

Vocht in gebouwen



Historische gevel in IJsland. Omdat er nauwelijks hout is, en importeren duur werden stalen golfplaten gebruikt als gevelbekleding. Vochttechnisch gezien een vreemde keuze, vooral in het IJslandse klimaat.

Foto: M.J. van der Laan

Inhoud	
1 Inleiding	3
2 Leeswijzer	3
DEEL A: BASIS	4
3 Vochthuishouding	5
4 Vochtige lucht: grootheden en eenheden	5
DEEL B: VOCHT IN EEN RUIMTE	
5 Vochtbalans	7
6 Klimaatklassen	10
7 Vochtbalans in de praktijk	10
DEEL C: OPPERVLAKTECONDENSATIE	
8 Oppervlaktecondensatie	11
9 De vochtbalans onder invloed van oppervlakte condensatie	12
10 Schimmelgroei	14
DEEL D: INWENDIGE CONDENSATIE	16
11 Inleiding	17
12 Vochttransport in bouwmaterialen in vloeibare vorm	17
13 Diffusie van waterdamp door bouwmaterialen	18
14 Uitgangspunten	18
15 Damptransport	19
16 Dampspanningsverloop	23
17 Methode van Glaser*	24
18 Beoordeling hoeveelheid condensaat*	30
19 Opmerkingen en beperkingen van de methode*	32
20 Voorbeelden*	34
21 Aangepaste zomer/winter berekening	44
22 Literatuur	46
23 Dampspanningstabel	47
Bijlage: Artikel Bouwwereld	50

1 Inleiding

In de levensduur van een gebouw vindt steeds onderhoud plaats. Ook worden bij renovatie of verbouwing aanpassingen aan de gebouwschil gedaan. Hierdoor kunnen de (bouw)fysische prestaties van die gebouwschil veranderen, in positieve of in negatieve zin! Soms leidt het oplossen van een bouwtechnisch probleem, zonder voldoende inzicht in de integraliteit, tot nieuwe problemen.

Toen bij een renovatie van jaren '70 rijtjeswoningen, de kozijnen werden vervangen en HR++ glas werd geplaatst ontstond er na verloop van tijd schimmel op de gevels. Het koudste binnenoppervlak was verplaatst van het (enkel) glas naar de ongeïsoleerde gevel. De kierdichting was verbeterd door de nieuwe kozijnen, en er waren geen nieuwe ventilatievoorzieningen getroffen.



Bron: Hollandsontwerp.nl

In de vergaderzaal van het kantoor van een bouwbedrijf werd een verlaagd plafond met daarboven minerale wol aangebracht om de akoestiek in het zaaltje te verbeteren. Daardoor ontstond inwendige condensatie in het platte dak van de vergaderzaal. Door het toegevoegde isolatiemateriaal werd de dakconstructie kouder.



Bron: bouwbiologie.wordpress.com

Uit deze voorbeelden blijkt al dat bouwtechnische en bouwtechnische basiskennis hard nodig is bij onderhoud en renovatie van gebouwen. Vochtproblemen komen veel voor: bijna 15% van de woningen in Nederland heeft ermee te maken.

Dit dictaat is gebaseerd op eerdere dictaten geschreven door ir. Aart Schuur (HU en TU Delft)

2 Leeswijzer

In dit dictaat vind je alle **basiskennis** op het gebied van vocht in gebouwen. Behalve dat wat in "Bouwtechnica" van Van der Linden al beschreven wordt. Er wordt daarom steeds verwezen naar de paragrafen in Van der Linden. Je kan daarom dit dictaat goed gebruiken om te studeren. Waar nodig wordt je vanzelf naar Van der Linden gestuurd. Daarnaast biedt dit dictaat als verdieping een aantal artikelen waarin vochtproblemen in de **bouwpraktijk** worden behandeld. Je ziet dan de toepassing van de theorie in de praktijk.

3 Vochthuishouding

Vochtproblemen van de gebouwschil (gevels, vloeren en daken) kunnen niet los gezien worden van de vochthuishouding in het gebouw. Het is daarom verstandig het vochttechnisch (of **hygrisch**) binnenklimaat te bekijken. De vochthuishouding van een woning wordt bepaald door de vochtproductie in de woningen, en de afvoer van het “geproduceerde” vocht. In de volgende paragrafen leren we hoe de vochtconcentratie of de relatieve luchtvochtigheid van de binnenlucht door het opstellen van een **vochtbalans** bepaald kan worden.

4 Vochtige lucht: grootheden en eenheden

➔ Lees eerst paragraaf 2.1 van Van der Linden. Hier leer je de basis grootheden dampspanning p , dampconcentratie c , relatieve vochtigheid ϕ en de verbanden tussen deze grootheden.

Hier alleen een kort overzicht van vochttechnische grootheden en eenheden.

1. Absolute luchtvochtigheid → om mee te rekenen



- Partiële dampspanning p [N/m²]
Wordt gebruikt bij het rekenen aan waterdampdiffusie door constructies.

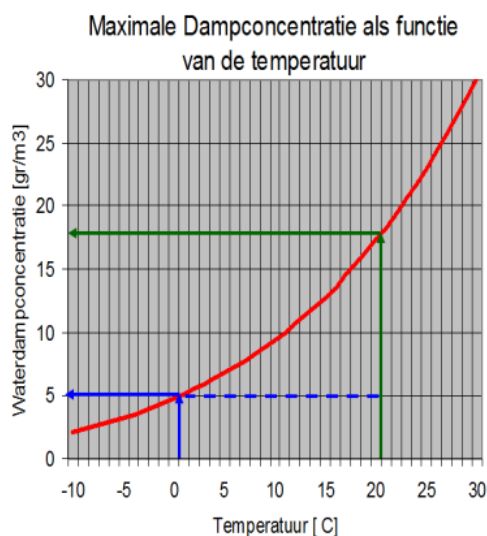
- Vochtconcentratie c [g/m³]
Wordt gebruikt bij het rekenen aan de vochtbalans van de ruimtelucht.

2. Relatieve luchtvochtigheid → effect van vocht

$$\phi = p/p_{\max} \text{ of } c/c_{\max}$$

Tabel 1 De effecten van de relatieve luchtvochtigheid

RV	Effect
100 %	Condensatie
> 80%	Schimmelgroei
30-70%	Comfort
45-60%	Museumcondities
<40%	Statische elektriciteit
<20%	Uitdrogen slijmvliezen
<10%	Vliegtuig (10km hoog)

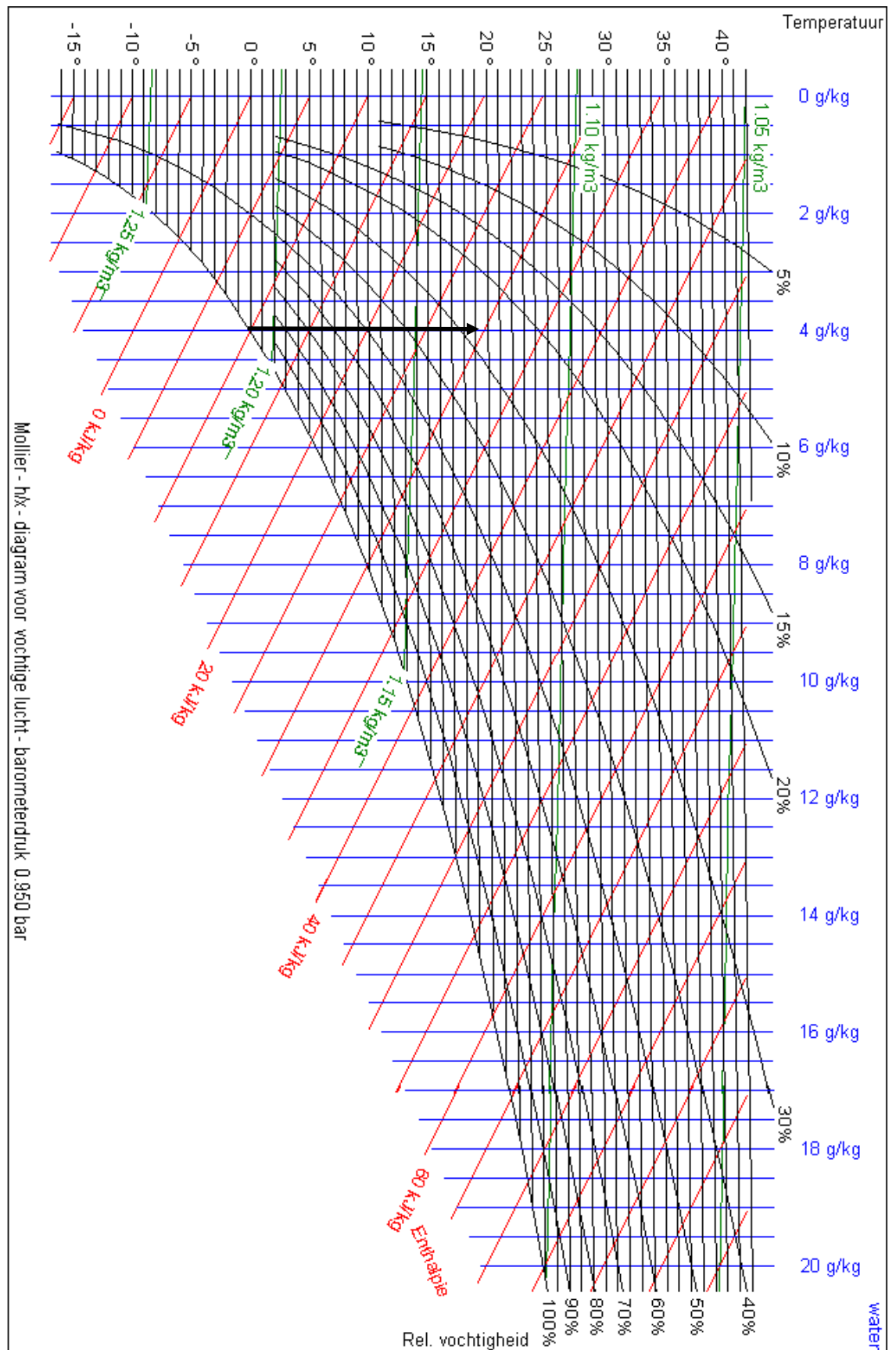


De hoeveelheid waterdamp die lucht kan bevatten is niet onbeperkt. De maximale hoeveelheid waterdamp per m³ lucht hangt af van de temperatuur. In de figuur hiernaast is dat goed te zien. Bestudeer het voorbeeld goed.

Dit zelfde verband tussen temperatuur en waterdamp in de lucht zie je in het Mollierdiagram (gekanteld ten opzichte van de figuur hiernaast). Het Mollierdiagram bevat meer informatie en kan worden gebruikt om de eigenschappen van vochtige lucht bij verschillende

omstandigheden te bepalen. Zo wordt bijvoorbeeld het effect van het stijgen van de temperatuur op de relatieve lucht-vochtigheid zichtbaar.

Zwarte pijl: lucht van 0°C en 100% RV wordt opgewarmd tot 20°C. De Relatieve vochtigheid van de lucht daalt dan naar minder dan 30%. Dit is wat er 's winters gebeurt bij het ventileren van woningen met koude buitenlucht.



5 Vochtbalans

Om te zorgen voor een comfortabel en gezond binnenklimaat is een bepaalde hoeveelheid ventilatie nodig. Doordat de **luchtdichtheid** van woningen veel beter is dan in het verleden ontstaat die ventilatie niet meer vanzelf. Bewoners van nieuwere of gerenoveerde woningen moeten leren om bewust te ventileren. Want als de hoeveelheid vocht die in een woning vrijkomt gelijk blijft, dan zal



<http://home.deds.nl/~gembouw/onderwerpen/isolatie.html>

- In vochtige woningen meer luchtwegklachten.
- Allergenen: schimmels en mijten
- Schimmelgroei: bij langdurige RV > 80%
- 3% van bevolking allergisch voor schimmelsporen
- Vochtproductie in woningen 10-12 l (kg) per dag!
- Ventilatie !

bij een verbeterde luchtdichtheid van de gebouwschil de luchtvochtigheid binnen toenemen. Een vochtbalans werkt net zoals een warmtebalans. Aan één kant van de vergelijking staat de toevoer van vocht (vochtproductie), aan de andere kant staat de afvoer van vocht. In een **stationaire** situatie moeten die twee met elkaar in balans zijn. Als dat niet zo is wordt de binnenlucht steeds vochtiger, of steeds droger. De vochtbalans (stationair) van de binnenlucht ziet er zo uit:

Vochtproductie = Vochtafvoer

We gaan deze vochtbalans uitwerken tot een bruikbaar hulpmiddel bij het beoordelen van het hygrisch

binnenklimaat van een woning of gebouw. Het afvoeren van vocht uit de binnenlucht kan op drie manieren:

$$\text{Vochtproductie} = \text{vochtafvoer door ventilatie} + \text{vochtafvoer door diffusie door de gebouwschil} + \text{vochtafvoer door condensatie}$$

Maar lees deel B van dit dictaat om te zien waarom dit toch schade kan veroorzaken!

In hfdst 9 leer je over situaties waarbij oppervlakte condensatie wel belangrijk is voor de vochtbalans.

In de praktijk is vooral het afvoeren van vocht door **ventilatie** belangrijk. Vochttransport door de gebouwschil is meestal verwaarloosbaar, althans voor de vochtbalans van de *binnenlucht*. Het is dus ook niet zo dat de gebouwschil moet kunnen “ademen” zoals wel wordt gezegd. In de praktijk zijn alleen de eerste paar millimeter van de schil van invloed op de vochtthuishouding *in* de woning. De pleisterlaag bijvoorbeeld. Dat betekent overigens niet dat dit vochttransport op den duur geen problemen kan veroorzaken in de gebouwschil. Meer hierover in deel B “Inwendige Condensatie”. Door condensatie, bijvoorbeeld op glas, “verdwijnt” er waterdamp uit de binnenlucht. Dat kan dus gezien worden als het afvoeren van vocht. Dit komt in hoofdstuk 8 en 9 ter sprake.

In veel situaties vindt het afvoeren van vocht dus vooral door ventileren plaats. In formulevorm wordt dat:

$$G = n \cdot V \cdot (C_i - C_e) \quad [\text{g/h}] \quad (1)$$

Met: G = de vochtproductie in g/h

n = ventilatievoud 1/h

V = volume van de ruimte m^3

$n \cdot V$ = de ventilatiehoeveelheid in m^3/h

C_i = de vochtconcentratie van de binnenlucht in g/m^3

C_e = de vochtconcentratie van de lucht buiten in g/m^3

Dezelfde formule anders geschreven maakt het mogelijk om de vochtconcentratie in de binnenlucht uit te rekenen:

$$C_i = G/nV + C_e \quad [\text{g}/\text{m}^3] \quad (2)$$

Probeer deze twee vergelijkingen zelf in elkaar om te schrijven!

Simpel voorbeeld: In een lokaal van een middelbare school zijn 25 leerlingen aanwezig. Gemiddeld produceren ze 50 g/h aan waterdamp (ademhaling en zweetverdamping). Zoals in veel scholen is de ventilatie van het lokaal beperkt. Het ventilatievoud bedraagt ongeveer 2 [1/h]. De afmetingen van het lokaal zijn 7,15 x 7 x 3 m^3 . De vochtconcentratie van de buitenlucht (ventilatie) is 7,28 g/m^3 . De temperatuur in het lokaal is 22°C.



Uitwerking:

$V = 150 \text{ m}^3$, $n = 2 \text{ h}^{-1} \rightarrow$ ventilatiehoeveelheid is $nV = 300 \text{ m}^3/\text{h}$

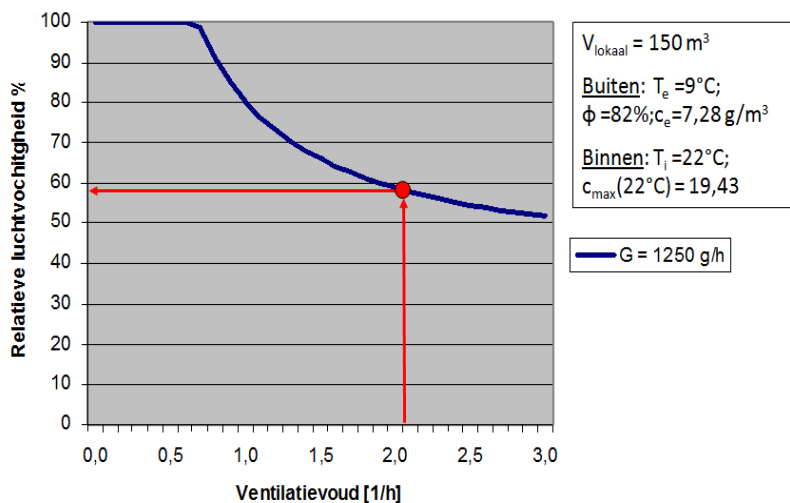
$G = 25 \times 50 = 1250 \text{ g/h}$

$C_i = 1250/300 + 7,28 = 11,4 \text{ g}/\text{m}^3$

Bij een temperatuur van 22°C kan lucht maximaal 19,43 g/m^3 waterdamp bevatten. De relatieve luchtvochtigheid wordt dus $\varphi = 11,4 / 19,4 \cdot 100\% = 59\%$

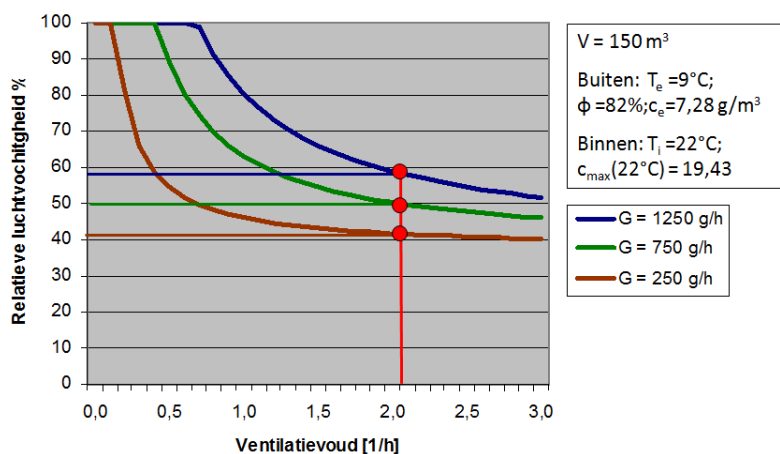
Vochtbronnen G	
Mensen - lichte activiteit	20 - 60 g/h
Keuken tijdens het koken	600 - 1500 g/h
Douchen	2600 g/h
Kamerplanten	10 g/h per stuk
Was drogen	50 - 200 g/h
Wateroppervlak (verdamping)	~40 g/h per m^2

Relatieve luchtvochtigheid lokaal als functie van productie G [g/h] en ventilatievoud n [1/h]



In de grafiek is de vochtbalans van het rekenvoorbeeld op de vorige bladzijde grafisch weergegeven. Met de rode lijnen/stip is de situatie in het lokaal aangegeven. Verder zie je aan de blauwe lijn wat er gebeurt met de RV in het lokaal als het ventilatievoud verandert. Minder ventilatie betekent dat de RV in het lokaal stijgt, omdat het geproduceerde vocht in mindere mate wordt afgevoerd. Als het ventilatievoud lager wordt dan 0,6 stijgt de RV tot 100%: de lucht is verzadigd met waterdamp.

