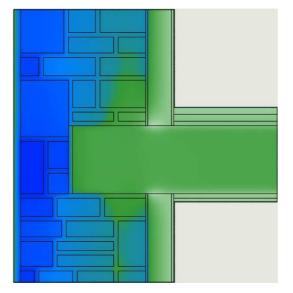


Bild 4.4.3 O rel. Feuchteprofil am 31.1. Locarno

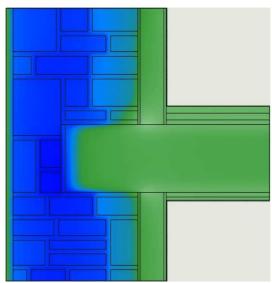


Bild 4.4.3 P rel. Feuchteprofil am 31.7. Locarno

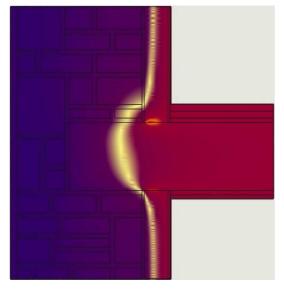


Bild 4.4.3 Q Temperaturprofil am 31.1. Locarno

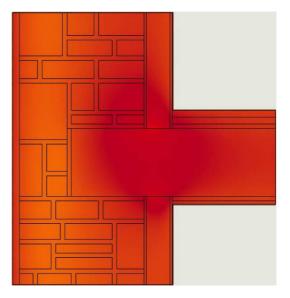


Bild 4.4.3 R Temperaturprofil am 31.7. Locarno

Im Bild 4.4.3. O sieht man deutlich den Einfluss der Heizfarbe auf die Feuchte in den Eckbereichen ober und unterhalb des Balkens und zwar im Winter deutlicher als im Sommer (Bild 4.4.3 P). Ähnlich verhält es sich auch mit der Temperaturverteilung. Der taupunktbedingte kritische Bereich ist mehr nach aussen verlagert (Bild 4.4.3. Q).

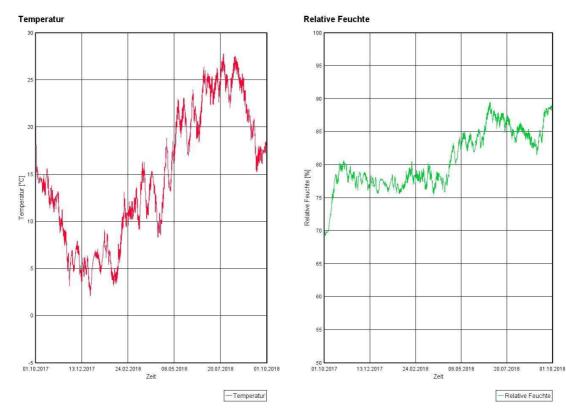


Bild 4.4.3 S Temperatur Balkenkopf Locarno

Bild 4.4.3 T rel. Feuchte Balkenkopf Locarno

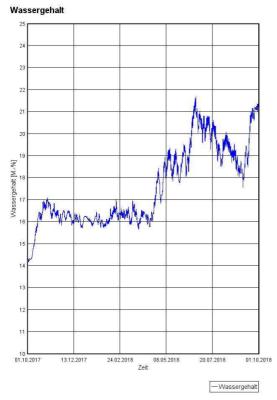


Bild 4.4.3 U Wassergehalt Balkenkopf Locarno

Die Bilder 4.4.3 S bis 4.4.3 U zeigen die Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt am Balkenkopf im Jahresverlauf für den Standort Locarno mit Holzfaserplatte und Heizfarbe. Die Temperatur schwankt zwischen 3 und 27 °C. Die relative Feuchte bleibt nach einem Einschwingvorgang zunächst unter 80 % und ab der zweiten Jahreshälfte bis auf 89 %, trocknet aber wieder aus. Der Wassergehalt liegt die Hälfte des Jahres unter 17 M.-% steigt aber bis über 21 M.-%. In der zweiten Jahreshälfte sind die Werte kritisch.

