



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

WEITERENTWICKLUNG, QS UND LANGZEITVERHALTEN VON VAKUUM- ISOLATIONSPANEelen MIT MECHANISCHEM SCHUTZ

Ausgearbeitet durch

Hans Simmler, dipl. phys., Dr. phil. II
Leiter Labor Bauphysik
Empa Abteilung Bautechnologien
Ueberlandstr. 129, CH-8600 Dübendorf

Industriepartner:

ZZ Wancor AG, CH-8105 Regensdorf
Porextherm GmbH, D-87437 Kempten

Impressum

Datum: 19. Dezember 2008

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Energie in Gebäuden

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Projektnummer: 101478

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Auftragnehmer

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Überlandstr. 129
CH-8600 Dübendorf
Fon +41 44 823 5511
Fax +41 61 467 45 43
E-Mail @fhnw.ch
Internet <http://www.fhnw.ch>

Industriepartner

ZZ Wancor AG
Althardstrasse 5
CH-8105 Regensdorf
Kontaktpersonen: Bruno Arnold, Pierre Jelowcan

Porextherm Dämmstoffe GmbH
Heisinger Straße 8
D-87437 Kempten
Kontaktpersonen: Gregor Erbenich, Hans-Frieder Eberhardt

Autor

Dr. Hans Simmler, unter Mitarbeit von
Dr. Samuel Brunner, Roger Vonbank, Rudi Blessing, Bruno Binder
Empa Abteilung Bautechnologien
Ueberlandstr. 129
CH-8600 Dübendorf

Danksagung

Die Autoren danken allen Beteiligten, die zur Arbeit an diesem Projekt beigetragen haben, insbesondere dem Bundesamt für Energie und den Industriepartnern für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit. Ein besonderer Dank geht an Bruno Arnold, der sich seit vielen Jahren mit Vakuumisolationspaneelen in Bauanwendungen beschäftigt und stets die Zusammenarbeit mit der Empa gesucht hat.

Zusammenfassung

Im Hochbau werden zunehmend Vakuumisolationspaneele (VIP) auf der Basis eines mikroporösen Kernmaterials mit niedrigem Innendruck und gasdichter Hülle eingesetzt. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit ermöglicht kleine Dämmsschichtdicken und eröffnet somit ein grosses Anwendungspotenzial für neue architektonische Lösungen im Niedrigenergie- und auch im Sanierungsbereich. Nach der Erarbeitung von Grundlagen zu Materialeigenschaften, Alterungsverhalten und Anwendungstechnik in IEA Annex 39 werden im aktuellen Projekt zwei Bauanwendungen mit VIP-Isolation untersucht: Bodenisolation eines Kühl-/Tiefkühlraums und Flachdachisolation, die bisher häufigste VIP-Anwendung in der Gebäudehülle.

Ab Juli 2005 und im Jahr 2006 wurde die Bodendämmung des Kühl-/Tiefkühlraums im Neubau „Forum Chriesbach“ der EAWAG in Dübendorf geplant, eingebaut und instrumentiert. Neben Temperatur- und Feuchtemessstellen wurden erstmals in dieser Anwendung spezielle Sensoren installiert, welche die Messung des Gasdrucks in den eingebauten VIP unter dem Unterlagsboden ermöglichen. Erste Resultate der Innendruckmessungen wurden im Jahresbericht 2006 gezeigt. Im Berichtsjahr wurden diese Messungen fortgesetzt und erlauben nun eine zuverlässige Bestimmung der jährlichen Innendruckzunahme und eine Langzeitprognose der Wärmeleitfähigkeit.

In einer zweiten Langzeitstudie wurden seit 2004 laufende Messungen an einer Flachdachkonstruktion in Regensdorf weiter geführt. Die aktualisierten Daten zeigen die intakte Funktion der VIP-Dämmung. Die beobachteten Alterungseffekte liegen im erwarteten Bereich und erlauben Modellberechnungen der Wärmeleitfähigkeit für die Referenzdauer von 25 Jahren. In Verbindung mit dem ETH-Bereichsprojekts CCEM-CH „Advanced Building Retrofit“ wurden zudem zusammen mit Industriepartnern Konzepte für VIP-gedämmte Fassaden und zum Einsatz von VIP in vorgefertigten hochdämmenden Fassadenementen entwickelt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Hintergrund.....	5
1.2	Untersuchungsmethoden	6
1.3	Alterungseigenschaften bei Temperatur-/Feuchteinwirkung.....	7
1.4	Lebensdauerabschätzung in Bauteilen	8
1.5	Ziele des Projekts.....	10
2	Messprojekt Flachdach Regensdorf	11
2.1	Versuchsaufbau	11
2.2	Monitoring-Resultate	12
2.3	Vergleich mit Labordaten	12
2.4	Lebensdauerabschätzung	13
3	Messprojekt Kühl-/Tiefkühlraum Chriesbach.....	14
3.1	Einbau und Instrumentierung der VIP-Bodenisolierung	14
3.2	Innendruckmessung: Messprinzip, Montage und Kalibration	16
3.3	Ergebnisse.....	17
4	Entwicklung von VIP-Bauteilen.....	18
4.1	Flächenschutz	18
4.2	Dämmelemente mit integriertem VIP	19
4.3	VIP-Fassadendämmung.....	20
5	Bewertung und Ausblick	21
6	Referenzen	22

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Seit rund zehn Jahren werden Vakuumisolationspaneele (VIP) für Bauanwendungen entwickelt und optimiert. Diese Hochleistungsdämmssysteme eröffnen interessante neue Möglichkeiten für Platz sparende und gleichzeitig hoch wärmedämmende Konstruktionen für die Gebäudehülle [1].

Produkte verschiedener Hersteller sind verfügbar und werden in der Schweiz bisher vor allem für Terrassendämmungen eingesetzt (Abb. 1), damit der Wohnraum und der aussen liegende Terrassenbereich mit darunter liegendem beheiztem Raum niveaugleich ausgeführt werden kann. Die installierte Fläche beträgt bereits einige 10'000 m².



Abbildung 1: Dämmung einer Terrasse mit VIP. Als Schutzschichten werden beidseitig dünne konventionelle Dämmplatten oder Bautenschutzmatten eingesetzt.

Aktuelle VIP für den Baubereich bestehen heute aus einer mikroporösen Kernplatte aus gepresstem Kieselsäurepulver (SiO_2), die bei einem Unterdruck von weniger als 1 mbar in eine weitgehend gasdichte Hülle eingeschweißt wird (Abb. 2). Durch den niedrigen Innendruck und die sehr feine Porenstruktur wird die Wärmeleitung durch Gas und Infrarot-Strahlung praktisch vernachlässigbar. Die Wärmeleitfähigkeit des trockenen, evakuierten Kernmaterials erreicht einen Wert von unter 0.004 W/(m K), also etwa ein Achtel von konventionellen Wärmedämmstoffen. Eine sehr dichte Umhüllung wird durch laminierte Aluminiumfolie (Al-Schichtdicke > 5 μm) erreicht. Zur Vermeidung des Wärmebrückenproblems im Randbereich [2] werden heute meist mehrfach laminierte Kunststofffolien mit 2 bis 3 Metallisierungsschichten (Al-Schichtdicken < 0.1 μm) verwendet, deren Ränder durch aufeinander liegende PE-Schichten thermisch verschweisst werden. Diese Hüllmaterialien sind bei üblichen Klimabedingungen stabil, können aber durch dauernde Einwirkung von Temperaturen ab etwa 80 °C und hoher Feuchtigkeit geschädigt werden [3],[4].

Obwohl heutige Mehrschichthüllen sehr gute Sperreigenschaften aufweisen, ist mit einer mehr oder weniger langsamen Zunahme des Innendrucks und einer Befeuchtung des Kernmaterials zu rechnen. Dies beruht einerseits auf der natürlichen Permeabilität von beschichteten Kunststofffilmen und andererseits auf Defekten, die durch Falten, Knickstellen und Schweißnähte hauptsächlich im Randbereich entstehen. Die "Gasleckraten" sind von den Umgebungsbedingungen – d.h. zeitlicher Verlauf von Temperatur und Wasserdampfdruck – und dem Paneelformat abhängig und führen zu einem An-

stieg der Wärmeleitfähigkeit über einen grösseren Zeitraum. Wie gross diese Effekte sind und welche Langzeiteigenschaften sich damit ergeben ist noch wenig bekannt.

Im Gegensatz zu „Vakuumprodukten“ im Konsumbereich werden von einem VIP in der Gebäudehülle Einsatzzeiten von mehreren Jahrzehnten erwartet. Deshalb ist für eine erfolgreiche Umsetzung der VIP-Technologie im Baubereich die Frage der Alterung bzw. einer hinreichenden Lebensdauer von entscheidender Bedeutung. Eine wichtige Voraussetzung dazu ist, dass einwandfrei produzierte Paneele konstruktiv und handwerklich korrekt eingebaut werden, damit die relativ heikle Hülle nicht mechanisch belastet, durch Kratzer (scharfe Kanten, Sandkörner) geschädigt oder das Paneel gar belüftet wird. Während Frühhausfälle durch Produktionsmängel heute eher selten sind, ist die optimale Verarbeitung bis zum fertigen VIP-Bauteil – besonders bei direkter Anlieferung auf den Bauplatz – eine nicht-triviale Aufgabe, die durch eine gute Planung, Organisation und ausgebildete Fachleute gelöst werden kann.



Abbildung 2: Aufgeschnittenes VIP mit Hülle und Pulverkern aus pyrogener Kieselsäure.

Im folgenden werden einige Untersuchungsmethoden und Ergebnisse dieser temperatur- und feuchtebedingten Alterung kurz zusammengefasst, die in Zusammenarbeit mit Partnerinstituten hauptsächlich in IEA Annex 39 erarbeitet wurden [5].

