

syllabus BOUWFYSICA

deel 1: WARMTE en VOCHT

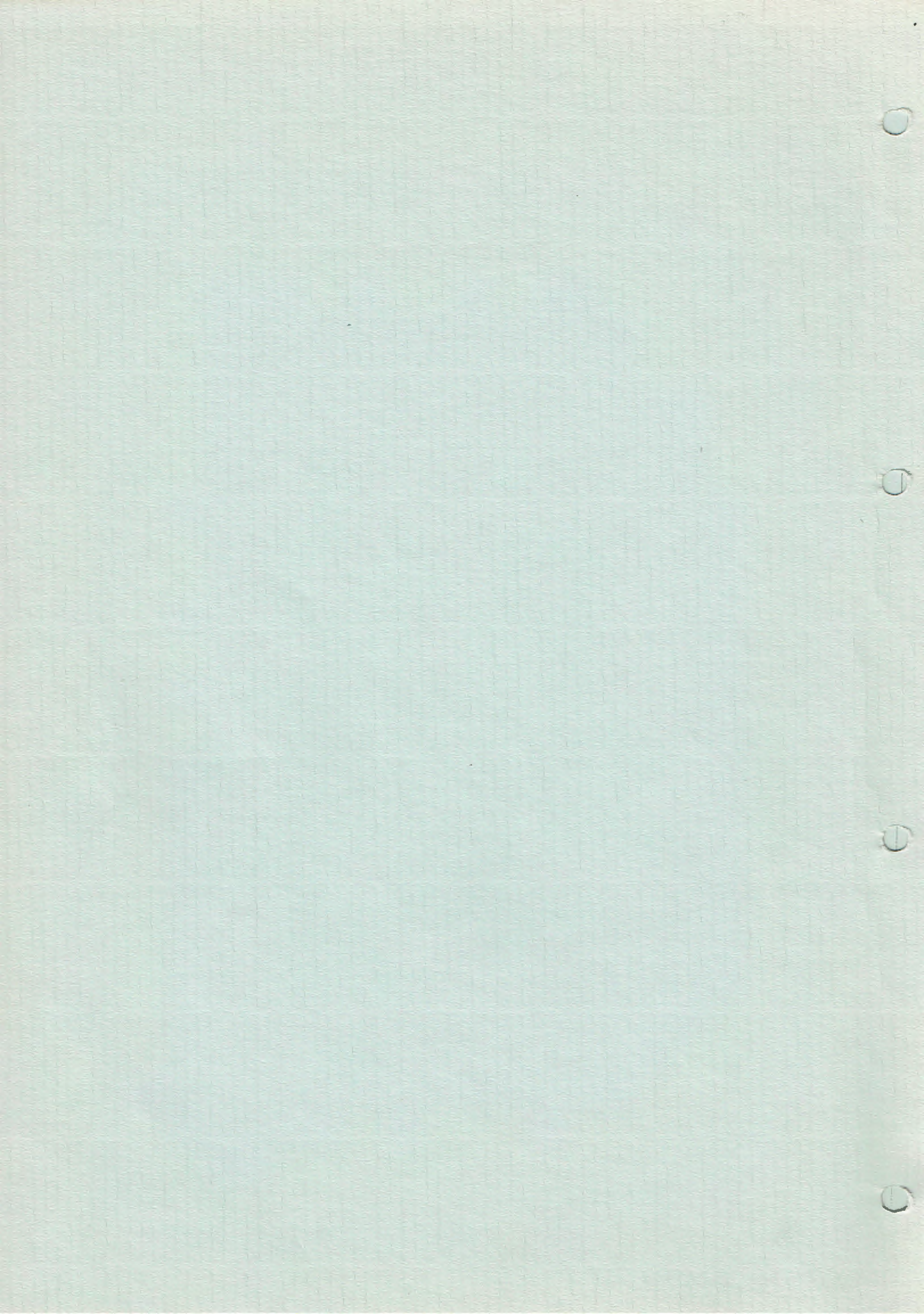
Rijksgebouwendienst

Hoofdafdeling Bouw

's-Gravenhage, november 1976

april 1978

ir. A.C. van der Linden



0	<u>INLEIDING</u>
0.1	WAAROM BOUWFYSICA
1	<u>EENHEDEN</u>
1.0	INLEIDING
1.1	GRONDEENHEDEN IN HET SI-STELSEL
1.2	ALGELEIDE EENHEDEN
2	<u>WARMTE</u>
2.0	INLEIDING
2.1	BASISBEGRIPPEN
2.2	WARMTEWEERSTAND VAN CONSTRUCTIES
2.3	TEMPERATUURVERLOOP IN CONSTRUCTIES
2.4	WARMTEACCUMULATIE
2.5	TEMPERATUURSPANNINGEN
2.6	KOUDEBRUGGEN
3	<u>VOCHT</u>
3.1	BASISBEGRIPPEN
3.2	WATERDAMPDIFFUSIEWEERSTAND VAN EEN CONSTRUCTIE
3.3	VERLOOP VAN DE WATERDAMPSPANNING IN CONSTRUCTIES
3.4	INWENDIGE CONDENSATIE
3.5	VOCHTABSORPTIE, HYGROSCOPISCH VOCHTGEHALTE
3.6	RELATIEVE VOCHTIGHEID BINNENSHUIS

- 4 WARMTE- EN VOCHTTECHNISCH GEDRAG VAN CONSTRUCTIES

- 4.0 INLEIDING

- 4.1 THERMISCH BEOORDELEN VAN CONSTRUCTIES
- 4.1.1 Normen
- 4.1.2 Aanbevelingen, gemiddelde k-waarde
- 4.1.3 Economie van het isoleren

- 4.2 BEOORDELEN VAN DE VOCHTHUISHOUDING IN CONSTRUCTIES
- 4.2.1 Klimaatcondities
- 4.2.2 Oppervlaktecondensatie
- 4.2.3 Inwendige condensatie

- 4.3 BUITENWANDEN
- 4.3.0 Inleiding
- 4.3.1 De traditionele spouwmuur
- 4.3.2 De geïsoleerde spouwmuur
- 4.3.3 De achteraf geïsoleerde spouwmuur
- 4.3.4 Andere spouwconstructies uit steenachtig materiaal
- 4.3.5 Spouwconstructies uit lichte materialen
- 4.3.6 Sandwichpanelen
- 4.3.7 Homogene wanden

- 4.4 DAKEN
- 4.4.0 Inleiding
- 4.4.1 Hellende daken
- 4.4.2 Platte daken
 - Koud dak
 - Dak met ribbenplaten
 - Warm dak
- 4.4.3 Verlaagde plafonds
- 4.4.4 Invloed van het soort isolatiemateriaal
- 4.4.5 De dampremmende laag
- 4.4.6 Nat worden van de isolatie
- 4.4.7 Blaasvorming op daken
- 4.4.8 Het omgekeerde dak

- 4.5 VLOEREN EN KELDERS
 - 4.5.1 Vloeren boven buitenlucht
 - 4.5.2 Vloeren boven kruipruimten
 - 4.5.3 Kelders niet in het grondwater
 - 4.5.4 Kelders in het grondwater

- 4.6 VOORKOMEN VAN KOUDEBRUGGEN

B O U W F Y S I C A
=====

0 INLEIDING

0.1 WAAROM BOUWFYSICA

Vroeger werd gebouwd volgens een "trial and error" systeem. Veranderingen vonden geleidelijk plaats; er was voldoende tijd om met nieuwe materialen en nieuwe constructies ervaring op te doen. Door de geringe bouwproductie bleven mislukkingen beperkt van omvang.

Thans worden aan de lopende band nieuwe bouwmaterialen en bouwconstructies ontwikkeld en voordat hiermee ervaring is opgedaan is er al dermate veel mee gebouwd dat fouten werkelijk tot calamiteiten kunnen leiden.

Voor het formuleren van ontwerpcondities en het voorspellen van het bouwfysisch gedrag van constructies en materialen moet nu de wetenschap te hulp komen.

Tevens moet de kennis die nodig is om bouwfouten te voorkomen worden doorgegeven naar de basis, naar diegenen die in het ontwerpproces en bij de bouw zijn betrokken.

De eisen die in de bouwfysica worden gesteld zijn van verschillende aard.

In de eerste plaats zijn er

- door de mens gestelde eisen aan de behaaglijkheid in het algemeen, zowel met betrekking tot warmte als tot geluid.

In de tweede plaats zijn er

- door de mens gestelde eisen met betrekking tot het beperken van energieverbruik voor ruimteverwarming enz.

In de derde plaats zijn er

- door de constructie gestelde eisen in verband met het voorkomen van bouwschade door scheuren, rotting, schimmels, afvriezen enz.

1 EENHEDEN

1.0 INLEIDING

Het lijkt nuttig als vervolg op de algemene inleiding aandacht te besteden aan de eenheden waarmee wordt gewerkt. Te meer daar er moet worden overgeschakeld naar SI-eenheden (Système International).

Zo werd bijvoorbeeld vroeger het vermogen van een verwarmingsapparaat uitgedrukt in kcal/h, nu is dat joule/seconde of watt.

Wat is het verband tussen deze eenheden?

Waar komt bijvoorbeeld de joule vandaan?

1.1 GRONDEENHEDEN IN HET SI-STELSEL

De SI-grondeenheden waarmee wordt gewerkt zijn de volgende:

l = lengte, eenheid: meter (m)

t = tijd, eenheid: seconde (s)

T = temperatuur, eenheid: kelvin (K)

m = massa, eenheid: kilogram (kg)

De eerste twee eenheden, m en s behoeven geen nadere uitleg. Anders ligt het met de temperatuur. Was men voorheen gewend te rekenen in $^{\circ}\text{C}$, nu gebeurt dit in K. Er is echter een eenvoudig verband tussen K en $^{\circ}\text{C}$.

De temperatuur van Celsius begint bij de temperatuur van smeltend ijs. De Kelvin-schaal begint bij het absolute nulpunt, ca. -273°C . De grootte van de eenheden van beide schalen zijn gelijk, zodat het volgende verband geldt:

$$K = ^{\circ}\text{C} + 273 \quad \text{of} \quad ^{\circ}\text{C} = K - 273$$

Wanneer een temperatuurverschil wordt bekeken is dit even groot als dit uitgedrukt wordt in K als in $^{\circ}\text{C}$. In dit hoofdstuk wordt voornamelijk gewerkt met temperatuurverschillen, zodat we in afwijking van het SI-stelsel toch de $^{\circ}\text{C}$ zullen gebruiken.

Ook de eenheid van massa heeft een nadere toelichting. Bij massa moet men niet denken aan een bepaald gewicht, maar aan een bepaalde hoeveelheid stof. Het gewicht van die massa, van die hoeveelheid stof is de grootte van de aantrekkingskracht die de aarde uitoefent op die massa. Deze aantrekkingskracht is niet overal op aarde gelijk.

1.2 AFGELEIDE EENHEDEN

Er bestaan vele afgeleide eenheden, die zijn samengesteld uit de basiseenheden.

Bijvoorbeeld:

v = snelheid, eenheid: m/s

a = versnelling, eenheid: m/s^2

1.2.1 Eenheid van kracht, newton

Om aan een massa een versnelling te geven is kracht nodig. In de mechanica geldt:

$$\text{kracht} = \text{massa} \times \text{versnelling}$$

$$\text{ofwel } \text{kracht} = \text{kg} \quad \times \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

De afgeleide eenheid van kracht noemt men newton:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2.$$

Door de aantrekkingskracht van de aarde ondergaat een (wrijvingloos) vallend lichaam een bepaalde versnelling. Deze is voor onze breedtegraad ca. $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Hieruit volgt, dat een massa van 1 kg een aantrekkingskracht ondervindt, een gewicht heeft van:

$$G = 1 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9,81 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} = 9,81 \text{ N}$$

In de praktijk wordt dit veelal afgerond op: 1 kg heeft een gewicht van 10 newton.

1.2.2 Hoeveelheid energie, arbeid, joule

Wanneer een gewicht over een bepaalde hoogte wordt opgetrokken, wordt een zekere hoeveelheid arbeid verricht. Hoe groter het gewicht en hoe groter de afstand, des te groter is de verrichte arbeid.

$$\begin{aligned} \text{Arbeid} &= \text{kracht} \times \text{weg} \\ \text{ofwel } \text{Arbeid} &= N \times m = N.m \end{aligned}$$

De afgeleide eenheid van arbeid noemt men joule: $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$

1.2.3 Vermogen, watt

De tijd waarin een bepaalde arbeid kan worden verricht bepaalt het vermogen. Om een gewicht twee keer zo snel omhoog te trekken is ook een twee keer zo groot vermogen nodig. De verrichte hoeveelheid arbeid blijft even groot.

$$\text{Vermogen} = \frac{\text{Arbeid}}{\text{tijd}} = \frac{\text{N.m}}{\text{s}} = \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

De afgeleide eenheid van vermogen noemt men watt: $1 \text{ W} = 1$ joule/s

2 WARMTE

2.0 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de basisbegrippen met betrekking tot warmte en warmtetransport behandeld. De vertaling naar in de praktijk voorkomende constructies en het werken met de begrippen komt in 4 "Warmte- en vochttechnisch gedrag van constructies" aan de orde.

Er zal steeds worden gewerkt in SI-eenheden; in een bijlage zijn omrekeningsfactoren opgenomen voor enige op dit moment nog voorkomende oude eenheden.

2.1 BASISBEGRIPPEN

2.1.1 Warmte, een vorm van energie

Warmte is niet anders dan een vorm van energie. Een hoeveelheid warmte wordt dan ook uitgedrukt in joule. Vroeger drukte men een hoeveelheid warmte uit in de kilocalorie.

Een kcal is de hoeveelheid warmte die nodig is om 1 kg water 1° C in temperatuur te doen stijgen.

Door nu een hoeveelheid water met behulp van een elektrisch element te verwarmen heeft men kunnen vaststellen hoeveel joule er nodig is om 1 kg water 1° C in temperatuur te doen stijgen.

Immers, $1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3600000 \text{ J}$, want
 $1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/s}$.

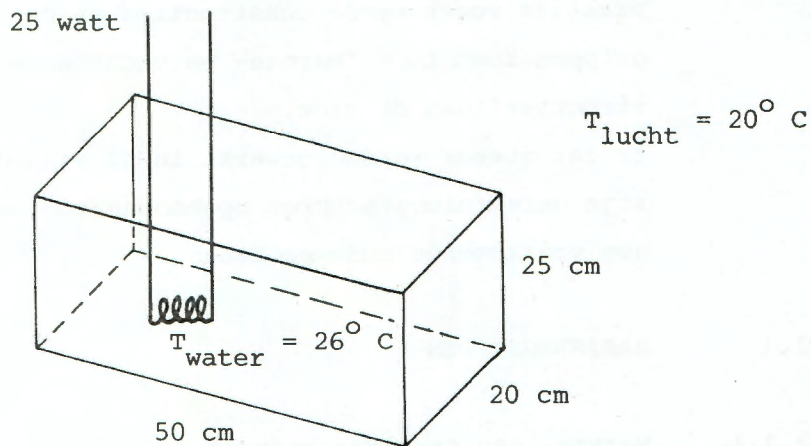
Zo heeft men kunnen vaststellen dat:

$$1 \text{ kcal} = 4190 \text{ joule}$$

2.1.2 Warmtestroom (i)

Om het begrip warmtestroom toe te lichten gebruiken we het voorbeeld van een aquarium.

electrische verwarming



In een aquariumboek kan men lezen dat wanneer in een aquarium van deze afmetingen een verwarming wordt aangebracht van 25 watt, het water altijd ca. 6°C hoger zal zijn dan de kamertemperatuur.

De electrische energie die aan het verwarmingselement wordt toegevoerd verwarmd het water en het water geeft de warmte, via het glas weer af aan de lucht in de kamer.

Vanuit het aquarium is er dus een warmtestroom $i = 25 \text{ watt} = 25 \text{ joule/s}$ naar de kamerlucht.

In het oude eenheden stelsel werd de warmtestroom uitgedrukt in kcal/h. De omrekening in SI-eenheden gaat als volgt.

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = \frac{4190 \text{ joule}}{3600 \text{ s}} = 1,16 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1,16 \text{ watt}$$

Op analoge wijze zijn ook andere omrekeningsfactoren eenvoudig te bepalen

2.1.3 Warmtetransport

Transport van warmte kan op verschillende manieren plaatsvinden, door convectie, geleiding of straling.

Convectie

Warmtetransport door convectie betekent dat de warmte vervoerd wordt door een of ander stromend medium. Het woord "convectie" betekent dan ook "stroming".

In het voorbeeld van het aquarium wordt door het verwarmings-element water opgewarmd. Dit water stroomt door het aquarium en geeft de warmte via het glas weer af aan het vertrek. Hetzelfde gebeurt bij de lucht die door een vertrek circuleert. Aan een radiator vindt opwarming plaats waarna de warmte weer afgegeven wordt aan bijvoorbeeld de ruiten.

In het eerste geval is het transportmiddel (stromend medium) dus water, in het tweede geval lucht. In beide gevallen spreekt men van warmteoverdracht door convectie.

Geleiding

Nu wordt de warmte niet door een stromend medium vervoert, maar vindt warmtegeleiding plaats in de stof zelf. De warmte wordt van molecuul tot molecuul doorgegeven.

Denk hierbij aan de koperen punt van een elektrische soldeerbout.

Deze warmtegeleiding kan plaatsvinden in vaste stoffen (metaal, steen, hout) maar ook in vloeistoffen en gassen (water, lucht, enz.).

Straling

Hierbij vindt warmtetransport plaats via een electromagnetische straling. Alle voorwerpen (lichamen) stralen warmte uit (infrarood).

Warme voorwerpen zenden meer straling uit dan koudere zodat tussen twee vlakken van verschillende temperatuur warmteoverdracht door straling mogelijk is.

Warmtestroomdichtheid (q)

Naast de totale warmtestroom kent men ook het begrip warmtestroomdichtheid.

Deze wordt aangeduid met q en is gedefinieerd als de warmtestroom per eenheid van oppervlak.

Zo zal men bij het berekenen van het warmteverlies van een gebouw eerst bepalen hoeveel warmte per m² door het glas of het dak verdwijnt om deze hoeveelheid daarna met het totale oppervlak van het betreffende constructiedeel te vermenigvuldigen.

$$i = q \cdot A \quad [W]$$

waarin: i = totale warmtestroom in W

q = de warmtestroomdichtheid in W/m²

A = het oppervlak in m²

2.1.4 Warmteoverdrachtscoëfficiënt door convectie

In de bouwpraktijk heeft men met convectie te maken aan oppervlakken van constructies.

In de wintersituatie wordt aan de binnenzijde van het gebouw door de lucht warmte overgedragen aan de buitenwanden; aan de buitenzijde wordt de warmte overgedragen aan de buitenlucht. Ook in spouwconstructies treedt warmteoverdracht door convectie op.

De grootte van deze convectieve warmteoverdracht wordt voornamelijk bepaald door de snelheid waarmee de lucht langs het oppervlak stroomt.

De warmtestroomdichtheid kan worden berekend met de volgende formule.

$$q_c = \alpha_c \cdot \Delta T \quad [W/m^2]$$

waarin: q_c = warmtestroomdichtheid door convectie in W/m²

α_c = warmteoverdrachtscoëfficiënt voor convectie in W/m²·K

ΔT = temperatuurverschil tussen het oppervlak en de langsstromende lucht in K of °C

De overdrachtscoëfficiënt geeft aan hoeveel warmte per m^2 wordt overgedragen bij een temperatuurverschil van 1 K ($^{\circ}C$) tussen het oppervlak en de langstromende lucht.

Voor een aantal omstandigheden wordt hieronder de overdrachtscoëfficiënt gegeven.

vrije convectie	$\alpha_c = 0-3 \text{ W/m}^2 \cdot K$
in verticale spouwen ($> 25 \text{ mm}$)	$\alpha_c = \text{ca. } 1 \text{ W/m}^2 \cdot K$
binnenshuis	$\alpha_c = 2-2,5 \text{ W/m}^2 \cdot K$
buitenshuis bij gemiddelde wind	$\alpha_c = 19-20 \text{ W/m}^2 \cdot K$
bij sterke wind oplopend tot	$\alpha_c = 200 \text{ W/m}^2 \cdot K$

2.1.5 Warmtegeleidingscoëfficiënt (λ)

Het is bekend dat het warmtegeleidingsvermogen van de diverse materialen verschillend is.

Metalen geleiden de warmte beter dan steen en steen geleidt de warmte weer beter dan hout of kunststoffen, terwijl de warmtegeleiding door een laag stilstaande lucht nog weer kleiner is.

Deze materiaaleigenschappen worden vastgelegd met behulp van de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ).

Deze coëfficiënt geeft aan hoeveel warmte er (per m^2) door een laag materiaal met een dikte van 1 m stroomt bij een temperatuurverschil tussen de beide oppervlakken van 1 K ($1^{\circ}C$). De dimensie van λ is daarom: $W/m \cdot K$.

In 5.2 wordt voor een groot aantal materialen de warmtegeleidingscoëfficiënt gegeven.

2.1.6 Warmtestroomdichtheid (q) door een laag materiaal, warmteweerstand (R)

De warmtestroomdichtheid (q), door een laag van een of ander materiaal is behalve van de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal afhankelijk van de dikte van de laag en het temperatuurverschil tussen de beide oppervlakken.

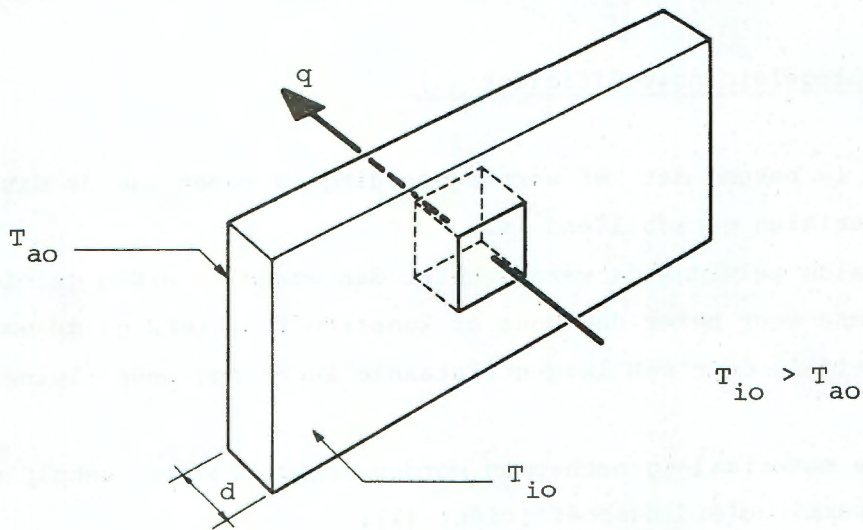
De warmteweerstand van een laag materiaal vindt men uit:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad \left[\text{m}^2 \cdot \text{K/W} \right]$$

De warmtestroomdichtheid volgt dan uit:

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad \left[\text{W/m}^2 \right]$$

Zie ook onderstaande figuur.



$$q = \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T = \frac{\lambda}{d} (T_{io} - T_{ao}) \quad \left[\text{W/m}^2 \right]$$

- waarin: q = de warmtestroomdichtheid in W/m^2
 λ = de warmtegeleidingscoëfficiënt van het materiaal
in W/m.K
 d = de dikte van de laag in m
 $\Delta T = T_{io} - T_{ia}$ het verschil in temperatuur tussen de
beide oppervlakken in K of $^{\circ}\text{C}$

In de onderstaande tabel wordt bij een temperatuurverschil van 10 K (°C) de warmtestroomdichtheid door een aantal materialen bij een veel toegepaste dikte gegeven.

materiaal	dikte (m)	λ (W/m.K)	$R = \frac{d}{\lambda}$ (m ² .K/W)	$q = \frac{\Delta T}{R}$ (W/m ²) $\Delta T = 10$ K
beton	0,12	1,9	0,063	158
houtwolcementplaat	0,10	0,12	0,83	12
polyurethaanschuim	0,04	0,023	1,7	6

2.1.7 Warmtestroomdichtheid bij warmteoverdracht door straling

Stralingsafgifte

De hoeveelheid warmte die door een willekeurig oppervlak wordt uitgestraald kan worden berekend met de volgende formule.

$$q = \epsilon \cdot 5,76 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 = \epsilon \cdot q_s \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

waarin: q = de afgegeven warmtestraling in W/m²

ϵ = de emissiecoëfficiënt van het materiaaloppervlak

T = de absolute temperatuur in K

$$q_s = 5,76 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Voor de meeste bouwmaterialen is de emissiecoëfficiënt

$\epsilon = 0,9 \text{ à } 1,0$. Deze waarden gelden ook voor alle kleuren verf.

Alleen voor metaalhoudende verf, zoals aluminiumlak geldt een

waarde $\epsilon = 0,35 \text{ à } 0,40$.

Voor geanodiseerd aluminium is de emissiecoëfficiënt

$\epsilon = 0,4 \text{ à } 0,5$ en voor blank aluminium $\epsilon = 0,07 \text{ à } 0,09$.

In de onderstaande tabel worden enkele waarden voor q_s (stralingsafgifte van een "zwart" lichaam) gegeven.

