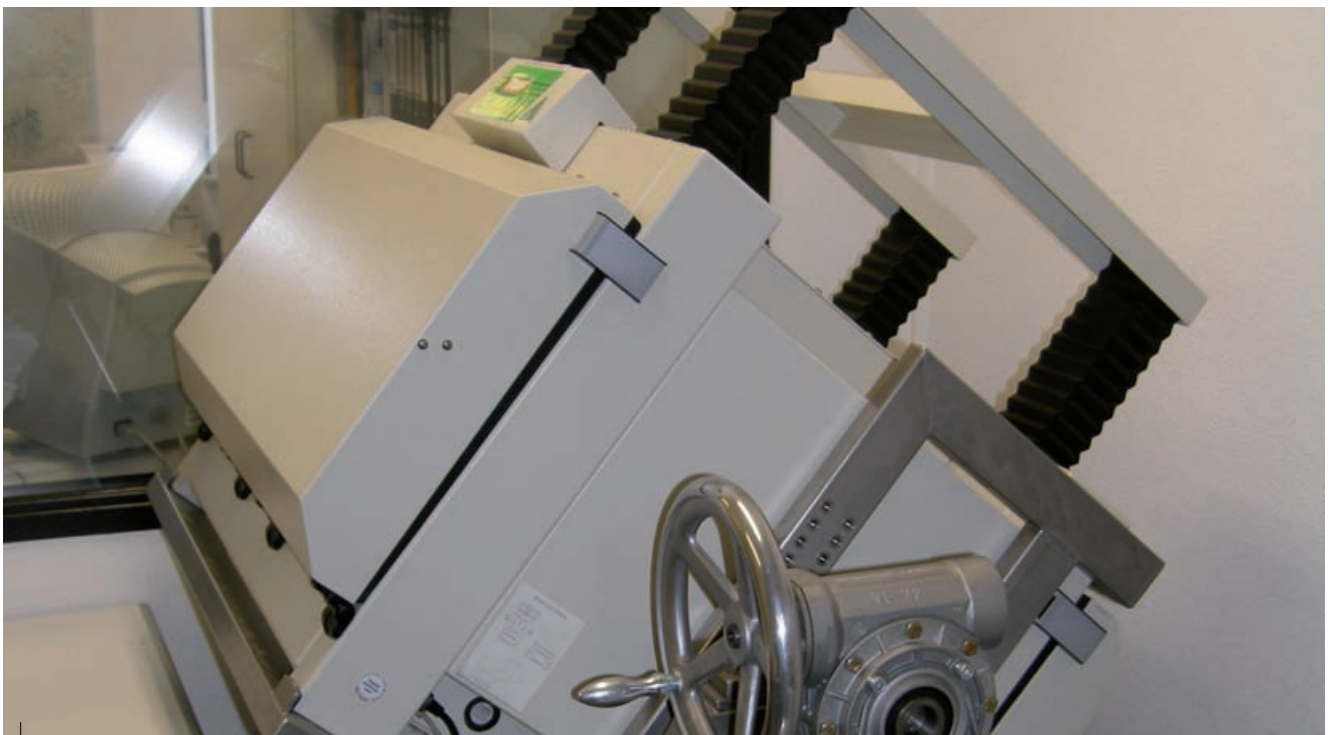


*Tekst en beeld:
prof. ir Nico
Hendriks, BDA
Dakadvies BV*

De invloed van vocht op bepaalde eigenschappen van isolatiematerialen is al heel lang onderwerp van studie door diverse onderzoekers. Dit is het eerste deel van twee artikelen en het gaat over de vochtinvloeden op de thermische prestatie van dakisolatie. In deel 2 komt de invloed van vocht aan de orde op de druksterkte en beloopbaarheid. Allereerst wordt nu een kort historisch overzicht gegeven van onderzoeken aan daken met aan vocht gerelateerde problemen en metingen van eigenschappen die met deze problemen zijn verbonden. Hierbij wordt ingegaan op de mechanismen van vochtopname in dakisolatiematerialen en laboratoriumonderzoeken.

De invloed van vocht op enkele eigenschappen van dakisolatie



Lambdametingen met een tweeplatenapparaat.

