

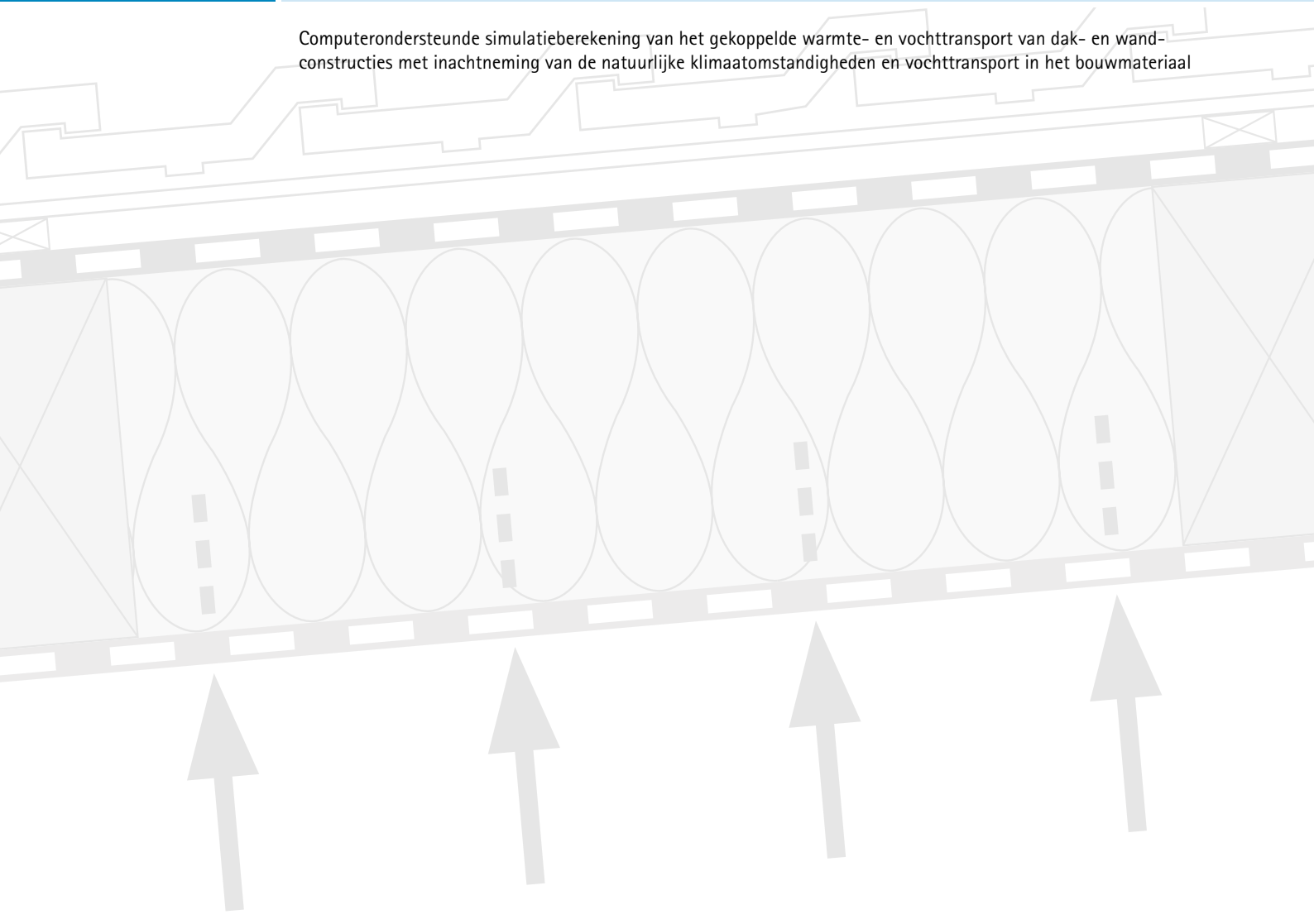
Renovatiestudie

Oplossingen voor de luchtdichtheid bij energietechnische renovaties van dakconstructies

Functietechnische plaatsing van de luchtdichting in constructies

Sub-and-Top: vergelijking van het potentieel met betrekking tot het uitblijven van bouwschade bij dampremmen met verschillende μ_d -waarde

Computerondersteunde simulatieberekening van het gekoppelde warmte- en vochttransport van dak- en wandconstructies met inachtneming van de natuurlijke klimaatomstandigheden en vochttransport in het bouw materiaal





Zeer betrouwbare renovatie-oplossingen

Inleiding	4		
Deel A. Functietechnische plaatsing van de luchtdichting in constructies	4	Deel B. Sub-and-Top-vergelijking van het potentieel met betrekking tot het uitblijven van bouwschade bij dampremmen met verschillende μ_d-waarde	14
Gouden regel 1 op 2	4		
Bronnen van vochtindringing	4	Vergelijkende beschouwing van mogelijkheid tot opdrogen	14
Rekenmodellen voor diffusieprocessen	5		
Berekening conform EN 13788 [2]		W_{DD} -waarden voor verschillende μ_d -waarden	14
Methode van Glaser	5		
Berekening conform EN ISO 15026 [4]	5	Berekening van het potentieel met betrekking tot het uitblijven van bouwschade	15
Rekenmodellen voor indringing door convectie	6	Onderzochte constructies	15
Toename van de hoeveelheid vocht door inwendige convectie	6	Voorbeeld 1: diffusieopen onderdak	15
IJslagen zijn dampschermen	6	Voorbeeld 2: onderdakplaat van 60 mm zachtboard	15
μ_d -waarde en μ -waarde	6	Voorbeeld 3: onderdakplaat van 35 mm polyurethaan	15
Meetonzekerheden bij uiterst diffusieopen materialen	7	Evaluatie van de resultaten	16
Beoordeling van de vochtinvloeden. Definitie van het criterium »uitblijven van bouwschade«	7	Conclusie: vergelijking van Sub-and-Top-gemonteerde damprem- en luchtdichtingssystemen	16
Onderzochte constructies	8	Bouwdoel	17
Voorbeeld 1: 35 mm zachtboard	9	8 punten voor een duurzaam betrouwbare constructie en verwerking	17
Voorbeeld 2: 1:1-oplossing	9		
Voorbeeld 3: 2:1-oplossing	9		
Voorbeeld 4: Sub-and-Top-oplossing	9		
Evaluatie van de resultaten	9		
Doel	9		
Berekeningen	10		
35 mm zachtboard als buitendakisolatie. Zonder luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 1a)	10		
35 mm zachtboard als buitendakisolatie. Met perfecte luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 1b)	10		
1:1-oplossing Zonder luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 2)	11		
2:1-oplossing Zonder luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 3)	11		
Luchtdichtingsbanen met monolithische, functionele laag	12		
Sub-and-Top-oplossing. Zonder luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 4)	12		
Conclusie: vergelijking luchtdichting buiten t.o.v. luchtdichting en damprem binnen	13		
10 punten voor een duurzaam betrouwbare constructie	13		

Literatuur

[1] EN ISO 13788: Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren, Beuth-Verlag, Berlin, 13/2015

[2] Conferentie over schimmels in woningen: »Schimmelpilz aus bau-physikalischer Sicht - Beurteilung durch aw-Werte oder Isoplethensysteme?«, Klaus Sedlbauer, Martin Krus, Fraunhofer IBP, Holzkirchen

[3] EN 15026: »Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation«, Beuth-Verlag, Berlin, 07/2007

[4] WUFI Pro 5.3: »Berechnung des eindimensionalen hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen«, Fraunhofer IBP, Holzkirchen, 08/2008

[5] WUFI 2D 3.4: »Berechnung des zweidimensionalen hygrothermischen Verhaltens von Baukonstruktionen unter realen Bedingungen«, Fraunhofer IBP, Holzkirchen

[6] Delphin 5: »Numerisches Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransport«, Institut für Bauklimatik, Fakultät Architektur, TU Dresden, Dresden

[7] EN ISO 12572: »Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit«, Beuth-Verlag, Berlin, 09/2001

[8] WTA Merkblatt 6-2-01/D: »Simulation wärme- und feuchte-technischer Prozesse«, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA-Referat 6 Physikalisch-Chemische Grundlagen, München, 05/2002

[9] Studie: »Berechnung des Bauschadensfreiheitspotential von Wärmedämmkonstruktionen in Holz- und Stahlbauweise«, Moll bauökologische Produkte GmbH, 12/2015

[10] Deutsche Bauzeitung; Heft 12/89, pagina 1639 ff.



Luchtdichtheid van bestaande dakconstructies – welke mogelijkheden zijn er om dit te verbeteren?

Inleiding

Het is algemeen bekend dat een thermische isolatieconstructie pas werkt als deze luchtdicht is. Luchtdichte constructies zorgen voor een behaaglijk klimaat binnenshuis en helpen bouwschade door vochtophoping als gevolg van condensatie te voorkomen. Met name door convectieve vochtstromen kunnen in zeer korte tijd grote hoeveelheden vocht in een thermische isolatielaag terechtkomen, waardoor zowel de dragende constructie als de werking van de thermische isolatie risico loopt. Niet zelden leidt dit tot schimmelvorming en aantasting van de constructie.

Bij energetische renovatie van bestaande dakconstructies rijst de vraag welke mogelijkheden er zijn om de meestal gebrekkige luchtdichtheid te verbeteren

en te combineren met een grotere isolatiedikte.

Daarbij moet allereerst worden gekeken op welke plaatsen dit mogelijk is. Luchtdichtingslagen worden normaliter aan de binnenzijde van de isolatielaag aangebracht en zo mogelijk ook aan de binnenzijde van de dragende constructie. Dit advies is gebaseerd op een ideale toestand in geval van nieuwbouw. Bij dakrenovatie kan dit slechts met zeer veel inspanningen worden bereikt en met veel ongerief voor de bewoners van het te renoveren pand. Volgens de normalisatieregels kan de luchtdichtheid van gebouwen dan ook in elke laag van het bouwelement worden uitgevoerd.

Bij de keuze van de locatie van een luchtdichtingslaag moet overeenkomstig de vereisten van EN 13788 [2] rekening worden gehouden met condensvorming.

