

Studie Berekening van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade

Berekening van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van thermische isolatie in hout- en staalbouwconstructies

Vochtvariabele dampremmen pro clima INTELLO en INTELLO PLUS met intelligent vochtmanagement

dak, wand, plafond

België en Nederland

Computergesteunde simulatieberekening van het gekoppelde warmte- en vochttransport van dak- en wandconstructies waarbij rekening is gehouden met natuurlijke klimaatomstandigheden en vochtschommelingen binnen in de bouwmaterialen





Bouwfysische studie

1. Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van thermische isolatie in houtbouwconstructies	4	3.2.11 Invloed van de isolatielaagdikte	14
1.1 Overzicht en inleiding	4	3.2.12 Conclusies potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade	14
1.2 Condensatie - Dauwpunt - Condensatiehoeveelheid	4	3.3 Bepaling van de geschiktheid voor gebruik	15
1.3 Vochtbelasting van de constructie	5	3.3.1 Testprocedure	15
1.3.1 Door diffusie	5	3.3.2 Geschiktheid voor gebruik buiten	16
1.3.2 Door convectie	6	diffusiedicht schuin dak	16
1.3.3 Vocht als gevolg van de constructie - flankdiffusie	6	3.3.3 Geschiktheid voor gebruik plat kiezeldak	16
1.3.4 Hoog bouwvochtgehalte in bouwmaterialen	6	3.3.4 Geschiktheid voor gebruik plat groendak	16
1.3.5 Samenvatting vochtbelasting	7	3.3.5 Conclusies geschiktheid voor gebruik	17
2. »Intelligente« dampremmen		3.4 Flankdiffusie	17
2.1 Uitdroging van de constructie naar binnen toe	8	3.4.1 Resultaten van de 2-dimensionale simulatieberekening	17
2.2 Werking van de vochtvariabele diffusieweerstand	8	3.4.2 Conclusie bij flankdiffusie	17
2.2.1 2.2.1 CE-markering / bestendigheid tegen veroudering	8	3.4.3 Wandconstructies	18
2.2.2 Hoge diffusieweerstand in de winter	9	4. Constructieaanbevelingen	19
2.2.3 Lage diffusieweerstand in de zomer	9	4.1 Constructies	19
2.2.4 Evenwichtig diffusieprofiel	9	4.2 Bekleding binnenzijde	19
Nieuwbouw: droogfase (60/2-regel)	9	4.3 Permanent vochtige ruimtes	19
Bouwfase: Hydrosafe-waarde (70/1,5-regel)	10	4.4 Nieuwbouw: uitdrogingsfase (60/2-regel)	19
2.2.5 Maximale betrouwbaarheid	10	4.5 Vochtige ruimtes in woningen	19
3. Bepaling van de betrouwbaarheid van een dakconstructie	10	4.6 Bouwfase: hydrosafe-waarde (70/1,5-regel)	19
3.1 Rekenkundige beoordeling van bouwelementen	10	4.7 Onderdak	20
3.1.1 Berekening volgens de methode van Glaser	10	4.8 Schuine dakconstructies	20
3.1.2 Berekening van de gekoppelde warmte- en vochttransporten	10	4.9 Platte dak- en groendakconstructies	20
3.2 Definitie van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade	11	4.10 Wanden	20
3.2.1 Berekening van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade	11	4.11 Kwaliteitsborging	20
3.2.2 Dakconstructies	11	5. Conclusie	21
3.2.3 Factoren die van invloed zijn op het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade	11	Contact	21
3.2.4 Klimaatgegevens locatie Brussel	12		
3.2.5 Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade bij schuin dak, noordzijde, 40° dakhelling	12		
3.2.6 Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade bij plat dak	12		
3.2.6.1 Plat kiezeldak	12		
3.2.6.2 Plat groendak	13		
3.2.7 Klimaatgegevens locatie Amsterdam	13		
3.2.8 Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade bij schuin dak, noordzijde, 40° dakhelling	13		
3.2.9 Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade bij kiezeldak	13		
3.2.10 Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade bij groendak	14		

Literatuur

[1] Consensusdocument van het 2e internationale congres over houtbouw (Holz[Bau] Physik-Kongress): 10/11-02-2011 Leipzig

[2] Ten Wolde, A. et al.: »Air pressures in wood frame walls, proceedings thermal VII.« Ashrae Publication Atlanta, 1999

[3] IBP Mitteilungen 355: »Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis?«

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

[5] DAB 1995; pagina 1479; Heft 8

[6] Klopfer, Heinz; Bauschäden-Sammlung, Band 11, Günter Zimmermann (Hrsg.), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 1997

[7] Klopfer, Heinz; ARCONIS: Wissen zum Planen und Bauen und zum Baumarkt: Flankenübertragung bei der Wasserdampfdiffusion Heft 1/1997, pagina 8-10

[8] H.M. Künzel; Tauwasserschäden im Dach aufgrund von Diffusion durch angrenzendes Mauerwerk, wksb 41/1996; Heft 37; pagina 34-36

[9] WUFI 2D 3.4 (Wärme- und Feuchte instationär); computerprogramma voor de berekening van gekoppeld tweedimensionaal warmte- en vochttransport in bouw-elementen; Fraunhofer-Institut für Bauphysik; informatie op www.wufi.de

[10] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Klima-bedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, Beuth-Verlag, Berlin, 11/2014

[11] OENORM B 8110-2: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationschutz, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 07/2003

[12] SIA 180: Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2014

[13] EN ISO 13788: Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächen-temperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren, Beuth-Verlag, Berlin, 05/2013

[14] Delphin 5.9.3; simulatieprogramma voor de berekening van gekoppeld warmte- en vochttransport in bouwelementen; Institut für Bauklimatik; informatie op www.bauklimatik-dresden.de

[15] WUFI 6.1 pro (Wärme- und Feuchte instationär); computerprogramma voor de berekening van gekoppeld warmte- en vochttransport in bouwelementen; Fraunhofer-Institut für Bauphysik; informatie op www.wufi.de

[16] Meteonorm 7; globale en meteorologische databank voor elke plaats op de wereld; Meteotest; informatie op www.meteonorm.com

[17] EN 15026 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Beuth-Verlag, Berlin, 07/2007

[18] Robert Borsch-Laaks: Bauphysik für Fortgeschrittene – Bemessungsregeln für Flachdächer; Holzbau – die neue quadriga; Verlag Kastner; Wolnzach; 05/2011

[19] DIN 68800-2: Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, Beuth-Verlag, Berlin, 02/2012

[20] WTA-Merkblatt 6-8: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation, Fraunhofer IRB-Verlag, 08/2016



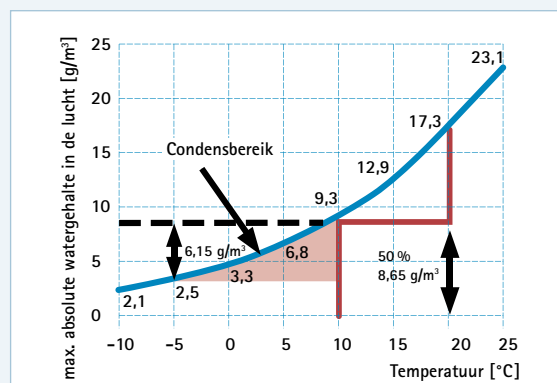
Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van thermische isolatie in houtbouwconstructies

Een kwestie van uitdrogingsreserves en intelligent vochtmanagement

Vochtfysica van de lucht

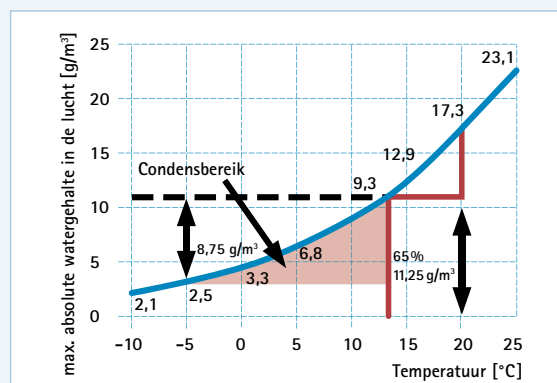
- Bij het afkoelen van de lucht neemt de luchtvochtigheid toe.
 - Bij overschrijding van de dauwpunttemperatuur wordt condenswater gevormd.
 - Bij hogere luchtvochtigheid in een ruimte wordt de dauwpunttemperatuur hoger.
- er wordt eerder condens gevormd

1. Vochtfysica van de lucht bij 50% rel. luchtvochtigheid



Onder normale klimaatomstandigheden (20 °C / 50% rel. luchtvochtigheid) wordt het dauwpunt bereikt bij 9,2 °C. Bij -10 °C treedt condensvorming van 6,55 g/m³ lucht op.

2. Vochtfysica van de lucht bij 65% rel. luchtvochtigheid



Bij een verhoogde luchtvochtigheid binnenshuis van 65% rel. luchtvochtigheid wordt het dauwpunt reeds bij 13,2 °C bereikt. Bij -10 °C treedt condensvorming van 9,15 g/m³ lucht op.

1.1 Overzicht en inleiding

Deze studie beschrijft de berekening van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van diverse dak- en wandconstructies, hoe bouwschade in thermische isolatieconstructies ontstaat en hoe constructies betrouwbaar tegen bouwschade kunnen worden beschermd. Bouwschade ontstaat wanneer de hoeveelheid vocht die in een constructie binnendringt groter is dan de uitdrogingscapaciteit van het bouwelement naar buiten toe. Om bouwschade te voorkomen, wordt meestal de nadruk gelegd op het reduceren van de vochtbelasting. Bouwconstructies kunnen echter niet volledig tegen vochtinvloeden worden beschermd. De voorspelbare vochtbelasting door diffusie is vrijwel nooit de oorzaak van bouwschade. Meestal is het de niet voorspelbare vochtbelasting die niet volledig kan worden uitgesloten. Om bouwschade en schimmel uit te sluiten, moet daarom de uitdrogingscapaciteit van de constructie naar buiten toe op de voorgrond staan. In deze studie worden de uitdrogingscapaciteiten van diverse constructies met elkaar vergeleken.

1.2 Condensatie - Dauwpunt - Condenshoeveelheid

De thermische isolatie van de gebouwschil scheidt bij winterse temperaturen de warme binnenlucht met zijn hoge vochtgehalte van de koude buitenlucht met zijn geringe absolute vochtgehalte. Als er warme binnenlucht in het bouwelement dringt, koelt de lucht tijdens de verplaatsing door de constructie af. De waterdamp in de lucht kan tot vloeibaar water condenseren. De oorzaak van condensvorming is het fysische gedrag van de lucht: warme lucht kan meer water opnemen dan koude lucht. Bij een hogere rel. vochtigheid in de ruimte (bijv. nieuwbouw met 65%) stijgt de dauwpunttemperatuur en als direct gevolg daarvan de hoeveelheid condenswater (zie [afb. 1 en 2](#)). In een bouwelement kan condenswater worden gevormd wanneer de temperatuur van de in het element aanwezige waterdamp lager is dan de dauwpunttemperatuur en de waterdamp door diffusiedichte elementlagen aan de buitenzijde niet uit het bouwelement kan drogen. Dat wil zeggen: elementlagen die aan de

buitenzijde van de thermische isolatie diffusiedichter zijn dan de lagen aan de binnenzijde zijn bouwfysisch ongunstig. Bijzonder problematisch zijn situaties waarbij warme lucht door convectiestromen, d.w.z. als gevolg van lekkages in de luchtdichte laag, in het bouwelement kan binnendringen. Als diffusieopen gelden bouwmaterialen waarvan de equivalente luchtdikte (μ_d -waarde) lager dan 0,50 m is. De μ_d -waarde wordt gedefinieerd als product van het dampdiffusieweerstandsgetal (μ -waarde) als materiaalconstante en de dikte van het bouwelement in meter:

$$\mu_d = \mu \times s \text{ [m]}$$

Een lage μ_d -waarde kan worden bereikt via een lage μ -waarde bij een grotere laagdikte (bijv. zachtboard) of door een hoge μ -waarde bij een zeer geringe laagdikte (bijv. onderdakfolie). De μ -waarde is dus bepalend en daarna pas de dikte van de materiaal laag. Dat wil zeggen dat bij een hoge μ -waarde sneller condensvorming optreedt dan bij een lage μ -waarde. Bij diffusieopen onderdakfolies heerst door het – meestal tijdens het koude jaargetijde – ontbrekende temperatuur- en vochtverschil slechts een gering drukverschil. Dat verklaart waarom er ook bij diffusieopen onderdakfolies bouwschade kan optreden wanneer er sprake is van een verhoogde vochtstroom in het bouwelement als gevolg van onvoorziene vochtintreding. Onderdak- en onderspanfolies met monolithisch membraan zonder poriën, bijv. uit de SOLITEX serie van pro clima, bieden hier grote voordelen, aangezien de diffusie door de speciale combinatie van polymeren niet passief via de poriën, maar actief langs de moleculketens plaatsvindt. Bovendien zijn de diffusieweerstanden van SOLITEX UD en SOLITEX PLUS variabel. Bij condensgevaar verminderen deze tot μ_d -waarden van minder dan 0,02 m. De folies zorgen dan voor een extreem snel en actief vochttransport uit het bouwelement naar buiten en beschermen de constructie optimaal tegen condens en schimmel. Wanneer er aan de binnenzijde van het onderdak condens ontstaat, kan er bij lage winterse temperaturen rijp- of ijsvorming aan de onderkant van de folies optreden. Ijs laat geen waterdamp door en vormt een dampdichte laag aan de



buitenzijde van het bouwelement. Het gevolg is dat waterdamp maar heel beperkt of zelfs helemaal niet uit het bouwelement naar buiten kan drogen. Constructies die aan de koude buitenzijde een diffusieremmende of diffusiedichte laag hebben, zijn bouwfysisch kritischer dan constructies die naar buiten toe diffusieopener worden. Onderdakfolies met actief vochttransport verminderen het risico op bouwschade aanzienlijk in vergelijking met diffusieremmende of diffusiedichte folies.

