



WEITERENTWICKLUNG, QS UND LANG-ZEITVERHALTEN VON VAKUUM-ISOLATIONSPANEelen MIT MECH. SCHUTZ

Jahresbericht 2006

Autor und Koautoren	Dr. Hans Simmler
beauftragte Institution	Empa Abteilung Bautechnologien
Adresse	Ueberlandstr. 129, CH-8600 Dübendorf
Telefon, E-mail, Internetadresse	+41 44 823 4276, hans.simmler@empa.ch , www.empa.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	101478 / 151839
BFE-Projektleiter	Ch. Filleux
Dauer des Projekts (von – bis)	Juli 2005 bis Juni 2008
Datum	17. November 2006

ZUSAMMENFASSUNG

Im Hochbau werden zunehmend Vakuumisolationspaneele (VIP) auf der Basis eines mikroporösen Kernmaterials mit niedrigem Innendruck und gasdichter Hülle eingesetzt. Die niedrige Wärmeleitfähigkeit ermöglicht geringe Dämmschichtdicken und eröffnet somit ein grosses Anwendungspotenzial für neue architektonische Lösungen im Niedrigenergie- und 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 liegen nun vor, welche die Qualität der VIP-Konstruktion bestätigen. In einer zweiten Langzeitstudie werden im Jahr 2004 gestartete Messungen an einer Flachdachkonstruktion in Regensdorf weiter geführt. Zur Innendruckmessung werden VIP ausgebaut und nach der Messung im Empa-Labor in Dübendorf wieder eingebaut. Die Zweijahresdaten zeigen die intakte Funktion der VIP-Dämmung. Es lassen sich Alterungseffekte beobachten, welche aufgrund von Laborversuchen und Modellberechnungen näherungsweise erwartet worden sind.

Projektziele

Vakuumisolationspaneelen (VIP) ermöglichen interessante neue Lösungen zur Raum sparenden Wärmedämmung im Baubereich (Fig. 1). Durch die Evakuierung eines mikroporösen Kernmaterials (Hauptbestandteil pyrogene Kieselsäure) auf etwa 1 mbar und die Verschweisung in eine hochdichte Hülle (Laminat aus metallisierten Kunststoffen) entsteht ein aktuelles VIP mit einem Anfangswert der Wärmeleitfähigkeit $\lambda \approx 0.004 \text{ W/(m K)}$. Dies entspricht nur etwa einem Achtel im Vergleich zu den heute üblichen Dämmmaterialien. Eine rege Nachfrage und eine grössere Zahl von realisierten Projekten bestehen insbesondere im Bereich Flachdach- und Kühl-/Tiefkühlraumwärmehaltung.



Fig. 1: Bestandteile eines Vakuumisolationspaneels VIP (links), Flachdachdämmung mit VIP (rechts).

Die prinzipielle Funktionstauglichkeit von VIP wurde in IEA Annex 39 [1] gezeigt, 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, weitere Mechanismen?) und die Gültigkeit von Lebensdauerprognosen sind noch kaum 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.

Im Rahmen des vorliegenden Projekts sollen diese Messungen weiter geführt und eine weitere Testfläche mit mechanisch geschützten VIP im Flachdach instrumentiert und ausgewertet werden. Im Neubau Forum Chriesbach (Neubau EAWAG auf dem EMPA-Areal) wird eine VIP-Dämmung für den Tiefkühlraumboden installiert und mit Temperatur-, Feuchte- und Innendrucksensoren ausgerüstet. Die Messdaten werden mit numerischen Berechnungen und Lebensdauermodellen verglichen.

Ziele in der Berichtphase waren Planung und Aufbau der VIP-Isolation und der Instrumentierung sowie Auswertung erster Daten des Tiefkühlraums, weiter das Auslesen und die weitere Auswertung der Testflächen im Flachdach.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

MESSPROJEKT KÜHL-/TIEFKÜHLRAUM CHRIESBACH

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 Fig. 2 dargestellt.