Relatieve luchtvochtigheid als functie van productie G en ventilatievoud n



De tweede grafiek (hiernaast) laat zien wat er gebeurt met de luchtvochtigheid in het lokaal als het aantal leerlingen ook varieert (25, 15 of 5 leerlingen). De overige omstandigheden blijven constant.

Er vallen drie dingen op:

- Logischerwijs heeft de bezettingsgraad en de mate van ventilatie grote invloed op de RV.
- Als de ventilatie terugloopt kom je in een steeds steiler verlopend deel van de

grafiek terecht: ieder verandering heeft dan grote gevolgen. Omdat de relatieve luchtvochtigheid sterk toeneemt, wordt de kans op vochtproblemen groter. Deze situatie is niet denkbeeldig: in scholen met natuurlijke ventilatie, worden vanwege tochtklachten, alle ventilatie-roosters of klepraampjes in de winter vaak gesloten. Ook in woningen kan dit gebeuren. Bij nieuwe of gerenoveerde woningen met een goede luchtdichtheid, is de invloed van bewoners erg groot. Over het goed gebruiken van de ventilatievoorzieningen wordt vaak weinig informatie gegeven. Bovendien is er veel variatie in de hoeveelheid waterdamp die in een woning vrij komt.

- Als er juist véél wordt geventileerd loopt de lijn steeds vlakker. Nog meer ventileren heeft dan weinig invloed meer op de RV. Ook de bezetting van het lokaal is minder van invloed op de relatieve luchtvochtigheid die in het lokaal ontstaat. Veel ventileren heeft wel gevolgen voor het energieverbruik!

6 Klimaatklassen

Bij het hygrisch (vochttechnisch) beoordelen van de gebouwschil is het belangrijk om te rekenen met goede waarden voor de luchtvochtigheid binnen en buiten. Het is logisch dat de luchtvochtigheid in een gebouw afhangt van de functie van het gebouw. Er zijn een aantal "klimaatklassen" vast gesteld die gebruikt kunnen worden bij de berekeningen. In de tabel wordt aangegeven voor welk gebouwtype de verschillende klimaatklassen zijn bedoeld. De gegeven waarden voor de dampspanning kunnen gebruikt worden voor de luchtvochtigheid binnen. Deze waarden zijn jaargemiddelden.

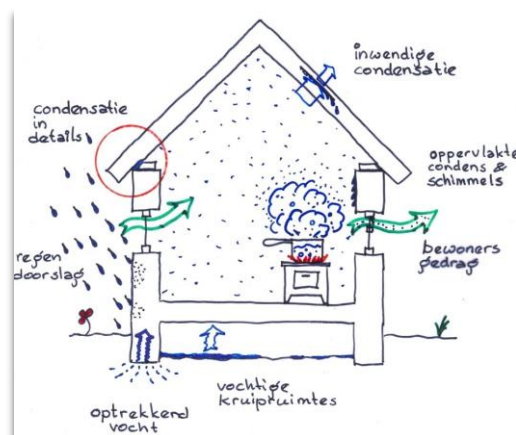
Klimaatklassen

$P_{a,gem} = 1030 - 1080 \text{ N/m}^2$	Klimaatklasse I Gebouwen met geringe vochtproductie (Schuur, garage, loods)
$P_{i,min,gem} = 1080 - 1320 \text{ N/m}^2$	Klimaatklasse II Gebouwen met enige vochtproductie (Woningen, kantoren, winkels)
$P_{i,max,gem} = 1320 - 1430 \text{ N/m}^2$	Klimaatklasse III Gebouwen met hogere vochtproductie (Woningen, scholen, gebouwen m. luchtbevochtiging)
$P_{s,d} \geq 1430 \text{ N/m}^2$	Klimaatklasse IV Gebouwen met hoge vochtproductie (Zwembaden, wasserijen)

LET OP: Hoewel de klimaatklassen ook in de praktijk nog wel gebruikt worden, is de geldigheid ervan lang niet zeker. Er is veel veranderd, zowel in de woningbouw en de gebouwinstallaties (ventilatiesystemen), maar ook in het bewonersgedrag (betere badkamers, gebruik wasdroger enz).

7 Vochtbalans in de praktijk

- In een woning met een (te) hoge vochtproductie en (te) weinig ventilatie kan oppervlakte condensatie ontstaan op koude binnenoppervlakken, zoals enkel glas of koudebruggen.
- Vochtproblemen worden versterkt als er nog andere vochtbronnen zijn, zoals een vochtige kruipruimte of de aanwezigheid van bouwvocht.
- Bij mechanische afzuiging, maar onvoldoende luchttoevoer via de gevels (ventilatioeroosters dicht) kan door onderdruk in de woning vochtige lucht uit de kruipruimte worden aangezogen.
- Juist bij een combinatie van ongunstige omstandigheden ontstaan ernstige vochtproblemen!
- In zeer goed geïsoleerde nieuwe woningen is het risico op oppervlaktecondensatie klein. In de winter kan het beperken van de hoeveelheid ventilatie ervoor zorgen dat de binnenlucht niet te "droog" wordt, en dat het energieverbruik wordt beperkt. Maar er blijft altijd ventilatie nodig om de luchtkwaliteit in huis goed te houden.



Uit deze opsomming blijkt hoe belangrijk kwaliteit is: een goed functionerend ventilatiesysteem, voorlichting aan bewoners, een luchtdichte begane grondvloer, en het vermijden van koudebruggen (ook tijdens de bouwuitvoering).

8 Oppervlakte condensatie



→ Lees eerst paragraaf 2.3 uit “Bouwfysica” van Van der Linden. Daarna dit hoofdstuk.

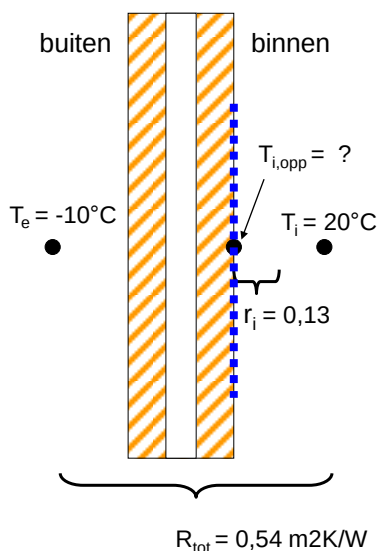
Rekenvoorbeeld: In een oudere woning werden aangetaste kozijnen vervangen door kunststof kozijnen en het enkel glas door HR++ glas, maar de gevel zelf niet werd geïsoleerd. Na de renovatie is de ongeïsoleerde gevel het koudste binnenoppervlak. In plaats van condensatie op enkel glas ontstaat

er nu condensatie op de binnenkant van de gevel. Dit zal als het vaak voorkomt leiden tot schimmelgroei. Het comfort in de woning is verbeterd, en het energieverbruik gaat omlaag, maar de schimmel kan voor nieuwe problemen zorgen.

In het rekenvoorbeeld hieronder bepalen we de temperatuur aan de binnenkant van de ongeïsoleerde gevel. We onderzoeken bij welke luchtvochtigheid er problemen ontstaan.

TIP: Probeer dit zelf na te rekenen. Het is een goede oefening voor het tentamen.

Controle oppervlakte-condensatie



$$1) \Delta T_{i-opp} = \Delta T_{tot} * \frac{\Delta r_{i-opp}}{R_{tot}}$$

$$\Delta T_{i-opp} = 30 * \frac{0,13}{0,54} = 7,2$$

$$T_{i,opp} = 20 - \Delta T_{i-opp} = 20 - 7,2 = 12,8 \text{ °C}$$

$$2) C_{opp,max(bij 12,8^\circ\text{C})} = 11,2 \text{ g/m}^3 \text{ (tabel)}$$

$$3) C_{i,max(20^\circ\text{C})} = 17,28 \text{ g/m}^3$$

$$4) C_i > C_{i,opp,max} \rightarrow \text{condens!}$$

$$5) \text{ Of als } \phi \geq 11,2/17,28 = 65\% \rightarrow \text{condens!}$$

9 De vochtbalans onder invloed van oppervlakte condensatie

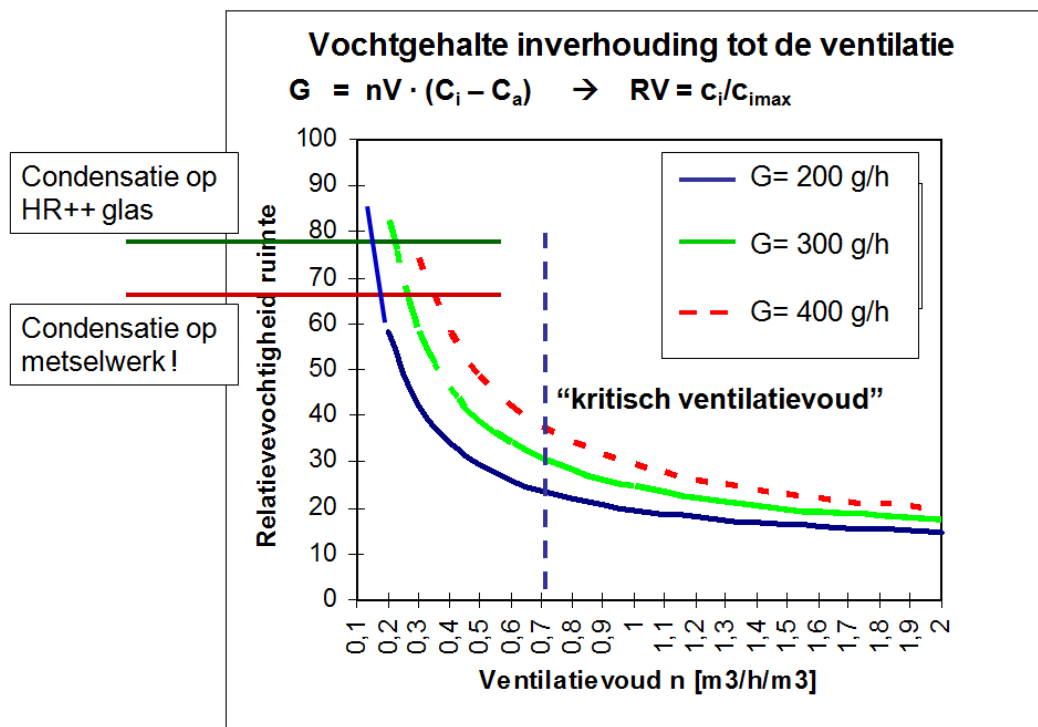
Na de eenvoudige vochtbalans (hoofdstuk 5), en het kunnen berekenen of oppervlakte condensatie optreedt (hoofdstuk 8) gaan we nu deze twee verschijnselen combineren. We gaan weer uit van de vochtbalans:

$$\text{Vochtproductie} = \text{vochtafvoer door ventilatie} + \text{vochtafvoer door diffusie} + \text{vochtafvoer door} \\ \text{door de gebouwschil} \quad \text{condensatie}$$

Als we het totale damptransport door dampdiffusie door de gebouwschil bij elkaar optellen, en het vergelijken met de vochtproductie in een woning dan blijkt: de afvoer van waterdamp door diffusie door gevels, vloeren en daken bedraagt circa 5% van de totale vochtproductie. We blijven daarom deze vorm van “vochtafvoer uit de woning” verwaarlozen.

Hoewel de vochtafvoer door ventilatie het belangrijkste blijft zijn er situaties waarin oppervlakte condensatie optreedt in zulke mate dat het de vochtbalans merkbaar beïnvloed. Het is deze situatie die we nu gaan bekijken:

De vochthuishouding van een gedeeltelijk gerenoveerde woning wordt beschreven met de grafiek hieronder. Het bewonersgedrag kan flink verschillen, dat is te zien aan de vochtproductie die hier varieert van gemiddeld 200 tot 400 g/h. De ventilatie is afhankelijk van de voorzieningen die zijn aangebracht, de wind en van het bewonersgedrag. Hierin is een zeer grote variatie mogelijk.



We bekijken de woning in een vorstperiode in de winter. De omstandigheden (randvoorwaarden) zijn: $T_i = 20^\circ\text{C}$ en $T_e = -10^\circ\text{C}$. De $R_c = 0,54 \text{ m}^2\text{K/W}$ (ongeïsoleerde gevel). Met deze gegevens kan de oppervlaktetemperatuur aan de binnenzijde berekend worden:

$T_{i,\text{opp ongeïsoleerde gevel}} = 12,8^\circ\text{C}$ (Dit is het rekenvoorbeeld uit hoofdstuk 8!)

$T_{i,\text{opp HR++ glas}} = 15,7^\circ\text{C}$ (Reken dit zelf uit! De U-waarde van het glas is $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Met behulp van de dampspanningstabel kunnen we nu aflezen dat de maximale dampconcentratie ter plaatse van het geveleppervlak $11,2 \text{ g/m}^3$ is, en ter plaatse van het binnenoppervlak van het glas $13,4 \text{ g/m}^3$. Dus:

Woonkamerlucht: $T_i = 20^\circ\text{C}$ dan is $c_{i,\text{max}} = 17,28 \text{ g/m}^3$

Gevel (ongeïsoleerd): $T_{i,\text{opp gevel}} = 12,8^\circ\text{C}$ dan is $c_{i,\text{opp,max}} = 11,2 \text{ g/m}^3$

HR++ glas: $T_{i,\text{op glasp}} = 15,7^\circ\text{C}$ dan is $c_{i,\text{opp,max}} = 13,4 \text{ g/m}^3$

In de grafiek van de vochtbalans op de vorige bladzijde zijn deze omstandigheden aangegeven. We zien bijvoorbeeld dat als het ventilatievoud daalt tot minder dan $0,2 \text{ h}^{-1}$ er ook in woningen met een hele lage vochtproductie condensatie op de binnenkant van de gevel optreedt.

Bereken zelf met de grafiek en bovenstaande gegevens een aantal andere voorbeelden. Zo krijg je gevoel voor de werking van de vochtbalans en voor de omstandigheden waaronder vochtproblemen optreden.

Als we nu willen berekenen wat de invloed van oppervlakte condensatie op de vochtbalans is, dan moeten we de formule die we in hoofdstuk 5 gebruikten uitbreiden met een term waarmee deze oppervlaktecondensatie kan worden beschreven:

$$G = \underbrace{nV \cdot (C_i - C_a)}_{\text{Vocht productie}} + \underbrace{10 \cdot (C_i - C_{\text{max,opp}}) \cdot A_{\text{condens}}}_{\text{"afvoer" door condensatie}} \quad (1)$$

afvoer door ventilatie

$$G_{\text{condens}} = \beta \cdot (C_i - C_{\text{max,opp}}) \cdot A_{\text{condens}} \quad (2)$$

$C_{\text{max,opp}}$ = maximale vochtconcentratie koudste oppervlak omhulling [g/m^3]

A_{condens} = oppervlakte waarop condensatie ontstaat [m^2]

$\beta \approx 10$ = dampovergangscoefficiënt ($\beta = 1/Z$) [h/m]

De "nieuwe" term aan de rechterkant beschrijft hoeveel waterdamp er uit de ruimtelucht condenseert op het koude oppervlak.

De hoeveelheid condens wordt beïnvloed door drie zaken:

- de grootte van het oppervlak A_{condens} (op een groot vlak condenseert meer),
- door het verschil tussen de dampconcentratie van de binnenlucht c_i en de maximale dampconcentratie bij het oppervlak $C_{\text{max,opp}}$. Hoe groter dit verschil, hoe groter de “vochtstroom” van de binnenlucht naar het oppervlak toe.
- en door de dampovergangscoefficiënt β_i (beta). Deze dampovergangscoefficiënt is te vergelijken met de warmteovergangscoefficient α_i die we gebruiken bij het berekenen van warmtetransmissie. Voor de dampovergangscoefficiënt β_i houden we een waarde van 10 h/m aan.



Voorbeeld: Het keukenraam van een vooroorlogse woning is beslagen. Het raam is 1,2 m² groot en van enkel glas. De oppervlaktetemperatuur is 2°C. Uit de dampspanningstabel blijkt dat daar een maximale vochtconcentratie $C_{\text{max,opp}} = 5,56$ g/m³ bijhoort. Als de dampconcentratie in de keuken 15 g/m³ bedraagt, hoeveel vocht zal er dan op de ruit condenseren?

$$G_{\text{condens}} = \beta \cdot (C_i - C_{\text{max,opp}}) \cdot A = 10 \cdot (15 - 5,56) \cdot 1,2 = 113,3 \text{ g/h}$$

Zolang de omstandigheden zo zijn dat er geen oppervlakte condensatie ontstaat heeft de vochtbalans de eenvoudige vorm:

$$G = n \cdot V \cdot (C_i - C_e) \text{ [g/h]}$$

Maar zodra condensatie optreedt wordt aan de vochtbalans de term voor condensatie toegevoegd:

$$G = n \cdot V \cdot (C_i - C_e) + 10 \cdot (C_i - C_{\text{max,opp}}) \cdot A \text{ [g/h]} \quad (1)$$

Als we deze laatste vergelijking oplossen voor C_i krijgen we het volgende:

$$C_i = \frac{n \cdot V \cdot C_a + G + \beta \cdot C_{\text{max,opp}} \cdot A_{\text{condens}}}{n \cdot V + \beta \cdot A_{\text{condens}}} \quad (3)$$

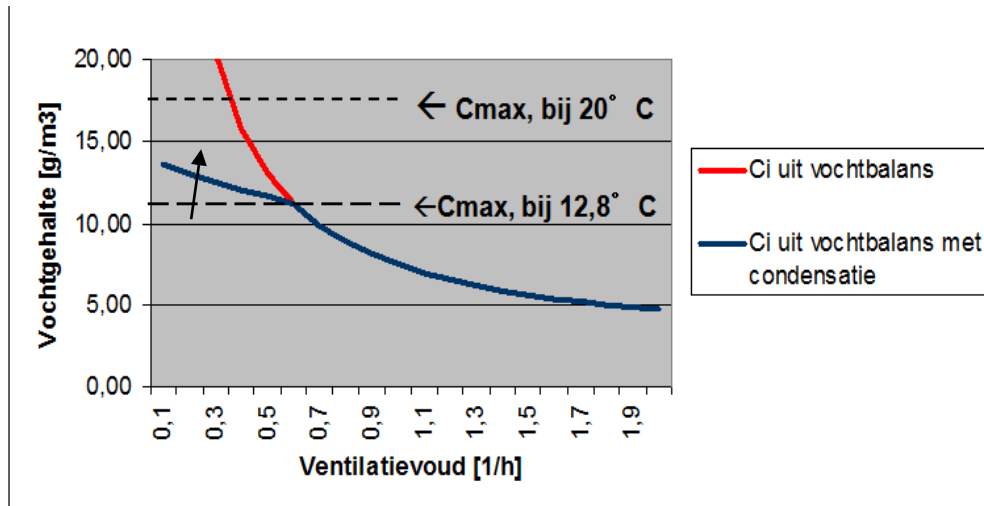
Dit maakt het mogelijk om de dampconcentratie van de binnenlucht te berekenen als er ergens oppervlakte condensatie optreedt.