De constante in de formule ($5,76 \cdot 10^{-8}$) is die van Stefan-Bolzman.

temperatuur		$q_s = 5,76 \cdot 10^{-8} \cdot T^4$ (W/m ²)
(°C)	(K)	
-273	0	0
-10	263	273
0	273	321
10	283	370
20	293	425
30	303	486
70	343	797

Stralingsuitwisseling

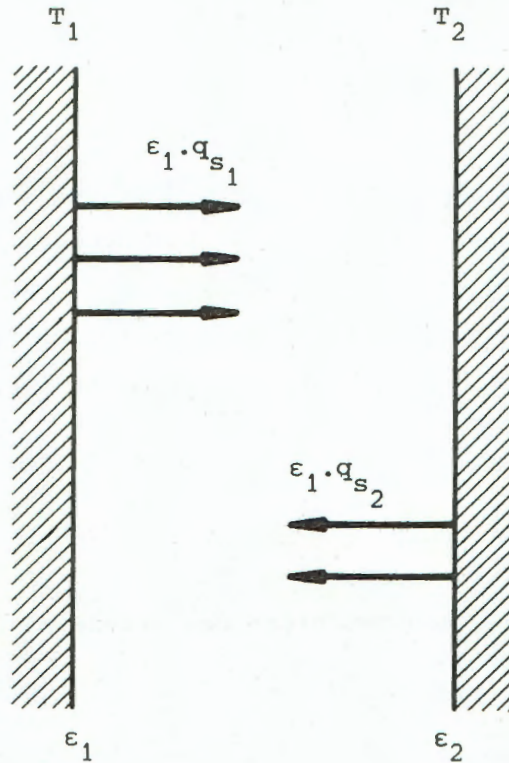
Twee vlakken tegenover elkaar stralen warmte naar elkaar. Voor beide vlakken geldt dus dat ze warmte ontvangen. Van de ontvangen warmte wordt een gedeelte geabsorbeerd. Dit gedeelte is gelijk aan de emissiecoëfficiënt van het oppervlak. Deze is dus feitelijk ook de absorptiecoëfficiënt. Wat niet wordt geabsorbeerd wordt gereflecteerd, en als het ware opgeteld bij wat in eerste instantie al wordt afgestraald, enz.

Wanneer de twee vlakken verschillend in temperatuur zijn en/of eventueel een verschillende emissiecoëfficiënt hebben zal per saldo warmte van het ene naar het andere vlak worden getransporteerd. Dit wordt berekend met behulp van de volgende formule.

$$q = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_1 \epsilon_2 + \epsilon_2} \cdot (q_{s_1} - q_{s_2}) \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

- waarin: q = de nettostralingsoverdracht in W/m²
 ϵ_1 = emissiecoëfficiënt van het ene vlak
 ϵ_2 = idem andere vlak
 q_{s_1} = stralingsafgifte van een "zwart" lichaam met de temperatuur van oppervlak 1 (zie tabel)
 q_{s_2} = idem oppervlak 2

Zie ook de volgende figuur.



Uit de tabel blijkt dat blijkt dat personen, met een huid (oppervlakte)temperatuur van 30 à 34° C bijna 500 W/m^2 warmte uitstralen. Wanneer men dicht bij een glasvlak met lage temperatuur (bijvoorbeeld 0° C) staat ontvangt men hooguit ca. 300 W/m^2 terug. Er is dan een netto stralingsverlies van ca. 200 W/m^2 hetgeen men ervaart als "koude-straling".

Evenzo ervaart men bij een warm vlak (radiator) de warmtestraling.

Overdracht van warmte door straling kan men onderdrukken door stralingsschermen zoals zonwering, gordijnen of een reflecterende folie in een spouwmuur.

2.2 WARMTEWEERSTAND VAN CONSTRUCTIES

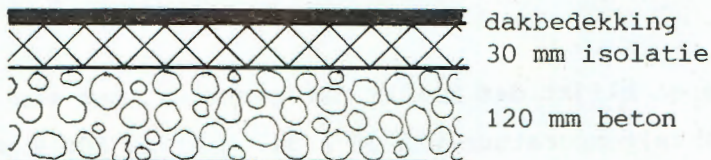
2.2.0 Inleiding

Hiervoor is de warmtegeleiding door een laag materiaal, de stralingsuitwisseling tussen twee oppervlakken en de warmteoverdracht door convectie besproken.

Bij constructies komen al deze vormen van warmtetransport naar voren. Verder is een constructie meestal uit meerdere lagen opgebouwd.

2.2.1 Warmteweerstand van gelaagde constructies

Als voorbeeld kan het hieronder getekende dak dienst doen.



Voor iedere laag kan de warmteweerstand worden uitgerekend. De totale warmteweerstand wordt gevonden door de weerstanden van de afzonderlijke lagen op te tellen.

$$R_C = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad [m^2.K/W]$$

waarin: R_C = de warmteweerstand van de constructies

R_1, R_2, R_3, \dots = de warmteweerstand van de afzonderlijke lagen

Aan de R_c worden, onder andere in het normblad NEN 1068:
"Thermische eigenschappen van woningen", eisen gesteld. In de
"voorschriften en wenken" en in de "model bouwverordening"
wordt veelal naar de normbladen verwezen.

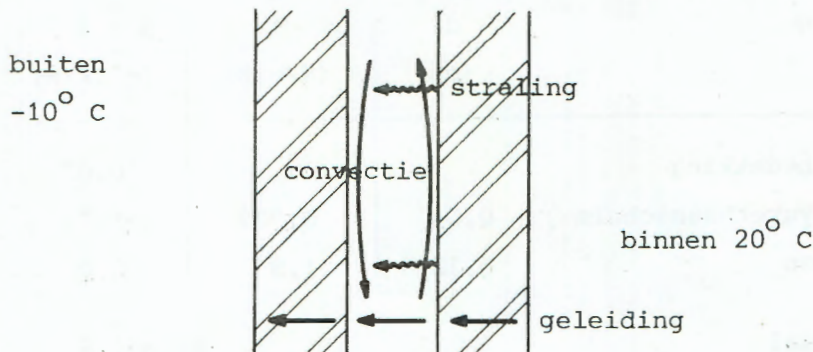
In het voorbeeld van het dak zijn de getallen als volgt.

laag	d (m)	λ (W/m.K)	$R = d/\lambda$ (m ² .K/W)
dakbedekking			0,03
polyurethaanschuim	0,04	0,023	1,74
beton	0,12	1,9	0,06
Totaal			$R_c = 1,83$

2.2.2 Warmteoverdracht in spouwconstructies

Bij een spouwconstructie komen alle vormen van warmteoverdracht aan de orde: geleiding, straling en convectie.

Eerst wordt een verticale spouw bekeken.



Lucht is een goede isolator. Voor stilstaande lucht geldt:
 $\lambda = \text{ca. } 0,025 \text{ W/m.K.}$ Dat wil zeggen dat een luchtlaag van 50 mm een warmteweerstand zou hebben van $R = d/\lambda = 0,05/0,025 = 2 \text{ m}^2.\text{K/W}$, en dat is erg veel. De lucht in een spouwconstructie staat echter jammer genoeg niet stil, er vindt convectie plaats. Aan het "warme" binnenspouwblad wordt de lucht opgewarmd. Warme lucht stijgt op. Aan het buitenspouwblad koelt de lucht af, wordt zwaarder en daalt. Zo ontstaat een rondgaande convectiestroom in de spouw, die warmte overbrengt van het binnen- naar het buitenspouwblad.

Omdat de oppervlaktetemperaturen van de spouwbladen (aan de spouwzijde) verschillend zijn, vindt ook warmteoverdracht door straling plaats.

Het is duidelijk dat de grote warmteweerstand van de lucht in stilstaande toestand sterk wordt verminderd door straling en convectie. Ook de in veel gevallen aanwezige spouwventilatie doet hieraan natuurlijk geen goed.

Hoe groot is nu de warmteweerstand van een spouw? Geleiding en convectie zijn afhankelijk van de spouwbreedte. In een erg smalle spouw zullen de convectiestromen zich niet zo sterk kunnen ontwikkelen; dat is gunstig. Aan de andere kant wordt de luchtlaag zo dun, dat de warmteweerstand erg laag wordt. Het aandeel van de straling is niet afhankelijk van de spouwbreedte, maar wel van de oppervlakte temperaturen van de spouwbladen.

Al met al is het niet goed mogelijk om voor de warmteweerstand van een bepaalde spouw een exacte waarde op te geven. In het algemeen wordt gerekend met een, door metingen bepaalde, gemiddelde waarde:

$$R_{\text{spouw}} = 0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (\text{verticale spouw})$$

Deze waarde geldt voor spouwen met een breedte van 25 tot 100 mm en hoogstens een zwakke ventilatie. Bij sterke ventilatie of afwijkende breedte ligt de warmteweerstand lager.

Bij horizontale spouwen ligt de invloed van de convectie iets anders. Er moeten twee gevallen worden onderscheiden:

- a) warmtestroom naar boven (dak met verlaagd plafond),
- b) warmtestroom naar beneden (vloer met verlaagd plafond boven onderdoorrit).

In het eerste geval stijgt de warme lucht die onderin de spouw wordt opgewarmd makkelijk naar de koude bovenkant waar de warmte wordt afgegeven.

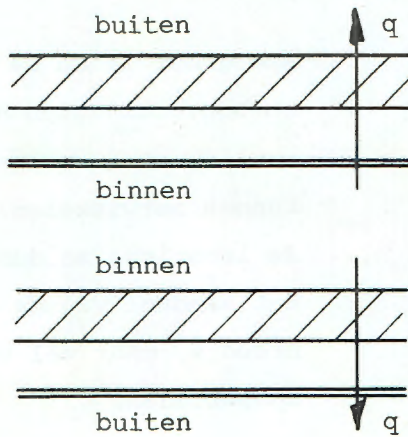
In het tweede geval blijft de warme lucht onder de warme vloer hangen, hetgeen dus minder sterke convectiestromen met zich meebrengt en dus een hogere warmteweerstand. Ook voor deze situaties zijn er rekenwaarden (zie de volgende figuur).

$$R_{\text{spouw}} = 0,15 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

horizontale spouw,
warmtestroom naar
boven,

$$R_{\text{spouw}} = 0,20 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

horizontale spouw,
warmtestroom naar
beneden



2.2.3 Warmteovergangsweerstanden

Hiervóór is de warmteweerstand van gelaagde constructies bekeken. Hierbij ging het om de warmteoverdracht van oppervlak (binnen) naar oppervlak (buiten). Er is vanzelfsprekend ook warmteoverdracht van de binnenlucht naar het binnenoppervlak en van het buitenoppervlak naar de buitenlucht. Deze overgang van lucht op materiaal en omgekeerd brengt ook een zekere warmteweerstand met zich mee. Deze warmteoverdracht vindt plaats door straling en door convectie. De convectie is, onder andere, afhankelijk van de luchtsnelheid langs het oppervlak. Buiten zal er, door de wind, een grotere warmteoverdracht door convectie plaatsvinden dan binnen.

Windsnelheid en oppervlaktetemperatuur veranderen steeds. Daarom wordt ook hier gewerkt met gemiddelde (genormaliseerde) waarden voor de zogenaamde warmteovergangsweerstanden.

$$r_a = 0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (\text{buiten})$$

$$r_i = 0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \quad (\text{binnen})$$

Wanneer men het warmteverlies door een constructie wil berekenen (bij het aanleggen van een verwarming bijvoorbeeld) moet men rekenen met de totale warmteweerstand die is samengesteld uit de warmteweerstand van de constructie en de beide overgangsweerstanden:

$$R_{\text{totaal}} = r_i + R_c + r_a$$

2.2.4 Warmtedoorgangscoefficiënt (k-waarde)

In de verwarmingswereld rekent (rekende) men veel met de zogenaamde k-waarde.

De k-waarde is het omgekeerde van de totale warmteweerstand.

$$k = \frac{1}{r_i + R_c + r_a} = \frac{1}{R_{\text{totaal}}} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Hierdoor verandert de formule voor de warmtestroomdichtheid:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{\text{tot}}} \quad \text{in} \quad q = k \cdot \Delta T \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

2.3 TEMPERATUURVERLOOP IN CONSTRUCTIES

Van een constructie die uit verschillende lagen is opgebouwd kan de totale warmteweerstand worden berekend. Hiermee kan de warmtestroomdichtheid worden bepaald.

Het is duidelijk dat die warmtestroomdichtheid (q) in iedere laag van de constructie even groot moet zijn; immers, er blijft geen warmte in de constructie achter en er wordt ook geen warmte bij gemaakt in de constructie.

$$\text{Voor iedere laag geldt: } q = \frac{\Delta T}{R}$$

Dit betekent dat het temperatuurverschil over een laag met grote warmteweerstand ook groter moet zijn dan bij een laag met kleine warmteweerstand. Met dit gegeven is het temperatuurverloop in een constructie te berekenen.

Er geldt:

$$q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{T_i - T_a}{R_{\text{totaal}}} = \frac{\Delta T_a}{r_a} = \frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{\Delta T_2}{R_2} = \dots\dots\dots$$

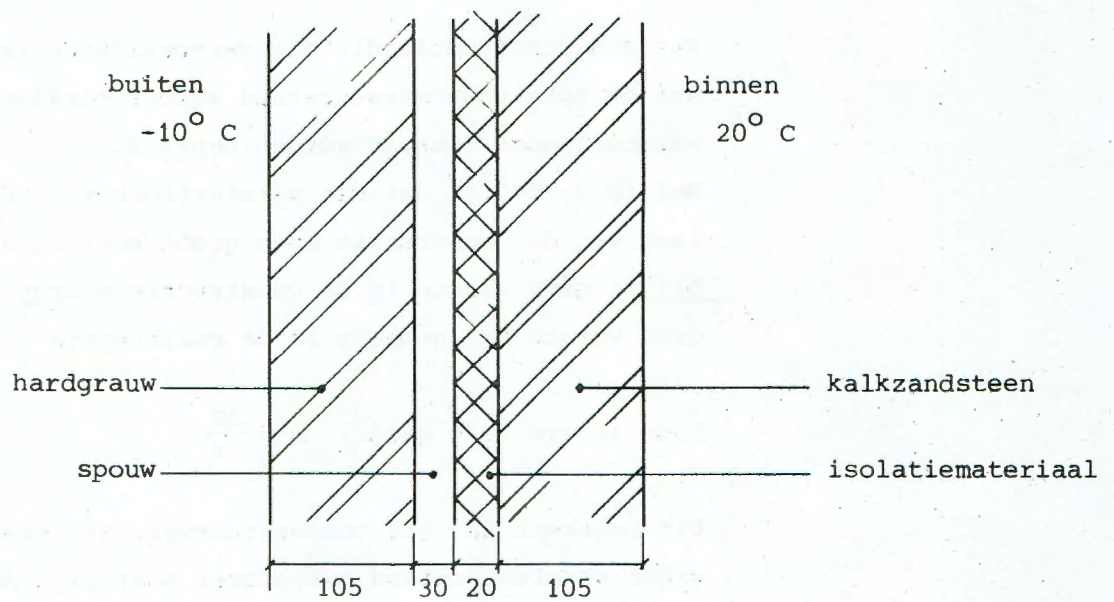
waarin: ΔT_1 = het temperatuurverschil over laag 1
 R_1 = de warmteweerstand van laag 1 enz.

Wanneer het temperatuurverschil over één laag wordt gevraagd is dit als volgt te berekenen:

$$\frac{\Delta T_1}{R_1} = \frac{T_i - T_a}{R_{\text{totaal}}} \quad \text{ofwel}$$

$$\Delta T_1 = \frac{R_1}{R_{\text{totaal}}} \cdot (T_i - T_a)$$

Wanneer het temperatuurverschil over iedere laag bekend is kan het temperatuurverloop door de constructie worden bepaald. Als voorbeeld nemen we een geïsoleerde spouwmuur.



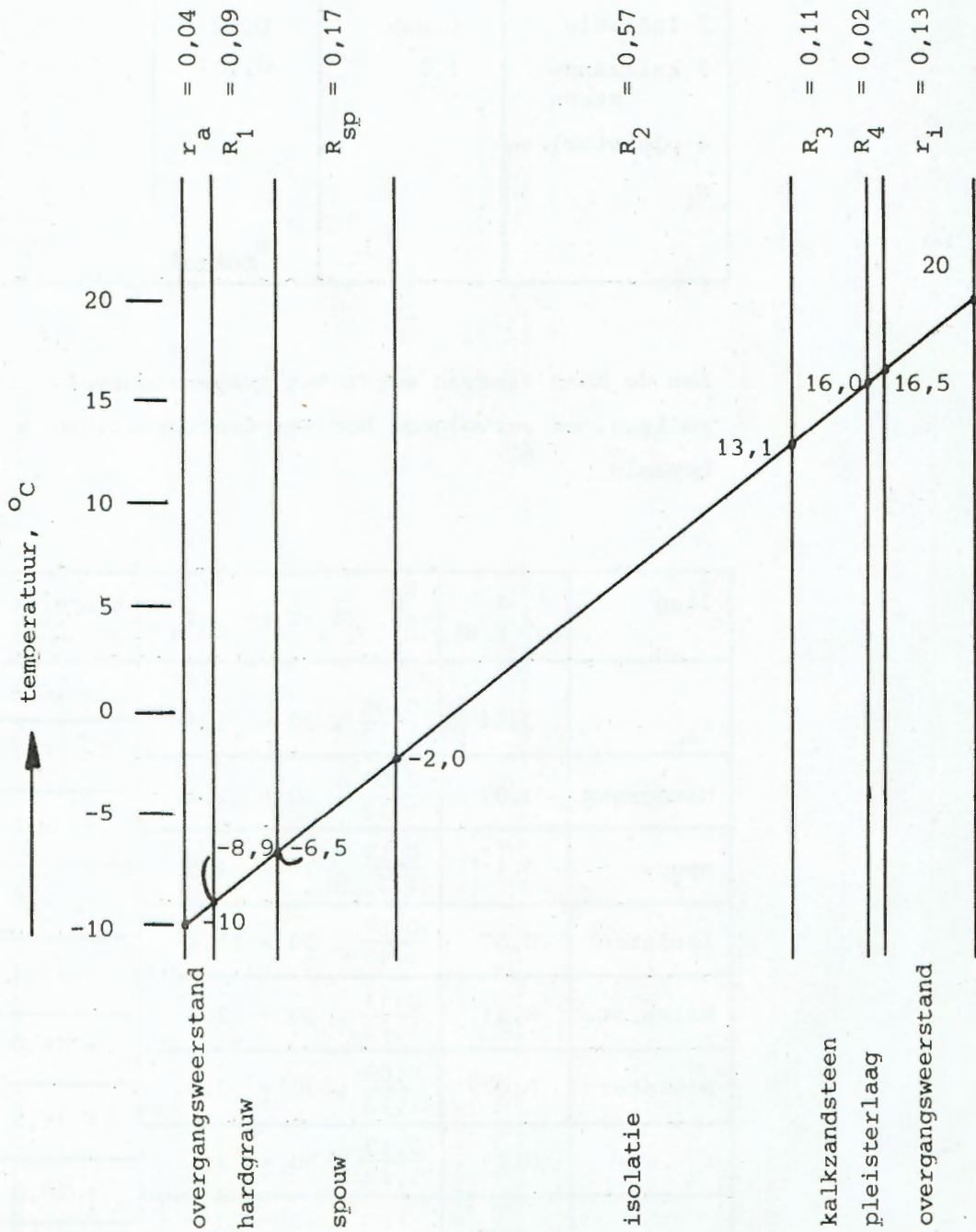
Eerst wordt de warmteweerstand van de muur en de afzonderlijke lagen bepaald.

laag	λ (W/m.K)	d (m)	$R = d/\lambda$ ($m^2 \cdot K/W$)
r_a			0,04
1 hardgrauw	1,2	0,105	0,09
spouw			0,17
2 isolatie	0,035	0,02	0,57
3 kalkzand- steen	1,0	0,105	0,11
4 pleisterlaag			0,02
r_i			0,13
		$R_{\text{totaal}} =$	<u>1,13</u>

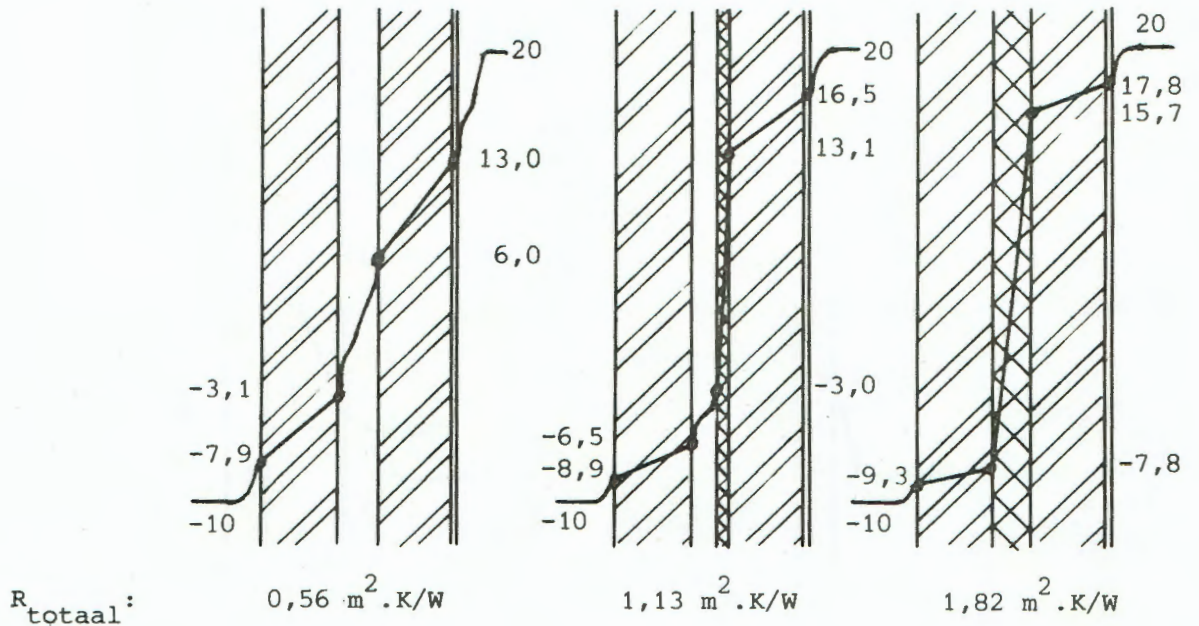
Aan de hand hiervan wordt het temperatuurverschil over iedere laag, en vervolgens het temperatuurverloop door de muur bepaald.

laag	R ($m^2 \cdot K/W$)	$\frac{R_n}{R_t} \cdot (T_i - T_a) = \Delta T_n$	temperatuur ($^{\circ}C$)
r_a	0,04	$\frac{0,04}{1,13} \cdot 30 = 1,1$	- 10,0
hardgrauw	0,09	$\frac{0,09}{1,13} \cdot 30 = 2,4$	- 8,9
spouw	0,17	$\frac{0,17}{1,13} \cdot 30 = 4,5$	- 6,5
isolatie	0,57	$\frac{0,57}{1,13} \cdot 30 = 15,1$	- 2,0
kalkz.st.	0,11	$\frac{0,11}{1,13} \cdot 30 = 2,9$	+ 13,1
pleister	0,02	$\frac{0,02}{1,13} \cdot 30 = 0,5$	+ 16,0
r_i	0,13	$\frac{0,13}{1,13} \cdot 30 = 3,5$	+ 16,5
	_____ +	_____ +	+ 20,0
R_{totaal}	1,13	$T_i - T_a = 30,0$	

Het is ook mogelijk dit temperatuurverloop grafisch te bepalen. Hiertoe wordt de muur nogmaals getekend. In plaats van de werkelijke dikte van de lagen wordt nu de warmteweerstand van iedere laag uitgezet. Op de verticale as komt de temperatuur te staan. Het temperatuurverloop wordt nu een rechte lijn die binnentemperatuur (T_i) en buitentemperatuur (T_a) met elkaar verbindt.



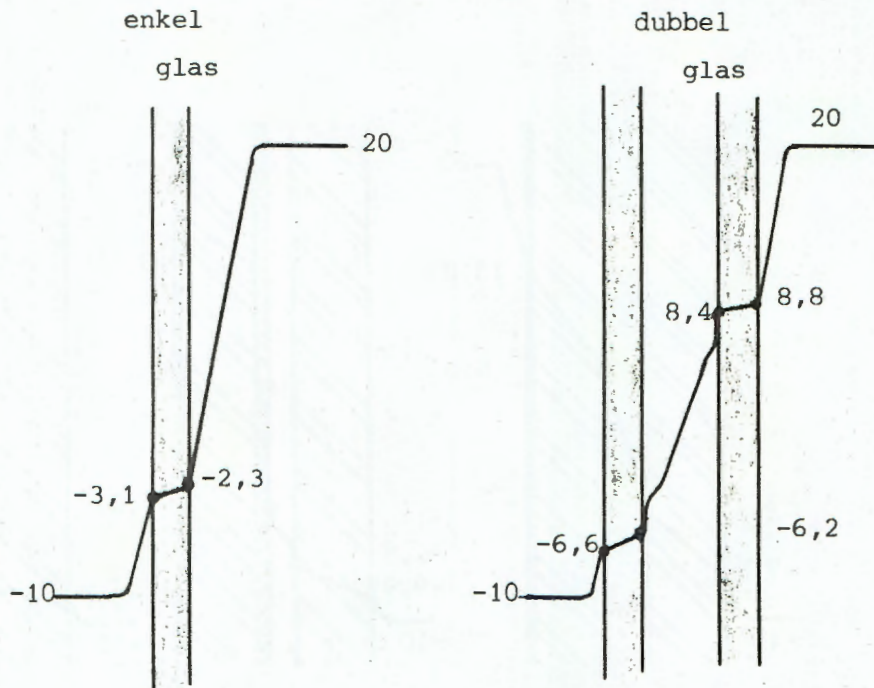
Hieronder wordt het bovenbepaalde temperatuurverloop vergeleken met dat van een niet geïsoleerde muur en dat van een muur waarvan de spouw volledig is gevuld.