Deel 1: De invloed van vocht op de thermische prestatie

Het dak is vaak een van de belangrijkste componenten in het warmtetransport door de gebouwschil. In de gebruikelijke warm-dakconstructies bestaat de opbouw uit een onderconstructie, een dampremmende laag, thermische isolatieplaten en een (meestal mechanisch) bevestigd dakbedekkingssysteem van bitumen of kunststof banen. De warmteweerstand van dergelijke daken hangt af van factoren zoals het type en de dikte van de isolatie, het aantal en de afmetingen van dakdoorbrekingen, het aantal mechanische

bevestigingen en niet in de laatste plaats de hoeveelheid ingesloten vocht en de verdeling daarvan. Zelfs kleine vochthoeveelheden kunnen bij sommige isolatiematerialen de thermische prestatie aanzienlijk negatief beïnvloeden, maar ook de druksterkte en als gevolg daarvan ook de beloopbaarheid.

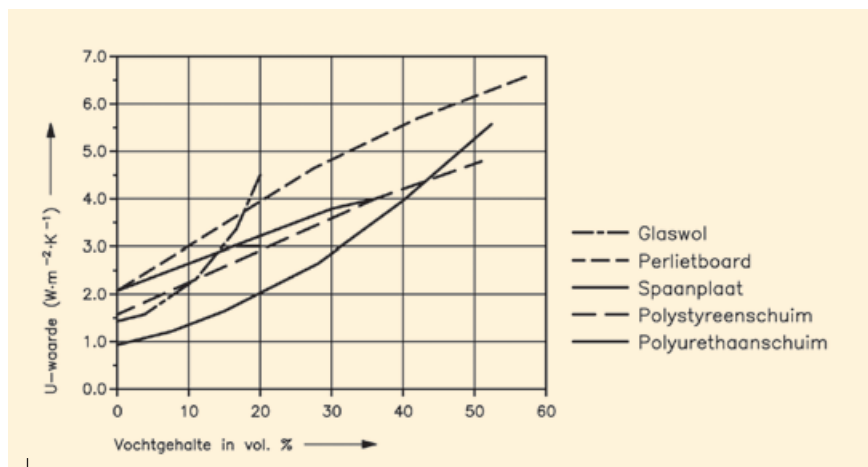
Dak- en laboratoriumonderzoeken

Research naar het effect van vocht vindt al vele jaren plaats. Tot het midden van de jaren tachtig was veel van de kennis

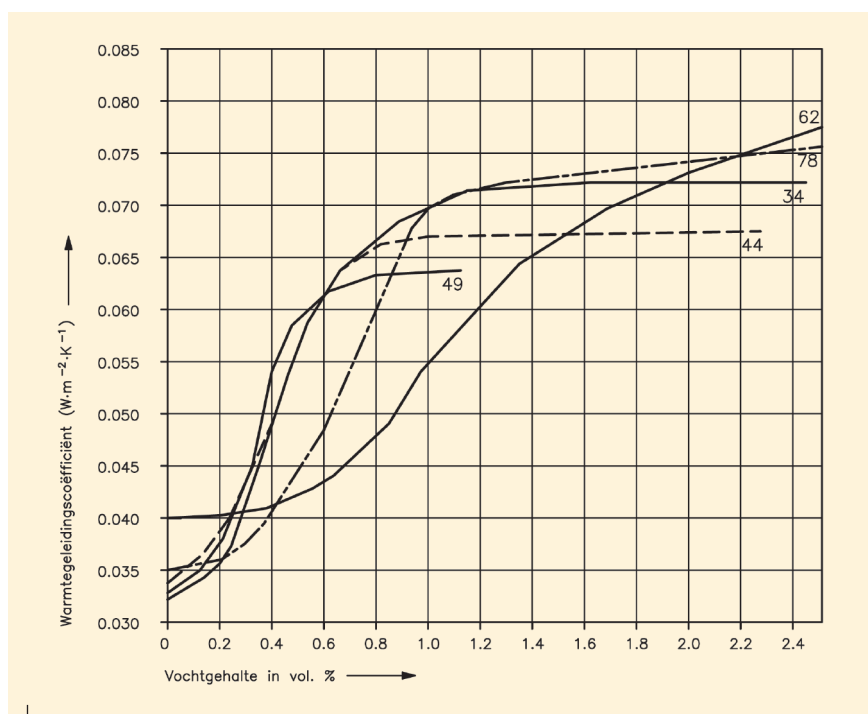
over het effect van vocht op de warmtegeleiding gebaseerd op de metingen door Jaspersen [1, 1952]. Hij gebruikte een stationaire meetmethode met een warmteplaat aan één zijde van het isolatiemonster en een koude aan de andere zijde en warmtestroommeters aan beide zijden. Een andere bekende vroege studie is gedaan door Cammerer [2, 1957]. In een uitgebreid overzicht gaat hij uitvoerig in op het effect van vochtverdeling op het meten van de warmtegeleiding en op de verandering van de vochtverdeling gedurende de meetperiode.