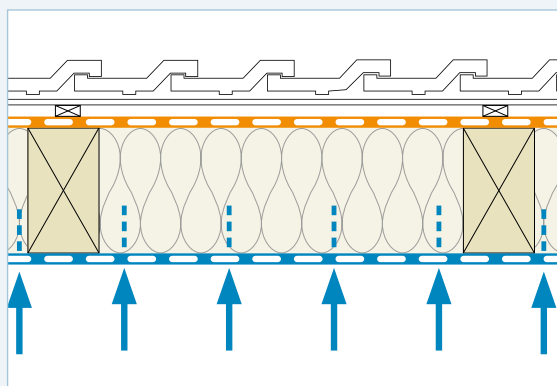
Wanneer een aan de binnenzijde aangebrachte luchtdichtingslaag een te lage diffusieweerstand (μ_d -waarde) heeft, kan er mogelijk te veel vocht in de constructie binnendringen en kan dit, afhankelijk van de volgende lagen van het bouwelement, tot condensvorming leiden – wanneer een luchtdichtingslaag aan de buitenzijde een te hoge sperswaarde heeft, kan dit bij lage weerstanden eveneens tot vochtophoping in de constructie leiden.

Doel van deze studie is om de afzonderlijke mogelijkheden te onderzoeken, te evalueren en tot aanbevelingen te komen voor duurzaam betrouwbare constructies, met een zo hoog mogelijk potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. Bij werkzaamheden aan bestaande woningen is het vooral belangrijk dat constructies fouttoleranties hebben.

A. Functietechnische plaatsing van de luchtdichting in constructies

Diffusieprocessen in de constructie kunnen betrouwbaar worden geëvalueerd

Afb. 1
Inwerking van vocht op een isolatieconstructie tijdens de winter



Via een dampremmende luchtdichtingslaag met een μ_d -waarde van 3 m komt per dag slechts 5 g water per vierkante meter in de constructie.

Gouden regel 1 op 2

De zogenaamde 20%-regel houdt in dat 20% van de totale warmtedoorlaatweerstand (bij gelijkblijvende warmtegeleidingsgroepen binnen de constructie is dat 1/5 van de totale thermische isolatiedikte) onder de diffusiewerende constructielaag mag worden aangebracht, zonder dat dit is doorgerekend. Wanneer deze specificatie wordt overschreden, moet dit rekenkundig worden gestaafd.

Hieraan ligt ten grondslag dat onder normale klimaatomstandigheden de temperatuur bij constructies met isolatiematerialen van gelijke warmtegeleidingsgroepen van binnenuit gezien na ca. 1/3 van de totale isolatiedikte tot onder de dauwpunttemperatuur (9,2 °C) daalt.

Wanneer de luchtdichtingslaag achter het dauwpunt ligt, kan dit tot een onbekende hoeveelheid condensaat leiden. Kritische vochtgehalten kunnen al vanaf een relatieve luchtvochtigheid boven 80% worden bereikt. Vanaf dit vochtgehalte wordt tussen 0 °C en 50 °C voldaan aan bijna alle voorwaarden voor schimmelgroei [3].

Bovendien kan de vorming van condens

op luchtdichtingsbanen die in een deel van een constructie worden aangebracht dat aan vorst blootstaat, tot ijsvorming leiden. Het ijs voorkomt elke vorm van vochttransport door de luchtdichtingslaag (bijv. diffusie of ontsnappen van gas door poriën), omdat ijs praktisch geen damp doorlaat. Daardoor kan er zich een nog grotere hoeveelheid schadelijk vocht ophopen.

Bronnen van vochtindringing

Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee belangrijke oorzaken van vochtindringing in thermische isolatieconstructies:

- indringing door diffusie
- indringing door convectie

Vochttransport door diffusieprocessen kan worden berekend op basis van algemene stationaire klimaatgegevens (bijv. maandwaarden conform EN 13788 [2]); ook kan een realistische niet-stationaire berekening van het vochttransport worden gemaakt op basis van reële parameters voor klimaat en bouwmaterialen conform EN 15026 [4].



Vochttransport door convectie kan niet worden berekend en resulteert vaak in een hoeveelheid vocht in de constructie, die ten opzichte van diffusie enkele honderden keren groter kan zijn.

Rekenmodellen voor diffusieprocessen

Er zijn diverse rekenmodellen met uiteenlopende nauwkeurigheid voor het berekenen van vochttransport door diffusie binnenin de constructie.

In EN 13788 [2] wordt de hoeveelheid condens resp. damp die door diffusie in het betreffende constructiedeel naar binnen resp. naar buiten kan, op basis van gestandaardiseerde klimaatomstandigheden berekend. Dit wordt ook de methode van Glaser genoemd.

Bij deze aanpak kunnen de warmte- en vochtstromen niet nauwkeurig worden bekeken. Het is niet mogelijk om het exacte vochtgehalte van een van de gebruikte materialen te bepalen. De methode van Glaser wordt in de bouw al tientallen jaren uitsluitend gebruikt om een grove inschatting te maken van condens- resp. verdampingshoeveelheden.

De niet-stationaire rekenmodellen conform EN 15026 [4], zoals uitgevoerd met WUFI pro [5] resp. WUFI 2D [6] of met Delphin [7], simuleren de vocht- en warmtestromen binnenin constructies. Veruit de meest nauwkeurige resultaten worden bereikt wanneer voor de berekening klimaatgegevens worden gebruikt die per uur zijn geregistreerd.

Berekening conform EN 13788 [2] Methode van Glaser

Berekeningen op basis van maandelijkse balans worden op basis van 12 algemene sets klimaatgegevens, met voor elke maand een gemiddelde binnen- en buitentemperatuur, gemaakt. In de winter kunnen de temperatuurramingen afhankelijk van de locatie buiten rond 0 °C liggen, in de zomer, afhankelijk van de regio, rond 18 °C. De constructies worden dus berekend zonder vorstperiode buiten en laten derhalve relatief duidelijke resultaten zien. De resultaten moeten dienovereenkomstig worden beoordeeld. Voor exacte resultaten worden niet-stationaire rekenmethodes toegepast.

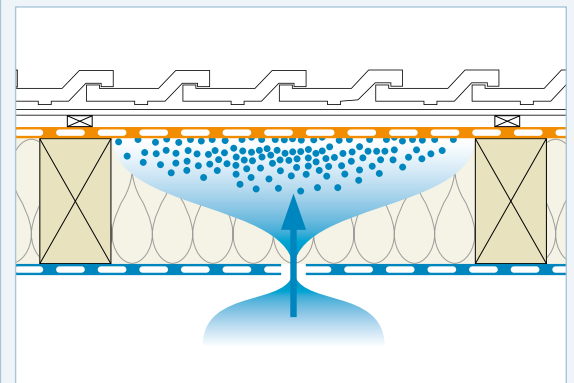
Berekening conform EN 15026 [4]

Daadwerkelijk realistische resultaten worden verkregen met de niet-stationaire rekenmethodes zoals WUFI pro [5], WUFI 2D [6] of Delphin [7]. Deze berekenen het vocht- en warmtetransport in de constructie op basis van reële klimaatgegevens (temperatuur, luchtvochtigheid, (slag-) regen, zon, wind enz.) resp. eigenschappen van de bouwmaterialen (diffusie, waterabsorptie, -opslag en -transport enz.) en de geografische oriëntatie van de gebouwdelen (helling, windrichting). Vochtgehalte en temperatuur kunnen voor elk punt van de constructie worden bepaald.

Onzekerheden: vochtindringing door voegen (convectie) kan momenteel alleen als ondergeschikte factor worden berekend

Afb. 2

Vochtindringing in de isolatie als gevolg van lekkage



Via een 1 mm brede voeg kan per vierkante meter tot 800 g vocht per dag binnendringen.

Exacte resultaten met niet-stationaire rekenmodellen

Stationair model

- Methode van Glaser (maandbalans)
→ geeft ruwe richtwaarden

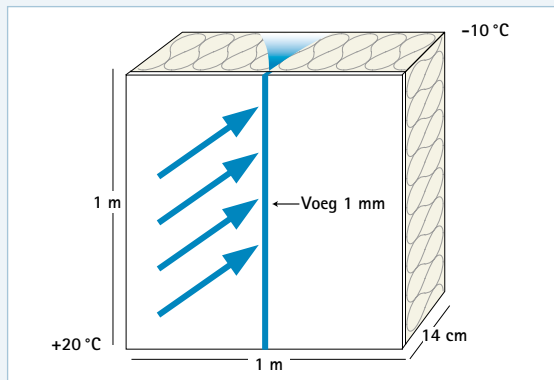
Niet-stationaire modellen

- WUFI pro / WUFI 2D
- Delphin
→ geven de meest nauwkeurige waarden voor vochtgehaltes op elke plek in het bouwelement – ideaal voor de berekening van de betrouwbaarheid



Vochtindringing in de constructie door openingen in de damprem

Afb. 3
1 mm voeg = 800 g/24 h per m voeglengte



Vochttransport

door damprem: $0,5 \text{ g} / (\text{m}^2 \times 24 \text{ h})$
door 1 mm voeg: $800 \text{ g} / (\text{m}^2 \times 24 \text{ h})$

Verhoging factor: 1.600

Randvoorwaarden

Damprem μ_d -waarde = 30 m
Binnentemperatuur = +20 °C
Buitentemperatuur = -10 °C
Drukverschil = 20 Pa
overeenkomstig windkracht 2-3

Meting: Institut für Bauphysik, Stuttgart [11]

Convectie en simulatie

Convectiestromen door lekkages kunnen slechts bij benadering worden berekend. Wanneer de binnenbekleding in de berekening wordt weggelaten, vindt vochtindringing uitsluitend door diffusie plaats. De daadwerkelijke indringing door convectie is hoger. Hoge μ_d -waarden bevorderen condensvorming.

Rekenmodellen voor indringing door convectie

De convectie wordt in gang gezet door het heersende drukverschil tussen het inwendige van een gebouw en de buitenlucht. Het drukverschil is het gevolg van de aan de buitenkant naar het gebouw toestromende wind en het opstijgen van verwarmde lucht in de bewoonde ruimte.