In het eerder besproken voorbeeld (ongesoleerde gevel, maar nieuwe ramen) ontstaat dan het volgende beeld bij vriezend weer (-10°C):

Condensatie op het binnenoppervlak van een gemetselde gevel.

Gegevens: $T_e = -10^\circ\text{C}$; $RV_e = 90\%$ $T_i = 20^\circ\text{C}$ $T_{i,opp} = 12,8^\circ\text{C} \rightarrow$ dus $C_{max,opp} = 11,2 \text{ g/m}^3$

Volume kamer: 30 m^3 ; Vochtproductie $G = 166,7 \text{ g/h}$

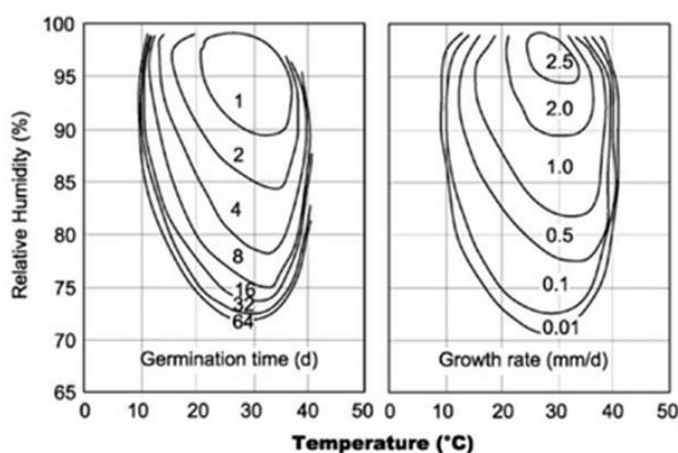


Voor de vochtproductie in de ruimte wordt in dit voorbeeld $166,7 \text{ g/h}$ aangenomen. Zolang het ventilatievoud hoger blijft dan ongeveer 0,7 luchtwisselingen per uur zal de vochtconcentratie in de binnenlucht lager blijven dan $12,8 \text{ g/m}^3$. Er is dan géén oppervlakte condensatie, en de situatie wordt beschreven met de eenvoudige vochtbalans. Maar als de ventilatie minder wordt (rooster dicht, of minder wind) dan treedt er condensatie op op het metselwerk. De vochtbalans wordt nu beschreven door de uitgebreide formule, en de lijn in de grafiek verloopt anders (zie pijltje). Met de gegevens hierboven kan je dit zelf worden narekenen!

10 Schimmelgroei

Schimmelgroei ontstaat als er aan de volgende voorwaarden wordt voldaan: een geschikte ondergrond met voedingsstoffen (de meeste bouwmaterialen zijn “geschikt” voor schimmelgroei), de juiste temperatuur en vochtigheid. Uit de grafiekjes hieronder kan worden afgelezen onder welke omstandigheden schimmels het beste ontkiemen, en hoe hard ze vervolgens groeien. Bij de temperaturen die in gebouwen voorkomen, gecombineerd met een hoge luchtvochtigheid ontstaan prima condities.

Moisture Requirements for Mold Growth



Bron: National Institute of Building Sciences, USA,

http://www.wbdg.org/resources/env_iag.php

11. Inwendige condensatie

Vochtproblemen die het gevolg zijn van condensatie in gevels en daken kunnen veel schade veroorzaken. We bestuderen damptransport door gebouwconstructies om te kunnen voorspellen waar er problemen kunnen ontstaan.

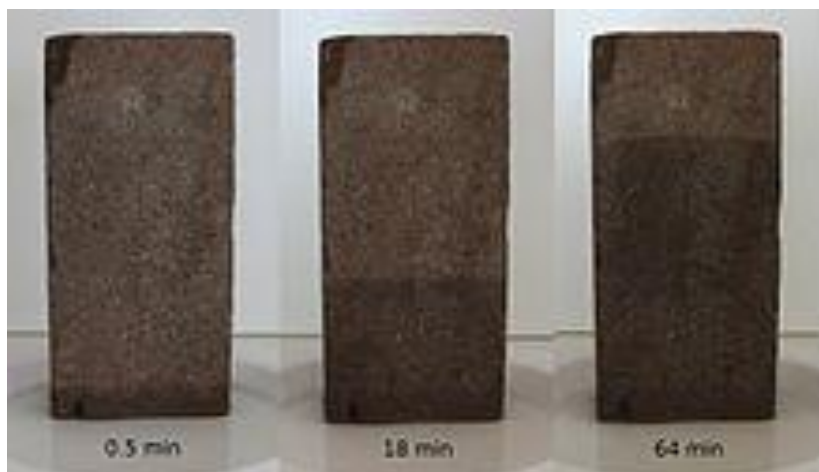
We behandelen hier een vereenvoudigde methode om het gevaar van **inwendige condensatie** door damptransport te voorspellen. Deze zogenaamde "Glaser methode" voorspelt of er inwendige condensatie plaatsvindt, en waar en hoeveel er condenseert.

De rekenmethode gaat (gelukkig!) uit van sterke vereenvoudigingen, want de combinatie van warmte-, vocht- en luchttransport in materialen en constructiedelen is zeer complex. Bij het vochttransport in constructies spelen met name het **dampdiffusie- en capillairvochttransport** een belangrijke rol, dat wil zeggen transport van waterdamp en transport van vloeibaar water. De grens tussen deze vochttransporten wordt bepaald door het kritische vochtgehalte ($= \psi_{kr.} [m^3/m^3]$). Het kritische vochtgehalte is een materiaaleigenschap. Hieronder worden deze twee vormen van vochttransport kort beschreven. Voor meer informatie over de theorie van vochttransport wordt verwezen naar de opgegeven literatuur.

12 Vochttransport in bouwmaterialen in vloeibare vorm

In een poreus materiaal zal bij een vochtgehalte boven het **kritische vochtgehalte** ($\psi > \psi_{kr.}$) onder invloed van kleine verschillen in vochtgehalte **hoofdzakelijk vochttransport in vloeibare vorm optreden** (dat is capillair vochttransport).

Hoewel iedereen het voorbeeld kent van een spons die water opzuigt, is dit zeer complexe materie die we hier niet verder zullen behandelen.



Capillair vochttransport in bakstenen. Duidelijk te zien is het "vochtfront" een halve, 18 en 64 minuten nadat de baksteen aan de onderzijde met water in contact komt. Onder dat vochtfront vindt vloeibaar transport plaats. Boven het vochtfront is er sprake van damptransport. Het vochtgehalte is daar lager dan het kritische vochtgehalte.

13 Diffusie van waterdamp door bouwmaterialen

Meestal ligt het vochtgehalte onder het kritische vochtgehalte ($\psi \leq \psi_{kr.}$). Het capillair vochttransport stopt. Er vindt dan hoofdzakelijk **een traag vochttransport door dampdiffusie** plaats. Voor dampdiffusie door constructies is veel tijd nodig, terwijl de verspreiding van waterdamp in lucht juist snel gaat.

Voor materialen met grote poriën (niet hygroscopische materialen), zoals baksteen, PS- en PUR-schuim, en minerale wol is het vochtgehalte zeker lager dan het kritische. Zo'n **niet hygroscopisch materiaal** bezit namelijk **weinig fijne poriën** (straal van het capillair: $r > 0.05 \mu\text{m}$ → micrometer) waardoor er minder water wordt vastgehouden. Bij een relatieve vochtigheid onder 98% is het vochtgehalte zelfs bijna nul.

Bij **sterk hygroscopische materialen** (veel kleine poriën) is bij relatieve vochtigheden onder 98% het vochtgehalte hoog (bijv. kalkzandsteen). Het vocht dat in dit materiaal in de **vele zeer kleine poriën** (straal kleiner dan $0.05 \mu\text{m}$) voorkomt wordt **hygroscopisch vocht** genoemd. Indien het vochtgehalte onder de kritische waarde blijft is ook dit materiaal met het dampdiffusie-rekenmodel in redelijk goed te beschrijven, alhoewel er nu wel enige condensatie in de capillairen kan optreden.

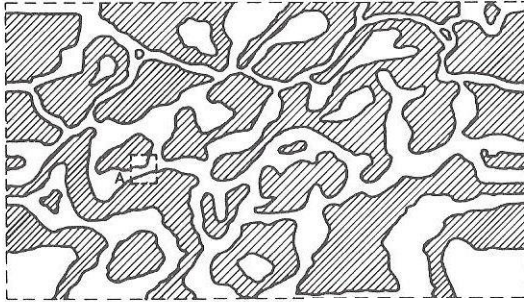
14. Uitgangspunten

Door het dampdiffusietransport en het capillair vochttransport onafhankelijk van elkaar te bekijken ontstaat een eenvoudige en goed te gebruiken beschrijving van het vochttransport door scheidingsconstructies. Bij dampdiffusietransport zoals dat hier wordt behandeld zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

- Er wordt voor het warmte- en dampdiffusietransport uitgegaan van een **stationaire situatie**. Dus constant blijvende omstandigheden (temperatuur en vochtigheid).
- Het vochttransport vindt **alleen via damptransport** plaats.
- Er vindt **geen luchttransport** in de constructie plaats.
- De materialen worden als **niet hygroscopisch** beschouwd. Bij deze materialen met grote poriën zal pas als de relatieve vochtigheid bijna 100% is, condensatie in de capillairen plaatsvinden. Daardoor is een wijziging van het vochtgehalte in een bepaald punt van de constructie alleen het gevolg van condensatie of verdamping. Het capillair vochttransport wordt in eerste instantie verwaarloosd. Na condensatie op een bepaald vlak in de constructie kan het vocht zich in aangrenzende poreuze materialen (bijv. baksteen (roodboerengrauw)) via capillaire werking verdelen. Bij de hygrische beoordeling van scheidingsconstructies worden de gevolgen van deze capillaire effecten besproken, maar niet berekend.
- De materiaaleigenschappen worden **constant** verondersteld.
- De invloed van vrijkomende condensatiewarmte op het temperatuurverloop wordt verwaarloosd.
- De te beoordelen scheidingconstructie wordt **droog** verondersteld. De werkelijke aanvangssituatie met eventueel bouwvocht wordt niet in rekening gebracht.
- Opwarming van de constructie door zonbestraling of afkoeling t.g.v. nachtelijke uitstraling wordt niet in deze beschouwing opgenomen.

Aan dit lijstje uitgangspunten is vooral te zien dat in *werkelijkheid* het transport van damp en water door bouwkundige constructies een zeer ingewikkelde zaak is.

15. Damptransport



Bron: Tammes en Vos

Vochttransport van waterdamp en vloeibaar water vindt alleen in poreuze materialen plaats. Bovendien moeten de poriën met elkaar in verbinding staan. Waterdamp verplaatst zich in bouwmaterialen door dampdruk- (of dampconcentratie-) verschillen. De damp diffundeert **zeer traag** van plaatsen met hoge dampdruk naar plaatsen met lagere dampdruk. Aangezien binnenshuis de dampdruk vrijwel steeds hoger is dan buiten, zal de normale richting van damptransport van binnen naar buiten zijn.

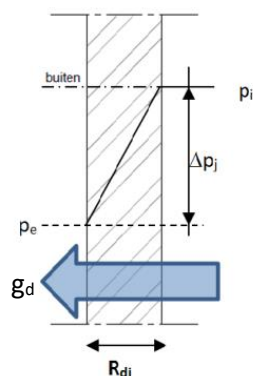
Omdat ieder materiaal remmend werkt op het dampdiffusieproces, gebruiken we het begrip **dampdiffusieweerstand**, dit is een maat voor de weerstand van het materiaal tegen het transport van waterdamp.

Dampdiffusietransport door een materiaal lijkt erg op warmtetransport, en ook op transport van elektriciteit. In de tabel hieronder zie je deze overeenkomsten (analogie):

Een ...	Drijvende kracht	..over een..	Weerstand	..veroorzaakt een..	Stroom
	Spanningsverschil ΔV [Volt]		Elektrische weerstand R [Ohm]		Elektrische stroom I [Ampere]
	Temperatuurverschil ΔT [°C]		Warmteweerstand R [W/m²K]		Warmtestroom q [W/m²]
	Dampdrukverschil Δp [N/m²]		Dampweerstand R_d [m/s]		Dampstroom g [kg/m².s]

In formulevorm ziet dit er voor damptransport zo uit:

$$g_d = \frac{\Delta p_j}{R_{dj}} \quad (1)$$



Damptransport van binnen naar buiten ontstaat door het verschil in dampdruk p_i (binnen) en p_e (buiten). De grootte van de dampstroom wordt bepaald door het verschil in dampdruk, én door de dampweerstand R_{dj} van de constructie.

met: g_d = waterdampstroomdichtheid in kg/m².s
 Δp_j = dampdrukverschil in N/m² over materiaallaag j.
 R_{dj} = dampdiffusieweerstand van materiaallaag j in m/s

Zo kan het ook:

In plaats van met een dampdrukverschil ($= \Delta p$), kan je de waterdampstroomdichtheid ook bepalen uit het verschil in *dampconcentratie* ($= \Delta c$). In dit geval is de waterdampstroomdichtheid en de dampdiffusie-weerstand als volgt te bepalen:

$$g_d = \frac{\Delta c}{Z} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] \quad (4)$$

met: $Z = 4,35 \cdot 10^4 \cdot \mu_d \quad [\text{s/m}]$

Maar meestal werken we hier *niet* mee, en kiezen we voor berekeningen op basis van de dampspanning p .

Om de dampdiffusieweerstand van een materiaallaag te kunnen berekenen is voor elk materiaal een karakteristieke grootheid, het **dampdiffusieweerstandsgetal μ** , ingevoerd (μ is de griekse letter “mu”). Deze grootheid is gedefinieerd als:

$$\mu = \frac{\text{dampdiffusieweerstand van materiaal met laagdikte } d}{\text{dampdiffusieweerstand van lucht met dezelfde laagdikte}} \quad (2)$$

De μ -waarde is dus een dimensieloos verhoudingsgetal. Het geeft aan hoeveel groter de weerstand tegen damptransport van een materiaal is ten opzichte van een even dikke laag stilstaande lucht. Voor beton, bijvoorbeeld, geldt dat de dampweerstand 35 x zo groot is als die van lucht: daarom $\mu_{\text{beton}} = 35$.

Waterdamp diffundeert gemakkelijker door een materiaal met een groot aantal open poriën (bijv. minerale wol) dan door een materiaal met een meer gesloten structuur (bijv. schuimglas). De weerstand tegen damptransport zal voor alle bouwmaterialen groter zijn dan voor lucht (dus voor elk bouw materiaal geldt: $\mu \geq 1$).

Enkele voorbeelden van μ -waarden:

Materiaal:	μ
minerale wol	1-2
metselwerk (rood)	9
Kalkzandsteen	12
beton ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$)	35
gipskartonplaat	13
XPS geëxtrudeerd PS ($\rho = 40 \text{ kg/m}^3$)	250
EPS geëxpandeerd PS ($\rho = 15-35 \text{ kg/m}^3$)	15-50
schuimglas ($\rho = 150 \text{ kg/m}^3$)	∞
bitumenlaag (heet aangebracht)	5000

Bron: <http://klimapedia.nl/> Vochttabellarium

De dampdiffusieweerstand hangt dus af van het materiaal (μ -waarde), maar ook van de dikte van de laag. Want een tweemaal zo dik materiaal levert ook een tweemaal grotere weerstand. De μd - waarde [m] is een **verhoudingsgetal** van de dampdiffusieweerstand van een materiaallaag. Getalsmatig is de weerstand van een materiaallaag is af te leiden uit de “Wet van Fick”. De weerstand van een materiaallaag j is hieruit te bepalen volgens:

$$R_{dj} = C \cdot \mu_{dj} \text{ [m/s]} \quad (3)$$

met C = "Diffusieconstante" van waterdamp in lucht als functie van druk en temperatuur. Deze constante geeft bij temperaturen tussen -10°C en 20°C een gemiddelde waarde van $\approx 5,3 \cdot 10^9 \text{ [1/s]}$.

Oefenopgaven:

1. Bereken de μ_d -waarde van 100mm metselwerk
2. Bereken de μ_d -waarde van 1,3mm dakleer
3. Bereken nu voor beiden de R_d

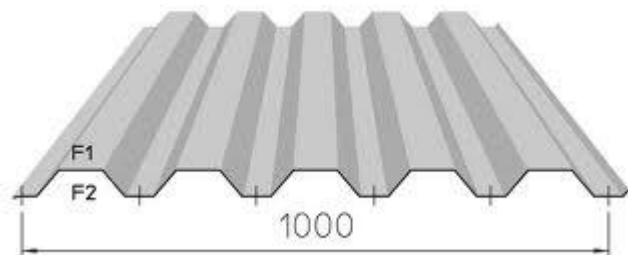
Oplossing:	
Metselwerk μ_d	=0,9
Dakbedekking μ_d	=1,3
Metselwerk :	
$R_d = 4,77 \cdot 10^{-9}$	
Dakbedekking :	
$R_d = 68,9 \cdot 10^{-9}$	

Voor dunne materiaallagen zoals folies, wordt meestal in plaats van een μ -waarde meteen een μ_d -waarde gegeven. Verder kunnen eventuele kleine luchtlekken in materiaallagen in de μ_d -waarde meegerekend worden. Deze μ_d -waarde wordt $\mu_{d\text{equivalent}}$ genoemd en kan uit metingen bepaald worden.

Hieronder zie je een aantal μ_d - en $\mu_{d\text{eq}}$ -waarden van verschillende materiaallagen:

Materiaallaag	μ_d -waarde [m]
200 mm beton:	$\mu_d = 33 \cdot 0,2 = 6,6 \text{ m}$
0.1 mm polyetheen:	$\mu_d = 65000 \cdot 0,0001 = 6,5 \text{ m}$
100 mm minerale wol:	$\mu_d = 2 \cdot 0,1 = 0,2 \text{ m}$
100 mm geëxtrudeerd PS:	$\mu_d = 200 \cdot 0,1 = 20,0 \text{ m}$
2 laags bitumineuze dakbedekking	$\approx 40,0 \text{ m}$
3 laags bitumineuze dakbedekking	$\approx 60,0 \text{ m}$
gevouwen plaatstalen dak, zonder naaddichting	$\approx 0,0 \text{ m}$
gevouwen plaatstalen dak, naden afgekit	$\approx 10,0 \text{ m}$
keramische dakpannen met enkele sluiting	$\approx 0,2 \text{ m}$
keramische dakpannen met dubbele sluiting	$\approx 0,3 \text{ m}$
sneldek betonpannen	$\approx 0,5 \text{ m}$
natuurleien	$\approx 2,1 \text{ m}$
houten schrootjes	$\approx 0,8 \text{ m}$

Uit de tabel met μ_d - en $\mu_{d\text{eq}}$ -waarden blijkt dat 0,1 mm polyetheen (=dampremmende laag) even veel damp doorlaat als 20 cm beton. Verder is te zien dat geëxtrudeerd polystyreenschuim veel dampdichter is dan minerale wol (glaswol, steenwol) met dezelfde dikte. De dampdichtheid van een geprofileerde stalen dakplaat is door de naden tussen de platen zeer laag ($\mu_{d\text{eq}}$ -waarde ≈ 0 !). Ook dakpannen blijken zeer "damp-open" te zijn.