Na hem was het Tye [1969] die zich bezig hield met het effect van vochttransport op de warmtegeleiding van vochtige materialen. Hij ontwikkelde een aantal modellen die gebruikt konden worden om het gedrag te voorspellen van poreuze samengestelde materialen zoals dakisolatie. Tobiasson en Ricard [3, 1979] presenteerden laboratoriumresultaten voor het effect van vochttoename op de warmteweerstand van enkele veel gebruikte dakisolatiematerialen. Tot dat moment waren er echter in de open literatuur geen andere studies beschikbaar van dakbedekkingsconstructies met isolatie en een bitumen dakbedekkingssysteem. Bovendien was de invloed van de hoeveelheid en de verdeling van vocht op de thermische prestatie van geïsoleerde (warme) daken nog niet onderzocht. Deze situatie veranderde met de publicatie van Knab L. I. e. a. [4, 1980]. In hun artikel presenteerden zij de testresultaten van een laboratoriumprogramma, gesponsord door het Amerikaanse Ministerie van Energie, inzake de invloed van het vochtgehalte op de thermische prestatie van dakconstructies met isolatie en een bitumen dakbedekkingssysteem. Verder evalueerden zij verschillende non-destructieve technieken om het vochtgehalte en de verdeling ervan in daken te meten. Figuur 1 toont een voorbeeld van de resultaten die zij vonden voor de 'thermische geleidbaarheid', die wij nu de U-waarde noemen, in afhankelijkheid van het vochtgehalte voor verschillende isolatiematerialen. De oorspronkelijke eenheid voor thermische geleidbaarheid (Btu/h.ft².°F) is hierbij omgerekend naar de huidige SI eenheid (W • m⁻² • K⁻¹).

In de jaren tachtig waren er diverse publicaties inzake vochtinvloeden, allemaal gerelateerd aan de thermische prestatie. Heel belangrijk waren die van Achtziger en Cammerer [5, 1984]. Deze gegevens zijn nog vele jaren daarna bij berekeningen gebruikt. Figuur 2 geeft de resultaten van hun metingen op minerale wol van verschillende dichtheden. Een strategie voor het beoordelen van de warmteweerstand van nat isolatiemateriaal werd uitgewerkt door Sandberg [6, 1987].



Figuur 1: Thermische geleidbaarheid' (U-waarde) afhankelijk van het vochtgehalte voor warm-dakconstructies met bitumen dakbedekking en 25 mm isolatie van verschillende materialen [4, 1980].



Figuur 2: Warmtegeleidingscoëfficiënt van minerale wol van verschillende dichtheden (34 tot 78 kg·m⁻³) afhankelijk van het vochtgehalte [5, 1984].

Bij dit onderzoek werd een computerprogramma ontwikkeld om de effecten te berekenen van vochttransport en faseveranderingen (van damp naar vloeistof en omgekeerd). Verder werden laboratoriumexperimenten uitgevoerd met vochtige minerale wolisolatie in een tweeplatenapparaat voor de bepaling van de warmtegeleidingscoëfficiënt. Er werd een bevredigende overeenkomst vastgesteld tussen de computerberekeningen en de resultaten van de experimenten. De warmteweerstand van minerale wolisolatie in twee verschillende praktijkomstandigheden werd bestudeerd onder de volgende omstandigheden:

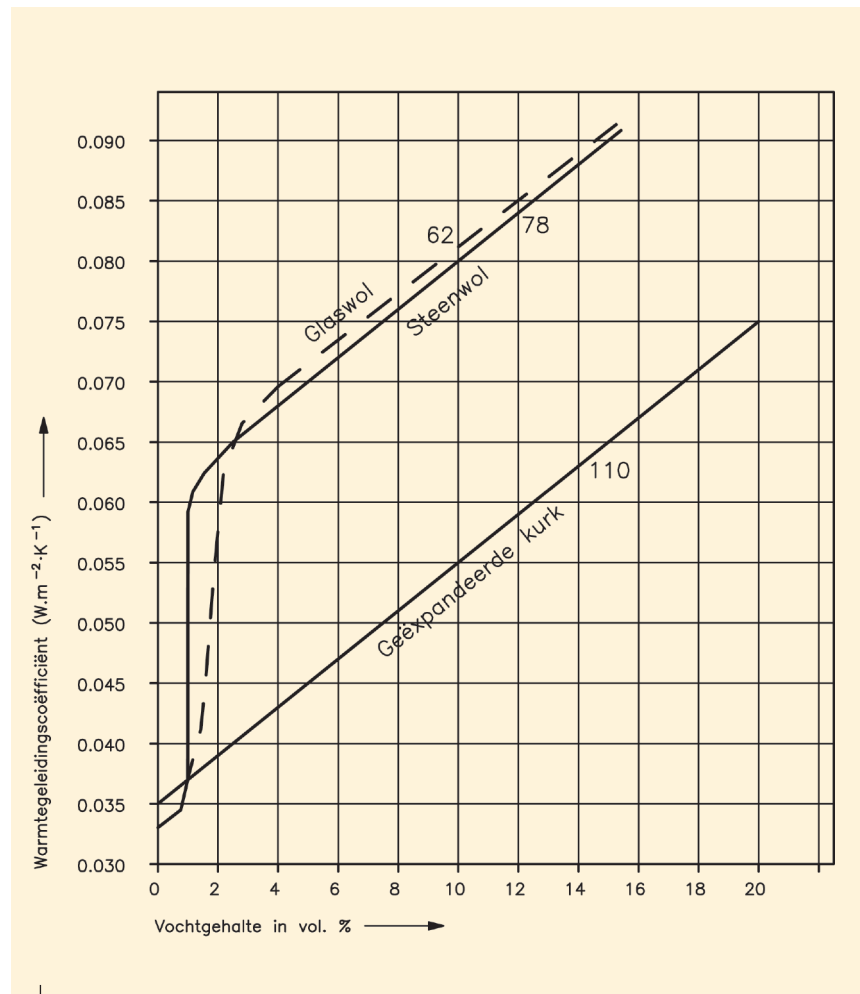
- Isolatie met een toevallig hoog vochtgehalte als gevolg van lekkage, regenwaterinfiltratie en dergelijke. Een typisch voorbeeld is isolatie aan de buitenzijde van een fundering.
- Isolatie met ingesloten vocht binnen waterdichte lagen. Een dergelijke situatie kan zich soms voordoen in warmdakconstructies: vocht tussen dakbedekking en dampremmende laag.

Een belangrijke conclusie was dat faseveranderingen in sommige gevallen belangrijk waren voor het warmte-transport en daarom in beschouwing moesten worden genomen.

Sandberg stelde voor om de warmtestroom te verdelen in drie componenten:

- **Type 1** – Warmtestroom als gevolg van een temperatuurgradiënt bij een conditie van vochtevenwicht, dat wil zeggen zonder vochttransport. Deze warmtestroom wordt beïnvloed door verschillende mechanismen, waaronder het vochtgehalte van het materiaal.
- **Type 2** – Convectief warmtetransport door vochtstroming. Waterdamp en water dragen ieder hun eigen enthalpie (interne energie). Hierbij wordt opgemerkt dat de enthalpie van waterdamp verschilt van die van water vanwege de latente verdampingswarmte.
- **Type 3** – Warmtetransport als gevolg van faseveranderingen.