Bij platte dakconstructies zijn sterk diffusieremmende folies aan de buitenzijde onvermijdelijk. Hier ligt de prioriteit in eerste instantie bij de waterdichtheid van de folie. Met name bij kiezel- of groendakconstructies moet rekening worden gehouden met een langdurig hoog vochtgehalte van de lagen boven op de afdichting. Diffusieopen of slechts beperkt dampremmende materialen laten te veel vocht van buitenaf in het bouwelement dringen. Diffusiedichte constructies zijn bijv. ook niet-geventileerde schuine daken met bitumenbanen of daken met een niet-geventileerde metalen dakbedekking. Bij de diffusiedichte laag hoopt het vocht zich op in de constructie en treedt er condensatie op.

1.3 Vochtbelasting van de constructie

Vochtbelasting binnen een thermische isolatieconstructie kan verschillende oorzaken hebben. Zo kan bijvoorbeeld water via lekkages in de dakbedekking in een bouwelement binnendringen. De hoeveelheid vocht kan zo groot zijn dat er water in de woonruimte druppelt. Kleine lekkages in afdichtingen kunnen tot een sluipende vochtophoping in de constructie leiden. Dit gaat dikwijls gepaard met schimmelvorming op de in de constructie verwerkte materialen. Belasting van de constructie door vocht kan echter ook van binnenuit plaatsvinden door:

Voorspelbare vochtbelasting:

- diffusieprocessen

Onvoorspelbare vochtbelasting:

- convectie, d.w.z. luchtstroming (lekkages in de luchtdichte laag)
- vochttransport als gevolg van de constructie (bijv. flankdiffusie door aangrenzend metselwerk)
- hoog vochtgehalte bij het inbouwen van bouwmaterialen (bijv. van de houten elementen)
- ongecoördineerd bouwproces

1.3.1 Door diffusie

Hoe hoger de μ_d -waarde aan de binnenzijde, hoe kleiner de kans op bouwschade – dat dacht men vroeger althans. De toepassing van dampdichte lagen met hoge diffusie-weerstand zou bouwschade verhinderen. Dat de werkelijkheid anders is, werd echter al meer dan 25 jaar geleden met bouwfysische berekeningen aangetoond bij de marktintroductie van de eerste vochtvariabele damprem DB+ met een μ_d -waarde van 2,30 m.

Momenteel voldoen deze zogenoemde dicht-dicht-elementen op platte dakconstructies (binnen dampdichte laag $\mu_d > 100$ m – buiten dampdichte laag) volgens bekende bouwfysici uit de wetenschap en de praktijk niet langer aan de »regels van de techniek«.

Een consensusdocument dat als uitkomst van het 2e internationale Hout[bouw] physica-Congres in februari 2011 werd gepubliceerd, vermeldt bij niet-geventileerde platte dakconstructies van hout het volgende: Dampdichte lagen »verhinderen de omgekeerde diffusie in de zomer die noodzakelijk is voor het opdrogen van het vocht dat in de winter via het damptransport door de luchtstroming (convectie) door onvermijdelijke restlekkages wordt veroorzaakt« [1].

In zoverre mogen dergelijke bouwelementen alleen zo worden uitgevoerd wanneer ze van een deugdelijke ventilatie zijn

voorzien, of wanneer wordt aangetoond dat de bouwelementen voldoende terugdrogingscapaciteit hebben. Dit kan bijv. door het kiezen van een geschikte dampremmende en luchtdichte folie aan de binnenzijde van het bouwelement. Al in 1999 [2] heeft onderzoek aan buitenwanden in Noord-Amerika aangetoond dat de vochtintrede door een dampdichte laag als gevolg van convectie zelfs bij vakkundige installatie een condenswaterhoeveelheid van ca. 250 g/m² gedurende het koude jaargetijde (periode waarin condens wordt gevormd) oplevert. Dat komt overeen met een condenshoeveelheid die gedurende één winter door een damprem met een μ_d -waarde van 3,3 m diffundeert [3].

Vochtfysica van de lucht

- Bij het afkoelen van de lucht neemt de luchtvochtigheid toe.
 - Bij overschrijding van de dauwpunttemperatuur wordt condenswater gevormd.
 - Bij hogere luchtvochtigheid in een ruimte wordt de dauwpunttemperatuur hoger
- > er treedt eerder condensvorming op.

1. Vochtfysica van de lucht bij 50% rel. luchtvochtigheid (afb. 1)

Onder normale klimaatomstandigheden (20 °C/50% rel. luchtvochtigheid) wordt het dauwpunt bereikt bij 9,2 °C. Bij -5 °C treedt condensvorming van 6,15 g/m³ lucht op.

2. Vochtfysica van de lucht bij 65% rel. luchtvochtigheid (afb. 2)

Bij een verhoogde luchtvochtigheid binnenshuis van 65% rel. luchtvochtigheid wordt het dauwpunt al bij 13,2 °C bereikt. Bij -5 °C treedt condensvorming van 8,75 g/m³ lucht op.

Conclusie

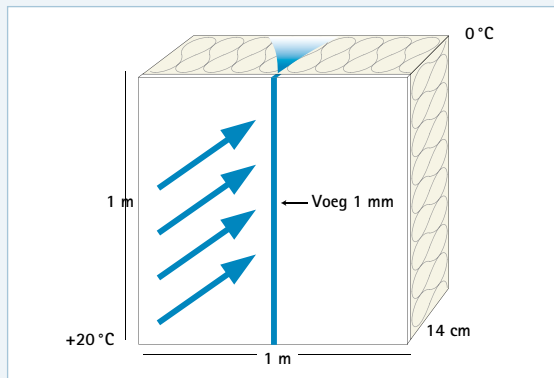


Ook constructies met dampdichte lagen waarvan de berekende μ_d -waarden 50 m, 100 m of meer bedragen, zullen uiteindelijk aanmerkelijke hoeveelheden vocht naar binnen leiden. Dampdichte lagen laten geen terugdroging toe. Daardoor ontstaan plekken waar vocht wordt vastgehouden.



Vochtintreding in de constructie via lekkages in de dampdichte laag

3. Hoeveelheid vocht door convectie



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

Verhoging met factor: 1.600

Randvoorwaarden:

Damprem μ_d -waarde = 30 m

Binnentemperatuur = $+20 \text{ °C}$

Buitentemperatuur = 0 °C

Drukverschil = 20 Pa

komt overeen met windkracht 2-3

Meting: Institut für Bauphysik, Stuttgart [4]

1.3.2 Door convectie

Door convectie, oftewel luchtstroming, worden aanmerkelijk grotere hoeveelheden vocht de constructie binnengeleid dan door diffusie. De convectief naar binnen geleide hoeveelheid vocht bedraagt al gauw het 1000-voudige van de door diffusie naar binnen gedrongen hoeveelheid (zie afb. 3).

Bij constructies met bouwlagen die aan de buitenkant diffusedicht zijn, leidt vochtintreding via lekkages al snel tot bouwschade. Convectief ingetreden vocht kan vanwege zijn hoge vochtbelasting echter ook gevaarlijk worden voor bouwelementen die aan de buitenzijde diffusieopen zijn, vooral wanneer er al condensvorming heeft plaatsgevonden of wanneer er bij winterse temperaturen ijslagen, bijv. op het onderdak zijn ontstaan.

1.3.3 Vocht als gevolg van de constructie – flankdiffusie

Uit de praktijk zijn verschillende gevallen van bouwschade bekend die door het optreden van diffusie en convectie door dampdichte lagen alleen niet verklaard kunnen worden. Ruhe [5] en Klopfer [6] hebben in 1995 resp. 1997 naar aanleiding van een geval van bouwschade op het probleem van flankdiffusie gewezen [7].

De constructie:

Schuin dak: aan de buitenzijde bitumenbaan op houten beschoot, aan de binnenzijde dampdichte laag van polyethyleen (PE), daartussen de volledig met minerale wol geïsoleerde ruimte tussen de kepers. Ondanks de perfect luchtdicht gemaakte constructie druppelde in de zomer water uit de aansluitingen van de baan op de aangrenzende onderliggende bouwelementen. Aanvankelijk werd aangenomen dat de oorzaak een verhoogde hoeveelheid bouwvocht was. Omdat het druppelen elk jaar toenam, moest dit als oorzaak worden uitgesloten. Na 5 jaar werd het dak geopend. Het houten beschoot bleek al grotendeels verrot.

Als mogelijke oorzaak werd vochtintreding door flankdiffusie genoemd. Daarbij dringt vocht via de flank van het aangrenzende metselwerk (hier een poreuze bakstenen muur) in het dak.

De vochtstroom beweegt zich daardoor

langs de dampdichte folie (zie afb. 4 en 5). Onder bouwfysici was deze kwestie aanvankelijk omstreden tot Künzle [8] in 1997 de flankdiffusie met behulp van berekeningen van het tweedimensionale warmte- en vochttransport met behulp van WUFI 2D [9] rekenkundig bewees. In de simulatie nam de rel. vochtigheid van het beschoot boven de bakstenen muur al na een jaar tot 20% toe. Na 3 jaar steeg deze tot 40% en na 5 jaar tot 50%.

1.3.4 Hoog bouwvochtgehalte in bouwmaterialen

Wanneer bouwmaterialen met een verhoogd vochtgehalte worden verwerkt, moet de constructie het vocht weer op de een of andere manier zien kwijt te raken. Tegenwoordig wordt er meestal technisch gedroogd hout (constructiehout) gebruikt. Dit heeft volgens de definitie een rel. vochtigheid van maximaal 18%. Deze waarde kan aanzienlijk toenemen door de opname van nog meer vocht, bijvoorbeeld door een flinke regenbui.

Een voorbeeld:

Een dak met 6/24 kepers en een keperafstand van $e=0,70 \text{ m}$ heeft per m^2 dakoppervlak 1,5 lopende meter keper. Bij 10% vochtigheid bevat dit dakoppervlak ca. 1,1 l water uit de kepers.

Bij een verhoogd vochtgehalte betekent dit dat:

De actuele versie van DIN 68800-2 [19] vereist dat hout dat tijdens de bouwfase een rel. vochtigheid van 20% bereikt, uiterlijk binnen 3 maanden een vochtigheid van minder dan 20% moet bereiken. Wanneer de rel. vochtigheid van het hout 30% bedraagt, moet er 1,1 l water per m^2 dakoppervlak kunnen uitdrogen om aan de norm te voldoen. Dit rekenvoorbeeld geldt ook voor een houten beschoot met een dikte van 24 mm. Het vochtgehalte bij 10% vochtigheid bedraagt ca. 1,2 l water per m^2 . Bij een rel. beginvochtigheid van 30% – na een dag regen geen zeldzaamheid – moet 1,2 l water per m^2 dakoppervlak uitdrogen om een rel. vochtigheid van 20% te bereiken. Voor kepers en houten beschoot samen is dat ca. 2,3 l per m^2 dakoppervlak. De totale hoeveelheid vocht wordt dikwijls onderschat. Bij massieve bouw kan door het vocht van de nieuwbouw een aanzienlijke hoeveelheid



vocht extra in het hout binnendringen. Als er dan aan de binnenzijde van een volledig geïsoleerde constructie een diffusiedichte dampdichte PE-folie wordt aangebracht en aan de buitenzijde als eerste laag een bitumenbaan, is bouwschade onvermijdelijk.

1.3.5 Samenvatting vochtbelasting

De uiteenlopende mogelijkheden van vochtintreding tonen aan dat in de dagelijkse bouwpraktijk vochtbelasting van een constructie nooit kan worden uitgesloten. Wanneer het erom gaat schade- en schimmelvrij te bouwen, is het aanmerkelijk effectiever en betrouwbaarder om de uitdrogingscapaciteit van een constructie te verhogen dan alles in het werk te stellen om vochtbelasting te voorkomen.

Intelligent vochtmanagement formule voor betrouwbaarheid



Uitdrogingscapaciteit > vochtbelasting = geen bouwschade

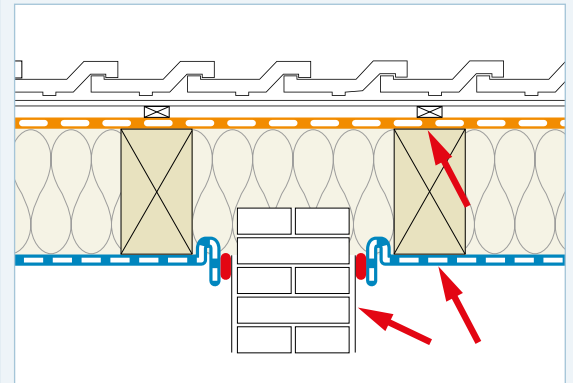
Bouwschade kan alleen optreden wanneer de uitdrogingscapaciteit kleiner is dan de vochtbelasting.

»Hoe hoger de uitdrogingsreserve van een constructie is, hoe hoger de vochtbelasting kan zijn terwijl de constructie toch schadevrij blijft.«

Constructies die aan de buitenzijde diffusieopen zijn, hebben een grotere uitdrogingsreserve dan constructies die van buiten diffusiedicht zijn.