1.2 Untersuchungsmethoden

Temperatur- / Feuchtebelastungsversuche bei statischen und teilweise bei zyklisch wechselnden Bedingungen (innerhalb der Herstellerspezifikation) werden in Klimaschränken und Klimaräumen durchgeführt. Dabei sollen mehrere Probekörper in mindestens zwei Abmessungen untersucht werden, um zuverlässige Resultate und Formateffekte bestimmen zu können.

Als wichtigste Größen sind der Feuchtegehalt und der Innendruck in Funktion der Zeit zu bestimmen. Für die Messung des absoluten Feuchtegehalts von VIP-Kernmaterial ist keine zerstörungsfreie Messung bekannt. Änderungen des Feuchtegehalts lassen sich jedoch einfach durch Wägung bestimmen. Da der Feuchtegehalt bei der Produktion in der Größenordnung von 0.1 Masse-% liegt, kann der Wert kurz nach der Anlieferung der Proben als ungefähr Null angenommen werden und hat keinen Einfluss auf das Feuchteaufnahmeverhalten, solange ein Sättigungseffekt (Annäherung der Wasserdampfdrücke innen und aussen) vernachlässigbar ist.

Für die Messung des Innendrucks gibt es kein standardisiertes Verfahren. Es wurde deshalb ein Messverfahren entwickelt, bei dem das VIP in einer evakuierbaren Kammer einem sinkenden Umgebungsdruck ausgesetzt wird. Beim Unterschreiten des Innendrucks beginnt sich die flexible VIP-Hülle aufzublasen oder abzuheben, was sich optisch beobachten lässt. Dazu werden mit Hilfe von Lasermesstechnik mehrere Positionen auf der VIP-Hülle in Funktion des Kammerdrucks aufgezeichnet und anschliessend mathematisch ausgewertet. Die Wiederholbarkeit wird damit etwa 0.1 mbar (Abb. 3).

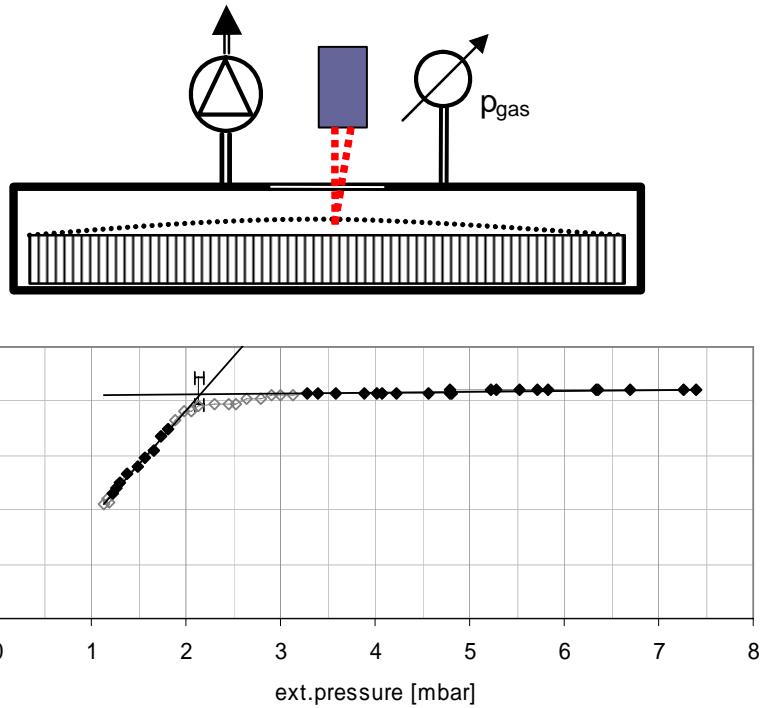


Abbildung 3: Messprinzip zur Bestimmung des Innendrucks (oben), Druck-/Distanzdiagramm zur Bestimmung des Innendrucks eines VIP (unten). Als Innendruck wird der Schnittpunkt der beiden linearisierten Bereiche identifiziert.

1.3 Alterungseigenschaften bei Temperatur-/Feuchteinwirkung

In verschiedenen Labors wurden Klimabelastungsreihen an VIP durchgeführt. An der Empa standen 20 mm dicke Probekörper mit den Abmessungen $25 \times 25 \text{ cm}^2$ (klein) und $50 \times 50 \text{ cm}^2$ (gross) zur Verfügung. In Abb. 4 ist der zeitliche Verlauf von Innendruck und Feuchtegehalt von kleinen Probekörpern eines Produkts mit 3-fach metallisierter Kunststoffhülle bei unterschiedlichen Klimabedingungen dargestellt. Bei $80^\circ\text{C} / 80\% \text{ r.F.}$ ist ein sehr rascher Anstieg beider Größen zu beobachten. Die Hülle ist für diesen Bereich klar ungeeignet. Bei zyklischem Wechsel ($8 \text{ Stunden } 80^\circ\text{C} / 80\% \text{ r.F.}, 4 \text{ Stunden } 25^\circ\text{C} / 50\% \text{ r.F.}$) ist der Anstieg noch rascher, was durch periodische Kondensationseffekte erklärbar ist. Bei 80°C und kleinem Wasserdampfdruck ist der Innendruckanstieg wesentlich kleiner, aber noch deutlich über 10 mbar pro Jahr. Der Feuchtegehalt bleibt praktisch konstant.

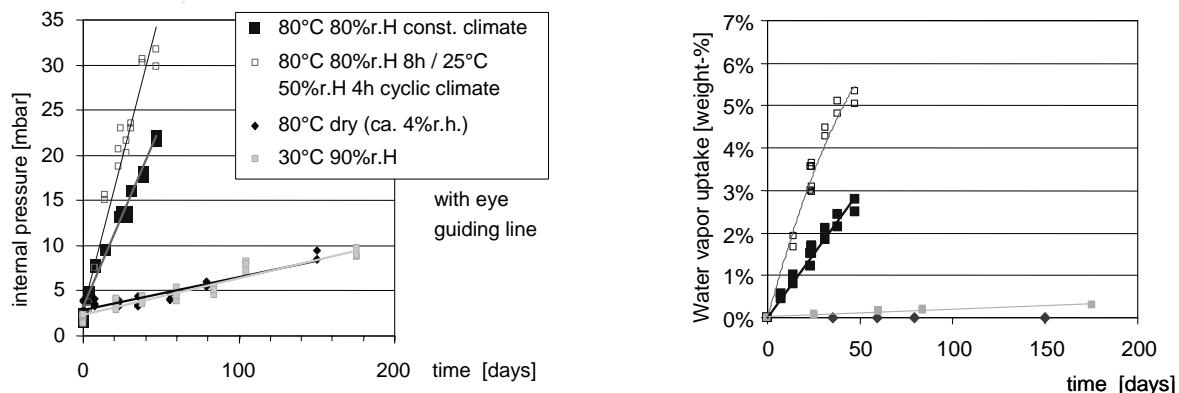


Abbildung 4: Zeitverlauf des Innendrucks (links) und des Feuchtegehalts (rechts) von VIP bei verschiedenen Klimabedingungen. Die Abmessungen sind $25 \times 25 \times 2 \text{ cm}^3$.

In Tababelle 1 sind jährliche Innendruck- / Feuchtegehaltsänderungen im Klima 23°C, 50% r.F. von zwei Produkten mit 3-fach metallisierter Kunststoffhülle (MF1, MF2) und eines Produkts mit laminierter Aluminiumfolie (AF) zusammengestellt. Innerhalb der Messunsicherheit zeigen die AF-Proben keine Änderung, während beide MF-Proben signifikante Zunahmen aufweisen. Die formatabhängigen Raten zeigen, dass die Gasdurchlässigkeit bei beiden Produkten nicht auf die Hauptflächen beschränkt ist.

Tabelle 1: Jährliche Zunahme von Innendruck und Feuchtegehalt verschiedener VIP-Produkte im Klima 23°C, 50% r.F.

Typ	Format cm	Innendruck p_a mbar / a	Feuchtegehalt X_{wa} Masse-% / a
AF	25x25x2	0.7	0.02%
	50x50x2	0.6	0.03%
MF1	25x25x2	3.3	0.15%
	50x50x2	1.8	0.10%
MF2	25x25x2	1.4	0.16%
	50x50x2	1.0	0.12%
Std.abweichung ca.		0.6	0.02%

Der jährliche Anstieg der Wärmeleitfähigkeit durch Innendruck- und Feuchtezunahme kann unter Vernachlässigung von Sättigungseffekten wie folgt abgeschätzt werden

$$\lambda_a \cong \lambda_p \cdot p_a + \lambda_{Xw} \cdot X_{wa}, \quad (1)$$

mit $\lambda_p \quad \partial\lambda/\partial p \cong 0.035 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ mbar}^{-1}$, für $p \leq 100 \text{ mbar}$

$\lambda_{Xw} \quad \partial\lambda/\partial X_w \cong 0.50 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ Masse-\%}^{-1}$

Für das grössere Format der MF-Produkte in Tabelle 1, mit $p_a \approx 1.5 \text{ mbar/a}$ und $X_{wa} \approx 0.1 \text{ Masse-\% / a}$, erhöht sich damit die Wärmeleitfähigkeit um rund 0.1 mW/(m K) pro Jahr.

Für längere Zeiträume kann die Wärmeleitfähigkeit unter Annahme einer Annäherung an den Gleichgewichtsfeuchtegehalt wie folgt extrapoliert werden [6][7]:

$$\lambda(t) \cong \lambda_0 + \lambda_p \cdot p_a \cdot t + \lambda_{Xw} \cdot X_{w,eq} (1 - \exp(-t/\tau)), \quad (2)$$

mit λ_0 Anfangswert der Wärmeleitfähigkeit, $10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$X_{w,eq}$ Gleichgewichtsfeuchtegehalt $\cong 4.0$ bzw. 6.4 Masse-\% bei 50 bzw. 80 % r.F.