5 Arbeitspaket 4: Hygrothermische Raumsimulation zur Bestimmung des optimalen Raumklimas

Es wurden die Temperaturen und relativen Feuchten in einem Modellraum mit unterschiedlichen Dämmstoffen als Innendämmung für die drei Klimastandorte berechnet. Bei der Simulation steht das Zusammenspiel zwischen den Komfortansprüchen an das Raumklima von Mensch und Kulturgut im Vordergrund.

5.1 Randbedingungen

Es wurde ein quaderförmiges Gebäude mit nur einer Fensterfassade (Ausrichtung Nord) und einem Wandaufbau gemäss Kapitel 3.3 ausgewählt (siehe unten).

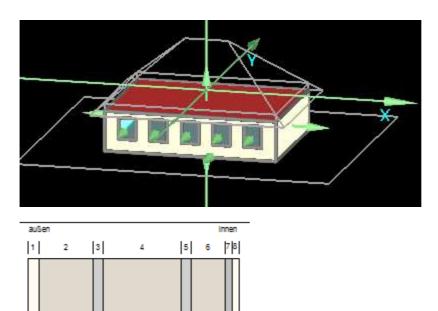


Bild 5.1 A Modell des untersuchten Raumes inkl. Wandaufbau

Nr.	Material/Schicht (außen> innen)	ρ [kg/m³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	Dicke [m]	Farbe
1	Kalkputz (w-Wert: 3,0 kg/m2h0,5)	1600	850	0.7	0.03	
2	Kalkstein (Dichte 2478)	2478	850	1.7	0.16	
3	Hydraulischer Kalkmörtel; grober Zuschlag entriegelt	1600	850	0.7	0.03	
4	Kalkstein (Dichte 2478)	2478	850	1.7	0.23	
5	Hydraulischer Kalkmörtel; grober Zuschlag entriegelt	1600	850	0.7	0.03	
6	Kalkstein (Dichte 2478)	2478	850	1.7	0.1	
7	Aspen Aerogels - Spaceloft Grey ohne 150 °C	146	1000	0.014	0.02	
8	Kalkputz (w-Wert: 3,0 kg/m2h0,5)	1600	850	0.7	0.02	

Tabelle 5.1 A Wandaufbau der betrachteten 60cm dicken Mauer inkl. bauphysikalischer Parameter

Um einen möglichst deutlichen Einfluss der Feuchtespeicherung zu erkennen, wurden zusätzliche Innenwände (25 m² Backsteinwand mit Gipsplatte auf beiden Seiten) in dem Modell berücksichtigt.

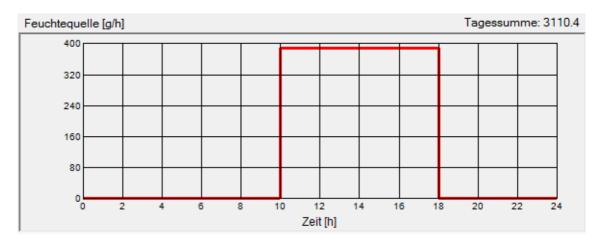


Bild 5.1 B Das im Modell berücksichtigte zeitliche Profil der Feuchtequelle

Als Feuchtequelle wird das Profil eines Ausstellungsraumes angenommen (Bild 5.1. B). Dies bedeutet eine Feuchteproduktion von ca. 390 g/h zwischen 10 bis 18 Uhr.