Door een betere isolatie wordt niet alleen het warmteverlies beperkt; ook de temperatuur van het binnenoppervlak wordt hoger bij toenemende isolatie, hetgeen de behaaglijkheid in de ruimte aanzienlijk kan verbeteren. Achtereenvolgens zien we als oppervlaktetemperatuur 13, 16,5 en 17,8 $^{\circ}\text{C}$ voor de ongeïsoleerde spouwmuur, de gedeeltelijk geïsoleerde muur en de muur waarbij de spouw volledig is gevuld.

Het kennen van het volledige temperatuurverloop in een constructie is belangrijk in verband met het bepalen of, en zo ja, waar er in de constructie inwendige condensatie zal optreden.

Evenzo kan het temperatuurverloop in en de oppervlaktetempe-
ratuur van enkel en dubbel-glas worden bepaald.



Bij een buitentemperatuur van -10°C is de oppervlaktetempe-
ratuur aan de binnenzijde van enkel-glas ca. $-2,3^{\circ}\text{C}$ en van
dubbel-glas ca. $8,8^{\circ}\text{C}$. Deze temperatuur bepaalt of er al dan
niet condensvorming op de ruit optreedt. Dit betekent bij-
voorbeeld dat men in gebouwen met luchtbevochtiging dubbel-
glas moet toepassen, of bij lage buitentemperaturen de mate
van bevochtiging dient te verlagen.

Temperaturen van binnenoppervlakken zijn te bepalen met de
formule:

$$T_{i0} = T_i - \frac{r_i}{R_{\text{totaal}}} \cdot (T_i - T_a) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

2.4 WARMTEACCUMULATIE

2.4.1 In de zomer

Onder warmteaccumulatie verstaat men het effect dat een groot, zwaar gebouw (bijvoorbeeld een oude kerk of een bunker) de gehele zomer, dag en nacht betrekkelijk koel blijft, terwijl een licht, houten gebouw overdag zeer warm wordt en 's nachts weer koud.

Dit berust op het verschil in massa van de gebouwen.

Wanneer de buitentemperatuur stijgt, of de zon gaat schijnen moet ook het gehele gebouw mee worden opgewarmd. Bij een licht gebouw kost dat weinig tijd. Binnen een paar uur is het gebouw zo warm, dat niet alleen de temperatuur van de vertreklucht gaat stijgen, maar dat ook de warmtestraling van de wanden de behaaglijkheid gaat beïnvloeden.

Bij een heel zwaar gebouw ligt het anders.

Door de grotere masse is er veel meer warmte nodig om het gebouw op te warmen; voordat het gebouw veel warmer is geworden, is het al avond en vindt weer afkoeling plaats. Hierdoor is de temperatuur in een zeer zwaar gebouw bijna gelijk aan de gemiddelde buitentemperatuur over een paar dagen of een week. Als men weet dat de gemiddelde temperatuur over de maand juli ca. 17° C bedraagt, dan is het niet verwonderlijk dat het in oude kerken vaak zo aangenaam koel is.

2.4.2 Warmteaccumulatie in de winter

Ook 's winters speelt de warmteaccumulatie een rol. Een licht gebouw is snel opgewarmd als de verwarming aangaat. Bij een wat zwaarder gebouw kan dat uren duren, of zelfs een paar dagen. In veel kantoren wordt het op maandag pas tegen de middag behaaglijk omdat in het weekend de verwarming was uitgeschakeld. Als de verwarming maandag 's morgens om bijvoorbeeld 6 uur aangaat, is om 9 uur wel de luchttemperatuur hoog genoeg, maar de wanden en vloeren zijn nog koud, zodat daarvan "koude-straling" wordt ondervonden.

Toch is een zwaarder gebouw prettiger.

Door de warmteaccumulatie zijn wisselingen in de buitentemperatuur binnen niet zo snel merkbaar. De verwarming, die ook een zekere traagheid heeft, hoeft niet zo snel te reageren, en het resultaat is een veel meer constante binnentemperatuur.

2.4.3 Warmtecapaciteit, plaats van de isolatie

De mate waarin van warmteaccumulatie sprake zal zijn kan worden afgeschaft aan de hand van de warmtecapaciteit van de constructies.

De warmtecapaciteit is afhankelijk van de massa van de constructie en de soortgelijke warmte van het toegepaste materiaal. Bij een uit meer lagen opgebouwde constructie speelt, wat betreft de warmteaccumulatie, ook de volgorde van de lagen een rol.

De soortgelijke warmte (c) van een materiaal is de hoeveelheid warmte (joule) die nodig is om 1 kg van het materiaal 1 K (1° C) in temperatuur te verhogen.

Voor steenachtige materialen geldt: $c = 840$ J/kg.K

Voor hout en kunststoffen geldt : $c = 1470$ J/kg.K

De warmtecapaciteit van een laag materiaal kan worden berekend met behulp van de volgende formule:

$$C = \rho \cdot c \cdot d \quad \left[\text{J/m}^2 \cdot \text{K} \right]$$

waarin: C = de warmtecapaciteit van de laag in $\text{J/m}^2 \cdot \text{K}$

ρ = de dichtheid van het materiaal in kg/m^3

c = de soortgelijke warmte in J/kg.K

d = de dikte van de laag in m

Deze warmtecapaciteit is dus de hoeveelheid warmte (joule) die nodig is om een m^2 van een laag materiaal met dikte d een graad in temperatuur te verhogen.

Als voorbeeld wordt de warmtecapaciteit berekend van een laag beton met een dikte van 200 mm en een laag kunststofschuim met een dikte van 40 mm.

materiaal	ρ	c	d	$C = \rho \cdot c \cdot d$
beton	2500 kg/m ³	840 J/kg.K	0,20 m	420 kJ/m ² .K
kunststofschuim	30 kg/m ³	1470 J/kg.K	0,04 m	1,8 kJ/m ² .K

De warmtecapaciteit van een betonlaag van 200 mm is dus ongeveer 230 maal zo groot als van een laag kunststofschuim van 40 mm dik.

De hoeveelheid warmte die per m² in een laag materiaal is geaccumuleerd wordt gevonden uit:

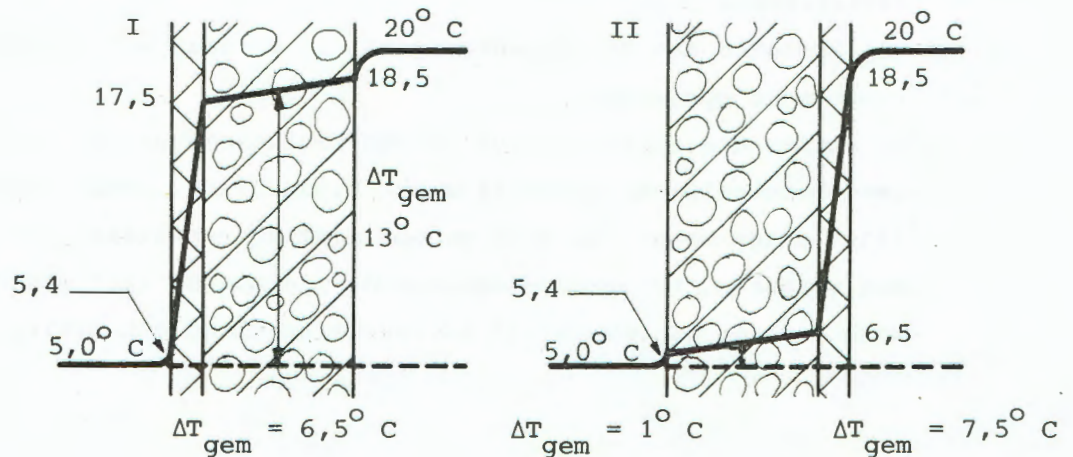
$$Q = C \cdot \Delta T \quad \left[\text{J/m}^2 \right]$$

waarin: Q = de hoeveelheid geaccumuleerde warmte in joule

C = de warmtecapaciteit van de laag in J/m².K

ΔT = de gemiddelde temperatuurverhoging van de laag in K (°C)

Als voorbeeld wordt de warmteaccumulatie berekend in een constructie die is opgebouwd uit de hiervoor genoemde betonlaag van 200 mm dik en de laag kunststofschuim met een dikte van 40 mm.



Bij een buitentemperatuur van 5°C en een binnentemperatuur van 20°C laat zich het aangegeven temperatuurverloop in de constructie berekenen. De hoeveelheid warmte die geaccumuleerd is ten opzichte van de niet verwarmde situatie (binnen en buiten 5°C), waarbij de temperatuur overal de in muur 5°C bedraagt, is weergegeven in de onderstaande tabel.

	ΔT (K)	C (KJ/m ² .K)	$Q = C \cdot \Delta T$ (KJ/m ²)
geval I: isolatie	6,5	1,8	12
beton	13,0	420	<u>5460</u>
			totaal 5472
geval II: beton	1,0	420	420
isolatie	7,5	1,8	<u>14</u>
			totaal 434

In de situatie van geval I (isolatie aan de buitenzijde) is ruim 12,5 maal zo veel warmte geaccumuleerd dan in geval II (isolatie aan de binnenzijde).

Bij isolatie aan de buitenzijde (I) is veel warmte in de muur opgeslagen (geaccumuleerd). Dit betekent een gelijkmatig binnenklimaat. Ook indien de verwarming gedurende een uur uitvalt is er genoeg reserve-warmte aanwezig in de wanden om dit te overbruggen. Het opwarmen van een dergelijk gebouw duurt vanzelfsprekend lang.

Bij isolatie aan de binnenkant (II) is er maar weinig warmte in de muur opgeslagen.

De warmte die is opgeslagen in het isolatiemateriaal is van geen betekenis; de isolatie weegt bijna niets, heeft nauwelijks enige massa. In zo'n gebouw moet de verwarming snel kunnen reageren. De warmte-regulerende steenmassa ligt als het ware buiten. De opwarmtijd is vanzelfsprekend ook gering. Dit

kan voordelen bieden voor gebouwen die maar een paar uur per week in gebruik zijn, aangezien dit een kleiner brandstofverbruik betekent.

In het algemeen is situatie I gunstiger; het gebouw heeft een grote binnencapaciteit. Bij situatie II (isolatie aan de binnenzijde) heeft de steenmassa weinig effect.

Overigens dient men ook steeds de massa van vloeren en binnenwanden in de beschouwingen te betrekken.

2.5 TEMPERATUURSPANNINGEN

2.5.1 Uitzetting van diverse materialen

Onder invloed van temperatuurverhoging zetten materialen uit. De mate waarin dit gebeurt, is voor de verschillende stoffen anders. De grootte waarmee dit wordt aangegeven is de lineaire uitzettingscoëfficiënt α . Deze geeft aan hoeveel mm een staaf van het betreffende materiaal ter lengte van één meter uitzet bij een temperatuurverhoging van één kelvin (1°C).

materiaal	lineaire uitzettingscoëfficiënt (mm/m.K)
baksteen	0,005
beton	0,010
staal	0,012
aluminium	0,023
polystyreenschuim	0,070
polyurethaanschuim	0,027
geschuimd glas	0,0085

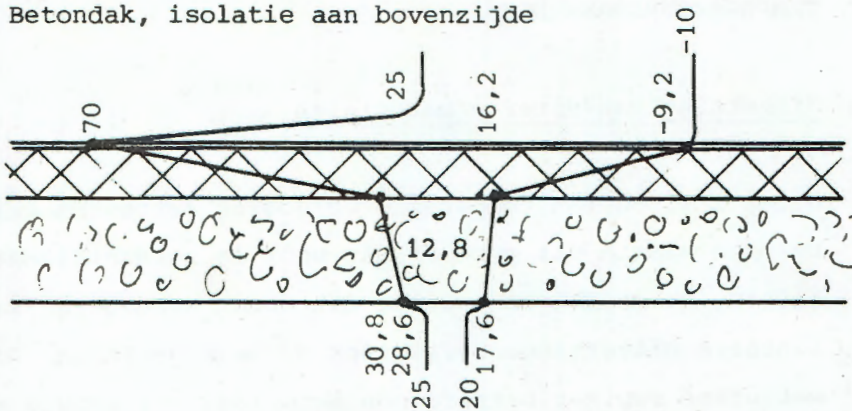
Wanneer de temperatuurbewegingen te groot worden kunnen scheuren ontstaan. Ook kan dit gebeuren als twee lagen in een constructie een verschillende uitzettingscoëfficiënt hebben.

2.5.2 Invloed van de plaats van de isolatie

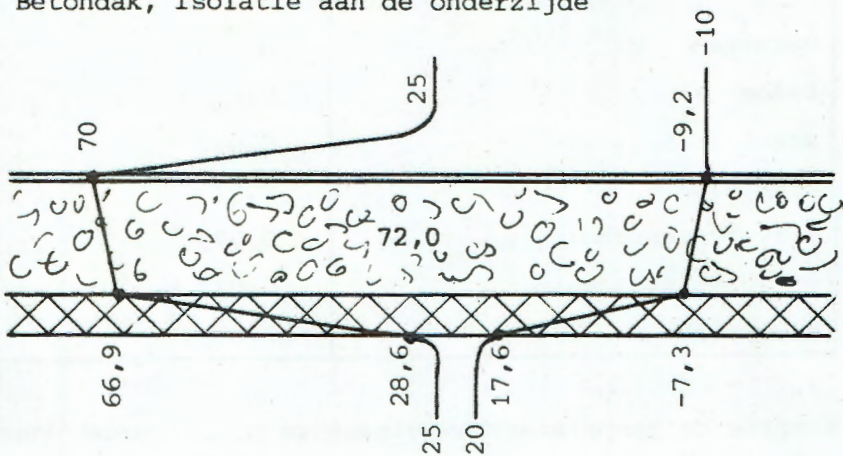
Met het oog op temperatuurspanningen is de plaats van de isolatie in de constructie van belang. Met name geldt dit voor daken. Door zonbestraling kunnen dakvlakken namelijk temperaturen tot 80° C bereiken.

Als voorbeeld is het temperatuurverloop in de zomer en in de winter van een tweetal dakconstructies getekend.

Betondak, isolatie aan bovenzijde



Betondak, isolatie aan de onderzijde



Uit bovenstaande figuren blijkt duidelijk de invloed van de plaats van de isolatie op het gemiddelde temperatuurverschil

tussen zomer en winter van de betonlaag.

$$\Delta T = 12,8^{\circ} \text{ C} \quad (\text{isolatie aan de bovenzijde})$$

$$\Delta T = 72,0^{\circ} \text{ C} \quad (\text{isolatie aan de onderzijde})$$

Bij een dakvlak van 30 m lengte heeft dit een lengteverandering tot gevolg van:

$$\Delta L = 0,01.12,8.30 = 3,8 \text{ mm} \quad (\text{isolatie boven})$$

$$\Delta L = 0,01.72,0.30 = 21,6 \text{ mm} \quad (\text{isolatie beneden}).$$

Een lengteverandering van enkele mm kan veelal, al dan niet met behulp van speciale voorzieningen door de constructie worden opgevangen. Met een lengteverandering van 3 cm is dat niet meer het geval. Het gevaar van scheurvorming is dan zeker niet denkdeelig.

2.5.3 Keuze van het isolatiemateriaal

Isolatie aan de bovenzijde is dus gunstig voor de temperatuurspanningen in de betonconstructie. Het stelt echter wel eisen aan de wijze van dakdekken en de keuze van het isolatiemateriaal. In hetzelfde voorbeeld is het dagelijks temperatuurverschil in de isolatielaag ca. 30° C .

Bij de keuze van polystyreenschuimplaten met een lengte van 1,20 m is de dagelijkse lengteverandering per plaat ca. 2,5 mm. Wanneer de dakbedekking volledig op de platen is geplakt moet deze lengteverandering worden opgevangen ter plaatse van de naden tussen de platen. Dit geeft een zeer zware belasting van de dakbedekking. Bij dergelijke constructies moet de dakbedekking slechts plaatselijk worden geplakt teneinde de lengteverandering over een bredere strook te verdelen.

Bij een met grind of tegels geballast dak wordt het temperatuurverschil in de isolatielaag iets minder. De lengteverandering blijft echter toch zo groot dat volledig plakken verkeerd is. Door de grindbelasting kan de dakbedekking echter ook wel los worden gelegd.

Bij de keuze van bijvoorbeeld geschuimd glas ($\alpha = 0.0085 \text{ mm/m.K}$) is de lengteverandering per plaat (ca. 0,60 m lang) slechts 0,15 mm. Op een dergelijk materiaal kan de dakbedekking volledig worden geplakt.

Een bijzonder geval vormt het omgekeerde dak, waar de isolatie los op de dakbedekking ligt en met grind of tegels is geballast. Het temperatuurtraject dat de dakbedekking nu meemaakt, is bijzonder klein; bovendien kunnen losliggende kunststoffolies als waterdichte laag worden gebruikt.

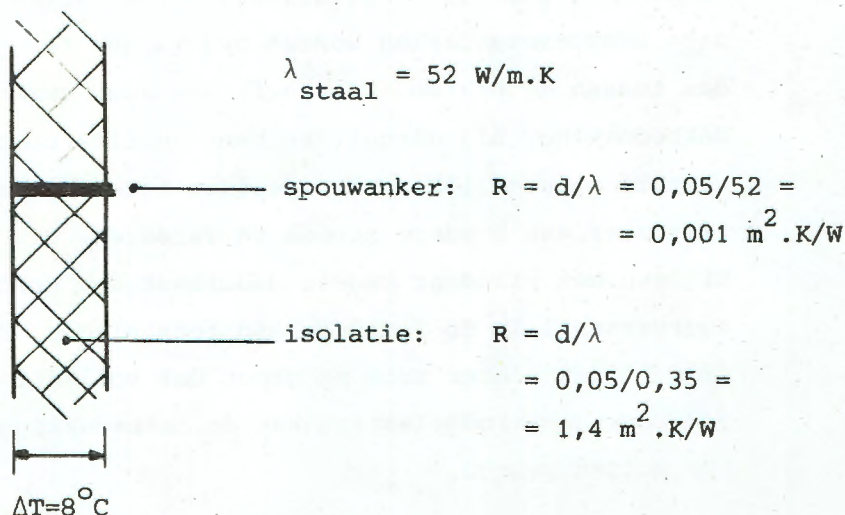
2.6 KOUDEBRUGGEN

2.6.0 Inleiding

Onder een koudebrug verstaat men een soort warmtelek in de isolatie. In een verder goed geïsoleerde constructie kan een plaats zijn met veel lagere warmteweerstand. Hierbij kan men denken aan een verdiepingvloer die rechtstreeks als balkon uitkraagt of aan een spouwanker dat in een geïsoleerde spouw een thermisch lek vormt.

2.6.1 Invloed op het warmtetransport

Als voorbeeld nemen we het hierboven genoemde geval van het spouwanker.



Bij een temperatuurverschil tussen beide oppervlakken van de isolatie van 8°C worden de volgende waarden gevonden voor de warmtestroomdichtheid (q) door isolatie en spouwanker.

$$q_{\text{isolatie}} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{8}{1,4} = 5,7 \text{ W/m}^2$$

$$q_{\text{anker}} = \frac{\Delta T}{R} = \frac{8}{0,001} = 8000 \text{ W/m}^2$$

De warmtestroomdichtheid door de spouwankers is dus vele malen groter dan door de isolatie. Per m^2 muur zijn echter hooguit twee spouwankers aanwezig met een gezamenlijke doorsnede van ca. $0,00005 \text{ m}^2$.

De totale warmtestroom door de twee ankers (per m^2 muur) is dus slechts:

$$i_{\text{ankers}} = q \cdot A = 8000 \cdot 0,00005 = 0,4 \text{ W}$$

De warmtestroom door 1 m^2 muur, door isolatie en ankers tezamen wordt dus:

$$i_{\text{muur}} = i_{\text{isolatie}} + i_{\text{ankers}} = 5,7 + 0,4 = 6,1 \text{ W}$$

Dit betekent een extra warmteverlies ten opzicht van een ankerloze spouwmuur van ca. 7%.

Bij een niet geïsoleerde spouwmuur liggen deze waarden als volgt:

De warmteweerstand van de spouw is:

$$R_{\text{spouw}} = 0,17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Bij een temperatuurverschil van 8°C betekent dit een warmtestroom per m^2 spouw van

$$i_{\text{spouw}} = \frac{\Delta T}{R} \cdot A = \frac{8}{0,17} \cdot 1 = 47,1 \text{ W}$$

Voor de warmtestroom door twee spouwankers is hiervoor de volgende waarde gevonden:

$$i_{\text{ankers}} = 0,4 \text{ W}$$

De warmtestroom door 1 m^2 muur, door spouw en ankers tezamen wordt dus:

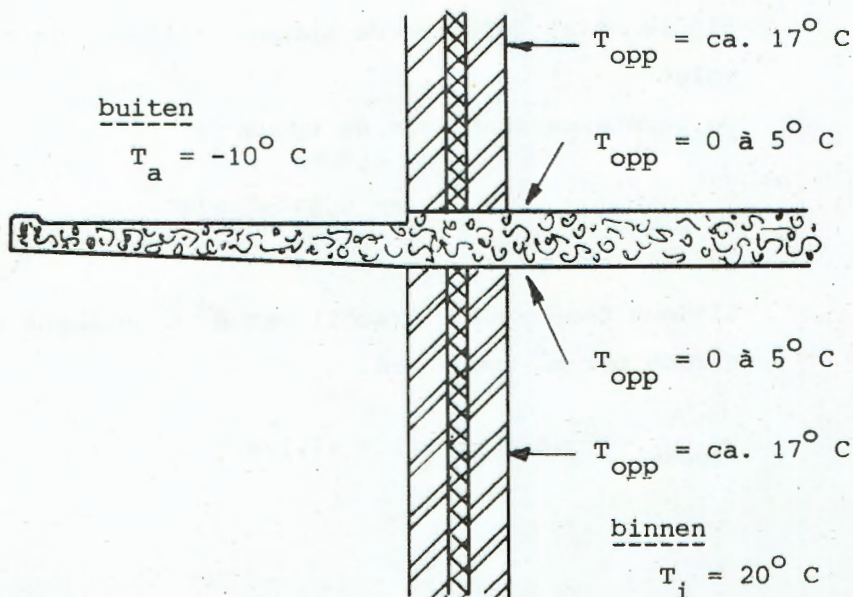
$$i_{\text{muur}} = i_{\text{spouw}} + i_{\text{ankers}} = 47,1 + 0,4 = 47,5 \text{ W}$$

De vergroting van het warmteverlies ten gevolge van de spouwankers is hier slechts ca. 1%.

Uit voorgaande mag blijken dat de invloed van koudebruggen uit oogpunt van vergroting van het warmtetransport nog wel meevalt. Hoewel de invloed bij zeer goed geïsoleerde constructies toch wel in de beschouwingen moet worden betrokken.

2.6.2 Invloed op de oppervlaktetemperatuur

voorbeeld: uitkragende betonplaat



Hierboven is een doorsnede over een doorgaande vloer/balkonplaat getekend. Ten gevolge van de sterke warmtegeleiding door de beton kan de oppervlaktetemperatuur in de aangegeven hoeken zeer laag worden.

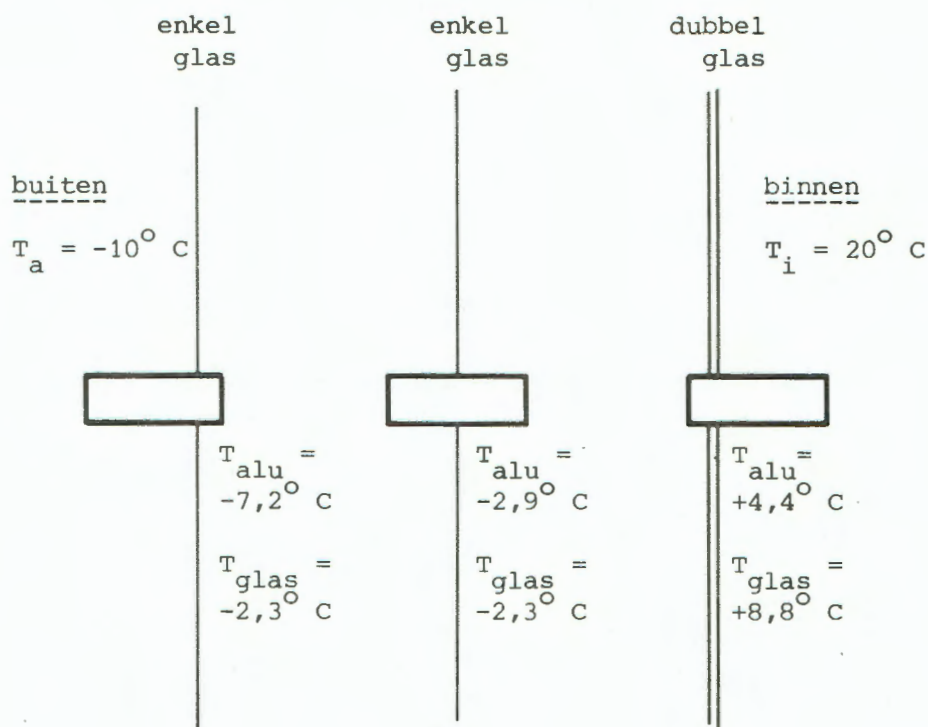
Dit kan condensatie van waterdamp tot gevolg hebben. Het resultaat hiervan is kringen in het plafond en/of een rottende vloerbedekking.

Zeer koude oppervlakken kunnen worden gevormd door stalen of in nog ernstiger mate aluminium raamprofielen.