τ Zeitkonstante für Feuchteausgleich $\cong X_{w,eq}/X_{wa}$, in Jahren

Mit einem Anfangswert $\lambda_0 = 4.5 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ erreicht die Wärmeleitfähigkeit mit den vorherigen Daten nach 25 Jahren den Wert $\lambda = 7.4 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

1.4 Lebensdauerabschätzung in Bauteilen

Die Umgebung eines VIP im Bauteil ist wesentlich komplexer als im Labor unter konstanten Bedingungen. An Stelle von einer komplexen Modellierung der dynamischen Temperatur- und Feuchteumgebung und des Gasaustausches durch die VIP-Hülle wird deshalb ein vereinfachtes Verfahren beschrieben. Dabei wird von der (sicheren) Annahme ausgegangen, dass bei allen auftretenden Umgebungstemperaturen eine Luftfeuchtigkeit von ca. 80% r.F. vorliegt. Damit kann eine aufwändige Charakterisierung der Gasdurchlässigkeit im 2-dimensionalen Temperatur-/Feuchtebereich vermieden werden. Die Temperaturabhängigkeit der jährlichen Innendruckzunahme bei 80% r.F. wurde durch Labormessungen bestimmt und lässt sich gut durch einen Arrheniusansatz beschreiben (Abb. 5) [4]:

$$p(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

Dabei ist die Temperatur T in Kelvin einzusetzen, und die Parameter A und E_a werden durch least-square-fit ermittelt. Unter der Annahme, dass die mittlere jährliche Rate der zeitlich gewichteten Überlagerung der Raten in gegebenen Temperaturintervallen entspricht, ergibt sich damit

$$p_a = \sum_i A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_i}\right) \Delta t_i \left/ \sum_i \Delta t_i \right. = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\text{effektiv}}}\right) \quad (4)$$

T_{effektiv} ist mittlere Temperatur, in welcher die Nicht-Linearität der Innendruckfunktion berücksichtigt ist.

Für die Feuchtezunahme ist das Vorgehen analog. Dies beinhaltet die Annahme, dass die dynamische Situation durch die Aufsummierung von Zeitanteilen bei den jeweiligen stationären Bedingungen angenähert werden kann. In diffusionsoffenen Konstruktionen, wo keine direkte Kopplung zwischen Temperatur und Wasserdampfdruck besteht, müssten der dynamische Wasserdampfdruckverlauf und die entsprechende Feuchtezunahme unabhängig betrachtet werden.

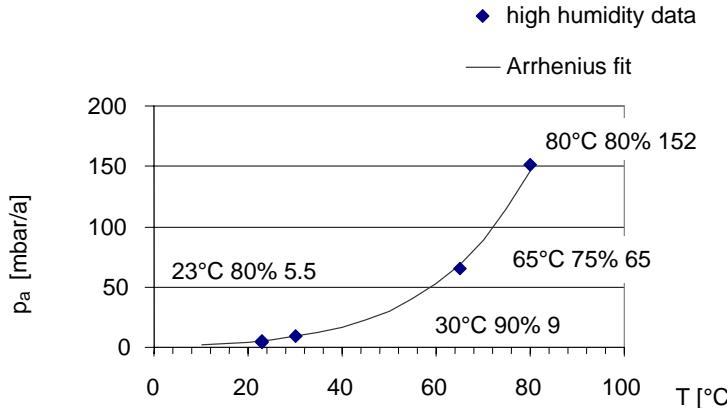


Abbildung 5: Jährliche Innendruckzunahme des VIP-Produkts MF1 (25 x 25 x 2 cm³) in Funktion der Temperatur (Messdaten und angepasste Arrheniusfunktion).

Mit Gl. (4) kann die mittlere Innendruck- bzw. Feuchtezunahme pro Jahr berechnet werden, falls die zeitliche Temperaturverteilung bekannt ist. Im folgenden wird das Verfahren beispielhaft auf eine Terrasse mit VIP-Dämmung im Format 50 x 50 x 2 cm³ angewendet (Abb. 6). Die Stundenwerte der Oberflächentemperatur auf beiden Seiten des VIP wurden mit dem Simulationsprogramm HELIOS [8] für Zürich-Kloten (design reference year), eine Innentemperatur von 22°C und einen solaren Absorptionsgrad von 65% (Betonplatte) berechnet. Aus den Zeitwerten wurden Temperaturhistogramme in einem Raster von 2 Kelvin erstellt und gemäss Gl. (4) berechnet.

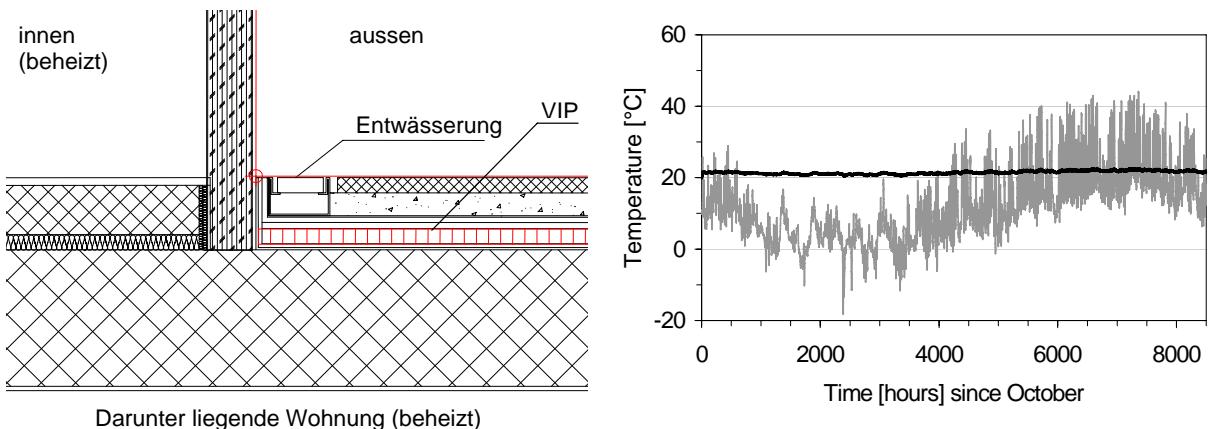


Abbildung 6: Vertikalschnitt durch eine Terrasse mit Betondecke und VIP-Dämmung (links), Jahresverlauf der Temperatur auf den Innen- und Außenflächen des VIP (rechts).

Auf der Innenseite ist die Temperatur modellbedingt relativ konstant und T_{effektiv} (21.5°C) entspricht dem Mittelwert. Auf der Außenfläche variieren die Temperaturen zwischen -18°C und +44°C. Gegen-

über dem Mittelwert 12°C ist T_{effektiv} auf 16°C erhöht. Die entsprechenden Raten sind dann $p_a = 2.1 \text{ mbar/a}$ und $X_{\text{wa}} = 0.18 \text{ Masse-\%/a}$ gemäss Gl. (4), und die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit pro Jahr ist $\lambda_a = 0.16 \text{ mW/(m}\cdot\text{K}\cdot\text{a)}$ nach Gl. (1). In einer Betriebsdauer von 25 Jahren erhöht sich damit die Wärmeleitfähigkeit von 4.0 auf 8.0 mW/(m K).

Falls bei der Feuchteaufnahme ein Sättigungseffekt durch den steigenden Dampfdruck innen berücksichtigt wird (Gl. 2), ergibt sich ein exponentiell gedämpfter Anstieg:

$$\Delta\lambda(t) = 0.035 \times 2.1 \times t + 0.5 \times 6.4 \left(1 - \exp(-t/35.6)\right) \quad (5)$$

Die Zeitdauer für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von 4.0 auf 8.0 mW/(m K) erhöht sich dadurch auf $t = 31.6$ Jahre (Abbildung 7).

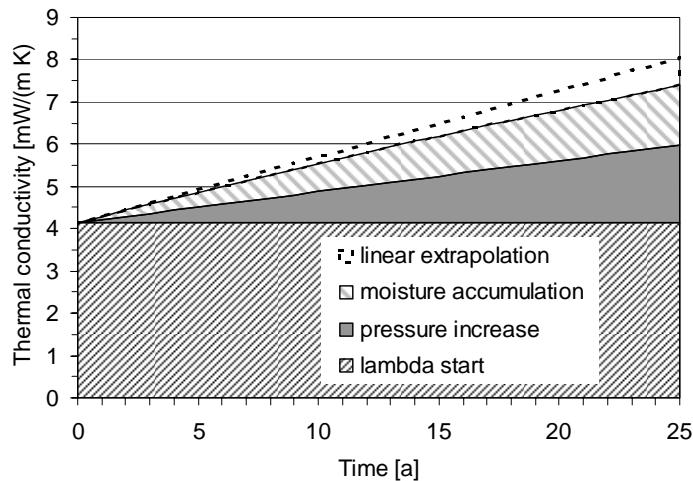


Abbildung 7: Zeitverlauf der Wärmeleitfähigkeit von VIP im Beispiel der Terrassendämmung. Die einfachste Abschätzung (lineare Zunahme) wird durch die gestrichelte Linie wiedergegeben.