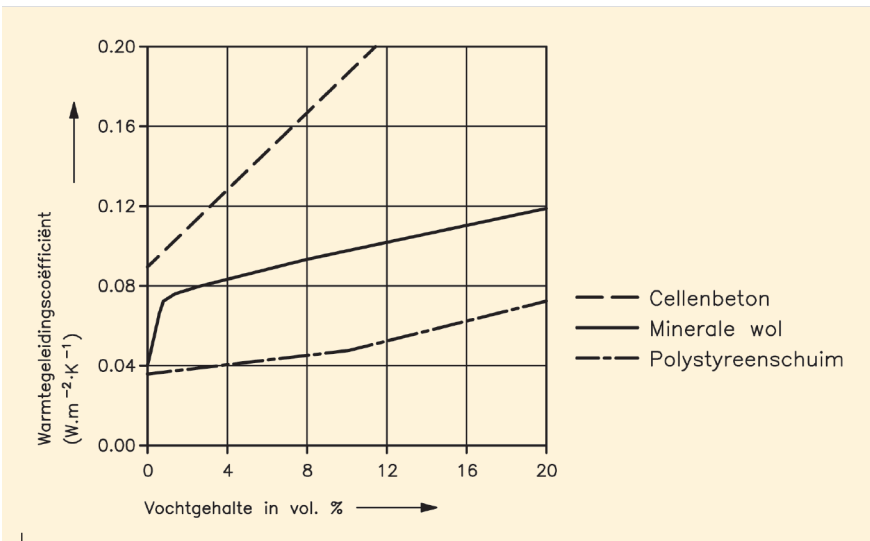
Simulatie van deze drie vochtinvloeden in een testprocedure is onrealistisch en onnodig. De invloeden volgens type 2 en 3 hangen geheel af van de aanwezigheid en omvang van vochttransport in het materiaal en als deze invloeden aanwezig zijn gedurende een test, is het moeilijk om een materiaaleigenschap of de eigenschap van een bouwproduct betrouwbaar vast te stellen. Bovendien is er een aanzienlijk risico van het overschatten van deze invloeden. De resultaten van 'standaard' metingen zoals uitgevoerd door Jespersen voor minerale wol worden getoond in figuur 3. Bij ongeveer 1 volume % vocht neemt de warmtegeleidingscoëfficiënt steil toe van ~ 0.035 tot ~ 0.065 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.



Figuur 3: Warmtegeleidingscoëfficiënt als een functie van het vochtgehalte volgens Jespersen [1, 1952]: steenwol (78 kg·m⁻³); glaswol (62 kg·m⁻³); geëxpandeerde kurk (110 kg·m⁻³).

Volgens Sandberg is het niet eenvoudig zo niet onmogelijk om een goede fysische verklaring te geven voor deze plotselinge toename in warmtegeleiding. In feite kan deze toename alleen worden verklaard door faseveranderingen van het vocht in het materiaal.

Dit betekent dat de warmtegeleidingscoëfficiënt zoals gerapporteerd door Jespersen [1, 1952] geen zuivere materiaaleigenschap betreft maar een 'schijnbare warmtegeleidingscoëfficiënt', die niet alleen afhangt van het vochtgehalte maar ook van de vochtstroom en de randvoorwaarden. Het komt er op neer dat in de proeven van Jespersen die vloeistofstroom aan de warme zijde een warmtedaling (verdamping) veroorzaakt en aan de koude zijde een warmtebron (condensatie). De consequentie hiervan is dat de warmtestroom die de warmtestroommeters opnemen aan de beide oppervlakken van het proefstuk (aanzienlijk) hoger is dan de Type 1 warmtestroom in het materiaal zelf. Het lijkt er dus op dat vele van de onderzoekers, die resultaten van Jespersen hebben gebruikt, hierbij onterecht warmtestroomberekeningen bij minerale wol baseren op metingen in een zeer speciale vochtsituatie die, volgens Sandberg, in de praktijk maar zelden voorkomt.



Figuur 4: De invloed van vocht op de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt van isolatiemateriaal [7, 2001].

Een dergelijke situatie vraagt namelijk om een permanente toevoer van vocht aan de warme zijde. In werkelijkheid zal in het algemeen de hoeveelheid vocht beperkt zijn en juist in zulke permeabele materialen als minerale wol zal het vocht onder de invloed van de temperatuurgradiënt zich snel concentreren in een dunne laag aan de koude zijde. De 'speciale vochtsituatie' kan zich daarentegen in de praktijk wel voordoen in geval van daklekkages, waarbij het lekwater geconcentreerd aanwezig is op de dampremmende laag onder de isolatie.

De voorbeelden geven aan hoe belangrijk het is om de grootschalige en lange termijn vochtbewegingen in het materiaal in acht te nemen. Dit vraagt om een computermodel en kennis van de randvoorwaarden inzake de vochtigheid en de vochtgeleidende eigenschappen van het materiaal. In de minerale wolisolatie gedraagt vocht zich erg mobiel en als gevolg daarvan vormen faseveranderingen een belangrijk energietransportmechanisme.