De warmtegeleidingscoëfficiënt van aluminium is zo groot ($\lambda = 204 \text{ W/m.K}$), dat het hele profiel praktisch dezelfde temperatuur aanneemt. Hierdoor is de temperatuur van het profiel sterk afhankelijk van de verhouding van het gedeelte dat zich buiten bevindt tot het gedeelte van het profiel dat zich binnen bevindt.

Wanneer het grootste gedeelte van het profiel buiten is werkt, dit als een soort koelvin. Het veel kleinere binnenoppervlak zal dan erg koud worden.

Als de verhouding andersom ligt zal het profiel een hogere temperatuur krijgen.



Uit het voorgaande is duidelijk dat op een aluminium profiel nog eerder condensatie op kan treden dan op enkel-glas. Dit kan worden verbeterd door het kozijn zodanig te ontwerpen dat het grootste deel van de aluminium profielen zich binnen bevindt of door het profiel aan de buitenzijde van een bekleding (bijvoorbeeld een neopreen strip) te voorzien. Een heel goede oplossing vormen de zogenaamde gedeelde profielen (anti-koudebrug profielen).

Hierbij bestaat het profiel uit twee delen die door een kunststof tussenstuk met elkaar zijn verbonden. Hierdoor ontstaat een profiel met een grotere warmteweerstand.

3 VOCHT

3.0 INLEIDING

In dit hoofdstuk worden de grondbegrippen met betrekking tot vocht, condensatie, vochttransport in constructies enz. behandeld. De vertaling naar concrete, in de praktijk voorkomende constructies en het werken met de begrippen komt aan de orde in 4, "Warmte- en vochttechnisch gedrag van constructies".

3.1 BASISBEGRIIPPEN

3.1.1 Soorten vocht

Er kunnen diverse soorten vocht worden onderscheiden: bouwvocht, woonvocht, regen, bodemvocht. De indeling komt voort uit de herkomst van het vocht.

Bouwvocht

Hieronder verstaat men het vocht (water) dat bij de bouw in de constructie achterblijft. Hierbij kan men denken aan nat geworden isolatieplaten op een dak, maar ook aan willekeurig betonwerk.

Van het water in de betonspecie is slechts een klein gedeelte nodig voor de (chemische) verharding. De rest wordt toegevoegd om de specie verwerkbaar te maken. Na verharding is derhalve in de beton nog zo'n 15 à 20 volume procent vocht aanwezig. In een plaat met een dikte van 15 cm komt dit neer op ca. 30 liter water per vierkante meter plaat.

Dit bouwvocht moet worden afgevoerd uit de constructie om rotting, vorstschade, vermindering van warmteweerstand enz. te voorkomen.

Woonvocht

Onder woonvocht wordt verstaan de waterdampproductie door de activiteiten die zich in het huis, kantoor of de fabriek afspelen.

c _{max} g/m ³	Temp ^o 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

Dampspanningstabel.

Dit kan dus de waterverdamping zijn van een zwembad of anodi-seerbaden enz. of de waterdampafscheiding van personen. Ter illustratie wordt de waterdampproductie van een gemiddeld gezin gegeven.

koken	2 kg per keer
afwassen	$\frac{1}{2}$ kg per keer
baden	$\frac{1}{4}$ kg per keer
kleding wassen	2 kg per keer
personen (4)	5 kg per 24 uur

In totaal betekent dit ca. 10 kg waterdamp per etmaal.

Regen

Het water dat door regen in de muren dringt moet hieruit weer kunnen verdampen. Ook mag geen vochtdoorslag optreden.

Bodemvocht

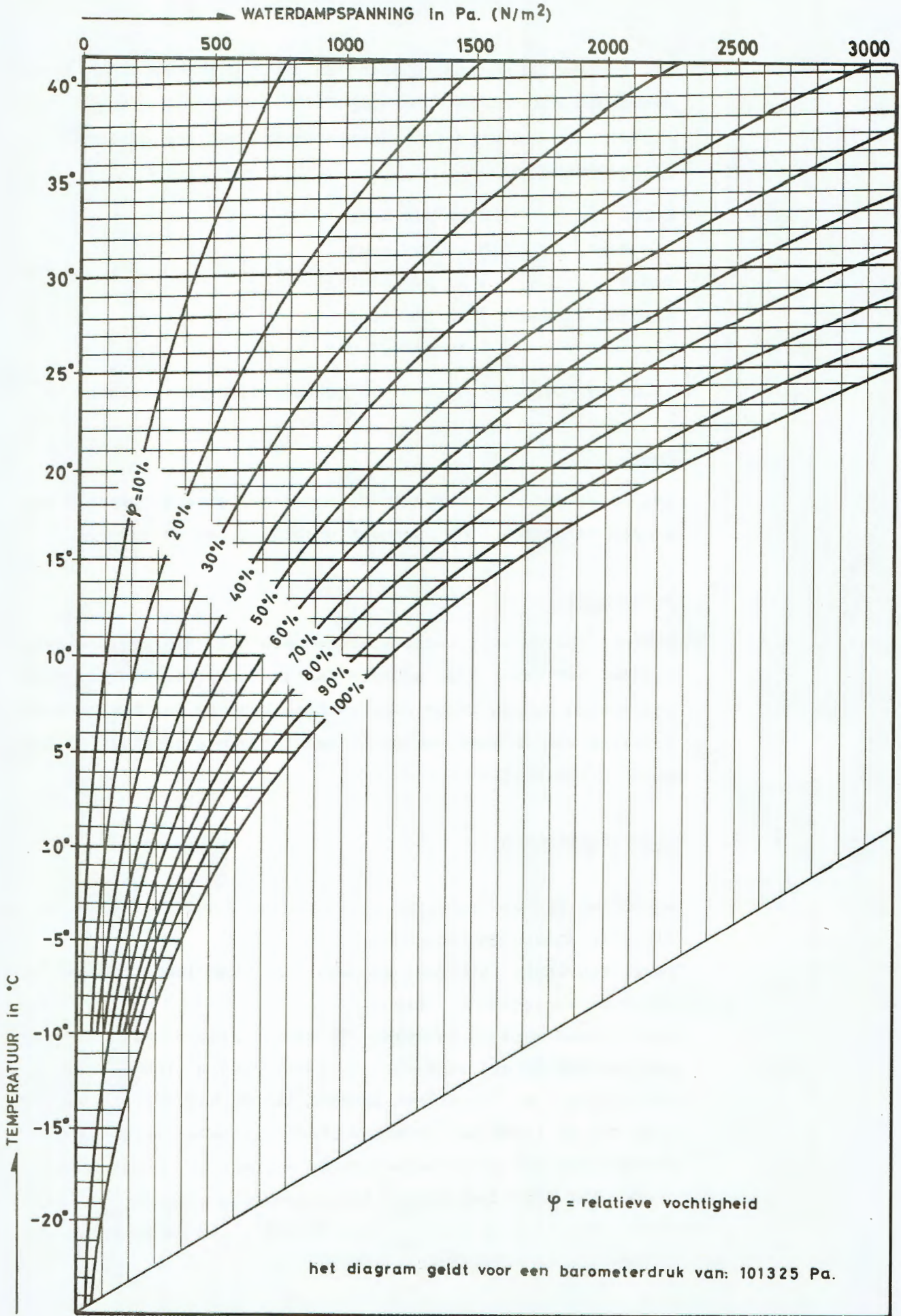
Hierbij spelen capillaire krachten een rol: kleine kanaaltjes trekken het water door adhesie (aantrekking) tussen water en kanaalwand omhoog in de constructie. Vandaar dat het onderste gedeelte van de muur veelal in een hardere steensoort (klinker) wordt uitgevoerd.

3.1.2 Luchtvochtigheid

Waterdamp is gasvormig, is onzichtbaar en gedraagt zich net zo als alle andere gassen.

Naast zuurstof, stikstof, koolzuur enz. kan lucht ook een hoeveelheid waterdamp bevatten.

Deze hoeveelheid is betrekkelijk klein, bijvoorbeeld 10 gram per kubieke meter lucht ($c = 10 \text{ g/m}^3$). Een m^3 lucht weegt ongeveer 1,2 kg. Er is ook een maximum aan de hoeveelheid waterdamp die de lucht kan bevatten. Deze maximale hoeveelheid is afhankelijk van de temperatuur. Zo kan bij 20°C maximaal 17,28 gram waterdamp per m^3 lucht aanwezig zijn ($c_{\text{max}} = 17,28 \text{ g/m}^3$). Bij 5°C is dit $c_{\text{max}} = 6,83 \text{ g/m}^3$. Een en ander is weer gegeven in de nevenstaande tabel.



TEMPERATUUR - WATERDAMPSPANNING - RELATIEVE VOCHTIGHEID

Er kan natuurlijk wel minder vocht aanwezig zijn. De waterdampconcentratie (c) in g/m^3 noemt men de absolute luchtvochtigheid. Veelal wordt in de bouwfysica in plaats van met waterdampconcentratie met waterdampspanning gerekend.

De waterdamp die in de lucht aanwezig is heeft een dampspanning (p) tot gevolg. De dampspanning wordt uitgedrukt in N/m^2 of Pa (pascal). Bij iedere temperatuur behoort een bepaalde maximale dampspanning (p_{max}), zie de eerder genoemde tabel.

Vroeger gebruikte men de eenheid "millimeter kwikkolom" (mmHg). Het verband tussen deze eenheid en de Pa is:

$$1 \text{ mmHg} = 133 \text{ Pa}; \text{ ofwel } 1 \text{ Pa} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ mmHg}.$$

De verhouding tussen de werkelijk aanwezige dampspanning (p) en de maximale dampspanning (p_{max}) noemt men de relatieve vochtigheid.

$$\phi = \frac{p}{p_{\text{max}}} \cdot 100\%$$

voorbeeld:

Stel de absolute vochtigheid van de lucht is $c = 10 \text{ g/m}^3$. Dit komt overeen met een dampspanning van ongeveer $p = 1350 \text{ Pa}$. Bij 20°C is de maximale dampspanning $p_{\text{max}} = 2340 \text{ Pa}$. De relatieve vochtigheid is dan:

$$\phi = \frac{1350}{2340} \cdot 100\% = 58\%$$

Wordt de lucht opgewarmd tot 24°C dan blijft de dampspanning $p = 1350 \text{ Pa}$. De maximale dampspanning verandert echter wel. Deze is bij 24°C : $p_{\text{max}} = 2985 \text{ Pa}$, zodat:

$$\phi = \frac{1350}{2985} \cdot 100\% = 45\%$$

In de nevenstaande figuur zijn lijnen voor constante relatieve vochtigheid uitgezet. Verticaal staat de temperatuur, horizon-

taal de dampspanning. Het diagram geldt voor een barometerdruk van 101325 Pa. De lijn van $\phi = 100\%$ geeft het verband aan tussen temperatuur (T) en maximale dampspanning (p_{\max}).

3.1.3 Condensatie

Wanneer er meer waterdamp is dan de lucht kan bevatten ($p > p_{\max}$) zal condensatie optreden. Een gedeelte van het water gaat over van dampvorm (gas) in water (vloeistof). Dit kan gebeuren als men lucht gaat afkoelen.

voorbeeld:

Stel men koelt lucht van 20°C , $p = 1350\text{ Pa}$, $\phi = 58\%$ af tot 15°C . Hierbij verandert de p_{\max} , zodat de relatieve vochtigheid $\phi = 78\%$ wordt.

Bij nog verder afkoelen wordt op een gegeven moment de maximale dampspanning gelijk aan de werkelijk heersende dampspanning. Dit gebeurt bij ca. $T = 11,4^{\circ}\text{C}$. De relatieve vochtigheid is dan $\phi = 100\%$.

De lucht is verzadigd met waterdamp. Bij nog verder afkoelen gaat de overtollige waterdamp condenseren. De absolute vochtigheid daalt, de relatieve vochtigheid blijft $\phi = 100\%$.

Condensatie kan ook voorkomen op koude oppervlakken, bijvoorbeeld enkel-glas in de buitengevel. Bij lage buitentemperaturen wordt ook de temperatuur van het binnenoppervlak erg laag en daarmee ook de luchtlaag die aan het glas grenst. Is de oppervlaktetemperatuur lager dan de dauwpuntstemperatuur van de lucht, dan treedt condensatie op het oppervlak op.

De dauwpuntstemperatuur (T_d) van lucht van een bepaalde conditie is die temperatuur waarbij de waterdamp in de lucht gaat condenseren.

Zo is de dauwpuntstemperatuur van lucht van 20°C , $\phi = 58\%$:

$$T_d = 11,4^{\circ}\text{C}.$$

In de figuur zijn deze temperaturen makkelijk te vinden.

3.1.4 Vochttransport door constructies

Vocht kan op verschillende manieren door een constructie worden getransporteerd. Wanneer vrij water in de constructie aanwezig is kan dit onder invloed van de zwaartekracht naar beneden zakken (regenwater).

Een tweede vorm van transport vindt plaats onder invloed van capillaire krachten. In nauwe kanaaltjes zal water zich onder invloed van de aantrekkingskracht (adhesie) tussen water en kanaalwand willen verplaatsen. Dit vindt plaats bij opzuiging van bodemvocht, maar ook bij transport in horizontale richting. Bij poreuze constructies kan het water ook door luchtdrukverschillen (winddruk) door de constructie worden geperst.

De laatste vorm, die we hierna uitvoerig zullen bespreken is het transport (de diffusie) van waterdamp door een constructie, onder invloed van een verschil in waterdampspanning aan weerszijden van de constructie.

3.1.5 Dampdiffusieweerstand (R_d)

Het waterdamptransport door de constructie ondervindt een zekere weerstand die afhankelijk is van het materiaal en de dikte daarvan. Tussen vochtstroom, verschil in waterdampspanning en dampweerstand bestaat het volgende verband:

$$g = \frac{\Delta p}{R_d} \left[\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \right]$$

waarin: g = waterdamptransport in $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

Δp = het verschil in waterdampspanning tussen binnen en buiten $\Delta p = (p_i - p_a)$ in Pa

R_d = dampdiffusieweerstand in m/s

3.1.6 Diffusieweerstandgetal (μ)

De dampdichtheid van diverse materialen wordt uitgedrukt in het dampdiffusieweerstandgetal (μ).

Dit geeft aan hoeveel maal groter de diffusieweerstand van een laag materiaal van een bepaalde dikte is dan die van een laag lucht van dezelfde dikte.

$$\mu = \frac{\text{dampdiffusieweerstand laag materiaal}}{\text{dampdiffusieweerstand even dikke laag lucht}}$$

De weerstand van een laag lucht van 1 meter dikte is:

$$R_{d,\text{lucht}} = 5,3 \cdot 10^9 \text{ m/s}$$

De weerstand van een laag materiaal van willekeurige dikte is:

$$R_d = 5,3 \cdot 10^9 \cdot \mu \cdot d \text{ [m/s]}$$

waarin: R_d = waterdampdiffusieweerstand in m/s

μ = dampdiffusieweerstandgetal

d = dikte van de laag in m

3.1.7 $\mu \cdot d$ -waarde

Bij het vergelijken van de dampdichtheid van bepaalde lagen materiaal wordt veelal uitsluitend het produkt $\mu \cdot d$ (m) gebruikt. Dit vormt een maatstaf voor de diffusieweerstand.

3.2 WATERDAMPDIFFUSIEWEERSTAND VAN EEN CONSTRUCTIE

Hieronder volgt van enkele materialen de μ -waarde en de dikte (d) waarin ze meestal worden toegepast en het hieruit volgende produkt $\mu \cdot d$ ($\mu \cdot d$ -waarde).

materiaal	μ	d (m)	$\mu \cdot d$ (m)
minerale wol	2	0,05	0,1
baksteen (rood)	9	0,11	1,0
beton	33	0,15	5,0
dakleer	10.000	0,002	20,0
polyetheenfolie	34.000	0,0003	10,2
aluminiumfolie	100.000	0,0002	20,0

De totale dampdiffusieweerstand van een gelaagde constructie wordt gevonden door de weerstanden van de aparte lagen op te tellen.

$$R_{d_{\text{totaal}}} = R_{d_1} + R_{d_2} + R_{d_3} + \dots \quad [\text{m/s}]$$

Ook hierbij moeten feitelijk overgangsweerstanden (lucht op constructie en constructie op lucht) worden bijgeteld. Ten opzichte van de weerstand van de constructie zijn deze echter te verwaarlozen klein.

Voor veel berekeningen kan met de $\mu \cdot d$ -waarden worden gerekend. Voor een gelaagde constructie kunnen de $\mu \cdot d$ -waarden van de afzonderlijke lagen worden opgeteld.

$$\mu \cdot d_{\text{totaal}} = \mu_1 \cdot d_1 + \mu_2 \cdot d_2 + \mu_3 \cdot d_3 + \dots \quad [\text{m}]$$

3.3

VERLOOP VAN DE WATERDAMPSPANNING IN EEN CONSTRUCTIE

Op dezelfde wijze als bij het bepalen van het temperatuurverloop in een constructie kan ook het verloop van de waterdampspanning in een constructie worden berekend of grafisch worden bepaald. Hierbij kan worden gerekend met $\mu \cdot d$ -waarden omdat het slechts gaat om de verhouding tussen de dampweerstand van de verschillende lagen.

Analoog aan de situatie bij het berekenen van het temperatuurverloop geldt:

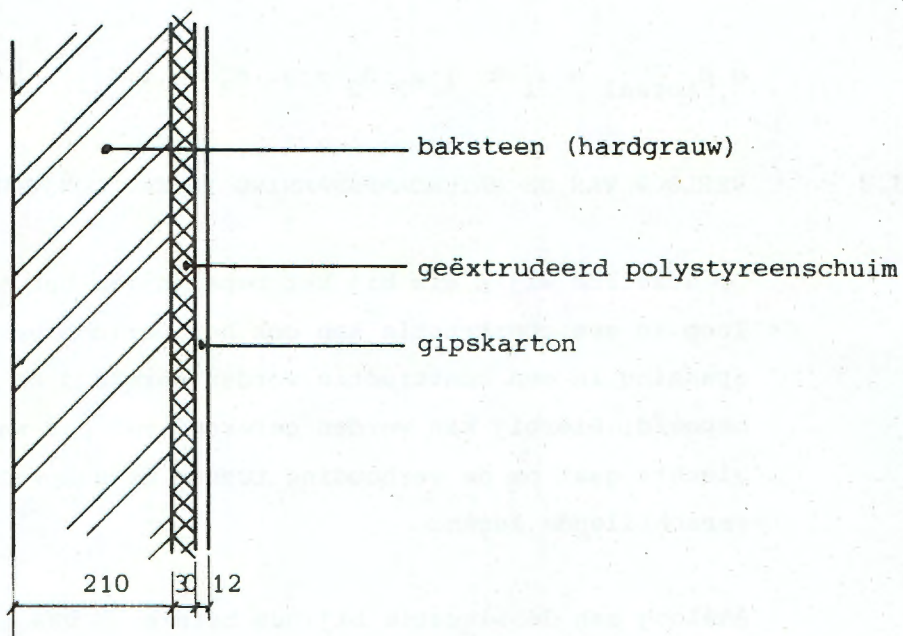
$$\frac{\Delta p_1}{\mu_1 \cdot d_1} = \frac{p_i - p_a}{\mu \cdot d_{\text{totaal}}} \quad \text{ofwel}$$

$$\Delta p_1 = \frac{\mu_1 \cdot d_1}{\mu \cdot d_{\text{totaal}}} \cdot (p_i - p_a)$$

- waarin: Δp_1 = het dampspanningsverschil over laag 1
 $\mu_1 d_1$ = de $\mu.d$ -waarde van laag 1
 P_i = de waterdampspanning binnen
 P_a = de waterdampspanning buiten
 μd_{totaal} = de $\mu.d$ -waarde van de totale constructie

Wanneer het verschil in dampspanning over iedere laag wordt berekend kan het verloop van de dampspanning door de constructie worden bepaald.

voorbeeld:



Eerst wordt de $\mu.d$ -waarde van iedere laag en van de gehele constructie bepaald.

materiaal	μ	d (m)	$\mu.d$ (m)
baksteen	13,5	0,210	2,9
polystyreenschuim	200	0,030	6,0
gipskarton	6	0,012	<u>0,1</u>
$\mu.d_{\text{totaal}} =$			9,0

Als klimaatcondities binnen en buiten gelden:

Buitenlucht: $- 10^{\circ} \text{C}$, $\phi = 80\%$, $p_a = 210 \text{ Pa}$

Binnenlucht: 20°C , $\phi = 40\%$, $p_i = 935 \text{ Pa}$

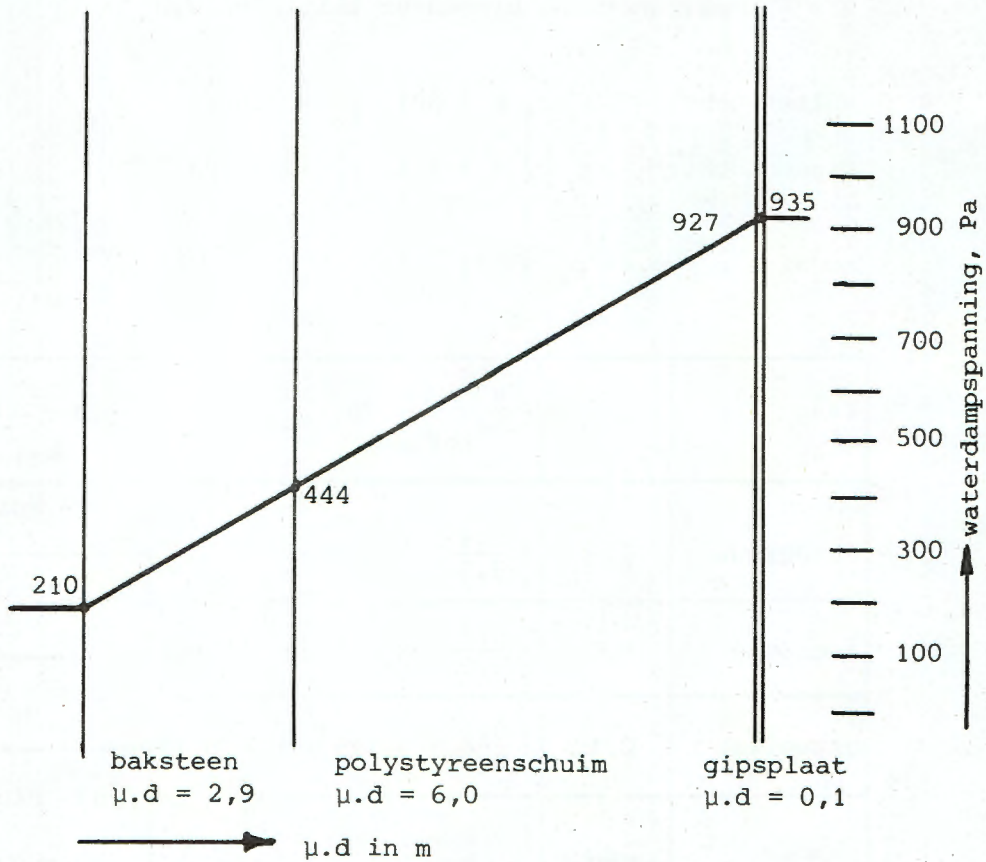
zodat: $p = p_i - p_a = 935 - 210 = 725 \text{ Pa}$

laag	$\mu \cdot d$ (m)	$\frac{\mu_n \cdot d_n}{\mu \cdot d_{\text{tot}}} \cdot (p_i - p_a) = \Delta p_n$	dampspanning (Pa)
hardgrauw	2,9	$\frac{2,9}{9,0} \cdot 725 = 234$	210 buiten
isolatie	6,0	$\frac{6,0}{9,0} \cdot 725 = 483$	444
gipsplaat	0,1	$\frac{0,1}{9,0} \cdot 725 = 8$	927
$\mu \cdot d_{\text{totaal}}$	$\text{---} +$ 9,0	$\Delta p_{\text{totaal}} = 725$	935 binnen

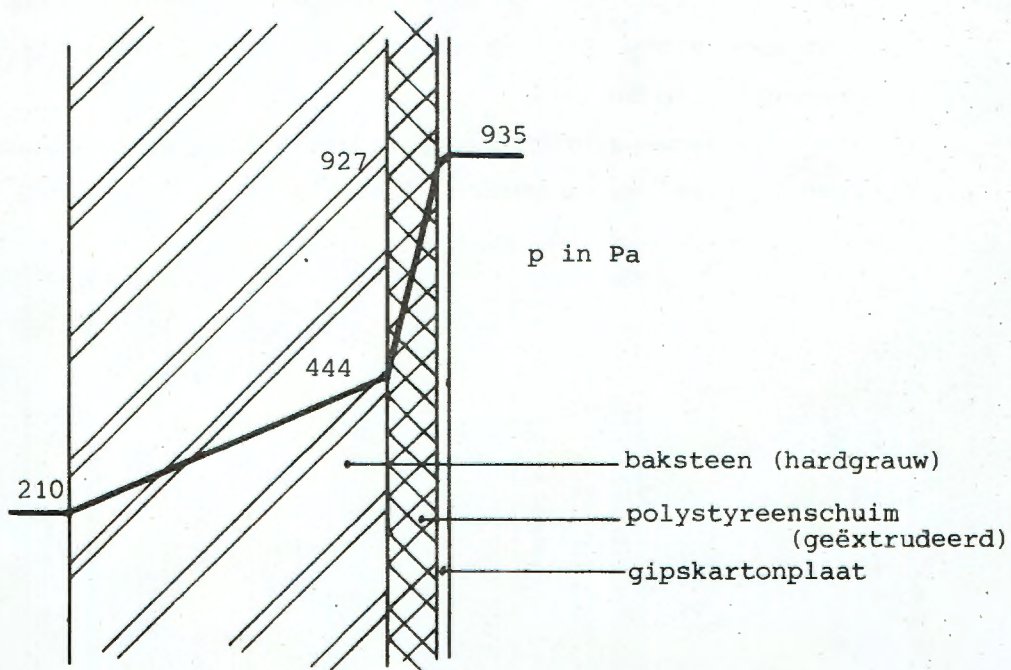
Het is ook mogelijk dit dampspanningsverloop grafisch te bepalen.