1.5 Ziele des Projekts

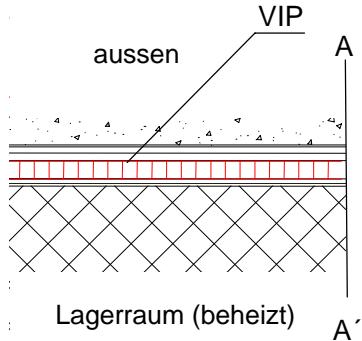
Die prinzipielle Funktionstauglichkeit von VIP kann heute aufgrund der bekannten Ergebnisse bejaht werden, doch bestehen nach wie vor Unsicherheiten in Bezug auf die Eignung im Baubereich. Einerseits stellt die Gefahr von Beschädigungen besonders vor und während des Einbaus ein Problem dar. Offene Fragen bestehen auch hinsichtlich der Qualitätssicherung und der Lebensdauer von VIP. Über das Langzeitverhalten von eingebauten VIP (Innendruck- und Feuchteanstieg, ev. weitere Alterungseffekte) und die Gültigkeit von Lebensdauerprognosen sind immer noch wenig verlässliche Daten vorhanden. Als erster Langzeitversuch wurde eine Versuchsfläche mit offen verlegten VIP auf einem Flachdach der Firma ZZ Wancor in Regensdorf instrumentiert und seit etwa zweieinhalb Jahr messtechnisch ausgewertet. Die Flachdachdämmung ist eine der häufigsten VIP-Anwendungen in der Schweiz in den letzten Jahren, da damit der begehbarer Außenbereich des Flachdachs niveaugleich mit dem Boden im beheizten Wohnbereich einer Terrassen- oder Attikawohnung ausgeführt werden kann, obwohl ein tiefer U-Wert des Dachs wegen des darunter liegenden beheizten Wohnraums erforderlich ist.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts werden diese Messungen weiter geführt und eine weitere Testfläche mit mechanisch geschützten VIP im Flachdach ausgewertet. Im EAWAG-Neubau Forum Chriesbach (EMPA-Areal in Dübendorf) wird eine weitere VIP-Dämmung für den Tiefkühlraumboden installiert und für In-Situ-Messungen mit Temperatur-, Feuchte- und Innendrucksensoren ausgerüstet. Von beiden Messprojekten in Regensdorf und in Dübendorf werden Datenauswertungen sowie Vergleiche mit numerischen Berechnungen und Lebensdauermodellen durchgeführt. In Verbindung mit dem ETH-Bereichsprojekts CCEM-CH „Advanced Building Retrofit“ werden zusammen mit Industriepartnern Konzepte für VIP-geädmmte Fassaden und zum Einsatz von VIP in vorgefertigten hochdämmenden Fassadenelementen entwickelt.

2 Messprojekt Flachdach Regensdorf

2.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung des Alterungsverhaltens von VIP unter realen Bedingungen in der Gebäudehülle wurde im Jahr 2004 eine bestehende Flachdachkonstruktion in Regensdorf ZH ausgerüstet. Standard-VIP in den Formaten 25 x 25 cm² und 50 x 50 cm² wurden in zwei quadratischen Versuchsflächen von ca. 200 x 200 cm² eingebaut (Abbildung 8).



Schichtbezeichnung (A-A')	d [mm]
Kies	30
Bituminöse Abdichtung (3 Lagen)	10
Schutzschicht (PE-Schaum)	7
VIP	20
Schutzschicht (PE-Schaum)	5
Wassersperre (bestehend)	10
Porenbeton (bestehend)	200

Abbildung 8: Vertikalschnitt der untersuchten Flachdachkonstruktion (links) und Schichtaufbau einschliesslich VIP-Dämmung (A-A' von aussen nach innen).

In der einen Fläche wurden Temperatur- und Feuchtesensoren auf den Innen- und Aussenoberflächen sowie im Stoßbereich verschiedener VIP installiert, die von einem Schutzring gleicher VIP umgeben waren. Messdaten der Sensoren und Klimadaten der Umgebung wurden im 1-Stundentakt durch einen Datenlogger aufgezeichnet. Das andere Testfeld wurde nicht mit Sensoren ausgerüstet, sondern für eine wiederholte Dachöffnung und Wiederinstallation der VIP vorbereitet. An diesen Paneeleien wurden die periodischen Messungen des Feuchtegehalts und des Innendrucks vorgenommen, die nur im Labor mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden können.

Durch leichten Niederschlag kurz vor dem Einbau der VIP wurde die unten liegende Schutzschicht aus PE-Schaum leicht feucht. Sie wurde vor der VIP-Installation von Hand getrocknet, enthielt aber dennoch eine gewisse Restfeuchtigkeit. Anschliessend wurde die Fläche durch eine mehrlagige bituminöse Abdichtung wasserdicht geschlossen. Darüber wurde eine Schicht aus grobem Kies oder Zementplatten verlegt. Fotos des Einbaus sind in Abbildung 9 zu sehen.



Abbildung 9: Bilder vom Einbau der zwei VIP-Testfelder.

2.2 Monitoring-Resultate

In Abbildung 10 ist als Beispiel der Messdaten der Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte im Zentrum der aussen liegenden Fläche eines Paneels dargestellt [9].

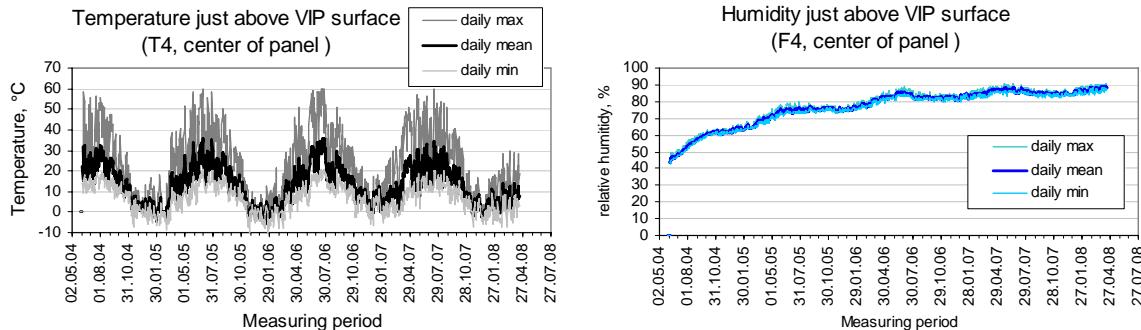


Abbildung 10: Aufgezeichneter Verlauf von Temperatur und relativer Feuchtigkeit im Zentrum der VIP (ausen).

Der jährliche Temperaturzyklus auf der Aussenoberfläche umfasst einen Temperaturbereich von etwa -10 °C bis +60 °C. Auf der Innenseite sind die Temperaturschwankungen wesentlich kleiner. Die relative Feuchte im Bereich der Oberfläche ist praktisch unabhängig von den Temperaturschwankungen, was auf Feuchtespeichereffekte von Materialien schliessen lässt. Auf der Innenseite ist die relative Feuchte immer nahe bei Sättigung, obwohl die Paneele durch Heissbitumen sorgfältig versiegelt sind. Eine mögliche Erklärung ist Diffusion von Wasserdampf auf der Innenseite, der sich kontinuierlich auf die Aussenseite verlagert.

Bei der zweiten Fläche wurden durch Messungen an aus- und wieder eingebauten Paneele in verschiedenen Zeitabständen jährliche Anstiegsraten des Innendrucks p_a und des Feuchtegehalts X_{wa} bestimmt. In Abbildung 11 sind die Ergebnisse für das kleinere Paneel-Format dargestellt. In der Startphase sind grosse Extrapolationsunsicherheiten und transiente Effekte zu erkennen. Zu späteren Zeiten zeigen die Ergebnisse eine zunehmende Konstanz.

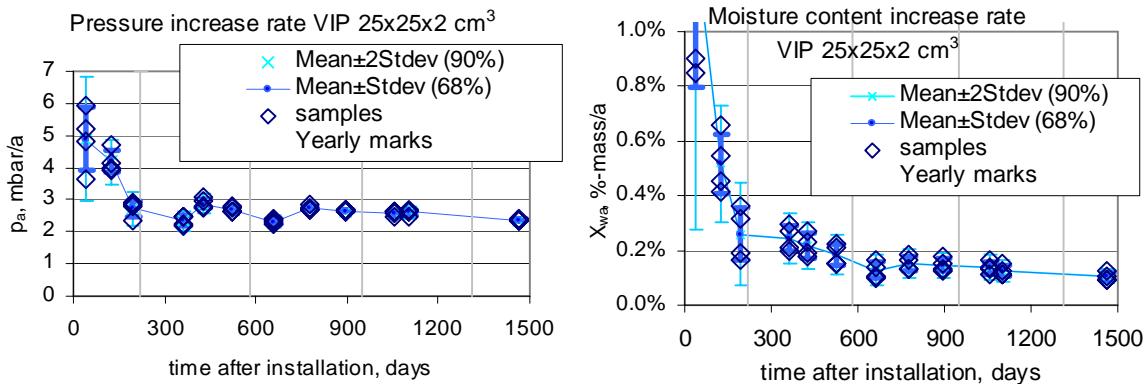


Abbildung 11: Bestimmung der jährlichen Anstiegsraten des Innendrucks (links) und des Feuchtegehalts (rechts) von kleinformatigen VIP während einer etwa 4-jährigen Messzeit.

2.3 Vergleich mit Labordaten

Wie Kap. 1 beschrieben wurden Anstiegsraten des Innendrucks und des Feuchtegehalts im Labor unter stationären Bedingungen in Klimakammern bei verschiedenen Temperaturen und etwa 80 % r.F. bestimmt. Dies entspricht im Mittel relativ gut den Feuchtebedingungen im Bereich der eingebauten Paneele. Nach Kap. 1 können diese Raten gut durch Arrhenius-Funktionen beschrieben werden. Mit diesen Daten und den Summenhäufigkeiten der gemessenen Oberflächentemperaturen wurden damit effektive Temperaturen T_{effektiv} entsprechend einer Arrhenius-Gewichtung berechnet [9][10].

Die effektiven Temperaturen sind 18.6 °C auf der Innenseite und 18.8 °C auf der Aussenseite der VIP. Ein Vergleich mit den arithmetischen Mittelwerten 17.7 °C innen und 12.4 °C aussen zeigt, dass die exponentielle Gewichtung wegen der teilweise hohen Temperaturen auf der Außenoberfläche eine deutliche Erhöhung um 6.4 K ergibt, was durch die Mittelwertbildung vernachlässigt wird. Die berechneten Ergebnisse sind zusammen mit den gemessenen Werten für beide VIP-Formate in Tabelle 2 zusammengestellt.