Vanaf WUFI pro 5.0 is er voor het berekenen van vochtindringing door convectie een luchtinfiltratiemodel beschikbaar. Dit kan op basis van een uitwisseling met de lucht in het gebouw convectieve vochtindringing simuleren. Voorwaarde hierbij is wel, dat de ondichtheid van de constructie bekend is, want deze wordt gebruikt om de vochtindringing te kwantificeren. Bij renovatie kan de kwaliteit van de binnenbekleding maar zelden exact worden bepaald. Deze is van doorslaggevende invloed op de vochtindringing door diffusie en convectie.

Vanwege de betrouwbaarheid van het element wordt daarom het vochttransport door lekkage in een constructie berekend, waarbij diffusiewerende inwendige lagen van de constructie (bijv. dampremmende lagen of binnenbekleding) buiten beschouwing worden gelaten. Omdat het hier slechts om diffusiestromen gaat en het mechanisme dat de luchtdrukverschillen veroorzaakt, ontbreekt, kunnen vochtbelastingen door convectie in werkelijkheid aanmerkelijk hoger zijn. Bij luchtstromen door lekkage is vochtindringing tot een klein oppervlak beperkt. Daardoor is deze een veelvoud hoger dan de resultaten van de berekeningen. Door convectie kan door een voeg van 1 mm breed en 1 m lang (= $1/1000 \text{ m}^2$) per dag een hoeveelheid vocht van 800 g/m in de thermische isolatieconstructie komen. Zo veel vocht kan ook de meest diffusieopen onderspanbaan niet laten opdrogen, temeer daar de diffusiestroom van een dun bouwelement bij een klein/geen drukverschil in de praktijk veel lager is dan de μ_d -waarden doen vermoeden (zie paragraaf μ_d -waarde en μ -waarde).

Toename van de hoeveelheid vocht door inwendige convectie

Convectiestromen kunnen ook binnenin constructies optreden. Door het opwarmen van de constructie van buitenaf door direct zonlicht kan vocht binnenin het bouwelement opstijgen en zich eventueel op plaatsen verzamelen waar de convectieprocessen, bijv. door overgangen, onderbroken zijn.

IJslagen zijn dampschermen

Wanneer er op materiaalagen die aan vorst zijn blootgesteld condensatie optreedt (bijv. uitwendige luchtdichtingsbanen), kan er zich daar bij temperaturen onder nul een laag ijs vormen. Omdat opdrogen naar buiten toe vanuit de constructie hierdoor wordt belemmerd, wordt er nog veel meer condensaat gevormd, en ook dat befrist. Dit resulteert in een verminderde isolerende werking van het toegepaste isolatiemateriaal en de in de constructie gebruikte materialen lopen ernstig risico.

μ_d -waarde en μ -waarde

Bepalend voor condensvorming is allereerst de μ -waarde (het dampdiffusie-weerstandsgetal [-]). Deze beschrijft de »kwaliteit« van het bouw materiaal met betrekking tot de blokkerende werking. De μ_d -waarde (equivalente luchtlaagdikte [m]) houdt tevens rekening met de dikte van een bouw materiaal. Naarmate de materiaaldikte toeneemt, duurt het langer voordat een watermolecuul door het materiaal kan worden getransporteerd. Onderspanbanen zijn diffusieopen en hebben een lage μ_d -waarde. Op basis van de beperkte laagdikte is de μ -waarde in verhouding echter toch hoog. In cijfers: een onderdakbaan met een microporeuze, functionele folie heeft bij een μ_d -waarde van 0,02 m en een dikte van 0,50 mm een μ -waarde van 40. In vergelijking met een vezelvormig thermisch isolatiemateriaal (μ -waarde =1) heeft de baan een diffusiedichtheid die rond een factor 40 hoger ligt. Daardoor kan er ook bij diffusieopen onderdakbanen condensvorming optreden. Bij microporeuze banen kan er aanzienlijk minder vocht opdrogen dan de μ -waarde



en de μ_d -waarde doen vermoeden. De reden hiervoor is het kleine resp. het ontbreken van een drukverschil bij dit dunne bouwelement onder wisselende klimatologische omstandigheden. Achtergrond: een diffusiestroom wordt altijd in gang gezet door een drukverschil. Wanneer aan beide zijden hetzelfde klimaat heerst (bijv. 10 °C en 80% relatieve vochtigheid), dan vindt er geen vochttransport plaats. Pas wanneer de temperatuur of de relatieve vochtigheid aan beide zijden van het bouwelement verschillend zijn, willen de moleculen zich via diffusie van de ene naar de andere zijde verplaatsen.

Bij een onderspanbaan/uitwendige luchtdichtingsbaan bestaan door de geringe materiaaldikte geen temperatuurverschillen, zodat men zich kan concentreren op de verschillen in relatieve vochtigheid. Deze zijn in de winter, wanneer de kans op condensatie op de onderspanbaan / uitwendige luchtdichting bestaat, uiterst gering, wanneer er aan de binnenzijde een relatieve vochtigheid van 80% heerst en er aan de buitenzijde van een vergelijkbare vochtigheid sprake is.

Extra betrouwbaarheid wordt hier geboden door luchtdichtingsbanen met een monolithische, functionele film. In geval van condensvorming aan de binnenzijde van de baan binnenin de constructie wordt vocht actief door diffusie langs de moleculen uit het bouwelement getransporteerd. Onder invloed van vocht wordt de diffusieweerstand van pro clima DASAPLANO 0,01 connect lager – de kans op ijsvorming wordt kleiner. Bij microporeuze membranen echter, zorgt condensvorming op de folie voor een beperkter diffusievermogen. Vocht kan uitsluitend passief in gasvorm door de banen dringen – de kans op ijsvorming is groter dan bij monolitische membranen.

Meetonzekerheden bij uiterst diffusieopen materialen

Paragraaf 9 »Meetnauwkeurigheid« van de voor het bepalen van de diffusieweerstand belangrijke norm, EN ISO 12572 [8], bevat een overzicht van mogelijke foutbronnen. Naast de kwaliteit van de testmonsters evenals de precisie van de meetinrichtingen worden ook de klimatologische randvoorwaarden tijdens de meting (luchtdrukschommelingen) als mogelijke

oorzaken van een foutief meetresultaat genoemd. DIN EN ISO 12572 is overeenkomstig de informatie in paragraaf 9.8 niet geschikt voor het meten van de eigenschappen van hoge doorlaatcoëfficiënten voor waterdamp (d.w.z. met $\mu_d < 0,1$ m). Op basis van de genoemde redenen moet voor metingen conform EN ISO 12572 bij de diffusieberekening in principe een minimale μ_d -waarde van 0,1 m worden aangehouden, ook wanneer de materialen conform het specificatieblad meer diffusieopen zijn.

Beoordeling van de vochtinvoeden. Definitie van het criterium »uitblijven van bouwschade«

De in [afb. 1](#) en [2](#) beschreven vochtindringing kan binnen bouwelementen tot een verhoogde relatieve luchtvochtigheid en tot condensvorming leiden. In combinatie met een voldoende hoge temperatuur ter plaatse van het verhoogde vochtgehalte kunnen schimmelsporen bij een voldoende lange blootstelling en een geschikte voedingsbron ontkiemen. Schimmelsporen gelden als zogenaamde »eerste kolonisten« omdat ze zich ook onder »biologisch ongunstige omgevingsomstandigheden« [3] kunnen ontwikkelen.

Sedlbauer en Krus [3] geven aan dat bij een relatieve vochtigheid van 80% voor bijna alle in de bouw relevante schimmels groeiomstandigheden worden bereikt. Afhankelijk van de soort ligt de optimale situatie bij een relatieve vochtigheid van 90 tot 96%. Willen de sporen kunnen ontkiemen, resp. de schimmels kunnen groeien, dan moet de temperatuur gedurende een periode van hoge vochtigheid tussen 0 en 50 °C liggen. De ideale groeitemperatuur ligt rond 30 °C. Op steenwol kunnen bij deze temperatuur schimmels ontkiemen en groeien vanaf een relatieve luchtvochtigheid van 92%. Is de temperatuur lager, dan is voor de kolonisatie een hogere relatieve luchtvochtigheid vereist.

»Verontreinigingen door stof, vingerafdrukken en luchtvervuiling (keuken, achtergebleven vuil na het douchen enz.) of uitwaseming van de mens« zijn voldoende om op een minder geschikte ondergrond betere voorwaarden voor de groei van schimmels te creëren. Deze randvoorwaarden zijn van invloed op de

Vochtindringing in de constructie kan tot bouwschade en schimmel leiden

Afb. 4

Schimmels groeien ook onder ongunstige omgevingsomstandigheden



Sedlbauer en Krus [3] geven aan dat bij een relatieve vochtigheid van 80% voor bijna alle in de bouw relevante schimmels groeiomstandigheden worden bereikt. Afhankelijk van de soort is een relatieve luchtvochtigheid van 90 tot 96% optimaal.



Vier constructies vergeleken

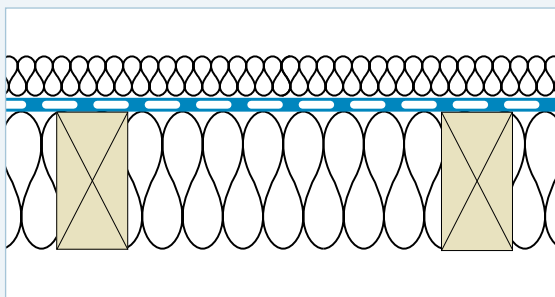
Voorbeeld 1:

35 mm zachtboard als buitendakse isolatie

Constructie met uitwendige luchtdichtingslaag.

Afb. 5

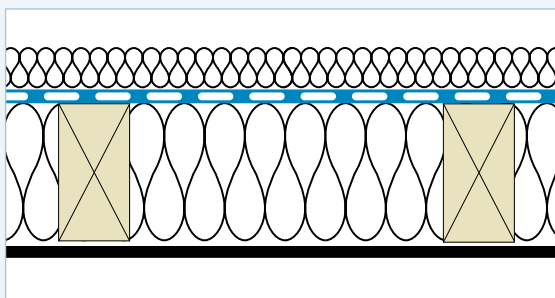
1a. Zonder luchtdichting binnen



- Zachtboard 35 mm
- Diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m)
- Vezelvormig, niet-absorberend isolatiemateriaal 120 mm
- Zonder binnenbekleding

Afb. 6

1b. Met luchtdichting binnen



- Zachtboard 35 mm
- Diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m)
- Vezelvormig, niet-absorberend isolatiemateriaal 120 mm
- Met gipsplaat 10 mm

hoogte van de voor het ontkiemen vereiste relatieve luchtvochtigheid resp. temperatuur.