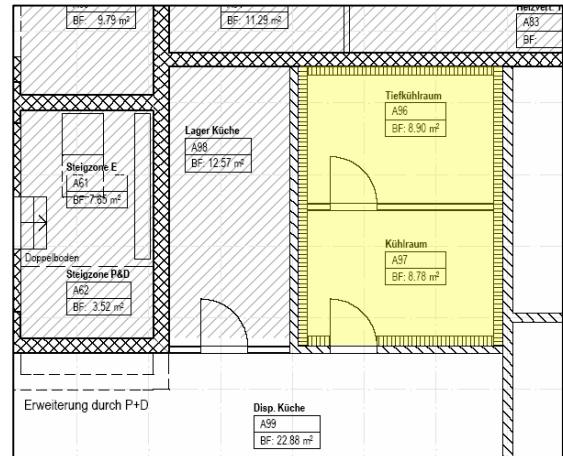


Fig. 2: Neubau EAWAG Forum Chriesbach auf dem Empa-Areal in Dübendorf (links), Lage der Kühlräume mit VIP-Bodenkonstruktion im Untergeschoß (rechts).

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. Fig. 3 zeigt einen Vertikalschnitt im Boden-/Wandanschlussbereich der Tiefkühlzelle.

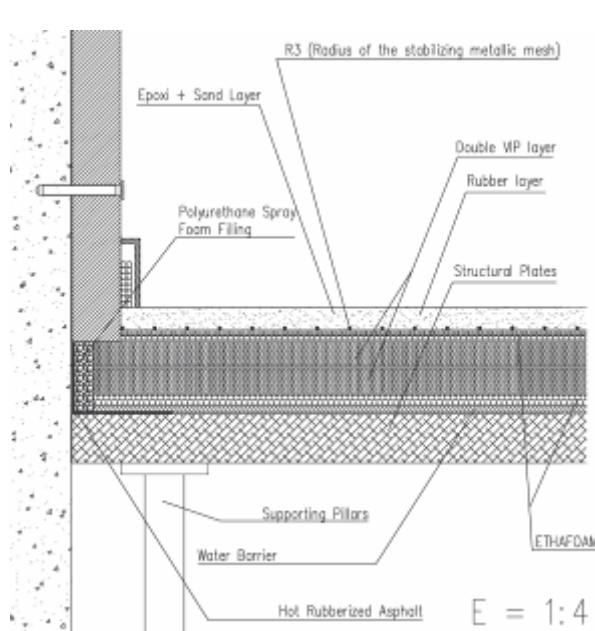


Fig. 3: Vertikalschnitt durch den Boden-/Wandanschlussbereich des Tiefkühlraums (links), Verlegung der VIP und Anbringen der Sensoren (rechts).

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 Fig. 4 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 (Fig. 3). Die Innendrucksensoren wurden aus Stabilitätsgründen durchwegs auf der warmen Seite installiert, d.h. auf den untersten Paneel-Oberflächen im Bereich der tragenden Holzbodenplatte.