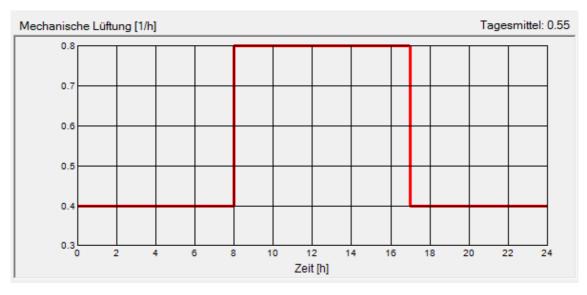


Bild 5.1. C Der im Modell berücksichtigte Verlauf der mechanischen Lüftung

Im Modell wurde keine natürliche Lüftung über Undichtigkeiten berücksichtigt. Der Verlauf der mechanischen Lüftung ist im Bild 5.1 C dargestellt. Dies entspricht einem Lüftungsprofil des obigen Ausstellungsraums und entspricht einer durchschnittlichen Luftwechselrate von 0.55 1/h.

5.2 Innendämmung mit Aerogel Matte <u>ohne</u> Feuchtespeicherputz

In den folgenden Unterkapiteln werden die Behaglichkeitsdiagramme mit Aerogel Matte und ohne Feuchtespeicherputz (nach Fanger EN ISO 7730:2006) für die drei Klimastandorte dargestellt. Dies jeweils für die Nord- und Südausrichtung.

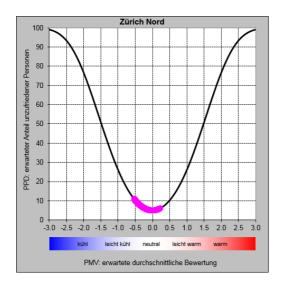
Die Randbedingungen für die Behaglichkeitsberechnungen sind in Tabelle 5.2 A zusammengefasst:

Luftgeschwindigkeit	0.1 m/s
Bekleidung	0.7 clo
Personentätigkeit	1.6 met
Anfangswert der Temperatur	20 °C
Anfangswert der relativen Luftfeuchte	55 %

Tabelle 5.2. A Randbedingen für die Behaglichkeitsberechnung

5.2.1 Behaglichkeit für Personen

Das Behaglichkeitsdiagramm für Zürich Nord zeigt eine mehrheitlich hohe Zufriedenheit (neutral bis leicht warm), allerdings mit der Tendenz hin zu leicht kühl (10 - 12%). Das Behaglichkeitsdiagramm für Zürich Süd unterscheidet sich praktisch nicht von dem für Zürich Nord.



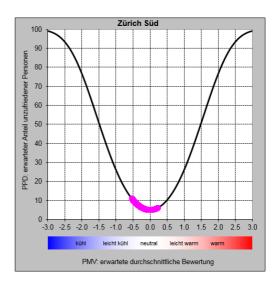
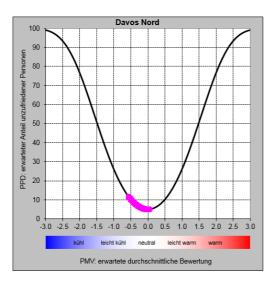


Bild 5.2.1 A Behaglichkeitsdiagramme für Personen Zürich Nord und Süd

Erwartungsgemäss zeigt das Behaglichkeitsdiagramm für Davos Nord die Empfindung eher bei neutral bis leicht kühl mit Mehrheit im leicht kühlen Bereich. Der Unterschied von Davos Süd zu Davos Nord liegt darin, dass die Datenpunkte im PMV Bereich -0,7 bis 0 liegen. Das bedeutet mehrheitlich eine leicht kühle Empfindung der Besucher.



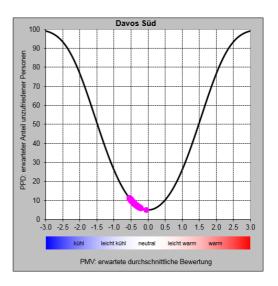
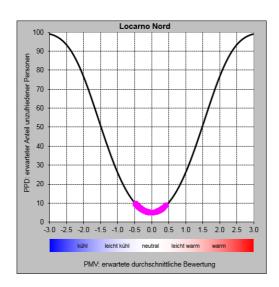


Bild 5.2.1 B Behaglichkeitsdiagramme für Personen Davos Nord und Süd

Für Locarno Nord ergibt sich eine symmetrisch optimale Verteilung der Datenpunkte um den PMV Wert 0. Das heisst das Empfinden wird im Mittel als neutral empfunden. Für Locarno Süd zeigt sich eine Tendenz zu höheren positiven PMV Werten, was gleichbedeutend ist mit einem wärmeren Empfinden.