Bij het wisselen van dag en nacht schommelen temperaturen, waardoor er mogelijk tijdelijk niet aan de voorwaarden voor schimmelgroei wordt voldaan. In [3] wordt overeenkomstig Zöld aangegeven, dat bij temperaturen onder 20 °C de kans op schimmelgroei aanwezig is wanneer er in de constructie langer dan 5 dagen gedurende meer dan 12 uur sprake is van een relatieve luchtvochtigheid van meer dan 75%.

Het criterium voor een constructie die risico loopt door mogelijke schimmelgroei kan dan als volgt worden gedefinieerd:

1. Gemiddelde temperatuur per etmaal boven 0 °C
2. Gemiddelde relatieve luchtvochtigheid per etmaal langdurig boven 90%
3. Temperatuur en relatieve luchtvochtigheid moeten langdurig in deze zone liggen

Onderzochte constructies

In het eerste deel van deze studie worden op basis van de geformuleerde criteria de volgende constructies op de waarschijnlijkheid van schimmelgroei onderzocht. Dit gebeurt met WUFI pro [5] van het Fraunhofer-Institut für Bauphysik in vergelijking tot de klimaatgegevens voor Holzkirchen, voor de volgende constructies:

1. Steil dak met 40° dakhelling op het noorden, dakbedekking van grijze dakpannen
2. Keperhoogte: 12 cm met volledige isolatie van vezelvormige isolatiematerialen
 - Absorberend isolatiemateriaal (bijv. zachtboard of cellulose)
 - Niet-absorberend isolatiemateriaal (bijv. steenwol) (dichtheid = 60 kg/m³)

Absorberend isolatiemateriaal biedt extra zekerheid. Het kan piekhoogtes in vocht in het bouwelement bij de grenslagen opvangen. Dit gebeurt bijv. bij isolatiemateriaal van zachtboard resp. cellulose door opname van het vocht in de houtcellen in het materiaal.

Het klimaat binnenshuis wordt overeenkomstig de uitgangspunten van het

WTA-Merkblatt 6-2-01/D [9] (in WUFI) op een normale vochtbelasting gesteld, zoals deze in ruimtes van bewoonde huizen (slaap- en woonkamers, badkamers en keukens) geldt.

Om een inschatting van de invloed van de dichtheid van de binnenbekleding te maken, worden de aangegeven constructies berekend met gipsplaten (10 cm dik) over het volledige oppervlak en zonder gipsplaten, zodat rekening wordt gehouden met de invloed van schotten van geprofileerde schroten resp. niet luchtdichte binnenbekleding.

De onderstaande voorbeelden 1, 2 en 4 zijn gebaseerd op niet-absorberend isolatiemateriaal (steenwol). In voorbeeld 3 is isolatiemateriaal met absorberende eigenschappen toegepast (cellulose).



Voorbeeld 1: 35 mm zachtboard (Afb. 5 en 6)

Isolatie over de kepers met zachtboard 35 mm, daaronder een uitwendige diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m). Isolatie tussen de kepers uit niet-absorberend isolatiemateriaal. (anders dan geadviseerd in EN ISO 12572 wordt de berekening met een μ_d -waarde van 0,02 m (in plaats van 0,10 m zoals genoemd in de norm) uitgevoerd.)

Voorbeeld 2: 1:1-oplossing (afb. 7)

De luchtdichtingslaag ligt tussen twee isolatielagen die even dik zijn: 50% van de thermische isolatie voor de luchtdichtingslaag – 50% van de thermische isolatie op de kepers. De twee materialen hebben dezelfde warmtegeleidingscoëfficiënt λ .

Isolatie over de kepers met zachtboard 120 mm, daaronder in het midden een diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m). Isolatie tussen de kepers uit niet-absorberend isolatiemateriaal. (Anders dan geadviseerd in EN ISO 12572 wordt de berekening met een μ_d -waarde van 0,02 m uitgevoerd.)

Voorbeeld 3: 2:1-oplossing (afb. 8)

Isolatie over de kepers met zachtboard 60 mm, daaronder een diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m). Isolatie tussen de kepers van absorberend isolatiemateriaal (bijv. zachtboard of cellulose) met een dikte van 120 mm.

Voorbeeld 4: Sub-and-Top-oplossing (afb. 9)

De luchtdichtingslaag wordt in de vorm van een golf (Sub-and-Top) op de binnenbekleding en over de dragende constructie gelegd. Isolatie over de kepers met zachtboard 35 mm, inwendige luchtdichting, Sub-and-Top-gemonteerd ($\mu_d =$ vochtvariabel 0,05 – 2,0 m). Isolatie tussen de kepers uit niet-absorberend isolatiemateriaal.

Evaluatie van de resultaten

Onderzocht wordt de vochtsituatie aan het grensvlak van de luchtdichtingsfolie. Daarvoor wordt

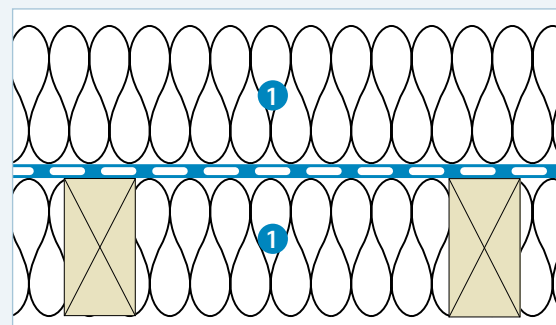
- de relatieve luchtvochtigheid als een functie van de heersende temperatuur in het grensgebied met de luchtdichtingsfolie (voorbeeld 1, 3, 4) resp. met de zachtboardplaat (voorbeeld 2) berekend.
- het watergehalte van de thermische isolatie in de grenslaag berekend.

Doel

Binnen thermisch geïsoleerde constructies treden zeer hoge relatieve vochtigheden resp. vochtgehaltes op aan de grenslaag bij de overgang van materiaal met een andere μ -waarde. Het watergehalte van de thermische isolatie in de buitenste laag (1 mm) en de relatieve vochtigheid mogen niet aanmerkelijk hoger zijn.

Afb. 7

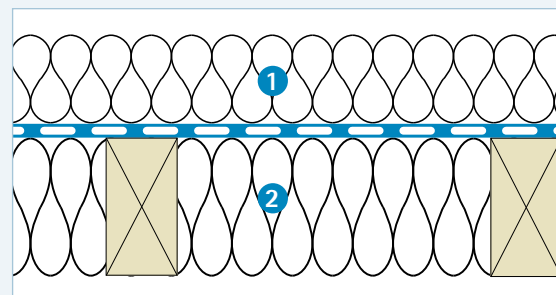
Voorbeeld 2: 1:1-oplossing



- Zachtboard 120 mm
- Diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m)
- Vezelvormig, niet-absorberend isolatiemateriaal 120 mm

Afb. 8

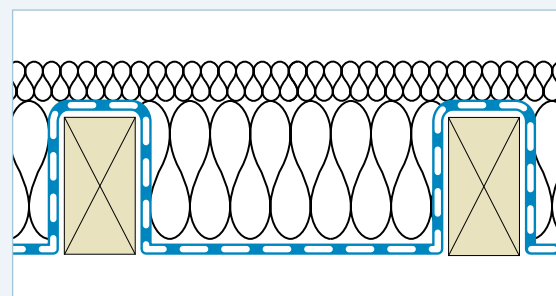
Voorbeeld 3: bij absorberend isolatiemateriaal en 2:1-regel



- Zachtboard 60 mm
- Diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m)
- Vezelvormig isolatiemateriaal 120 mm

Afb. 9

Voorbeeld 4: Sub-and-Top-oplossing

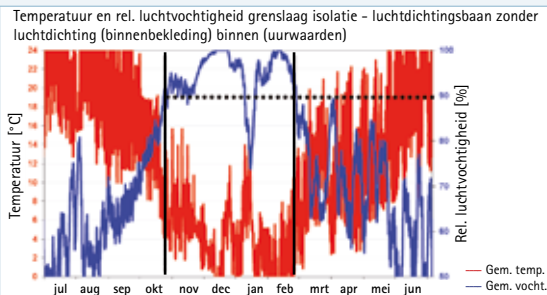


- Zachtboard 35 mm
- Luchtdichting, Sub-and-Top-gemonteerd ($\mu_d =$ vochtvariabel 0,05–2,0 m)
- Vezelvormig isolatiemateriaal 120 mm



Afb. 10 en 11

Resultaat voorbeeld 1a: 35 mm zachtboard – luchtdichting buiten, binnenbekleding met voegen



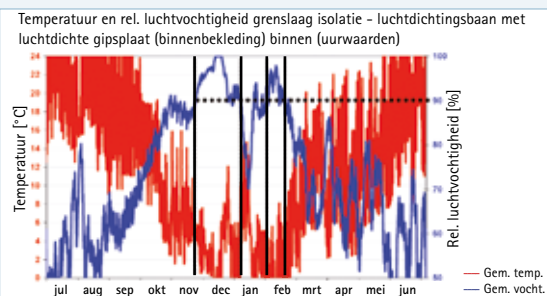
Vocht na 157 dagen > 90%, na 15 dagen condensaat
 → **Schimmel zeer waarschijnlijk**



Max. vochtgehalte aan de grenslaag tijdens meerdere maanden verhoogd - meer dan 150 kg/m³

Afb. 12 en 13

Resultaat voorbeeld 1b: 35 mm zachtboard – luchtdichting buiten, binnenbekleding luchtdicht



Vocht na 84 dagen > 90%, na 6 dagen condensaat
 → **Verhoogde kans op schimmel**

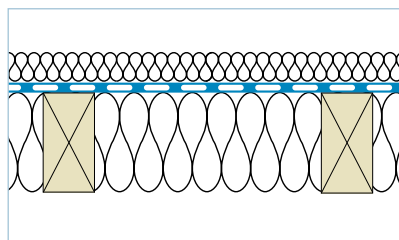


Max. vochtgehalte aan de grenslaag langer dan 1 maand verhoogd - tot 60 kg/m³

Berekeningen

35 mm zachtboard als buitendakse isolatie. Zonder luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 1a)

Constructie met uitwendige luchtdichtingslaag.