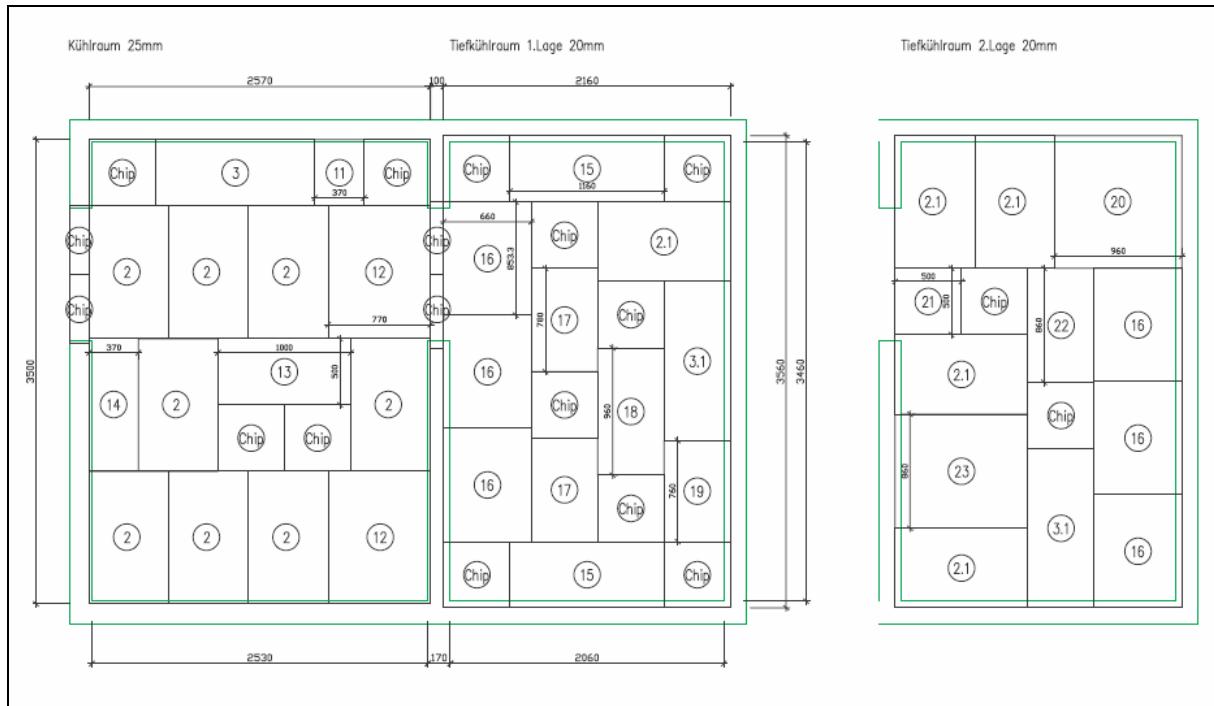


Fig. 4: Verlegeplan der VIP-Elemente für die Bodenfläche. Auf der linken Seite die gesamte Fläche beider Räume für die erste Lage, rechts die Einteilung der 2. Lage für den Tiefkühlbereich. An den mit „Chip“ bezeichneten Punkten befinden sich im Paneel eingebaute Messschreiber für die Innendruckmessung (siehe Text).

Innendruckmessung: Messprinzip, Montage und Kalibration

Der Innendruck ist der direkte Indikator für die Alterung (langsamem Eindringen von Gasen) oder die Zerstörung eines VIP. Deshalb wurde viel Aufwand betrieben zur Sicherstellung einer möglichst genauen und zuverlässigen Messung im eingebauten Zustand. Das einzige heute funktionierende Messprinzip, das durch die Firma va-Q-tec AG, D-Würzburg entwickelt wurde, beruht auf der gasdruckabhängigen Wärmeleitfähigkeit eines Vlieses, das zusammen mit einer Wärme absorzierenden Aluscheibe direkt unter der Hülle in das VIP eingeschweisst wird [2]. Durch Aufheizen eines aussen angebrachten Sensorkopfs auf eine vorgegebene Temperatur wird ein Wärmeeflussignal 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 Wärmeeflussignal reproduzierbar bestimmt werden (Fig. 5). Für die Messungen wurde der Empa ein Auslesegerät und Auswertesoftware zur Verfügung gestellt, in welcher die Kalibriertypen für jeden Sensorkopf gespeichert sind.

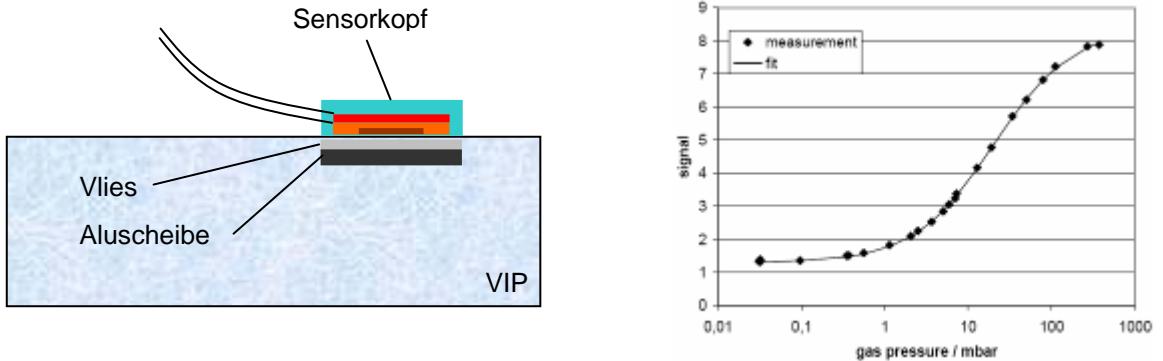


Fig. 5: Indirekte Bestimmung des VIP-Innendrucks durch Messung des Wärmeflusses in einem aufgeklebten Sensorkopf, der auf eine vorgegebene Temperatur erwärmt wird (links). Der Zusammenhang zwischen Gasdruck und Wärmeflußsignal ist durch eine Kalibrierkurve gegeben (rechts).