Trotz verschiedener Vereinfachungen stimmen die auf T_{effektiv} basierenden Druckzunahmeraten gut überein mit den Messwerten. Formateffekte wegen unterschiedlicher Flächen- und Randeffekte sind klar zu erkennen. Durch Mittelwertbildung werden die berechneten Werte kleiner als die Messwerte. Der Einfluss hoher Temperaturen wird damit unterschätzt.

Tabelle 2: Gemessene und berechnete Anstiegsraten von Druck / Feuchtegehalt bei VIP im Flachdach.

Format	Messgrösse	Berechnung			Messung (774 Tage)	
		mbar/a	innen	aussen	Mittel	
25 x 25 x 2 cm ³	$p_a (T_{\text{effektiv}})$		2.70	2.75	2.73	2.7 ± 0.2
	$p_a (T_{\text{Mittel}})$		2.50	1.63	2.07	
50 x 50 x 2 cm ³	$p_a (T_{\text{effektiv}})$		2.03	2.06	2.05	2.1 ± 0.2
	$p_a (T_{\text{Mittel}})$		1.88	1.23	1.56	
Massee-%/a						
25 x 25 x 2 cm ³	$X_{wa} (T_{\text{effektiv}})$		0.25	0.27	0.26	0.15 ± 0.03
	$X_{wa} (T_{\text{Mittel}})$		0.23	0.15	0.19	
50 x 50 x 2 cm ³	$X_{wa} (T_{\text{effektiv}})$		0.17	0.18	0.18	0.10 ± 0.01
	$X_{wa} (T_{\text{Mittel}})$		0.16	0.10	0.13	

Betreffend Feuchtegehalt ergibt die nichtlinear gewichtete Berechnung etwas höhere Anstiegsraten als die Messung. Eine mögliche Ursache dafür ist ein Trocknungseffekt durch die wiederholte Öffnung der zweiten Testfläche, womit die Feuchtelast dort eher geringer war als bei der sensorbestückten Testfläche. Dies wurde dadurch bestätigt, dass nach mehreren Öffnungen kein Kondensat mehr sichtbar war wie zu Beginn (und bei Testfläche 1 gemessen). Zusammengefasst ergibt der Bezug zu stationär bestimmten Labordaten anhand der Randbedingungen im Bauteil eine brauchbare Näherung zur realen Situation. Arithmetische Mittelung führt zu einer Unterschätzung der Anstiegsraten beim Innendruck, während exponentielle Gewichtung eine gute Übereinstimmung ergibt. Auch beim Feuchtegehalt ergeben sich dadurch höhere Anstiegsraten, die etwas über den Messwerten zu liegen scheinen. Der Vergleich zwischen Messung und Berechnung ist wegen möglicherweise unterschiedlicher Randbedingungen jedoch schwierig.

2.4 Lebensdauerabschätzung

Anstelle der Lebensdauerbestimmung für einen gegebenen Leistungskennwert wird in Europäischen Normen für Wärmedämmstoffe gefordert, dass die deklarierte Wärmeleitfähigkeit Alterungseffekte über einen Zeitraum von 25 Jahren einschliessen soll [11]. Wie in Kap. 1 beschrieben kann der Einfluss der Druckerhöhung und der Feuchtezunahme auf die Wärmeleitfähigkeit für VIP bei bekannten jährlichen Anstiegsraten p_a und X_{wa} durch folgende vereinfachte Beziehung dargestellt werden:

$$\lambda(t) \cong \lambda_0 + 0.035 \cdot p_a \cdot t + 0.50 \cdot X_{w,eq} (1 - \exp(-t/\tau)), \quad (6)$$

mit $X_{w,eq}$ Gleichgewichtsfeuchtegehalt ≈ 6.4 Massee-% bei 80 % r.F.

τ Zeitkonstante für den Feuchteausgleich $\cong X_{w,eq}/X_{wa}$, in Jahren

Bei einer Innentemperatur 21.5 °C und einem VIP- "Standardformat" 100 x 60 x 2 cm³ werden die Parameter $p_a = 1.5$ mbar/a, $X_{wa} = 0.17$ Masse-%/a, und $\tau = 37.6$ Jahre. Der erwartete Anstieg der Wärmeleitfähigkeit nach 25 Jahren wird damit $2.9 \cdot 10^{-3}$ W m⁻¹ K⁻¹. Mit einem realistischen Anfangswert $\lambda_0 = 4.5 \cdot 10^{-3}$ W m⁻¹ K⁻¹ erreicht die Wärmeleitfähigkeit nach 25 Jahren den Wert $\lambda = 7.4 \cdot 10^{-3}$ W m⁻¹ K⁻¹. Eine Abschätzung ergibt eine relative Unsicherheit für die Wärmeleitfähigkeit nach 25 Jahren von 10 bis 15 % [9].

3 Messprojekt Kühl-/Tiefkühlraum Chriesbach

3.1 Einbau und Instrumentierung der VIP-Bodenisolierung

Der Einbau und die Instrumentierung einer Bodenkonstruktion mit Vakuumisolation für den Kühl-/Gefrierraum des Personalrestaurants im Neubau Chriesbach erfolgten in Zusammenarbeit mit verschiedenen Projektpartnern. Planung und Realisierung mussten zwischen der Bauherrschaft, der Generalunternehmung, dem Lieferanten der Kühlzellen, den Bauausführenden und der ZZ Wancor AG als Verantwortliche für die VIP-Isolation nachträglich koordiniert werden, da im bewilligten Bauprojekt eine herkömmliche Zellenkonstruktion mit PU-Sandwichelementen enthalten war. Eine Ansicht des Gebäudes und die Lage der Räume im Untergeschoss sind in Abbildung 12 dargestellt.



Abbildung 12: Neubau EAWAG Forum Chriesbach auf dem Empa-Areal in Dübendorf (links), Lage der Kühlräume mit VIP-Bodenkonstruktion im Untergeschoss (rechts).

Die beiden gekühlten Räume wurden mit Ausnahme der Bodenkonstruktion als Einbauzelle aus PU-Sandwichpaneelen und einer gleichartigen Trennwand mit Tür realisiert. Der Aufbau der Zelle erfolgte auf einem Stahlrohrgerüst, welches in die vertiefte Bodenwanne eingebaut war. Auf dem Stahlrohrgerüst wurden massive Bodenplatten verlegt. Anschliessend erfolgte der eigentliche Bodenaufbau mit Wassersperre aus Kunststoff, PE-Schaum als Schutzschicht unter und über der Isolationsschicht, eine zusätzliche Schutzschicht aus Gummischrot, und schliesslich eine Nutz- und Lastverteilschicht aus epoxidharzgebundenem Quarzsand mit Armierung. Abbildung 13 zeigt einen Vertikalschnitt im Boden-/Wandanschlussbereich der Tiefkühlzelle.

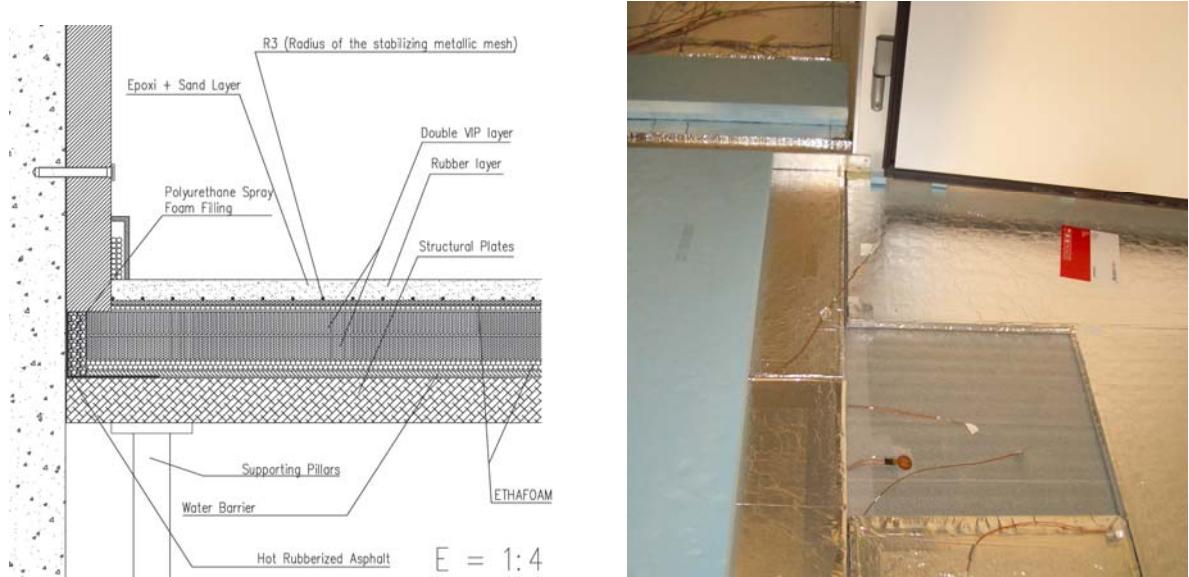


Abbildung 13: Vertikalschnitt durch den Boden-/Wandanschlussbereich des Tiefkühlraums (links), Verlegung der VIP und Anbringen der Sensoren (rechts).

Als Bodenisolationsplatten wurden VIP verlegt, eine Lage mit 25 mm im Kühlbereich bzw. zwei Lagen mit je 20 mm im Tiefkühlbereich. Der Verlegeplan ist in Abbildung 14 dargestellt. Es wurden unterschiedliche Formate gewählt, um Dimensionseffekte im Alterungsverhalten identifizieren zu können, welche auf das Eindringen von Umgebungsgasen durch den Randbereich zurückzuführen sind. Im Verlegeplan sind die Positionen der Innendruckmessstellen (siehe nächsten Abschnitt) mit „Chip“ bezeichnet.