Oefenopgave:

Een muur is 0,2 m dik en heeft een μ -waarde van 10.

Verder is een gemiddelde wintersituatie gegeven door:

$$T_i = +20^\circ\text{C}; \phi_i = 50\%;$$

$$T_e = +5^\circ\text{C}; \phi_e = 80\%; \text{ stationaire toestand.}$$

Bereken de dampstroom die door de constructie diffundeert. Er wordt aangenomen dat er geen inwendige condensatie in de constructie plaatsvindt en de constructie luchtdicht is uitgevoerd.

Oplossing

De optredende waterdampdruk **binnen** is: $p_i = 0,50 \cdot 2340 = 1170 \text{ N/m}^2$ (opzoeken in de dampspanningstabel bij 20°C)

De optredende dampdruk **buiten** is: $p_e = 0,80 \cdot 872 = 698 \text{ N/m}^2$ (opzoeken)

Het **dampdrukverschil** Δp is dan $1170 - 698 = 472 \text{ N/m}^2$

De **dampdiffusieweerstand** van de steensmuur is: $R_d = C \cdot \mu d = 5,3 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 0,2 = 10,6 \cdot 10^9 \text{ m/s}$

De **dampstroomdichtheid** g_d volgt dan uit: $g_d = \Delta p / R_d \text{ (1)} = 472 / 10,6 \cdot 10^9 = 44,53 \cdot 10^{-9} \text{ [kg/m}^2\text{s]}$

Dit komt overeen met: $44,53 \cdot 10^{-9} \text{ [kg/m}^2\text{s]} \cdot 3600 \text{ [s/h]} \cdot 10^3 \text{ [g/kg]} = 0,16 \text{ g/m}^2\text{h}$ (niet zo veel dus)

De berekende dampstroomdichtheid klopt alleen als er geen inwendige condensatie in de constructie plaatsvindt. Als er wel condensatie optreedt, blijft er vocht achter in de constructie. Dan is de dampstroom die de constructie ingaat dus groter dan de dampstroom die de constructie weer uitkomt. Bij de methode Glaser (Hfst.17) gaan we hier dieper op in.

Wat verder opvalt is dat er maar heel *weinig* waterdamp via dampdiffusie door de gevel naar buiten verdwijnt, ook al is in het rekenvoorbeeld de dampweerstand van muur klein ($\mu d = 2$). Bij hogere dampdiffusieweerstanden van de omhulling blijft er van de naar buiten diffunderende waterdamp bijna niets over. Daarom is bij de vochtuishouding in een verblijfsruimte de bijdrage van de dampdiffusie door de dichte delen van de omhulling dan ook **meestal verwaarloosbaar** (zie ook Hoofdstuk 5!). Alleen de afvoer van vocht via ventilatie is bij "normale" ventilatiehoeveelheden bepalend voor de waterdampconcentratie in ruimten.

Waarom is het rekenen aan de dampdiffusie door bouwconstructies dan toch nodig? Ondanks het trage transport en de kleine hoeveelheden, kan er *binnen in* de constructies na verloop van tijd schade ontstaan door condensatie van waterdamp.

Behalve de vochttechnische eigenschappen van bouwmaterialen is ook detailleren erg belangrijk. De luchtdichtheid van de binnenzijde van een constructie is behalve voor energie en comfort, ook voor vocht van belang: Bij luchtlekken kan er warme binnenlucht door de uitwendige scheidingsconstructie trekken. Door deze "convectie" in de constructie wordt waterdamp meegevoerd. Op een koudere plek in het detail ontstaat er condens. De hoeveelheden zijn vaak veel groter dan bij dampdiffusie door de materialen heen.

*Foto: Ontbrekende dichting tussen dakelement en kantgording.
Bron: SBR Publicatie Luchtdicht Bouwen.*



16 Dampspanningsverloop

Bij het *warmtetransport* zijn, behalve de warmteweerstand van een constructie R_c , ook de begrippen warmteovergangsweerstand binnen r_i en buiten r_e ingevoerd. De totale warmteweerstand werd bepaald door het optellen van de weerstanden.

Je kan dus verwachten dat voor het damptransport, naast de dampdiffusieweerstand van een constructie $R_d (= \sum R_{dj} = C \cdot \sum \mu_{dj})$, er ook **dampovergangsweerstanden** R_{di} en R_{de} worden gedefinieerd. De waarden die voor deze grootheden worden gevonden zijn:

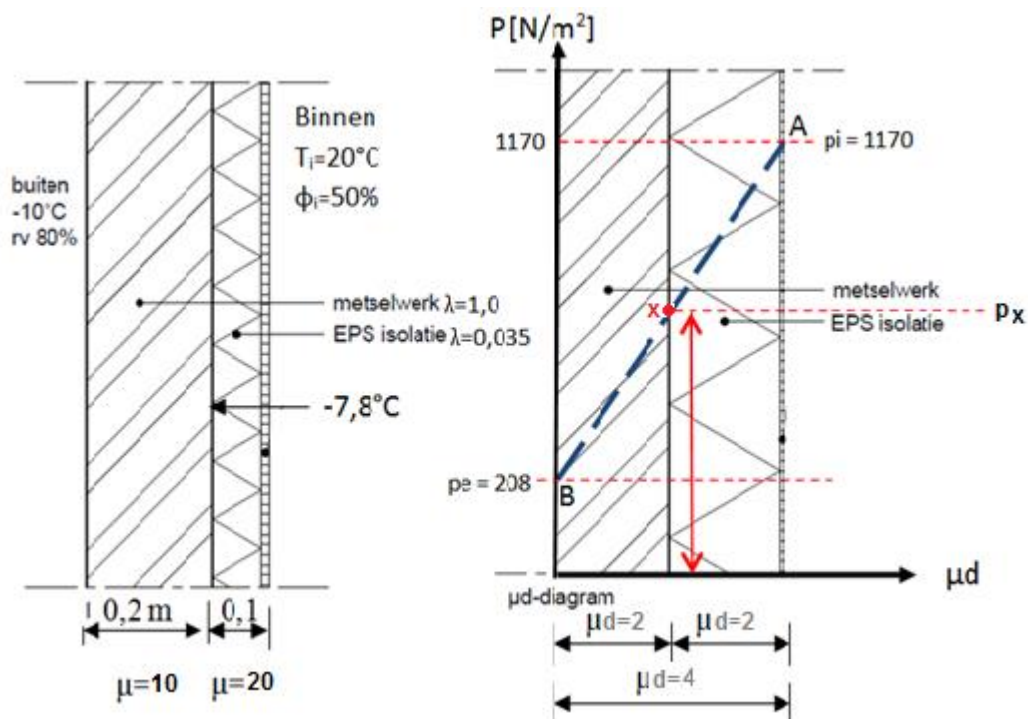
$$R_{di} \approx 0,040 \cdot 10^9 \text{ m/s}$$

$$R_{de} \approx 0,007 \cdot 10^9 \text{ m/s}$$

Maar omdat ze heel erg klein zijn vergeleken met de dampdiffusieweerstand van de meeste materialen, worden deze dampovergangsweerstanden verwaarloosd. Bij het werkelijke dampspanningsverloop zal dus geen merkbare dampspanningssprong aan het binnen- en buitenoppervlak optreden. Bij het temperatuurverloop is dit wél het geval, daar tellen we de r_i en r_e op bij de R_c . Bij **oppervlaktecondensatie** speelt de dampovergangsweerstand overigens wel een rol (zie Hoofdstuk 8).

Voorbeeld binnenisolatie

Het verloop van de dampspanning door een gevel of dakconstructie kan je met een grafiek bepalen, dus zonder rekenen. Op de horizontale as wordt de **dampdiffusieweerstand μd per materiaallaag op schaal** uitgezet (en dus niet de dikte!), en op de verticale as een **dampspanningschaal**. Hieronder is dit bijvoorbeeld voor een steensmuur met binnenisolatie gedaan. De gegevens en de temperatuur op het scheidingsvlak muur/isolatie zijn in de figuur weergegeven.



Gewone doorsnede

In dit μd -diagram is van elke laag niet de **dikte**, maar de **μd -waarde** van de laag uitgezet.

In het μd -diagram verloopt de dampspanning als een rechte lijn van binnen naar buiten (van punt A naar punt B). Dat komt omdat bij stationair damptransport de dampstroom door iedere laag van de constructie hetzelfde is. Dat is zo te beredeneren: voor iedere laag geldt dat er evenveel damp uit moet komen als er in gaat. Dus voor iedere laag afzonderlijk (maar ook voor het totaal!!) geldt:

$$g_d = \frac{p_i - p_e}{C \cdot \sum \mu d_{\text{tot.}}} = \frac{p_i - p_x}{C \cdot \mu d_{\text{isol.}}} = \frac{p_x - p_e}{C \cdot \mu d_{\text{muur}}} = \text{constant} \quad (1)$$

De damp-
stroom

door de totale
constructie

is gelijk aan die
door de isolatielaag

en gelijk aan de
dampstroom door
het metselwerk

*Omdat in dit voorbeeld de μd -waarde van metselwerk en isolatie (toevallig!) aan elkaar gelijk zijn ligt de dampspanning op het grensvlak tussen de twee lagen precies halverwege p_i en p_e , dus $p_x = 689 \text{ N/m}^2$.
Bekijk dit goed in de grafiek, en reken het zelf even na.*

Voorbeeld: Het berekenen van de dampstroom:
Voorbeeld binnenisolatie (vorige bladzijde)

Dampspanning binnen (20°C , $\phi_i=50\%$) $\rightarrow p_i = 0,5 \cdot 2340 = 1170 \text{ N/m}^2$;
Dampspanning buiten (-10°C , $\phi_e=80\%$) $\rightarrow p_e = 0,8 \cdot 260 = 208 \text{ N/m}^2$

$\mu d_{\text{muur}} = 10 \cdot 0,2 = 2 \text{ m}$
 $\mu d_{\text{isol.}} = 20 \cdot 0,1 = 2 \text{ m}$
 $\mu d_{\text{tot.}} = 4 \text{ m};$

$C = 5,3 \cdot 10^9$ (constante: dampweerstand van 1m lucht)

Als er geen inwendige condensatie optreedt is de dampstroom
Van binnen naar buiten door de gevel eenvoudig te berekenen:

$$g_d = \frac{p_i - p_e}{C \cdot \sum \mu d_{\text{tot}}} = \frac{1170 - 208}{5,3 \cdot 10^9 \cdot 4} = 45,38 \cdot 10^{-9} \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

Reken dit nu zelf om naar gram per m^2 per uur!

En om te berekenen wat de dampspanning p_x is op de grens van
metselwerk en isolatie:

$$g_d = \frac{1170 - 208}{5,3 \cdot 10^9 \cdot 4} = \frac{1170 - p_x}{5,3 \cdot 10^9 \cdot 2} \quad \text{vereenvoudigen geeft:}$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}$ $\underbrace{\hspace{1.5cm}}$
dampstroom door
de totale gevel dampstroom
door de isolatielaag

$$45,38 \cdot 10^{-9} = (1170 - p_x) / (10,6 \cdot 10^9)$$

Dit is een "vergelijking met één onbekende" (p_x) die kan worden opgelost tot: $p_x = 689 \text{ N/m}^2$
Vergelijk dit met het μd -diagram op de vorige bladzijde. Je kan daar controleren of dit resultaat klopt.



Ook voor gevels en daken met meer dan twee lagen kan je het verloop van de dampspanning op twee manieren bepalen:

- door (op schaal!) een μd -diagram te tekenen, en de dampspanning op verschillende plaatsen in de constructie uit de grafiek af te lezen,

of

- door het dampspanningsverloop te berekenen zoals in het voorbeeld hierboven.

Maximale dampspanning

De dampspanningsberekening verloopt dus eigenlijk precies hetzelfde als het berekenen van het temperatuurverloop door een constructie. Maar er is één belangrijk verschil: er zit een bovengrens aan de dampspanning. De gevonden dampspanning kan nooit groter zijn dan de maximale dampspanning. Zie Hoofdstuk 4 en ook Van der Linden paragraaf 2.1.

Om te controleren of je dampspanningsberekening voor een constructie niet hoger is dan wat mogelijk is, is het nodig om ook de maximale dampspanning in het μd -diagram te tekenen. Het verloop van de maximale dampspanningslijn ($p_{\max}$) wordt bepaald uit het temperatuurverloop. Dat kan door bij de temperaturen de bijbehorende maximale dampspanning op te zoeken in de dampspanningstabel. Deze $p_{\max}$ -waarden worden in de constructie op de scheidingsvlakken uitgezet en met elkaar verbonden.

Het bepaling van de maximale dampspanning $p_{\max}$ voor het voorbeeld binnenisolatie gaat zo:

1. Warmteweerstand en U-waarde van de gevel:

$$R_c = \sum d/\lambda = 0,10/0,035 + 0,20/1,0 = 2,86 + 0,20 = 3,06 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

$$R_{\text{tot}} = r_i + R_c + r_e = 0,13 + 3,06 + 0,04 = 3,23$$

$$U = 1 / R_{\text{tot}} = 1 / 3,23 = 0,31 \text{ [W/m}^2\text{·K]}$$

2. Warmtestroomdichtheid door de gevel:

$$q = \Delta T / R_{\text{tot}} = 30 / 3,23 = 9,29 \text{ [W/m}^2\text{]} \text{ (warmtestroomdichtheid)}$$

3. De temperatuur tussen iedere laag kan nu worden berekend, en ...
4. Met de dampspanningstabel wordt tenslotte de bijbehorende maximale dampspanning opgezocht:

$$T_{i0} = 20 - (0,13 \cdot 9,29) = 18,8^\circ\text{C}$$

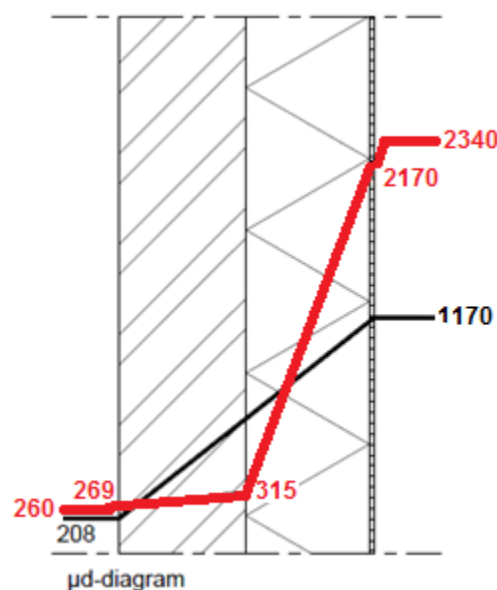
$$\rightarrow p_{i0,\max} = 2170 \text{ N/m}^2 \text{ (opzoeken in dampspanningstabel in bijlage)}$$

$$T_s = 18,8 - (2,86 \cdot 9,29) = -7,8^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow p_{s,\max} = 315 \text{ N/m}^2$$

$$T_{e0} = -7,8 - (0,20 \cdot 9,29) = -9,6^\circ\text{C}$$

$$\rightarrow p_{e0,\max} = 269 \text{ N/m}^2$$



De dampspanningslijn p_w (zwart) en de maximale dampspanningslijn $p_{\max}$ (rood) door de gevel.

Als de dampspanningslijn ergens hoger is dan de maximale dampspanningslijn, betekent dat er condensatie zal optreden.

In deze gevel is er dus een probleem tussen het metselwerk en de isolatie.

In dit μ d-diagram is te zien dat op sommige plaatsen $p_w > p_{\max}$ zou worden, maar dat is onmogelijk. Er moet daarom ergens in de constructie inwendige condensatie zal plaatsvinden. **De werkelijke dampspanningslijn loopt niet zoals werd getekend, maar moet gecorrigeerd worden.** De dampstroom g_d die we eerder berekende is ook onjuist, want de dampstroom verandert als er damp “verdwijnt” door te condenseren ergens in de constructie.

Door het p_w en $p_{\max}$ -verloop te tekenen in een μ d-diagram (op schaal), kan dus worden nagegaan of er in een constructie onder de gegeven omstandigheden inwendige condensatie zal optreden. In het hoofdstuk 17 bespreken we de “Methode van Glaser” om te berekenen **waar en hoeveelheid** waterdamp er condenseert.

17 Methode van Glaser

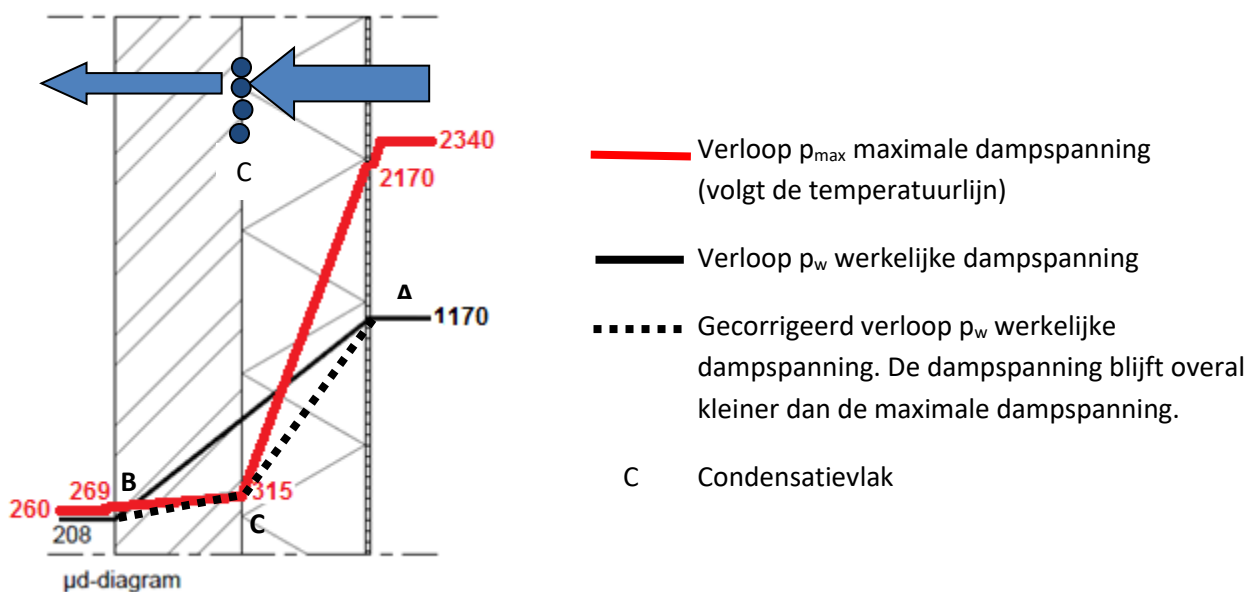
Aangezien p_w nooit groter kan zijn dan $p_{\max}$, zal het p_w -verloop anders moeten zijn dan de zwarte lijn in de figuur in paragraaf 16 (vorige bladzijde).

In de getekende figuur met de dampdiffusieweerstanden op de horizontale as en de dampspanning op de verticale as geldt steeds:

- Als in de constructie geen vochtbronnen aanwezig zijn, zal in de constructie van binnen naar buiten de dampstroom constant blijven of **afnemen** (als er condensatie is). Dat wil zeggen dat in de grafiek de hellingshoek van de dampspanningslijn van binnen naar buiten kleiner moet worden. De helling van deze lijn is namelijk een maat voor de dampstroom: hoe stijler de lijn, hoe groter de dampstroom. Maar als er ergens vocht achterblijft (door condensatie), dan moet de dampstroom kleiner worden (dus minder stijl).
- De heersende p_w kan **nooit** groter zijn dan de $p_{\max}$ die bepaald is door de temperatuur ter plaatse.