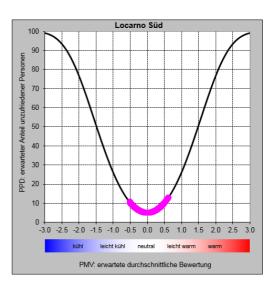


Bild 5.2.1 C Behaglichkeitsdiagramme für Personen Locarno Nord und Süd

5.2.2 Risikobereich für Holz und Leinwand

Für Kunstgegenstände aus Holz und Leinwand sind die idealen Temperatur- und Feuchtebereiche der Innenluft nicht immer deckungsgleich mit den Behaglichkeitsanforderungen für Menschen [3]. Daher werden im Folgenden die berechneten Werte aus Kapitel 5.2.1 mit den Optimalbereich für Holz und Leinwand verglichen.

Bild 5.2.2 A zeigt den Risikobereich für Zürich Nord. Durch das Festlegen einer unteren Grenze für die Temperatur liegen alle Datenpunkte rechts dieser Grenzline. Für Zürich Nord sind die Daten mehrheitlich ausserhalb des Optimalbereichs und zum Teil über der Grenzlinie für mikrobielles Wachstum.

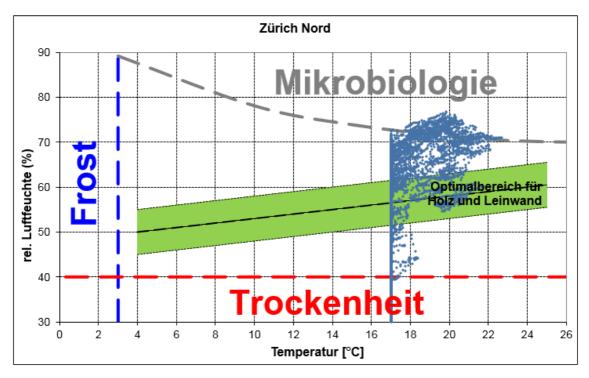


Bild 5.2.2 A Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Zürich Nord

Für Zürich Süd (Bild 5.2.2 B) zeigen sich mehr Datenpunkte im Optimalbereich. Allerdings bleibt das mikrobielle Wachstumsrisiko erhalten.

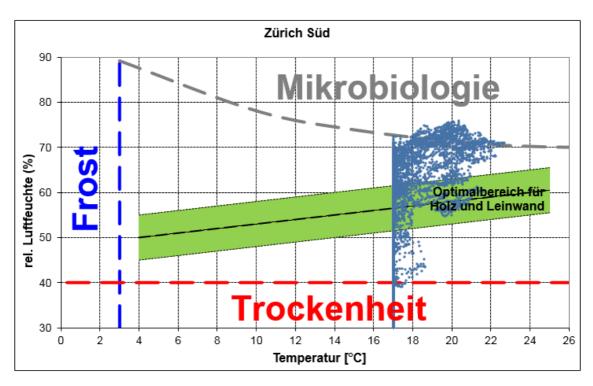


Bild 5.2.2 B Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Zürich Süd

Davos Nord (Bild 5.2.2 C) zeigt erwartungsgemäss ein ganz anderes Bild. Ein kleiner Teil der Daten liegt im grünen Optimalbereich, aber die grosse Mehrheit im eher zu trockenen Bereich. Ein zu trockenes Klima kann u.a. zu Rissen in Holzmaterialien führen.