Horizontaal wordt nu de $\mu \cdot d$ -waarde van de diverse lagen uitgezet, verticaal komt de waterdampspanning. Het verloop wordt dan een rechte lijn tussen de dampspanning binnen (p_i) en de dampspanning buiten (p_a).

De waterdampspanning (p) op iedere willekeurige plaats in de constructie kan nu worden afgelezen.



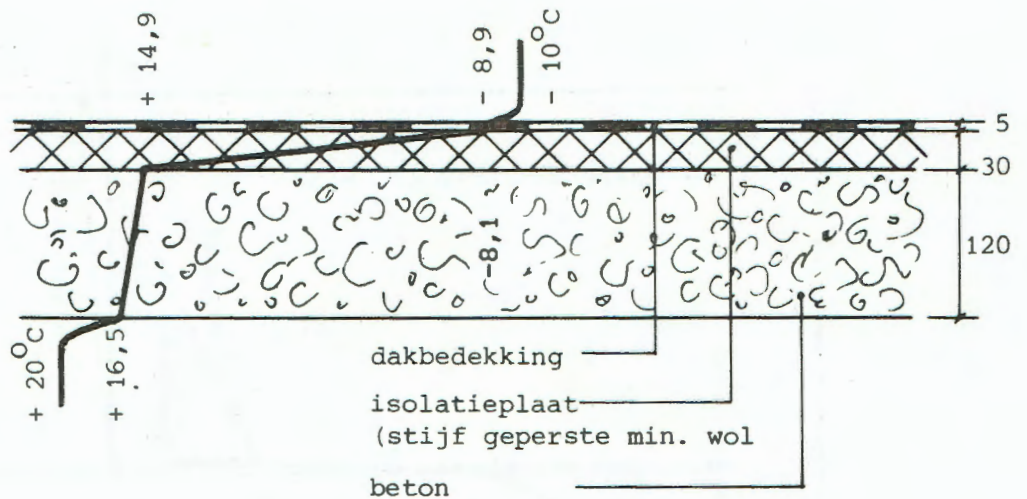
Het hierboven bepaalde verloop van de waterdampspanning kan natuurlijk ook in de op schaal getekende muurconstructie worden aangegeven.



3.4 INWENDIGE CONDENSATIE

Hiervóór is het verloop van de waterdampspanning in een constructie bekeken. Uit het temperatuurverloop kan het verloop van de maximale dampspanning in de constructie (p_{\max}) worden bepaald. Immers bij iedere temperatuur hoort een bepaalde maximale waterdampspanning. In werkelijkheid kan de waterdampspanning nergens boven de maximale dampspanning komen. Zijn de berekende waarden toch hoger, dan treedt in de constructie condensatie op.

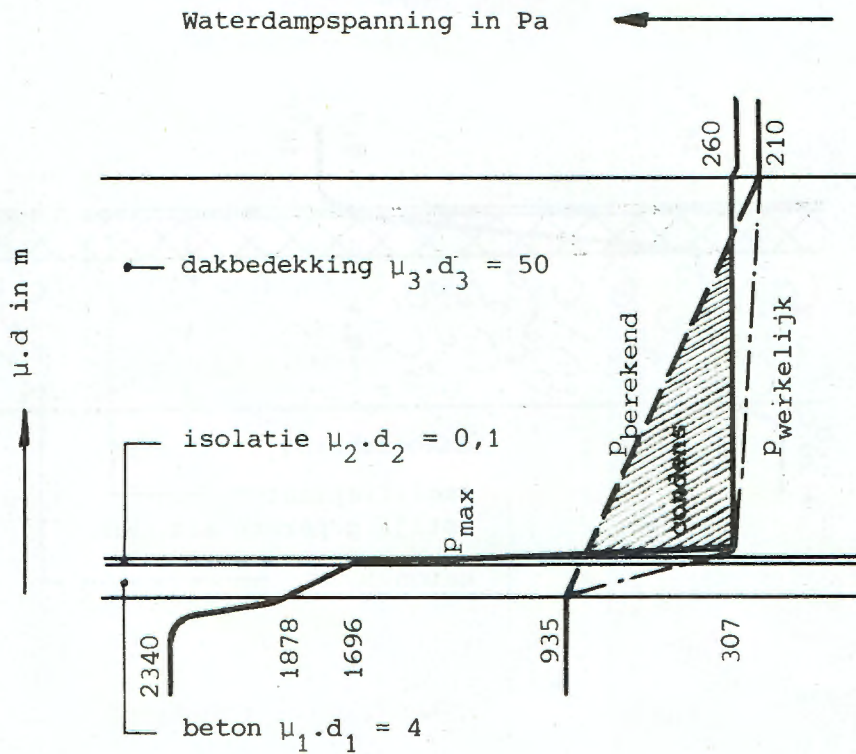
Een en ander wordt verduidelijkt aan de hand van een voorbeeld van een dak.



Met behulp van de $\mu.d$ -waarden wordt het verloop van de waterdampspanning (p) in de constructie grafisch bepaald. In dezelfde grafiek kan het uit het temperatuurverloop bepaalde verloop van de maximale dampspanning (p_{\max}) worden opgetekend.

temperatuur ($^{\circ}\text{C}$)	p_{max} (Pa)
- 10,0	260
- 8,9	285
- 8,1	307
+ 14,9	1696
+ 16,5	1878
+ 20,0	2340

Buiten: -10°C , $\phi = 80\%$, $p_a = 210\text{ Pa}$
 Binnen: 20°C , $\phi = 40\%$, $p_i = 935\text{ Pa}$



Uit bovenstaande grafiek blijkt dat de berekende dampspanning boven de maximale dampspanning uitkomt. Dan kan niet. In het grijs gearceerde gebied treedt nu condensatie op. Deze condensatie begint op het scheidingsvlak tussen isolatie en dakbedekking.

Met behulp van de dampweerstand (R_d) kan worden berekend hoeveel waterdamp gedurende de winter in de constructie condenseert.

Het werkelijke verloop van de dampspanning moet zijn zoals in de figuur is aangegeven. Dit houdt in (het is een geknikte lijn in plaats van een rechte) dat er meer vocht van binnen uit in de constructie dringt dan er naar buiten ontwijkt. De grootte van deze vochtstromen kan met de volgende formule worden berekend.

$$g = \frac{\Delta p}{R_d} \left[\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \right]$$

waarin: g = de vochtstroom in $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$

Δp = het dampspanningsverschil over het beschouwde deel van de constructie in Pa

$R_d = 5,3 \cdot 10^9 \cdot \mu \cdot d$ = de dampdiffusieweerstand over het beschouwde deel van de constructie in m/s

In het voorgaande voorbeeld worden de volgende waarden gevonden.

Vochtstroom van binnenlucht naar de plaats waar condensatie plaatsvindt (tussen isolatie en dakbedekking)

$$\begin{aligned} g_{\text{in}} &= \frac{p_i - p_c}{5,3 \cdot 10^9 \cdot (\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2)} = \frac{935 - 307}{5,3 \cdot 10^9 \cdot 4,1} \\ &= 28,9 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \end{aligned}$$

Vochtstroom naar buiten door de dakbedekking

$$\begin{aligned} g_{\text{uit}} &= \frac{p_c - p_a}{5,3 \cdot 10^9 \cdot \mu_3 d_3} = \frac{307 - 210}{5,3 \cdot 10^9 \cdot 50} \\ &= 0,4 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \end{aligned}$$

De hoeveelheid vocht die in de constructie achterblijft is dus:

$$g_{\text{in}} - g_{\text{uit}} = (28,9 - 0,4) \cdot 10^{-9} = 28,5 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Wanneer een winterseizoen overeenkomt met 60 dagen met de hiervoor genoemde condities dan is de hoeveelheid vocht die zich per winter ophoopt in de constructie gelijk aan:

$$\begin{aligned} g_{\text{geaccumuleerd, winter}} &= 28,5 \cdot 10^{-9} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 60 \\ &= 0,15 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{winter} \end{aligned}$$

Deze hoeveelheid is zo klein dat ze gemakkelijk door de constructie kan worden opgenomen. Voorwaarde is echter wel dat het vocht in de zomer weer kan verdwijnen. In het algemeen kan worden aangenomen dat dit het geval is als de $\mu.d$ -waarde van de dakbedekking niet meer dan 30 maal de som van de $\mu.d$ -waarden aan de warme zijde van de constructie bedraagt (1). Een en ander kan echter ook worden berekend.

Wanneer het dak niet uit beton bestaat, maar uit een houten balklaag met dakbeschot ligt de situatie anders. De dampweerstand van houten dakbeschot is minstens 10 maal zo klein als die van 12 cm beton; de warmteweerstand blijft vrijwel hetzelfde. Gedurende de winter komt nu ca. 1500 g/m^2 vocht het dak binnen. Dat is te veel. Bij deze constructie moet een dampremmende laag worden aangebracht tussen dakbeschot en isolatielaag met een $\mu.d$ -waarde van ca. 5 m. Per winter komt er dan nog ca. 100 g/m^2 vocht binnen.

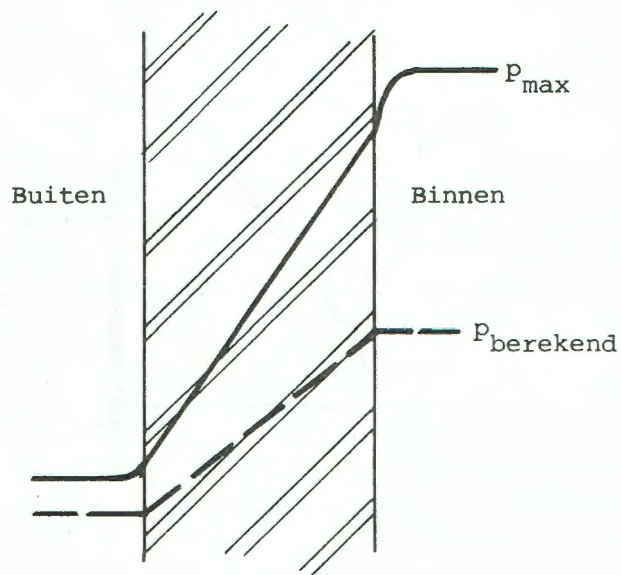
Ook wanneer de condities van de binnenlucht vochtiger zijn moeten (ook bij betondaken) dampremmende lagen worden toegepast, zie hiervoor hoofdstuk 4 of (2) en (3).

3.4.1 Plaats van isolatie en dampremmende lagen

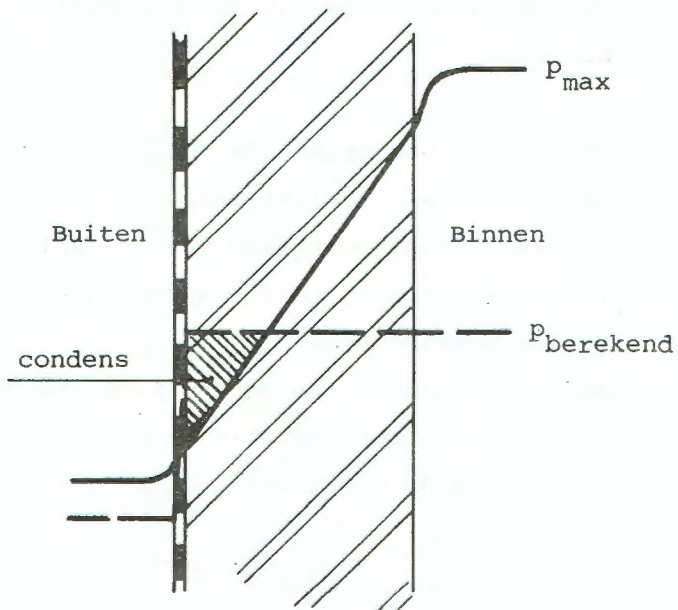
De plaats van een dampremmende laag is van groot belang. Bij dakconstructies vormt de dakbedekking meestal een dampdichte laag die juist aan de verkeerde kant zit, hetgeen men tracht te compenseren door het aanbrengen van een dampremmende laag onder de isolatie.

Hierdoor wordt de inwendige condensatie niet voorkomen maar wordt slechts de hoeveelheid condenserend vocht beperkt.

Als voorbeeld dient een steensmuur. In zijn oorspronkelijke uitvoering is er geen kans op inwendige condensatie. Het werkelijk dampspanningsverloop blijft op iedere plaats beneden de maximale dampspanning.

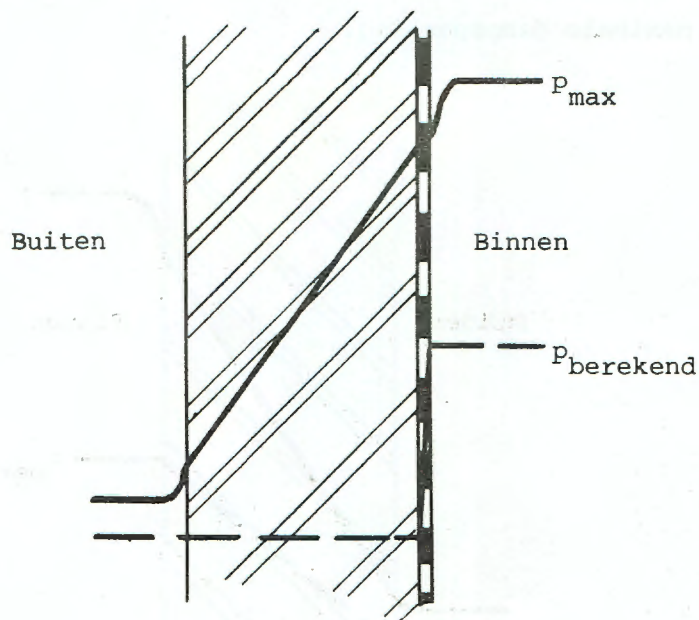


Wordt nu de buitenzijde sterk dampremmend afgewerkt, dan gaat een en ander er als volgt uitzien. Het verloop van p_{max} blijft hetzelfde, want het temperatuurverloop verandert niet.



Nu treedt vlak achter de dampremmende laag inwendige condensatie op.

Bij aanbrengen van een dampdichte laag aan de binnenzijde is de situatie weer gezond.



De maximale dampspanning is altijd groter dan de berekende.

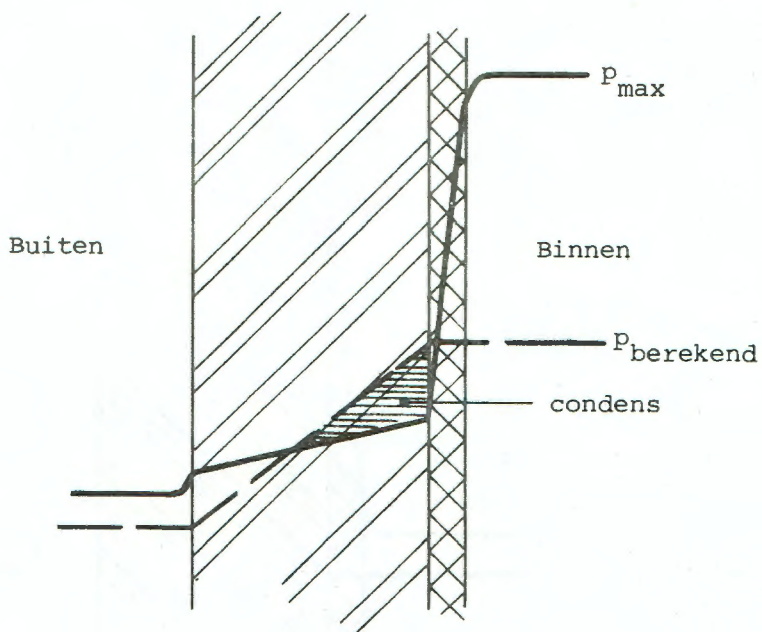
Uit dit voorbeeld blijkt dat een dampremmende laag altijd aan de warme zijde van de constructie moet worden aangebracht.

Met behulp van hetzelfde voorbeeld bekijken we nu de plaats van een isolatielaag.

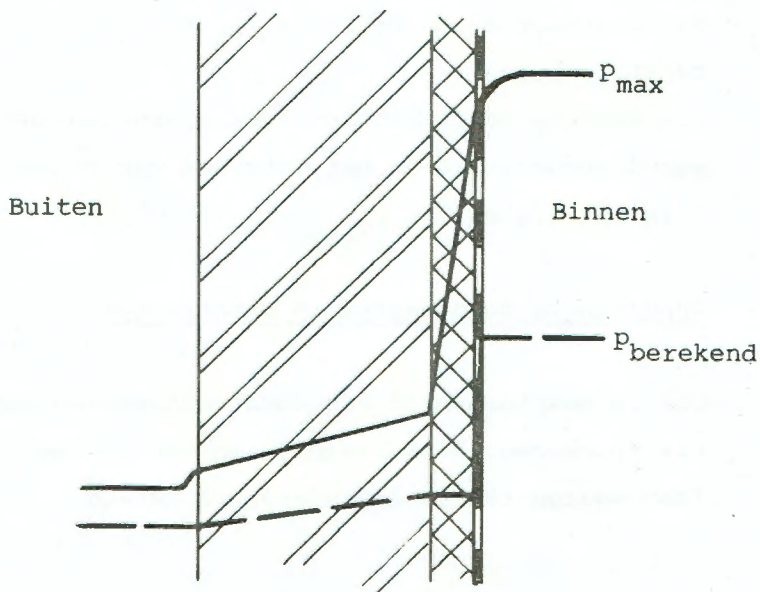
De dampdiffusieweerstand van de isolatie wordt verwaarloosbaar klein gesteld ten opzichte van die van de rest van de constructie.

Wat nu verandert, is het verloop van de maximale dampspanning. Immers met isolatie beïnvloeden we het temperatuurverloop in de constructie.

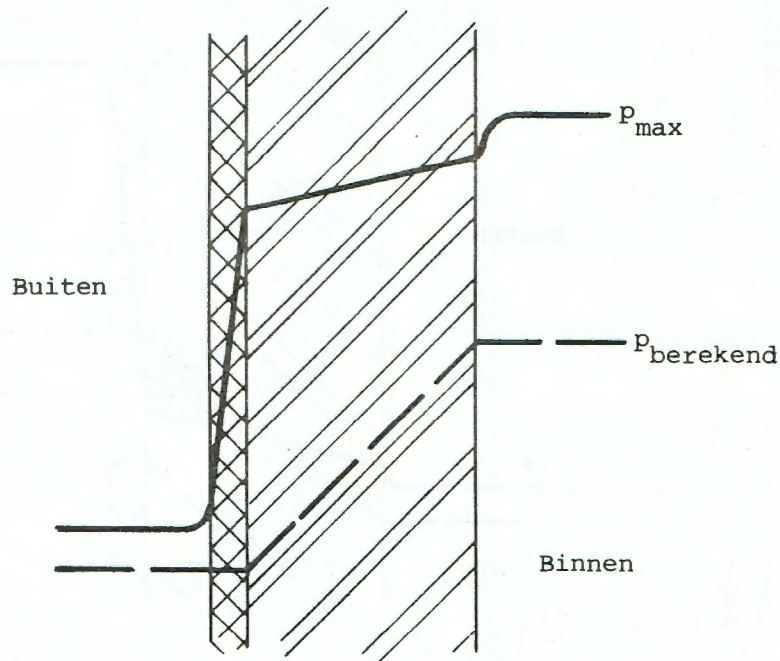
Bij isolatie aan de binnenzijde blijkt, met name op het scheidingsvlak tussen isolatie en steen de berekende waterdampspanning hoger te zijn dan de maximale. Het gevolg is inwendige condensatie.



Een goede dampremmende laag aan de binnenzijde kan dit probleem weer verhelpen.



Ook het aanbrengen van de isolatie aan de buitenzijde voorkomt de inwendige condensatie, mits de isolatie niet dampremmend wordt afgewerkt (zie voorbeeld dak).



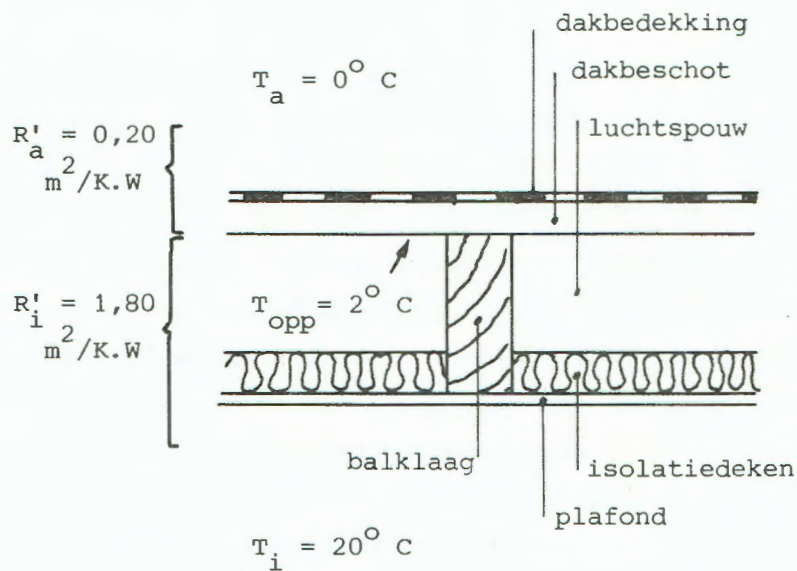
Voorgaand voorbeeld laat zien dat de juiste plaats voor een dampremmende laag feitelijk de warme zijde (binnenkant) van de constructie is. De isolatielaag kan het beste aan de buitenzijde komen.

Dit laatste heeft trouwens ook voordelen in verband met de warmteaccumulatie en het optreden van temperatuurspanningen (zie ook 2.4 en 2.5).

3.4.2 Oppervlakte condensatie in constructies

Ook in het inwendige van constructies kan oppervlaktecondensatie voorkomen. Denk hierbij aan een dak met een verlaagd plafond waarop een isolatiedeken is gelegd.

In dergelijke constructies kan het binnenoppervlak van het dakbeschot bijzonder koud worden. In de meeste gevallen kan de dampdichtheid van het plafond ten gevolge van doorbrekingen voor lampen enz. en naden en kieren bij aansluitingen worden verwaarloosd ten opzichte van de dampdichtheid van de dakbedekking, zodat in de spouw onder het dakbeschot vrijwel dezelfde luchtcondities heersen als in de ruimte.



Een oppervlaktetemperatuur van 2°C houdt in: $p_{\text{max}} = 706 \text{ Pa}$. Dat wil zeggen dat bij een binnenluchttemperatuur van 20°C ($p_{\text{max}} = 2340 \text{ Pa}$) reeds bij een relatieve vochtigheid van $\phi = 32\%$ condensatie optreedt.

Bij een buitentemperatuur van -10°C wordt de oppervlakte temperatuur van het dakbeschot zelfs -7°C ($p_{\text{max}} = 337 \text{ Pa}$), zodat nu reeds bij een relatieve vochtigheid van $\phi = 16\%$ condensatie optreedt; dit condensvocht bevriest nog ook.

Wanneer op dergelijke wijze bevroren vocht plotseling gaat ontdooien valt het water op het plafond, waar het kringen en op lekkage lijkende verschijnselen kan veroorzaken. Overigens kan een geringe hoeveelheid oppervlaktecondens reeds rotting en schimmelvorming tot gevolg hebben.

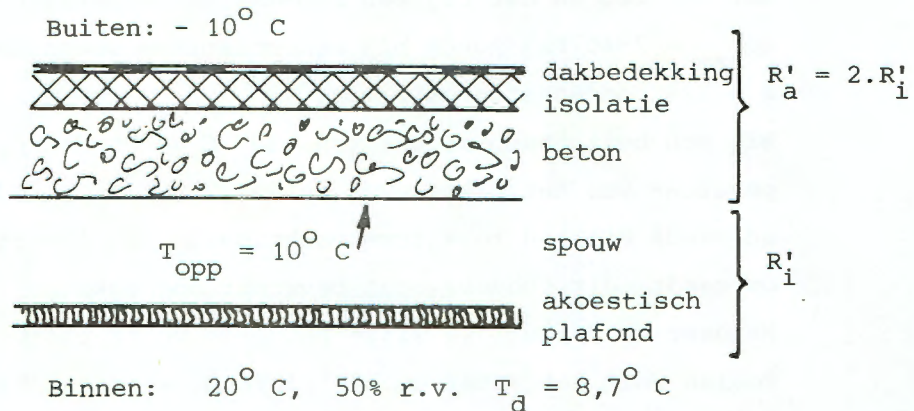
In de eerste plaats dient de hoeveelheid naar de spouw diffunderende waterdamp te worden verkleind door het aanbrengen van een dampremmende laag tussen plafond en isolatie. Dit is in de uitvoering echter heel erg moeilijk te verwezenlijken gezien de doorbrekingen door lampen enz. en het beschadigen van de folie.

Zeker bij een houten dakbeschot blijft het daarom nodig de door het plafond gedrongen waterdamp door ventilatie met buitenlucht af te voeren. In de winter kan die ventilatielucht echter niet zoveel vocht meenemen. Per m³ ventilatielucht kan soms maar 1 gram waterdamp worden afgevoerd.

