



TECHNIEK
EN MANAGEMENT

Warmte-, vocht- en luchttransport

Deel III Inwendige condensatie

Auteur:

Ir. A.Schuur

Inhoud

1. Inleiding
2. Uitgangspunten
3. Damptransport
4. Dampspanningsverloop
5. Methode Glaser
6. Beoordeling hoeveelheid condensaat
7. Opmerkingen en beperkingen van de methode
8. Voorbeelden
9. Kwalitatieve hygrische beoordeling van ontwerpvarianten
10. Literatuur

1. Inleiding

In andere lesbrieven zijn alleen problemen behandeld waarin het gaat om de vraag, of er al dan niet oppervlaktecondensatie op een scheidingsconstructie zal plaatshebben bij gegeven binnen- en buitencondities. In deze lesbrief komen mogelijke vochtproblemen aan de orde die het gevolg zijn van condensatie in scheidingsconstructies ten gevolge van damptransport door de constructie bij stationaire omstandigheden. Een hygrische beoordeling van de uitwendige scheidingsconstructies bij wisselende buitencondities zal in de nog op te stellen lesbrief "hygrische beoordeling omhulling (V3-2)" plaatsvinden.

Deze lesbrief bespreekt een vereenvoudigde methode om het gevaar van inwendige condensatie ten gevolge van damptransport door scheidingsconstructies te voorspellen. Deze zogenaamde "Glasermethode" voorspeld of er inwendige condensatie plaatsvindt, waar en hoeveel er condenseert.

De rekenmethode gaat uit van sterke vereenvoudigingen in het zeer complexe aan elkaar gerelateerde transport van warmte-, vocht- en luchttransport in materialen en constructiedelen. Bij het vochttransport in constructies spelen met name het **dampdiffusie- en capillair vochttransport** een belangrijke rol. De grens tussen deze vochttransporten wordt weergegeven door het kritische vochtgehalte ($= \psi_{kr}$, [m^3/m^3]). **Ter informatie** worden hierna deze twee transporten kort beschreven. Voor meer informatie over de theoretische grondslagen van vochttransport wordt verwezen naar de opgegeven literatuur.

-Damptransport in vloeibare vorm ($\psi > \psi_{kr}$).

In een poreus materiaal zal bij een vochtgehalte **boven** het kritische vochtgehalte onder invloed van kleine verschillen in vochtgehalte ("vochtgehaltegradiënt = grad ψ ") **hoofdzakelijk vochttransport in vloeibare vorm optreden** (= capillair vochttransport). Bij kleine temperatuurverschillen kan dit transport als volgt beschreven worden:

$$g_v = D_v \cdot \rho_w \cdot \text{grad } \psi \quad (1)$$

met g_v = vochtstroomdichtheid [$kg/m^2 \cdot s$]

D_v = vochtvereffeningscoëfficiënt [m^2/s]

ρ_w = volumieke massa van water [$1000 kg/m^3$]

grad = verandering van een fysische grootte per lengte eenheid

ψ = vochtgehalte [$m^3 \text{ water}/m^3 \text{ materiaal}$]

-Dampdiffusie ($\psi \leq \psi_{kr.}$).

Meestal ligt het vochtgehalte ($=\psi$) echter **onder** het kritische vochtgehalte. Het capillair vochttransport stagneert. 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, minerale wol is het vochtgehalte zeker lager dan het kritische. Zo'n **niet hygroscopisch materiaal** bezit namelijk **weinig fijne poriën** (straal van het capillair: $r > 0.05 \mu\text{m}$) en een relatief laag vochtgehalte. 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. kalzandsteen). Het vocht dat in dit materiaal in de **veel voorkomende 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 hierna te behandelen dampdiffusie-rekenmodel in eerste instantie goed te beschrijven, alhoewel er nu wel enige condensatie in de capillairen kan optreden.

2. Uitgangspunten

Door het dampdiffusietransport en het capillair vochttransport onafhankelijk van elkaar te beschouwen ontstaat een eenvoudige goed te gebruiken beschrijving van het vochttransport door scheidingsconstructies.

Bij het hierna te behandelen dampdiffusietransport zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

1. Er wordt voor het warmte- en dampdiffusietransport uitgegaan van een **stationaire situatie**.
2. Het vochttransport vindt **alleen** via **damptransport** plaats.
3. Er vindt **geen luchttransport** in de constructie plaats.
4. De materialen worden als niet hygroscopisch beschouwd. Bij grote poriën zal pas bij relatieve vochtigheden tegen de 100% 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 (rood,boerengrauw)) via capillaire werking verdelen. Bij de hygrische beoordeling van

scheidingsconstructies worden de gevolgen van deze capillaire effecten kwalitatief in relatie tot de plaats van condensatie besproken.

5. De materiaaleigenschappen worden **constant** verondersteld.
6. De invloed van **vrijkomende condensatiewarmte** op het temperatuurverloop wordt **verwaarloosd**.
7. De te beoordelen scheidingconstructie wordt **droog** verondersteld. De werkelijke aanvangssituatie met eventueel bouwvocht wordt niet in rekening gebracht.
8. Opwarming van de constructie door zonbestraling cq. afkoeling t.g.v. nachtelijke uitstraling wordt niet in de beschouwing opgenomen.

3. Damptransport

Vochttransport van waterdamp en vloeibaar water vindt alleen in poreuze materialen plaats, wanneer de poriën met elkaar in verbinding staan.

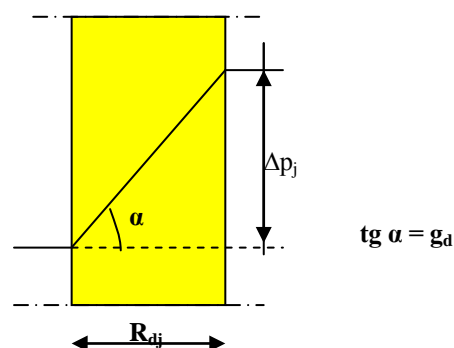
Waterdamp verplaatst zich in bouwmaterialen o.a. onder invloed van dampdruk-(of concentratie-) verschillen. De damp diffundeert **zeer traag** van plaatsen met hoge dampdruk naar plaatsen met lagere dampdruk. Aangezien binnenshuis de dampdruk vrijwel steeds hoger is dan buiten, zal de normale richting van damptransport van binnen naar buiten zijn.

Daar elk materiaal remmend werkt op het dampdiffusieproces, is men gekomen tot de invoering van het begrip dampdiffusieweerstand van een laag, als maat voor de weerstand van die laag tegen het transport van waterdamp.

Op identieke wijze als bij het warmte-transport kan bij het damptransport gebruik gemaakt worden van de analogie met de Wet van Ohm nml. stroom is drijvende kracht gedeeld door weerstand. Bij een stationaire toestand is de dampdiffusie door een materiaallaag dan als volgt te beschrijven:

$$g_d = \frac{\Delta p_j}{R_{dj}} \quad (2)$$

figuur 1



met: g_d = waterdampstroomdichtheid in $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
 Δp_j = dampdrukverschil in N/m^2 over materiaallaag j.
 R_{dj} = dampdiffusieweerstand van materiaallaag j in m/s
 (onder invloed dampdruk verschil Δp_j)

Om de dampdiffusieweerstand voor een materiaallaag te kunnen berekenen is voor elk materiaal een karakteristieke grootheid, het dampdiffusieweerstandsgetal μ , ingevoerd. Deze grootheid is gedefinieerd als:

$$\mu = \frac{\text{dampdiffusieweerstand van materiaal met dikte } d}{\text{dampdiffusieweerstand van lucht met dezelfde dikte}} \quad (3)$$

De μ -waarde is dus een dimensieloos verhoudingsgetal. Uit voorgaande formules blijkt dat bij een gelijk dampdrukverschil een materiaal met een μ -waarde van bijvoorbeeld 10, tien maal minder damp zal diffunderen dan door lucht met dezelfde dikte.

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 (gevolg: $\mu \geq 1$).

Enkele globale μ -waarden zijn:

<u>materiaal:</u>	μ
minerale wol	1-2
metselwerk (rood)	9
beton ($\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$)	35
gipskartonplaat	13
geëxtrudeerd PS ($\rho = 40 \text{ kg/m}^3$)	200
geëxpandeerd PS ($\rho = 15-35 \text{ kg/m}^3$)	20-90
schuimglas ($\rho = 150 \text{ kg/m}^3$)	∞
polyetheenfolie (0,1 mm)	65000
polyetheenfolie (0,3 mm)	34000
dakleer	10000
aluminiumfolie	100000

Behalve met het dampdiffusieweerstandgetal μ is de dampdiffusieweerstand ook evenredig met de dikte d in meters. Immers een tweemaal zo dik materiaal levert ook een tweemaal grotere weerstand. De μd - waarde [m] is nu een **verhoudingsgetal** van de dampdiffusieweerstand. De **numerieke waarde van de weerstand** van een materiaallaag j is af te leiden uit de Wet van Fick . De weerstand per materiaallaag j is hieruit te bepalen volgens:

$$R_{dj} = C \cdot \mu d_j \quad [m/s] \quad (4)$$

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

Voor dunne materiaallagen wordt meestal in plaats van een μ -waarde een μd -waarde gegeven. Verder kunnen eventuele kleine luchtlekken in materiaallagen in de μd -waarde verdisconteerd worden. Deze μd -waarde wordt $\mu d_{\text{equivalent}}$ genoemd en kan uit metingen bepaald worden.

Bij grote luchtlekken in de binnenafwerking moet opgepast worden dat geen luchtstroming in de uitwendige scheidingsconstructie ontstaat. Damptransport door luchtverplaatsing in de constructie (convectie) kan dan aanleiding geven tot directe oppervlaktecondensatie in de constructie !!

Enige μd - en μd_{eq} -waarden van verschillende materiaallagen worden hieronder met elkaar vergeleken:

200 mm beton:	$\mu d = 33 \cdot 0,2$	= 6,6 m
0.1 mm polyetheen:	$\mu d = 65000 \cdot 0,0001$	= 6,5 m
100 mm minerale wol:	$\mu d = 2 \cdot 0,1$	= 0,2 m
100 mm geëxtrudeerd PS:	$\mu d = 200 \cdot 0,1$	= 20,0 m
2 laags bitumineuze dakbedekking		≈ 40,0 m
3 laags bitumineuze dakbedekking		≈ 60,0 m
gevouwen plaatstalen dak, zonder naaddichting		≈ 0,0 m
gevouwen plaatstalen dak, naden afgekit		≈ 10,0 m
keramische dakpannen met enkele sluiting		≈ 0,2 m
keramische dakpannen met dubbele sluiting		≈ 0,3 m
sneldek betonpannen		≈ 0,5 m
natuurleien		≈ 2,1 m
houten schrootjes		≈ 0,8 m

Uit voorgaand overzicht met μd - en μd_{eq} -waarden volgt dat 0,1 mm polyetheen (=dampremmende laag) even veel doorlaat als 20 cm beton. Verder blijkt dat geëxtrudeerd polystyrenschuim aanmerkelijk dampdichter is dan minerale wol (glaswol, steenwol) met dezelfde dikte. De dampdichtheid van een gevouwen plaatstalen dak is door de naden zeer laag (μd_{eq} -waarde ≈ 0 !). Dakpannen blijken zeer "dampopen" te zijn.

Opmerking:

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

$$g_d = \frac{\Delta c}{Z} \quad [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}] \quad (5)$$

met:

$$Z = 4,35 \cdot 10^4 \cdot \mu d \quad [\text{s/m}]$$

Voorbeeld 1

Gegeven: Een muur met een dikte van 0,2 m en een μ -waarde van 10. Verder is een gemiddelde wintersituatie gegeven door:

$T_i = + 20^\circ\text{C}$; $\varphi_i = 50\%$; $T_e = + 5^\circ\text{C}$; $\varphi_e = 80\%$; stationaire toestand.