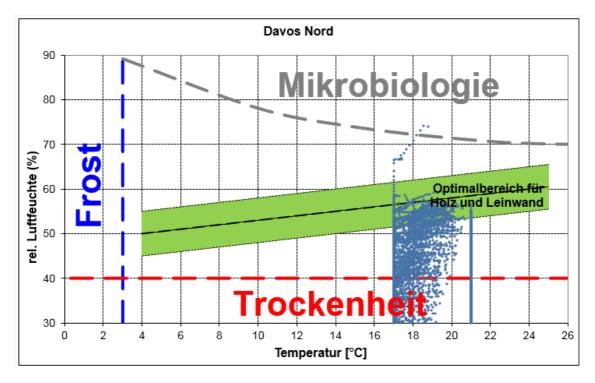


Bild 5.2.2 C Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Davos Nord

Davos Süd zeigt hingegen den grössten Teil der Datenpunkte im Optimalbereich. Wenige Punkte sind auch hier im trockenen Bereich. Dies zeigt wie wichtig die Orientierung der Fensterflächen ist.

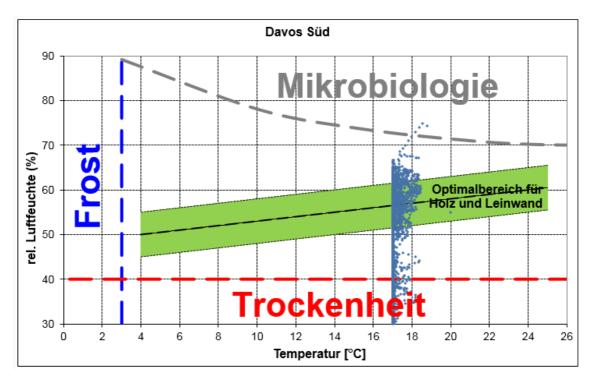


Bild 5.2.2 D Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Davos Süd

Das warme und feuchte Klima von Locarno verschiebt die Datenpunkte mehrheitlich in den Bereich des mikrobiellen Wachstums. Rund ein drittel der Punkte bleibt unterhalb dieser Grenzlinie (Bild 5.2.2 E).

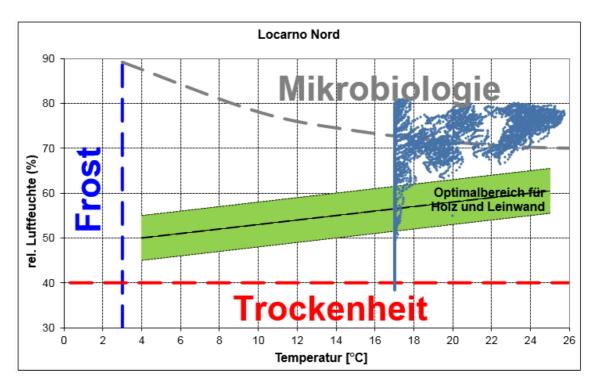


Bild 5.2.2 E Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Locarno Nord

Für Locarno Süd zeigt sich der Effekt bei einer Änderung der Ausrichtung der Fenster in einer Verschiebung der Datenpunkte in Richtung Optimalbereich. Noch eine Drittel der Datenpunkte befindet sich oberhalb der Grenzlinie für mikrobielles Wachstum.

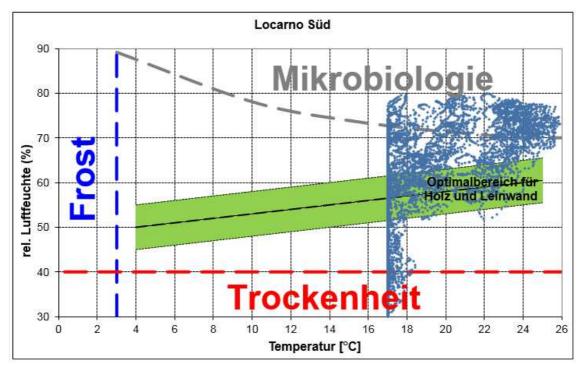


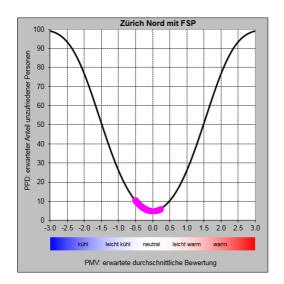
Bild 5.2.2 F Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Locarno Süd