Een goede, ongestoorde ventilatie is derhalve noodzakelijk. Voor richtlijnen hiervoor zie hoofdstuk 4 en boeken als (2), (3) en (4).

Ook bij betondaken kan dit condensatieverschijnsel optreden. Veel verlaagde, akoestische plafonds hebben een behoorlijk hoge warmteweerstand waardoor de onderkant van de betonplaat vaak zeer koud kan worden.

Naar beneden vallende condensdruppels geven dan kringen in het plafond en gedachten aan lekkage. Dit kan worden voorkomen door de isolatie van het bovenste gedeelte van het dak aan te passen aan de isolatie door spouw en verlaagd plafond.



Voor andere binnenluchtcondities gelden weer andere verhoudingen tussen R'_a en R'_i , zodat toch geval voor geval moet worden bekeken.

Ook bij houten daken waar (door de grote breedte of door het in de verkeerde richting lopen van de balklagen) geen doeltreffende ventilatie met buitenlucht mogelijk is kan de toestand door het aanbrengen van isolatie op het dak gezond worden gemaakt.

3.5

VOCHTABSORPTIE, HYGROSCOPISCH VOCHTGEHALTE

De meeste materialen bevatten een geringe hoeveelheid vocht, die afhankelijk is van de relatieve vochtigheid van de lucht waarin het materiaal zich bevindt. Dit noemt men hygroscopisch vocht. In lucht met $\phi = 40\%$ bevat hout ca. 6 volume procent vocht, bij $\phi = 65\%$ wordt dit ca. 10 volume procent.

Hieronder wordt voor enkele materialen het hygroscopisch vochtgehalte in vol. % gegeven bij verschillende relatieve luchtvochtigheden.

materiaal	$\phi = 40\%$	65%	95%
grindbeton	2	3	7
hout	6	10	18
baksteen enz.	-	-	-
kalkzandsteen	2	4	10
pleisterlagen	1	2	4
houtwolcement	2	3	6

In de tabel zijn voor baksteen geen waarden ingevuld. Baksteen is niet hygroscopisch.

Dat wil zeggen: het hygroscopisch vochtgehalte is te verwaarlozen klein.

Van het verschil in hygroscopisch vochtgehalte bij diverse luchtvochtigheden heeft men in bijvoorbeeld een keuken een zeker voordeel. Het pleisterwerk op de wanden zal bij stijgende ϕ een groter vochtgehalte krijgen, het kan waterdamp opnemen en het op een later tijdstip weer afgeven.

voorbeeld:

Stel het wandoppervlak is 40 m^2 en stel dat een dikte van 5 mm van de pleisterlaag meedoet in de vochtuitwisseling. Bij stijging van ϕ van 40 naar 65% stijgt het hygroscopisch vochtgehalte van het pleisterwerk met 1 volume procent. Dit houdt in dat

$$\frac{1}{100} \cdot 40 \cdot 0,005 = 0,002 \text{ m}^3 \text{ ofwel } 2 \text{ liter}$$

water door het pleisterwerk kan worden opgenomen. Dit is juist de hoeveelheid die bij het koken ongeveer vrijkomt.

3.6 RELATIEVE VOCHTIGHEID BINNENSHUIS

De absolute vochtigheid binnenshuis, en daarmee ook de dampspanning is, door de produktie van woonvocht, vrijwel altijd hoger dan buitenshuis. Anders ligt dit met de relatieve vochtigheid.

In de winter is de relatieve vochtigheid buiten gemiddeld $\phi = \text{ca. } 80\%$. Wat gebeurt er nu als die lucht van -10° C , $\phi = 80\%$, $p_a = 208 \text{ Pa}$ binnenkomt en wordt opgewarmd tot 20° C . Het absolute vochtgehalte verandert niet, wel de maximale waterdampspanning. Bij 20° C is $p_{\text{max}} = 2340 \text{ Pa}$. Dit houdt in dat de relatieve vochtigheid van de lucht nu $\phi = \frac{208}{2340} \cdot 100\% = \text{ca. } 9\%$ wordt; $c_i = 1,5 \text{ g/m}^3$.

Zo laag zal ϕ binnenshuis echter nooit worden omdat er binnen altijd een zekere vochtproductie plaatsvindt.

Mensen produceren bij rustige arbeid ca. 75 gram waterdamp per uur. Wanneer we er van uitgaan dat een mens ongeveer $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ventilatielucht krijgt toegevoerd, dan moet (wil er evenwicht

zijn in de vochtbalans) die $30 \text{ m}^3/\text{h}$ ventilatielucht 75 g/h waterdamp afvoeren. Dat wil zeggen: per m^3 ventilatielucht wordt er $\frac{75}{30} = 2,5$ gram waterdamp afgevoerd. Het absolute vochtgehalte van de afvoerlucht (dus van de lucht in het vertrek) moet daarom $2,5 \text{ g/m}^3$ hoger zijn dan bij afwezigheid van vochtproductie, zodat $c_i = 1,5 + 2,5 = 4,0 \text{ g/m}^3$. Ook de dampspanning is dan hoger. Deze is nu ca. $p_i = 545 \text{ Pa}$.

Dit betekent een relatieve vochtigheid binnenshuis van

$$\phi = \frac{545}{2340} \cdot 100\% = 23\%.$$

Dit is overigens nog erg laag in verband met de behaaglijkheid. Wil men, bijvoorbeeld in een kantoorgebouw tijdens de winter een relatieve vochtigheid van minimaal $\phi = 35\%$ handhaven dan moet de lucht worden bevochtigd.

$T_i = 20^\circ \text{ C}$, $\phi = 35\%$ betekent

$$c_i = 0,35 \cdot c_{\text{max}} = 0,35 \cdot 17,3 = 6,1 \text{ g/m}^3.$$

Er moet dus nog $6,1 - 4,0 = 2,1 \text{ g/m}^3$ waterdamp aan de ventilatielucht worden toegevoegd.

Andersom kan de relatieve vochtigheid in de zomer (bijvoorbeeld in een kelder) binnenshuis aanmerkelijk hoger zijn dan buiten. Stel de buitencondities zijn 28° C , $\phi = 50\%$, $p_a = 1890 \text{ Pa}$. Door de zware wanden en vloeren en mogelijk ook door het "koude" grondwater dat tegen wanden en vloeren aanstaat is de luchttemperatuur in de kelder wellicht maar 20° C . Hierbij is $p_{\text{max}} = 2340 \text{ Pa}$, zodat de relatieve vochtigheid in de kelder bij ventilatie met buitenlucht wordt:

$$\phi = \frac{1890}{2340} \cdot 100\% = 81\%$$

Door het grondwater kan de oppervlaktetemperatuur van de wanden nog lager zijn, bijvoorbeeld 15° C . Hierbij is $p_{\text{max}} = 1706 \text{ Pa}$. Dit betekent dat er condensatie op de wanden zal optreden, een reden dus om ook kelderwanden (en vloeren) goed te isoleren. Juist door ventilatie kan in de zomer een kelder vochtig worden.

4 WARMTE- EN VOCHTTECHNISCH GEDRAG VAN CONSTRUCTIES

4.0 INLEIDING

In het voorgaande zijn de basisbegrippen en rekenmethodes omtrent warmte- en vochttransport door constructies gegeven.

In het hierna volgende wordt besproken hoe een constructie kan worden beoordeeld. Verder worden een aantal veel voorkomende constructies aan een nadere beschouwing onderworpen, waarbij wordt aangegeven voor welke omstandigheden ze geschikt zijn en hoe ze moeten worden uitgevoerd.

4.1 THERMISCH BEOORDELEN VAN CONSTRUCTIES

4.1.1 Normen

Thermisch beoordelen van een constructie kan het best gebeuren aan de hand van de norm NEN 1068 "Thermische eigenschappen van woningen". Hoewel deze norm bedoeld is voor woningen kunnen de erin genoemde getallen zeker ook voor andere gebouwen worden gebruikt. De norm dateert uit 1964 en wordt op dit ogenblik herzien.

In de nieuwe norm zullen naast de eisen met betrekking tot de minimale warmteweerstand van gebouwonderdelen ook regels worden geformuleerd voor het beperken van het totale energieverbruik van gebouwen.

De oorspronkelijke norm onderscheidt drie klassen, "matig, voldoende en goed". Gezien de huidige ontwikkelingen worden hier alleen de getallen genoemd van de klasse "goed".

Buitenwanden, daken, vloeren boven buitenlucht of boven niet verwarmde of vaak openstaande ruimten, zoals garages, moeten een minimale warmteweerstand hebben van:

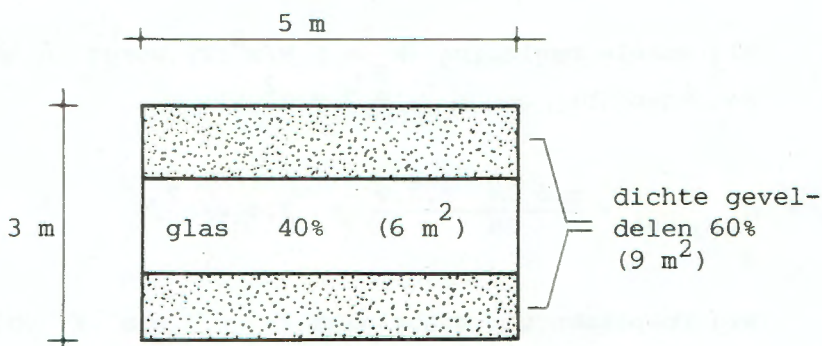
$$R_c = 1,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

Naast de norm NEN 1068 worden ook in bijvoorbeeld de "Vorschriften en Wenken" van de Vereniging van Nederlandse Gemeenten en in ministeriële beschikkingen regels met betrekking tot de warmte-isolatie geformuleerd.

4.1.2 Aanbevelingen, gemiddelde k-waarde

Teneinde het energieverbruik benodigd voor de verwarming van gebouwen te beperken en het energieverbruik per eenheid van gebouwvolume voor de diverse gebouwen in dezelfde orde van grootte te brengen bestaat de mogelijkheid eisen te stellen aan de gemiddelde warmteweerstand van alle gebouwomsluitingen.

Het meest eenvoudig kan worden gerekend met de gemiddelde k-waarde (warmtedoorgangscoefficiënt). Dit toont het volgende voorbeeld aan.



gevelgedeelte, (15 m²)

Het totale warmteverlies van het getekende gevelsegment volgt uit:

$$i = A_g \cdot k_g \cdot \Delta T + A_w \cdot k_w \cdot \Delta T = A_{\text{totaal}} \cdot k_{m, \text{gevel}} \cdot \Delta T$$

- Waarin: i = warmtestroom in W
 A_g = glasoppervlak in m^2
 A_w = oppervlak dichte gevelgedeelten
 A_{totaal} = totaal geveloppervlak ($A_g + A_w$)
 k_g = k-waarde van het glas in $W/m^2.K$
 k_w = k-waarde dichte geveldelen
 $k_{m, \text{gevel}}$ = gemiddelde k-waarde van de gevel
 ΔT = temperatuurverschil tussen binnen en buiten in K of $^{\circ}C$

Hieruit kan worden afgeleid:

$$k_{m, \text{gevel}} = \frac{k_g \cdot A_g + k_w \cdot A_w}{A_{\text{totaal}}} \quad [W/m^2.K]$$

Bij enkele beglazing ($k_g = 5 W/m^2.K$) wordt in het voorbeeld gevonden (bij een $k_w = 0,7 W/m^2.K$):

$$k_{m, \text{gevel}} = \frac{5 \cdot 6 + 0,7 \cdot 9}{15} = 2,4 W/m^2.K$$

Bij toepassen van dubbelglas ($k_g = 3 W/m^2.K$) volgt:

$$k_{m, \text{gevel}} = \frac{3 \cdot 6 + 0,7 \cdot 9}{15} = 1,55 W/m^2.K$$

Op dezelfde wijze kan men nu een gemiddelde k-waarde voor het gehele gebouw bepalen.

De formule hiervoor luidt als volgt:

$$k_m = \frac{k_w \cdot A_w + k_g \cdot A_g + k_v \cdot A_v + 0,8 \cdot k_d \cdot A_d + 0,5 \cdot k_{gr} \cdot A_{gr}}{A}$$

waarin:

- k_m = de gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt
- A = het gezamenlijk oppervlak van alle gebouwomsluitingen
- $k_v \cdot A_v$ = k-waarde en oppervlak van vloeren grenzend aan buitenlucht
- $0,8 \cdot k_d \cdot A_d$ = k-waarde en oppervlak van het dak (de factor 0,8 dient om de warmte winst door zonbestraling in rekening te brengen)
- $0,5 \cdot k_{gr} \cdot A_{gr}$ = k-waarde en oppervlak van vloeren boven kruipruimten of rechtstreeks op de bodem (de factor 0,5 dient om het kleinere temperatuurverschil tussen binnen en buiten in rekening te brengen; kruipruimte en bodem hebben een hogere temperatuur dan de buitenlucht)

De eis die gesteld wordt aan de gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt (k_m) is afhankelijk van de verhouding tussen oppervlak en volume van het gebouw (zie ook het rapport "Richtlijnen voor de gemiddelde warmtedoorgangscoefficiënt k_m " van 29-1-'76). Voor een gebouw met een groot oppervlak in verhouding tot het volume wordt een lagere k-waarde geëist (een betere warmte weerstand) dan voor een gebouw met gunstige (A/V) oppervlak/volume verhouding (zie de tabel).

A/V (m^{-1})	$k_{m,max}$ ($W/m^2 \cdot K$)	A/V	$k_{m,max}$
$\leq 0,195$	1,83	0,70	1,03
0,20	1,76	0,75	1,00
0,25	1,57	0,80	0,98
0,30	1,45	0,85	0,95
0,35	1,36	0,90	0,94
0,40	1,29	0,95	0,92
0,45	1,23	1,00	0,91
0,50	1,18	1,05	0,90
0,55	1,14	1,10	0,88
0,60	1,10	1,15	0,87
0,65	1,06	$\geq 1,20$	0,85

Naast de eis die gesteld wordt aan de gemiddelde k-waarde voor het gehele gebouw (k_m) wordt ook een eis geformuleerd voor de gemiddelde k-waarde van de gevel. Deze luidt:

$$k_{m,gevel} \leq 2,25 \quad \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Voor het glasaandeel in de gevel betekent dit het volgende.

Bij een k-waarde van de borstwering van $k_w = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ bedraagt het maximale glaspercentage (t.o.v. het buitenoppervlak) bij toepassen van enkel-glas ca. 35%.

Bij toepassen van dubbel-glas zou men kunnen gaan tot een glaspercentage van ca. 65%.

Bij nog grotere glaspercentages kan men gaan denken aan driedubbel glas of andere speciale glassoorten (ook zonreflecterend glas heeft een gunstiger k-waarde).

Los hiervan dient te worden bedacht dat het glaspercentage, in combinatie met de gekozen zonwering een zeer belangrijke invloed heeft op de vertrektemperaturen in de zomer of op de capaciteit van de benodigde koelinstallatie.

Hetzelfde geldt voor de opbouw van de dakconstructie.

Een licht dak geeft in de zomer (bij gebrek aan warmteaccumulerende massa) aanleiding tot veel hogere binnentemperaturen dan een zwaar (beton) dak met dezelfde k-waarde. Dit kan men enigszins compenseren door het lichte dak een veel hogere warmteweerstand te geven, bijvoorbeeld $k_d < 0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

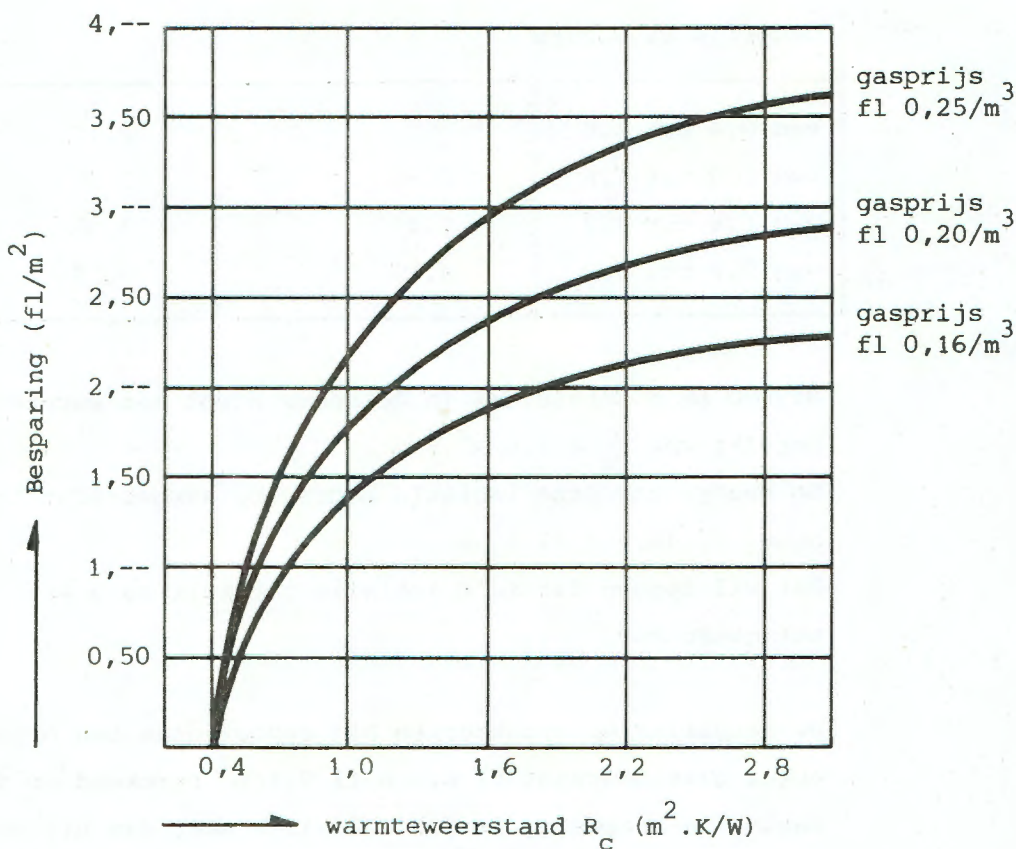
De hierboven geformuleerde eisen die aan de thermische isolatie van de gebouwomsluitingen kunnen worden gesteld tasten de vrijheid van de architect met betrekking tot gebouwoontwerp en vormgeving van de gevel niet aan. Een zekere bezinning naar aanleiding van de geïntroduceerde verhouding A/V kan echter wellicht toch op zijn plaats zijn.

4.1.3 Economie van het isoleren

Isoleren betekent brandstof besparen. Op een gegeven moment levert nog meer isoleren echter nauwelijks meer wat op.

Er is een bepaald evenwicht tussen hoeveelheid isolatie en de brandstofprijs (aardgasprijs).

Als voorbeeld nemen we de spouwmuurisolatie. In onderstaande grafiek is weergegeven hoeveel de besparing is (voor een gemiddelde woning, bij een gemiddelde stookgewoonte) ten opzichte van de stookkosten bij een ongeïsoleerde spouwmuur.



Het toevoegen van $0,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ (ongeveer 20 mm isolatiemateriaal) aan de reeds aanwezige warmteweerstand R_c levert steeds minder extra besparing op. Hoe hoger de gasprijs, hoe hoger de extra besparing blijft.

Vergroting van de warmteweerstand R_c ($m^2 \cdot K/W$)	Extra besparing per m^2 muur (fl/m^2)	Besparing t.o.v. ongeïsoleerde muur (fl/m^2)
Gasprijs $fl\ 0,16/m^3$		
van 0,4 tot 1,0		1,40
van 1,0 tot 1,6	0,50	1,90
van 1,6 tot 2,2	0,25	2,15
van 2,2 tot 2,8	0,12	2,27
Gasprijs $fl\ 0,25/m^3$		
van 0,4 tot 1,0		2,15
van 1,0 tot 1,6	0,80	2,95
van 1,6 tot 2,2	0,40	3,35
van 2,2 tot 2,8	0,20	3,55

Bij 50 mm minerale wol in de spouw wordt een warmteweerstand bereikt van $R_c = 1,6\ m^2 \cdot K/W$.

De kosten van deze isolatie bedragen, aangebracht tijdens de bouw, $fl\ 10,=$ à $fl\ 15,=$.

Dat wil zeggen dat zo'n isolatie zichzelf na 3 à 5 jaar heeft terugverdiend.

De besparing op stookkosten bij dubbel-glas ten opzichte van enkel-glas bedraagt $fl\ 6,=$ à $fl\ 9,=/m^2$ berekend op dezelfde basis. De besparing is dus duidelijk meer dan bij de spouwmuur. De kosten zijn echter beduidend hoger; ca. $fl\ 160,=/m^2$ bij nieuwbouw en ca. $fl\ 200,=/m^2$ bij vervangen van bestaand enkel glas. De terugverdientijd is hierdoor 20 à 30 jaar.

In het algemeen kan worden aangenomen dat een investering rendabel is als de kosten in ca. 10 jaar kunnen worden terugverdiend.

4.2 BEOORDELEN VAN DE VOCHTHUISHOUDING IN CONSTRUCTIES

4.2.1 Klimaatcondities

In navolging van (2,3) kunnen een viertal klimaatklassen worden onderscheiden, uitgaande van een jaargemiddelde dampdruk binnen.

- I condities heersend in ruimten zonder, of met zeer geringe dampproductie, zoals opslagplaatsen, garages, schuren;
 $1030 < \bar{p}_i < 1080$ Pa
- II condities heersend in ruimten met geringe dampproductie, zoals woningen, kantoren en winkels waarin geen luchtbevochtiging plaatsvindt; $1080 < \bar{p}_i < 1320$ Pa
- III condities heersend in ruimten met matige dampproductie, zoals scholen, verpleeginrichtingen, bejaardentehuizen, recreatiegebouwen en gebouwen met geringe luchtbevochtiging; $1320 < \bar{p}_i < 1430$ Pa
- IV condities heersend in ruimten met hoge dampproductie, zoals wasserijen, badinrichtingen, zwembaden en zuivelfabrieken, en gebouwen met sterke luchtbevochtiging zoals drukkerijen en textielfabrieken; $\bar{p}_i > 1430$ Pa

4.2.2 Oppervlaktecondensatie

Er zijn diverse redenen waarom oppervlaktecondensatie moet worden voorkomen:

- vochtige plekken bevorderen vervuiling
- vochtige plekken kunnen aanleiding geven tot schimmelvorming enz.
- als oppervlaktecondensatie optreedt zal in het algemeen ook inwendige condensatie kunnen worden verwacht
- bij strenge koude kan door bevriezing stukspringen optreden
- op ruiten belemmert condens het doorzicht.

Hoewel het minder fraai is kan oppervlaktecondensatie op ruiten en aluminiumstijlen enz. wel eens worden toegestaan.

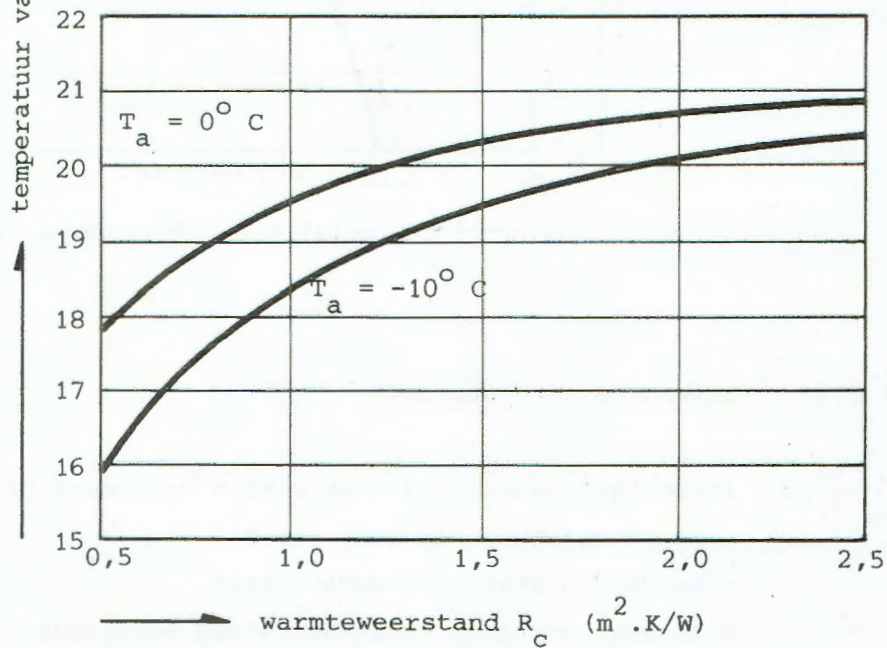
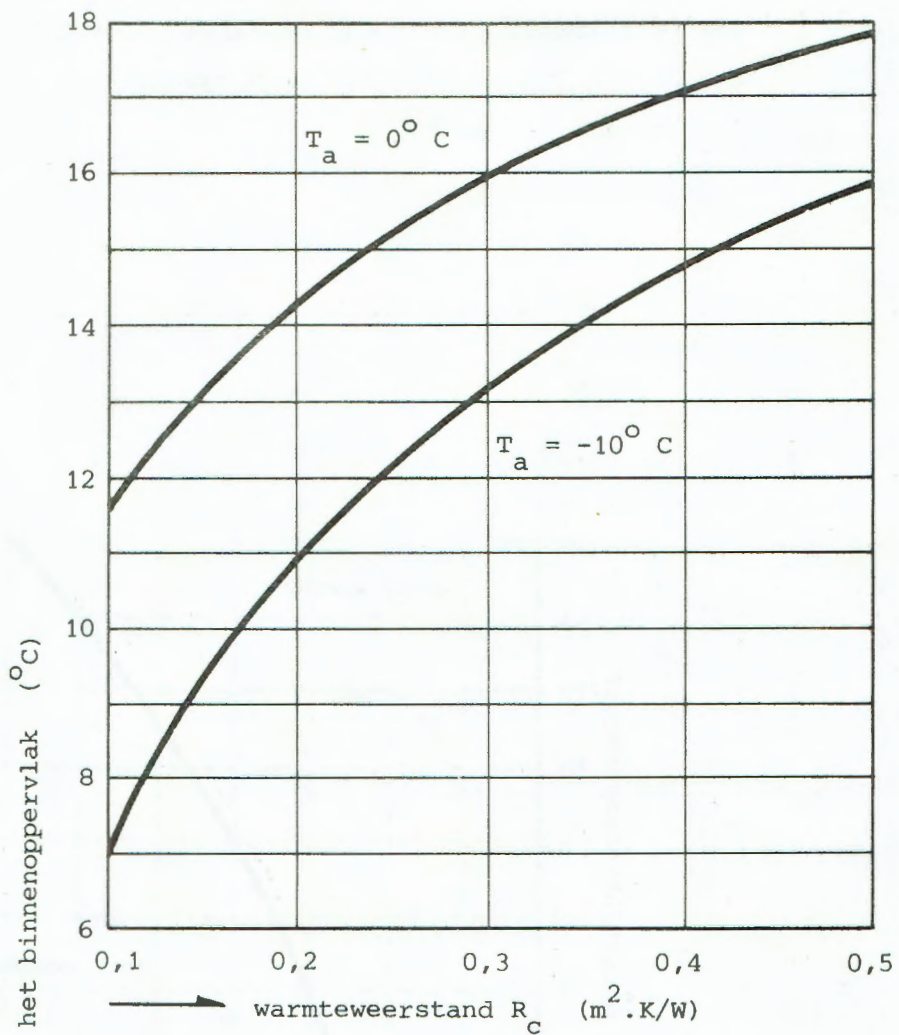
Een reden hiervoor is dat de normale woonhuizen en kantoren zonder luchtbevochtiging de vochtigheid van de lucht in de winter zo laag is dat pas bij heel lage buitentemperaturen (dus niet zo vaak) condensatie optreedt. Verder zijn glas en aluminium ongevoelig voor vocht.