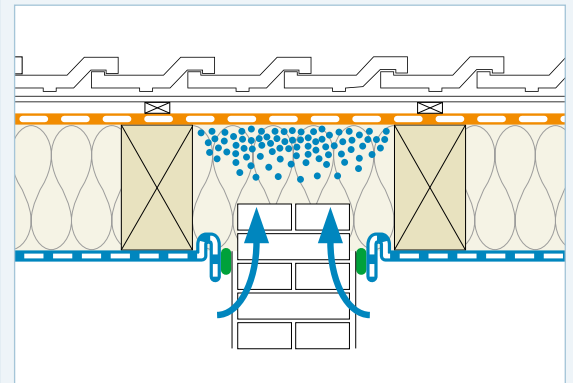
Flankdiffusie

4. Bouwschade: vochtintreding ondanks luchtdichte aansluiting en toepassing van een dampdichte laag



Luchtdichte constructie met dampdichte PE-folie en luchtdichte pleisterlaag, buiten bitumenbaan

5. Oorzaak van de vochtintreding: vochttransport via de flank, hier het metselwerk



Vochtintreding door flankdiffusie via het aangrenzende metselwerk



»Intelligente« dampremmen

Vochtsituatie in de constructie

De diffusiestroom loopt altijd van de warme naar de koude zijde. Daaruit volgt:

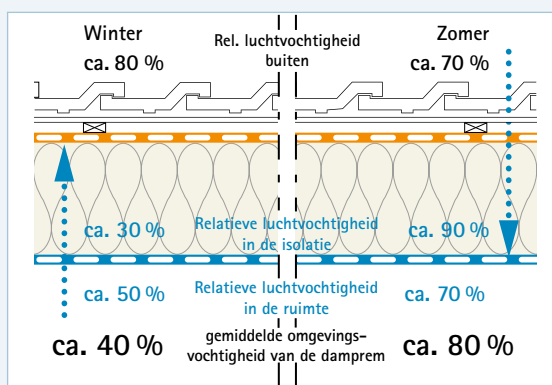
in de winter:

verhoogde vochtigheid aan de buitenzijde

in de zomer:

verhoogde vochtigheid aan de binnenzijde

6. Werkingsprincipe van vochtvariabele folies



Weergave van de rel. luchtvochtigheden bij de damprem afhankelijk van het jaargetijde

Omgevingsvochtigheid van de damprem

- in de winter: geringe luchtvochtigheid
→ de vochtvariabele damprem is diffusiedichter
- in de zomer: hoge luchtvochtigheid
→ de vochtvariabele damprem is diffusieopener

7. Diffusiestromen van de vochtvariabele dampremmen van pro clima

Diffusiestroom	W_{DD} -waarde in g/m^2 per week	
	in de winter	in de zomer
Diffusierichting	naar buiten richting onderdak	naar binnen richting damprem
DB+	28	175
INTELLO INTELLO PLUS INTESANA	7	560

2.1 Uitdroging van de constructie naar binnen toe

Een andere effectieve manier om de uitdroging van een bouwelement te bevorderen, is het activeren van het inwendige terugdrogingsoppervlak: steeds wanneer de temperatuur aan de buitenzijde van de isolatie hoger is dan aan de binnenzijde van het gebouw draait de diffusierichting om – het vocht in het bouwelement dringt naar de binnenzijde van het gebouw. Dit gebeurt al op zonnige dagen in het voorjaar en in de herfst, en in sterkere mate gedurende de zomermaanden. Wanneer er in plaats van een dampremmende en luchtdichte folie een diffusieopen luchtdichte folie zou worden aangebracht, zou het eventueel in de constructie aanwezige vocht naar binnen kunnen uitdrogen.

Een diffusieopen folie zou in de winter echter te veel vocht in de constructie laten diffunderen en daardoor bouwschade veroorzaken. Met dampdichte folies lijkt de constructie op het eerste gezicht beschermd tegen vocht. Als er echter vochtintreding plaatsvindt als gevolg van convectie, flankdiffusie of een verhoogd vochtgehalte van bouwmaterialen, is terugdroging naar binnen toe in de zomer niet mogelijk. Aangezien deze bouwwijze in de hand werkt dat er plekken ontstaan waar vocht wordt vastgehouden, werd deze op het 2e Hout[bouw]fysica-Congres in februari 2011 de status »conform der erkende regels« ontnomen. [1]

Ideaal is daarom een damprem met een hoge diffusieweerstand in de winter en een zeer lage diffusieweerstand in de zomer. Deze »intelligente« dampremmen met vochtvariabele μ_a -waarde hebben hun effectiviteit al jaren in de praktijk bewezen. Ze passen hun diffusieweerstand aan de gemiddelde relatieve luchtvochtigheid van hun omgeving aan. Daarom zijn ze in een winters klimaat diffusiedichter en beschermen ze de constructie tegen vocht. In een zomers klimaat zijn ze diffusieopener en maken zo de uitdroging van eventueel vocht in de constructie naar binnen toe mogelijk. In het ideale geval ligt de μ_a -waarde in de zomer duidelijk onder de 0,50 m – een materiaal geldt pas onder deze waarde als diffusieopen.

Als de potentiële μ_a -waarde in de zomer meer dan 0,50 m bedraagt, wordt de

uitdroging uit het bouwelement naar binnen toe aanzienlijk gereduceerd.

2.2 Werking van de vochtvariabele diffusieweerstand

De richting van de diffusiestroom wordt bepaald door het verschil van de deeldruk van de waterdamp. Deze is afhankelijk van de temperatuur en het vochtgehalte van de lucht binnen resp. buiten een gebouw. Wanneer er, bij wijze van vereenvoudiging, alleen naar de temperatuur wordt gekeken, stroomt het vocht van de warme naar de koude zijde. In de winter van binnen naar buiten, in de zomer van buiten naar binnen. Metingen in dakconstructies hebben uitgewezen dat in een winters klimaat de damprem, door het transport van het vocht in het kepersveld naar buiten, in een gemiddelde omgevingsluchtvochtigheid van ca. 40% ligt. In een zomers klimaat treedt er in het kepersveld daarentegen een verhoogde relatieve luchtvochtigheid bij de damprem op en wordt er bij onvoorziene vochtintredingen deels zelfs zomercondens gevormd (zie afb. 6).

Dampremmen met een vochtvariabele diffusieweerstand reageren actief op deze klimaatomstandigheden en zijn daardoor in de winter diffusiedichter en in de zomer diffusieopener.

Sinds 1991 heeft DB+ van pro clima zich met miljoenen gelede m^2 ruimschoots bewezen. De diffusieweerstand kan μ_a -waarden tussen 0,4 m en 4 m aannemen. In 2004 heeft de firma MOLL bauökologische Produkte GmbH de uiterst effectieve damprem pro clima INTELLO ontwikkeld. INTELLO, INTELLO PLUS en INTESANA hebben een bijzonder hoge, in alle klimaatzones werkende vochtvariabele diffusieweerstand van 0,25 m tot boven 25 m (zie afb. 9). Volgens de algemene bouwtechnische goedkeuring van het Duitse Instituut voor Bouwtechniek (DIBt) kunnen INTELLO en INTELLO PLUS μ_a -waardes tot 55 m bereiken. Dit betekent dat bouwelementen in bovengenoemde winterse omstandigheden zeer goed worden beschermd tegen bouwschade als gevolg van vochtintreding door diffusie.

2.2.1 CE-markering/bestendigheid tegen veroudering

De Europese norm voor dampremmende



folies (EN 13984) bevat eisen voor tests die moeten worden uitgevoerd op dampremmende en luchtdichte folies voor het verkrijgen van een CE-markering. Alleen met een CE-markering mag een folie volgens de Europese wetgeving voor bouwproducten (EU-verordening Nr. 305/2011) als bouwproduct in constructies worden gebruikt. INTELLO en INTELLO PLUS zijn voorzien van de CE-markering. EN 13984 bevat echter geen eisen voor verouderingstests aan folies met vochtvariabele μ_d -waardes. Daarom is de duurzaamheid van de vochtvariabiliteit van INTELLO en INTELLO PLUS getest middels een procedure van een commissie van deskundigen van het Duitse Instituut voor Bouwtechniek (in Duitsland is het succesvol voltooiën van deze verouderingstest conform DIN 68800-2 vereist – het is de voorwaarde voor het verkrijgen van een algemene bouwkundige goedkeuring die wederom een rechtsconforme toepassing in Duitsland garandeert). Om de bestendigheid tegen veroudering van de vochtvariabiliteit van INTELLO en INTELLO PLUS te bepalen, worden de folies gedurende 24 weken bij 80 °C bewaard. De testduur en de temperatuur liggen duidelijk boven de eisen van EN 13984 voor dampremmen met constante diffusieweerstanden (70 °C gedurende 12 weken). De goedkeuring zorgt er tevens voor dat de productie en de materiaaleigenschappen regelmatig en onafhankelijk op kwaliteit worden getest door een erkend testinstituut. EN 13984 verlangt alleen een productiecontrole door de foliefabrikant zelf.

INTELLO en INTELLO PLUS voldoen beide aan de hoge eisen. De kwaliteit en het materiaal worden regelmatig onafhankelijk gecontroleerd. Hiermee is de duurzame werking van de vochtvariabele diffusieweerstand gedurende een periode van ten minste 50 jaar bevestigd.

2.2.2 Hoge diffusieweerstand in de winter

De diffusieweerstand van de damprem INTELLO is zodanig ingesteld dat de folie in een winters klimaat een μ_d -waarde van meer dan 25 m kan bereiken. Dat zorgt ervoor dat in de winter, wanneer de vochtdruk op de constructie het grootst is, de damprem bijna geen vocht naar het bouwelement doorlaat. De werking van de

vochtvariabele diffusieweerstand is onafhankelijk van de hoogteligging van het gebouw. Ook tijdens lange koude winters blijft deze eigenschap behouden. Bij constructies met diffusiedichte afdichtingsfolies aan de buitenzijde kunnen de folies de vochtthuishouding regelen en de bouwelementen effectief tegen vocht beschermen. De hoge μ_d -waarde is ook bij aan de buitenzijde diffusieopen daken van voordeel, wanneer er bijv. door rijp- en ijsvorming op een diffusieopen onderdakfolie een dampdichte laag ontstaat (zie afb. 9).

2.2.3 Lage diffusieweerstand in de zomer

De diffusieweerstand in een zomers klimaat kan naar een μ_d -waarde van minder dan 0,25 m dalen. Dat zorgt voor een snelle uitdroging van eventueel in de constructie aanwezig vocht naar binnen toe. Afhankelijk van de hoogte van het verschil in dampdruk komt dat overeen met een uitdrogingscapaciteit van 5-12 g/m² water per uur, oftewel ca. 80 g/m² water per dag resp. 560 g/m² water per week (zie afb. 7).

Deze hoge uitdrogingscapaciteit zorgt ervoor dat een bouwcompartiment al in het voorjaar snel kan uitdrogen. Dampremmen met een variabele diffusieweerstand moeten in het vochtige gedeelte (gedurende de zomer) een μ_d -waarde van duidelijk minder dan 0,5 m kunnen bereiken, anders bieden ze bij onvoorziene vochtintredingen onvoldoende zekerheid.

2.2.4 Evenwichtig diffusieprofiel

Bij de huidige verbeterde oplossingen voor luchtdicht bouwen en daarmee samenhangende hogere luchtvochtigheden in de massieve bouw (nieuwbouw) vervult de diffusieweerstand bij een hogere rel. vochtigheid (RV) een belangrijke rol

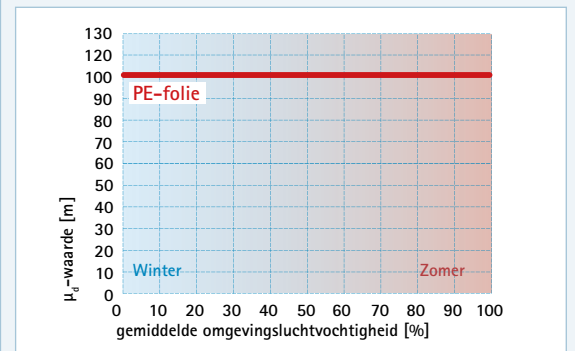
Nieuwbouw: droogfase (60/2-regel)

In nieuwe woningen en in vochtige ruimtes van woningen (badkamers, keukens) is er om bouwkundige redenen en door de bewoning sprake van een verhoogde luchtvochtigheid van ca. 70%. De diffusieweerstand van een damprem dient zodanig te zijn ingesteld dat bij deze vochtigheid een μ_d -waarde van minstens 2 m wordt gerealiseerd om de constructie voldoende

μ_d -waarde-gedrag van dampremmen

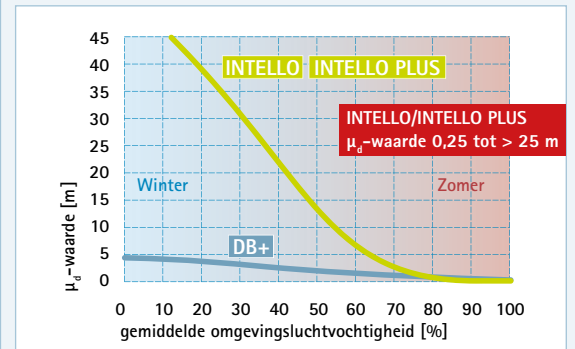
Hoe groter de variabiliteit van de diffusieweerstand tussen winter en zomer, hoe hoger de betrouwbaarheid van de damprem.

8. μ_d -waarde-gedrag PE-folie



PE-folie: geen vochtvariabiliteit

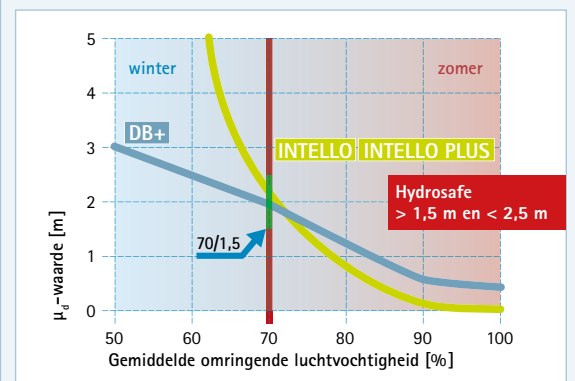
9. μ_d -waarde-gedrag dampremmen pro clima



DB+: Gemiddelde vochtvariabiliteit

INTELLO/INTELLO PLUS: hoge vochtvariabiliteit

10. Gebruik en bouwfase (uitdroging en Hydrosafe-waarde)



Aanbevolen minimum μ_d -waarden tijdens de bouwfase, bij nieuwbouwocht en voor vochtige ruimtes van woningen



tegen binnendringend vocht vanuit de binnenlucht en daardoor tegen schimmelvorming te beschermen. INTELLO en INTELLO PLUS hebben bij een gemiddelde vochtigheid van 60% (70% luchtvochtigheid binnen en 50% luchtvochtigheid bij de thermische isolatie) een μ_a -waarde van meer dan 6 m (zie afb. 10).