Het gecorrigeerde dampspanningsverloop zie je in het diagram hieronder. Dit is de enige mogelijkheid om aan de voorwaarden hierboven te voldoen.

De hoeveelheid gecondenseerd vocht blijft achter **in het vlak door punt C**. Het condensaat wordt in één vlak geconcentreerd gedacht, maar in werkelijkheid zal het condens zich over een groter gebiedje verdelen.





Tijdens de renovatie is tegen het dakbeschoot een isolatiedeken aangebracht. Ingeklemd tussen de gordingen achter latten en zonder de naden af te plakken. Na het weghalen van de isolatie wordt duidelijk dat hier inwendige condensatie heeft opgetreden. Bron: Bouwwereld.

Hoewel er nogal wat beperkingen bij deze manier van rekenen zijn, geeft de methode toch bruikbare uitkomsten en inzicht. De methode is relatief eenvoudig en daarom van groot belang bij de vochttechnische beoordeling van dak-en wandconstructies.

Met een paar voorbeelden zal de methode van Glaser worden uitgelegd. De stationaire randvoorwaarden voor het binnen- en buitenklimaat zijn bij deze methode:

Winter: 60 dagen lang (dat zijn dus $\rightarrow 60 \cdot 24 \cdot 3600 = 5,184 \cdot 10^6$ seconden) geldt:

$$T_i = 20^\circ\text{C}, \phi_i = 50\%$$

$$T_e = -10^\circ\text{C}, \phi_e = 80\%$$

Zomer : 90 dagen lang ($\rightarrow 90 \cdot 24 \cdot 3600 = 7,776 \cdot 10^6$ seconden)

$$T_i = 12^\circ\text{C}, \phi_i = 70\%$$

$$T_e = 12^\circ\text{C}, \phi_e = 70\%$$

De aanname is dat er 's winters condensatie zal optreden, en 's zomers droging van de constructie. Als je deze randvoorwaarden bekijkt zie je dat we rekenen met een "winter" waarin het 60 dagen lang -10°C is. De "zomer" is erg koel. Later bij de "Aangepaste zomer-winter berekening" wordt er gerekend met meer realistische binnen- en buitencondities. In dit hoofdstuk gaat het vooral om de methode. De randvoorwaarden die hier worden gebruikt geven voor gevel- en dakconstructies toegepast in de woningbouw in ieder geval een veilige hygrische beoordeling.

Voorbeeld : beoordeling gevel binnenisolatie

1. Condensatie in de winter?

De gevel met binnenisolatie die we al eerder hebben gebruikt zal nu volgens de methode van Glaser worden beoordeeld. In de figuur zijn de $p_{\max}$ en p_w -lijnen weergegeven. Vanuit de punten A en B worden nu de raaklijnen aan de maximale dampspanningslijn getrokken. De raaklijnen snijden elkaar in punt C. In punt C is de werkelijke dampspanning dus gelijk aan de maximale dampspanning. Dus de relatieve vochtigheid is hier $\phi=100\%$, en er zal in dit vlak condensatie optreden. **Het werkelijke dampspanningsverloop in de constructie wordt nu gegeven door de lijn A-C-B (gestippelde lijn, zie figuur 4)**

Hoeveel er gaat condenseren kan als volgt berekend worden:

De dampstroom g_{in} vanaf binnen tot aan het condensatievlak is nu:

$$g_{in} = \frac{1170 - 315}{C \cdot 2} = \frac{427,5}{C} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

- Hierbij is $C = 5,3 \cdot 10^9$ (constante: dampweerstand van 1m lucht)
- En de dampweerstand μd -waarde = 2 voor zowel metselwerk als isolatielaag

En de dampstroom g_{uit} vanaf het condensatievlak naar buiten:

$$g_{uit} = \frac{315 - 208}{C \cdot 2} = \frac{53,5}{C} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Het verschil tussen beide dampstroomdichtheden ($g_{in} - g_{uit}$) geeft de hoeveelheid vocht (in kg) die achterblijft en dus in de gevel condenseert. Bij de methode Glaser gaan we er van uit dat deze omstandigheden 60 dagen lang aanwezig zijn. Zo kan de totale hoeveelheid gecondenseerd vocht berekend worden. Deze hoeveelheid, kortweg G-winter genoemd, wordt:

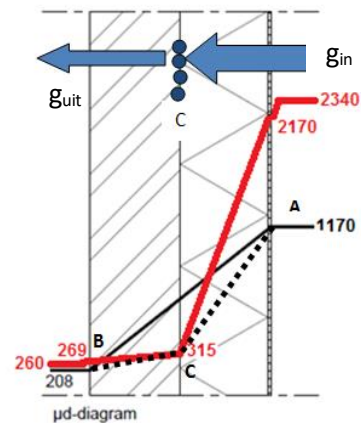
$$G_{winter} = g_{in} - g_{uit} = \frac{(427,5 - 53,5)}{5,3 \cdot 10^9} \cdot 5,184 \cdot 10^6 [\text{s}] \cdot 1000 [\text{g/kg}] =$$

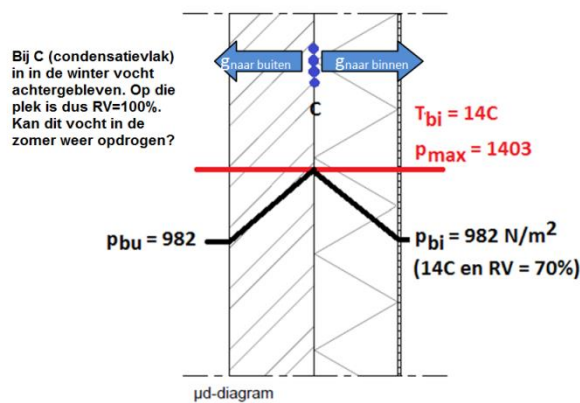
$$G_{winter} = (427,5 - 53,5) \cdot 0,978 = 366 \text{ g/m}^2 \quad \text{gecondenseerd vocht per m}^2 \text{ gevel gedurende 60 dagen.}$$

2. Droging in de zomer?

Op dezelfde manier kan je berekenen, voor de zomercondities, hoeveel vocht in die periode weer uit de constructie zal verdwijnen. Volgens de methode Glaser wordt voor de zomerperiode een constante temperatuur van 12°C zowel binnen als buiten aangehouden. Dit zijn hele ongunstige waarden, waardoor de mogelijkheid tot droging heel kritisch wordt ingeschat. De bijbehorende werkelijke en maximale dampspanningslijn zijn in de volgende figuur met de voorgeschreven constante temperatuur van 12°C eenvoudig te bepalen. Voor de berekening wordt er van uitgegaan dat in de zomer in het condensatievlak de relatieve vochtigheid 100% is, want door de condensatie in de winter is er vocht achtergebleven. Bij deze situatie horen de volgende dampspanningen:

$p_{\max, t.p.v.C} (12^\circ\text{C})$	$= 1403 \text{ N/m}^2$
en voor	
p_i en p_e geldt :	$0,7 \cdot 1403 = 982 \text{ N/m}^2$





Figuur: Voorbeeld binnenisolatie – droging in de zomer

De dampspanning in het condensatievlak is in de zomerperiode van 90 dagen hoger dan de dampspanning binnen en buiten, waardoor vanuit dit vlak waterdamp naar binnen en buiten diffundeert. Dat is te zien aan de helling van de zwarte lijnen in de grafiek. De som van deze dampstromen geeft de maximaal mogelijke verdamping in de zomer volgens:

De dampstroom $g_{\text{naar binnen}}$ vanaf het condensatievlak naar binnen:

$$g_{\text{naar binnen}} = \frac{1403 - 982}{C \cdot 2} = \frac{421}{C \cdot 2} \quad \text{kg/m}^2\text{s}$$

Met $C = 5,3 \cdot 10^9$ (constante: dampweerstand van 1m lucht) en $\mu d = 2$ voor zowel metselwerk als de isolatielaag

En de dampstroom $g_{\text{naar buiten}}$ vanaf het condensatievlak naar buiten is:

$$g_{\text{naar buiten}} = \frac{1403 - 982}{C \cdot 2} = \frac{421}{C \cdot 2} \quad \text{kg/m}^2\text{s}$$

De totale hoeveelheid vocht die in de zomer kan verdampen is de som van deze twee dampstromen. De hoeveelheden staan hierboven nog per seconde. Omrekenen naar de hele periode van 90 dagen ($=7,776 \cdot 10^6$ s):

$$G_{\text{zomer}} = (g_{\text{naar binnen}} + g_{\text{naar buiten}}) \cdot 7,776 \cdot 10^6 \cdot 1000 \text{ g/kg}$$

$$G_{\text{zomer}} = \left(\frac{1403 - 982}{5,3 \cdot 10^9 \cdot 2} \right) + \left(\frac{1403 - 982}{5,3 \cdot 10^9 \cdot 2} \right) \cdot 7,776 \cdot 10^9 = 618 \text{ g/m}^2$$

In de zomerperiode kan er dus meer vocht uit de constructie diffunderen (618 g/m^2) dan er in de winterperiode (366 g/m^2) is ingekomen, zodat er geen gevaar bestaat dat de constructie in de loop van de jaren steeds vochtiger wordt. In het algemeen blijkt dat bij uitwendige scheidingsconstructies, die in gebouwen met normale vochtproductie worden toegepast, het in de winter gecondenseerde vocht in de zomer weer zal verdampen. Maar er zijn constructies die wel heel kritisch zijn!

Wat gebeurt er met het gecondenseerde vocht?

Als er in de isolatie geen capillair watertransport kan plaatsvinden (zoals bij de meeste kunststofschuimen) dan zal het vocht in de winter door het metselwerk worden opgezogen. Aan het oppervlak van het metselwerk zal in eerste instantie het maximale vochtgehalte optreden. Bij baksteen is dat: $\psi_o \approx 0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (ψ is de greekese letter psi). Blijft het condensatieproces doorgaan, dan verandert de vocht verdeling. Na het stoppen van het condensatieproces ontstaat na enige tijd door het capillair transport een situatie waarbij over een zekere dikte van het metselwerk ($= x$) het watergehalte overal **kritisch** is (baksteen: $\psi_{kr.} \approx 0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$). De dikte x is als volgt te bepalen:

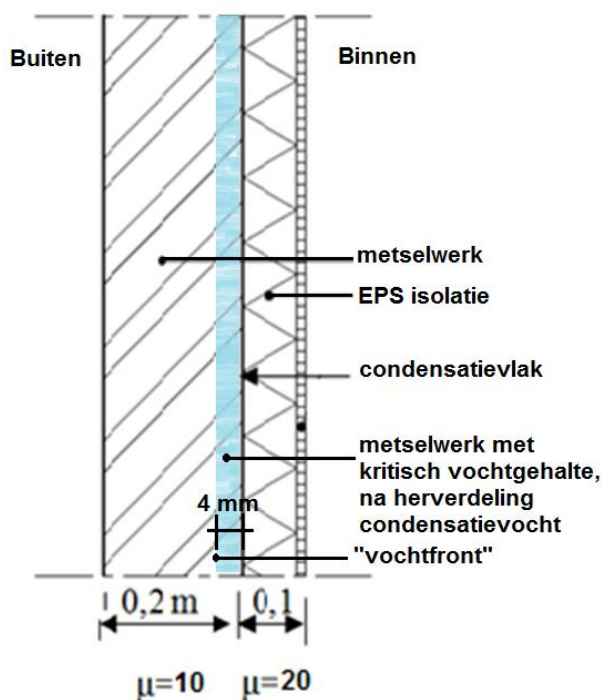
Een laagje van 1 mm water per $\text{m}^2 = 0,001 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}^2 = 0,001 \text{ m}^3$ water
1 m^3 water weegt 1000 kg; dus 0,001 m^3 weegt 1 kg (of 1000 gram).

(6)

Het in de winter gecondenseerde vocht was 366 g/m^2 en komt dus overeen met een waterlaagje van 0,366 mm. Na enige tijd wordt dit water verdeeld over het metselwerk als gevolg van capillaire zuiging. Het water verdeelt zich zodat overal het kritisch vochtgehalte heerst, dus $\psi_{kr.} \approx 0,10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ofwel 0,10 mm water per mm baksteen. De indringingsdiepte "x" wordt dan:

$$x = \frac{0,366 \text{ [mm waterlaag]}}{0,10 \text{ [mm water/ mm materiaaldikte] } (\psi_{kr.})} \approx 4 \text{ mm}$$

Dat wil zeggen dat over een laagje van 4mm vanaf de isolatie het metselwerk "nat" is:



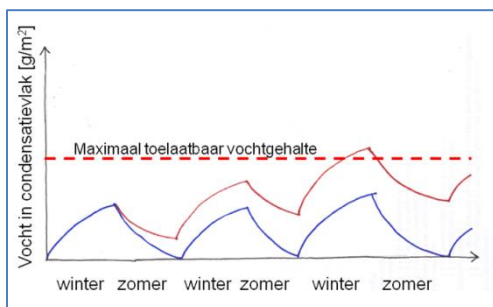
Er is op 4 mm van de binnenzijde van de muur een vrij scherpe overgang van "nat" naar "droog" metselwerk. Vanaf dit vochtfront, gelegen op 4 mm afstand van de binnenzijde van het metselwerk, vindt diffusie naar buiten plaats. Door de kleine indringingsdiepte van 4 mm blijft de hiervoor berekende warmtestroomdichtheid naar buiten ($=g_{uit}$) vrijwel gelijk. Het condensvlak kan bij de berekeningen daarom als één vlak worden beschouwd.

Om deze hoeveelheid vocht in de winter te beoordelen, vergelijken we de berekende 366 g/m^2 vocht met de gevolgen van slagregen op een gemetselde muur. Bij een doorsnee regenbui kan op 1 dag door het voorblad van een spouwmuur 4 à 10 liter water per vierkante meter worden opgenomen. Dit betekent dat 40 tot 100 mm metselwerk kritisch vochtig zal zijn. Volledige droging blijkt bijvoorbeeld in de wintermaand januari uitgesloten. Zelfs in dit geval is dat meestal probleemloos. De berekende hoeveelheid condensaat is dan ook in dit voorbeeld niet problematisch.

18 Het beoordelen van de hoeveelheid condensaat

In het voorbeeld van het vorige hoofdstuk bleek de hoeveelheid gecondenseerd vocht in de winter geen schade te veroorzaken. Bovendien kon al het vocht in de zomer weer verdampen. Wat de grenswaarden zijn bij de vochttechnische beoordeling van scheidingsconstructies, is afhankelijk van de materialen en de opbouw van de constructie (gevel of dak) waarin condensatie voorkomt. Belangrijk is dat.....

- het isolerend vermogen niet sterk achteruit gaat door nat geworden isolatiemateriaal (dus als de stilstaande lucht is vervangen door water).
- de vochtig geworden materialen zelf geen schade oplopen, zoals vorstschade, corrosie, rotting (bij organische materialen zoals hout en hennep), oplossen van stoffen (bijv. lijm) en schimmelvorming.
- rekening moet worden gehouden met al eerder aanwezig vocht (zoals bouwvocht)



Inwendige condensatie is geen probleem als het vocht dat 's winters condenseert 's zomers weer kan verdampen, én als er geen schade aan materialen ontstaat.

Om materiaalschade te voorkomen moet de in de winter gecondenseerde hoeveelheid vocht in de zomer weer kunnen verdwijnen (**eis: $G_{\text{zomer}} \geq G_{\text{winter}}$**). Verder moet G_{winter} afhankelijk van het materiaal waar condensatie optreedt aan een maximum gebonden worden. Voorlopig mogen we aannemen dat de met de methode Glaser berekende waarden voor G_{winter} representatief zijn voor de hoeveelheid condensaat onder wisselende klimaatcondities. Dit zijn grenswaarden die je kan aanhouden voor verschillende materialen en constructies:

- 1) Vorstgevoelige steenachtige materialen:

$$G_{\text{winter}} \leq 50 \cdot \psi_{\text{kr}} [\text{m}^3/\text{m}^3] \cdot d [\text{mm}] \quad \text{g/m}^2$$

- 2) Organische materialen. Als de materialen zijn verlijmd, en de lijm vochtbestendig is:

$$G_{\text{winter}} \leq 0,03 \cdot \rho [\text{kg}/\text{m}^3] \cdot d [\text{mm}] \quad \text{g/m}^2$$

- 3) Organische materialen die niet vochtbestendig zijn verlijmd:

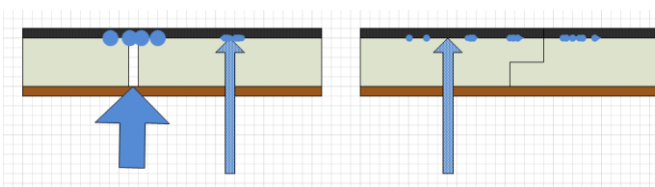
$$G_{\text{winter}} \leq 50 \quad \text{g/m}^2$$

- 4) Isolatiematerialen in dakconstructies:

$$G_{\text{winter}} \leq 500 \quad \text{g/m}^2$$

- 5) Niet-vocht absorberende (isolatie)materialen met naden, waardoor mogelijke lekkage door de naden naar binnen kan plaatsvinden bij platte daken (zie linker figuur hieronder):

$$G_{\text{winter}} \leq 100 \quad \text{g/m}^2$$



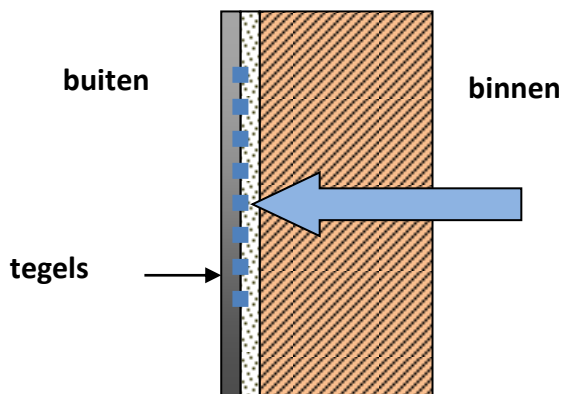
De hoeveelheid condens is erg afhankelijk van de detaillering. In het detail links kan door de gebrekkige luchtdichtheid en de naden tussen de isolatieplaten warme vochtige binnenlucht makkelijk door convectie (luchtstroming) in het dak terecht komen. Hierdoor zal er veel meer condensatie optreden dan berekend met Glaser.