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

Oplossing:

De optredende waterdampdruk binnen is:

$$p_i = 0,50 \cdot 2340 = 1170 \text{ N/m}^2$$

en de optredende dampdruk buiten is:

$$p_e = 0,80 \cdot 872 = 698 \text{ N/m}^2.$$

Het dampdrukverschil is dan constant $1170 - 698 = 472 \text{ N/m}^2$. De dampdiffusieweerstand van de steensmuur wordt:

$$R_d = C \cdot \mu_d = 5,3 \cdot 10^9 \cdot 10 \cdot 0,2 = 10,6 \cdot 10^9 \text{ m/s}.$$

De dampstroomdichtheid g_d volgt dan uit:

$$g_d = \Delta p / R_d \text{ (2)} = 472 / 10,6 \cdot 10^9 = 44,53 \cdot 10^{-9} \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

Dit komt overeen met:

$$44,53 \cdot 10^{-9} \text{ [kg/m}^2\text{s}] \cdot 3600 \text{ [s/h]} \cdot 10^3 \text{ [g/kg]} = \underline{0,16 \text{ [g/m}^2\text{h]}}$$

De berekende dampstroomdichtheid treedt alleen in stationaire toestand op, indien er geen inwendige condensatie in de constructie plaatsvindt. In het geval dat er wel condensatie optreedt, is de dampstroom die de constructie ingaat groter dan de dampstroom die de constructie uitkomt. Het verschil tussen de ingaande en uitkomende dampstroom zal dan in de constructie condenseren. Bij de methode Glaser (hfstk.5) wordt hier nader op ingegaan.

Wat verder opvalt is de geringe hoeveelheid waterdamp die via dampdiffusie door de muur met de toch lage dampdiffusieweerstand ($\mu_d = 2$) naar buiten verdwijnt. Bij hogere dampdiffusieweerstanden van de omhulling blijft er van de naar buiten diffunderende waterdamp vrijwel niets over. Bij de bepaling van de **waterdampconcentratie in ruimten** kan de bijdrage van de dampdiffusie door de dichte delen van de omhulling dan ook **meestal verwaarloosd worden**.

Alleen de afvoer van vocht via ventilatie is bij "normale" ventilatiehoeveelheden bepalend voor de waterdampconcentratie in ruimten.

4. Dampspanningsverloop

Bij het warmtetransport zijn, behalve de warmteweerstand van een constructie r_c , ook de begrippen warmteovergangswaarden binnen r_i en buiten r_e ingevoerd. De totale warmteweerstand werd bepaald door optelling van de weerstanden.

Analoog hieraan moeten in principe voor het damptransport, naast de dampdiffusieweerstand van een constructie $R_d (= \sum R_{dij} = C \cdot \sum \mu d_j)$, de dampovergangswaarden R_{di} en R_{de} worden gedefinieerd. De waarden die voor deze grootheden worden gevonden zijn:

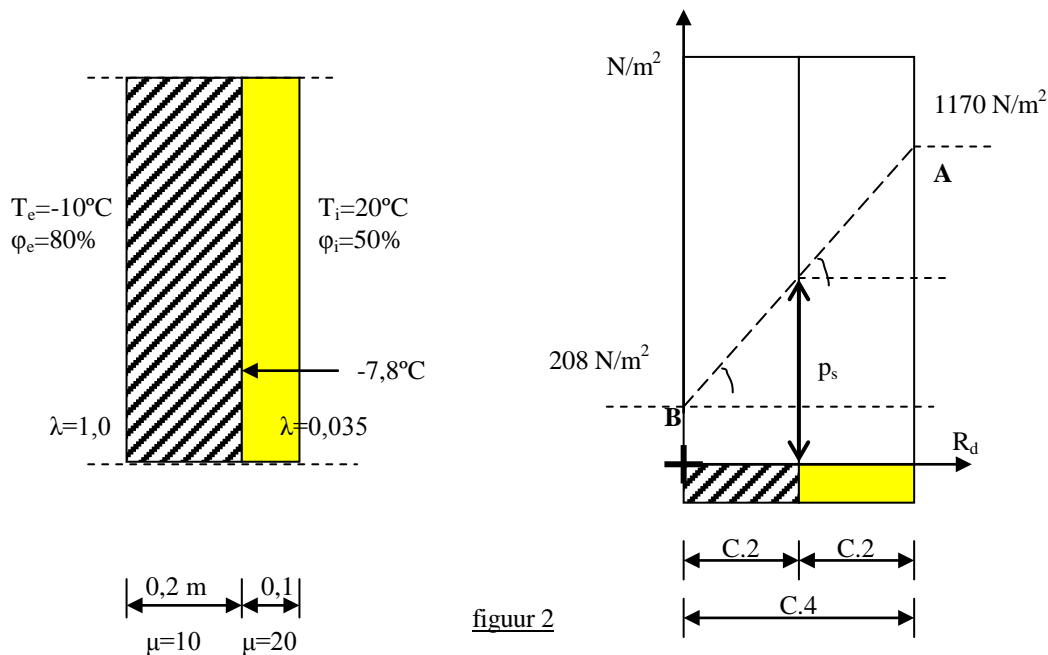
$$R_{di} \approx 0,040 \cdot 10^9 \text{ m/s}$$

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

Omdat deze waarden zeer klein zijn ten opzichte van de dampdiffusieweerstand van de constructie worden deze dampovergangswaarden verwaarloosd. Bij het werkelijke dampspanningsverloop zal dus geen merkbare dampspanningsprong aan het binnen- en buitenoppervlak optreden, wat bij het temperatuurverloop wél het geval is. Bij oppervlaktecondensatie speelt de dampovergangswaarde uiteraard wel een rol.

Voorbeeld 2

Analoog aan de bepaling van het temperatuurverloop in een constructie is het nu ook mogelijk om het dampspanningsverloop in een meerslagen-constructie op grafische wijze te bepalen. Hiertoe zet men op de horizontale as de **dampdiffusieweerstanden per materiaallaag op schaal** achter elkaar uit, en op de verticale as een **dampspanningschaal**. In figuur 2 is dit als voorbeeld 2 voor een steensmuur met binnenisolatie uitgewerkt. De gegevens en de temperatuur op het scheidingsvlak muur/isolatie zijn in de figuur weergegeven.



figuur 2

De punten B (0, 208) en A (C.4, 1170) worden door **een rechte lijn** met elkaar verbonden. Omdat bij stationair damptransport de dampstroom door iedere laag van de constructie constant moet zijn is de rechte verbindingslijn de enige juiste, immers:

$$g_d = \frac{p_i - p_e}{C \cdot \sum \mu_{d_{tot.}}} = \frac{p_i - p_s}{C \cdot \mu_{d_{isol.}}} = \frac{p_s - p_e}{C \cdot \mu_{d_{muur}}} = \text{constant} = \text{tg } \alpha$$

Uitwerking voorbeeld 2:

$$p_i = 0,5 \cdot 2340 = 1170 \text{ N/m}^2; p_e = 0,8 \cdot 260 = 208 \text{ N/m}^2$$

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

$$\mu_{d_{tot.}} = 4 \text{ m}; \mathbf{C = 5,3 \cdot 10^9}$$

$$g_d = \frac{1170 - 208}{C \cdot 4} = \frac{240,5}{C} \text{ is gelijk aan } \frac{1170 - p_s}{C \cdot 2} \text{ geeft}$$

$$p_s = 1170 - 481 = \underline{689 \text{ N/m}^2}$$

èn als er geen inwendige condensatie optreedt:

$$g_d = \frac{240,5}{5,3 \cdot 10^9 (=C)} = 45,38 \cdot 10^{-9} \text{ [kg/m}^2\text{s]}$$

In plaats van voorgaande berekening kan de heersende dampspanning p_s afgelezen worden op het scheidingsvlak tussen metselwerk en isolatie. Omdat het Glaser-diagram (is rechter figuur 2) de werkelijke constructie vertekend weergeeft zijn de materiaalaanduidingen in de figuur weergegeven.

Op soortgelijke wijze kunnen de diverse dampdrukken bij meerlaagse constructies ter plaatse van de scheidingsvlakken van de materiaallagen op de verticale as worden afgelezen of uit de geometrie van de figuur berekend worden.

In tegenstelling met het temperatuurverloop is echter aan de bovenbeschreven manier om het werkelijk optredende dampspanningsverloop te vinden **één voorwaarde** verbonden: de gevonden dampspanning moet overal in de constructie kleiner zijn dan, of hoogstens gelijk aan, de maximale dampspanning die bij de temperatuur ter plaatse mogelijk is. Om dit na te gaan moet de maximale dampspanning in het Glaser-diagram getekend worden (zie uitwerking fig.3). Het verloop van de maximale dampspanningslijn (p_{max}) wordt verkregen uit het temperatuurverloop, door bij de temperaturen voor een aantal punten de bijbehorende maximale dampspanning op te zoeken. Deze p_{max} -waarden worden in de constructie op de scheidingsvlakken uitgezet en met elkaar verbonden.

De bepaling van p_{max} voor voorbeeld 2 verloopt als volgt:

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

$$r_{tot.} = 0,13 (=r_i) + 3,06 (=r_c) + 0,04 (r_e) = 3,23 \text{ SI}$$

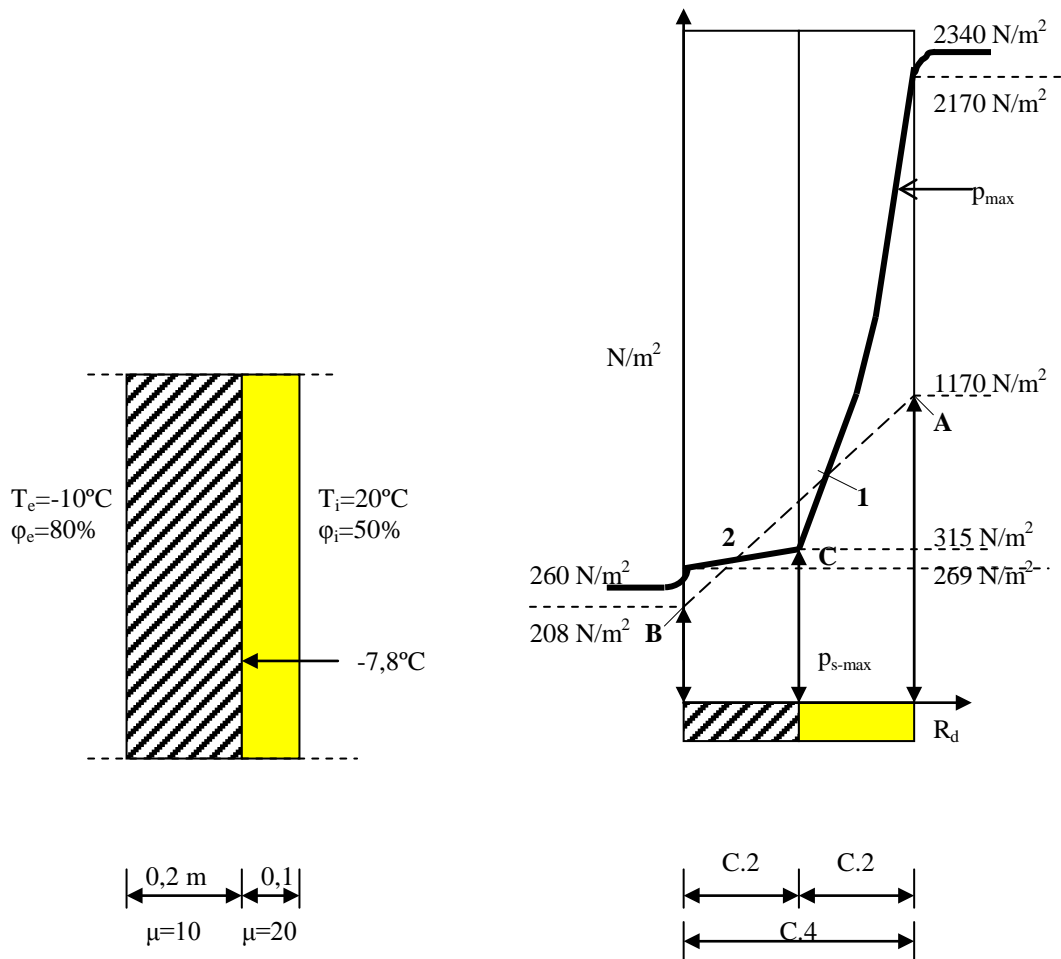
$$U = 1/3,23 (1/r_{tot.}) = 0,31 [W/m^2.K]$$

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

$$T_{io} = 20 - 0,13.9,29 = 18,8^{\circ}C \text{ ---> } p_{io,max} = 2170 \text{ N/m}^2$$

$$T_s = 18,8 - 2,86.9,29 = -7,8^{\circ}C \text{ ---> } p_{s,max} = 315 \text{ N/m}^2$$

$$T_{eo} = -7,8 - 0,20.9,29 = -9,6^{\circ}C \text{ ---> } p_{eo,max} = 269 \text{ N/m}^2$$



figuur 3

Uit het Glaser-diagram (figuur 3) blijkt dat op sommige plaatsen $p_w > p_{max}$ zou worden, hetgeen onmogelijk is, zodat er ergens in de constructie inwendige condensatie zal plaatsvinden. **De werkelijke dampspanningslijn blijkt niet op de juiste wijze te verlopen. De hiervoor berekende dampstroom g_d is daarom onjuist.**

Door op voornoemde wijze het p_w en p_{max} -verloop te tekenen, kan dus worden nagegaan of in een constructie onder gegeven omstandigheden inwendige condensatie zal optreden. Hoeveel en waar vocht zal condenseren is echter nog niet bekend. Met behulp van de in het volgende hoofdstuk te behandelen Methode van Glaser kan nu voor de meeste constructies worden berekend hoe groot de gecondenseerde **hoeveelheid** waterdamp zal zijn en **waar** deze waterdamp condenseert.