Künzel en Schmidt [7, 2001] presenteren de stand van de techniek in het gebruik van meer geavanceerde rekenmethoden en gebruikten daarbij het WUFI model. Figuur 4 toont de toename in de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt van drie verschillende isolatiematerialen afhankelijk van hun vochtgehalte.

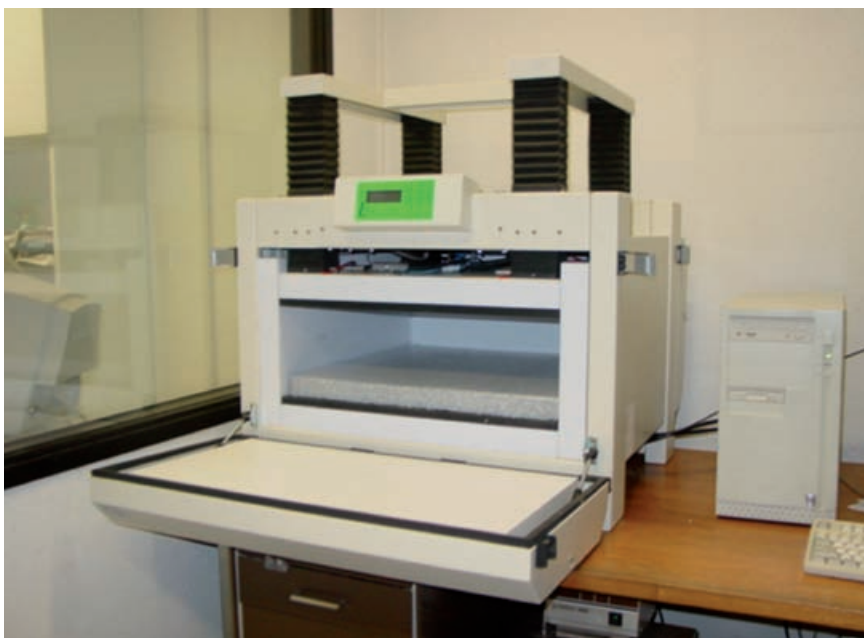
Inzake de blijkbare verschillen in de invloed van vocht op de warmtegeleidingscoëfficiënt merken de auteurs het volgende op. Terwijl de warmtegeleiding van minerale materialen zoals cellenbeton in figuur 4 lineair toeneemt met het vochtgehalte, vertoont de warmtegeleidingscoëfficiënt van EPS een geringe progressieve toename. De warmtegeleiding van minerale wol vertoont echter al bij een zeer laag vochtgehalte een verrassende toename. Dit is het gevolg van de direct optredende herverdeling van het vocht als gevolg van de snelle dampdiffusie in minerale wol wanneer een temperatuurgradiënt wordt aangebracht over het proefstuk. Dit betreft zogenoemde niet-stationaire latente warmte-invloeden, als gevolg van faseveranderingen van het vocht in het materiaal gedurende de meting in de lambda-meter (tweelatenapparaat of warmtestroommeterapparaat). Deze latente warmte-invloeden zijn in het algemeen slechts van korte duur en hebben niets te maken met de werkelijke warmtegeleiding van het isolatiemateriaal. Aangezien hun effect sterk afhankelijk is van de aangrenzende materialen van de isolatielaag, zijn ze niet karakteristiek voor het isolatiemateriaal zelf. Dit betekent dat de warmtegeleidingscoëfficiënt van minerale wol die op deze manier wordt bepaald, zoals getoond in figuur 4, niet erg geschikt is als materiaaleigenschap voor niet-stationaire berekeningen of voor het bepalen van de stationaire U-waarde.

De werkelijke warmtegeleidingscoëfficiënt van minerale wol kan in het tweelatenapparaat worden bepaald wanneer 'geschikte voorzorgsmaatregelen' worden genomen. Resultaten van dergelijke metingen laten zien dat wanneer latente warmte-effecten worden uitgesloten de warmtegeleidingscoëfficiënt van minerale wol een vochtafhankelijkheid vertoont die zeer goed te vergelijken is met die van EPS in figuur 4. Deze vaststellingen komen overeen met die van Sandberg [6, 1987]. Helaas vermelden de auteurs niet wat dan wel de 'geschikte voorzorgsmaatregelen' zijn waaraan zij refereren, noch tonen zij resultaten van dergelijke aangepaste metingen.