Voorbeeld 1: Geglazuurde tegels

Bij condensatie tegen de binnenzijde van tegels van 5 mm dikte wordt de grenswaarde vanwege mogelijke vorstschade, volgens regel 1 in de tabel (vorstgevoelige steenachtige materialen)

Als gegeven is $\psi_{kr.} = 0,08$ en $d = 5$ mm dan moet ervoor gezorgd worden dat:

$$G_{winter} \leq 50 \cdot 0,08 \cdot 5 = 20 \text{ g/m}^2$$

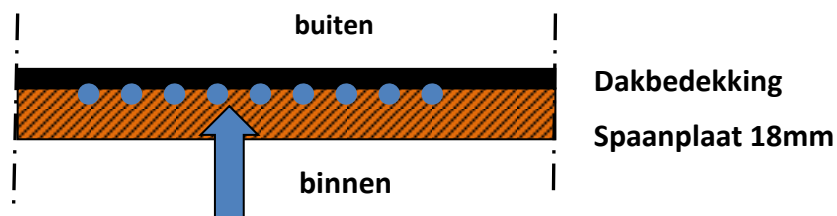


Amsterdam, Haarlemmerweg;
<http://www.nederlandstegelmuseum.nl/>

Voorbeeld 2: plat dak

Condensatie tussen dakbedekking en een dakbeschot van spaanplaat ($\rho = 350 \text{ kg/m}^3$). Tegen de onderzijde van het dakbeschot met een dikte van 18 mm wordt de grenswaarde, volgens regel 2 van de tabel (verlijmde organische materialen).

Maximaal toelaatbaar om schade te voorkomen is dan: $G_{winter} \leq 0,03 \cdot \rho = 0,03 \cdot 350 \cdot 18 \approx 190 \text{ g/m}^2$

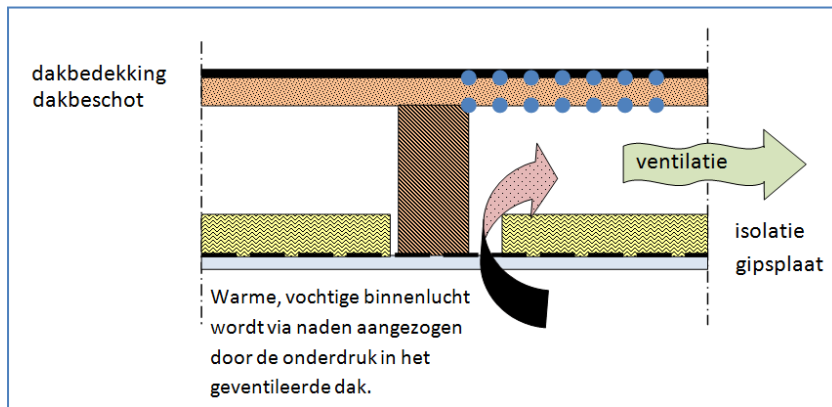


19 Opmerkingen en beperkingen van de methode Glaser

De beperkingen van de methode Glaser zijn het gevolg van de uitgangspunten volgens hoofdstuk 2.

- Zo wordt er steeds van uitgegaan dat de scheidingsconstructie **droog** is bij de start van de berekening. Om constructies die al een hoog vochtgehalte hebben te beoordelen, moeten eerst de gevolgen van droging op het vochttechnisch gedrag van de constructie onderzocht te worden. Het hoge vochtgehalte kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van regen of overmatig watergebruik bij afschotlagen. Het beoordelen hiervan valt buiten de lesstof.

- Verder moeten de constructies aan de binnenzijde perfect **luchtdicht** uitgevoerd worden. Als dit niet het geval is zal, vooral bij constructies met luchtlagen, als gevolg van luchtstroming warme vochtige binnenlucht in korte tijd veel vocht in de constructie brengen. Dit vocht kan tegen een koude laag condenseren en grote schade tot gevolg hebben! Dit laatste is bijvoorbeeld het geval bij een metalen “buitendak”. Omdat een goede luchtdichte afsluiting aan de binnenzijde in de bouwpraktijk soms moeilijk is te realiseren, moeten geventileerde dakconstructies afgeraden worden.



Figuur: Het gevaar van geventileerde (dak)constructies. Als de binnenkant niet goed luchtdicht is, kan warme, vochtige lucht binnendringen. Het vocht condenseert tegen een koude laag aan de buitenkant van de constructie.

- De gevolgen van **nachtelijke uitstraling** kunnen eveneens bij met buitenlucht geventileerde constructies tot vochtproblemen leiden. Een lichtgewicht “buitendak”, dus met kleine warmtecapaciteit en een lage thermische weerstand (vooral bij een metalen dakbedekking) zal ook aan de onderzijde afkoelen. De “warmere vochtige ventilatielucht” van buiten zal tegen de onderzijde van het koude “buitendak” condenseren. Bij het toepassen van een metalen buitendak zullen de hoeveelheden condensaat tot grote vochtproblemen leiden, die lijken op een lekkage!

20 Voorbeelden

Voorbeeld 8.1

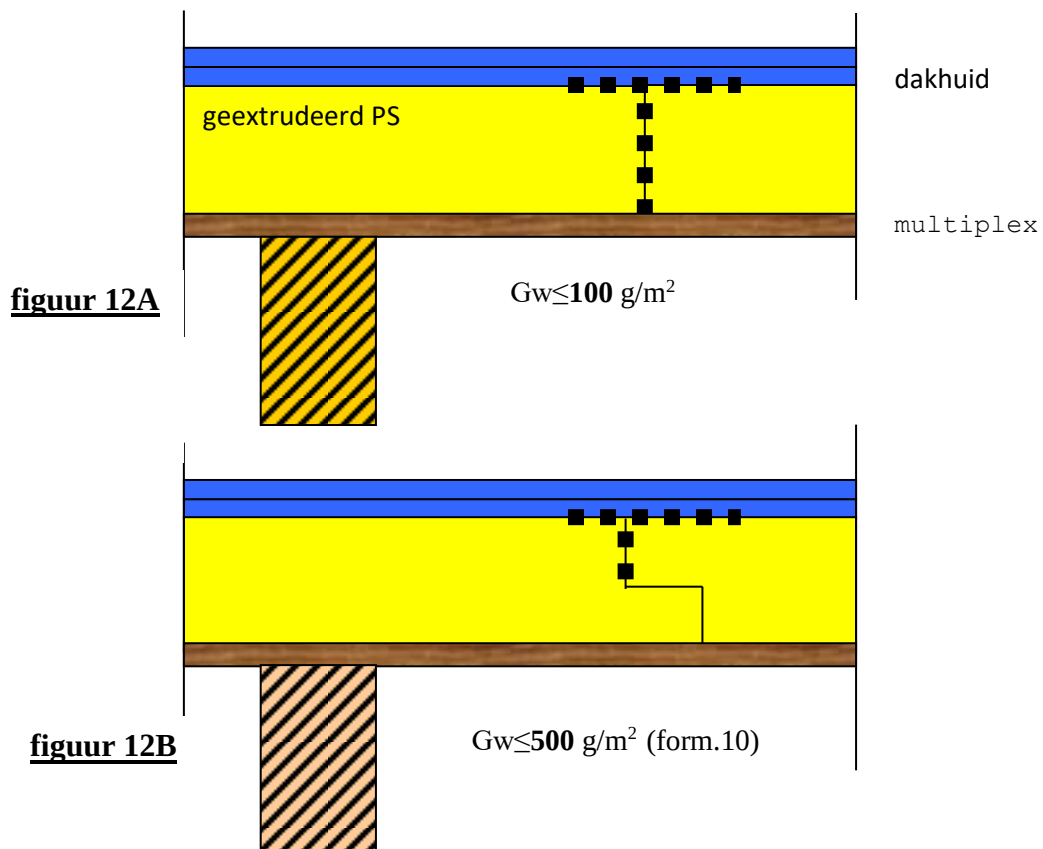
Gegeven:

Een plat houten dak (multiplex met $d = 0,02 \text{ m}$, $\mu = 10$ en $\lambda = 0,2 \text{ SI}$) wordt geïsoleerd met niet-vocht absorberende geëxtrudeerde PS platen van $0,10 \text{ m}$ dikte ($\mu=200$ en $\lambda = 0,035$) en uitgevoerd met stompe naden volgens figuur 12A. De dakbedekking heeft een μ -waarde van 60 m en een thermische isolatie weerstand van $0,04 \text{ SI}$. De rekenwaarden voor het binnen-en buitenklimaat voor de winterperiode zijn overeenkomstig hoofdstuk 5:

Winter: 60 dagen ($=60 \cdot 24 [\text{h/dag}] \cdot 3600 [\text{s/h}] = 5,184 \cdot 10^6 [\text{s}]$)

$T_i = 20^\circ\text{C}$, $\phi_i = 50\%$

$T_e = -10^\circ\text{C}$, $\phi_e = 80\%$



Gevraagd:

Beoordeel de hoeveelheid condensaat in de winterperiode van de gegeven dakconstructie (volgens

figuur 12A) met behulp van de methode Glaser.

Oplossing:

a.Bepaling μ d-waarden en de optredende binnen- en buitendampspanningen

$$\mu\text{d-dakhuid} = 60 \text{ m}$$

$$\mu\text{d-isolatie} = 200 \cdot 0,10 = 20 \text{ m}$$

$$\mu\text{d-dakbeschot} = 10 \cdot 0,02 = 0,2 \text{ m}$$

$$p_i = 0,5 \cdot 2340 \text{ (} p_{\text{max. bij } 20^\circ \text{ C)} = 1170 \text{ N/m}^2$$

$$p_e = 0,5 \cdot 260 \text{ (} p_{\text{max. bij } -10^\circ \text{ C)} = 208 \text{ N/m}^2$$

b.Bepaling van de maximale dampspanningen in de dakconstructie

$$r_c = \sum d/\lambda = 0,04 + 0,10/0,035 + 0,02/0,2 = 0,04 + 2,86 + 0,10 = 3,00 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

$$r_{\text{tot.}} = 0,13 (=r_i) + 3,00 (=r_c) + 0,04 (r_e) = 3,17 \text{ SI}$$

$$U = 1/3,17 \text{ (} 1/r_{\text{tot.}} \text{)} = 0,315 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$$

$$q = 30/3,17 \text{ (} \Delta T/r_{\text{tot.}} \text{)} = 9,46 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$T_{i0} = 20 - 0,13 \cdot 9,46 = 18,8^\circ\text{C} \rightarrow p_{i0,\text{max}} = 2170 \text{ N/m}^2$$

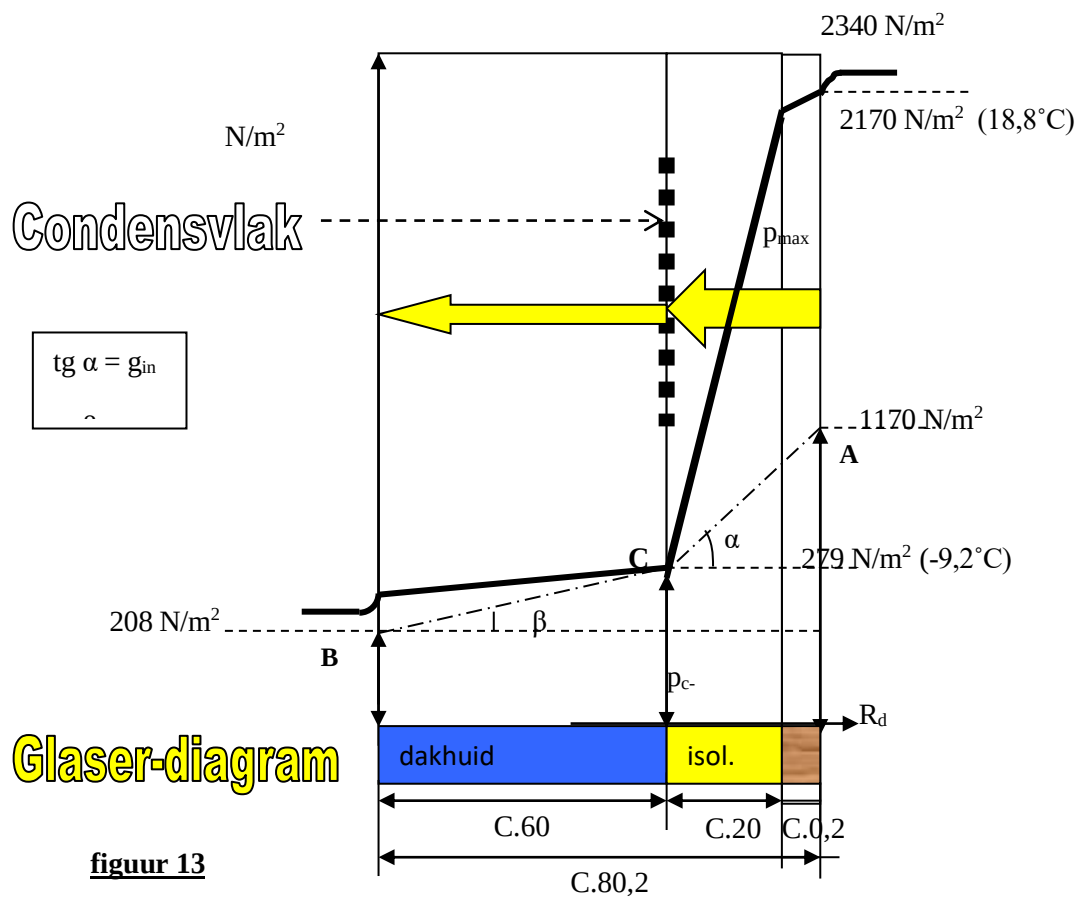
$$T_{\text{bovenzijde dakbeschot}} = 20 - (0,13+0,10) \cdot 9,46 = 17,8^\circ\text{C} \rightarrow p_{\text{max}} = 2034 \text{ N/m}^2$$

$$T_{\text{onderzijde dakhuid}} = 20 - (0,13+0,10+2,86) \cdot 9,46 = -9,2^\circ\text{C} \rightarrow p_{c,\text{max}} = 279 \text{ N/m}^2$$

$$T_{e0} = -10 + 0,04 \cdot 9,46 = -9,6^\circ\text{C} \rightarrow p_{e0,\text{max}} = 269 \text{ N/m}^2$$

c. Teken het Glaser-diagram

Voor het tekenen van het diagram en de bepaling van de hoeveelheid condensaat blijken alleen de hiervoor berekende vetgedrukte waarden relevant.



d. Bepaling van het condensatievlak en de hoeveelheid condensaat

In figuur 13 zijn de p_{max} - en p_w -lijnen weergegeven. Vanuit de punten A en B worden nu de raaklijnen aan de maximale dampspanningslijn getrokken. De raaklijnen snijden elkaar in punt C. In punt C is de $\phi=100\%$ zodat in dit vlak condensatie optreedt. Het condensatievlak tussen dakhuid en isolatie wordt zeer dun verondersteld. Het werkelijke dampspanningsverloop in de constructie wordt nu gegeven door

de lijn A-C-B

De hoeveelheid condens in de winterperiode wordt:

dampdiffusie naar **binnen** (tg α):

$$g_{in} = \frac{1170 - 279}{C(=5,3 \cdot 10^9) \cdot 20,2} = \frac{(1170 - 279) / 20,2}{C} = \frac{44,11}{C} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

dampdiffusie naar **buiten** (tg β):

$$g_{uit} = \frac{279 - 208}{C \cdot 60} = \frac{1,18}{C} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

Het verschil tussen beide dampstroomdichtheden ($g_{in} - g_{uit}$) geeft de hoeveelheid vocht (in kg) die in één vierkante meter constructie per seconde condenseert. De berekende hoeveelheid condensaat in de winter wordt:

$$G_{winter} = (+44,11 - 1,18) \cdot \frac{5,184 \cdot 10^6 [\text{s}] \cdot 1000 [\text{g/kg}]}{5,3 \cdot 10^9 (=C)} = (+44,11 - 1,18) \cdot 0,978 = + \underline{42,0 \text{ g/m}^2}$$

Deze hoeveelheid komt overeen met 0,04 mm vrij water!

Opmerkingen bij voorbeeld 8.1:

1-De dakconstructie voldoet, omdat de hoeveelheid condensaat in de winter lager dan de eis van 100 g/m² is. Later zal blijken dat voor de meeste binnenklimaten (p_i jaargemiddeld $\leq 1400 \text{ N/m}^2$) de hoeveelheid condensaat van de winterperiode in de aansluitende zomerperiode weer zal verdampen! Voor gebouwen met hoge vochtproducties, zoals zwembaden, wasserijen e.d. geldt dit uiteraard niet.

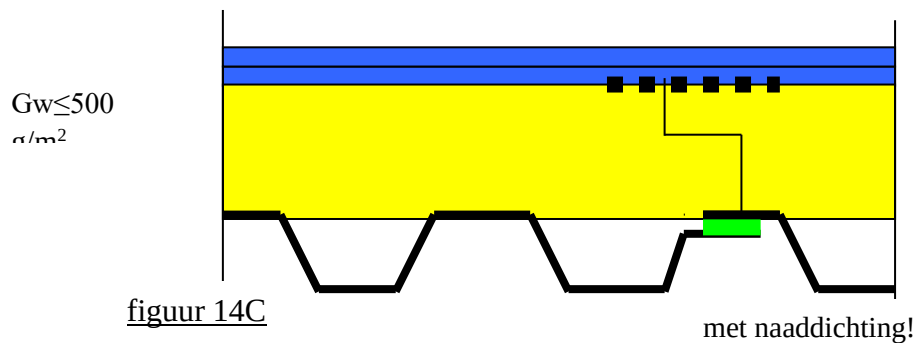
2-Indien de geëxtrudeerde PS platen worden vervangen door 0,12 m dikke minerale wolplaten (met de volgende gegevens: $\mu=2$, $\lambda=0,042$ geeft $\mu d=2 \cdot 0,12=0,24 \text{ m}$) met dezelfde isolatiewaarde ($d/\lambda = 0,12/0,042 = 2,86$) zal de hoeveelheid condensaat flink toenemen:

dampdiffusie naar **binnen** (tg α):

$$g_{in} = \frac{1170 - 279}{C \cdot (0,24+0,20)} = \frac{2025}{C} \text{ kg/m}^2\text{s} \quad \text{en}$$

$$G_{winter} = (+2025 - 1,18) \cdot 0,978 = + \underline{1979,3 \text{ g/m}^2} \text{ (bijna 2 mm vrij water)} \gg 100 \text{ g/m}^2$$

Deze hoeveelheid kan teruggebracht worden tot de eis door boven op het dakbeschot een dampremmende laag toe te passen. Om aan de eis van 100 g/m² te voldoen moet **de totale μd_i van**



4-Indien de geëxtrudeerde PS (XPS) platen van de dakconstructie (voorbeeld 8.1) worden vervangen door 0,10 m geëxpandeerde PS platen (EPS platen met $\mu=20$ in plaats van 200, rest blijft gelijk) zal de hoeveelheid condensaat toenemen:

dampdiffusie naar **binnen** (tg α):

$$g_{in} = \frac{1170 - 279}{C \cdot (20,0,10 + 0,20)} = \frac{405}{C} \text{ kg/m}^2\text{s} \quad \text{en}$$

$$G_{winter} = (+405 - 1,18) \cdot 0,978 = +394,9 \text{ g/m}^2 (0,39 \text{ mm vrij water}) > 100 \text{ g/m}^2$$

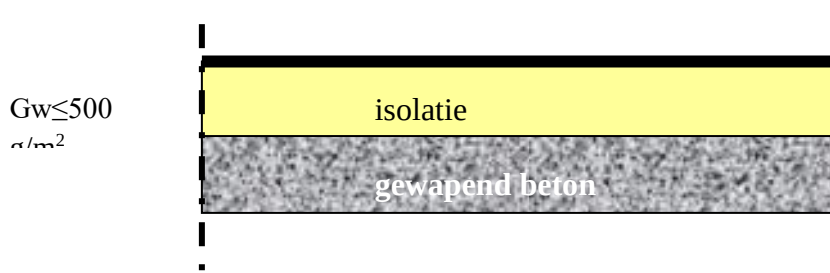
Deze hoeveelheid kan teruggebracht worden door boven op het dakbeschot een dampremmende laag toe te passen. Om aan de eis van 100 g/m^2 te voldoen moet de dampremmende laag minimaal een μ -waarde hebben van $8,6 - (2,0 + 0,2) = 6,4 \text{ m}$ (zie opmerking 2). Bij toepassing van EPS met randprofilering volgens figuur 12B is de dampremmende laag overbodig (G_{winter} -eis is 500 g/m^2).