Bouwfase: Hydrosafe-waarde (70/1,5-regel)

Tijdens de bouwfase, wanneer er wanden worden gepleisterd of een dekvloer wordt gelegd, heerst er in het gebouw een zeer hoge luchtvochtigheid van soms meer dan 90%. In welke mate een geïsoleerde houtconstructie tijdens de bouwfase wordt beschermd tegen een verhoogde binnenluchtvochtigheid (bouwvocht) wordt uitgedrukt door de Hydrosafe-waarde. Deze geeft aan welke equivalente

luchtlaagdikte (μ_a -waarde) een aan de binnenzijde aangebrachte vochtvariabele dampremmende en luchtdichte folie minimaal moet hebben, om de isolatie en de constructie gedurende alle fasen voldoende tegen vocht te kunnen beschermen. Een Hydrosafe-waarde van ten minste 1,5 m bij een gemiddelde rel. luchtvochtigheid van 70% geldt als voldoende betrouwbaar (zie DIN 68800-2 [19]). INTELLO en INTELLO PLUS hebben bij een gemiddelde vochtigheid van 70% (90% luchtvochtigheid binnen en 50% luchtvochtigheid in de isolatielaag) een μ_a -waarde van meer dan 2 m en beschermen bouwelementen ook bij een verhoogde rel. vochtigheid tijdens de bouwfase voldoende. Overmatige binnenluchtvochtigheid tijdens de bouwfase gedurende een lange periode leidt tot schade aan alle materialen resp. bouwelementen in het gebouw en

tot vochtophoping en moet altijd snel en permanent door openstaande ramen naar buiten kunnen ontsnappen. Evt. zijn bouwdrogers noodzakelijk (zie afb. 10).

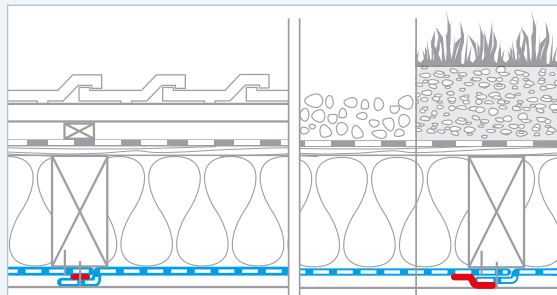
2.2.5 Maximale betrouwbaarheid

Het »intelligente« gedrag van de vochtvariabele dampremmen van pro clima maakt thermische isolatieconstructies ongeacht het type en de plaats van aanbrengen bijzonder betrouwbaar, ook bij onvoorziene vochtintrede in de constructie, bijv. door ongunstige weersomstandigheden, lekkages, flankdiffusie of een verhoogd vochtgehalte van bouw hout of isolatiemateriaal. De vochtvariabele dampremmen van pro clima werken als een vochttransportpomp die actief vocht aan het bouwelement onttrekt dat hierin eventueel onvoorzien is binnengedrongen.

Bepaling van de betrouwbaarheid van een dakconstructie

Bouwfysische beoordeling van dakconstructies

11. Opbouw van de dakconstructies



Elementlagen:

- aan de buitenzijde diffusiedicht (afdichtingsfolie μ_a -waarde = 300 m)
- compleet houten beschot, 24 mm
- vezelisolatie (minerale wol) WLG 0,035 W/mK, 200 m
- dampremmen/-afdichtingen met verschillende μ_a -waarden
- installatielaag, 25 mm
- gipsplaat, 12,5 mm

Bekeken dakvarianten:

- schuin dak met 40° helling gericht op het noorden, rode dakpannen
- plat dak met 5 cm kiezellaag
- groendak met extensieve groenvoorziening: 10 cm plantensubstraat

Alle constructies zijn schaduwvrij.

3.1 Rekenkundige beoordeling van bouwelementen

Voor het berekenen van vochtbelastingen binnen in bouwelementen zijn statische en dynamische methoden beschikbaar. Bouwelementen kunnen met statische berekeningen worden beoordeeld met behulp van de methode van Glaser. Deze vormt de basis voor verschillende nationale en internationale normen (bijv. EN ISO 13788 [13], DIN 4108-3 [10], OENORM B 8110-2 [11] of SIA 180 [12]). Om het specifieke vochtgehalte van bijvoorbeeld afzonderlijke materialen te bepalen, kan een dynamische methode conform EN 15026 [17] worden gebruikt.

3.1.1 Berekening volgens de methode van Glaser

De methode van Glaser is een vereenvoudigde statische methode voor het beoordelen van de vochttechnische kwaliteit van bouwelementen. Hierbij wordt gekeken naar het diffusietransport op basis van statische gegevens en vaste randvoorwaarden. De methode van Glaser is een modelmatige benaderingsmethode die niet de werkelijke fysische processen binnen in een bouwelement weergeeft. De vereenvoudigde methode levert slechts beperkte resultaten op, omdat er bijv. geen rekening kan worden gehouden met

schaduwvorming of extra elementlagen met kiezels of begroeiing. Ook negeert de berekeningsmethode het werkelijke vochtgehalte evenals capillariteit en sorptie van de bouwmaterialen. Verder wordt »bij de toegepaste methode [...] een aantal belangrijke natuurkundige fenomenen [...] buiten beschouwing gelaten:

- veranderende materiaaleigenschappen afhankelijk van het vochtgehalte; [...]
- luchtbeweging vanuit een gebouw in het bouwelement door spleten of in luchtruimtes; [...]

De resultaten van de methode gelden daarom alleen als de invloeden van deze fenomenen te verwaarlozen zijn.« (uit EN ISO 13788 [13])

Om die reden is de methode van Glaser niet geschikt voor het berekenen van bouwfysisch complexe houtbouwconstructies.

3.1.2 Berekening van de gekoppelde warmte- en vochttransporten

Een gedetailleerde beoordeling van het vochtgehalte binnen in een bouwelement is mogelijk met dynamische berekeningsmethoden. Deze kunnen zowel rekening houden met de klimaatomstandigheden die van buitenaf invloed op het bouwelement uitoefenen (binnen- en buitenklimaat), alsook met eigenschappen van



materialen, zoals vochtgehalte, sorptie en capillariteit. Bekende softwareoplossingen zijn Delphin [14] van het Institut für Bauklimatik, Dresden en WUFI pro [15] van het Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen.

De programma's zijn meerdere malen gevalideerd, d.w.z. de resultaten van de berekeningen zijn aan de hand van tests in het veld gecontroleerd. Voor de berekening zijn de betreffende klimaatgegevens van een jaar in de vorm van uurwaarden nodig. Deze kunnen voor vrijwel elke locatie wereldwijd worden opgevraagd in de meteorologische database Meteonorm [16]. Voor de simulatieberekeningen wordt het bouwelement met zijn opeenvolgende lagen bekeken en een meerjarig verloop van het vochtgehalte voor het hele bouwelement of voor afzonderlijke elementen geanalyseerd.

Het resultaat toont bijv. of het vochtgehalte van afzonderlijke materialen of op specifieke plekken in het bouwelement binnen de toelaatbare grenzen blijft. Door het verloop van het totale vochtgehalte mee te nemen, kan de maximale uitdrogingscapaciteit van diverse bouwelementen worden bepaald. Dit wordt ook wel het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade genoemd.

3.2 Definitie van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade

Het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade is een theoretische waarde, waarmee de uitdrogingscapaciteiten van constructies met elkaar kunnen worden vergeleken. Het geeft aan hoeveel vocht er theoretisch door onvermijdelijke lekkages, flankdiffusie of vochtige bouwmaterialen kan binnendringen. De waarde wordt afgezet tegen de hoeveelheid vocht die binnen een jaar uit het bouwelement kan uitdrogen. Op deze manier kunnen verschillende concepten met elkaar worden vergeleken. Hoe groter het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade, hoe kleiner het risico op bouwschade.

3.2.1 Berekening van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade

Om het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van een bouwelement bij onvoorziene vochtintreding te kunnen bepalen, wordt de volgende benadering gehanteerd: Als eerste wordt er een verhoogde vochtigheid in de thermische isolatielaag van 20 kg water per m³

isolatiemateriaal vastgelegd. De berekening laat zien hoe snel deze laag weer kan uitdrogen. De hoeveelheid vocht die per jaar onder de aanname van een verhoogde beginvochtigheid uit de constructie kan ontsnappen, is het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. De berekeningen worden onder ongunstige omstandigheden uitgevoerd (bijv. noordzijde van een schuin dak), in verschillende klimaatzones (bijv. hooggebergte) en met verschillende dakvormen (schuin dak, plat kiezeldak of plat groendak). Bouwfysisch gunstigere constructies bieden een dienovereenkomstige hogere betrouwbaarheid. Een bijkomend criterium voor de werking van een constructie is het maximum vochtgehalte dat in de bouwlagen kan optreden. Deze onderzoeken naar de geschiktheid voor gebruik volgen vanaf paragraaf 3.3.

3.2.2 Dakconstructies

De hierna beschreven en als bouwfysisch kritisch geldende constructie wordt als voorbeeld genomen. Locaties en dampremmen worden gevarieerd.

Opbouw van de constructie:

Het betreft een constructie met 200 mm isolatie (minerale wol WLK 035). Het bouwelement is aan de buitenkant voorzien van een diffusiedichte afdichtingsfolie (zie afb. 11 links).

Dampremmen:	μ_d-waarde:
• Dampscherm	100 m constant
• Damprem	5 m constant
• Damprem	0,8 - 35 m richtingsafhankelijk variabel
• pro clima INTELLO/INTELLO PLUS	0,25 - 25 m vochtvariabel

Dakvarianten:

- Schuin dak met 40° helling gericht op het noorden, rode dakpannen
- Plat dak met 5 cm kiezellaag boven op de afdichting
- Plat dak met 10 cm groendak boven op de afdichting

Locaties:

- Brussel, België
- Amsterdam, Nederland

Berekening:

- Met Delphin 5.9.3 [14]
- Beginvochtigheid in de thermische isolatie 4000 g/m³ (= 20 kg/m³)

Met potentiële schaduw (bijv. door fotovoltaïsche installaties, gebouwen met naar voren springende gedeeltes, hoge bomen of topografie) is bij de berekeningen geen rekening gehouden.

3.2.3 Factoren die van invloed zijn op het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade

Een wezenlijke factor voor het bouwschadevrij blijven is de omgekeerde diffusie in de zomer en de daarmee gepaard gaande uitdroging van de constructie naar binnen toe. De omvang hangt af van de buitentemperatuur op de buitenzijde van de thermische isolatie en van de diffusieopenheid van de dampremmende en luchtdichte folie tijdens de zomer. Door zonnestraling (ook diffuus) hebben de oppervlakken van bouwelementen een hogere temperatuur dan de aangrenzende lucht. De tijd die de warmte van buiten nodig heeft om bij de thermische isolatie te komen, is bepalend. Bij een schuin dak is dit sneller het geval dan bij een platte kiezeldak- of groendakconstructie. Bij een schuin dak hangt de hoogte van de temperatuur van het dakoppervlak af van de dakhelling, de richting van de dakoppervlakken (noorden/zuiden) en de kleur van de dakbedekking resp. dakafdichting (lichter/donkerder). Het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade wordt voorts door de gekozen isolatielaagdikte beïnvloed. Grote isolatiediktes leiden in de regel tot geringere terugdrogingshoeveelheden, aangezien de inwendige opwarming van het bouwelement langzamer gebeurt en als gevolg daarvan de terugdrogingsperiodes korter worden.

Ongunstige factoren zijn:

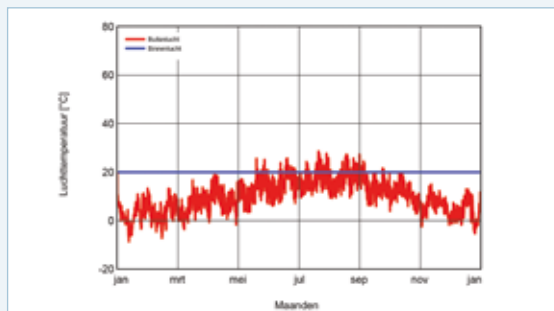
- dakhelling op het noorden
- grote dakhelling (> 25°)
- lichte kleur van de dakbedekking of de afdichtingsfolie
- diffusiedicht onderdak
- koud klimaat, bijv. in hooggelegen gebieden
- grote isolatielaagdiktes
- extra lagen boven op de afdichting (groenvoorziening, terrasbekleding etc.)

Om de invloed van de diffusieweerstand van dampremmende of dampdichte lagen op het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade te bepalen, wordt er bij de berekening vanuit gegaan dat de buitenzijde voorzien is van een diffusiedichte afdichtingsfolie (μ_d-waarde = 300 m).

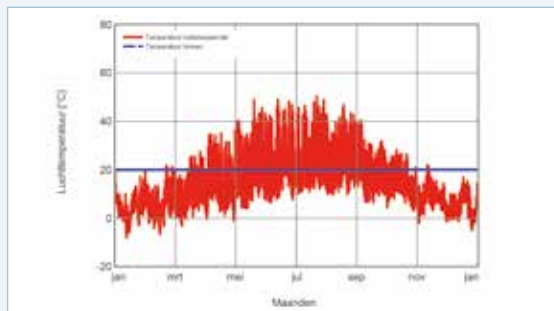


Jaarlijks temperatuurverloop Brussel, België Dak: rode pannen resp. kiezel

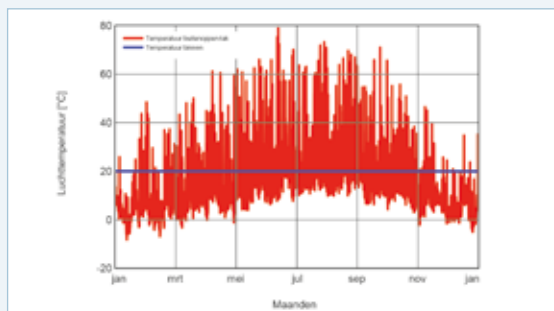
12. Luchttemperaturen (vochtreferentieklimaat)



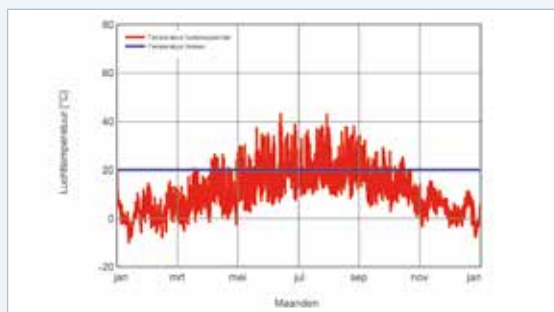
13. Temperatuur dakoppervlak noordzijde, 40° dakhelling



14. Temperatuur dakoppervlak zuidzijde, 40° dakhelling



15. Temperatuur dakoppervlak kiezel dak



Deze benadering kan tijdens de winter (bij temperaturen onder het vriespunt) worden gebruikt om de invloed van diffusiedichte onderdak- en onderspanfolies als gevolg van ijsvorming op het vochtgehalte binnen in de constructie te bepalen.