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 [3]. Es zeigte sich, dass die Messwerte relativ stark von den Einzelheiten der Sensormontage, von den umgebenden Materialien und von der Umgebungstemperatur (Starttemperatur der Messung) abhängig sind. Deshalb wurde für die Kalibriermessungen möglichst genau die Einbausituation gewählt (Fig. 6). 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.

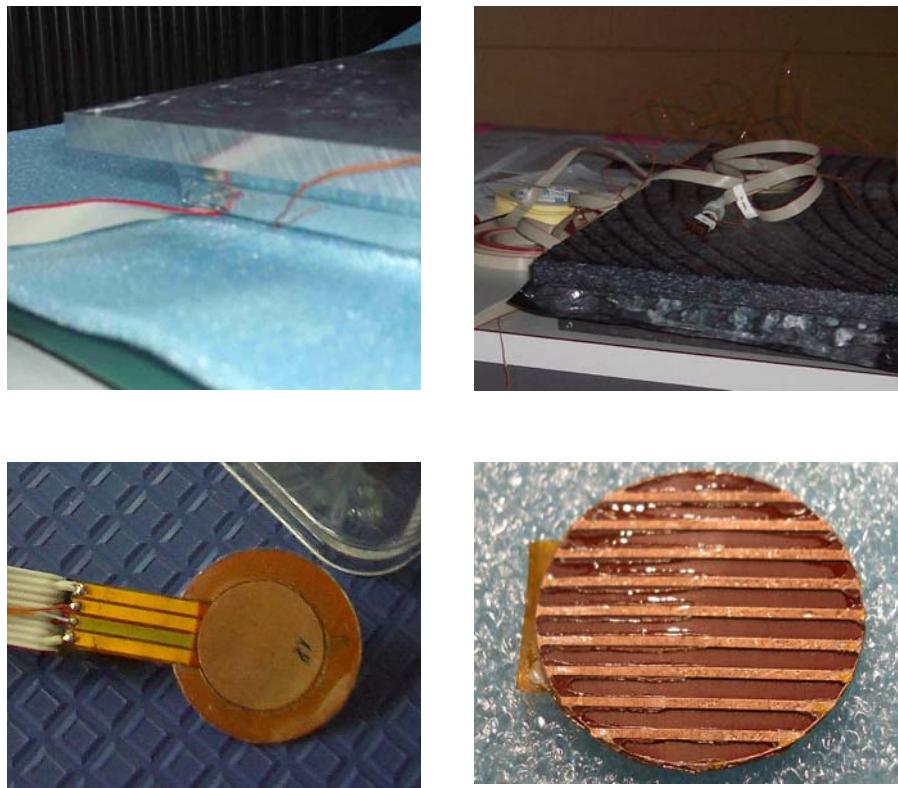


Fig. 6: Kalibrierung unter Einbaubedingungen (oben), Sensorkopf und delamierte Kupferplatte (unten).

Erste Ergebnisse

Erste Ergebnisse von Innendruckmessungen über einen Zeitraum von ca. 6 Monaten (Fig. 7) zeigen Anfangswerte des Innendrucks von rund 2 mbar für die Standardausführung der VIP. Vergleichspunkte eines zweiten VIP-Produkts weisen Innendrücke 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. Temperaturkorrigiert ist trendmäßig eine geringe Innendruckzunahme erkennbar, die nach aktuellen Daten unter 1 mbar pro Jahr liegen dürfte. Hinweise auf undichte oder gar belüftete VIP liegen nicht vor.