- Zachtboard 35 mm
- Diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m)
- Vezelvormig, niet-absorberend isolatiemateriaal 120 mm

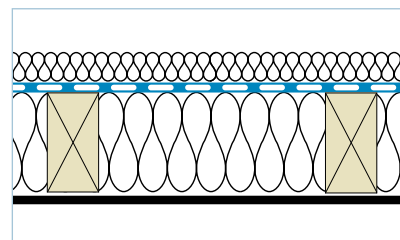
Dit voorbeeld simuleert constructies met een onvolledige luchtdichting bij gipsplaten, gestucte oppervlakken en schotten van geprofileerd hout.

Bij dergelijke constructies is er volgens het in **afb. 10 en 11** weergegeven resultaat van de berekening aan de grenslaag van thermisch isolatiemateriaal en uitwendige luchtdichtingslaag sprake van zeer hoge relatieve luchtvochtigheden, ver boven 90%, zelfs tot condensvorming. 157 dagen per jaar is de relatieve luchtvochtigheid aan de grenslaag hoger dan 90% - 15 dagen is er zelfs sprake van condensvorming. Het risico van schimmelvorming is zeer groot, aangezien de hoge luchtvochtigheid zich voordoet in een periode waarin de temperatuur ruim boven 0 °C ligt. Het watergehalte in de grenslaag stijgt tot boven 150 kg/m³.

Bij dergelijke constructies met een onvolledige luchtdichting bestaat het risico van bouwschade.

35 mm zachtboard als buitendakse isolatie. Met perfecte luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 1b)

Constructie met uitwendige luchtdichtingslaag.



- Zachtboard 35 mm
- Diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m)
- Vezelvormig, niet-absorberend isolatiemateriaal 120 mm
- Gipsplaten (luchtdicht) 10 mm

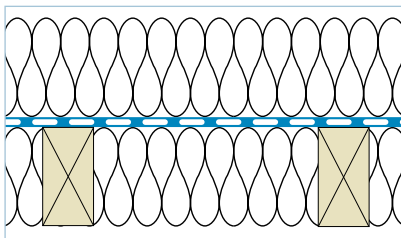
Wanneer in een bestaande woning over het volledige oppervlak een binnenbekleding van gipsplaten aanwezig is, wordt deze bij de berekening als luchtdicht beschouwd. Vochtindringing in de constructie gebeurt uitsluitend via diffusie.

Deze constructie vertoont overeenkomstig **afb. 12** 84 dagen per jaar een zeer hoge luchtvochtigheid boven 90% - 6 dagen is er zelfs sprake van condensvorming. De thermische isolatie aan de grenslaag met de luchtdichtingsbaan wordt korte tijd belast met tot 60 kg/m³ (**afb. 13**) vocht. In deze constructie bestaat ondanks de doeltreffende luchtdichte binnenbekleding een verhoogde kans op schimmelvorming aan de grenslaag van isolatiemateriaal - luchtdichtingsbaan.



1:1-oplossing Zonder luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 2)

Constructie met luchtdichtingslaag in het midden.

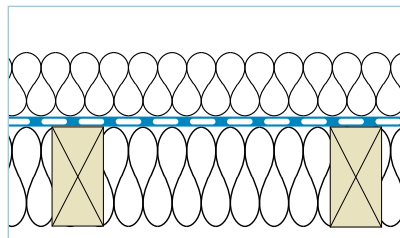


- Zachtboard 120 mm
- Diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m)
- Vezelvormig, niet-absorberend isolatiemateriaal 120 mm

Wanneer 50% van de thermische isolatie (van de totale warmte doorlaatweerstand) vóór de luchtdichtingslaag wordt aangebracht, is er gedurende de winterse periode slechts gedurende een week sprake van een relatieve vochtigheid hoger dan 90% (zie afb. 14). Er is geen condensvorming. Aan de grenslaag ontstaan geen belangrijke vochthoeveelheden (zie afb. 15). Wanneer de binnenbekleding intact is, is de relatieve luchtvochtigheid aan de grenslaag van isolatiemateriaal – luchtdichtingsfolie het hele jaar lager dan 90%. Schimmelmicrobiële groei is hier dan ook [3] niet mogelijk, ook wanneer de inwendige luchtdichtingslaag (binnenbekleding) gebreken vertoont.

2:1-oplossing Zonder luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 3)

Constructies met 1 deel boven de kepers en 2 delen tussen de kepers.



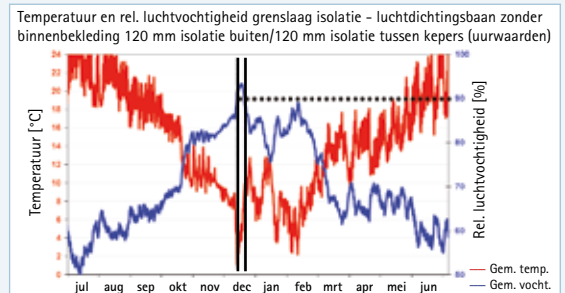
- Zachtboard 60 mm
- Diffusieopen luchtdichting ($\mu_d = 0,02$ m)
- Vezelvormig isolatiemateriaal met absorberende eigenschappen (cellulose) 120 mm

Wanneer isolatiemateriaal wordt toegepast dat vocht kortstondig door absorptie kan opslaan, kan de verhouding van isolatie tussen de kepers en buitendakse isolatie op 1/3 boven de kepers en 2/3 tussen de kepers worden bepaald. Voorwaarde is dat de toegepaste isolatiematerialen dezelfde warmtegeleidingscoëfficiënt hebben. In het voorbeeld is de isolatie van 120 mm tussen de kepers en de buitendakse isolatie van 60 mm gescheiden door een diffusieopen luchtdichtingsfolie. Bij deze constructie is er tijdens langere periodes sprake van vochtgehalten van 90% aan de grenslaag. Deze grens wordt deels overschreden. Door de absorberende eigenschappen van bijv. cellulose of houtvezel zijn deze vochtgehalten acceptabel. (afb. 16). De vochtgehalten aan de grenslaag tussen de isolatielaag en de luchtdichtingsfolie zijn niet kritisch (afb. 17).

In geval van renovatie kan een reeds in het bouwelement aanwezig niet-absorberend isolatiemateriaal (bijv. steenwol) in de constructie blijven, wanneer tot de luchtdichtingslaag (bovenzijde van keper) ten minste 40 mm absorberend isolatiemateriaal (bijv. zachtboard of cellulose) wordt aangevuld.

Afb. 14 en 15

Resultaat voorbeeld 2: 1:1-oplossing – Luchtdichting in het midden, binnenbekleding met voegen



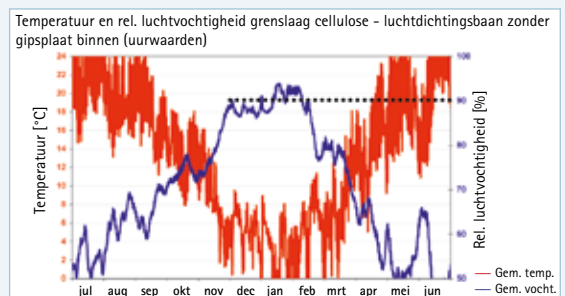
Vocht na 7 dagen > 90%, geen condensaat
→ Beperkte kans op schimmel



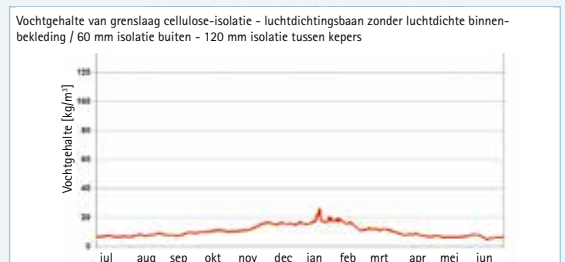
Slechts een zeer laag vochtgehalte aan de grenslaag

Afb. 16 en 17

Resultaat voorbeeld 3: 2:1-oplossing – Luchtdichting in isolatielaag, binnenbekleding met voegen



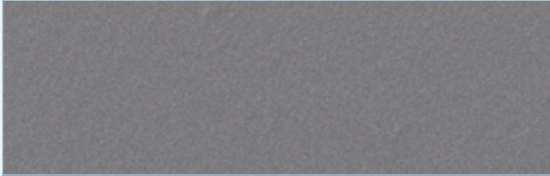
Vocht na 45 dagen > 90%, geen condensaat
→ Beperkte kans op schimmel met absorberend isolatiemateriaal



Niet-kritisch vochtgehalte in de grenslaag



Afb. 18
Uitvergroting van de monolithische, poriënvrije functionele folies van DASAPLANO-banen



Actief vochttransport langs de molecuulketen verhoogt het opdrogingsvermogen.

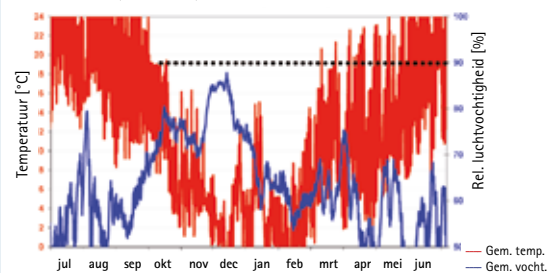
Afb. 19
Vergroting van een microporeuze, functionele film



Passief vochttransport door poriën (ontsnappen van gas) vergroot het risico van ijsvorming in het bouwelement.

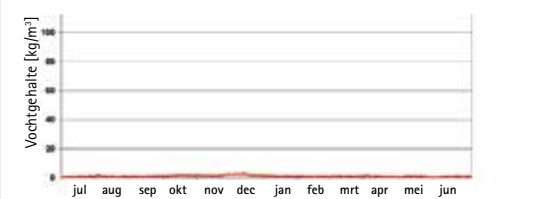
Afb. 20 en 21
Resultaat voorbeeld 4: Sub-and-Top-oplossing – Luchtdichting binnen, binnenbekleding met voegen

Temperatuur en rel. luchtvochtigheid grenslaag isolatie - onderdakplaat met DASATOP binnen (uurwaarden)



Geen vocht > 90%, geen condensaat
→ Schimmel zeer onwaarschijnlijk

Vochtgehalte van grenslaag steenwol - zachtboard met DASATOP



Niet-kritisch vochtgehalte in de grenslaag

Luchtdichtingsbanen met monolithische, functionele laag

Wanneer de luchtdichtingslaag zoals omschreven in voorbeeld 2 (1:1-oplossing) resp. voorbeeld 3 (2:1-oplossing) boven de kepers wordt aangebracht, dan moet een diffusieopen luchtdichtingsbaan met een vochtvariabele en monolithische, functionele film worden toegepast. De pro clima DASAPLANO-banen zijn voorzien van een dergelijke folie van monolithische polymere mengsels en geven de constructie de volgende voordelen:

• luchtdichtheid

De monolithische functionele folies van de DASAPLANO-banen garanderen 100% luchtdichtheid. In tegenstelling tot traditionele luchtdichtingsbanen met microporeuze films (afb. 19) hebben DASAPLANO-banen absoluut geen poriën (afb. 18).