3.2.4 Klimaatgegevens locatie Brussel

Brussel ligt in hartje België en heeft een gematigd klimaat met naar verhouding veel regen. De gemiddelde jaartemperatuur bedraagt voor de gebruikte klimaatgegevens $10,3\text{ °C}$ – de hoeveelheid neerslag in dezelfde periode bedraagt 1025 mm. De diagrammen links tonen het temperatuurverloop gedurende een jaar. De blauwe lijn geeft de binnen-, de rode balkjes geven de buitentemperaturen aan (zie afb. 12 t/m 15). De globale straling (direct zonlicht en verstrooid licht) meegerekend, resulteert dit, vergeleken met de luchttemperatuur, in een deels aanmerkelijk hogere temperatuur van het dakoppervlak. Wanneer de buitentemperatuur (rood) de binnentemperatuur (blauw) overschrijdt, vindt bij constructies met vochtvariabele dampremmen uitdroging naar binnen toe plaats. Zelfs bij schuine daken op het noorden is daardoor in Brussel op een groot aantal dagen omgekeerde diffusie mogelijk, bij ligging op het zuiden al op zonnige dagen in de winter. Bij deze berekening werd de ongunstigste situatie als uitgangspunt genomen: dakligging op het noorden met een dakhelling van 40° .

3.2.5 Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade bij schuin dak, noordzijde, 40° dakhelling

De hoeveelheid vocht die binnen een jaar door uitdroging uit de constructie verdwijnt in g/m^2 drukt het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade uit en bepaalt derhalve hoe betrouwbaar een constructie is bij onvoorziene vochtintreding (bijv. door convectie, flankdiffusie etc.). De berekeningsresultaten laten zien dat de PE-folie (μ_d -waarde 100 m) geen significante uitdroging van het vocht in de 200 mm dikke isolatielaag bewerkstelligt. Condens in de isolatielaag kan niet meer uitdampen.

Ook bij een damprem met een constante μ_d -waarde van 5 m zijn er slechts geringe uitdrogingsreserves. Bij de richtingsafhan-

kelijke variabele damprem bedraagt de uitdrogingsreserve ca. 2400 g/m^2 -jaar. De uiterst effectieve damprem INTELLO biedt de constructie de hoogste betrouwbaarheid. Binnen een jaar kan de constructie volgens de Delphin [14]-berekeningen ca. 4000 g/m^2 water uitdrogen. (zie afb. 16).

3.2.6 Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade bij plat dak

Voor de berekening van groen- en kiezel daken zijn diverse datarecords voor verschillende materialen voor groendaken en voor kiezelconstructies beschikbaar. Deze zijn op basis van metingen op verschillende dakconstructies op diverse locaties samengesteld.

In de datarecords is rekening gehouden met de veranderingen die een groendak- resp. kiezel dakconstructie in de loop der tijd ondergaat. Zo is de veranderende invloed van de begroeiing (schaduwvorming door plantengroei) al in het datarecord opgenomen. Dit maakt betrouwbare simulaties van de hygrothermische omstandigheden in en onder groendaken resp. kiezel daken bij uiteenlopend gebruik in Midden-Europa mogelijk.

3.2.6.1 Plat kiezel dak

Het platte kiezel dak is minder betrouwbaar dan het schuine dak, omdat de kiezellaaag boven op de afdichting maar langzaam wordt verwarmd. Hierdoor vindt een vertraagde opwarming van de daaronder gelegen bouwlagen inclusief de isolatielaag plaats. Afb. 13 t/m 15 tonen de temperaturen van een op het noorden resp. zuiden liggende schuine dakconstructie in vergelijking met een plat kiezel dak. Het verschil wordt met name duidelijk bij het schuine dak dat op het zuiden ligt. Maar ook het op het noorden liggende schuine dak heeft ca. $8\text{--}10\text{ °C}$ hogere piektemperaturen dan het platte kiezel dak.

Evenals bij het schuine dak treedt er bij het kiezel dak met de PE-folie geen uitdroging op grond van de hoge μ_d -waarde van 100 m op. Ook de damprem met een constante μ_d -waarde van 5 m biedt geen noemenswaardige betrouwbare terugdroging.

Dit is een gevolg van de verminderde temperatuur van de bouwelementen, die de omgekeerde diffusie reduceren. Reeds



bij geringe onvoorziene vochtbelastingen treedt bouwschade op. Bij de richtingsafhankelijke variabele damprem is een uitdroging mogelijk van ca. 1400 g/m²-jaar. Ofschoon de oppervlaktetemperatuur van het kiezeldak duidelijk verlaagd is, biedt de uiterst effectieve damprem INTELLO de constructie een substantiële betrouwbaarheidsmarge. Binnen een jaar kan de constructie volgens de Delphin-berekeningen [14] ca. 2400 g/m² water uitdrogen. (zie afb. 17).

3.2.6.2 Plat groendak

Platte groendakconstructies gedragen zich vanwege de dikke substraatlaag en de daarin opgeslagen waterhoeveelheden weer net iets trager dan de variant met de kiezellaa. De temperatuur op de afdichtingsfolie bereikt in de zomer maximumwaarden van 35-40 °C. Desondanks is het potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade van de niet in de schaduw liggende constructie met een isolatiedikte van 200 mm en INTELLO resp. INTELLO PLUS 1500 g/m²-jaar (zie afb. 18). Het bouwelement is voldoende betrouwbaar in geval van een onvoorziene vochtintreding. Hier wordt de meegewogen invloed van de begroeiing (schaduwvorming) en de daardoor in het datarecord opgenomen betrouwbaarheid duidelijk. Het potentieel van de richtingsafhankelijke variabele damprem ligt bij 1000 g/m²-jaar – de damprem met de μ_a -waarde van 5 m toont geen significante reserves (zie afb. 18). Voor platte groendaken zijn INTELLO en INTELLO PLUS de betere keuze vanwege de hogere reserves.

3.2.7. Klimaatgegevens locatie Amsterdam

Amsterdam heeft een gematigd klimaat met het hele jaar door relatief veel neerslag. De gemiddelde temperatuur bedraagt 9,2 °C – de normale hoeveelheid regen bedraagt 865 mm per jaar. De volgende diagrammen tonen het temperatuurverloop over een jaar beschouwd. De blauwe lijn geeft de binnen-, de rode balkjes geven de buitentemperaturen aan (zie afb. 19 t/m 22). Wanneer de luchttemperaturen worden vergeleken met de oppervlaktetemperaturen van de schuine daken resp. het kiezeldak, wordt duidelijk hoeveel invloed de straling

van de zon heeft op de uitdroging van het bouwelement.

3.2.8 Potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade bij schuin dak, noordzijde, 40° dakhelling

Voor de berekening werd, om de instraling door de zon te minimaliseren, eveneens van de meest ongunstige situatie uitgegaan, d.w.z. een op het noorden liggend dak met 40° helling en rode pannen. Bij een damprem met een constante μ_a -waarde van 5 m ligt het potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade onder de 1000 g/m²-jaar en is daarmee te gering. De damprem met de richtingsafhankelijke variabele diffusieweerstand heeft een potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade van 2300 g/m².

De uiterst effectieve damprem INTELLO biedt een bouwfysisch onberispelijke constructie en een zeer hoge beschermingsmarge. Binnen een jaar kan de constructie volgens de Delphin [14]-berekeningen ca. 3900 g/m² water uitdrogen (zie afb. 23).

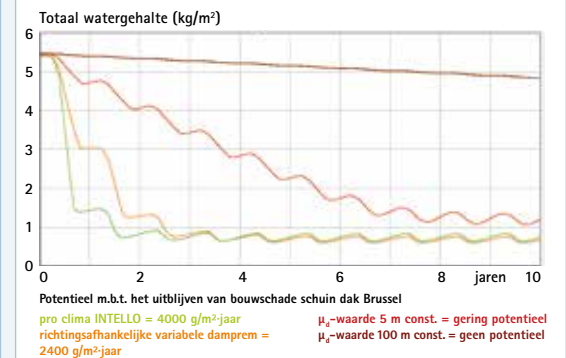
3.2.9 Potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade bij kiezeldak

In tegenstelling tot een schaduwvrij foliedak of een schuine dakconstructie, worden de temperaturen op het afdichtingsvlak van een plat dak gereduceerd als er elementlagen (hier kiezel) op de afdichtingsfolie worden aangebracht. Evenals bij het schuine dak ontstaan er bij het platte kiezeldak met de PE-folie als dampremende en luchtdichte folie geen noemenswaardige terugdrogingsreserves. De damprem met een μ_a -waarde van 5 m biedt voor deze constructie eveneens geen noemenswaardig potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade. Wanneer er onvoorziene vocht in deze bouwelementen binnendringt, is schade nagenoeg onvermijdelijk. De damprem met de richtingsafhankelijke variabele diffusieweerstand heeft een uitdrogingscapaciteit van 1300 g/m²-jaar. De grootste terugdrogingsreserves bieden INTELLO en INTELLO PLUS met ca. 2000 g/m²-jaar (zie afb. 24).

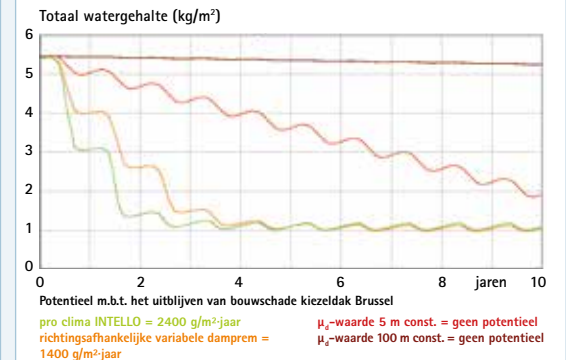
Berekening van het potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade locatie Brussel, dak

Aangenomen extra vocht aan het begin: 4000 g/m²
 Vochtgehalte van de constructie in droge toestand (= vochtgehalte van het houten besot bij 15%): 1700 g/m²

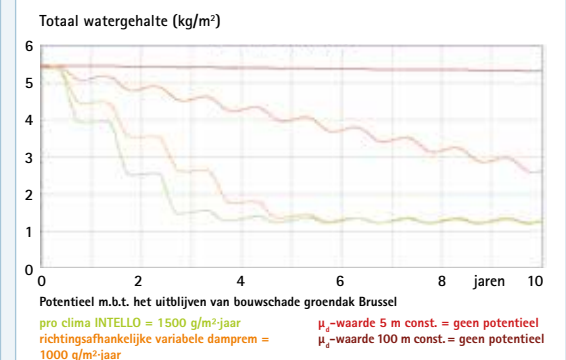
16. Potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade schuin dak, noordzijde, 40° dakhelling



17. Potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade plat dak met 5 cm kiezel



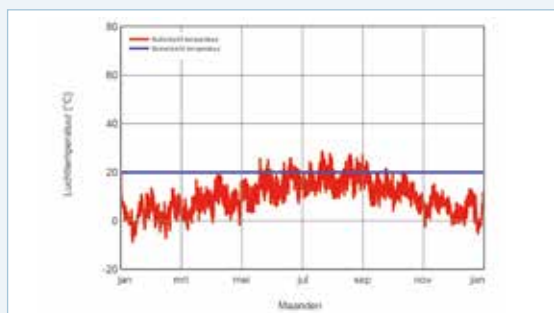
18. Potentieel m.b.t. het uitbliven van bouwschade groendak met 10 cm opbouw



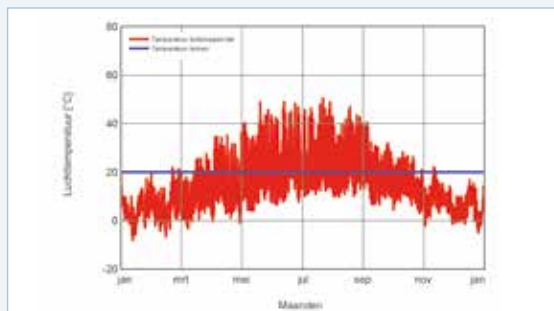


Jaartemperatuurverloop Amsterdam Dak: rode pannen resp. kiezel

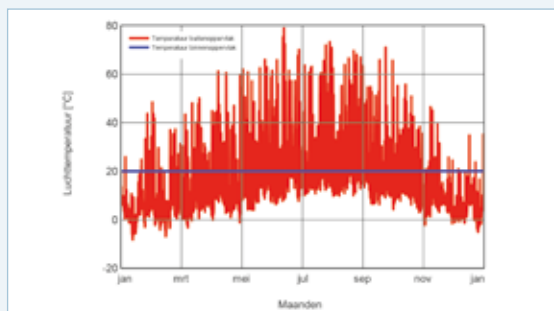
19. Luchttemperaturen Amsterdam



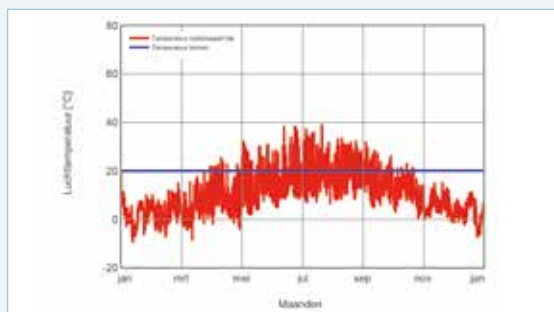
20. Temperatuur dakoppervlak noordzijde, 40° dakhelling



21. Temperatuur dakoppervlak zuidzijde, 40° dakhelling



22. Temperatuur dakoppervlak kiezel dak



3.2.10 Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade bij groendak

Platte dakconstructies met begroeiing zijn vanwege de dikke substraatlagen op de afdichting bouwfysisch het meest complex. De temperatuur op de afdichting bereikt nauwelijks 40 °C, waardoor terugdroging naar binnen toe wordt gereduceerd vergeleken met andere constructies. Toch bereikt de constructie met INTELLO of INTELLO PLUS binnen een potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van ca. 1300 g/m²-jaar. Bij onvoorziene vochtintreding is de constructie voldoende betrouwbaar. De richtingsafhankelijke variabele damprem heeft een uitdrogingsreserve van ca. 800 g/m²-jaar – de damprem met de constante μ_a -waarde van 5 m toont geen significante uitdrogingscapaciteiten (zie afb. 25).