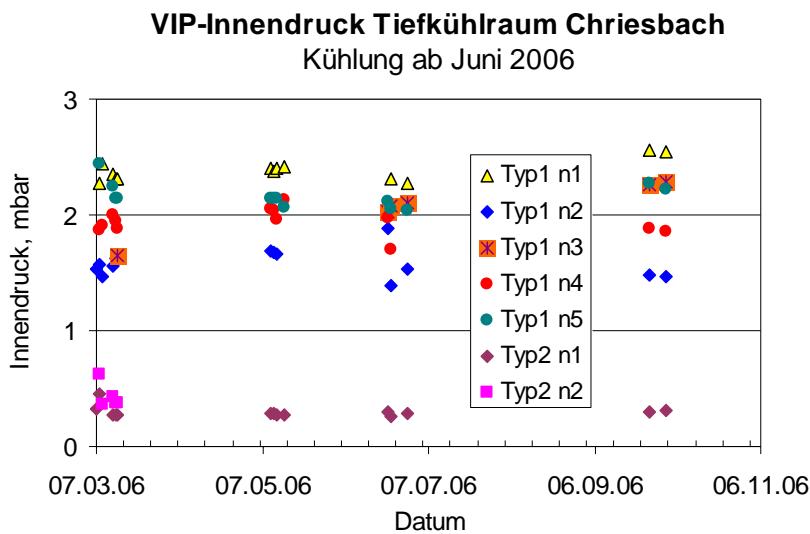


Fig. 7: Innendruck-Messwerte der Bodenisolation im Tiefkühlraum. Nach der Inbetriebnahme der Kälteanlage im Juni 2006 (dritte Messserie) ist ein leicht ansteigender Trend erkennbar.

FLACHDACHISOLATION REGENSDORF

Aufbau

Zur Untersuchung wurde eine Flachdachkonstruktion im Grossraum Zürich gemäss schematischer Darstellung in Tab. 1 gewählt. Dies ist eine der häufigsten VIP-Anwendungen in der Schweiz in den letzten Jahren, da damit der begehbarer Außenbereich eines 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.

Tab. 1: Zusammenstellung der Schichten im Flachdachaufbau mit VIP-Isolation.

Materialschicht	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

Für das Monitoring wurden VIP mit 3-fach metallisierter Barriere auf Polymerbasis in den Dimensionen 25 x 25 cm² und 50 x 50 cm² und einer Dicke von 20 mm auf zwei quadratischen Testfeldern von jeweils etwa 200 x 200 cm² verlegt. Das eine Testfeld wurde mit Temperatur- und Feuchtesensoren auf beiden Seiten der Fläche und im Stoßbereich der VIP instrumentiert. Das andere Testfeld wurde nicht mit Sensoren ausgerüstet, sondern für eine wiederholte Dachöffnung und Wiederinstallation der VIP vorbereitet. An diesen Paneelen wurden wiederholte 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 benetzt. Sie wurde vor der VIP-Installation von Hand getrocknet, enthielt aber dennoch eine erhöhte Restfeuchtigkeit. Anschliessend wurde die Fläche durch eine bituminöse Abdichtung wassererdicht geschlossen. Darüber wurde eine Schicht aus grobem Kies oder Zementplatten verlegt. Fotos des Einbaus sind in Fig. 8 zu sehen.



Fig. 8: Bilder vom Einbau der zwei VIP-Testfelder.

Resultate

Die Datenaufzeichnung wurde im Juni 2004 gestartet. Der Verlauf von Temperatur und Feuchte im ersten Testfeld während eines Jahres ist in Fig. 9 dargestellt.