5.3 Innendämmung mit Aerogel Matte <u>mit</u> Feuchtespeicherputz

In den nachfolgenden Berechnungen wurden die oben genannten Innenwände (25 m²) mit einem Feuchtespeicherputz belegt. Dessen Auswirkung auf die Temperaturen und vor allem relativen Luftfeuchten im Raum werden sowohl für Personen als auch Kulturgut für die drei Standorte Zürich, Davos und Locarno gezeigt. Dies lässt den direkten Vergleich zu den Simulationen aus Kapitel 5.2 zu.

5.3.1 Behaglichkeit für Personen

Für Zürich Nord zeigen sich keine Unterschiede in der thermischen Behaglichkeit nach dem Anbringen des Feuchtespeicherputzes im Vergleich zu Bild 5.2.1 A. Dieser Sachverhalt ändert sich auch nicht für Zürich Süd.



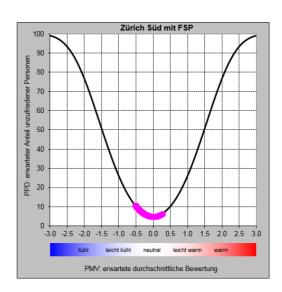
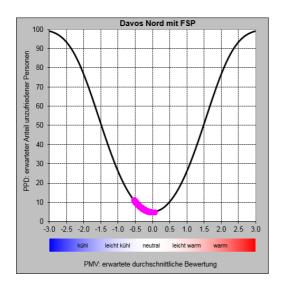


Bild 5.3.1 A Behaglichkeitsdiagramme für Personen Zürich Nord und Süd mit Feuchtespeicherputz

Auch für Davos Nord bringen die zusätzlichen Feuchtespeicherschichten keine Änderung in der thermischen Behaglichkeit. Das Temperaturempfinden bleibt bei leicht kühl. Auch für Davos Süd ergibt sich durch den Einsatz des Feuchtespeicherputzes für die thermische Behaglichkeit keinen sichtbaren Effekt.



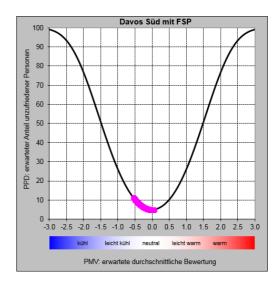
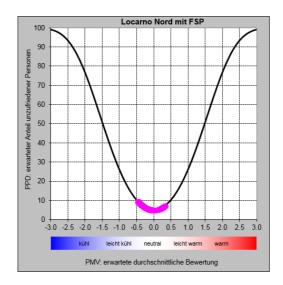


Bild 5.3.1 B Behaglichkeitsdiagramme für Personen Davos Nord und Süd mit Feuchtespeicherputz

Der Feuchtespeicherputz kann seine Wirkung erst bei höheren Feuchten entfalten. Für Locarno ist die Raumluftfeuchte ziemlich hoch, was den Einfluss des Feuchtespeicherputzes sichtbar macht. Für Locarno Nord komprimieren sich Datenpunkte daher in einen engeren, neutraleren Bereich. Für Locarno Süd zeigt sich auch eine Komprimierung der Datenpunkte auf einen kleineren, symmetrischen neutralen Bereich. Dies ist der direkte Einfluss des Feuchtespeicherputzes.



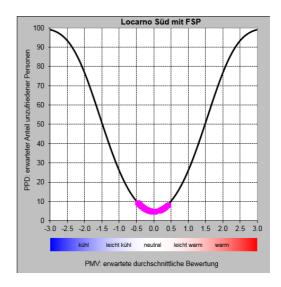


Bild 5.3.1 C Behaglichkeitsdiagramme für Personen Locarno Nord und Süd mit Feuchtespeicherputz

5.3.2 Risikobereich für Holz und Leinwand

Der Risikobereich für mikrobielles Wachstum ging durch den Einsatz des Feuchtespeicherputzes für Zürich Nord zurück. Mehr Datenpunkte wurden in den Optimalbereich verschoben.