3.2.11. Invloed van de isolatielaagdikte

De laatste jaren is de dikte van de ingebouwde isolatielagen toegenomen, niet in de laatste plaats door de steeds scherpere eisen van de energiebesparingsvoorschriften. Isolatiediktes van 300 mm of meer, die bij conventionele gebouwen in het verleden slechts sporadisch werden toegepast, worden steeds vaker gebruikt. Sterk geïsoleerde thermische constructies hebben een lager potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. De oorzaak hiervan is de tragere inwendige opwarming van het bouwelement naarmate de isolatiedikte toeneemt. Daardoor wordt de verdamping van onvoorziene vochtintreding langzamer. Aangezien de buitenklimaatomstandigheden evenwel gelijk blijven, dalen de terugdrogingshoeveelheden op jaarbasis.

INTELLO:

Afb. 26 toont het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van de boven beschreven schuine dakconstructie met INTELLO met de isolatiediktes 200, 300 en 400 mm. Bij een isolatiedikte van 200 mm bedraagt het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade ca. 4000, bij 300 mm ca. 3500 en bij 400 mm nog ca. 3000 g/m²-jaar.

Damprem met richtingsafhankelijke variabele diffusieweerstand:

Deze damprem biedt in vergelijking met INTELLO en INTELLO PLUS over het geheel genomen een geringer potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. Bij een isolatiedikte van 200 mm bedraagt het ca. 2400, bij 300 mm ca. 2000 en bij 400 mm nog ca. 1900 g/m²-jaar (zie afb. 26).

μ_a -waarde 5 m:

Bij een isolatiedikte van 200 mm heeft de constructie met de damprem met de constante μ_a -waarde van 5 m al een bijzonder gering potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. Bij dikkere isolatielagen wordt dit nog kleiner. Maar ook bij dunne isolatielagen is het potentieel zo gering dat de toepassing bij bouwelementen die aan de buitenzijde diffusiedicht zijn zowel bij dunne als bij dikke isolatielagen moet worden afgeraden (geen afb.).

Voor INTELLO en INTELLO PLUS geldt daarom:

ook bij op het noorden liggende aan de buitenzijde diffusiedichte schuine dakconstructies (40°) met grote isolatiediktes en rode pannen zijn de bouwlementen betrouwbaar en bieden zij in vergelijking met andere constructies het grootste potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. Ondersteuning bij de vochttechnische berekening van schuine daken, foliedaken en platte daken met elementlagen op de afdichtingsfolie (bijv. kiezels, begroeiing, terrasbekleding) biedt de technische hotline van pro clima.

3.2.12 Conclusies potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade

Met de dampremende en luchtdichte folies INTELLO en INTELLO PLUS van pro clima kan bij de op een isolatielaagdikte van 200 mm bemenet schuine dakconstructies een bijzonder hoog potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade worden gerealiseerd. Ook bij extra vocht door onvoorziene invloeden blijven de constructies schadevrij. Flankdiffusie bij een bakstenen muur, zoals door Ruhe [4], Klopfer [5], [6] en Künzel [7] beschreven, kan door INTELLO en INTELLO PLUS worden opvangen, maar dient door een gedetailleerde planning te worden voorkomen. Vochtvariabele dampremmen worden al vele jaren



toegepast (INTELLO > 13 jaar, DB+ > 25 jaar). Hun betrouwbaarheid als het gaat om het voorkomen van bouwschade wordt bewezen door de vele miljoenen m² die in complexe constructies zijn aangebracht.

Afb. 11 toont aan dat de toepassing van INTELLO en INTELLO PLUS in dakconstructies met kiezel voor hoge betrouwbaarheid in Brussel en Amsterdam zorgt. Ze verkleinen het risico op bouwschade aan de bouwelementen.

INTELLO en INTELLO PLUS kunnen ook bij toepassing in groendakconstructies voor een betrouwbare isolatie van bouwelementen zorgen. De dikte van de isolatielaag heeft invloed op het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. De berekeningsvoorbeelden tonen aan dat de terugdrogingscapaciteiten voor schuine daken erg hoog zijn in vergelijking met die van andere constructies.

Richtingsafhankelijke variabele dampremmen hebben in vergelijking met alle andere constructies met INTELLO en INTELLO PLUS een geringer potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. De oorzaak hiervan is dat ze in vochtige delen een verhoogde diffusieweerstand hebben die conform DIN 4108-3 [10] diffusieremmend (dampremmend) wordt genoemd. Deze verhindert de uitdroging van onvoorziene vochtintredingen. Wat het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade betreft, liggen de mogelijke terugdrogingsreserves per jaar voor alle onderzochte constructies ca. 40% onder die van constructies met de uiterst effectieve dampremmen INTELLO en INTELLO PLUS.

3.3 Bepaling van de geschiktheid voor gebruik

Naast het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade is doorslaggevend welke vochtgehalten er tijdens het gebruik in het bouwelement optreden. Als voorbeeld wordt voor de constructies in **afb. 11** voor Brussel en Amsterdam de geschiktheid voor gebruik getest. Bij de hygrische berekening wordt eerst onderzocht welke lagen in het bouwelement kritisch moeten worden bekeken. Normaal gesproken gaat het om aan de buitenkant aangebracht houten beschot of om houtderivaatplaten (bijv. OSB-platen). Na het identificeren van de lagen worden er dynamische berekeningen uitgevoerd. Daarbij wordt

het bouwelement, indien nodig, uitgebreid met steeds dickere isolatielagen op de dragende constructie, totdat het vochtgehalte in de kritische lagen onder de toelaatbare waardes ligt.

De geschiktheid voor gebruik van een constructie is naast de volgorde van de lagen ook afhankelijk van de ligging van een gepland bouwwerk. Zo is een constructie die op meerdere honderden meters hoogte ligt aan zwaardere weersomstandigheden blootgesteld dan een constructie vlak boven de zeespiegel. De berekeningen voor het bepalen van de geschiktheid voor gebruik worden hier met WUFI pro uitgevoerd.

3.3.1 Testprocedure

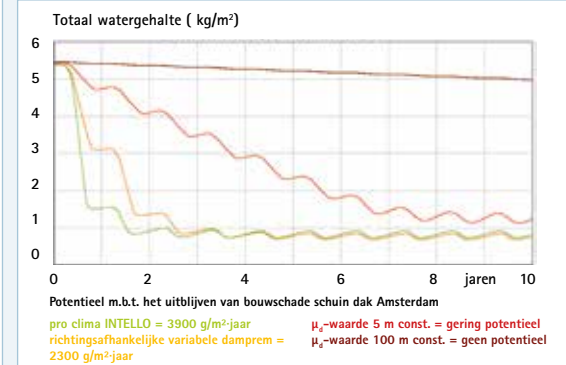
Voor een hygrische berekening is het zinvol om rekening te houden met vochtintredingen door onvermijdelijke lekkages (convectie). Met het luchtinfiltratiemodel in WUFI pro kunnen door convectie veroorzaakte vochtintredingen in de thermische isolatielaag worden gesimuleerd. Maatstaf is hier de bouwschilgerelateerde luchtuitwisseling q_{50} , die niet zoals de n_{50} -waarde betrekking heeft op het volume, maar op de buitenschil van een gebouw. De q_{50} - en de n_{50} -waarde zijn tot een O/V-verhouding (bouwschil in verhouding tot het bekeken gebouw) van 0,9 1/m nagenoeg gelijk. Bij kleinere O/V-verhoudingen daalt de q_{50} -waarde in vergelijking met de n_{50} -waarde (bijv. O/V = 0,7 1/m: q_{50} -waarde = 2,3 m³/m²-h bij n_{50} = 3 1/h) (vgl. [18], p. 20).

Het luchtinfiltratiemodel maakt standaard onderscheid tussen drie luchtdichtheidsklassen (A, B, C) die overeenkomen met een q_{50} -waarde van 1 m³/m²-h (klasse A), 3 m³/m²-h (klasse B) en 5 m³/m²-h (klasse C). Klasse A kan bij modulaire bouwelementen resp. geteste luchtdichtheid met lekkagedetectie, klasse B bij geteste luchtdichtheid en klasse C bij constructies zonder geteste luchtdichtheid worden toegepast om de onvoorziene vochtbelasting door lekkage te simuleren. Voor een maximaal betrouwbare constructie moet elk bouwelement op luchtdichtheid worden getest met lekkagedetectie. Dan kan luchtdichtheidsklasse A voor de goedkeuring worden gebruikt. De volgende onderzoeken en de afgeleide geschiktheid voor gebruik hebben betrekking op thermische isolatie

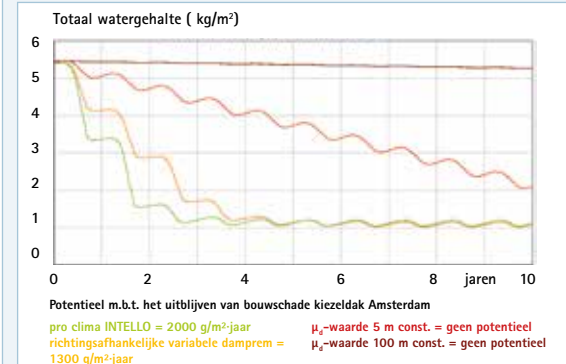
Berekening van het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade locatie Amsterdam, dak

Gegevens zie berekening Brussel pagina 18

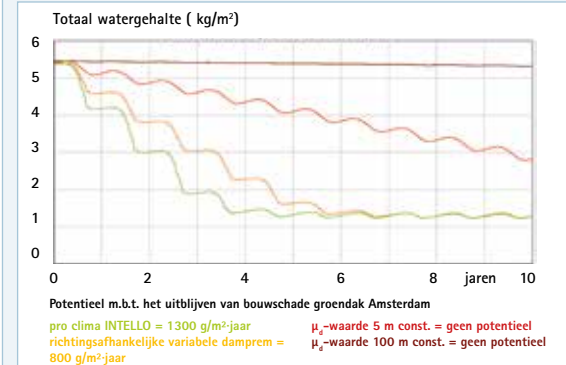
23. Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade schuin dak, noordzijde, 40° dakhelling



24. Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade kiezeldak

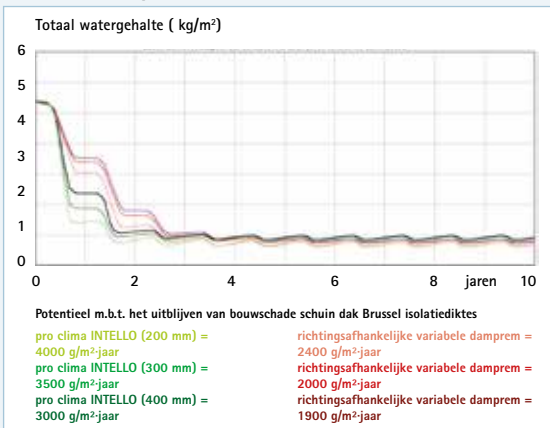


25. Potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade groendak



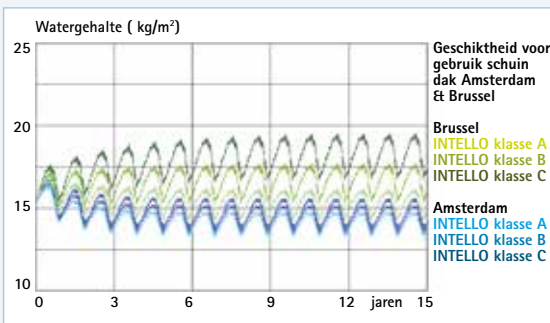


26. Potentieel met INTELLO en richtingsafhankelijke variabele damprem: verschillende isolatiediktes

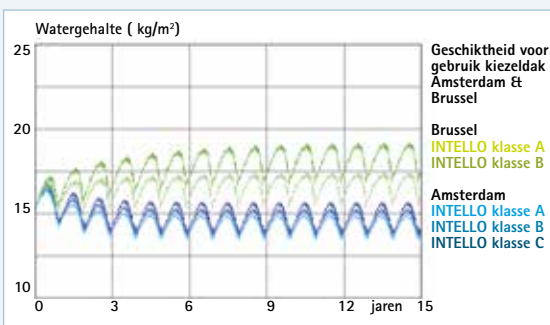


Bepalen van de geschiktheid voor gebruik voor bouwelementen conform afb. 11, p. 10

27. Geschiktheid voor gebruik van schuine dakconstructie (40°/200 mm minerale wol 035 / Brussel & Amsterdam)



28. Geschiktheid voor gebruik van kiezel dak (200 mm minerale wol 035 / Brussel & Amsterdam)



van minerale wol of steenwol WLG 035. Het bepalen van de randvoorwaarden voor de berekening en het beoordelen van de resultaten gebeurt conform de aanbevelingen van het WTA-Merkblatt 6-8 [20] voor de aspecten van de constructie (par. 6.4b).

Om bouwelementen te beschermen, kan het zinvol zijn om al tijdens de planningsfase een extra isolatielaag op de eerste afdichtingsfolie in te voegen. Ook wanneer deze bouwkundig gezien eigenlijk niet nodig is, biedt de laag o.a. het voordeel dat vocht bijv. door een lekkage in de buitenste afdichtingslaag niet in de houten constructie kan binnendringen. Deze wordt zo beschermd. Een regelmatige controle (onderhoud) van alle constructies wordt standaard aanbevolen.

3.3.2 Geschiktheid voor gebruik buiten diffusiedicht schuin dak

Voor het bij wijze van voorbeeld bepalen van de geschiktheid voor gebruik in Brussel en Amsterdam, werd de schuine dakconstructie in **afb. 11** met rode geëngobeerde dakpannen met INTELLO van pro clima bekeken. Hiervoor werd de constructie met INTELLO met een isolatielaagdikte van 200 mm minerale wol berekend. De berekeningen met WUFI pro werden uitgevoerd met toepassing van de drie luchtdichtheidsklassen en een hoogte van de geïsoleerde bouwschil van 5 m.