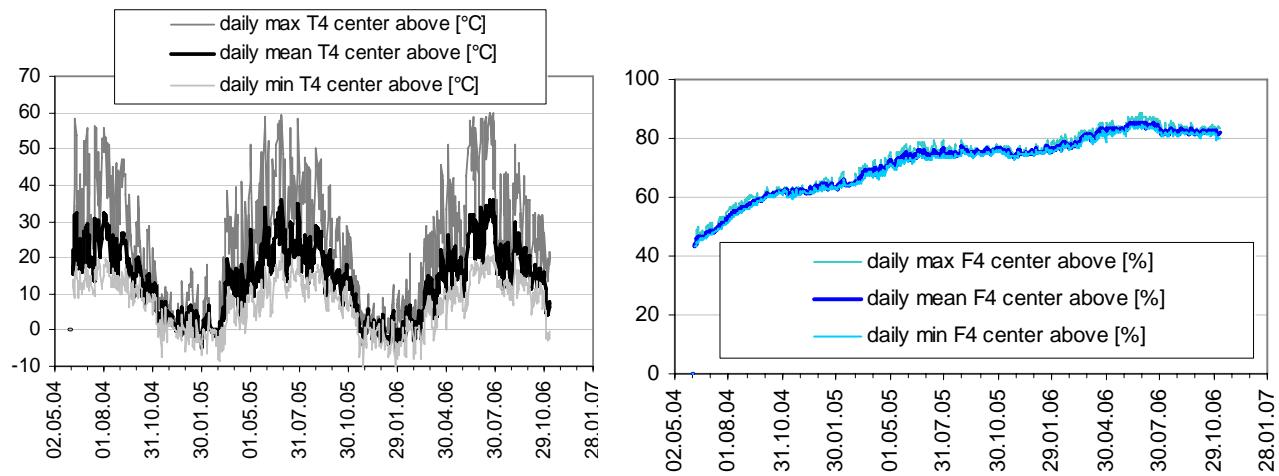


Fig. 9: Aufgezeichneter Verlauf von Temperatur und relativer Feuchtigkeit im Zentrum der VIP (außen).

Im Zentrum der Paneelfläche aussen werden die höchsten Temperaturen gemessen, die trotz der Dämpfungswirkung durch die Kiesschicht Werte bis gegen 60°C erreichen. Auf der Innenseite ist die Temperatur stabiler. Sie sinkt im Winter aber ab, da der darunter liegende Lagerraum nicht voll beheizt ist. Aufschlussreich ist die Beobachtung, dass die relative Luftfeuchtigkeit φ auf beiden Seiten des VIP praktisch unabhängig ist von der Aussentemperatur. Dies ist zu erwarten für ein geschlossenes Volumen, das Luft und Materialien enthält, deren Feuchtespeicherverhalten näherungsweise durch eine Sorptionskurve $u(\varphi)$ mit geringer Temperaturabhängigkeit beschrieben wird. Auf der unten liegenden raumseitigen VIP-Oberfläche wurde fast durchgehend gesättigte Luftfeuchtigkeit gemessen, was durch die aufgenommene Feuchtigkeit vor dem Einbau erklärbar ist. Das langsame Ansteigen der relativen Feuchtigkeit auf der Aussenseite ist durch Feuchteverlagerung von der Innenseite erklärbar. Gesamthaft liegt die mittlere relative Feuchtigkeit beider Seiten im Bereich von 80 bis 85 % r.F. Diese Beobachtungen zeigen, dass das Auftreten von Temperaturen im Bereich von 60°C und gleichzeitiger hoher Feuchtigkeit bei der Entwicklung von Laminaten berücksichtigt werden muss.

Das zweite, nicht mit Sensoren ausgerüstete Testfeld wurde mehrmals geöffnet, um den Feuchtegehalt und den Innendruck von einzelnen Paneelen im Labor bestimmen zu können. Bei der ersten Öffnung wurde Kondensat auf der Unterseite der VIP beobachtet, wie auf Grund der Messwerte der relativen Feuchtigkeit im ersten Testfeld zu erwarten war. Jährliche Anstiegsraten des Innendrucks p_a und des Feuchtegehalts sind in Fig. 10 für beide Formate dargestellt. Die Daten sind jeweils auf ein Jahr extrapoliert. Wie in der Abbildung eingezeichnet nimmt die Unsicherheit zunehmender Messzeit (d.h. grösseren Messwerten) ab. Erkennbar ist auch ein transienter Effekt, der auf die jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Randbedingungen zurückzuführen ist.