5-Bij het verwerken van niet-vocht absorberende isolatiematerialen in voornoemde “warmdak” constructies is het toepassen van een dampdrukverdelende laag onder de dakhuid of een (gedeeltelijk) losliggende dakhuid aan te bevelen. De oplopende dampdruk onder de dakhuid kan bij zonbestraling gelijkmatig verdeeld worden, waardoor blaasvorming kan worden voorkomen.

Voorbeeld 8.2

Gegeven:

Een plat dak van gewapend beton ($d = 0,20$ m, $\mu = 35$ en $\lambda = 2,0$ SI) wordt geïsoleerd met minerale wolplaten met harde persing van $0,20$ m dikte ($\mu=2$ en $\lambda = 0,04$) volgens figuur 15 . De dakbedekking heeft een μ d-waarde van 60 m en een thermische isolatie weerstand van $0,04$ SI. De rekenwaarden voor het binnen-en buitenklimaat voor de winterperiode zijn overeenkomstig voorgaande voorbeeld.



figuur 15

Gevraagd:

Beoordeel de hoeveelheid condensaat **in de winterperiode** van de gegeven dakconstructie (volgens figuur 15) met behulp van de methode Glaser.

Oplossing:

a. Bepaling μ d-waarden en de optredende binnen- en buitendampspanningen

$$\mu\text{d-dakhuid} = 60 \text{ m}$$

$$\mu\text{d-isolatie} = 2 \cdot 0,20 = 0,4 \text{ m}$$

$$\mu\text{d-dakbeschot} = 35 \cdot 0,2 = 7,0 \text{ m}$$

$$p_i = 0,5 \cdot 2340 (p_{\text{max. bij } 20^\circ \text{C}}) = 1170 \text{ N/m}^2$$

$$p_e = 0,5 \cdot 260 (p_{\text{max. bij } -10^\circ \text{C}}) = 208 \text{ N/m}^2$$

b. Bepaling van de maximale dampspanningen in de dakconstructie

$$r_c = \sum d/\lambda = 0,04 + 0,20/0,04 + 0,20/2,0 = 0,04 + 5,0 + 0,10 = 5,14 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

$$r_{\text{tot.}} = 0,13 (=r_i) + 5,14 (=r_c) + 0,04 (r_e) = 5,31 \text{ SI}$$

$$q = 30/5,31 (\Delta T/r_{\text{tot.}}) = 5,65 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$T_{i0} = 20 - 0,13 \cdot 5,65 = 19,3^\circ \text{C} \rightarrow p_{i0,\text{max}} = 2240 \text{ N/m}^2$$

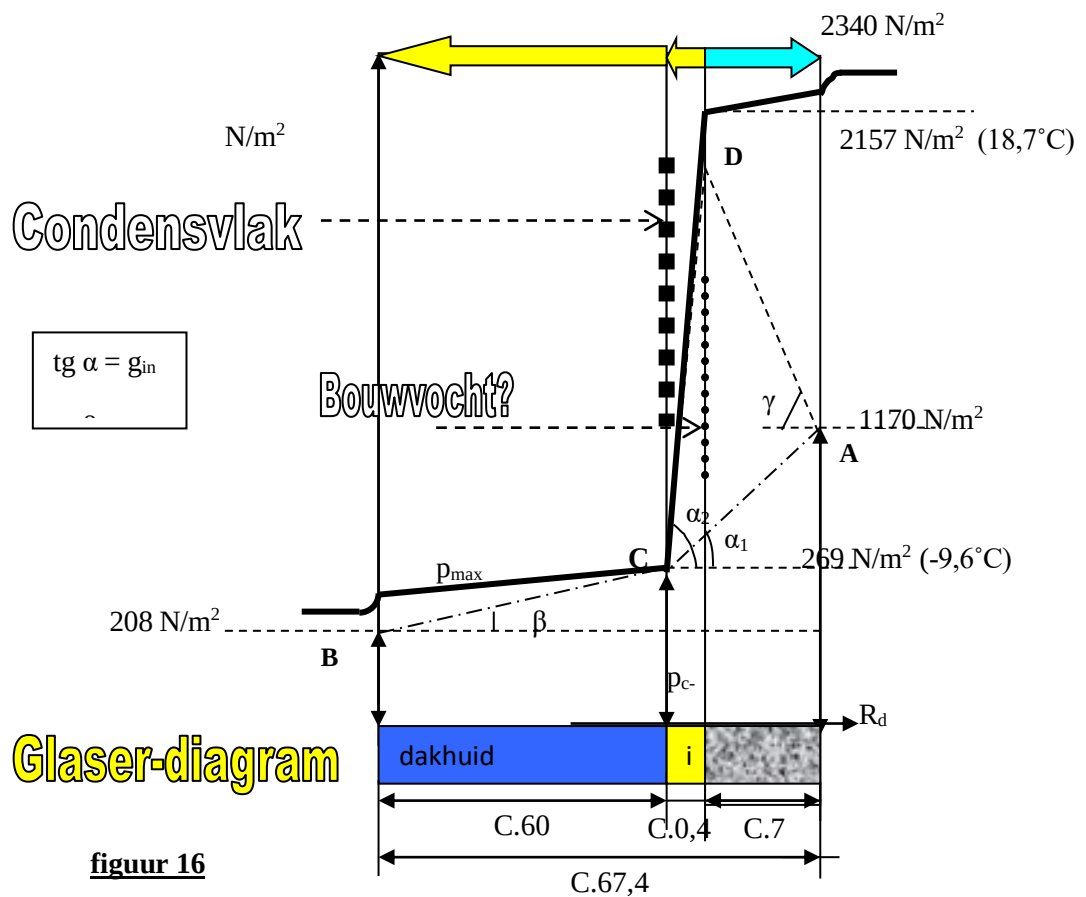
$$T_{\text{bovenzijde beton}} = 20 - (0,13 + 0,10) \cdot 5,65 = 18,7^\circ \text{C} \rightarrow p_{\text{max}} = 2157 \text{ N/m}^2$$

$$T_{\text{onderzijde dakhuid}} = 20 - (0,13 + 0,10 + 5,0) \cdot 5,65 = -9,6^{\circ}\text{C} \rightarrow p_{c.\text{max}} = 269 \text{ N/m}^2$$

$$T_{\text{eo}} = -10 + 0,04 \cdot 5,65 = -9,8^{\circ}\text{C} \rightarrow p_{\text{eo.max}} = 264 \text{ N/m}^2$$

c. Teken het Glaser-diagram

Voor het tekenen van het diagram en de bepaling van de hoeveelheid condensaat blijken alleen de hiervoor berekende vetgedrukte waarden relevant. De p-max lijn kan schetsmatig in analogie met de temperatuurlijn in het diagram geschetst worden. Alleen de vorm van de p-max lijn en de numerieke waarde van p-max ter plaatse van het condensvlak is van belang.



d. Bepaling van het condensatievlak en de hoeveelheid condensaat

In voorgaande figuur 16 zijn de p_{max}, p_w-lijnen en het condensvlak weergegeven. Onder aanname dat geen bouwvocht aanwezig is wordt de hoeveelheid condens overeenkomstig vorige voorbeeld in de

winterperiode:

$$G_{\text{winter}} = [(1170-269)/7,4 - (269-208)/60] \cdot 0,978 = (+121,76-1,02) \cdot 0,978 = +118,1 \text{ g/m}^2$$

Deze hoeveelheid voldoet aan de eis van maximaal 500 g/m²

Opmerkingen bij voorbeeld 8.2:

1-De dakconstructie voldoet, omdat de aanwezigheid van bouwvocht is uitgesloten. Indien voor het aanbrengen van de dakisolatie echter op de betonnen draagconstructie een **natte** afschotlaag is aangebracht zal ter plaatse van deze laag (vlak tussen draagconstructie en isolatie) de relatieve vochtigheid 100% bedragen. Door verdamping zal deze relatieve vochtigheid verminderen. Als we aannemen dat tijdens de winterperiode met gegeven rekenwaarden de relatieve vochtigheid ter plaatse van de afschotlaag 100% blijft, zal er onder de dakhuid aanzienlijk meer condenseren. Een **indicatie** van deze hoeveelheid na het eerste jaar van verdamping wordt als volgt bepaald (zie figuur 16):

$$G_{\text{winter } 1^{\text{e}} \text{ jaar}} = \text{tg } \alpha_2 - \text{tg } \beta = [(2157-269)/0,4 - (269-208)/60] \cdot 0,978 = (+4720-1,02) \cdot 0,978 = +4615 \text{ g/m}^2$$

Een indicatie van de verdamping van vocht **uit de afschotlaag** onder gegeven rekenwaarden en een gelijkblijvende relatieve vochtigheid van 100% is:

$$G_{\text{verdamp. } 1^{\text{e}} \text{ jaar}} = -\text{tg } \alpha_2 - \text{tg } \gamma = [-(2157-269)/0,4 - (2157-1170)/7] \cdot 0,978 = (-4720-141) \cdot 0,978 = -4754 \text{ g/m}^2$$

De hoeveelheid condensaat na de eerste winter kan teruggebracht worden tot de eis door **boven op de afschotlaag** een dampremmende laag toe te passen. Om na de eerste winter aan de eis van 500 g/m² te voldoen en uitgaande van voornoemd vereenvoudigde verdampfingsproces moet de totale **µd van isolatie en dampremmende laag** voldoen aan:

$$G_{\text{winter } 1^{\text{e}} \text{ jaar}} = [(2157 - 269) / \mu\text{d-tot} - 1,02] \cdot 0,978 = 500 \text{ g/m}^2 \rightarrow \mu\text{d-tot} = 3,7 \text{ m}$$

De dampremmende laag moet minimaal een µd-waarde hebben van 3,7-0,4 = 3,3 m.

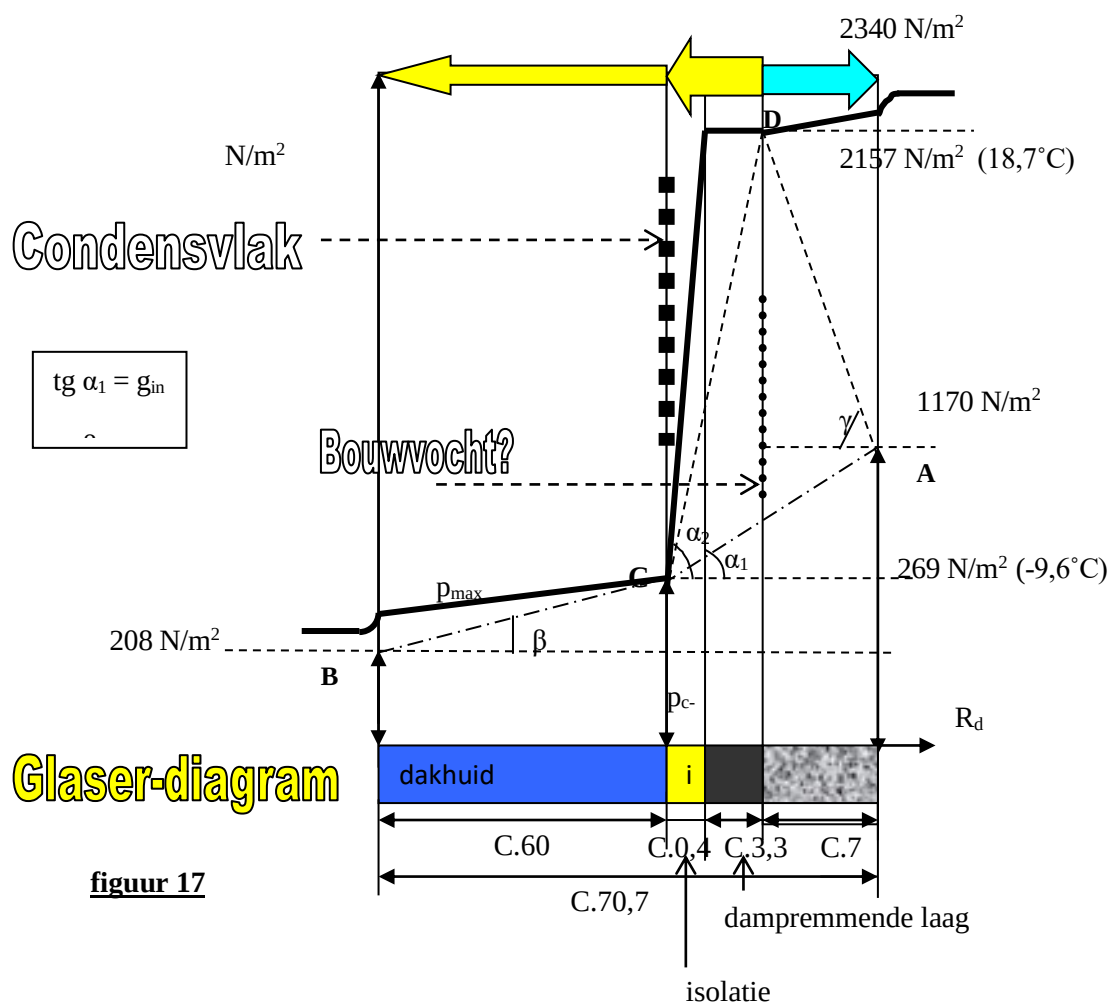
De verdamping van vocht uit de afschotlaag bij toepassing van een dampremmende laag op deze laag zal onder gegeven rekenwaarden en een gelijkblijvende relatieve vochtigheid van 100% behoorlijk dalen:

$$G_{\text{verdamp. } 1^{\text{e}} \text{ jaar}} = -\text{tg } \alpha_2 - \text{tg } \gamma = [-(2157-269)/3,7 - (2157-1170)/7] \cdot 0,978 = (-510-141) \cdot 0,978 = -637 \text{ g/m}^2$$

Door de dampremmende laag zal het dus langer duren voordat al het bouwvocht uit de dakconstructie verdampt is.

Het Glaser-diagram met dampremmende laag is in figuur 17 weergegeven.

2-Door het toepassen van een dampdicht isolatiemateriaal (µd > 3,7 m) met profilering aan de zijkant is een dampdichte laag overbodig. Een nog betere manier is de natte afschotlaag cq. afwerklaag tot een minimum te beperken door het toepassen van afschot isolatieplaten.



figuur 17

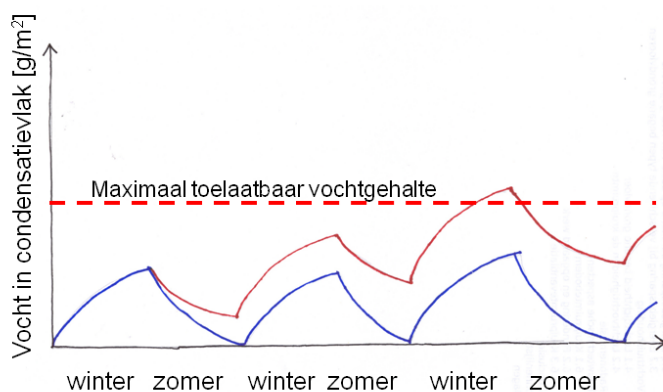
21 Aangepaste glaserberekening

De Glasermethode gaat uit van lage buitentemperaturen (-10°C) in de winter, en is daarom wel erg kritisch. In werkelijkheid is de gemiddelde temperatuur tijdens het stookseizoen in Nederland veel hoger (5 à 6°C). De hoeveelheid condensatie die wordt berekend met Glaser is daarom te hoog.

Voor nauwkeurige resultaten is een simulatieprogramma nodig waarin vochttransport en warmtetransport worden gecombineerd. Zo'n complexe rekenmethode valt niet onder de hbo-bouwfysica lesstof.

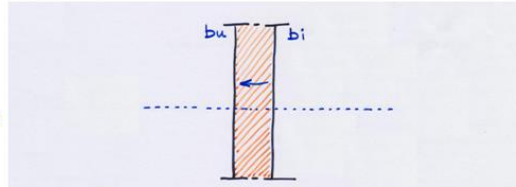
Wat we wel kunnen doen is de Glaser methode aanpassen. Als we uitgaan van de gemiddelde omstandigheden binnen en buiten de woning gedurende de winter en zomer, dan krijgen we een redelijke schatting van de vochthuishouding van gevel of dak. Omdat dampdiffusie een traag proces is, is het werken met gemiddelde omstandigheden over langere perioden toegestaan. We kunnen daarmee nagaan of er zeker wel, of zeker geen problemen ontstaan. Maar als de situatie kritisch is, dat dit nauwkeuriger moet worden bekeken.

Inwendige condensatie is geen probleem als er geen schade ontstaat en als het vocht in de zomer weer kan opdrogen



1. Glaser

- Winter (60 dagen)
 $T_a = -10^\circ\text{C}$, $\phi_a = 80\%$
- Zomer (90 dagen)
 $T_a = 12^\circ\text{C}$, $\phi_a = 70\%$



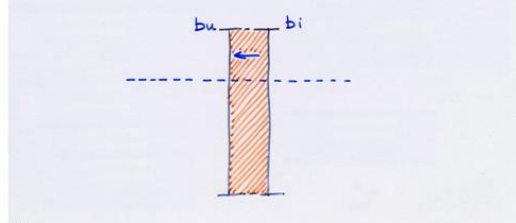
- Winter
 $T_i = 20^\circ\text{C}$, $\phi_i = 50\%$
- Zomer
 $T_i = 12^\circ\text{C}$, $\phi_i = 70\%$

2. Maandelijkse berekening



3. Aangepaste winter/zomer berekening

- Winter (5 mnd)
 $T_a = 6^\circ\text{C}$, $\phi_a = 90\%$
- Zomer (5 mnd)
 $T_a = 14/16^\circ\text{C}$, $\phi_a = 70\%$



- Winter
 $T_i = 20^\circ\text{C}$, $p_{i, \text{gem}}$
- Zomer
 $T_i = 12^\circ\text{C}$, $p_{i, \text{gem}}$

Rekenmethoden voor het beoordelen van de vochtthuishouding van een bouwdeel. Hieronder volgt een overzicht van de randvoorwaarden zoals die gebruikt worden bij de aangepaste zomer/winter berekening:

- Winter:
 - $T_a = 6^\circ\text{C}$; $T_i = 20^\circ\text{C}$;
 - $\phi_a = 90\%$; $p_{i, \text{winter}} = p_i$ (jaargemiddelde);
 - duur 5 maanden à 30 dagen
- Zomer:
 - $T_a = 14^\circ\text{C}$ (gevels) of 16°C (daken); $T_i = 12$ of 20°C ;
 - $\phi_a = 70\%$; $p_{i, \text{zomer}} = p_i$ (jaargemiddelde);
 - duur 5 maanden à 30 dagen
- Eisen:
 - Maximale wateraccumulatie in een winter: $G_{\text{winter}} < 500 \text{ g/m}^2$
 - Als inwendige condensatie plaatsvindt in materiaallagen van hout of houtproducten: $G_{\text{winter}} < 200 \text{ g/m}^2$
 - Daarnaast $G_{\text{zomer}} > G_{\text{winter}}$

Voor het berekenen van condensatie in de winter is de rekenstrategie hieronder beschreven. De theorie is gelijk aan die van de methode Glaser.