De zwakste laag in deze bouwelementen is het vuren dakbeschoot onder de afdichting. **Afb. 27** toont het vochtgehalte in het 24 mm dikke beschoot gemeten over een periode van 10 jaar. Om maximale betrouwbaarheid te bereiken, moet het vochtgehalte in het vuren beschoot onder de 20% liggen (bij houtderivaatplaten ligt de grens bij 18%). Het bouwelement is dan geschikt voor gebruik.

Berekeningen voor alle drie de luchtdichtheidsklassen tonen aan dat er met INTELLO op beide locaties geen verhoogde hoeveelheid vocht in het vuren beschoot aanwezig is – de geschiktheid voor gebruik is hiermee voor alle luchtdichtheidsklassen aangetoond. Sterker nog, er zijn nog extra reserves voor andere onvoorzien vochtbelastingen beschikbaar.

3.3.3 Geschiktheid voor gebruik plat kiezel dak

De kiezel dakconstructie werd net als de schuine dakconstructies met INTELLO voor de locaties Brussel en Amsterdam berekend. De minerale wol is 200 mm dik. Het vochtgehalte van het vuren beschoot ligt bij toepassing van INTELLO voor de locatie Brussel onder de maximaal toelaatbare waarde van 20% voor de luchtdichtheidsklassen A en B. Dit bevestigt de geschiktheid voor gebruik voor deze constructie (**zie afb. 28**). Als de luchtdichtheid van de gebouwschil niet wordt getest, wordt aanbevolen om de berekening voor luchtdichtheidsklasse C uit te voeren. Voor het kiezel dak in Brussel kan de geschiktheid voor gebruik dan alleen met een extra isolatielaag op de dragende constructie worden aangetoond – anders stijgt het vochtgehalte in het buitenste beschoot naar meer dan 20% rel. vochtigheid. Daadwerkelijk is het testen van de luchtdichtheid met het oog op de betrouwbaarheid van bouwelementen van voordeel. Voor het klimaat in Amsterdam kan de geschiktheid voor gebruik voor alle drie de luchtdichtheidsklassen worden aangetoond.

3.3.4 Geschiktheid voor gebruik plat groendak

Groendakconstructies kunnen met INTELLO en INTELLO PLUS voor het klimaat in Brussel en Amsterdam bij een isolatiedikte van 200 mm minerale wol WLG 035 conform **afb. 11** worden berekend (**zie afb. 29**). In Brussel liggen de resultaten voor alle drie de luchtdichtheidsklassen duidelijk onder de grens van 20% rel. vochtigheid in het beschoot. Voor de constructie in Amsterdam is het noodzakelijk dat deze op luchtdichtheid en lekkages wordt getest (luchtdichtheidsklasse A) om vochtintredingen door convectie te voorkomen. Het vochtgehalte van het houten beschoot stijgt in dit geval ook na 15 jaar nog licht. Vergelijkende berekeningen hebben aangetoond dat de rel. vochtigheid van het hout ook na 40 jaar de grens van 20% niet overschrijdt. De andere luchtdichtheidsklassen leiden in dit geval bij de berekening tot hogere convectieve vochtintredingen. Hierdoor stijgt de vochtigheid in het beschoot naar meer dan 20%. Om dit te voorkomen, kan



er een aanvullende isolatielaag op de kepers worden aangebracht.

3.3.5 Conclusies geschiktheid voor gebruik

De geschiktheid voor gebruik van aan de buitenzijde diffusiedichte schuine daken (40°), platte kiezeldaken of platte groendakconstructies met 200 mm dikke minerale wol WLG 035 en vuren beschot rekenkundig is voor de locaties Amsterdam en Brussel aangetoond. Bij afwijkende constructies (dikkere isolatielagen, houtderivaatplaten in plaats van beschot, sortie bevorderende isolatiematerialen in plaats van minerale wol) en andere locaties (steden/plaatsen, schaduwvorming) kan het om bouwkundige redenen noodzakelijk zijn om een extra isolatielaag met een tweede afdichtingslaag op de kepers aan te brengen. Bij alle volledig geïsoleerde daken draagt dit in principe bij aan de betrouwbaarheid van de bouwelementen, omdat de dubbele afdichting de dragende constructie beschermt tegen vochtintreding van buitenaf, wanneer er in de bovenste afdichtingslaag een lek ontstaat. Voor alle daken (bijv. foliedaken, kiezeldaken en groendaken) wordt bovendien aanbevolen om jaarlijks onderhoud (inspectie) te plegen om ervoor te zorgen dat de werking van de dakconstructie en alle afvoerpunten is gewaarborgd. Het is absoluut zinvol om de geschiktheid voor gebruik van een constructie met aan de buitenzijde diffusiedichte bouw-elementlagen door een bouwfysicus te laten testen. Neem voor het testen en berekenen van bouwelementen contact op met de technische hotline van pro clima.

3.4 Flankdiffusie

Om de invloed van vochtintreding via de flank van bouwelementen te kunnen bepalen, wordt de aansluiting van een verbindende binnenwand op een thermische isolatieconstructie beoordeeld. De constructie is aan de buitenzijde uitgevoerd met een diffusiedichte bitumenbaan (zie afb. 30).

Metselwerk heeft een geringere diffusie-weerstand dan de dampremmende en luchtdichte laag van de aangrenzende houtbouwconstructie. Daardoor vindt er via de flank een sterkere diffusie van

vocht in de thermische isolatieconstructie plaats dan in de aangrenzende lagen met damprem. Voor dit voorbeeld wordt een nieuwbouwsituatie gekozen. Het metselwerk en de pleisterlaag hebben dan een gangbaar vochtgehalte van 30 kg/m³. De vezelvormige thermische isolatie is droog ingebouwd. De relatieve houtvochtigheid van het dakbeschot ligt bij 15%. Als dampremmende en luchtdichte laag wordt bij een constructie een diffusieremmende PE-folie (μ_d -waarde 100 m) toegepast, bij een tweede constructie de vochtvariabele INTELLO van pro clima (μ_d -waarde 0,25 tot meer dan 25 m).

3.4.1 Resultaten van de 2-dimensionale simulatieberekening

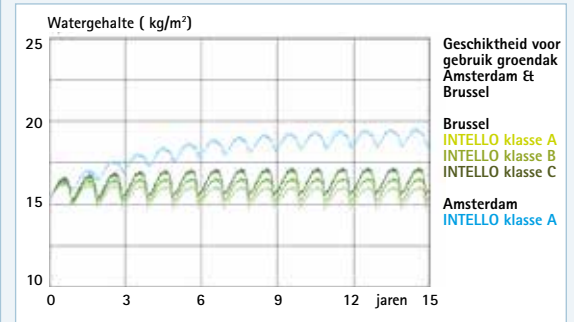
Wanneer een dergelijke constructie wordt berekend met de 2-dimensionale berekeningsmethode voor warmte- en vochtstromen, die in WUFI 2D [9] is geïmplementeerd, wordt het volgende resultaat bereikt (zie afb. 31): Na een seizoensgebonden toename van het vochtgehalte in beide constructies liggen beide op een ongeveer even hoog niveau. Bij de variant met de PE-folie als dampremmende en luchtdichte laag is binnen de beschouwde periode van 4 jaar ieder jaar een duidelijke toename van het totale vochtgehalte waarneembaar (rode grafiek). In deze constructie treedt accumulatie van vocht op in de gebruikte bouwmaterialen, aangezien geen terugdroging door de PE-folie richting binnenruimte mogelijk is. Het gevolg: schimmelvorming op het hout resp. beginnende houtrot.

Bij de constructie met de uiterst effectieve damprem INTELLO kan het aanwezige vocht naar binnen ontwijken. Het bouwelement is tegen vochtophoping beschermd – dit wordt snel aan de binnenruimte afgegeven (groene grafiek). Daardoor daalt het vochtgehalte binnen de observatieperiode gestaag. De constructies met INTELLO en INTELLO PLUS hebben een hoog potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade.

3.4.2 Conclusie bij flankdiffusie

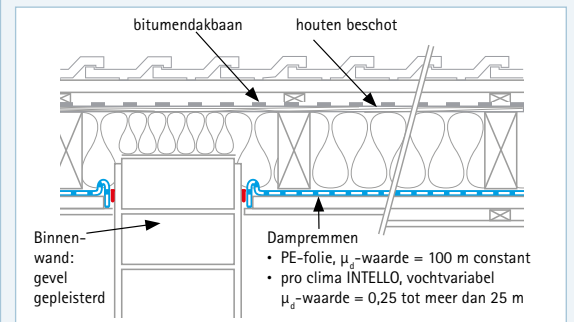
Vochtintreding door flankdiffusie bij een op de thermische isolatie aansluitende binnenwand, zoals door Ruhe [5], Klopfer [6], [7] en Künzel [8] beschreven, kan via

29. Geschiktheid voor gebruik van groendak (200 mm minerale wol 035 / Brussel & Amsterdam)

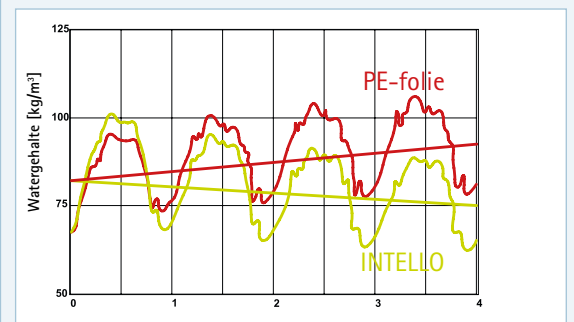


2-dimensionale berekening van de warmte- en vochtstromen met WUFI 2D

30. Constructieopbouw: verbindingwand



- 31. Vochttoename met PE-folie
- vochtophoping = bouwschade
- Vochtreducering met INTELLO
- Uitdroging = Geen bouwschade



Toenemend vochtgehalte in het bouwelement met PE-folie μ_d -waarde = 100 m constant

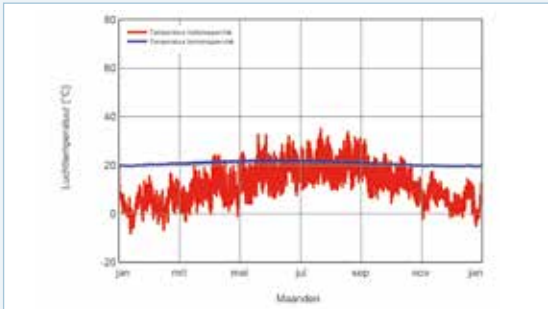
Afnemend vochtgehalte in het bouwelement met pro clima INTELLO μ_d -waarde = 0,25 tot meer dan 25 m vochtvariabel



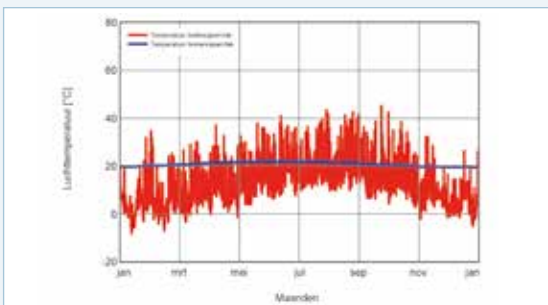
Temperatuurverloop Brussel en Amsterdam Wand, gepleisterde gevel licht

Brussel:

31. Wandtemperatuur noordzijde

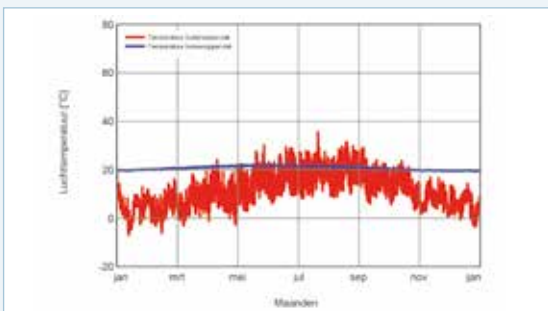


32. Wandtemperatuur zuidzijde

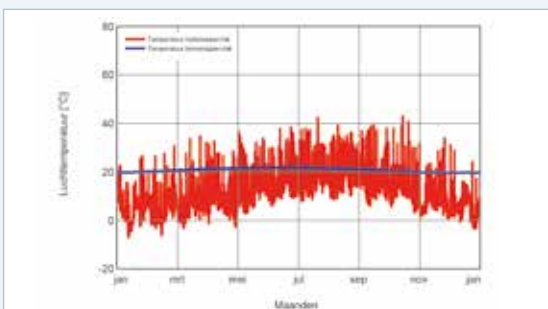


Amsterdam:

33. Wandtemperatuur noordzijde



34. Wandtemperatuur zuidzijde



INTELLO en INTELLO PLUS weer uit het bouwelement ontwijken. Bij constructies met een gering potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade moeten flankdiffusieprocessen constructief worden voorkomen.

3.4.3 Wandconstructies

Wandconstructies zijn door hun verticale plaatsing minder aan zonlicht blootgesteld dan daken. Het terugdrogingspotentieel is daardoor geringer. In tegenstelling tot daken zijn wanden in de regel niet diffusiedicht. Er worden geen bitumenbanen toegepast, omdat er anders dan bij platte daken en groendaken geen hoge eisen worden gesteld aan de waterdichtheid.

De temperaturen in de buitenwand hangen in essentie af van de gevelkleur. Op lichtgekleurde gevels worden door de instraling van de zon lagere temperaturen bereikt dan op donkere gevels. De getoonde temperatuurprofielen op de buitenwand treden op bij normale lichtgekleurde gepleisterde gevels (zie **afb. 32 t/m 35**).

De uiterst effectieve damprem INTELLO biedt ook bij wandconstructies een substantieel potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. Berekeningen met Delphin [14] bij voor Brussel en Amsterdam geldende klimaatomstandigheden voor een op het noorden liggende buitenwand met een diffusiedichte buitenbekleding tonen aan dat er bij toepassing van INTELLO en INTELLO PLUS nog steeds een voldoende grote betrouwbaarheidsmarge is.

Daarmee zijn INTELLO en INTELLO PLUS ook bij houtderivaatplaten als OSB- of spaanplaten aan de buitenzijde de ideale oplossing voor een groot potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. Het gevaar van schimmelvorming wordt aanmerkelijk gereduceerd.