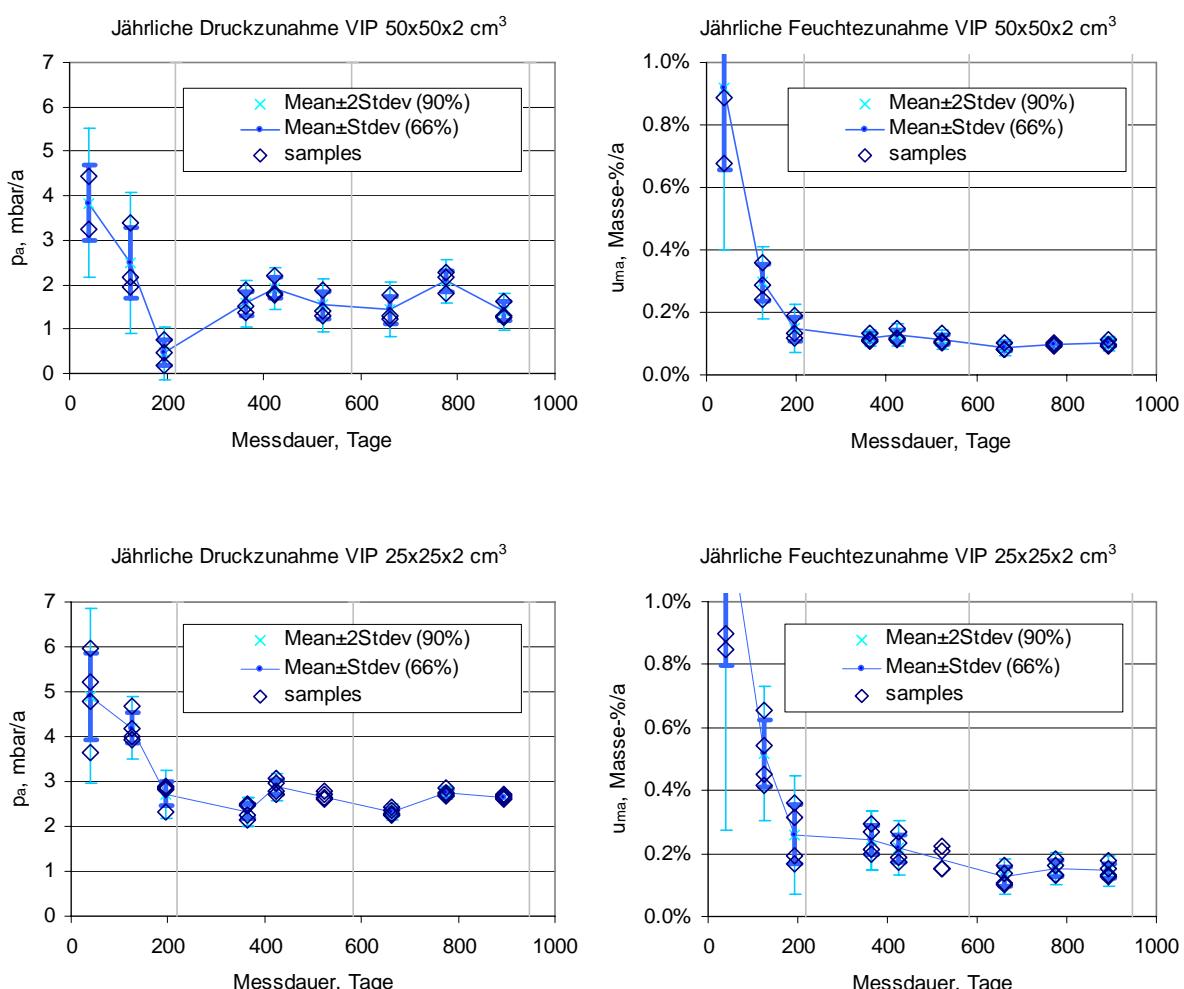


Fig. 10: Extrapiolierte jährliche Anstiegsraten des Innendrucks und des Feuchtegehalts in VIP für das grössere Format (oben) bzw. das kleinere Format (unten) auf Grund wiederholter Messungen an ausgebauten Paneelen.

Für das grössere Format betragen die Anstiegsraten 1.5 – 2 mbar/a beim Innendruck und ca. 0.1 Masse-%/a beim Feuchtegehalt. Für das kleinere Format sind die Zunahmen etwa 50 % höher, bedingt durch den grösseren Beitrag der Permeation durch den Randbereich. Die Werte liegen damit in Bereichen, die aufgrund von Laborversuchen und Modellrechnungen erwartet werden können. Bezogen auf die Leistungsfähigkeit der Wärmedämmung bedeutet diese Alterung eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit von rund 0.004 auf 0.008 W/(m K) im Lauf von 25 Jahren. Eine genaue Analyse der Daten über die ganze bisherige Messdauer und der Vergleich mit numerischen Alterungsmodellen ist zurzeit in Bearbeitung.