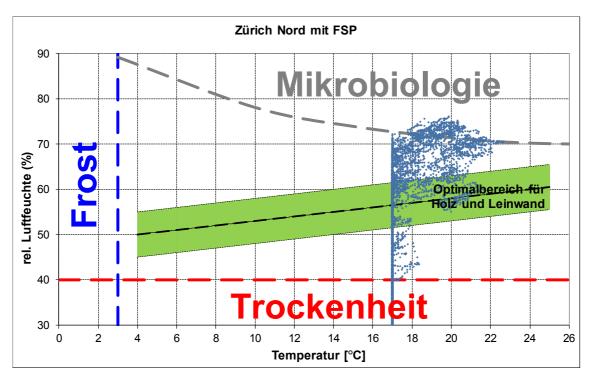


Bild 5.3.2 A Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Zürich Nord mit Feuchtespeicherputz

Zürich Süd unterscheidet sich von Zürich Nord nur marginal. Im Vergleich jedoch zu Bild 5.2.2 B ohne Feuchtespeicherputz, zeigt sich eine deutliche Verschiebung der Datenpunkte in unkritische Bereiche.

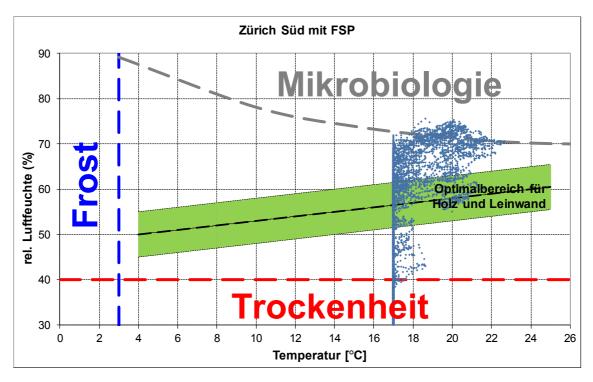


Bild 5.3.2 B Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Zürich Süd mit Feuchtespeicherputz

Die Verteilung der Datenpunkte ist für Davos Nord enger, aber innerhalb desselben warmtrockenen Bereiches. Durch den Feuchtespeicherputz kann aufgrund des trockenen Aussenklimas, der Feuchtegehalt der Raumluft nicht angehoben werden.

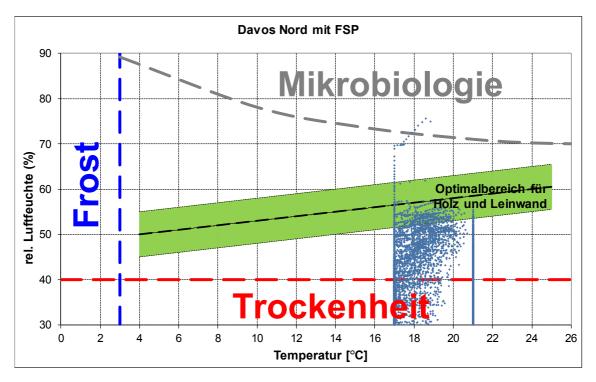


Bild 5.3.2 C Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Davos Nord mit Feuchtespeicherputz

Die oben gemachte Aussage gilt sogar noch etwas mehr für Davos Süd.