Opmerking:

De getekende rechte lijnen van p_{max} zijn eigenlijk licht gebogen, omdat de relatie tussen temperatuur en maximale dampspanning niet rechtlijnig verloopt. In de figuur is na berekening van de temperatuur in het midden van de isolatie ($5,5^\circ\text{C}$) de maximale dampspanning bepaald en de gebogen lijn ingetekend. Zonder grote fouten te maken wordt bij de verdere berekeningen uitgegaan van rechte lijnen tussen de maximale dampspanningen welke op de grensvlakken van de materialen bepaald worden.

5. Methode van Glaser

Aangezien p_w nooit groter kan zijn dan p_{max} , zal het p_w -verloop anders moeten zijn dan de onderbroken lijn (- - -) in figuur 3.

Het ligt voor de hand te veronderstellen dat het verloop dan zal worden weergegeven volgens de gebroken lijn A-1-C-2-B. Dit blijkt echter principieel onmogelijk te zijn.

In de getekende figuur met de dampdiffusieweerstanden op de horizontale as is de dampstroom op een bepaalde plaats in de constructie gelijk aan de tangens van de hoek die het dampspanningsverloop ter plaatse maakt met de horizontale as. Verder zijn uit theoretische overwegingen voor het werkelijke dampspanningsverloop de volgende voorwaarden te formuleren:

-Indien in de constructie geen vochtbronnen aanwezig zijn, zal in de constructie van binnen naar buiten de dampstroom constant blijven of **afnemen bij condensatie**. De tangens van de hoek met de horizontaal kan in de constructie van binnen naar buiten dus alleen kleiner worden.

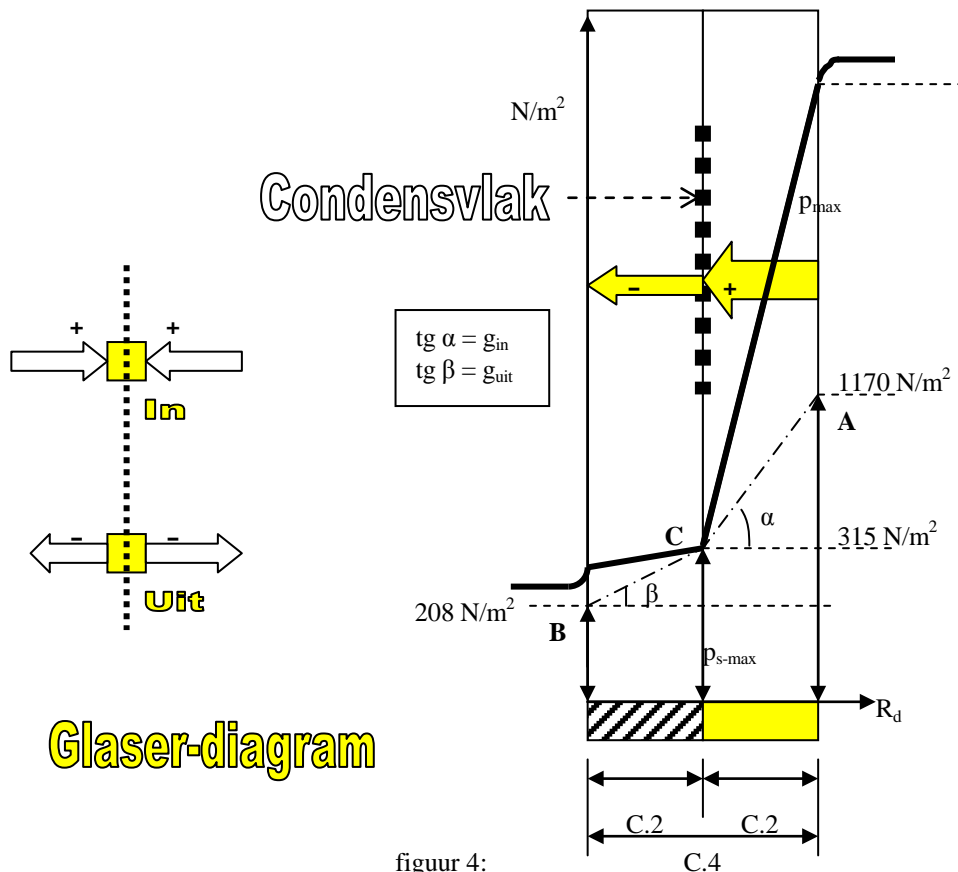
-De heersende p_w kan nooit groter zijn dan de p_{max} die bepaald is door de temperatuur ter plaatse.

Uit deze voorwaarden volgt dat de lijn A-1-C-2-B in figuur 3 **niet** het gezochte p_w -verloop kan zijn, aangezien dan in de vlakken door de punten 1 en 2 de dampstroom zou moeten toenemen. Dit is alleen mogelijk indien ter plaatse van de vlakken door de punten 1 en 2 een vochtbron aanwezig zou zijn.

De enige mogelijkheid om aan de voorwaarden te voldoen blijkt de lijn A-C-B te zijn, waarmee het werkelijk optredende dampspanningsverloop is gevonden.

De tangens van de lijn A-C geeft de hoeveelheid damp aan die de constructie **binnenkomt** (+) per m² per s). De tangens van de lijn C-B geeft de hoeveelheid damp aan die de constructie **uitgaat** (-). Uit het verschil van deze twee hoeveelheden is te berekenen hoeveel vocht in een bepaalde periode door condensatie in de constructie achterblijft.

De hoeveelheid gecondenseerd vocht condenseert **in het vlak door het raakpunt C**. Het condensaat wordt in één vlak geconcentreerd gedacht, terwijl in werkelijkheid deze hoeveelheid zich over een eindig gebied zal uitstrekken.



figuur 4:

Aan de beschreven methode zijn overeenkomstig de uitgangspunten de nodige beperkingen opgelegd. Ondanks deze beperkingen geeft de methode **bruikbare uitkomsten en inzichten**. Door de eenvoudige wijze van berekening is deze methode dan ook van groot belang bij de thermisch/hygrische beoordeling van dak-en wandconstructies. Aan de hand van enkele voorbeelden zal de methode van Glaser worden toegelicht. De **stationaire rekenwaarden** voor het binnen- en buitenklimaat worden **overeenkomstig Glaser voorlopig vastgesteld** op:

Winter: 60 dagen (=60.24[h/dag].3600[s/h]= $5,184 \cdot 10^6$ [s])

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

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

Zomer : 90 dagen (=90.24.3600= $7,776 \cdot 10^6$ [s])

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

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

In de lesbrief "hygrische beoordeling omhulling" wordt het binnenklimaat van gebouwen nader besproken. Hieruit zullen **andere rekenwaarden** volgen. **In dit hoofdstuk gaat het vooral om de methodiek, alhoewel voornoemde rekenwaarden voor gevel- en dakconstructies toegepast in de woningbouw een veilige hygrische beoordeling zal geven.**

Voorbeeld 3 : hygrische beoordeling muur met binnenisolatie

Het hiervoor gebruikte voorbeeld zal nu hygrisch beoordeeld worden. In figuur 4 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 $\varphi=100\%$ **zodat in dit vlak condensatie optreedt**. Het condensatievlak tussen metselwerk en isolatie wordt in eerste instantie zeer dun verondersteld. **Het werkelijke dampspanningsverloop in de constructie wordt nu gegeven door de lijn A-C-B (zie figuur 4)**

De hoeveelheid condens kan als volgt berekend worden:

dampdiffusie naar binnen (tg α):

$$g_{\text{in}} = \frac{1170 - 315}{C(=5,3 \cdot 10^9) \cdot 2} = \frac{427,5}{C} \text{ kg/m}^2\text{s}$$

dampdiffusie naar buiten (tg β):

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

Het verschil tussen beide dampstroomdichtheden ($+g_{\text{in}} - g_{\text{uit}}$) geeft de hoeveelheid vocht (in kg) die in één vierkante meter constructie per seconde condenseert. Wanneer voorgaande klimaatgegevens in een periode van twee maanden (=60 dagen) constant aanwezig zijn, kan de hoeveelheid condensaat berekend worden. De berekende hoeveelheid condensaat in deze twee maanden wordt als representatieve waarde beschouwd voor de werkelijke hoeveelheid

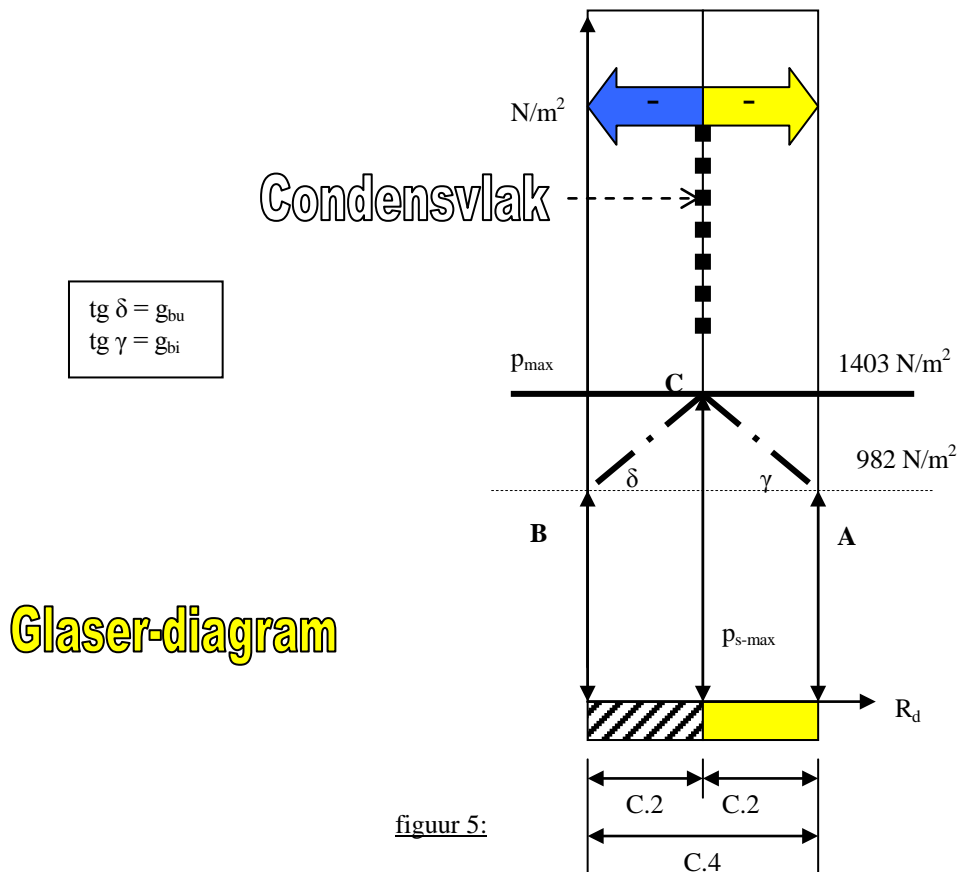
condensaat in de winter. Deze hoeveelheid, kortweg G-winter genoemd, wordt:

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

$$G_{\text{winter}} = (+427,5 - 53,5) \cdot 0,978 = +366 \text{ g/m}^2$$

Op dezelfde wijze kan men berekenen voor de zomercondities, hoeveel vocht in die periode weer uit de constructie zal verdwijnen. De werkelijke en maximale dampspanningslijn zijn in figuur 5 met de constante temperatuur van 12 °C eenvoudig te bepalen. Voor de berekening wordt er van uitgegaan dat in de zomer **in het vlak van condensatie (vlak door punt C) de relatieve vochtigheid 100% blijft (T_c = 12)**. De van belang zijnde dampspanningen worden:

$$p_{\text{max.t.p.v.C}} = 1403 \text{ N/m}^2 \text{ en } p_i = p_e = 0,7 \cdot 1403 = 982 \text{ N/m}^2$$



De dampspanning ter plaatse van het condensvlak is in de denkbeeldige zomerperiode van 90

dagen ($=7,776 \cdot 10^6$ s.) hoger dan de dampspanning binnen en buiten, waardoor vanuit het vlak van condensatie waterdamp naar binnen en buiten diffundeert. De som van deze dampstromen geeft de maximaal mogelijke verdamping in de zomer volgens:

$$G_{\text{zomer}} = (-tg \delta - tg \gamma) \cdot 7,776 \cdot 10^6 \cdot 1000 \text{ g/kg}$$

met:

$tg \delta$ = dampstroomdichtheid van het condensvlak naar buiten.