Ojanen [8, 2004] borduurt verder op het artikel van Sandberg en omschrijft dat de totale warmtestroom bestaat uit drie verschillende componenten:

- **Component 1** – Warmtetransport door uitsluitend geleiding in de natte vaste fase, maar zonder massa (vocht) stroom. Dit is wat bedoeld zou moeten worden met de warmtegeleiding van nat materiaal.
- **Component 2** – Warmtetransport door enthalpiestroom wanneer sprake is van vochttransport in vloeibare of dampfase.
- **Component 3** – Warmtestroom als gevolg van faseveranderingen van het vocht.

Bij open poreus materiaal is het praktisch onmogelijk om het type warmtetransport met zuivere geleiding (component 1) alleen door meting te bepalen als gevolg van het feit dat de temperatuurgradiënt gedurende de metingen vochttransport en faseveranderingen veroorzaakt. De gemeten warmtegeleidingswaarden bestaan dan ook uit alle drie de componenten van warmtetransport. In minerale wolisolatie versterken de faseveranderingen de schijnbare warmtestroom gedurende het vochttransport en aan het eind van dit proces komt de warmtestroom dichtbij de 'droge conditie' waarden onder de voorwaarde dat de hoeveelheid vocht in de vloeibare fase relatief klein is vergeleken met het totale volume van de open ruimte in de isolatie.



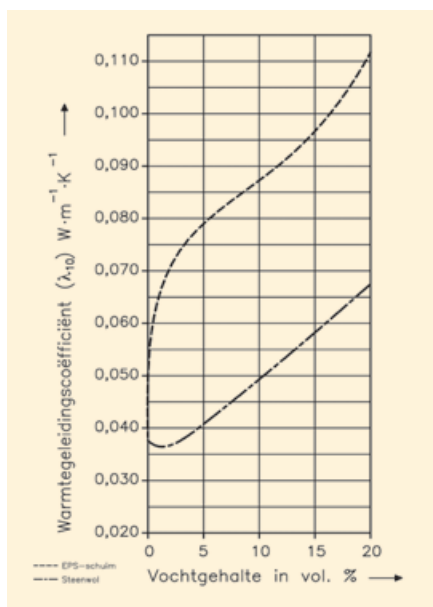
Wanneer echter de hoeveelheid vocht zodanig hoog is dat een belangrijk deel van de open ruimte in de isolatie is gevuld met water, dan zal de warmtegeleiding het 'droge conditie' niveau niet bereiken. Bij EPS is het vochttransport en de daarmee samenhangende faseverandering duidelijk aanzienlijk lager dan bij minerale wolisolatie, waardoor dus ook de additionele warmtestroom veroorzaakt door de component 2 en 3 typisch kleiner is dan bij minerale wolisolatie.

Ojanen concludeert dat verschillende thermische isolatieproducten verschillende vochtgeleidende eigenschappen hebben en dat dus hun toepasbaarheid bij verschillende vochtbelastingscondities kunnen variëren.

Het is bijvoorbeeld duidelijk dat minerale wolisolatie in grond- en funderingstoepassingen een significant hoger vochtgehalte zal hebben dan EPS, specifiek wanneer bevochtiging plaatsvindt door vloeibaar water. Het drogen van een hogere vochtinhoud vraagt ook een grotere hoeveelheid warmte. Dit betekent dat het effect van vocht op de totale warmteverliezen door minerale wolisolatie significant hoger kan zijn dan bij EPS-isolatie onder dezelfde vochtbelastingscondities. In de context van daktoepassingen is deze conclusie belangrijk in relatie tot isolatie die nat is geworden door (ernstige) lekkage, specifiek in warm-dakconstructies met een dampremmende laag.

De resultaten van proeven (figuren 5a en 5b) in het BDA laboratorium

[9, 2006] tonen effecten die vergelijkbaar zijn met die in de figuren 2, 3 en 4.



Figuur 5b: Het effect van vocht op de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt van isolatiematerialen [9, 2006].