Nationale Zusammenarbeit

Die Empa arbeitet auf nationaler Ebene in der „Arbeitsgruppe Vakuumdämmung“ beim energie-cluster mit. Ein Treffen mit ca. 20 Teilnehmenden von Fachhochschulen, Planungsbüros und der Industrie fand an der Empa im August 2006 statt. Mit der Eicher & Pauli AG ist ein Forschungsantrag zu Qualitätsfragen und Deklaration bzw. Bemessung von VIP-Konstruktionen in Vorbereitung. Die Empa ist im Rahmen des CCEM (Kompetenzzentrum für Energie und Mobilität des ETH-Bereichs) am Projekt Bauerneuerung / Retrofit beteiligt. Darin werden im Bereich der Gebäudehülle energieeffiziente Lösungen mit Hochleistungsisolationssystemen entwickelt.

Internationale Zusammenarbeit

Das nationale Projekt CCEM-Retrofit ist gekoppelt mit dem Projekt IEA ECBCS Annex 50 Prefabricated Systems for Low Energy / High Comfort Building Renewal. Die Empa ist nicht direkt im internationalen Projekt beteiligt, doch fließen Ergebnisse des IEA-Projekts in das nationale Projekt ein und umgekehrt. Die Empa ist in Kontakt zu deutschen VIP-Herstellern und Prüflabors und ist in die Gespräche über Qualitätsüberwachung und Produktzulassung in Deutschland eingebunden. Ergebnisse der Arbeiten im Bereich Vakuumisolation wurden an der „4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings“ in Lyon präsentiert.

Bewertung 2006 und Ausblick 2007

Das Bau- und Messprojekt für eine VIP-Bodenisolierung des Kühl-/Tiefkühlraums im EAWAG-Neubau Chriesbach konnte erfolgreich gestartet werden. Damit VIP-Isolation und Messeinrichtungen installiert werden konnten wurde das Bauprojekt nachträglich angepasst. Alle Schritte wie Erstellen des Verlegeplans, Produktion der VIP mit Sensorscheibe, Kalibrierung der Innendrucksensoren, Einbau der Bodenisolierung mit gleichzeitiger Verdrahtung der Messstellen wurden erfolgreich abgeschlossen und erfolgten unter direkter Beteiligung der Empa. Erste Messungen zeigen das Funktionieren der VIP-Isolierung und der Messkette.

Die Messungen durch Aus- und Wiedereinbau von VIP im Flachdach Regensdorf laufen planmäßig weiter. Sie zeigen Alterungseffekte, die im Rahmen der Erwartungen liegen, und bestätigen damit die Anwendbarkeit der VIP-Technologie für diese Anwendungen, sofern in Bemessungswerten die Alterung entsprechend berücksichtigt wird.

Im Jahr 2007 wird das Monitoring der Testflächen weitergeführt. Die Innendruck- und Klimadaten werden analysiert und mit Lebensdauermodellen verglichen. In Laborversuchen und numerischen Berechnungen wird untersucht, wie das Alterungsverhalten von geschützten VIP (z.B. zusätzliche Metall- oder Glasdeckschichten) im Vergleich zu ungeschützten Paneelen verlängert werden kann.

Referenzen

- [1] Vacuum Insulation Panels – Study on VIP-components and panels for service life prediction of VIP in building applications, Final Report IEA/ECBCS Annex 39 Subtask A (2005). Pdf-Dokument: www.vip-bau.ch.
- [2] R. Caps: **Monitoring Gas Pressure in Vacuum Insulation Panels**, Proc. of the 7th International Vacuum Insulation Symposium, CH-Duebendorf, 2005.
- [3] H. Simmler and S. Brunner, **Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, ageing mechanisms and service life**, Energy and Buildings 37 (2005) 1122-1131.
- [4] H. Simmler, S. Brunner: **Thermal properties and service life of vacuum insulation panels (VIP)**, Proc. of the 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings (EPIC), F-Lyon, 2006.