$tg \gamma$ = dampstroomdichtheid van het condensvlak naar binnen.

$$G_{\text{zomer}} = \left[- \left(\frac{1403 - 982}{2 (\sum \mu d_e)} \right) - \left(\frac{1403 - 982}{2 (\sum \mu d_i)} \right) \right] \cdot \frac{7,776 \cdot 10^9}{5,3 \cdot 10^9} =$$

$$G_{\text{zomer}} = (-210,5 - 210,5) \cdot 1,467 = -618 \text{ g/m}^2$$

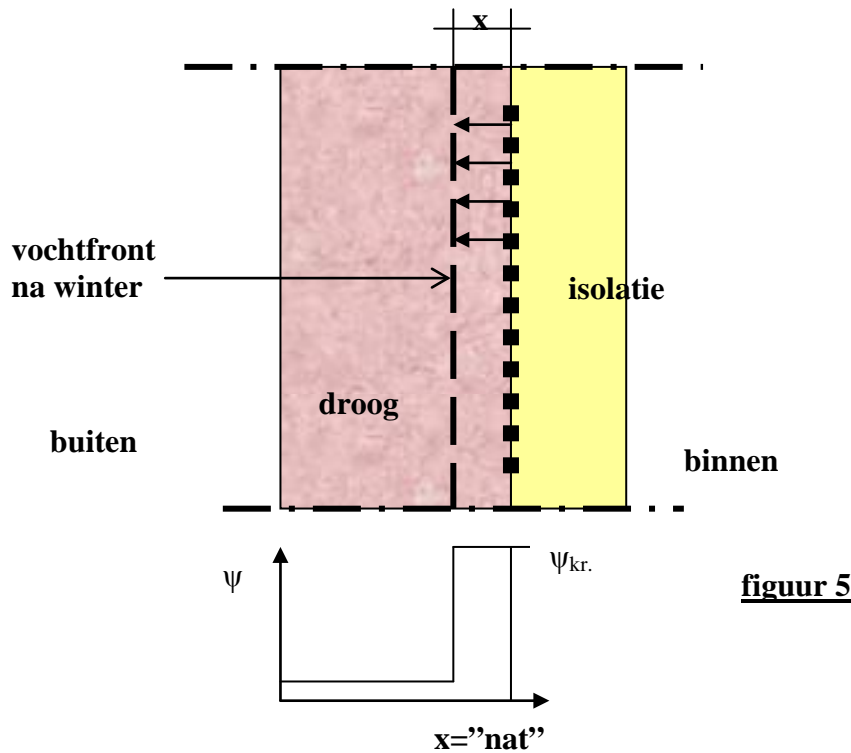
In de zomerperiode zal dus meer vocht uit de constructie willen diffunderen (-618=uit) dan er in de winterperiode (+366=in) is ingekomen, zodat er geen gevaar bestaat dat de constructie steeds vochtiger wordt. De "droogmogelijkheid" (= -618 g) is groter dan de hoeveelheid condensaat in de winter (= +366 g). 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.

Indien in de isolatie geen capillair watertransport kan plaatsvinden (de meeste schuimen zijn niet "zuigend") zal het condensaat in de winter door het metselwerk worden opgezogen. Aan het binnenoppervlak van het metselwerk zal in eerste instantie het **maximale vochtgehalte** optreden (baksteen: $\psi_o \approx 0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Blijft het condensatieproces doorgaan, dan verandert de vochtverdeling. Na het stoppen van het condensatieproces ontstaat na enige tijd door het zuigproces 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:

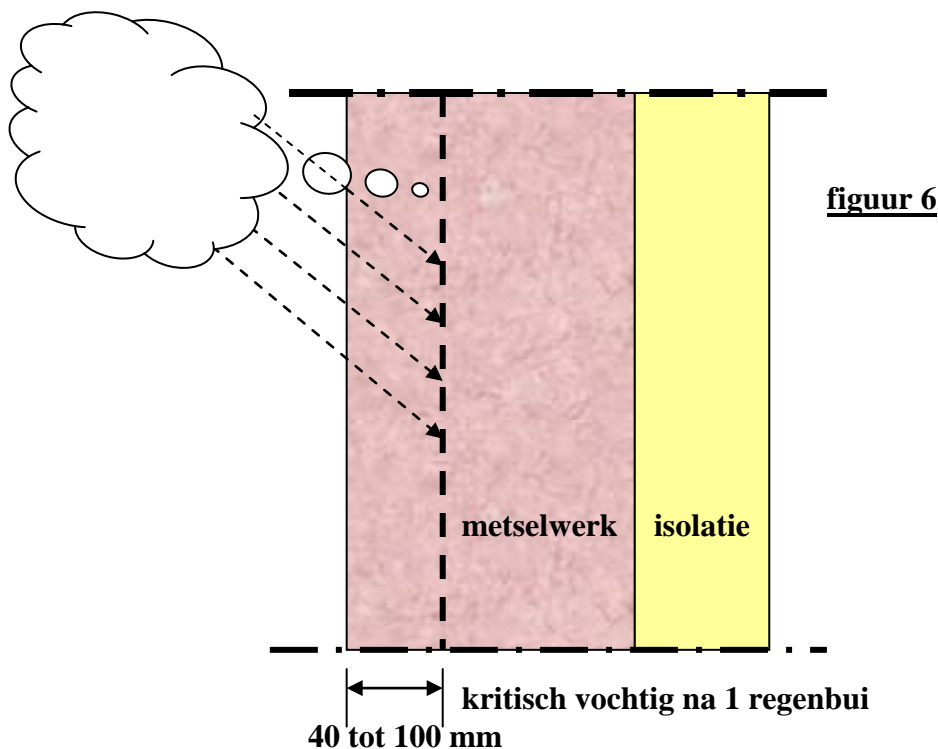
$$\mathbf{1 \text{ mm "vrij" water weegt per m}^2 : 0,1 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm} \cdot 100 \text{ cm} = 1000 \text{ cm}^3 = 1 \text{ dm}^3 = \mathbf{1 \text{ liter} = 1000 \text{ g}} \quad \mathbf{(6)}$$

366 g komt dus overeen met 0,366 mm waterfilm. Na enige tijd wordt door het zuigproces de indringingsdiepte x (zie figuur 5):

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



Er is op 4 mm van de binnenzijde van de muur een scherpe overgang van "nat" naar "droog". Vanaf dit vochtfront, gelegen op 4 mm afstand van de binnenzijde van het metselwerk, vindt diffusie naar buiten plaats. Door de geringe 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 de hoeveelheid condensaat in de winter te beoordelen, vergelijken we de 366 g 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. Bij 10 liter per dag blijkt 10/0,10 = 100 mm metselwerk kritisch vochtig te 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.

6. Beoordeling hoeveelheid condensaat

In voorbeeld 3 van het vorige hoofdstuk bleek de hoeveelheid condensaat in de winter geen schade te geven. Verder bleek de hoeveelheid condensaat in de zomer weer te verdampen. Welke grenswaarden bij de hygrische beoordeling van scheidingsconstructies gehanteerd moeten worden is afhankelijk van het gedrag van de materiaallaag van de constructie waarin de vochtige zone ten gevolge van condensatie voorkomt. De grenswaarden voor de hoeveelheid condensaat moeten zodanig zijn dat:

- het isolerend vermogen niet sterk achteruit gaat
- de vochtig geworden materialen geen schade oplopen, zoals vorstschade, corrosie, rot (organische materialen, kurk, hout), oplossen van stoffen (bijv. lijm) en schimmelvorming.
- rekening moet worden gehouden met al aanwezig vocht (bouwvocht e.d.)

Om het hygrisch gedrag van constructies te beoordelen is dus kennis van het gedrag van materialen onder invloed van vocht vereist.

Om materiaalschade te voorkomen moet de in de winter gecondenseerde hoeveelheid vocht in de zomer weer kunnen verdwijnen (**eis: $G_{zomer} \geq G_{winter}$**). Verder moet G_{winter} afhankelijk van het materiaal waar condensatie optreedt aan een maximum gebonden worden. **Voorlopig wordt aangenomen dat de met de methode Glaser berekende waarden voor G_{winter} representatief zijn voor de hoeveelheid condensaat onder wisselende klimaatcondities.** De volgende grenswaarden mogen aangehouden worden:

1. vorstgevoelige steenachtige materialen:

$$G_{winter} \leq 50 \cdot \psi_{kr.} [m^3/m^3] \cdot d [mm] \quad g/m^2 \quad (7)$$

2. organische materialen; indien verlijmd, moet de lijm vocht bestendig zijn:

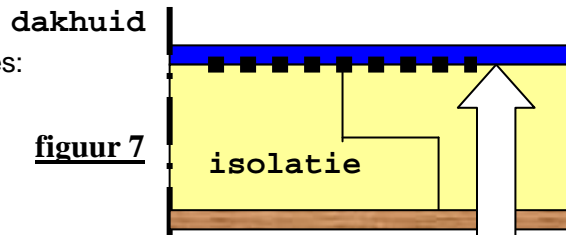
$$G_{winter} \leq 0,03 \cdot \rho [kg/m^3] \cdot d [mm] \quad g/m^2 \quad (8)$$

3. organische materialen welke niet vochtbestendig zijn verlijmd:

$$G_{\text{winter}} \leq 50 \text{ g/m}^2 \quad (9)$$

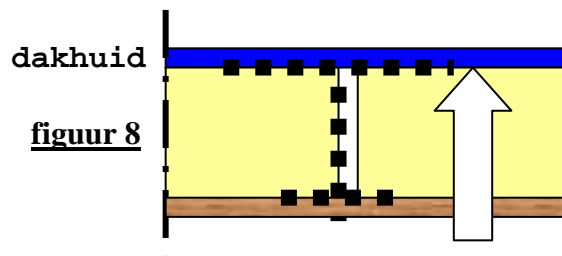
4. isolatiematerialen in dakconstructies:

$$G_{\text{winter}} \leq 500 \text{ g/m}^2 \quad (10)$$



5. niet-vocht absorberende (isolatie)materialen met naden, waardoor mogelijke lekkage door de naden naar binnen kan plaatsvinden bij platte daken:

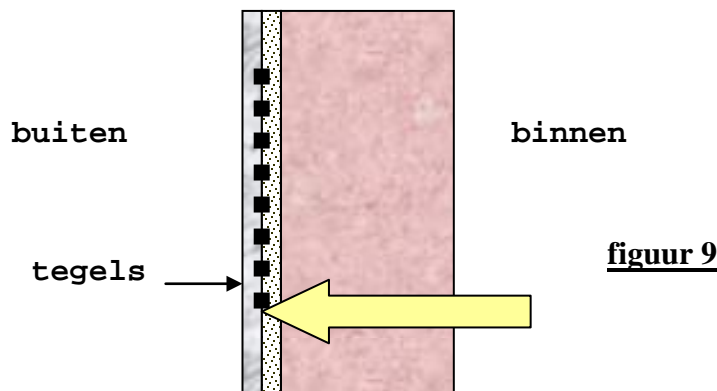
$$G_{\text{winter}} \leq 100 \text{ g/m}^2 \quad (11)$$



Voorbeelden:

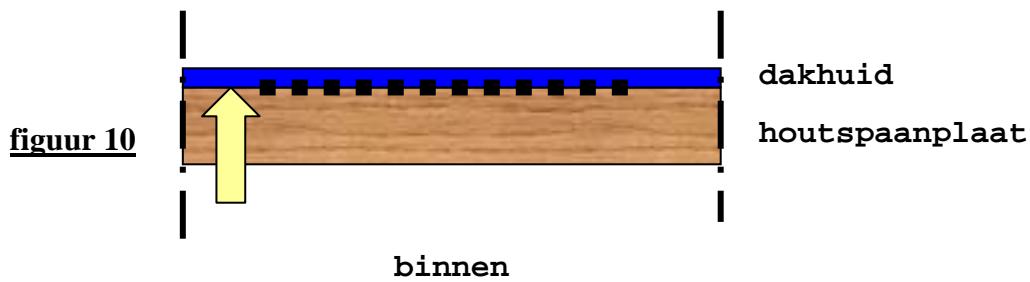
-Bij condensatie tegen de binnenzijde van tegels van 5 mm dikte wordt de grenswaarde i.v.m. mogelijke vorstschade, volgens (7):

bij gegeven $\psi_{kr} = 0,08$ en $d = 5 \text{ mm}$ wordt $G_{\text{winter}} \leq 50 \cdot 0,08 \cdot 5 = 20 \text{ g/m}^2$



-Bij condensatie tussen dakhuid en dakbeschoot van houtspaانplaat ($\rho = 350 \text{ kg/m}^3$) cq. tegen de onderzijde van het dakbeschoot met een dikte van 18 mm wordt de grenswaarde, volgens (8):

$$G_{\text{winter}} \leq 0,03 \cdot 350 \cdot 18 \approx 190 \text{ g/m}^2$$

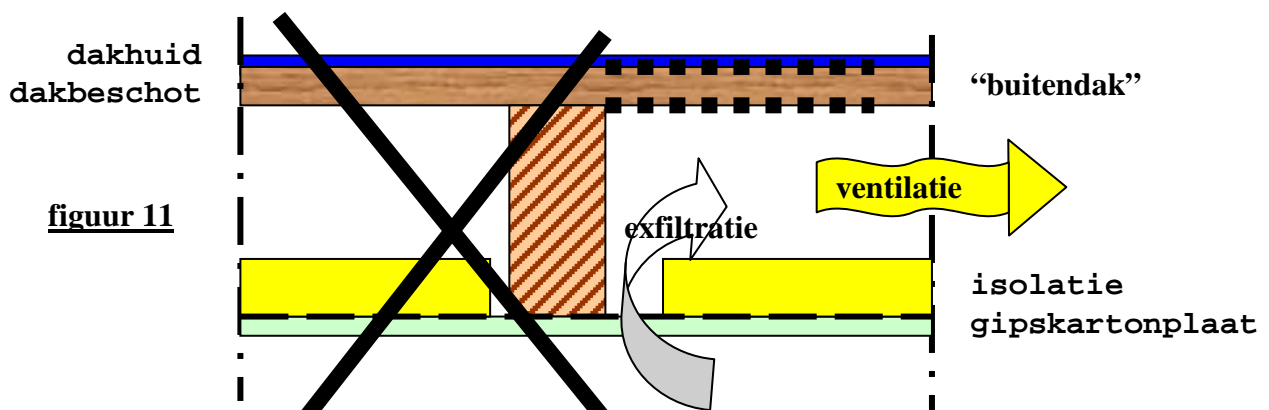


7. Opmerkingen en beperkingen van de methode

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

Zo is de scheidingsconstructie bij de methode Glaser **droog** verondersteld (7^e uitgangspunt). Om tot een juiste beoordeling bij constructies met een hoog aanvangsvochtgehalte te komen, dienen eerst de gevolgen van droging op het hygrisch gedrag van de constructie onderzocht te worden. Het hoge vochtgehalte kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van regen of overmatig watergebruik bij afschotlagen. De beoordeling van dit aanvangsvochtgehalte valt buiten het kader van deze lesbrief.

Verder dienen de constructies aan de binnenzijde perfect luchtdicht uitgevoerd te worden (2^e en 3^e uitgangspunt). Indien dit niet het geval is zal, met name bij constructies met **luchtlagen**, door de convectieve luchtstroom van warme vochtige binnenlucht (=exfiltratie) in korte tijd veel vocht in de constructie tegen het “buitendak” condenseren en **grote schade tot gevolg hebben!** Dit laatste is vooral het geval bij een metalen “buitendak”, welke **geen enkele vochtabsorptie bezitten**. Omdat een goede luchtdichte afsluiting aan de binnenzijde in de bouwpraktijk bij toepassing van lijnvormige elementen moeilijk is te realiseren, dienen geventileerde dakconstructies, welke uit lijnvormige elementen bestaan, afgeraden te worden.



De gevolgen van nachtelijke straling kunnen eveneens bij met buitenlucht geventileerde constructies tot vochtproblemen leiden. Een “buitendak” met geringe warmtecapaciteit en een lage thermische weerstand (vooral bij een metalen “buitendak”!!) 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!

8. Voorbeelden

Voorbeeld 8.1

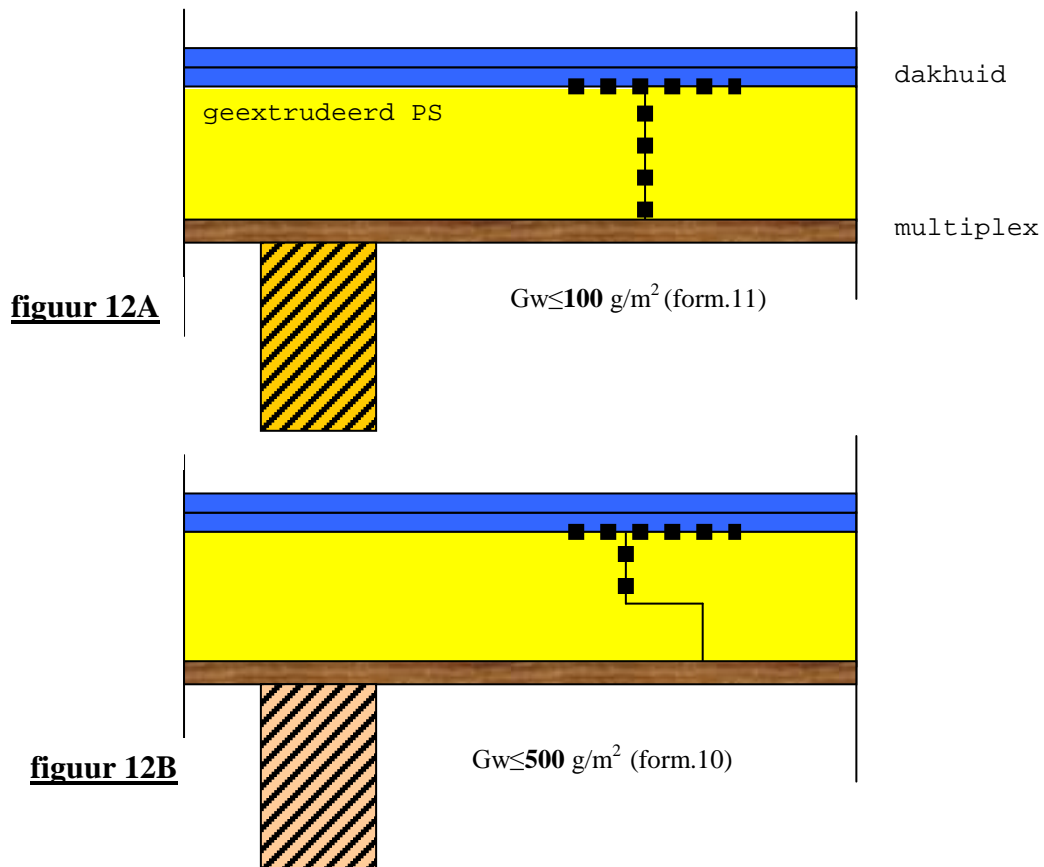
Gegeven:

Een plat houten dak (multiplex met $d = 0,02$ m, $\mu = 10$ en $\lambda = 0,2$ SI) wordt geïsoleerd met niet-vocht absorberende geëxtrudeerde PS platen van $0,10$ 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 $0,04$ SI. De rekenwaarden voor het binnen-en buitenklimaat voor de winterperiode zijn overeenkomstig hoofdstuk 5:

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

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

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



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

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

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

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

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

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

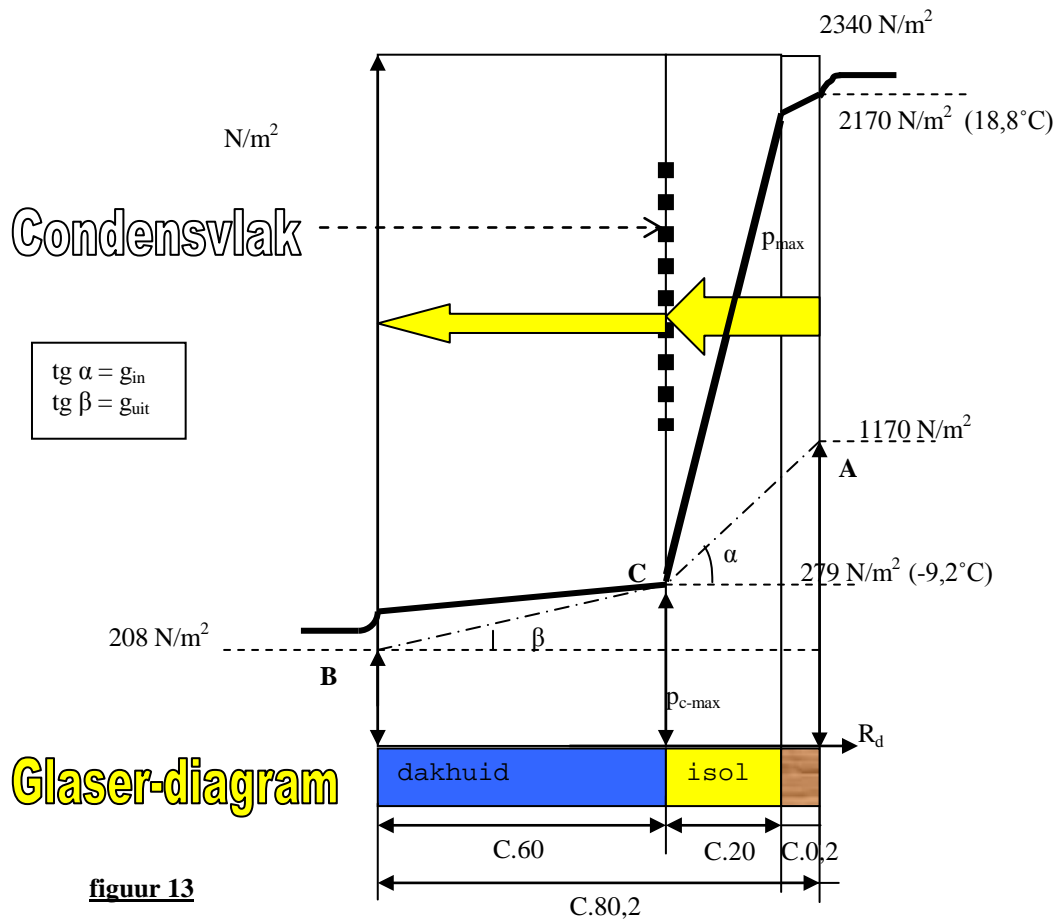
$$T_{\text{bovenzijde dakbeschot}} = 20 - (0,13+0,10) \cdot 9,46 = 17,8^\circ\text{C} \text{ ---} \rightarrow p_{\text{max}} = 2034 \text{ N/m}^2$$

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

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

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** ($tg \alpha$):

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

dampdiffusie naar **buiten** (tg β):

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

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

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

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/m^2 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):

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

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

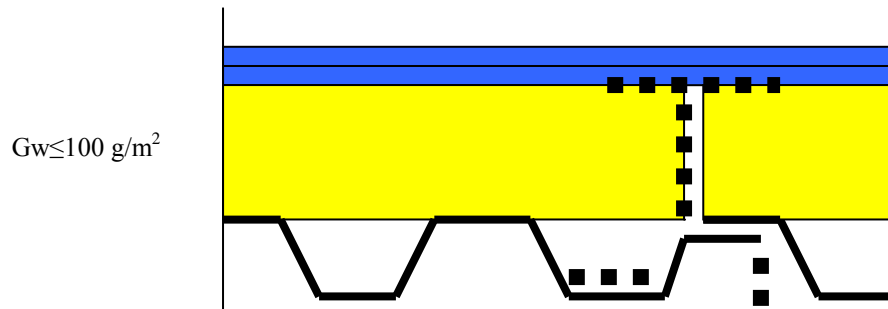
Deze hoeveelheid kan teruggebracht worden tot de eis door boven op het dakbeschot een dampremmende laag toe te passen. Om aan de eis van 100 g/m^2 te voldoen moet **de totale μd_i van isolatie, dampremmende laag en dakbeschot (kortweg $\sum \mu d_i$ genoemd)** voldoen aan:

$$G_{\text{winter}} = \{(1170 - 279) / \sum \mu d_i - 1,18\} \cdot 0,978 = 100 \text{ g/m}^2 \rightarrow \sum \mu d_i = 8,6 \text{ m}$$

De dampremmende laag moet minimaal een μd -waarde hebben van $8,6 - (0,24+0,20) = 8,16 \text{ m}$.