Conclusies

1. De invloed van vocht op de thermische prestatie van dakisolatie is uitvoerig onderzocht, maar de resultaten zijn niet altijd goed vergelijkbaar.
2. De warmtegeleiding van nat en zeer dampdoorlatend materiaal zoals minerale wol (steenwol en glaswol) is bijzonder moeilijk zo niet onmogelijk betrouwbaar vast te stellen. De gemeten warmtestroom bestaat uit meerdere componenten die gedurende de meting kunnen veranderen, afhankelijk van de mate van vloeistoftransport, het effect van faseverandering enz.
3. Wanneer minerale wolisolatie aanzienlijk vochtiger wordt door vloeibaar

water, bijvoorbeeld als gevolg van ernstige lekkage in warm-dakconstructies met een dampremmende laag, zal in het algemeen het vochtgehalte aanzienlijk hoger zijn dan bij kunststofschuim zoals EPS onder gelijke omstandigheden. Het droogproces van een grotere vocht-hoeveelheid vraagt ook meer warmte. Dit betekent dat de invloed van vocht op het totale warmteverlies bij minerale wol aanzienlijk hoger kan zijn dan bij kunststofschuim zoals EPS onder dezelfde vochtbelastingscondities.



Bronnen

[1] Jespersen, H.B. 1952: 'Fugtige materia- lers varme ledningstal'(in Danish), VARME, No. 3, Copenhagen.

[2] Cammerer, J. S. 1957: 'The Influence of Humidity on the Thermal Conductivity Coefficients of Building Materials According to the International Literature', (Feuchtigkeitsregelung, Durchfeuchtung und Wärmeleitfähigkeit).

[3] Tobiasson, W., and J. Ricard 1979: 'Moisture Gain and its Thermal Consequence for Common Roof Insulations', Proceedings, 5th Conference on Roofing Technology, NBS and NRCA.

[4] Knab, L. I. e.a. 1980: 'The Effect of Moisture on the Thermal Conductance of Roofing Systems', NBS Building Science Series 123.

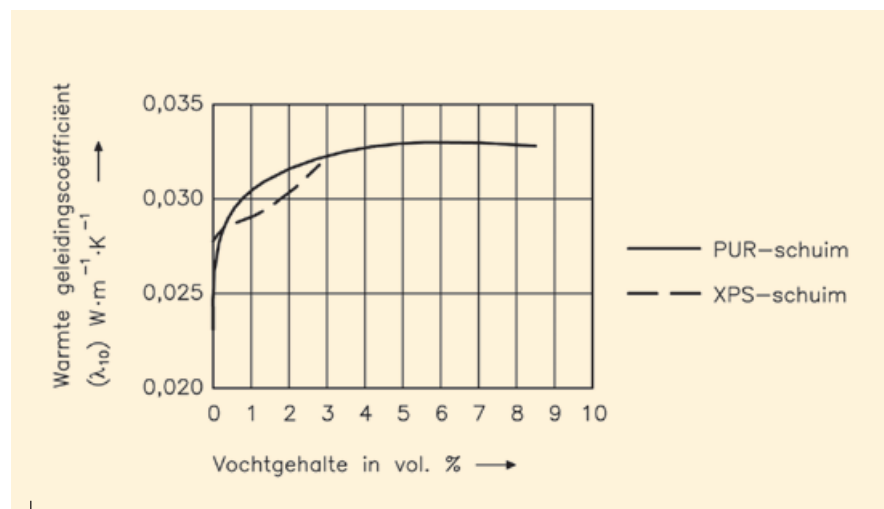
[5] Achtziger, J., J. Cammerer 1984: 'Water Content versus Thermal Conductivity', (Einfluss des Feuchtegehaltes auf die Wärmeleitfähigkeit von Bau- und Dämmstoffen), FIW München.

[6] Sandberg, P.I. 1987: 'Thermal Resistance of a wet Mineral Fibre Insulation' Thermal Insulation: Materials and Systems, ASDTM STP 922, F.J. Powell and S.L. Matthews, Eds., American Society for testing and Materials, Philadelphia, pp. 394-404.

[7] Künzel, H.M. and Th. Schmidt 2001: 'Moisture Transport In Building Materials - Computer Simulation with the WUFI Model', IBP.

[8] Ojanen, T. 2-004: 'Draft statement about the influence of moisture on the thermal conductivity of thermal insulation materials - Differences between EPS and mineral wool ground and foundation installation applications', Research report no. RTE1836/04, VTT Technical Research Centre of Finland.

[9] Hendriks, N.A. 2006: 'Probleemloos isoleren - Schadevoorbeelden en oplossingen', BDA publicatie.



Figuur 5a: Het effect van vocht op de gemeten warmtegeleidingscoëfficiënt van isolatiematerialen [9, 2006].