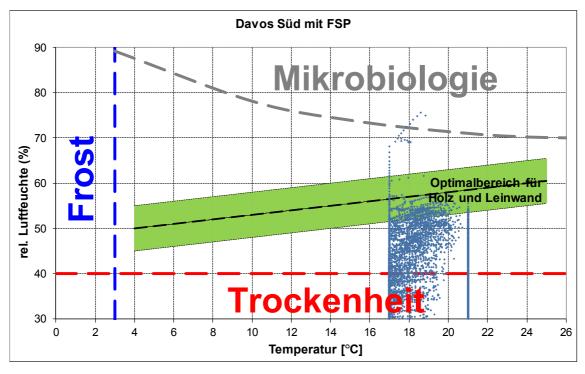


Bild 5.3.2 D Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Davos Süd mit Feuchtespeicherputz

Für Locarno Nord wird der Einsatz des Feuchtespeicherputzes deutlich. Hierbei ist die Aufnahmefähigkeit des Feuchtespeicherputzes zu beachten, da bei Sättigung wieder Datenpunkte im mikrobiellen Bereich auftreten können. Es muss bei Feuchtespeichermaterialien immer darauf geachtet werden, dass sich diese durch Lüftungsvorgänge auch wieder entladen können.

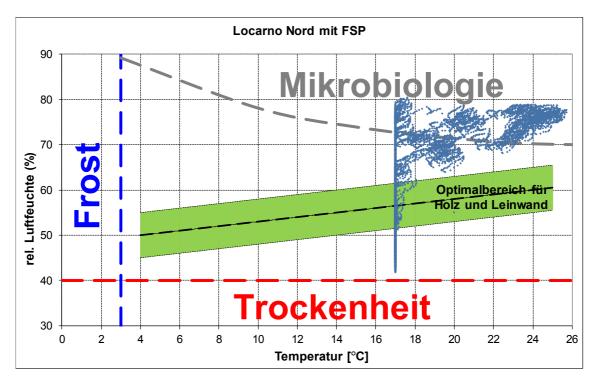


Bild 5.3.2 E Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Locarno Nord mit Feuchtespeicherputz

Locarno Süd hat aufgrund der höheren Raumtemperatur mehr Datenpunkte im Optimalbereich als Locarno Nord. Die Datenpunkte sind mit Feuchtespeicherputz in einem engeren Temperatur- und relativen Luftfeuchteband (Vergleich mit Bild 5.2.2 F), aber viele Punkte liegen trotzdem im mikrobiellen Bereich.

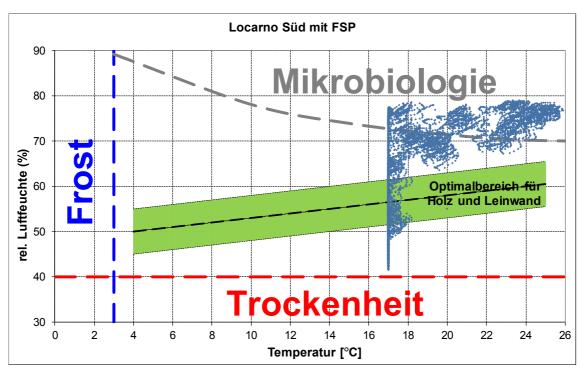


Bild 5.3.2 F Raumklima und Risikobereich für Holz und Leinwand Locarno Süd mit Feuchtespeicherputz

Literaturverzeichnis

- [1] Institut für Bauforschung e.V. Hannover: U-Werte alter Bauteile, 1. Auflage (2004), Fraunhofer IRB Verlag
- [2] Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen. www.wufi.de
- [3] Thomson, G. (1986): The Museum Environment. 2. Auflage London

Danksagung

Es ist ein Anliegen der Autoren, an dieser Stelle sich recht herzlich bei der Stiftung zur Förderung der Denkmalpflege für die grosszügige Gewährung der finanziellen Mittel zur Erstellung dieses Forschungsberichtes zu bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch Frau Dr. Hardegger für die freundliche und hilfreiche Begleitung des Projektes.

Für die zur Verfügungstellung der Baupläne des Hauses Rünenberg bedanken wir uns recht herzlich beim Architekturbüro Christoph Ecker GmbH in Oltingen. Für die Bereitstellung von historischem Baumaterial bedanken wir uns bei der Kantonalen Denkmalpflege Basel-Landschaft.

Anhang