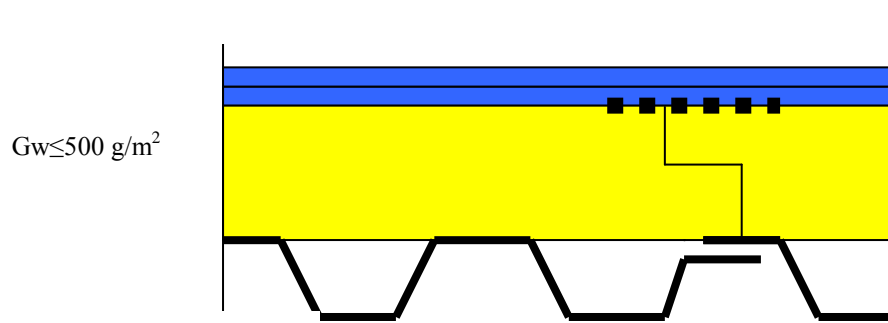
3. We vergelijken het houten dak uit voorbeeld 8.1 met een plaatstalen dak (figuur 14A). Dit gevouwen plaatstalen dak (zonder naaddichting met een $\mu d = 0 \text{ m}$ en r -thermisch = 0) wordt op gelijke wijze geïsoleerd met niet-vocht absorberende geëxtrudeerde PS platen van 0,10 m dikte ($\mu=200$ en $\lambda = 0,035$) en uitgevoerd volgens onderstaande figuur 14A .

De overige gegevens blijven gelijk. De $\sum \mu d_i$ -waarde wordt nu 20 in plaats van 20,2 m uit voorbeeld 8.1. De temperatuur onder de dakhuid blijft vrijwel gelijk. De hoeveelheid condensaat in de winter wordt iets hoger 42,4 g/m². Alhoewel de constructie volgens figuur 14A voldoet is, vanwege het gevaar van een convectieve luchtstroom door de naden van het plaatstalen dak en de isolatie, constructie volgens figuur 14B/C of een dampremmende (luchtdichte) laag op het gevouwen plaatstaal van constructie figuur 14A aan te bevelen!



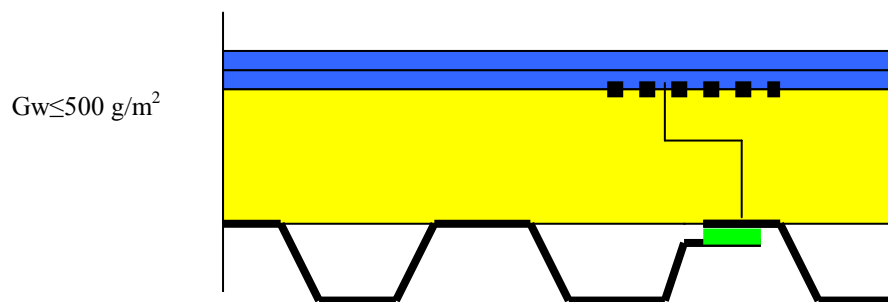
figuur 14A

gevaar van convectieve luchtstroom!
zonder naaddichting!



figuur 14B

zonder naaddichting!



figuur 14C

met naaddichting!

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):

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

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

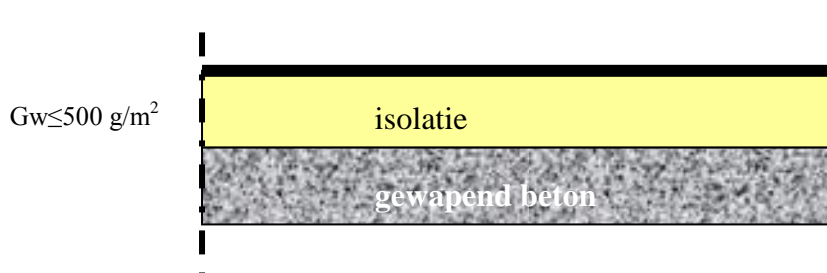
Deze hoeveelheid kan teruggebracht worden door boven op het dakbeschot een dampremmende laag toe te passen. Om aan de eis van 100 g/m^2 te voldoen moet de dampremmende laag minimaal een μ -waarde hebben van $8,6 - (2,0 + 0,2) = 6,4 \text{ m}$ (zie opmerking 2). Bij toepassing van EPS met randprofilering 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 ($d = 0,20 \text{ m}$, $\mu = 35$ en $\lambda = 2,0 \text{ SI}$) wordt geïsoleerd met minerale wolplaten met harde persing van $0,20 \text{ m}$ dikte ($\mu=2$ en $\lambda = 0,04$) volgens figuur 15. 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 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

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

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

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

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

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

b. Bepaling van de maximale dampspanningen in de dakconstructie

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

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

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

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

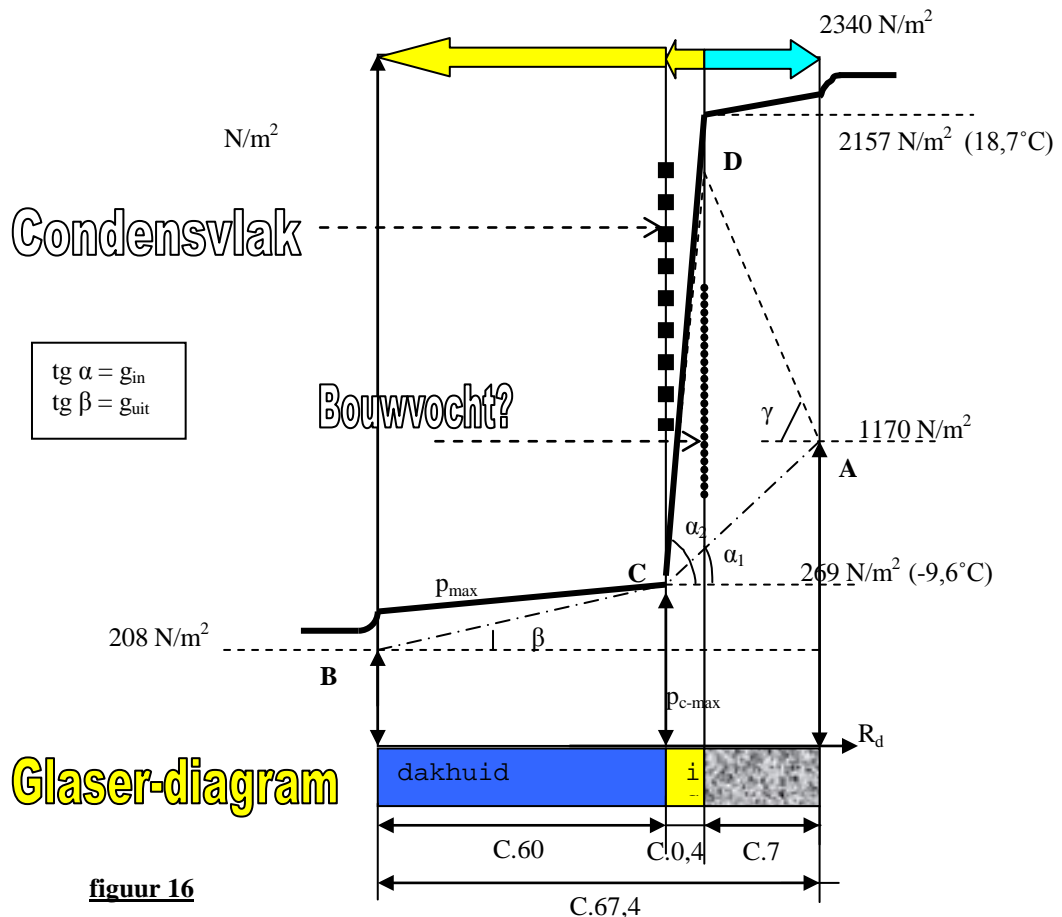
$$T_{\text{bovenzijde beton}} = 20 - (0,13+0,10) \cdot 5,65 = 18,7^\circ\text{C} \text{ ---> } p_{,\text{max}} = 2157 \text{ N/m}^2$$

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

$$T_{e0} = -10 + 0,04 \cdot 5,65 = -9,8^\circ\text{C} \text{ ---> } p_{e0,\text{max}} = 264 \text{ N/m}^2$$

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 condensatievlak weergegeven. Onder aanname dat geen bouwvocht aanwezig is wordt de hoeveelheid condens overeenkomstig vorige voorbeeld in de winterperiode:

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

Deze hoeveelheid voldoet aan de eis van maximaal 500 g/m^2

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):

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

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

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

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/m^2 te voldoen en uitgaande van voornoemd vereenvoudigde verdampingsproces 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 $3,7 - 0,4 = 3,3 \text{ m}$.

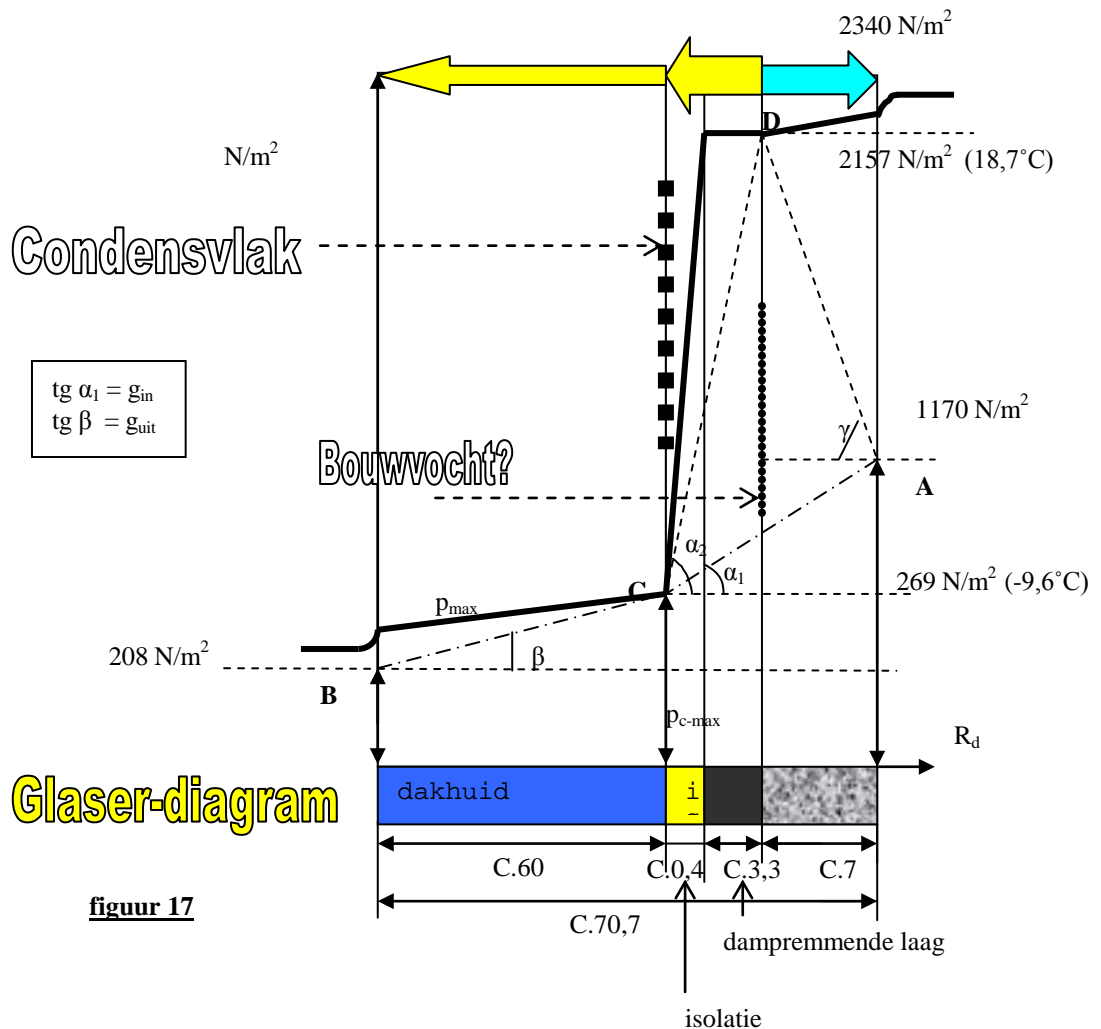
De verdamping van vocht uit de afschotlaag bij toepassing van een dampremmende laag op deze laag zal onder gegeven rekenwaarden en een gelijkblijvende relatieve vochtigheid van 100% behoorlijk dalen:

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

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

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

2. Door het toepassen van een dampdicht isolatiemateriaal ($\mu\text{d} > 3,7 \text{ m}$) 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.