Im gesamten Bodenbereich wurde eine Vielzahl von Temperatur- und Luftfeuchtemessstellen installiert (Abbildung 13). Die Innendrucksensoren wurden aus Stabilitätsgründen durchwegs auf der warmen Seite installiert, d.h. auf den untersten Panel-Oberflächen im Bereich der tragenden Holzbodenplatte.

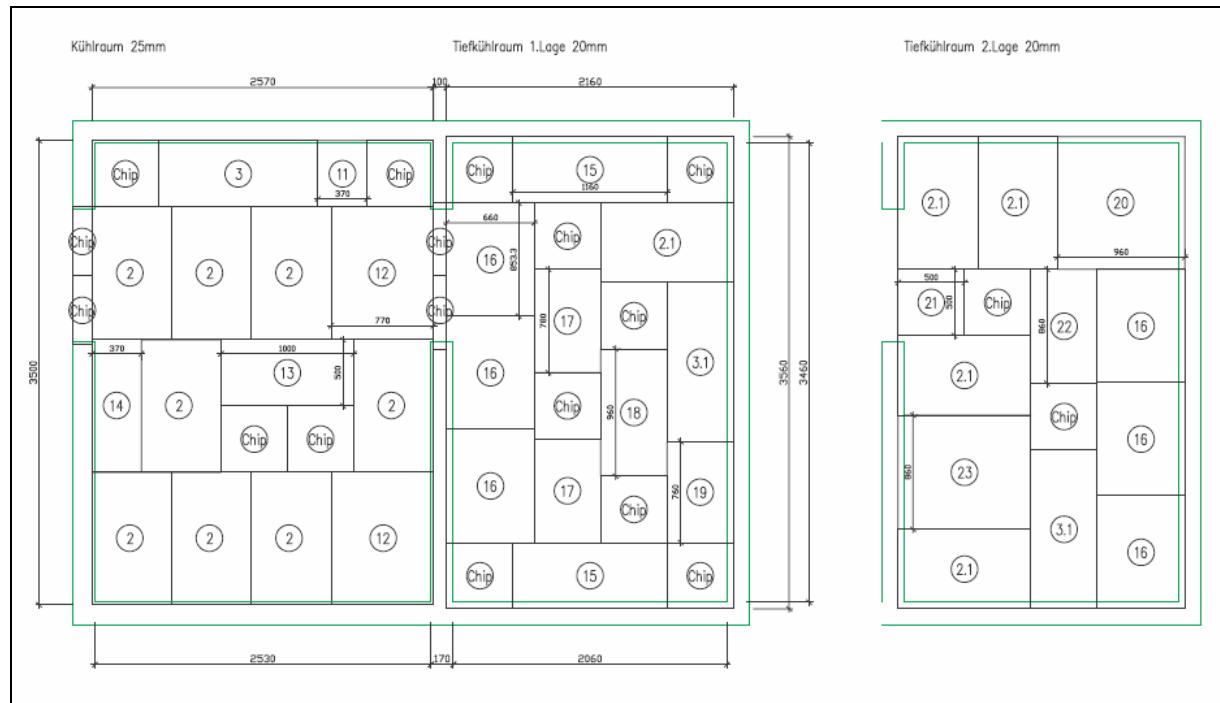


Abbildung 14: Verlegeplan der VIP-Elemente für die Bodenfläche. Auf der linken Seite die gesamte Fläche beider Räume für die erste Lage, rechts die Einteilung der 2. Lage für den Tiefkühlbereich.

3.2 Innendruckmessung: Messprinzip, Montage und Kalibration

Durch die fest eingebaute Bodenkonstruktion konnte der zeitliche Verlauf des Innendrucks nicht durch Messung an ausgebauten VIP verfolgt werden. Deshalb wurden detaillierte Abklärungen und Untersuchungen zur Sicherstellung einer möglichst genauen und zuverlässigen Messung im eingebauten Zustand durchgeführt. Das einzige heute funktionierende Messprinzip, das durch die Firma va-Q-tec AG, D-Würzburg entwickelt wurde, beruht auf der gasdruckabhängigen Wärmeleitfähigkeit eines porösen Vlieses, das zusammen mit einer als Wärmesenke funktionierenden Aluscheibe direkt unter der Hülle in das VIP eingeschweisst wird [12]. Durch Aufheizen eines aussen angebrachten Sensorkopfs auf eine vorgegebene Temperatur wird ein Wärmeflussignal erzeugt, das im Wesentlichen vom Wärmeleitwert des Vlieses, d.h. vom Innendruck des VIP abhängig ist. Durch Kalibrierung mit einer anderen Methode zur Druckmessung kann der Zusammenhang zwischen Gasdruck und Wärmeflussignal reproduzierbar bestimmt werden (Abbildung 15). Für die Messungen wurde der Empa ein Auslesegerät und Auswertesoftware zur Verfügung gestellt, in welcher die Kalibrierdaten für jeden Sensorkopf gespeichert sind.

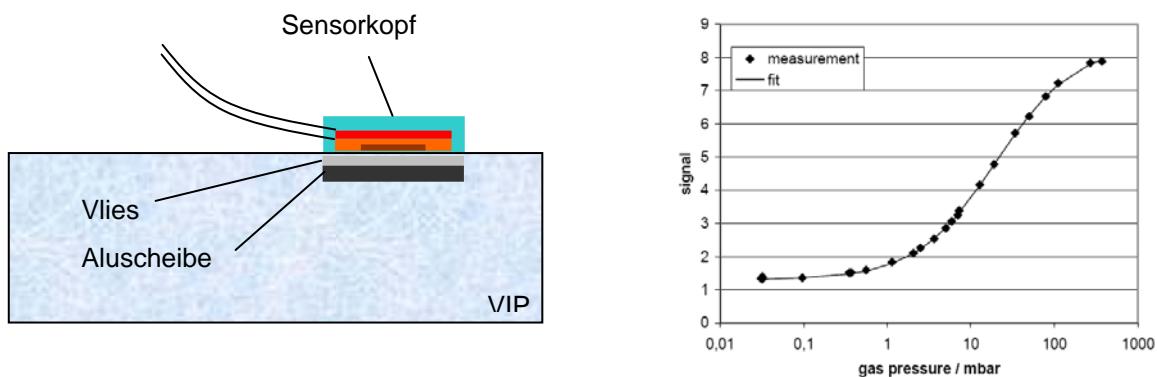


Abbildung 15: Indirekte Bestimmung des VIP-Innendrucks durch Messung des Wärmeflusses in einem aufgeklebten Sensorkopf, der auf eine vorgegebene Temperatur erwärmt wird (links). Der Zusammenhang zwischen Gasdruck und Wärmeflussignal ist durch eine Kalibrierkurve gegeben (rechts).

Die überwiegend verwendeten VIP der Firma Porextherm Dämmstoffe GmbH wurden im Werk in D-Kempten im Beisein von Mitarbeitenden der Empa mit vliesbelegten Aluscheiben ausgerüstet. Die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Methode wurden durch umfangreiche Versuche an den fertigen Paneelen an der Empa getestet. Als Referenzmethode diente dazu die Innendruckmessung durch Druckabsenkung bis zum Ausgleichsdruck (Kap. 1). Es zeigte sich, dass die Messwerte relativ stark von den Einzelheiten der Sensormontage, von den umgebenden Materialien und von der Umgebungs-temperatur (Starttemperatur der Messung) abhängig sind. Deshalb wurde für die Kalibriermessungen möglichst genau die Einbausituation gewählt (Abbildung 16). Aus den mit Messscheibe ausgerüsteten VIP wurden schliesslich 8 Messstellen ausgewählt, welche unter Einbaubedingungen eine gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten und auch eine gute Wiederholbarkeit der Messung aufwiesen. Als Schwachstelle der Sensorköpfe zeigte sich teilweise oder vollständige Delamination der Kupferplatte. Ursache ist möglicherweise thermischer Stress durch das Aufheizen auf gegen 90°C während der Messung. Im Rahmen der Tests konnte ein zuverlässiges Reparaturverfahren entwickelt werden.



Abbildung 16: Kalibrierung unter Einbaubedingungen (oben), Sensorkopf und delaminierte Kupferplatte (unten).

3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse von Innendruckmessungen über einen Zeitraum von knapp 2 Jahren (Abbildung 17) zeigen Anfangswerte des Innendrucks von rund 2 mbar für die Standardausführung der VIP. Vergleichspaneele eines zweiten VIP-Produkts (type 2) weisen Anfangswert des Innendrucks von rund 0.5 mbar auf (einer dieser Sensor wurde bei den Folgemessungen instabil). Die vorher im Labor kalibrierten Messwerte werden gut reproduziert. Einzelne Ausreisser traten vor allem vor dem Vergießen des Kunstharzbodens auf, was vermutlich auf eine Änderung des Kontaktes zwischen Sensor und VIP-Oberfläche zurückzuführen ist. Mit der Inbetriebnahme der Kühlanlage im Juni 2006 ist temperaturbedingt eine leichte Abnahme des Innendrucks zu beobachten. Die Oberflächentemperaturen der Paneele im Betrieb sind etwa 13 / -7 °C im Tiefkühlraum (untere Schicht) und 16 / 6 °C im Kühlraum. Die Lufttemperaturen sind rund 20 °C vor den Zellen, 18 °C unter dem Zellenboden, 4 °C im Kühlraum und -21 °C im Tiefkühlraum.

Seit der Inbetriebnahme sind über die Messzeit bis April 2008 weitgehend lineare Druckzunahmen zu erkennen. Die Anstiegsraten liegen etwa zwischen 0.1 und 0.6 mbar/a (Tabelle 3). Eine Extrapolation von Alterungsdaten aus Laborversuchen ergibt für die trockene und kühle Umgebung im Kühlraumboden eine Innendruckzunahme von rund 0.7 mbar/a. Als sicherer Wert kann für solche Anwendungen angegeben werden, dass innerhalb einer Betriebszeit von 15 Jahren eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von weniger als $0.5 \cdot 10^{-3}$ W/(m K) zu erwarten ist.