Vochtwerende maatregelen moeten technisch worden berekend. Raadpleeg hiervoor een bouwkundige. Via de technische hotline van pro clima kan de beoordeling van bouwelementen worden aangevraagd.



Constructieaanbevelingen

4.1 Constructies

De bouwfysische onderzoeken met reële klimaatgegevens tonen het enorme potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade voor de constructies. Dit geldt zowel bij toepassing van de uiterst effectieve dampremmen INTELLO en INTELLO PLUS met hun uitzonderlijk hoge en in alle klimaatzones werkende vochtvariabele diffusieweerstand, als voor de al meer dan 25 jaar met succes ingezette vochtvariabele damprem DB+. Met de vochtvariabele dampremmen en luchtdichte folies van pro clima worden de constructies ook bij een verhoogde vochtbelasting uitstekend beschermd tegen bouwschade.

Bij de technisch berekening van vochtwerende maatregelen kan niet alleen rekening worden gehouden met de invloed van aan de buitenkant diffusiedichte materialen, maar ook met de impact van extra lagen bovenop de houten constructie, zoals beplanting en kiezels, en met schaduwvorming door gebouwen, topografie of fotovoltaïsche installaties. Neem voor een berekening contact op met een bouwfysicus of met de technische hotline van pro clima.

4.2 Bekleding binnenzijde

Een belangrijke voorwaarde voor de hoge veiligheidsreserves is een onbelemmerde uitdroging van de binnenruimte. Aan de binnenzijde van de vochtvariabele damprem aangebrachte bekledingen met een diffusieremmende werking, zoals houtderivaten (bijv. OSB- of multiplexplaten), reduceren de hoeveelheid vocht die kan uitdrogen en daardoor het potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade. Gunstig zijn materialen met een open structuur, bijv. betimmeringen van profielschroten, lichte houtwolplaten met pleister en gipsplaten. Constructies met diffusiedichte lagen aan de buitenzijde dienen uitsluitend met diffusieopen binnenbekledingen te worden gecombineerd. In dat geval zijn de bouwelementen maximaal tegen bouwschade beschermd.

4.3 Permanent vochtige ruimtes

Vochtvariabele dampremmen zijn niet geschikt voor toepassing in permanent

vochtige omgevingen, zoals zwembaden, kuurbaden, tuinderijen of bedrijfskeukens.

4.4 Nieuwbouw: uitdrogingsfase (60/2-regel)

Door naleving van de 60/2 regel worden thermische isolatieconstructies in nieuwbouw, waar binnen per definitie een verhoogde luchtvochtigheid heerst, effectief beschermd. INTELLO, INTELLO PLUS en DB+ van pro clima voldoen allemaal aan deze eis en leveren daardoor een belangrijke bijdrage aan het hoge potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van de bouwconstructie.

4.5 Vochtige ruimtes in woningen

Natte en vochtige ruimtes in woongebouwen hebben een tijdelijk verhoogde relatieve vochtigheid van 70%.

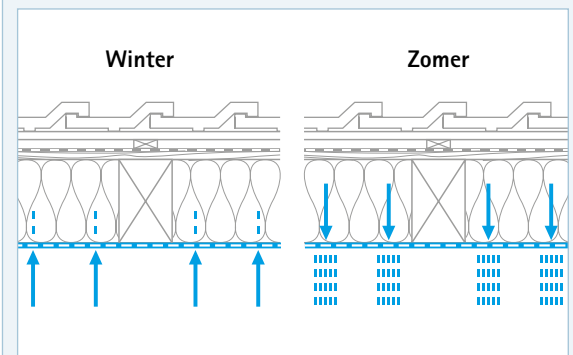
De vochtvariabele dampremmen INTELLO en INTELLO PLUS van pro clima bieden door naleving van de 60/2-regel - bij 70% luchtvochtigheid in de ruimte en 50% vochtigheid in de isolatielaag (60% gemiddelde vochtigheid) met een μ_d -waarde groter dan 5 m (DB+ > 2,5 m) - ook voor deze ruimtes een optimale bescherming. Hierdoor is de constructie ook bij nieuwbouwvocht als gevolg van de constructie of door bewoning voldoende tegen vochtintrede vanuit de binnenlucht en dus ook tegen schimmelvorming beschermd (zie afb. 36).

4.6 Bouwfase: Hydrosafe-waarde (70/1,5-regel)

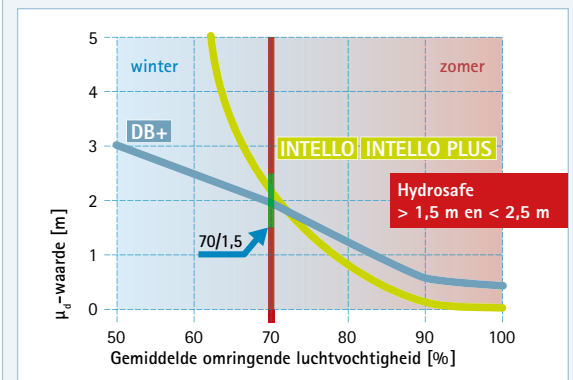
Tijdens de bouwperiode, wanneer er een verhoogde luchtvochtigheid optreedt, is het heel erg belangrijk dat vochtvariabele dampremmen een voldoende hoge Hydrosafe-waarde hebben. INTELLO, INTELLO PLUS en DB+ van pro clima hebben een hydrosafe-waarde van meer dan 2,0 m en beschermen constructies uitstekend tegen vochtbelasting tijdens de bouwperiode (zie afb. 36). Daardoor zijn constructies met vochtvariabele damprembanen ook gedurende de bouwperiode goed beschermd tegen schimmelvorming. Vocht tijdens de bouw dient snel en consequent door middel van permanente ventilatie te worden afgevoerd. Bouwdrogers zijn een goed middel om de vochtbe-

Voorwaarde voor de werking van vochtvariabele dampremmen

35. Aan de binnenzijde mogen zich alleen diffusieopen lagen bevinden om uitdroging van vocht door teruggediffusie naar de binnenruimte niet te blokkeren.



36. Bescherming van de thermische isolatie in nieuwbouw en tijdens de bouwperiode



De μ_d -waarde van de banen stelt zich in op de verschillende vochtigheid van omgevingen. Een hydrosafe-waarde tussen 1,5 en 2,5 m beschermt de constructie tegen een verhoogde relatieve luchtvochtigheid tijdens de bouwperiode. Tegelijkertijd garandeert deze een hoog potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade van volledig geïsoleerde houtbouwconstructies.



37. Bescherming van de thermische isolatie in nieuwbouw en tijdens de bouwperiode



pro clima WINCON

38. 37 Bepalen van het luchtverversingsdebiet (n_{50} -waarde)



BlowerDoor

lastig te verminderen. Het reduceren van het vochtgehalte van vochtig ingebouwde materialen (metselwerk, pleister, dekvloer, beton etc.) is niet in de laatste plaats van belang, omdat zo bij nieuwbouw schimmel wordt voorkomen.

4.7 Onderdak

Voor onderdaken kan het best worden gekozen voor diffusieopen materialen (bijv. houtvezelonderdakplaten of SOLITEX onderdak- resp. onderspanfolie met porievrij membraan), waarbij vocht goed naar buiten kan opdrogen. Constructies met diffusiedichte buitenelementen, bijv. bitumenbanen, platte daken, groendaken en daken met een metalen dakbedekking, reduceren de bouwfysische betrouwbaarheid van de constructie. Volledig houten betimmeringen bieden hogere betrouwbaarheidsmarges dan houtderivaatplaten (bijv. OSB), omdat hout een vochtvariabele diffusieweerstand heeft en capillair geleidend is. INTELLO en INTELLO PLUS bieden door de grote vochtvariabiliteit een zeer hoge betrouwbaarheid.

4.8 Schuine dakconstructies

In schuine daken met diffusieopen constructies aan de buitenzijde zijn zeer hoge uitdrogingsreserves aanwezig, zodat INTELLO, INTELLO PLUS en DB+ van pro clima zonder meer kunnen worden aanbevolen. Voor aan de buitenzijde diffusiedichte schuine dakconstructies neemt u contact op met een bouwfysicus of de technische hotline van pro clima.

4.9 Platte dak- en groendakconstructies

Platte daken hebben aan de buitenzijde altijd een afdichtingsfolie die bescherming biedt tegen water. Deze hebben minimaal een diffusieweerstand vergelijkbaar met die van een sterke damprem, maar kunnen ook volledig dampdicht zijn (μ_a -waarde > 1500 m), bijvoorbeeld bij een bitumenbaan met aluminium. In ieder geval beperken ze de uitdrogingscapaciteit naar buiten tot een minimum. Geventileerde constructies zijn mogelijk, wanneer er rekening wordt gehouden met de hoogtes en lengtes van de ventilatieopeningen en wanneer er een minimale doorsnede van de toevoer- en afvoeropeningen wordt

gewaarborgd (zie bijv. DIN 4108-3 en DIN 68800-2). Daarnaast is het van belang dat de twee openingen elkaar kunnen »zien«, zodat de lucht ongehinderd kan stromen. Ventilatie door een labyrint werkt meestal niet en is daardoor schadelijk voor de constructie. Een dergelijke maatregel wekt ten onrechte de indruk dat de constructie goed wordt geventileerd. Ventilatie ruimtes verhogen overigens de doorsnede van de constructie en dat kan een grote invloed op de architectuur van een gebouw hebben. Doorsnedes van ventilatieopeningen moeten nauwkeurig worden gepland. Daarnaast moet worden gewaarborgd dat de ventilatie werkt. Niet of slecht geventileerde ruimtes boven de geïsoleerde platte dakconstructie kunnen bouwschade veroorzaken. Niet-geventileerde platte daken kunnen efficiënt en betrouwbaar met INTELLO en INTELLO PLUS worden gerealiseerd. Ook kunnen ze met een extra laag bovenop de afdichting worden gepland en gerealiseerd, bijvoorbeeld met kiezels, plantensubstraat of terrasbekleding. De uiterst effectieve dampremmen INTELLO en INTELLO PLUS bieden door hun vochtvariabele diffusieweerstand een zeer goede bescherming tegen bouwschade bij onvoorziene vochtbelasting. Vocht kan in grote hoeveelheden uit constructies drogen, zonder dat er schadelijke vochtophopingen ontstaan. Neem voor het berekenen van vochtwerende maatregelen contact op met een bouwfysicus of met de technische hotline van pro clima.

4.10 Wanden

Houtskeletwanden met diffusieopen lagen aan de buitenkant (bijv. pro clima SOLITEX FRONTA WA, houtvezelplaten of MDF-platen) achter open gevels kunnen met DB+, INTELLO en INTELLO PLUS probleemloos worden gerealiseerd. De vochtvariabele dampremmen kunnen eveneens worden gebruikt voor houtskeletwanden met gevelisolatie van isolatieschuim of voor de binnenisolatie van gemetselde of betonnen constructies. Neem voor een hygrische beoordeling contact op met een bouwfysicus of met de technische hotline van pro clima.



4.11 Kwaliteitsborging

De luchtdichtheid van een constructie wordt in het ideale geval direct na het realiseren van de luchtdichte laag getest. Middels een lekkagedetectie kunnen gebreken eenvoudig worden opgespoord en verholpen. Constructies worden zo bijzonder betrouwbaar. De test kan

bijvoorbeeld worden uitgevoerd met een WINCON van pro clima (afb. 37). Deze testventilator heeft een zeer groot vermogen en kan daardoor ook tijdens de bouwperiode in voorlopig afgedichte gebouwen (deuren, ramen etc.) een onderdruk genereren. Alternatief kan tijdens de bouw de kwaliteit ook worden gewaarborgd met een blowerdoortest

(afb. 38). De definitieve metingen en het bepalen van de n_{50} -waarde gebeurt dan na het voltooiën van het gebouw met de blowerdoortest. Een luchtdichte ruimte is essentieel voor een behaaglijk binnenklimaat, een gering energieverlies en een goede bescherming tegen schade door binnendringend vocht als gevolg van convectie.

5. Conclusie



Constructies met DB+ en INTELLO resp. INTELLO PLUS hebben afhankelijk van de plaats van aanbrengen en de constructie enorme veiligheidsreserves en zorgen via intelligent vochtmanagement voor een effectieve preventie van bouwschade en schimmelvorming. Zelfs bij onvoorziene of in de bouwpraktijk niet te vermijden vochtbelasting hebben de constructies dankzij hun hoge uitdrogingsreserves door de vochtvariabele diffusieweerstanden een zeer hoog potentieel m.b.t. het uitblijven van bouwschade.

De uiterst effectieve dampremmen INTELLO en INTELLO PLUS onderscheiden zich door een bijzonder effectieve, in alle klimaatzones werkende variabiliteit van de diffusieweerstand en zorgen zo bij thermische isolatieconstructies voor een zeer hoge bescherming - zowel bij aan de buitenzijde diffusieopen als bij bouwfysisch veeleisende constructies, zoals platte daken, groendaken, metalen dakbedekkingen en daken met diffusiedichte eerste afdekkingen. De werking van INTELLO, INTELLO PLUS en DB+ tijdens de bouwperiode wordt aangetoond door een hoge bescherming tegen bouwvocht. Conform de eisen van DIN 68800-2 hoeft er bij de toepassing van vochtvariabele dampremmen geen chemisch houtbeschermingsmiddel meer te worden gebruikt. De omvangrijke, transparante en schappelijke systeemgarantie van pro clima biedt extra zekerheid.

»Hoe hoger de uitdrogingsreserve van een constructie, hoe hoger de onvoorziene vochtbelasting kan zijn terwijl de constructie desondanks schadevrij blijft.«

De intelligente werking van INTELLO, INTELLO PLUS en DB+ ondersteunt deze vuistregel en zorgt voor bijzonder betrouwbare constructies.

Meer informatie over de verwerking en constructiebijzonderheden vindt u in de pro clima ontwerpdocumentatie. Bij afwijkende randvoorwaarden bereikt u ons op: Technische Hotline +49 (0) 62 02 – 27 82.45.

Meer informatie vindt u in onze actuele brochure:

»Renovatiestudie«