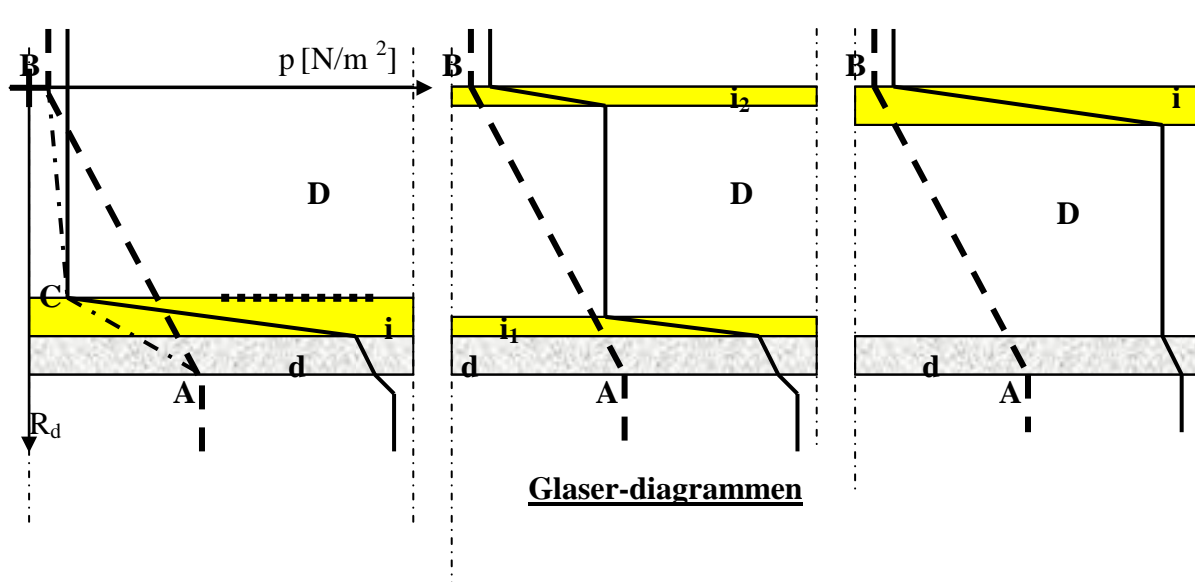
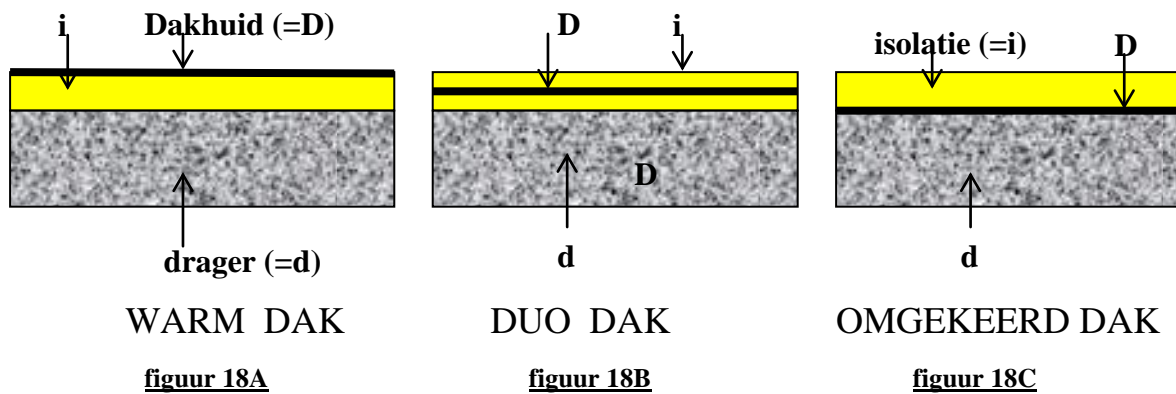


9. Kwalitatieve hygrische beoordeling van ontwerpvarianten

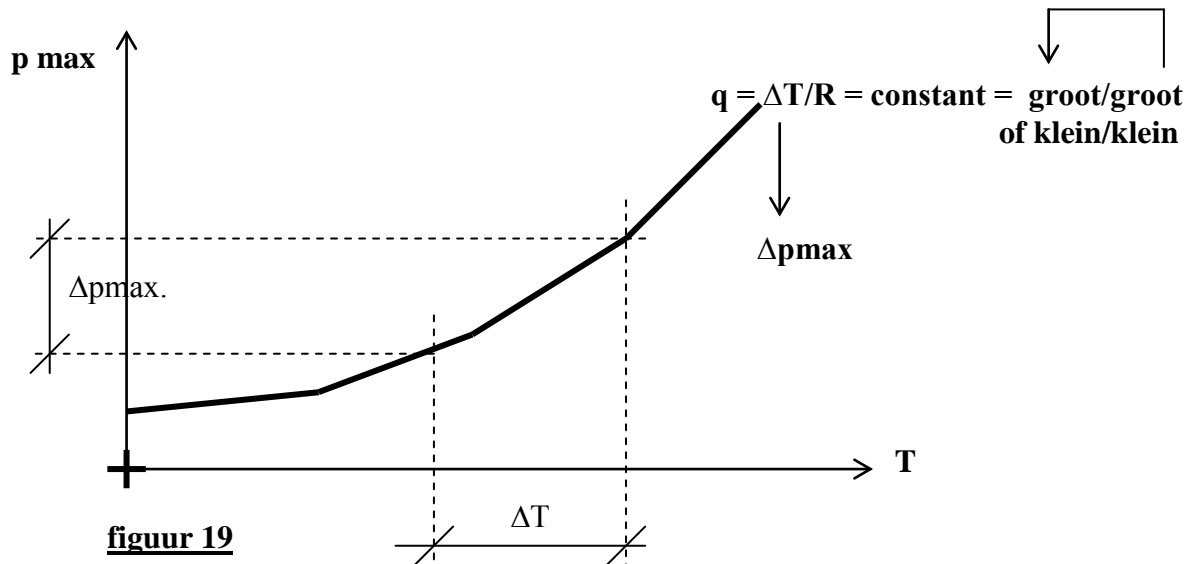
Uit vorig hoofdstuk blijkt dat voor een kwantitatieve beoordeling van een uitwendige scheidingsconstructie, slechts enkele waarden relevant zijn. Om vast te stellen welke waarden voor een kwantitatieve berekening relevant zijn en/of om een eerste kwalitatieve beoordeling van een ontwerpvariant mogelijk te maken dient **eerst een schets van het Glaser-diagram getekend te worden**. Met deze Glaser-diagrammen kunnen ook ontwerpvarianten kwalitatief met elkaar vergeleken worden.

Voorbeeld 9.1

Hierna wordt als voorbeeld drie dakconstructies **hygrisch** met elkaar vergeleken. De isolerende laag (i) verloopt bij de te vergelijken dakconstructies van onder de dakhuid (=warm dak; fig.18A) naar boven de dakhuid (=omgekeerd dak; fig.18C). Het dak in figuur 18B is een nageïsoleerd warm dak, ook wel **duo-dak** genoemd. De dakhuid bezit een grote dampdiffusieweerstand (aangegeven met een "grote" D). De constructielaa of drager, welke uit diverse materialen kan bestaan, bezit verhoudingsgewijs een kleinere dampdiffusieweerstand ("kleine" d) en een kleine warmte-isolatie.



Het dampdiffusieproces is in de Glaser-diagrammen (figuur 18) weergegeven. Op de verticale as zijn in verhouding de dampdiffusieweerstanden uitgezet; op de horizontale as de dampdrukken. De maximale dampspanningslijn (ononderbroken lijn) kan uit de temperatuurlijn bepaald worden. Een grote temperatuursprong zoals bij een goed isolerende materiaallaag (R groot) betekent ook een grote maximale dampspanningsprong over deze materiaallaag (zie figuur 19: relatie $T - p_{\text{max}}$).



De werkelijke dampspanningslijn (—) is in dit diagram een rechte lijn tussen de optredende dampspanning binnen en buiten (punten A en B, figuur 18). Bij doorsnijding van deze onderbroken verbindingslijn AB met de maximale dampspanningslijn, zal inwendige condensatie plaatsvinden. Alleen bij het warme dak (figuur 18A) is dit het geval en treedt duidelijk inwendige condensatie in het vlak door punt C op (raaklijnen)

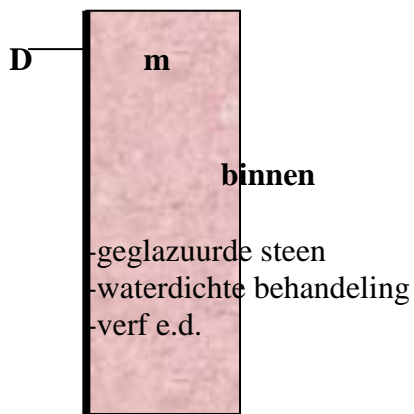
Volgens figuur 18C, het omgekeerde dak, is de kans op inwendige condensatie nihil. Het nadeel van dit dak is, dat water tussen de isolatieplaten door kan sijpelen en voor afkoeling onder de isolatieplaat kan zorgen (onderstroming). Isolatieplaten met grotere dikte en randprofieling moet dit energieverlies opvangen. Opdrijven moet door ballast voorkomen worden..

Bij het warme dak is condensatie onder de dakhuid vrijwel niet te vermijden. In vorige hoofdstukken hebben we echter gezien dat de meeste combinaties drager/isolatie een ruim voldoende "binnen"-dampdiffusie weerstand ($\sum \mu_i$) bezitten om vochtproblemen in het warme dak te voorkomen.

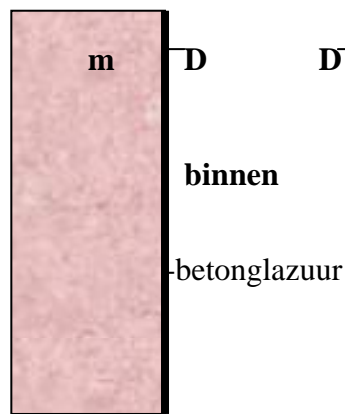
Door combinatie van het warme en het omgekeerde dak ontstaat het "duo"-dak. De nadelen van voornoemde daken vallen bij dit dak weg. De ballast kan beperkt blijven, onderstroming heeft een gering effect, temperatuurspanningen in de dakhuid zijn geringer dan bij een warm dak en de kans op inwendige condensatie is zeer klein.