• diffusieopenheid

Door de monolithische functionele folie is een actief vochttransport door het baanmateriaal mogelijk. Wanneer er sprake is van inwendig druppelvormig condensaat van een DASAPLANO-baan, dan wordt dit langs de molecuulketen actief naar buiten getransporteerd. Daardoor wordt het risico van ijsvorming (=dampscherm) op de luchtdichtingsbaan in vergelijking tot een baan met een microporeuze functionele film duidelijk beperkt.

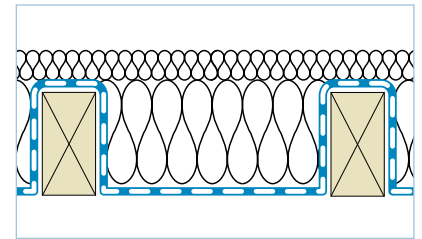
• vochtvariabiliteit

De Funktionsfilm der DASAPLANO 0,01 connect heeft vochtvariabele eigenschappen. Daardoor daalt de diffusieweerstand van de banen bij condensvorming tot een μ_a -waarde van 0,01 m. Hierdoor wordt de gebruikelijke verhoging van de diffusieweerstand, bijv. als gevolg van door water afgesloten poriën, optimaal voorkomen.

Wanneer de luchtdichtingsbaan boven de kepers moet worden aangebracht, dan zorgen DASAPLANO-banen bij de 1:1- resp. 2:1-oplossing in vergelijking tot de microporeuze luchtdichtingsbanen voor duidelijk meer bescherming van de bouwelementen.

Sub-and-Top-oplossing, zonder luchtdichting (bijv. gipsplaat) binnen (voorbeeld 4)

Constructies met inwendige luchtdichtingslaag zonder binnenbekleding



- Zachtboard 35 mm
- Luchtdichting, Sub-and-Top-gemonteerd (μ_a = vochtvariabel 0,05-2,0 m).
- Vezelvormig isolatiemateriaal 120 mm

De Sub-and-Top-montage van renovatiedamprem DASATOP zorgt voor een betrouwbare luchtdichtheid en beschermt door de vochtvariabele μ_a -waarde de thermische isolatie in alle lagen tegen schadelijke, hoge vochtgehalten. DASATOP kan met alle vezelvormige isolatiematerialen worden gecombineerd. Een luchtdichtingsbaan boven de isolatie tussen kepers is dan niet nodig. Door toepassing van DASATOP ligt het vochtgehalte in de thermische isolatie direct onder de zachtboardplaat op een onschadelijk niveau. Het maximale vochtgehalte van 85% doet zich slechts zeer kort bij temperaturen rond het vriespunt voor (zie afb. 20). Het vochtgehalte is nooit zo hoog dat er schade aan het materiaal ontstaat (zie afb. 21). Onder deze randvoorwaarden kunnen schimmelsporen bij de gebruikte materialen niet ontkiemen, eenmaal ontkiemde schimmels kunnen ook niet verder groeien. Constructies met DASATOP lopen bij luchtdichte montage en verlijming geen risico van schimmelvorming in het bouwelement. Daarmee bieden ze de grootste betrouwbaarheid voor alle vezelvormige isolatiematerialen en de constructie.



Conclusie: vergelijking luchtdichting buiten t.o.v. luchtdichting en damprem binnen

Berekeningen met niet-stationaire simulatiemethodes kunnen risico's van condensvorming in beeld brengen zodat gevolgtrekkingen mogelijk zijn ten aanzien van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. Wanneer constructies met uitwendige luchtdichtingen zonder voldoende bovenliggende isolatie worden bekeken, zijn er relatieve luchtvochtigheden boven 90% en ernstige condensvorming aan de grenslagen van thermische isolatie en luchtdichting te zien. Er is een risico van schimmelvorming in de constructie.

Wanneer binnenbekleding niet over het volledige oppervlak zonder voegen is, kan dit binnenin de constructie tot ernstige condensvorming leiden. Bij tussenwanden, bijv. bij ondichtheden in gevelmuren, kan er lucht door de binnenste isolatielaag stromen. Opnieuw neemt de kans op schimmelgroei toe.

Het bepalen van de μ_a -waarde van uiterst diffusieopen materialen kan overeenkomstig de bepalingen in DIN EN ISO 12572 beïnvloed zijn door meetfouten. Een

verhoging van de diffusieweerstand van de luchtdichtingsbaan met 0,01 m (van 0,02 naar 0,03 m) veroorzaakt in de berekening van voorbeeld 1 met binnenbekleding een verhoging van het maximale vochtgehalte aan de grenslaag isolatiemateriaal/luchtdichtingsbaan met meer dan 60%. Wanneer de waarde stijgt naar 0,04 m, is het maximale vochtgehalte ruim dubbel (120%) zo hoog als de beginwaarde. Door kleine afwijkingen in de diffusieweerstand wordt het risico van schimmelvorming dus enorm groter.

Wordt de luchtdichtingslaag in het midden van de thermische isolatielaag aangebracht (1:1-oplossing), dan daalt de luchtvochtigheid aan de grenslaag onder de kritische waarde. Bij deze benadering kunnen alle vezelvormige isolatiematerialen tussen de kepers worden toegepast.

Als alternatief kan bij gebruik van absorberende isolatiematerialen, zoals zachtboard en cellulose, de dikte van de buitendakse isolatie tot 1/3 van de totale isolatiedikte worden beperkt (2:1-oplossing). Wanneer er al isolatie aanwezig is, moet ten minste 40 mm van de isolatie voor de luchtdichtingslaag uit absorberende isolatie bestaan.

De twee voorgestelde oplossingen werden

op basis van diverse in de markt verkrijgbare kwaliteiten zachtboardplaten productonafhankelijk bepaald. Fabrikanten van zachtboardplaten kunnen constructies aanbevelen die afwijken van deze informatie. Zij zijn precies op de hoogte van de technische eigenschappen van hun producten, zodat de laagdiktes voor buitendakse isolatie kleiner kunnen uitvallen. Bij bouwelementen die van onze specificaties afwijken, dient u zich voor goedkeuring en adviezen ten aanzien van de constructie rechtstreeks tot de leverancier/fabrikant van de zachtboardplaten te richten.

De constructie met de Sub-and-Top-gemonteerde damprem DASATOP voor dakrenovatie is het meest betrouwbaar. Deze kan met alle vezelvormige isolatiematerialen worden gecombineerd. De thermische isolatie is door de inwendig aangebrachte damprem met een μ_a -waarde tot 2 m voldoende beschermd tegen vochtig worden vanuit het interieur. Nergens binnen de constructie is er sprake van een vochtgehalte waarbij schimmel zou kunnen ontstaan.

Met de DASATOP is het niet nodig het bouwelement ter bescherming tegen schadelijke condensvorming van een extra buitendakse isolatie te voorzien.

10 punten voor een duurzaam betrouwbare constructie



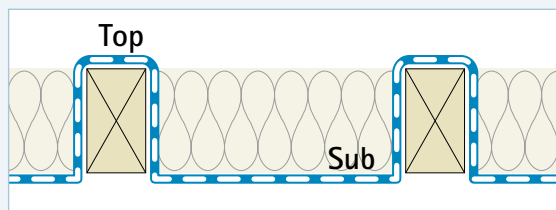
1. Als optimaal betrouwbaar worden constructies gezien die van dampremmende en luchtdichtingslagen in de verhouding 1 op 2 (1/3 binnen, 2/3 buiten) zijn voorzien (zie pag. 4 Gouden regels).
2. Hoe verder de luchtdichtingslaag naar binnen ligt, des te betrouwbaarder is de constructie. Hoe verder de luchtdichtingslaag naar buiten ligt, des te problematischer de constructie: er is dan een lagere kans dat er geen bouwschade optreedt.
3. Binnenbekledingen over de volledige oppervlakte, zonder verbindingsnaden, voorkomen bij uitwendig aangebrachte luchtdichtingsbanen het binnendringen van vocht als gevolg van convectie.
4. Sub-and-Top-oplossingen van DASATOP met alle vezelvormige isolatiematerialen bieden de meeste zekerheid, omdat het materiaal zich onder de thermische isolatie in het warme gedeelte bevindt (warmer dan dauwpunttemperatuur). Op de kepers kan het de diffusieweerstand van een onderspanbaan aannemen.
5. Wanneer absorberende isoatiematerialen worden gebruikt, bijv. zachtboardplaten of cellulose, dan kan de 2:1-oplossing worden gekozen in combinatie met een luchtdichtingsbaan met een vochtactief, luchtdicht, monolithisch membraan met DASAPLANO 0,01 connect als luchtdichtingslaag.
6. Constructies met niet-absorberende isolatiematerialen, bijv. steenwol, kunnen als betrouwbaar worden beschouwd wanneer de luchtdichtingslaag aan interieurzijde 50% van de totale warmte-doorlaatweerstand bedraagt.
7. Gunstig als luchtdichtingsbaan bij voorbeeld 2 en 3 is een diffusieopen luchtdichtingsbaan met monolithisch membraan, bijv. DASAPLANO 0,01 connect, die het vocht actief langs de molecuulketens kan transporteren. Daardoor wordt het risico van ijsvorming en daarmee een sprongsgewijze verhoging van de diffusieweerstand bij onvoorzien vochtindringing kleiner.
8. Het uitvoeren van een kwaliteitscontrole tijdens de bouw is altijd aan te bevelen. Bij de renovatie van buitenaf kan de luchtdichtheid met behulp van een overdruktest in combinatie met een kunstmatige nevel worden getest. Lekken kunnen dan worden opgespoord en gedicht.
9. De diffusieweerstand van diffusieopen luchtdichtingsbanen moet uiterst precies worden aangehouden en moet ook bij een hoge relatieve vochtigheid gelden.
10. De luchtdichting moet zich zo mogelijk in de vorstvrije zone bevinden.