Vanzelfsprekend dient er wel voor te worden verzorgd dat het condensvocht op een doelmatige wijze kan worden afgevoerd zonder in andere constructiedelen schade te veroorzaken.

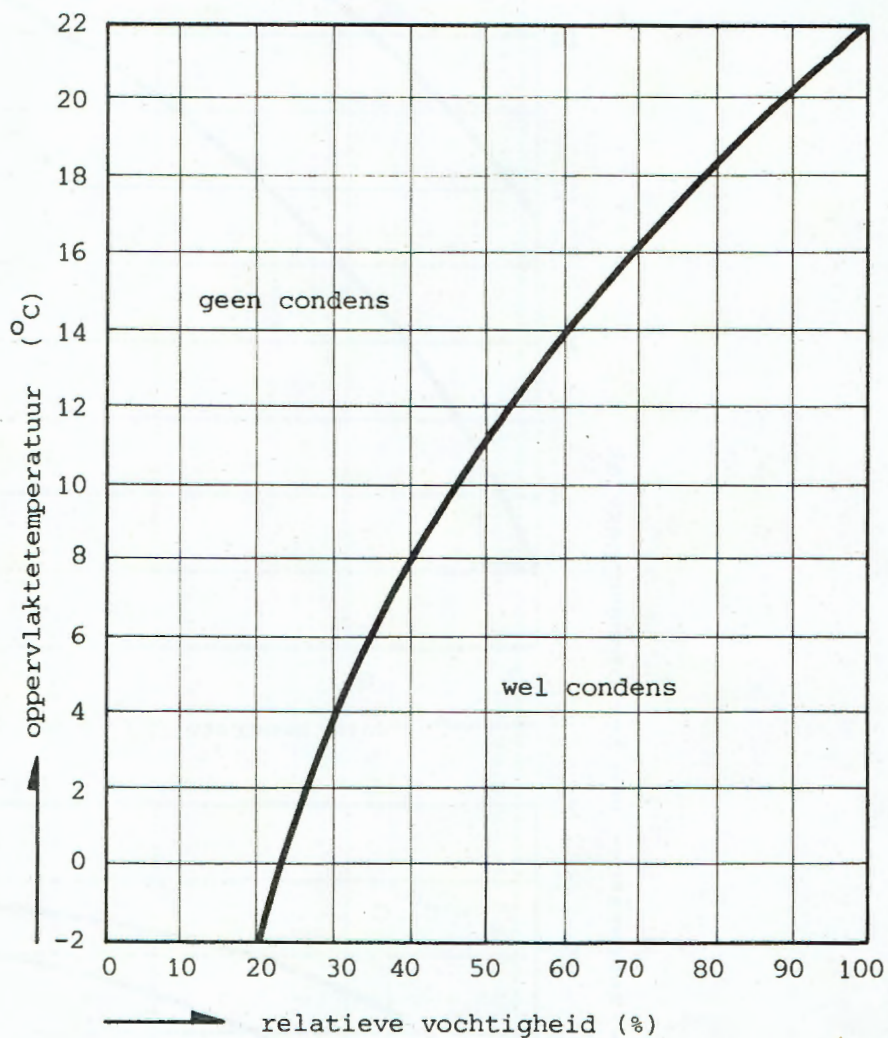
In gebouwen met luchtbevochtiging dient of dubbel-glas te worden toegepast of de luchtbevochtiging bij lage buitentemperaturen te worden verminderd.

Lage oppervlaktetemperaturen beïnvloeden in sterke mate de behaaglijkheid in de ruimte. De minimale oppervlaktetemperatuur waarbij zonder stralingscompensatie door middel van bijvoorbeeld een radiator een behaaglijk binnenklimaat kan worden bereikt is ca. 16° C.

In de volgende twee grafieken kan voor een binnentemperatuur van 22° C en een buitentemperatuur van 0° C of -10° C de temperatuur van het binnenoppervlak worden afgelezen bij verschillende warmteweerstanden van de constructie R_c .



In de volgende grafiek is weergegeven bij welke vochtigheid van de binnenlucht bij een bepaalde oppervlaktetemperatuur condensatie optreedt. Hierbij is uitgegaan van een temperatuur van de binnenlucht van 22°C .



4.2.3 Inwendige condensatie

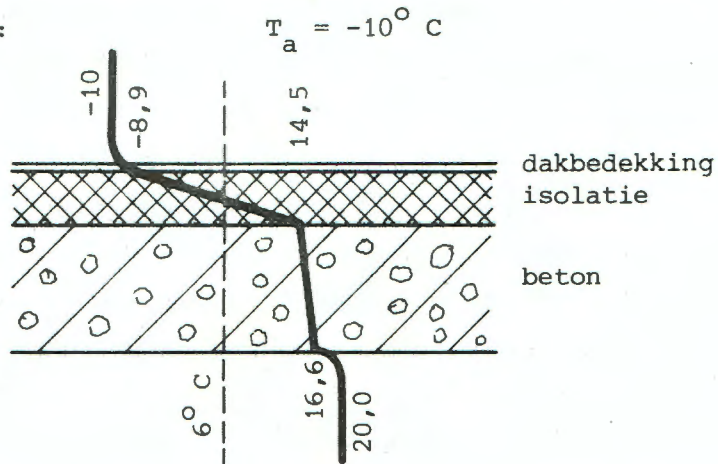
Inwendige condensatie moet worden voorkomen of beperkt omdat:

- de constructie kan gaan rotten
- er kans bestaat op kapotvriezen
- te veel vocht de warmteweerstand vermindert.

Een eerste eenvoudige methode ter controle is, na te gaan waar het dauwpunt van de binnenlucht ligt in de constructie

voorbeeld: geïsoleerd betondak (stationaire situatie)

buiten:



binnen: $T_i = 20^{\circ} \text{C}$, $\phi = 40\%$, $T_d = 6^{\circ} \text{C}$

In dit voorbeeld ligt het dauwpunt in de isolatielaag. Dat wil zeggen: als daar waterdamp aanwezig is zal het condenseren. Als er op die plaats in de constructie geen of slechts weinig waterdamp kan komen is het goed. Dit is bijvoorbeeld het geval bij een 100% dampdicht isolatiemateriaal (bijvoorbeeld geschuimd glas). Bij andere isolatiematerialen kan de betonlaag als voldoende dampdicht worden beschouwd voor klimaatklasse I en II. Bij klimaatklasse III en IV moet een extra dampremmende laag worden aangebracht tussen beton en isolatie. De som van de $\mu \cdot d$ -waarden aan de warme kant van de isolatie moet hierbij minstens 5 m respectievelijk 25 m bedragen. Komt het dauwpunt onder de isolatielaag of dampremmende laag terecht dan moet een dikkere isolatielaag worden toegepast.

Het voorgaande was slechts één voorbeeld.

Alle gevallen zo te behandelen voert te ver. Hiervoor kan bijvoorbeeld (2,3) worden geraadpleegd.

Een nauwkeuriger methode om de vochttechnische kwaliteit te bepalen berust op de in 3.4 beschreven methode om de mogelijkheid

van inwendige condensatie te onderzoeken. Niet alleen kan het condensatiegebied worden bepaald, het is ook mogelijk de hoeveelheid binnendringend vocht te berekenen.

Het is niet noodzakelijk iedere vorm van inwendige condensatie te voorkomen. De hoeveelheid vocht die door inwendige condensatie in de constructie achterblijft gedurende de winterperiode mag echter een bepaald maximum niet overschrijden. Verder moet hetgeen in de winter binnendringt 's zomers weer kunnen verdwijnen. De hoeveelheid vocht die aan het eind van de winterperiode aanwezig mag zijn wordt voor daken in het algemeen aangehouden (1) op:

$$0,5 \text{ kg/m}^2.$$

Alleen bij houtbevattende stoffen geldt $0,1 \text{ kg/m}^2$ per 10 mm dikte van het materiaal, met een maximum van $0,5 \text{ kg/m}^2$. Ook bij een geslotencellig isolatiemateriaal, dat een zeer geringe opnamecapaciteit voor vocht heeft moeten lagere waarden worden gehanteerd (minder dan $0,1 \text{ kg/m}^2$) daar anders de ophoping van vocht tussen isolatiemateriaal en dakbedekking te groot wordt. Bij aanwezigheid van een dampdrukverdelende laag (zie ook 4.4.7) wordt de opnamecapaciteit voor vocht weer iets groter.

Voor het afvoeren van het vocht in de zomer geldt het volgende (3): "bij een \bar{p}_i -waarde lager dan 1430 N/m^2 (de grens tussen klimaatklasse III en IV) mag, althans bij een buitenklimaat als het Nederlandse, worden verwacht dat alle waterdamp die gedurende de winter in een constructie condenseert in de aansluitende zomerperiode weer door verdamping wordt afgevoerd. Is de \bar{p}_i -waarde hoger dan 1430 N/m^2 , dan moet op een van jaar tot jaar voortschrijdende vochtaccumulatie worden gerekend".

Dampremmende lagen hebben slechts invloed op de hoeveelheden vocht die in dit proces een rol spelen.

4.3 BUITENWANDEN

4.3.0 Inleiding

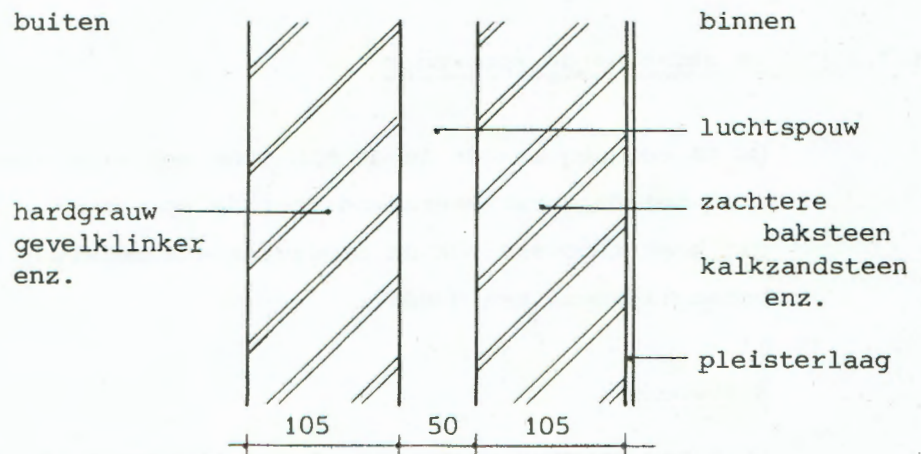
In dit gedeelte wordt de isolatie en het bijkomend vochttechnisch gedrag van buitenwanden besproken.

In eerste instantie kan een onderscheid worden gemaakt tussen nieuwbouw en renovatie of achteraf isoleren.

Een tweede onderscheid is te maken tussen wanden die geheel of gedeeltelijk in de fabriek zijn samengesteld en wanden die op de bouwplaats tot stand komen.

Verder is er een onderscheid in spouwconstructies, sandwich- en homogene constructies.

4.3.1 De traditionele spouwmuur



De spouw heeft (had) diverse functies:

- voorkomen van regendoorslag
- afvoer van door het buitenblad gedrongen water
- verhogen van de warmteweerstand
- droging van het buitenblad door ventilatie.

De afgelopen jaren is uit diverse onderzoeken (4) gebleken dat bij een normale spouwmuur, ventilatie van de spouw niet noodzakelijk is. Met name de laatstgenoemde functie blijkt niet belangrijk te zijn. Constructief kan baksteen best een hoeveelheid vocht verdragen (baksteen is vorstbestand) en verder geschiedt de droging van een nat geworden buitenblad voor ca. 95% door verdamping aan het buitenoppervlak en maar voor ca. 5% door de spouwventilatie.

Dit geldt vanzelfsprekend niet voor muren waarvan het buitenblad sterk dampremmend is uitgevoerd (bijvoorbeeld geglazuurde baksteen); daar blijft de spouw noodzakelijk voor het afvoeren van waterdamp.

Ook de warmteweerstand van een traditionele spouwmuur is lager dan op dit moment wenselijk wordt geacht.

De belangrijkste functie van de spouw blijft: het voorkomen van regendoorslag.

4.3.2 De geïsoleerde spouwmuur

Om te voldoen aan de in de NEN 1068 gestelde eisen met betrekking tot de warmteweerstand moet de spouwmuur worden geïsoleerd. Dit komt trouwens ook de oppervlaktetemperatuur en daardoor de behaaglijkheid ten goede.

Nieuwbouw

De meest eenvoudige manier om een spouwmuur te isoleren is het aanbrengen van isolatiemateriaal in de spouw. Dit kan op twee manieren gebeuren. De spouw kan geheel of gedeeltelijk met isolatiemateriaal worden gevuld. Wat het beste is, hangt onder meer af van het gebruikte materiaal.

Kunststofschuimplaten

Hierbij is slechts gedeeltelijke spouwvulling mogelijk. Een spouw (20 à 30 mm) blijft nodig om vochtdoorslag te voorkomen.

Bij volledige spouwvulling zouden de naden tussen de platen als vochtbruggen gaan werken. De platen kunnen tegen het binnenblad worden gelijmd, of door over de spouwankers geschoven klemschijven tegen het binnenblad worden aangedrukt. Ventilatie van de spouw is niet nodig. Wel dienen onderaan enkele stootvoegen open te blijven teneinde door het buitenblad gedrongen water de gelegenheid te geven af te vloeien.

Minerale wol

Bij isolatie met platen uit minerale wol kan de spouwmuur geheel worden gevuld. De vezelige randen van de platen grijpen goed in elkaar zodat geen vochttransport door naden kan ontstaan. Hoewel ze poreus zijn transporteren de platen zelf geen water omdat het materiaal waterafstotend is en omdat echte kanaaltjes ontbreken. Bij berekeningsproeven is gebleken dat de platen hoogstens tot een diepte van 5 mm vochtig worden.

Ook gedeeltelijke spouwvulling is mogelijk. Hierbij moeten echter bevestigingsmiddelen worden toegepast om de platen tegen het binnenspouwblad te drukken. Deze bevestigingsmiddelen kosten geld. Veelal is het zelfs goedkoper een dikkere plaat te nemen en de spouw dan maar geheel te vullen. Doordat de spouw geheel is gevuld is er geen gevaar voor vochtdoorslag ten gevolge van valspectie, bovendien is de isolatiewaarde hoger.

Uitzonderlijke gevallen

In sommige gevallen is het volledig vullen van de spouw niet mogelijk.

Dampremmend buitenblad

Wanneer het buitenblad sterk dampremmend is (geglazuurde steen, prefab beton) dient er een met buitenlucht geventileerde spouw te blijven bestaan teneinde van binnen naar buiten diffunderende waterdamp af te voeren. Zonder spouwventilatie vindt condensatie plaats op en in het buitenblad waardoor onder andere glazuur kan afvriezen.

Zeer poreus buitenblad

Bij een buitenblad uit poreus materiaal (bijvoorbeeld stenen uit lichtbeton) kan de regendoorslag zo groot zijn dat de isolatielaag ontoelaatbaar nat wordt en ook doorslaan van de gehele muur kan plaatsvinden. Een spouw blijft dus nodig. Deze behoeft echter niet te worden geventileerd.

Niet winddicht binnenspouwblad

Bij een binnenspouwblad uit schoon metselwerk, al of niet uit poreuze steen wordt in het algemeen het binnenblad aan de spouwzijde van een raaplaag voorzien. Deze laatste kan achterwege blijven indien een winddicht isolatiemateriaal wordt aangebracht. Dit kan bestaan uit platen van kunststofschuim of platen uit minerale wol die voorzien zijn van winddicht papier.

4.3.3 De achteraf geïsoleerde spouwmuur

Er zijn systemen ontwikkeld om bestaande spouwmuren alsnog te isoleren. Dit kan gebeuren met: kunststofschuim, minerale wolvlokken, korrels geëxpandeerd polystyreenschuim of perlite korrels. In alle gevallen gaat het om volledige spouwvulling. Wanneer rekening wordt gehouden met het feit dat de spouw plaatselijk toch niet geheel is gevuld en met de teruggang in de isolatiewaarde bij hevige regen, kunnen voor het maken van rendementsberekeningen de volgende warmteweerstanden voor de hiervoor beschreven spouwmuur (spouw 50 mm) worden aangehouden (5). Gegeven is de warmteweerstand van de constructie (R_C), dus zonder overgangsweerstanden.

kunststofschuim ureum formaldehyde	$R_C = 1,1-1,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
minerale wolvlokken	$R_C = 1,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
gebonden PS-schuim-parels	$R_C = \text{ca. } 1,2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$
gesiliconiseerde perlite	$R_C = 1,3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

Isolatie met UF-schuim

Bij deze veel toegepaste isolatiemethode wordt het ureum-formaldehyde schuim via in het buitenblad (in een voeg) geboorde gaten in de spouw aangebracht.

Een van de meest kritische punten is het samenstellen van het schuim. De verhouding van de componenten, de heersende temperatuur, de hardheid van het water, de zorgvuldigheid waarmee de apparatuur wordt schoongemaakt enz. oefenen een sterke invloed uit op de kwaliteit van het eindprodukt.

Bij regen loopt de warmteweerstand van de geïsoleerde muur vrij sterk terug, en het duurt geruime tijd voordat deze op zijn oude waarde terug is.

Verder staat nog niet vast in hoeverre de vrijkomende formaldehyde dampen, hetzij korte tijd na het aanbrengen of in een later stadium (het gebonden formaldehyde) schadelijk zijn voor de gezondheid. In het bijzonder bij mensen met bronchiale aandoeningen (bijvoorbeeld astma) kunnen zich problemen voordoen. Zorgvuldigheid is hierbij derhalve op zijn plaats.

Isolatie met minerale wolvlaken

Het aanbrengen is bij deze manier van isoleren wat meer ingrijpend. Er zijn vrij grote openingen nodig om de vlaken in te blazen, zodat hele stenen moeten worden verwijderd. Belangrijk hierbij is dat de juiste hoeveelheid openingen op de goede plaatsen wordt aangebracht teneinde volledige vulling van de spouw te bereiken.

Een voordeel is, dat het isolatiemateriaal in de fabriek vervaardigd wordt, waardoor een goede kwaliteitscontrole mogelijk is.

De teruggang in isolatiewaarde bij regen is betrekkelijk gering en duurt niet zo lang.

Isolatie met gebonden korrels van geëxpandeerd polystyreenschuim

Bij dit systeem wordt de muur gevuld met korrels van geëxpandeerd polystyreenschuim.

Aan de korrels wordt tijdens het vullen van de spouw een bindmiddel toegevoegd waardoor, na verdamping van het water, de schuimkorrels de mobiliteit verliezen en een homogene massa met elkaar vormen.

Voor het vullen worden in een bepaald patroon gaten van 20 mm geboord op de kruising tussen een stoot- en een lintvoeg. De rijen gaten worden verspringend aangebracht. In het onderste gedeelte van de muur is de onderlinge afstand van de gaten ca. 2 m, terwijl in de bovenste rij de gaten ca. 0,6 m uit elkaar komen.

Isolatie met gesiliconiseerde perlite

Perlite is een vermalen vulkanisch gesteente dat in speciale ovens wordt geëxpandeerd tot korrels met een grootte van 0 tot 4 mm. De voor spouwmuurvulling bestemde korrels worden besproeid met een laagje siliconen om ze waterafstotend te maken.

De korrels worden in de spouw geblazen. Er zijn echter minder openingen nodig dan bij minerale wolvlokken omdat door de kleine korrelafmetingen de stroom korrels zich gemakkelijk een weg zoekt in de spouw. Deze kleine korrelafmetingen maken het overigens wel noodzakelijk dat alle gaatjes en kieren (kozijnaansluitingen enz.) zorgvuldig worden gedicht, daar anders na verloop van tijd alle perlite is verdwenen. Open stootvoegen aan de onderzijde van het buitenblad blijven nodig, maar moeten bijvoorbeeld met fijn gaas worden afgedicht. Ook is het niet zonder meer mogelijk één huis in een rij te isoleren als de spouw doorloopt naar de burenen.

Het effect van regen is bij deze isolatie betrekkelijk gering.

Uitzonderlijke gevallen

Wat betreft dampremmend uitgevoerde of zeer poreuze buitenbladen geldt bij achteraf-isolatie hetzelfde als wat hiervoor is gezegd bij isolatie tijdens de bouw.

Criteria bij het beoordelen van achteraf-isolatie

Bij het maken van een keuze uit de aanwezige mogelijkheden voor het achteraf-isoleren van spouwmuren moeten de volgende vragen worden gesteld.

- wat is de praktische warmteweerstand?
- hoe is de duurzaamheid i.v.m. vocht?
- wat is het effect van kleine fouten, gemaakt tijdens de uitvoering?
- hoe betrouwbaar is de kwaliteitscontrole (vindt deze in een fabriek plaats of op de bouw)?
- hoe wordt de isolatie aangebracht?
- hoe verhouden zich de kosten van het aanbrengen tot de te bereiken besparing, en hoe is in verband hiermee de duurzaamheid van de isolatie, geeft deze over 10 jaar nog dezelfde besparing?

Isolatie van een spouwmuur aan binnen- of buitenzijde

Wanneer vulling van de spouw niet mogelijk is kan een spouwmuur ook aan de binnen- of buitenzijde worden geïsoleerd. De mogelijkheden hiertoe zijn dezelfde als aangegeven bij de isolatie van homogene wanden.

4.3.4 Andere spouwconstructies uit steenachtig materiaal

Hiervóór is de traditionele spouwmuur behandeld die is opgebouwd uit twee gemetselde spouwbladen. Veelal bestaat tegenwoordig het binnenblad uit beton (gietbeton, prefab). Zolang het buitenblad ook steenachtig is, bijvoorbeeld metselwerk, kunnen deze wanden precies eender worden behandeld als de traditionele spouwmuur, met dezelfde beperkingen voor zeer poreuze of sterk dampremmende buitenbladen.

4.3.5 Spouwconstructies uit lichte materialen

In eerste instantie geldt weer dat bij een sterk dampremmend buitenblad (kunststofpanelen, staalplaat enz.) ventilatie van de spouw een noodzaak is.

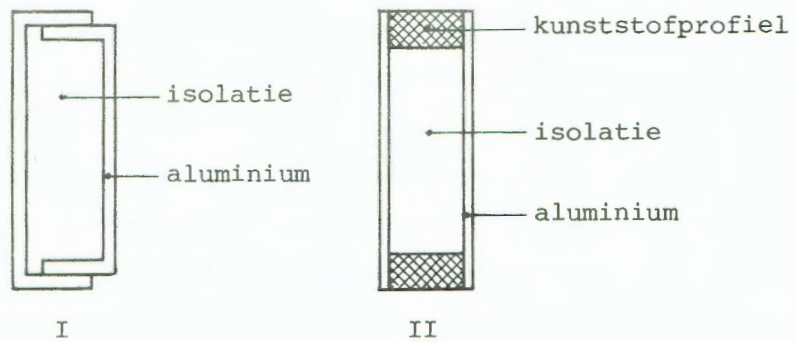
Bij een houten buitenbekleding is spouwventilatie niet altijd nodig als het binnenspouwblad goed dampdicht wordt uitgevoerd ($\mu.d = 5$ m bij klimaatklasse II, $\mu.d = 25$ m bij klimaatklasse III).

Het spreekt vanzelf dat de houten bekleding niet dampdicht (verf enz.) mag worden afgewerkt. Bij een bekleding met houten delen is overigens veelal door de naden reeds een geringe ventilatie aanwezig.