Änderungen des Feuchtegehalts können in dieser Anwendung nicht bestimmt werden.

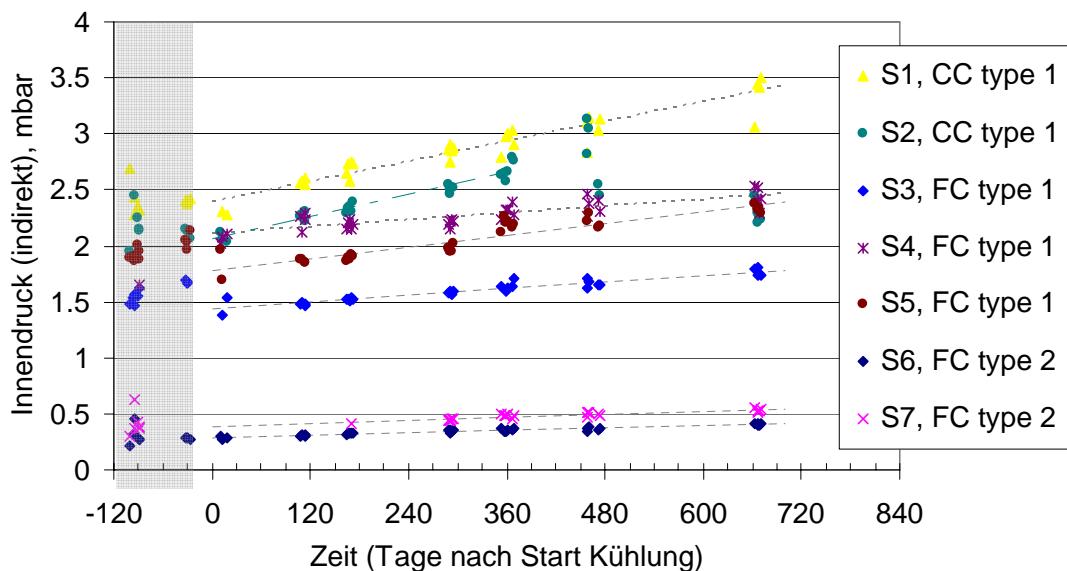


Abbildung 17: Innendruck-Messwerte der Bodenisolation im Tiefkühlraum. Nach der Inbetriebnahme der Kälteanlage im Juni 2006 (dritte Messserie) ist ein leicht ansteigender, linearer Trend erkennbar.

Tabelle 3: Jährliche Druckanstiegsraten der VIP in mbar/a.

Sensor #1	Sensor #2	Sensor #3	Sensor #4	Sensor #5	Sensor #6	Sensor #7
0.54	0.61	0.18	0.18	0.32	0.07	0.08

4 Entwicklung von VIP-Bauteilen

4.1 Flächenschutz

Der Einbau von VIP ohne Schutz auf der Baustelle, wie es in den ersten Anwendungen üblich war und teilweise immer noch praktiziert wird, beinhaltet grössere Schadensrisiken und kann nicht empfohlen werden. Bewährt hat sich eine Schutzbeschichtung der Hauptflächen, die je nach Anwendung ein- oder beidseitig vor der Auslieferung durch den VIP-Hersteller angebracht wird (Abbildung 18). Dieser Teilschutz verhindert die häufigsten Beschädigungen beim Einbau und hat den Vorteil, dass bei satt gestossenen Paneelen keine zusätzlichen Wärmebrücken zu berücksichtigen sind. Ein zusätzlicher Stirnflächenschutz zum Beispiel in Form eines rundum angebrachten Selbstklebebandes wäre ebenfalls empfehlenswert und wärmetechnisch vernachlässigbar, wird bei aktuellen Produkten aber (noch) nicht angeboten.

Wichtig ist, dass eingesetzte Klebstoffe mit allen Materialien verträglich sind. Die meisten VIP-Hersteller fordern die Verwendung von lösungsmittelfreien Klebern.

Um mögliche Einflüsse einer verklebten Beschichtung zu erkennen war im Flachdach Regensdorf eine dritte Testfläche mit beidseitig beschichteten VIP ausgerüstet (Vacucomp P2). Von dieser Fläche wurden durch die Empa punktuell Paneele entnommen und mittels Innendruckmessungen im Labor geprüft. Dabei konnten keine systematischen Unterschiede im Langzeitverhalten festgestellt werden.

Ein absoluter Schutz zum Beispiel gegen Durchschlagen von Nägeln oder Bohren bei Innendämmung ist nur mit einer massiven, durchgehenden Deckschicht zu realisieren, die am besten grossflächig und objektgerecht vor Ort angebracht wird.



Abbildung 18: VIP mit beidseitiger Gummischrotmatte als Schutzbeschichtung (Vacucomp P2, ZZ Wancor).

4.2 Dämmelemente mit integriertem VIP

Der beste Schutz von VIP als Dämmelement ist durch die vollständige Umschliessung mit geeigneten Deckmaterialien gegeben. Dies hat insbesondere bei der Anwendung in einem Fassadendämmssystem auch den Vorteil geringerer Massabweichungen. Grundsätzlich ist eine Vielzahl von Ausführungen möglich, von denen in den letzten Jahren verschiedene Prototypen erstellt wurden. Diese lassen sich in 2 Hauptgruppen einteilen:

- Einschliessung in eine Kassette mit Boden, Deckel und umlaufendem Randverbund: Vorteilhaft ist dabei, dass für die Hauptflächen leichte (z.B. expandiertes Polystyrol) oder harte Materialschichten wie Glas oder Blech eingesetzt werden können. Auch beidseitig unterschiedliche Deckschichten sind möglich, was anwendungstechnisch oft sinnvoll ist. Nachteilig ist, dass eine automatisierte Fertigung solcher Dämmodule bisher wirtschaftlich nicht realisierbar schien und somit nur eine kostenintensive handwerkliche Fertigung von Kleinserien erfolgt ist.
- Nahtlose Einschäumung: Vorteilhaft ist die Möglichkeit einer industriellen Produktion in Schäum-Automaten. Ein gewisser Nachteil ist, dass die Flächen nicht in unterschiedlichen, anwendungstechnisch angepassten Materialien ausgeführt werden können. Zu beachten ist auch, dass sich die Platte optisch nicht von einer konventionellen Platte des gleichen Materials unterscheidet, womit die Beschädigungsgefahr eher zunimmt.

Unabhängig von der Ausführung ist bei einer vollständigen Einschliessung die Wärmebrückenwirkung der stirnseitigen Deckschichten zu berücksichtigen. Qualitativ ist klar, dass eine geringe Breite des Randes und eine niedrige Wärmeleitfähigkeit des Materials anzustreben sind. Für ein solches VIP-Dämmelement wurde eine vereinfachte Berechnung in Form eines Rechenblatts erstellt, welches die (formatabhängige) äquivalente Wärmeleitfähigkeit von VIP einschliesslich Ausführung von Deckschichten, Randverbund und Wärmedurchlasswiderstand der Massivwand berechnet. Die Effekte werden an einem Beispiel mit folgenden Daten illustriert:

- Massivwand Backstein, $d = 200 \text{ mm}$, $\lambda = 0.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- Deckschichten Dämmstoff EPS, $d = 10 \text{ mm}$ beidseitig, $\lambda = 0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- Randverbund Dämmstoff, $b = 5 / 10 / 20 \text{ mm}$, $\lambda = 0.023 / 0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, entspricht PF / EPS
- Kern VIP, $d = 20 / 30 \text{ mm}$, $\lambda_{20 \text{ mm}} = 0.008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\lambda_{30 \text{ mm}} = 0.007 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit der VIP-Dämmeschicht einschliesslich Randeffekte ist in Abbildung 19 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Randverbundbreite einen entscheidenden Einfluss hat. Bei einer Breite von 5 mm liegen die Werte um 0.3 bis 0.7 mW/(m·K) höher im Vergleich zum wärmebrückenfreien Fall. Die Wärmeleitfähigkeit des Randdämmstoffs hat einen geringen Einfluss. Bei 20 mm Randbreite liegen die Zuschläge bei 1.3 bis 2.6 mW/(m·K), abhängig vom Plattenformat und der Wärmeleitfähigkeit des Materials im Randverbund. Vor allem beim kleinen Format wirkt sich bei dieser Randbreite auch die Wärmeleitfähigkeit des Randdämmstoffs deutlich stärker aus.

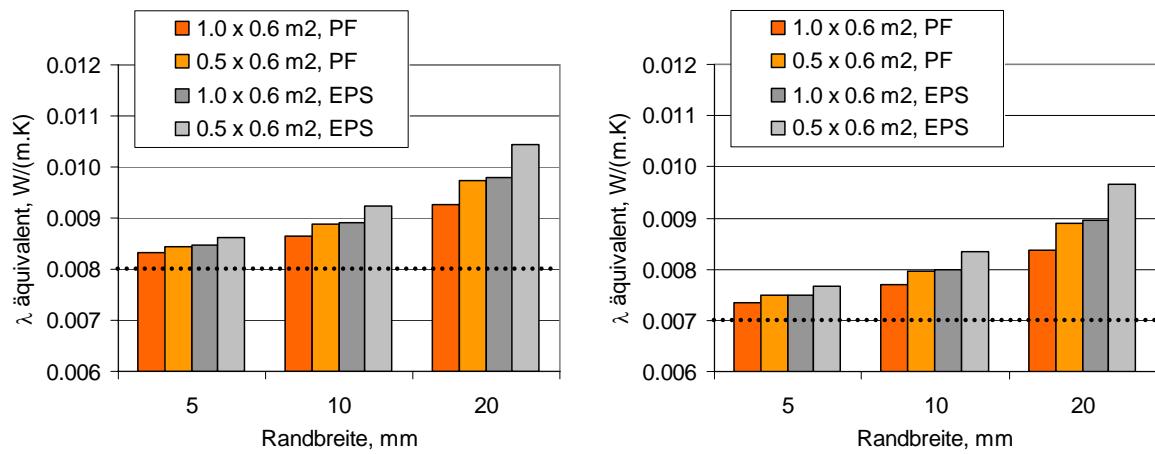


Abbildung 19: Äquivalente Wärmeleitfähigkeit von VIP (links 20 mm, rechts 30 mm dick) in einem Dämmelement mit umlaufendem Randverbund in Abhängigkeit der Breite und der Wärmeleitfähigkeit des Randdämmstoffs.