Winter: rekenstrategie

1. Bepaal kwalitatief waar condensatie op zal treden:

- Schets temperatuurverloop
- Schets (gecorrigeerd) dampspanningsverloop (μd -diagram)

2. Bereken T_c en $p_{\max,c}$ (in het condensatievlak)

$$\rightarrow q = \frac{T_i - T_a}{R_{\text{tot}}} = \frac{T_i - T_c}{\Delta R_{i-c}} \rightarrow T_c, \text{ en met tabel } p_{\max,c}$$

3. Bereken $g_{\text{cond}} = g_{i \rightarrow c} - g_{c \rightarrow a}$

$$\rightarrow g_{\text{cond}} = \frac{p_i - p_c}{(\sum \mu d)_{i \rightarrow c} \cdot 5,3 \cdot 10^9} - \frac{p_c - p_a}{(\sum \mu d)_{c \rightarrow a} \cdot 5,3 \cdot 10^9} \quad [\text{kg/m}^2\text{s}]$$

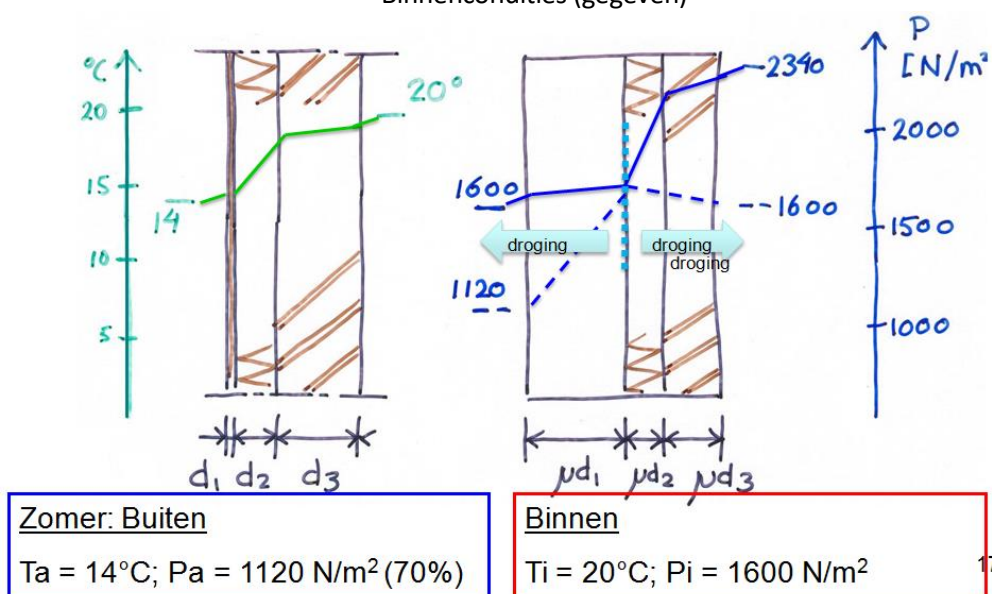
4. Omrekenen naar $\rightarrow G_{\text{winter}} = g_{\text{cond}} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 5 \cdot 1000$ [g/m²] g

Vervolgens wordt berekend hoeveel droging er in de zomer optreedt. LET OP: hierbij wordt ervan uitgegaan van dat er **in het condensatievlak zich vocht heeft opgehoopt gedurende de winter**. Dit vocht kan in de zomer periode in principe naar twee kanten verdampen: vanuit het condensatie vlak naar de binnenkant van de constructie, én vanuit het condensatievlak naar buiten toe.

In de figuur hieronder is voor een gevel te zien wat er 's zomers gebeurt. In de winter is er condens ontstaan achter de pleisterlaag. Er bevindt zich op die plek dus vocht (water). We kunnen er daarom van uit gaan dat de dampspanning daar maximaal is (relatieve vochtigheid 100%). Dat duurt zolang er nog vocht aanwezig is.

De rekensituatie is nu:

- buitencondities (gegeven)
- In het condensatievlak ($p = p_{\max}$)
- Binnencondities (gegeven)



Vanuit het condensatievlak vindt droging plaats naar de buitenzijde, én naar de binnenzijde van de gevel. Dat is te zien aan het verloop van de gecorrigeerde dampspanningslijn: die loopt vanuit het condensatievlak in twee richtingen naar beneden af.

Zomer: rekenstrategie

1. Bepaal kwalitatief het temperatuur- en dampspanningsverloop:

→ In het condensatievlak (winter) geldt $p = p_{\max,c}$
als resultaat van condensatie in de winter!

2. Bereken T_c en $p_{\max,c}$ (in het condensatievlak)

3. Bereken $g_{\text{verdamping}} = g_{c \rightarrow i} + g_{c \rightarrow a} =$ LET OP: verschil met winter

$$\rightarrow g_{\text{verdamping}} = \frac{p_c - p_i}{(\sum \mu d)_{i \rightarrow c} \cdot 5,3 \cdot 10^9} + \frac{p_c - p_a}{(\sum \mu d)_{c \rightarrow a} \cdot 5,3 \cdot 10^9}$$

4. Omrekenen naar G_{zomer} (5 maanden)

$$\rightarrow G_{\text{zomer}} = g_{\text{verdamping}} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 5 \cdot 1000 \text{ [g/m}^2\text{]}$$

15

22 Literatuur

1. Dictaat 70 Bouwfysische Aspecten van Uitwendige Scheidingsconstructies, HU, Aart Schuur, 1995
2. Dictaat 125 Inwendige Condensatie, HU, Aart Schuur, 2000
3. Hens, H en A. Janssens: Bouwfysische aspecten van metalen daken, tijdschrift Bouwfysica, vol.9, 1998 no.1.
4. KIVV- technologisch instituut, genootschap Bouwfysica i.s.m. Nederlands Vlaamse Bouwfysica Vereniging: Fysisch gedrag van hellende daken, studiedag, Antwerpen 4 dec. 1991
5. WTCB- tijdschrift Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, Vochtgedrag van bouwelementen met toepassing op daken, Brussel maart 1982, no.1
6. Tietz, ing.A: Vocht bij daken en gevels in dunne plaat, lezing 9, symposium gevels en klimaat, 27 sept. 1994, TU Delft.
7. Vos, B.H. en E. Tammes: Warmte en vochttransport in bouwconstructies, Kluwer Technische Boeken.
8. Seiffert, K: Wasserdampdiffusion im Bauwesen, Wiesbaden, Bauverlag, 1967.
9. SBR-rapport no.41 : Het niet-geventileerde platte dak, Stichting Bouwresearch, 1974

<http://bouwwereld.nl/bouwkennis/bouwschade/ondeugdelijk-dakontwerp-veroorzaakt-problemen/>
voorbeeld probleem, met analyse, details en foto's

<http://bouwwereld.nl/bouwkennis/bouwschade/houtrot-na-dakrenovatie/>
foute renovatie met analyse en een paar foto's

23 Dampspanningstabel

Tabel 9

Maximale waterdampconcentratie en waterspanning in afhankelijkheid van de temperatuur

$c_{\max}$ g/m ³	Temp. °C	De verzadigde waterdampspanning p_s in N/m ²									
		,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
39,56	+ 35	5627	5657	5688	5720	5752	5784	5816	5848	5880	5912
37,54	34	5323	5352	5381	5412	5443	5472	5503	5533	5564	5595
35,62	33	5033	5061	5090	5118	5146	5176	5205	5234	5264	5293
33,77	32	4757	4785	4812	4838	4866	4893	4921	4949	4977	5005
32,02	31	4496	4521	4546	4573	4598	4625	4650	4677	4704	4730
30,34	30	4245	4270	4294	4319	4344	4369	4393	4418	4443	4469
28,73	29	4007	4031	4054	4078	4102	4125	4149	4173	4197	4221
27,21	28	3782	3803	3826	3848	3871	3893	3915	3939	3962	3984
25,75	27	3567	3588	3610	3630	3651	3674	3695	3716	3738	3760
24,36	26	3363	3383	3403	3423	3443	3463	3484	3504	3530	3546
23,05	25	3169	3188	3207	3226	3246	3264	3284	3303	3323	3343
21,78	24	2985	3003	3022	3040	3058	3076	3095	3114	3132	3151
20,55	23	2811	2828	2844	2861	2879	2896	2915	2932	2949	2967
19,43	22	2645	2661	2677	2693	2710	2727	2744	2760	2778	2793
18,35	21	2488	2504	2518	2535	2549	2565	2581	2597	2613	2629
17,28	20	2340	2353	2368	2382	2397	2412	2428	2442	2457	2473
16,30	19	2198	2212	2225	2240	2253	2268	2281	2296	2310	2325
15,37	18	2065	2077	2090	2104	2117	2130	2144	2157	2170	2184
14,47	17	1938	1950	1962	1978	1988	2001	2014	2026	2034	2052
13,65	16	1818	1830	1842	1854	1866	1878	1890	1902	1914	1926
12,85	15	1706	1717	1728	1739	1750	1761	1773	1784	1796	1808
12,07	14	1599	1609	1619	1630	1641	1651	1662	1673	1684	1696
11,35	13	1498	1507	1518	1527	1538	1547	1558	1569	1578	1589
10,65	12	1403	1413	1422	1431	1441	1450	1459	1469	1478	1489
10,01	11	1313	1321	1331	1339	1349	1358	1366	1375	1385	1394
9,40	10	1229	1237	1245	1253	1262	1270	1278	1287	1295	1305
8,82	9	1148	1156	1164	1172	1179	1187	1195	1203	1212	1220
8,27	8	1072	1080	1087	1095	1103	1110	1118	1126	1132	1140
7,76	7	1002	1008	1016	1023	1030	1036	1044	1051	1059	1066
7,28	6	935	942	948	955	962	968	975	982	988	995
6,83	5	872	879	884	891	898	903	910	916	923	928
6,40	4	814	819	826	831	836	843	848	855	860	867
5,99	3	758	763	768	775	780	786	791	796	802	808
5,59	2	706	711	716	722	727	732	736	742	747	752
5,21	1	657	661	667	671	676	681	685	691	696	701
4,84	+ 0	611	615	620	624	628	633	637	643	647	652
4,84	- 0	611	605	600	596	591	587	581	576	572	567
4,48	- 1	563	557	553	548	544	539	535	531	525	521
4,14	- 2	517	513	508	504	500	496	492	488	484	480
3,82	- 3	476	472	468	464	460	456	452	448	444	440
3,53	- 4	437	433	429	425	423	419	415	412	408	404
3,26	- 5	401	397	395	391	388	384	381	377	375	371
3,01	- 6	368	365	361	359	356	352	349	347	344	340
2,77	- 7	337	335	332	329	327	323	320	317	315	312
2,55	- 8	309	307	304	301	299	296	293	291	288	285
2,34	- 9	283	281	279	276	273	271	269	267	264	261
2,15	- 10	260	257	255	252	251	248	245	244	241	240
1,98	- 11	237	235	233	231	229	227	225	223	221	219
1,82	- 12	217	215	213	211	209	207	205	204	201	200
1,67	- 13	199	196	195	193	191	189	188	185	184	183
1,53	- 14	181	179	177	176	175	173	171	169	168	167
1,41	- 15	165	164	163	160	159	157	156	155	153	152
1,29	- 16	151	149	148	147	145	144	143	141	140	139
1,18	- 17	137	136	135	133	132	131	129	128	127	125
1,08	- 18	124	124	123	121	120	119	117	116	116	115
0,99	- 19	113	112	111	111	109	108	107	105	105	104
0,90	- 20	103	101	101	100	98,7	98,7	97,4	96,0	94,7	94,7

Vochtklachten woningen uit jaren '70 en '80

28-03-2008; ir. H. Versteeg LBP; www.bouwwereld.nl

EP-advies combineren met bouwfysica

Woningen uit de jaren '70 en '80 hebben diverse bouwfysische eigenschappen die tot problemen kunnen leiden en die bij renovatie aandacht behoeven. Een EP-maatwerkadvies combineert de vereiste energiecificering met een onderzoek van deze knelpunten.

Woningen uit de jaren '70 en '80 zijn uitermate gevoelig voor een onvoldoende beheerste vochtuithouding. In de praktijk doen zich veel vochtklachten voor, zoals schimmelaantasting op meubilair, wanden en plafond. Deze problemen worden veroorzaakt door een aantal kenmerkende bouwfysische eigenschappen, namelijk een onvoldoende luchtdichte beganegrondvloer, een beperkte woningventilatie en een geringe thermische kwaliteit van de woningschil.

Beganegrondvloer

De beganegrondvloer van deze woningen is over het algemeen steenachtig. Er werden destijds geen eisen gesteld aan de luchtdichtheid van de beganegrondvloer. Hierdoor is deze over het algemeen onvoldoende luchtdicht en is dus transport van veelal vochtige lucht vanuit de kruipruimte naar de woning mogelijk. Bij een renovatie kan deze vochtbelasting met een zorgvuldige afdichting van de luchtlekkages in de beganegrondvloer (onder meer ter plaatse van de leidingdoorvoeren en het kruipluik) afdoende worden beperkt. Als prestatie-eis wordt hierbij veelal uitgegaan van het wettelijke vereiste prestatieniveau voor nieuw te bouwen woningen. Middels controlemetingen kan nagegaan worden in hoeverre de luchtdichtheid van de beganegrondvloer voldoet aan het gewenste prestatieniveau.



Een typische jaren '80-woning. Voor ventilatie zijn veelal uitsluitend klep- en draairamen beschikbaar.



Rondom leidingdoorvoeren en kruipluiken treden veel lucht lekkages op.

Woningventilatie

Voor de toevoer van ventilatielucht hebben de woningen uit deze bouwperiode veelal alleen beschikking over te openen klep- en draairamen. Bij koud en/of winderig weer zijn deze ventilatievoorziening-en veelal gesloten. Ook speelt de inbraakveiligheid een rol bij het beperkte gebruik hiervan. De afvoer van ventilatielucht vindt veelal op natuurlijke wijze plaats via afvoer-kanalen met instroomopeningen ter plaatse van badkamer, keuken en toilet. De natuurlijke afvoer is echter afhankelijk van het optreden van drukverschillen ten gevolge van temperatuur en wind en is dus niet altijd gegarandeerd. Ook ingeval sprake is van een mechanisch afzuigstelsel blijven de afgevoerde luchthoeveelheden in het algemeen ver onder hetgeen is gewenst. Ook produceert het ventilatiesysteem meestal te veel geluid, wat tot gevolg heeft dat de bewoners het systeem uitschakelen of in een lagere capaciteitsstand schakelen.

Om bij renovatie van woningen uit deze bouwperiode een toereikende woningventilatie te waarborgen, is het van belang dat de woning beschikt over:

- Inbraakveilige en fijnregelbare toevoervoorzieningen, waarvan de capaciteit is afgestemd op de nieuwbouweisen van het Bouwbesluit, bijvoorbeeld door klepramen met een inbraakveilige kierstandregeling of fijnregelbare ventilatieroosters.
- Overstroomvoorzieningen ten behoeve van de interne circulatie van lucht binnen de woning, bijvoorbeeld door spleten van 10-20 mm onder de binnendeuren.
- Een mechanisch afzuigstelsel, waarvan de capaciteiten in de 'normale' schakelstand (stand 2 in geval van een driestandenschakelaar) voldoet aan de nieuwbouweisen van het Bouwbesluit en waarbij het geluidniveau in deze capaciteitsstand is beperkt tot maximaal 30 dB(A).

Het verdient aanbeveling om bij oplevering, de ingeregelde luchthoeveelheden alsmede het optredende geluidniveau ten gevolge van het ventilatiesysteem door een onafhankelijke deskundige te laten controleren en deze in een meetrapport te laten vastleggen.





Schimmelaantasting op kritische locaties in de woningschil.

Thermische kwaliteit

De thermische kwaliteit van woningen uit de jaren '70 en '80 is vaak beperkt. In combinatie met een onvoldoende gewaarborgde vocht-huishouding heeft dit een verhoogd risico van schimmelaan-tasting op de kritische locaties van de woningschil tot gevolg. Ook heeft de geringe thermische kwaliteit consequenties voor het thermisch comfort en het energiegebruik. Met na-isolatie van de woningschil kan in deze woningen dan ook vaak een belangrijke kwaliteitsverbetering worden gerealiseerd. Wel is het hierbij van belang aandacht te schenken aan de mogelijke bouwfysische consequenties en om zonodig passende maatregelen te treffen. Zo kan een na-isolatie van de gevel resulteren in een afname van de woningventilatie en een toename van de kruipruimte-invloed. Ook een vervanging van de enkele beglazing door isolatieglas kan een afname van de woningventilatie tot gevolg hebben.

Historisch overzicht eisen thermische isolatie jaren '70 en '80						
Datum	Eisen thermische isolatie					Grondslag
	Vloer	Gevel	Dak	Glas	Overig	
1975	Geen	$R_{t} \geq 1,3 \text{ m}^2\text{K/W}$	$R_{t} \geq 1,3 \text{ m}^2\text{K/W}$	geen	geen	voor gesubsidieerde bouw
1980	$R_{t} \geq 1,3 \text{ m}^2\text{K/W}$	$R_{t} \geq 1,3 \text{ m}^2\text{K/W}$	$R_{t} \geq 1,3 \text{ m}^2\text{K/W}$	dubbel (woonkamer en keuken)	geen	MBV
1985	$R_{t} \geq 1,3 \text{ m}^2\text{K/W}$	$R_{t} \geq 2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$	$R_{t} \geq 2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$	dubbel (woonkamer en keuken)	geen	MBV
1988	$R_{t} \geq 1,3 \text{ m}^2\text{K/W}$	$R_{t} \geq 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$	$R_{t} \geq 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$	dubbel (alle vertrekken)	geen	MBV

EP-maatwerkadvies

Zoals waarschijnlijk bekend, is het per 1 januari 2008 verplicht om bij een gebouwtransactie een energieprestatiecertificaat te overleggen. Woningcorporaties die hun bezit in één keer van een certificaat laten voorzien, krijgen hiervoor uitstel tot 1 januari 2009. Voor corporaties is het veruit het meest efficiënt om de EP-certificering complexgewijs aan te pakken en dit te combineren met een EP-maatwerkadvies. Het maatwerkadvies geeft een integrale beoordeling van praktisch haalbare en kosteneffectieve energiebesparende maatregelen, waarbij tevens aandacht is besteed aan de relevante bouwfysische, akoestische en brandveiligheidsaspecten. Te denken valt hierbij aan aspecten als het oplossen van bestaande problemen (vocht, tocht geluid), het waarborgen van een voldoende woningventilatie en het tegengaan van mogelijk kritische koudebruggen.