B. Sub-and-Top-vergelijking van het potentieel om bouwschade te voorkomen bij dampremmen met verschillende μ_d -waarde

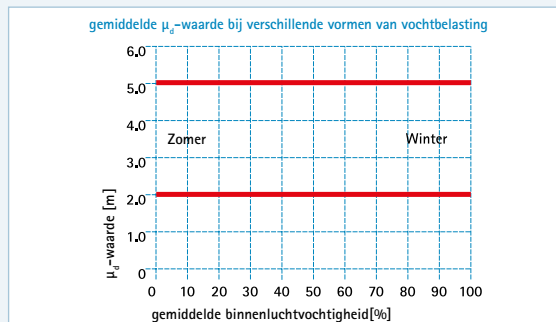
Uiterste betrouwbaarheid bij renovatie met vochtvariabele Sub-and-Top-banen

Afb. 22
Sub-and-Top-principe



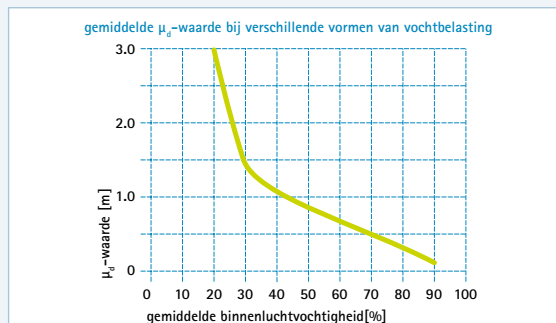
In het deel (Sub) diffusiedichter: bescherming tegen vocht. Op de kepers (Top) uiterst diffusieopen: snelle droging naar buiten.

Afb. 23
Baan μ_d -waarde 2 m en 5 m



In droog gedeelte: μ_d -waarde 2 resp. 5 m: komt overeen met een damprem
In vochtig gedeelte: μ_d -waarde 2 resp. 5 m: komt overeen met een damprem

Afb. 24
DASATOP μ_d -waarde 0,05-2 m



In droog gedeelte: μ_d -waarde 2 m: komt overeen met een damprem
In vochtig gedeelte: μ_d -waarde 0,05 m: komt overeen met een onderdakbaan

In het eerste deel van deze studie werd onderscheid gemaakt tussen renovatiesystemen die geschikt zijn voor dakrenovatie van buitenaf. Daarbij werden diffusieopen folies voor het realiseren van luchtdichtheid vergeleken met systeemoplossingen die tegelijkertijd licht diffusieremmend zijn.

In de volgende uitwerking worden pure Sub-and-Top-oplossingen bekeken, die zowel onder de thermische isolatie als boven de dragende constructie worden aangebracht.

Daarbij zijn twee wezenlijke varianten te onderscheiden:

1. Systemen van dampremmende en luchtdichtingsbanen met vochtvariabele (veranderlijke) diffusieweerstand

Deze beschikken over een variabele diffusieweerstand die afhangt van de omringende gemiddelde relatieve luchtvochtigheid. Bij de damprem voor dakrenovatie DASATOP kan deze een waarde tussen 0,05 en 2 m (zie afb. 24) hebben, afhankelijk van de gemiddelde relatieve luchtvochtigheid in de directe nabijheid van de baan. Informatie over de exacte werking van vochtvariabiliteit is te vinden in de studie »Berechnung des Bauschadensfreiheitspotentials von Wärmedämmkonstruktionen im Holz- und Stahlbau« (»Berekening van het potentieel om bouwschade van thermische isolatieconstructies in houten en stalen constructies te voorkomen« [10].

2. Systemen van dampremmende en luchtdichtingsbanen met constante (onveranderlijke) diffusieweerstand

Bij dit baanconcept worden functionele films toegepast, die bij verschillende relatieve vochtigheden geen verandering van de diffusieweerstand laten zien. Een voorbeeld hiervan zijn de diffusieweerstanden van twee banen met een μ_d -waarde van 2 m resp. 5 m in afb. 23.

Vergelijkende beschouwing van mogelijkheid tot opdrogen

Worden banen Sub-and-Top aangebracht, dan is duidelijk, dat deze aan de bovenkant van de dragende constructie een zo laag mogelijke diffusieweerstand moeten hebben. μ_d -waarden onder 0,1 m zijn ideaal, zodat door een hoge diffusieopenheid de grootst mogelijke hoeveelheden vocht uit de kepers kunnen drogen. Vochtvariabele dampremmen voor isolatie tussen kepers bereiken in het vochtige deel een μ_d -waarde van ca. 0,25 m.

Daarom is de kans op het uitblijven van bouwschade kleiner dan bij DASATOP. Wanneer de diffusiestroom door een materiaal in stationaire toestand door middel van een berekening van de stroomdichtheid van waterdampdiffusie in $g [kg/m^2 \times h]$ wordt bepaald, dan wordt de werking van banen met verschillende dichtheden duidelijk.

De stroomdichtheid van waterdampdiffusie wordt vastgesteld door het verschil van de waterdampdeeldruk p_i (binnen) [Pa] en p_a (buiten) [Pa] te delen door de waterdampdoorlaatweerstand $Z [m^2 \times h \times Pa/kg]$. De waterdampdoorlaat (W_{DD}) [$g/m^2 \times 24 h$] wordt berekend door het resultaat met 24 te vermenigvuldigen.

Als voorbeeld wordt de diffusiestroom bij het berekenen van het dauwpunt in combinatie met een winterse buitentemperatuur berekend. Voor p_i ligt hieraan een waarde van 1.163 Pa (9,2 °C / 100% relatieve luchtvochtigheid (dauwpunttemperatuur bij normaal klimaat) en voor p_a een waarde van 208 Pa (-10 °C / 80% relatieve luchtvochtigheid) ten grondslag.

W_{DD} -waarden voor verschillende μ_d -waarden

μ_d -waarde [m]	W_{DD} [$g/m^2 \times 24 h$]
0,05	~ 320
0,10	~ 160
0,50	~ 32
2,0	~ 8
5,0	~ 3
50,0	~ 0,3



De mogelijke waterdampdoorlaten worden bij een beperkte verhoging van de μ_d -waarde duidelijk minder. Dit heeft gevolgen voor de betrouwbaarheid van een constructie.

Deze beschouwing kan niet rechtstreeks naar niet-stationaire berekeningen worden vertaald, omdat p_i en p_a door het in de berekening gebruikte reële klimaat en afhankelijk van de locatie in de constructie continu wijzigen. Voor de opdrogings situatie zijn de waarden bijvoorbeeld op basis van de lagere drukverschillen aan beide zijden van de banen lager.

Berekening van het potentieel met betrekking tot het uitblijven van bouwschade

Voor de berekening van constructies met Sub-and-Top gemonteerde banen is het ontvochtigingsvermogen van de dragende constructie (hier kepers) bepalend. Bij banen die niet nauw tegen de kepers aanliggen, kan tijdens de koude wintermaanden condensvorming boven de kepers optreden. Dit condens moet door de het materiaal uit de constructie kunnen opdrogen. Daarvoor is het noodzakelijk dat de warmte- en vochtstromen tweedimensionaal worden bekeken. Warmte- en vochtstromen gaan niet per definitie van binnen naar buiten. Ook binnen de constructie kunnen er diffusiestromen zijn, bijv. van de keperflanken door geschikte damprem- en luchtdichtingsbanen in de thermische isolatielaag. Om het ontvochtigingsvermogen weer te geven, wordt via het houtvocht in de kepers de extra hoeveelheid vocht ingebracht. Dit wordt met een vochtgehalte van het materiaal van 80% (= 2.300 g water per strekkende meter keper) in de berekening meegenomen en simuleert vocht tussen dampremende/luchtdichtingsbaan en kepers. Uit de berekende opdrooghoeveelheid kan vervolgens de kans op het uitblijven van bouwschade in $[g] H_2O/[m]$ keper per jaar worden berekend. Normaliter is het vochtgehalte van kepers ca. 300 g per strekkende meter.

Het potentieel met betrekking tot het uitblijven van bouwschade geeft aan

- wat de toleranties van de constructie zijn bij onvoorziene vochtbelasting en
- hoeveel water in een constructie kan indringen (onvoorzien) waarbij deze toch vrij van bouwschade blijft.

Onderzochte constructies

1. Steil dak met 40° dakhelling op het noorden, dakbedekking van grijze dakpannen
2. Keperhoogte 12 cm met isolatie van de volledige keperhoogte met steenwol (dichtheid = 60 kg/m³)

De vochtbelasting van het binnenklimaat wordt als normaal bepaald.

Voorbeeld 1: diffusieopen onderdak (afb. 25)

Het onderdak heeft in de berekening een μ_d -waarde van 0,1 m.

Voorbeeld 2: onderdakplaat van 60 mm zachtboard (afb. 26)

Deze wordt ter vermindering van warmtebruggen als extra isolatie op de kepers toegepast (μ_d -waarde = 0,3 m).