Voorbeeld 9.2

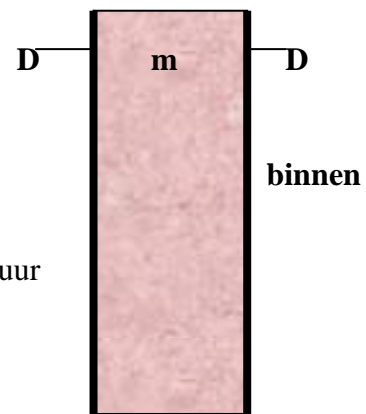
In onderstaand voorbeeld worden mogelijke vochtproblemen onderzocht van een homogene constructie (hier bijv.: steens buitenmuur (=m)) in relatie tot een dampremmende laag (=D). De dampremmende laag is aan de buiten- en binnenzijde en aan beide zijden aangebracht. Door het Glaser-diagram van deze drie varianten te schetsen kunnen deze kwalitatief vergeleken worden.



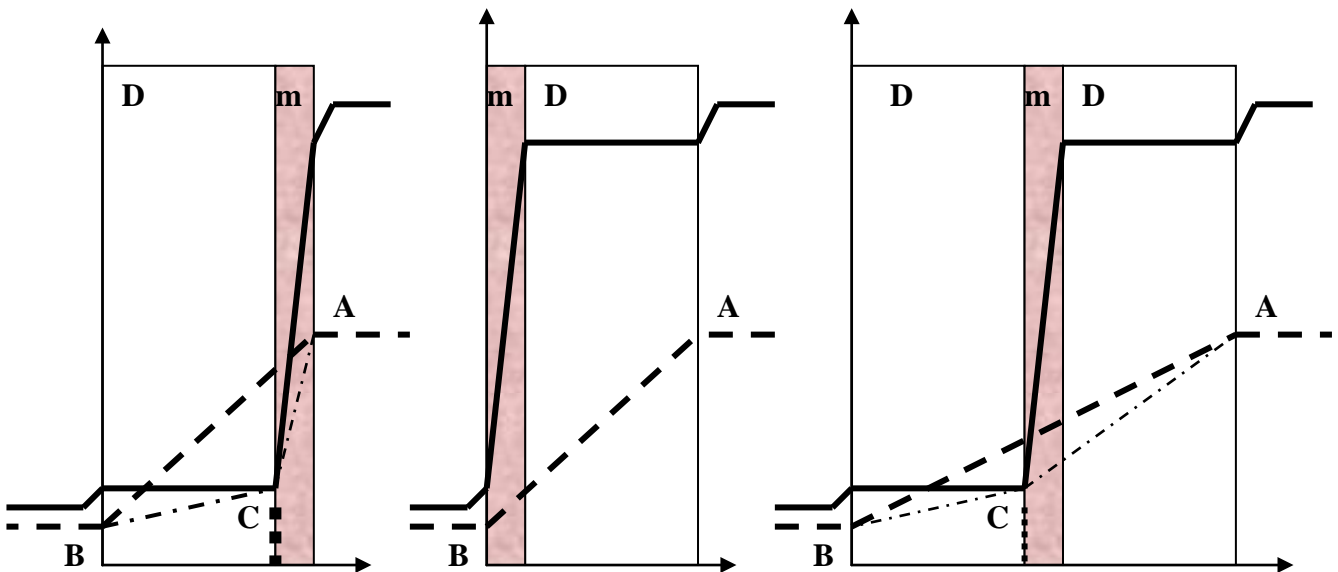
figuur 20A



figuur 20B



figuur 20C

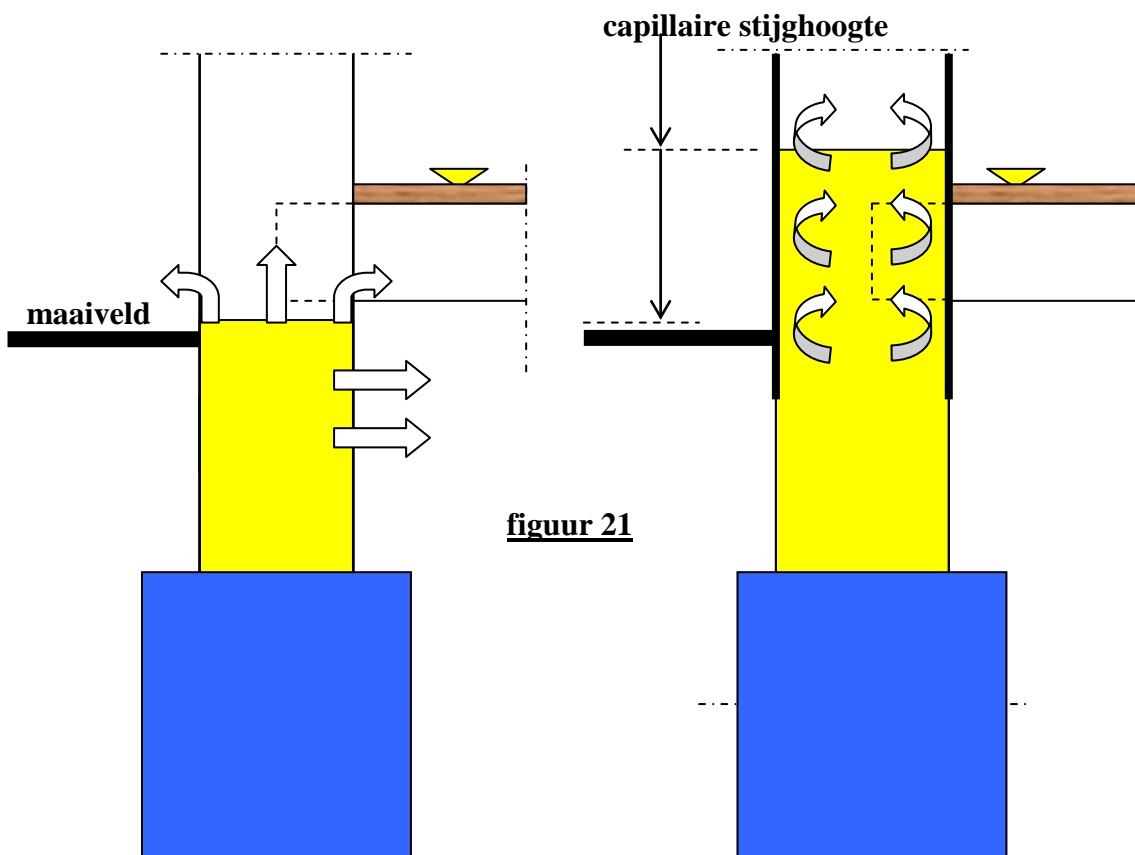


Uit figuur 20A blijkt dat een dampremmende laag (bijv. verf of geglaazuurde steen) aan de buitenzijde van een homogene constructie (bijv. houten stijl of steensmuur) inwendige condensatie achter de dampremmende laag tot gevolg heeft.

Bij een dampdichte laag aan de binnenzijde is inwendige condensatie uitgesloten (figuur 20B).

Dampdichte lagen moeten dus aan de warme kant liggen.

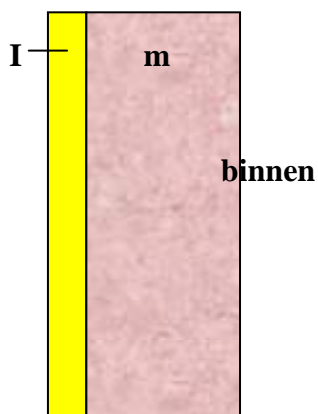
Dampdichte lagen zijn aan de binnenzijde in elk geval noodzakelijk, wanneer aan de buitenzijde op andere technische gronden een laag dampdicht materiaal (verf, waterdichte laag ter voorkoming van vochtdoorslag e.d.) is aangebracht en waterdampcondensatie moet worden voorkomen (figuur 20C). Het nadeel van het geheel inpakken van constructies met dampremmende lagen is dat in de constructie aanwezig vocht (bouwvocht, optrekkend vocht, binnendringend vocht bij scheuren e.d.) moeilijk kan verdampen en tot vochtproblemen kan leiden (bijv. weggrotende stijl van kozijn, weggrotende balkkop door verhoging capillaire stijghoogte in muur; figuur 21).



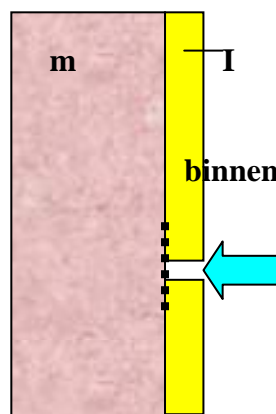
figuur 21

Voorbeeld 9.3

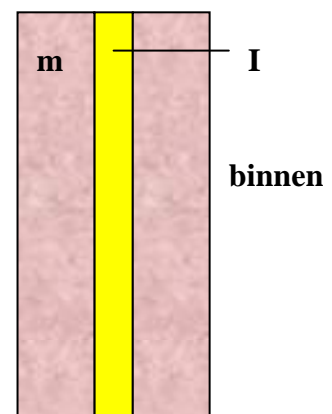
In onderstaand voorbeeld worden mogelijke vochtproblemen onderzocht van een homogene constructie (hier bijv.: steens buitenmuur (=m)) in relatie tot een zeer goed **dampremmende isolerende laag van schuimglas (=I)**. Het schuimglas is aan de buiten- en binnenzijde en in het midden van de homogene constructie aangebracht. Door het Glaser-diagram van deze drie varianten te schetsen kunnen deze kwalitatief vergeleken worden.



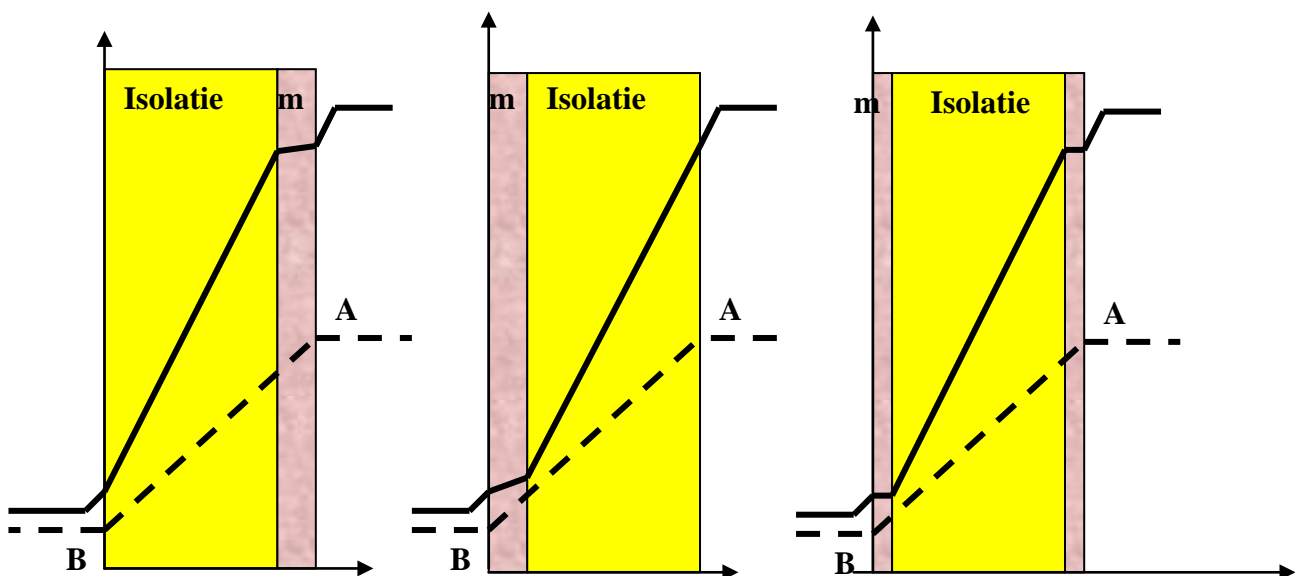
figuur 21A



figuur 21B



figuur 21C



Uit figuur 21A blijkt dat een dampremmende isolatielaag (bijv. foamglas o.i.d.) aan de buitenzijde van een homogene constructie (bijv. steensmuur) geen inwendige condensatie tot gevolg heeft.

Bij een dampdichte isolatielaag aan de binnenzijde is de kans op inwendige condensatie vrijwel uitgesloten (figuur 21B). Alleen bij een slechte naaddichting tussen de isolatieplaten kan oppervlaktecondensatie tegen de muur optreden. Voor een goede naaddichting en in verband met de kans op breuk dienen de schuimglasplaten geheel in bitumen te worden aangebracht.

Ook bij een door twee muren ingesloten isolatielaag door schuimglas is inwendige condensatie uitgesloten (figuur 21C).

10. Literatuur

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