VIP-Fassadendämmung

Die Empa unterstützt den Industriepartner ZZ Wancor bei der Entwicklung einer hinterlüfteten vorgehängten Fassade mit VIP-Dämmung. Eine Demonstrationsfläche ist in Regensdorf in Vorbereitung (Abbildung 20). Die Hauptaufgabe besteht darin, die Durchdringungen der VIP-Dämmeschicht zur mechanischen Befestigung der Vorhangsfassade möglichst wärmebrückenfrei realisieren. Berechnungen ergeben, dass punktuelle Anker mit stockwerkshohem Vertikalabstand ohne grosse Verschlechterung in Streifen mit konventioneller Dämmung (z.B. Phenolharzhartschaum oder Polyurethanschaum) integriert werden können (Tabelle 4). Kritisch ist hingegen die Tragkonstruktion. Ohne thermische Trennung eingesetzte Stahlgewindeanker (punktuerlicher Wärmebrückenverlust $X \geq 0.05 \text{ W/K}$, Anzahl $n = 28$) ergeben für die relativ kleine Fläche $A = 12.5 \text{ m}^2$ einen grossen Zuschlag auf den Gesamt-U-Wert. Ein U-Wert unter $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ mit 40 mm VIP ist z.B. mit dem Einsatz von GFK-Stäben erreichbar.

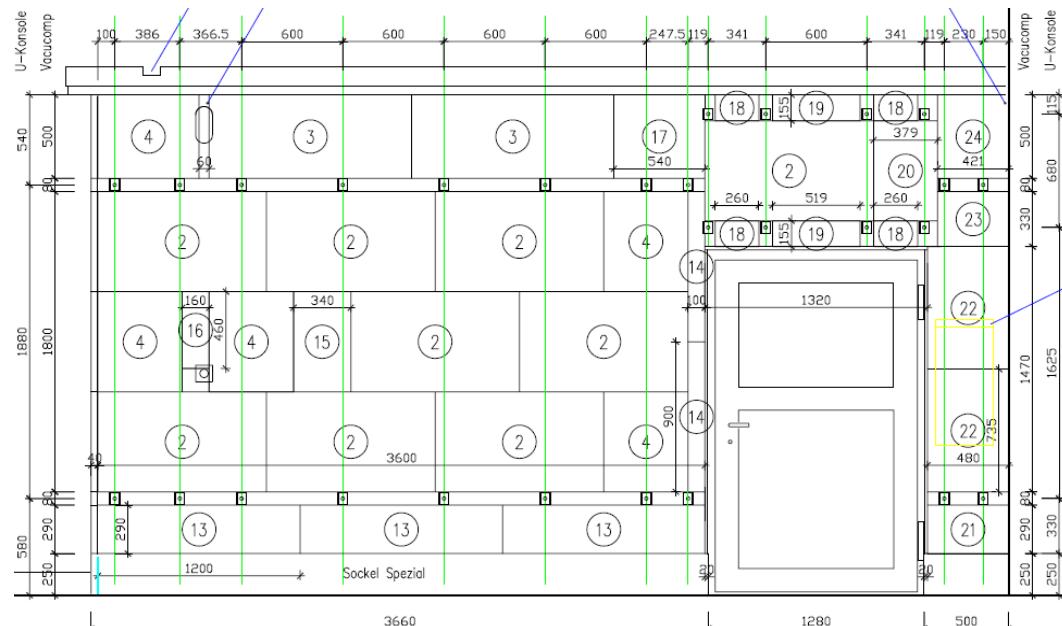


Abbildung 20: Ansicht der Demonstrationsfläche mit voraehänater hinterlüfteter Fassade.

Tabelle 4: Einfluss von Wärmebrücken auf den Gesamt-U-Wert einer Vorhangsfassade mit 40 mm VIP.

X Anker	W/K	0.00 (ideal)	0.05 (Stahl)	0.01 (GFK)
U Anteil Flächen konventionell	W/(m ² K)	0.03	0.03	0.03
U Anteil Flächen mit VIP	W/(m ² K)	0.14	0.14	0.14
U Anteil Anker	W/(m ² K)	0.00	0.14	0.03
U total	W/(m ² K)	0.16	0.31	0.19

5 Bewertung und Ausblick

Das Messprojekt Kühl-/Tiefkühlraum im EAWAG-Neubau Chriesbach konnte erfolgreich installiert und durch aufwändige Messtechnik für die Innendruckbestimmung während etwa zwei Jahren mit guter Genauigkeit ausgewertet werden. Die Messungen im Flachdach Regensdorf konnten ebenfalls fortgeführt werden und erstrecken sich nun über einen Zeitraum von über vier Jahren.

Die Messdaten aus beiden Messprojekten zeigen, dass die installierten Vakuumisolationspaneelle planmäßig funktionieren. In der Flachdachanwendung werden grössere Alterungseffekte beobachtet als im Kühlraumboden, wie aufgrund der höheren Temperatur- und Feuchtebelastung zu erwarten ist. Die Alterungseffekte stimmen gut überein mit Prognosen, die auf Alterungsversuchen im Labor und der Umrechnung auf die Temperatur- und Feuchtebedingungen in den Anwendungen basieren. Auch die Formatabhängigkeit ist zwischen den Laborversuchen und realen Bedingungen vergleichbar. So mit können Langzeitwerte der Wärmeleitfähigkeit format- und anwendungsbezogen durch Laborversuche bestimmt werden, wobei die jeweiligen Temperatur- und Feuchtebedingungen in der Anwendung zu berücksichtigen sind.

Aufgrund der Messergebnisse und Extrapolationen kann für kühl-trockene Umgebung und eine Gebrauchsdauer von 15 Jahren ein Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von $0.5 \cdot 10^{-3}$ W/(m·K) als sicherer Zuschlag betrachtet werden, während in der Gebäudehülle bei üblichen VIP-Formaten mit Anstiegen bis $3 \cdot 10^{-3}$ W/(m·K) in 25 Jahren zu rechnen ist. Für kleine Formate mit Seitenlängen von weniger als 50 cm können die Zuschläge wegen der grösseren Randeffekte noch deutlich höher werden. Zusätzlich fällt bei kleinen Formaten auch der Wärmebrückeneffekt durch den Randverbund stärker ins Gewicht.

Nach Möglichkeit wird die Datenaufzeichnung der Testflächen weitergeführt. Öffnungen der Dachflächen sollen in grösseren Zeitabständen mit Unterstützung des Industriepartners erfolgen und weitere Auswertungen veröffentlicht werden. Entwicklungsarbeiten mit Industriepartnern für VIP-Fassaden (hinterlüftete Vorhangsfassade und verputzte Kompaktfassade) sowie für hochdämmende Komponenten in vorgefertigten grossformatigen Fassadenelementen laufen weiter. Erste Demonstrationsobjekte sind zurzeit in Planung oder sind teilweise bereits realisiert.

6 Referenzen

- [1] R. Caps, U. Heinemann, M. Ehrmanntraut, J. Fricke, *Evacuated insulation panels filled with pyrogenic silica powders: properties and applications*, High Temperatures-High pressures 33 (2002) 151-156.
- [2] K. Ghazi Wakili, R. Bundi, *Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels VIP used in building constructions*, Building Research and Information 32 (4) (2004), 293-299.
- [3] S. Brunner, Ph. Gasser, H. Simmler, K. Ghazi Wakili, *Investigation of multilayered aluminium-coated polymer laminates by focused ion beam (FIB) etching*, Surface & Coatings Technology 200 (2006) 5908–5914.
- [4] S. Brunner, P.J. Tharian, H. Simmler, K. Ghazi Wakili, *Focused ion beam (FIB) etching to investigate aluminium-coated polymer laminates subjected to heat and moisture loads*, Surface & Coatings Technology 202 (2008) 6054–6063.
- [5] IEA / ECBCS Annex 39 "High Performance Thermal Insulation in Building", *Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications*, und *Vacuum Insulation in the Building Sector - Systems and Applications*, Final Reports Subtasks A/B (2005), Download von www.vip-bau.ch.
- [6] H. Simmler, S. Brunner (2005), *VIP for building application – basic properties, aging mechanisms and service life*, Energy & Buildings 37, 1122–1131.
- [7] H. Schwab, U. Heinemann, A. Beck, H.-P. Ebert, J. Fricke (2005), *Permeation of different gases through foils used as envelopes for vacuum insulation panels*, Thermal Envelope & Building Science, 28 (4), 293 – 317.
- [8] Th. Frank, HELIOS-PC Version 1.0, EMPA Laboratory for Applied Physics in Building, 1992.
- [9] H. Simmler, *In situ Performance Assessment and Service Life of Vacuum Insulation Panels (VIP) in Buildings*, Proc. 8th International Vacuum Insulation Symposium (IVIS), D-Würzburg, September 2007.
- [10] S. Brunner, H. Simmler, *In situ performance assessment of vacuum insulation panels in a flat roof construction*, Vacuum 82 (2008) 700 – 707.
- [11] z.B. EN 13165, Thermal insulation products for buildings – Factory made products of rigid polyurethane foam – Specification, CEN, Brussels, 2001.
- [12] R. Caps: *Monitoring Gas Pressure in Vacuum Insulation Panels*, Proc. of the 7th International Vacuum Insulation Symposium, CH-Dübendorf, 2005.