Voorbeeld 3: onderdakplaat van 35 mm polyurethaan (afb. 27)

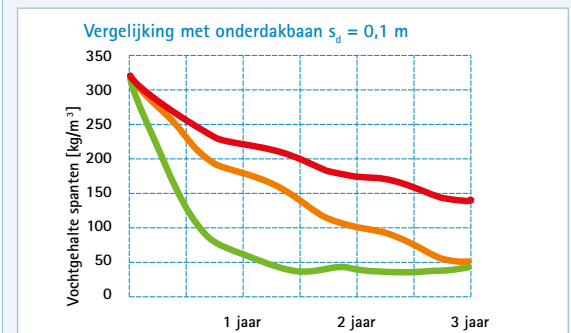
Isolatie op kepers zoals in voorbeeld 2, maar μ_d -waarde = 3,5 m. Elk van de 3 voorbeelden wordt met 3 verschillende dampremmen - Sub-and-Top-gemonteerd - in beschouwing genomen:

- damprem DASATOP μ_d -waarde vochtvariabel 0,05 tot boven 2 m
- damprem μ_d -waarde 2 m constant
- damprem μ_d -waarde 5 m constant

Berekening van het potentieel met betrekking tot het uitblijven van bouwschade Locatie Holzkirchen (D), dak

Afb. 25

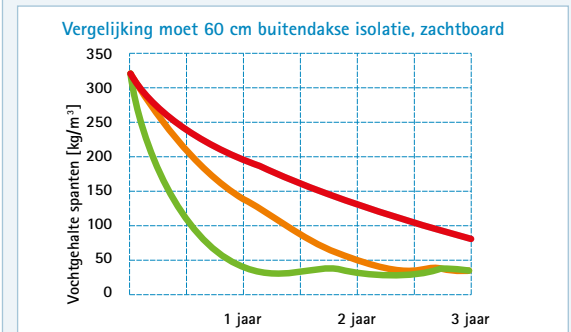
Resultaat voor diffusieopen onderdak ($\mu_d = 0,1$ m)



Pot. uitblijven bouwschade:
— DASATOP 1.900 g/m
— μ_d 2 m: te laag
— μ_d 5 m: te laag

Afb. 26

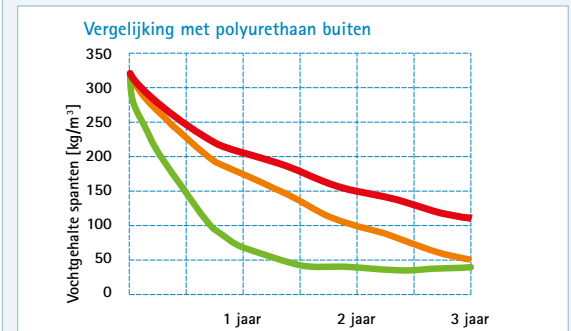
Resultaat voor 60 mm Zachtboardplaat buiten ($\mu_d = 0,3$ m)



Pot. uitblijven bouwschade:
— DASATOP 2.100 g/m
— μ_d 2 m: te laag
— μ_d 5 m: te laag

Afb. 27

Resultaat met 35 mm polyurethaan buiten ($\mu_d = 3,5$ m)



Pot. uitblijven bouwschade:
— DASATOP 1.800 g/m
— μ_d 2: te laag
— μ_d 5: te laag



pro clima veiligheidsformule

Hoe hoger de veiligheidsreserve van een constructie, d.w.z. het potentieel met betrekking tot het uitblijven van bouwschade, des te beter is de constructie bij onvoorziene vochtbelasting beschermd tegen schimmel.

Evaluatie van de resultaten

Het opdrogingsvermogen van het in de kepers aanwezige, verhoogde vochtgehalte wordt onderzocht. Dit wordt vergeleken tijdens een periode van 3 jaar voor elk van de voorbeelden met verschillende damprembanen weergegeven.

Bij alle constructies blijkt, dat bij de variant met vochtvariabel DASATOP het materiaalvocht het snelste uit de kepers kan ontsnappen.

Wanneer het vezelvezeladigingspunt van het hout niet wordt bereikt, zijn de vochtgehalten in de kepers niet kritisch. Wanneer dit voor een vergelijking van de opdrogingsnelheid wordt gebruikt, dan droogt de keper in de constructie met DASATOP ongeveer drie keer sneller dan met de damprem met de constante μ_d -waarde van 2 m. In vergelijking met een damprem met een constante μ_d -waarde van 5 m verloopt het opdrogen met DASATOP bij constructies met buitendakse isolatie vijf keer sneller. Bij constructies met uitsluitend een diffusieopen onderdakfolie verloopt het opdrogen met DASATOP zelfs ruim acht keer sneller dan bij een constructie met een damprem met een μ_d -waarde van 5 m.

Conclusie: vergelijking van Sub-and-Top-gemonteerde damprem- en luchtdichtings-systemen

Sub-and-Top-montage met vochtvariabele dampremmende en luchtdichtingsbanen is vanuit bouwfysisch oogpunt de beste oplossing voor de constructie en biedt bij onvoorziene vochtbelasting de grootste kans op het uitblijven van bouwschade.

Niet-kritische vochtgehalten in hout worden bij gebruik van DASATOP in de kepers in vergelijking met banen met een μ_d -waarde van 2 m resp. 5 m ca. drie keer resp. ca. vijf keer (soms zelfs acht keer) sneller bereikt.

Bij Sub-and-Top-montage werkt de folie onder de thermische isolatie (Sub) als een damprem. Bij montage over de kepers (Top) is de werking van een onderspanbaan echter gunstig, zodat het vocht zo veel mogelijk ongehinderd kan opdrogen. Bij banen die niet precies tegen de kepers aanliggen, kan vocht weer snel vanuit de

keperflanken opdrogen. Vochtvariabele dampremmen voor isolatie tussen kepers bereiken in het vochtige deel een μ_d -waarde van ca. 0,25 m. Daarom is de kans op het uitblijven van bouwschade kleiner dan bij DASATOP.

Op basis van de vochtgestuurde diffusieweerstand kunnen de banen op alle detailpunten betrouwbaar worden aangebracht, bijv. bij overgangen, kilkepers en hoekkepers resp. gedeelde constructies. De diffusieweerstand kan op elke plaats van de baan een afhankelijk van de situatie klimaatafhankelijke, aangepaste μ_d -waarde tussen 0,05 en 2 m hebben. De banen kunnen zowel in lengterichting als in dwarsrichting worden aangebracht.

Gunstig is het gebruik van diffusieopen banen buiten resp. het aanbrengen van een diffusieopen buitendakse isolatie van vezelvormig isolatiemateriaal.

Wanneer banen met een constante μ_d -waarde voor Sub-and-Top-montage wordt gebruikt, daalt de kans op het uitblijven van bouwschade aanzienlijk. In de winter beschermen de banen in het Sub-deel de thermische isolatie zoals vochtvariabele banen dat tegen indringend vocht doen. In de zomer biedt dit echter geen aanvullende droogmogelijkheid vanuit de constructie. Wanneer er aan de bovenzijde van de kepers condensaat wordt gevormd, kan dit slechts langzaam opdrogen. Het risico van bouwschade wordt aanmerkelijk groter. Bij thermische isolatieconstructies zouden de veiligheidsreserves in principe zo groot mogelijk moeten zijn. Bij onvoorziene vochtbelasting is er dan extra bescherming tegen bouwschade en schimmel. Daarmee is ook de verwerker optimaal beschermd tegen schade en aansprakelijkheidsclaims. De Sub-and-Top-montage van vochtvariabele dampremmende en luchtdichtingsbanen met een zo laag mogelijke μ_d -waarde bij hoge relatieve vochtigheden bieden bij dakrenovatie van buiten vanuit bouwfysisch oogpunt de beste bescherming.



Bouwdoel

Doel van het bouwen is niet alleen het creëren van energiezuinige gebouwen met een hoog klimatologisch wooncomfort, maar vooral ook gebouwen met een gezond woonklimaat. Hier spelen niet alleen toxicologische aspecten, bijv. via emissie van bouwmaterialen een rol, maar vooral de afwezigheid van schimmel op en in de constructie. Sporen van schimmels tasten het immuunsysteem aan en verergeren/veroorzaken allergieën; de afscheidingen van schimmels (microbial volatile organic compounds) kunnen tot fysieke en psychische gezondheidsproblemen leiden. Schimmels in een droog klimaat zijn veel minder gevaarlijk. Wanneer schimmels echter weer vochtig

worden, worden ze op de bekende wijze weer gevaarlijker.

Wanneer er zich schimmels aan de interieurzijde van bouwelementen bevinden (bijv. door warmtebruggen of oppervlaktecondensaat), zijn deze zichtbaar, kunnen worden geïdentificeerd en zo nodig worden verwijderd. Wanneer er zich echter bronnen van schimmels binnenin een constructie bevinden, worden deze niet gevonden. Jaarlijks worden ze door vocht weer opnieuw geactiveerd – de gezondheid van de bewoners loopt continu gevaar. Het bouwen zou bedoeld moeten zijn om de bouwfysische betrouwbaarheid niet tot het uiterste op te trekken, maar juist met betrekking tot schimmel een zo hoog mogelijke betrouwbaarheid te verkrijgen.

8 punten voor een duurzaam betrouwbare constructie en verwerking



1. Optimale betrouwbaarheid bieden constructies met vochtvariabele dampremmende en luchtdichtingsbanen met in het vochtige deel een bijzonder lage diffusieweerstand van $< 0,10$ m.
2. Sub-and-Top-banen met een bijzonder lage diffusieweerstand bij vocht kunnen boven de kepers in het bevroeringsdeel liggen. Het risico van ijsvorming is op basis van het hoge opdroogvermogen en de diffusiekarakteristiek van de constructie praktisch uitgesloten.
3. Niet-kritische vochtgehalten in kepers worden met DASATOP drie resp. vijf keer (soms acht keer) sneller bereikt. Daarbij is extra bescherming tegen schimmelvorming gegarandeerd.
4. μ_a -waarden tot 2 m beschermen de in vakken aangebrachte thermische isolatie tegen vocht als gevolg van gebruik van de binnenruimte. Er kan zich geen schadelijke condensvorming in de isolatielaag voordoen.
5. Aan de buitenzijde diffusieopen constructies hebben een groter opdroogvermogen dan constructies met diffusieremmende lagen van bouwelementen (bijv. isolatieschuim).
6. Het uitvoeren van een kwaliteitscontrole tijdens de bouw is altijd aan te bevelen. Bij de renovatie van buitenaf kan de luchtdichtheid met behulp van een overdruktest in combinatie met een kunstmatige nevel worden getest. Lekken kunnen dan worden opgespoord en gedicht.
7. Bevestiging van de baan bij Sub-and-Top-montage dient mechanisch te gebeuren, met dunne strips. Met een luchtdichtingsaansluitlijm is extra verlijming mogelijk. Kleefbanden hechten niet op de stoffige ondergrond van oude kepers.
8. Ontspiegelde, donkere folie heeft vanwege ongevalpreventie en gemak bij het aanbrengen de voorkeur boven lichte, met name witte folie.

Meer informatie vindt u in onze actuele brochure:

»**Studie Berekening van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade**«