Lichte gevelbekledingen lenen zich vaak goed voor het toepassen van een geringe spouwventilatie. Hiermee kan altijd een veilige constructie worden verkregen.

4.3.6 Sandwichpanelen

Buitenwanden kunnen ook worden uitgevoerd als sandwichpaneel. Meestal bestaan de buitenste lagen uit dichte of sterk dampremmende materialen zoals, aluminium, beton, kunststof, asbest-cement enz.). Bij aluminium doosconstructies is de manier waarop de randverbinding is opgelost erg belangrijk.



In geval I vormt de rand (doorgaand aluminium) een ernstige koudebrug die de isolatiewaarde sterk vermindert en langs de randen grote kans op oppervlaktecondensatie geeft. Beter is een randconstructie volgens het principe van II waarbij de twee aluminium platen thermisch zijn gescheiden door een kunststofprofiel.

Als isolatiemateriaal wordt in deze panelen veelal poly-urethaanschuim gebruikt.

Wat betreft inwendige condensatie is er bij aluminium sandwichpanelen geen probleem omdat de aluminiumplaat als volledig dampdicht mag worden beschouwd.

Betonnen sandwichpanelen komen ook veel voor. Een probleem hierbij vormt de randoplossing. Beide zijden mogen namelijk niet star met elkaar worden verbonden.

Het binnenste paneel heeft een vrij constante temperatuur, het buitenste staat bloot aan zonbestraling en winterse koude, zodat grote verschillen in lengteverandering tussen binnen- en buitenkant optreden. De verschillende fabrikanten hebben dit op verschillende wijze opgelost.

Bij een zeer vochtige atmosfeer (klimaatklasse IV) bestaat er kans op ontoelaatbare inwendige condensatie, verder kunnen deze panelen zonder meer worden toegepast. Een waarde voor de warmteweerstand is in het algemeen niet te geven, daar de wijze waarop de randoplossing is uitgevoerd grote invloed (koudebrug) kan hebben op het warmtetransport.

Kunststofpanelen geven ook weinig problemen. Het materiaal is sterk dampremmend en de randconstructies geven geen aanleiding tot koudebruggen.

Panelen met asbestcementplaten (meestal alleen gebruikt als puivulling) geven geen problemen als voor de isolatie een geslotencellig kunststofschuim met hoge dampweerstand is gebruikt. Bij isolatie met bijvoorbeeld kurk moet bij vochtiger ruimten voorzichtigheid worden betracht omdat de asbestcementplaat aan de binnenzijde niet dampdicht genoeg is ten opzichte van de laag aan de buitenzijde.

Constructies met lichte sandwichpanelen geven natuurlijk weinig warmteaccumulatie. Het is derhalve verstandig ter compensatie de isolatiewaarde niet te klein te kiezen.

4.3.7 Homogene wanden

Hierbij kan men denken aan enkelvoudige betonwanden, 1-steens of 1½-steens metselwerk enz. Wat betreft de vochthuishouding geven deze wanden geen problemen. Bij oud metselwerk kan echter wel vochtdoorslag door regen optreden. Het is mogelijk de muren aan de buitenzijde met een waterafstotend middel te behandelen. Zo'n middel moet waterafstotend zijn en mag niet dampdicht zijn. Bij een dampdichte afwerking van de buitenkant ontstaat een sterke inwendige condensatie van van binnen naar buiten diffunderende waterdamp. Zulke middelen bestaan. Een nadeel is dat ze regelmatig opnieuw moeten worden opgebracht wat een vergroting van het onderhoud betekent.

Het effect van vochtdoorslag kan ook worden weggenomen door de hierna genoemde methoden van isolatie van homogene wanden.

Een enkelvoudige steenachtige wand heeft vanzelfsprekend geen hoge warmteweerstand. Om te voldoen aan de gestelde eisen zal zo'n wand moeten worden geïsoleerd. De oplossingen voor isolatie zijn bij nieuwbouw en renovatie vrijwel gelijk en worden hier niet apart behandeld.

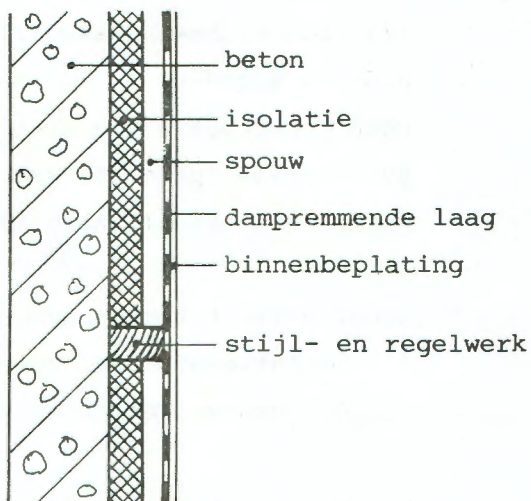
In principe verdient isolatie aan de buitenzijde de voorkeur. De massa van de muur kan dienst blijven doen voor warmteaccumulatie en ook de vochthuishouding geeft de minste problemen als de buitenzijde tenminste niet dampdicht wordt afgewerkt (dan is een spouw nodig).

Isolatie aan de buitenzijde komt meestal neer op een spouwconstructie, zie hiervoor bij spouwconstructies.

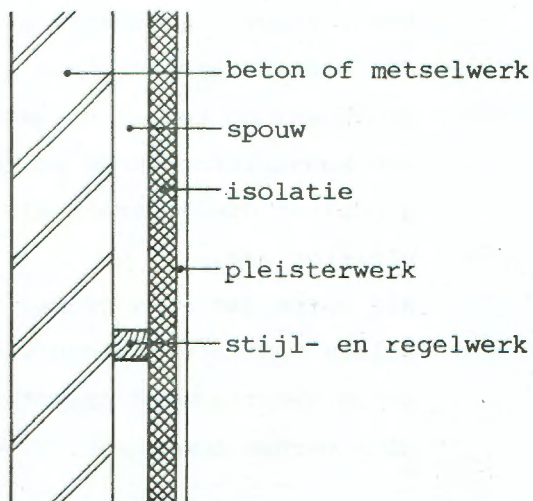
Er zijn systemen ontwikkeld om rechtstreeks op de buitenwand isolatieplaten te hechten die afgewerkt worden met een pleisterlaag. Deze systemen vinden in Nederland echter nog weinig toepassing.

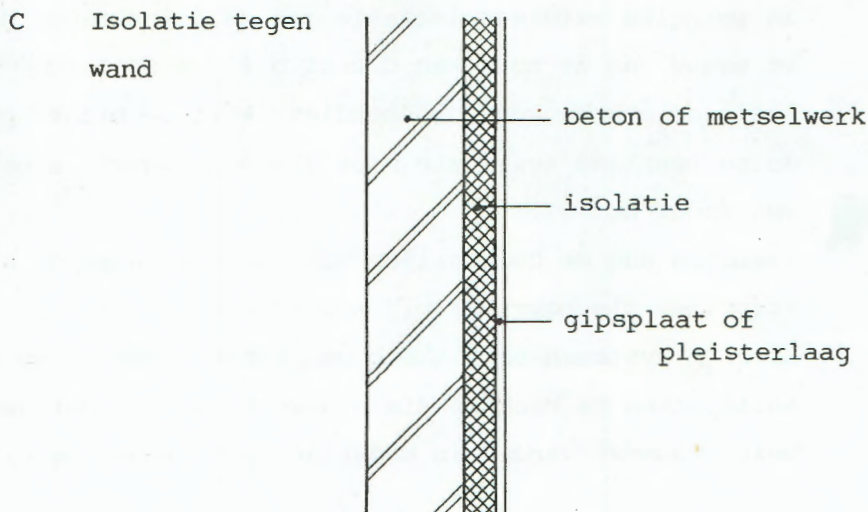
Soms blijft alleen de mogelijkheid over van isolatie aan de binnenzijde. Hierin kunnen drie methoden worden onderscheiden.

A isolatie tegen wand;
beplating op stijl- en regelwerk



B Isolatie op stijl- en regelwerk





Constructie A kan worden toegepast bij klimaatklasse I, II en III. Bij klimaatklasse III echter is een dampremmende laag met $\mu.d > 5$ m nodig.

Deze constructie kan niet worden toegepast bij wanden waar re-gendoorslag optreedt. Voor het isolatiemateriaal kan een keuze worden gemaakt uit alle ter beschikking staande soorten.

Constructie B kan worden toegepast bij klimaatklasse I en II. Als isolatiemateriaal komen houtwolcementplaten of sandwichplaten van houtwolcement en kunststofschuim in aanmerking.

Constructie C kan worden toegepast bij klimaatconditie I, II en III. Als isolatiemateriaal kunnen platen van kunststofschuim, geschuimd glas of houtwolcement (eventueel met kunststofschuim kern) worden toegepast. Sinds kort zijn er platen op de markt die bestaan uit een laag kunststofschuim (polystyreen, polyurethaan) op een gipsplaat. Deze platen kunnen rechtstreeks met een kunststofhoudende mortel tegen de muur worden bevestigd. De gipsplaat dient direct als afwerking of als drager voor een pleisterlaag.

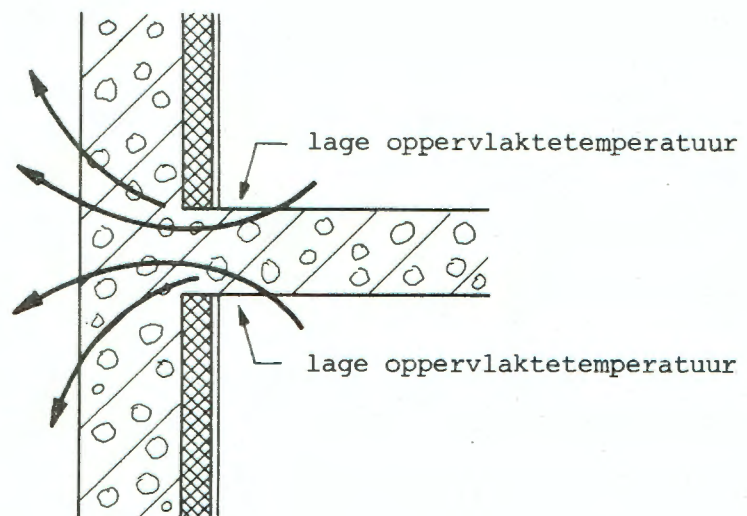
Bij muren die niet geheel vrij zijn van vochtdoorslag kunnen alleen platen van tegen water bestand kunststofschuim (bijvoorbeeld geëxtrudeerd polystyreenschuim) of platen van geschuimd glas worden toegepast.

Bij isolatie aan de binnenzijde met kunststofschuim dient men terdege rekening te houden met het gedrag bij brand. Bij veel schuimen komen bij verhitting giftige dampen vrij. Ook de rookontwikkeling kan dermate sterk zijn dat blus- en reddingswerk daardoor worden bemoeilijkt. Dit soort materiaal dient dus zorgvuldig te worden afgewerkt met gipsplaten waarvan de naden goed zijn gedicht, of door een pleisterlaag.

Verder kan nog worden opgemerkt dat deze methode van isoleren ook bij spouwmuren kan worden toegepast.

Bij isolatie aan de binnenzijde gaat de warmte-accumulerende werking van de wand verloren. Dit is niet zo erg als binnenwanden en vloeren voldoende massa vertegenwoordigen en voor zover deze niet zijn bedekt door zware tapijten of sterk isolerende (kunststof) wandbekleding.

Verder kunnen op de wand aansluitende vloeren en daken nu koudebruggen gaan vormen waarbij door de lage oppervlaktetemperaturen condensatie kan optreden (zie 1.12).



Homogene wanden van lichtbeton

Homogene wanden van lichtbeton ($\lambda = 0,45$ tot $0,65$ W/m.K) kunnen bij voldoende dikte een redelijke warmteweerstand bezitten.

De vochthuishouding geeft geen problemen omdat de waterdamp ongehinderd naar buiten kan diffunderen. Het beton dient wel vorstbestand te zijn, daar door regen aan de buitenzijde een laag met water kan worden verzadigd.

4.4 DAKEN

4.4.0 Inleiding

In dit gedeelte wordt de isolatie van, en de vochthuishouding in daken besproken.

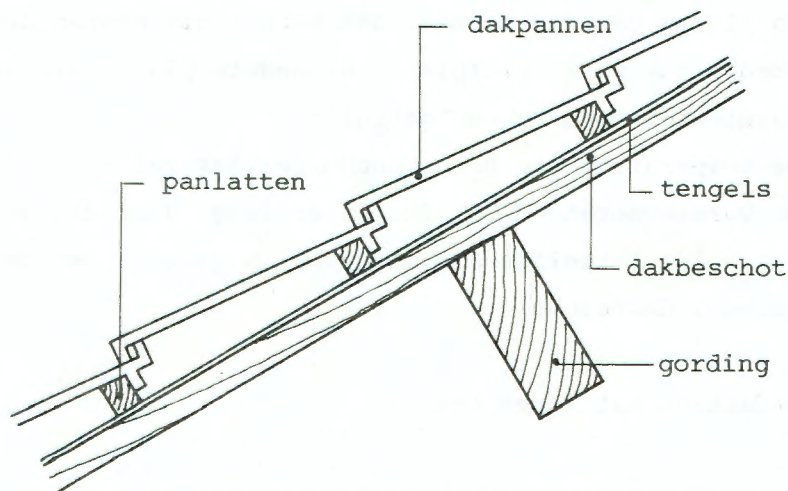
Er is onderscheid te maken in hellende daken en platte of flauw hellende daken en tussen koud-dakconstructies, warm-dakconstructies en bijzondere constructies zoals het omgekeerde dak. Verder heeft ook de gebruikte soort materiaal invloed op de werking van de constructie.

Er wordt geen onderscheid gemaakt tussen isolatie tijdens de bouw en achteraf omdat dit in de uitvoering weinig verschil geeft.

4.4.1 Hellende daken

Ongeïsoleerd dak

Bekleding met pannen, leien enz.



Een traditioneel dak is veel opgebouwd uit dakbeschoot, bevestigd op gordingen met daarop tengels, panlatten en dakpannen.

Ook worden bedekkingen door leien en andere materialen toegepast.

In de getekende vorm is er wat betreft de vochthuishouding geen enkel probleem te verwachten. Onder de pannen vindt ventilatie plaats. Vaak wordt hiervoor zelfs een speciale ventilatiepan toegepast. Hierdoor wordt door het dakbeschot diffunderende waterdamp ogenblikkelijk afgevoerd.

Bij wat vochtiger ruimten kan bij erg lage buitentemperaturen de oppervlaktetemperatuur van het dakbeschot zo laag worden dat condensatie op en in het hout plaatsvindt.

Zodra de temperatuur echter weer enigszins stijgt wordt dit vocht weer verdampt zodat geen schade optreedt. Boven erg vochtige ruimten kunnen echter wel problemen optreden.

Om binnendringen van eventueel door de pannen gekomen water te verhinderen wordt wel een kunststoffolie over het dakbeschot gespannen. Zeer belangrijk is hierbij dat de folie in betrekkelijk smalle, elkaar overlappende stroken wordt gelegd of dat er op andere wijze in wordt voorzien dat de folie geen dampremmende werking heeft. Dit zou namelijk optreden van condens onder de folie veroorzaken. Bij goede pannen is zo'n waterkerende laag echter zelden noodzakelijk.

In plaats van een normaal dakbeschot uit houten delen of triplex worden ook vaak vezelplaten of andere platen die een wat hogere warmteweerstand hebben gebruikt.

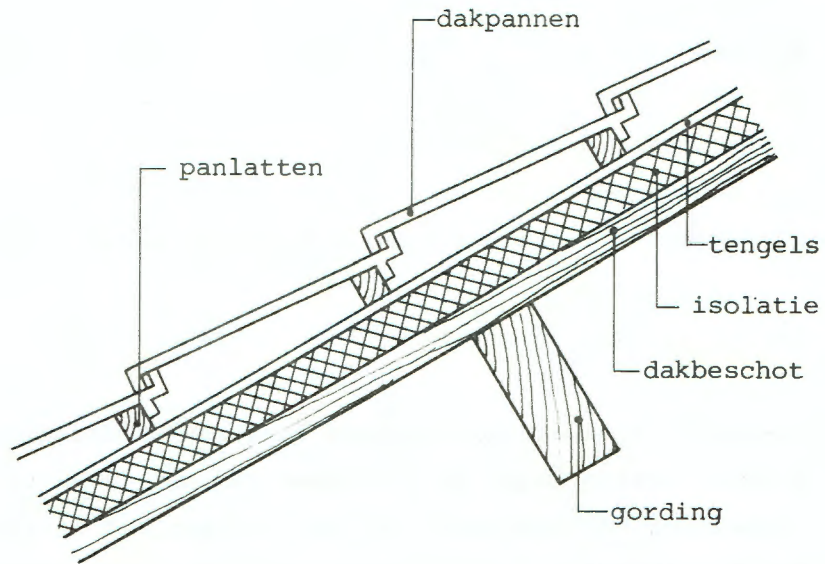
De temperatuur van het binnenoppervlak zal hierbij hoger liggen. De warmteweerstand blijft echter laag. Voor dit soort materialen geldt hetzelfde als hiervoor is gesteld met betrekking tot normaal dakbeschot.

Bedekking met koper enz.

Wanneer het dakbeschot wordt afgedekt met koperplaat of een ander dampdicht materiaal, dan zal dit condens tussen dakbeschot en koper tot gevolg hebben. Zo'n dak kan dus niet worden toegepast boven ruimten waar een hoge vochtproduktie plaatsvindt. De ruimte onder het dak (zolder, verlaagd plafond) moet met buitenlucht worden geventileerd.

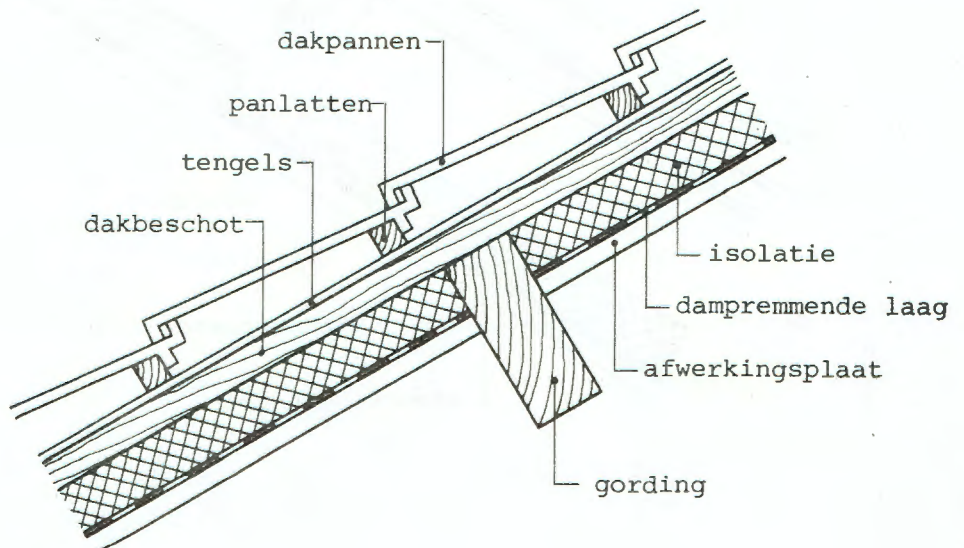
Geïsoleerd dak

Isolatie op het dakbeschot



Isolatie aan de buitenzijde verdient de voorkeur. Het dakbeschot blijft nu zo warm dat inwendige condensatie uitgesloten is. Voorwaarde is wel dat de isolatie niet dampremmend wordt afgewerkt. Naar buiten diffunderende waterdamp wordt door de ventilatie onder de pannen afgevoerd. Als isolatiemateriaal zijn platen van minerale wol zeer goed bruikbaar, maar ook andere materialen komen in aanmerking.

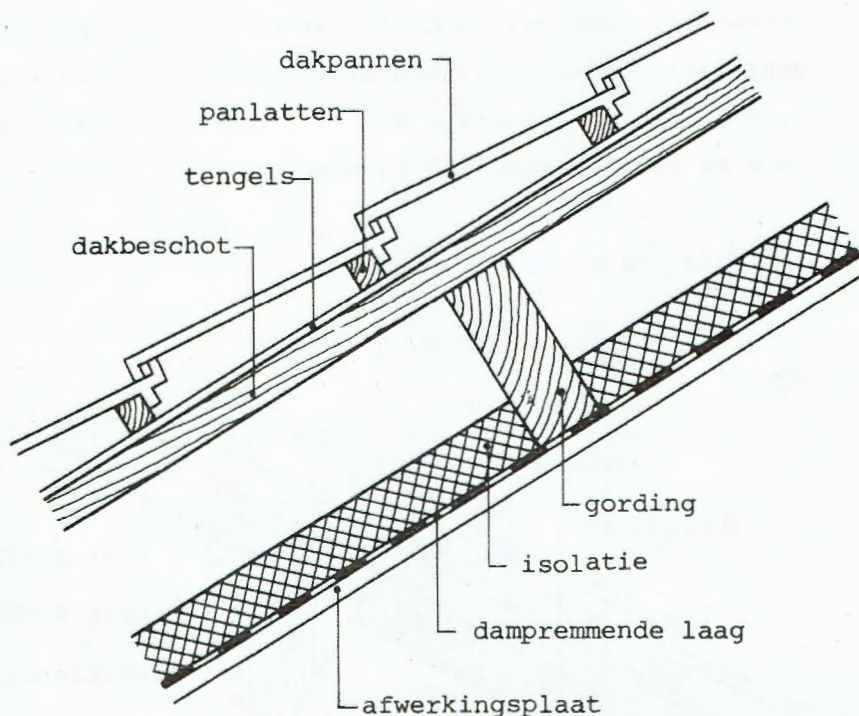
Isolatie onder het dakbeschot



Omdat de isolatie nu aan de binnenzijde zit kan inwendige condensatie in het dakbeschot (tussen dakbeschot en isolatie) ontstaan. Hoewel door de ventilatie onder de pannen het dakbeschot een goede gelegenheid heeft te drogen moet toch de hoeveelheid diffunderend vocht worden beperkt door het aanbrengen van een dampremmende laag tussen afwerking en isolatiemateriaal. Tenminste voor zover er van enige dampproductie in de ruimte onder het dak aanwezig is, en deze ruimte niet wordt geventileerd. Alle soorten isolatiemateriaal komen in aanmerking

Isolatie onder de gordingen

Hier is een goede dampremmende laag een noodzaak om schadelijke condensvorming tegen de onderkant van het 's winters zeer koude dakbeschot te voorkomen. Bij twijfel aan het realiseren van een goede dampremming kan de spouwruimte met buitenlucht worden geventileerd. Ook hier kan met alle gebruikelijke isolatiematerialen een goed resultaat worden bereikt.



Deze situatie verschilt sterk van de overeenkomstige bij een plat dak omdat daar het dakbeschot dampdicht is afgewerkt door de dakbedekking, zodat ventilatie daar altijd noodzakelijk is.

Dak met dampremmende afdekking (koper, bitumenweefsels enz.)

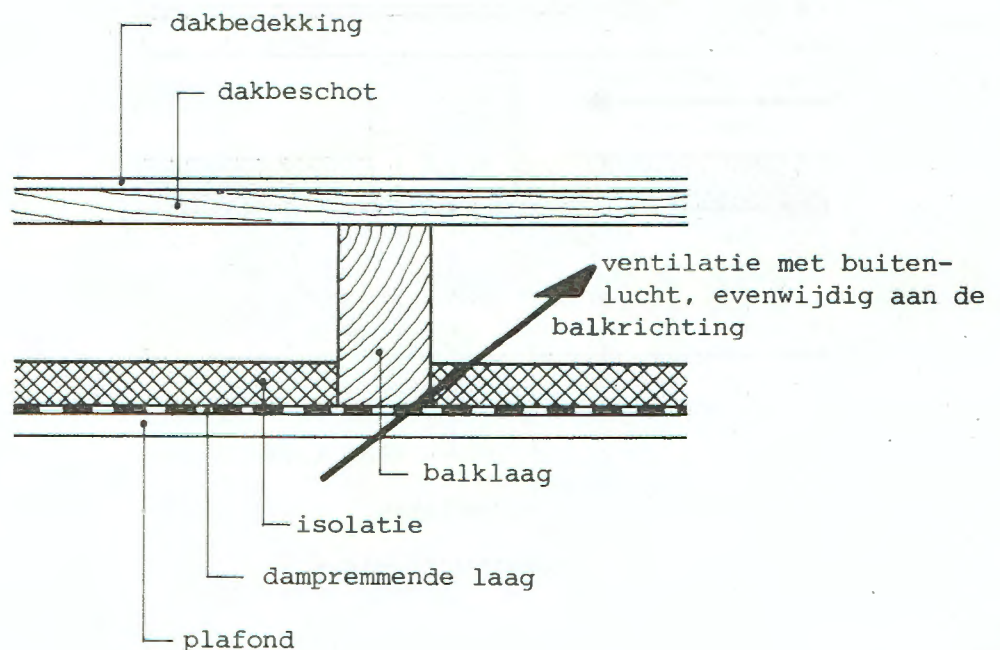
De behandeling van dit soort daken verschilt niet wezenlijk van die bij de overeenkomstige gevallen bij platte daken.

4.4.2 Platte daken

Koud dak

Een koud dak is een constructie waarbij tussen het eigenlijke dak (de waterdichte en winddichte laag) en de isolatielaag wordt geventileerd met buitenlucht teneinde door de onderliggende constructie diffunderende waterdamp af te voeren, waarmee inwendige condensatie (of oppervlaktecondensatie tegen de onderkant van de dakhuid) wordt voorkomen.

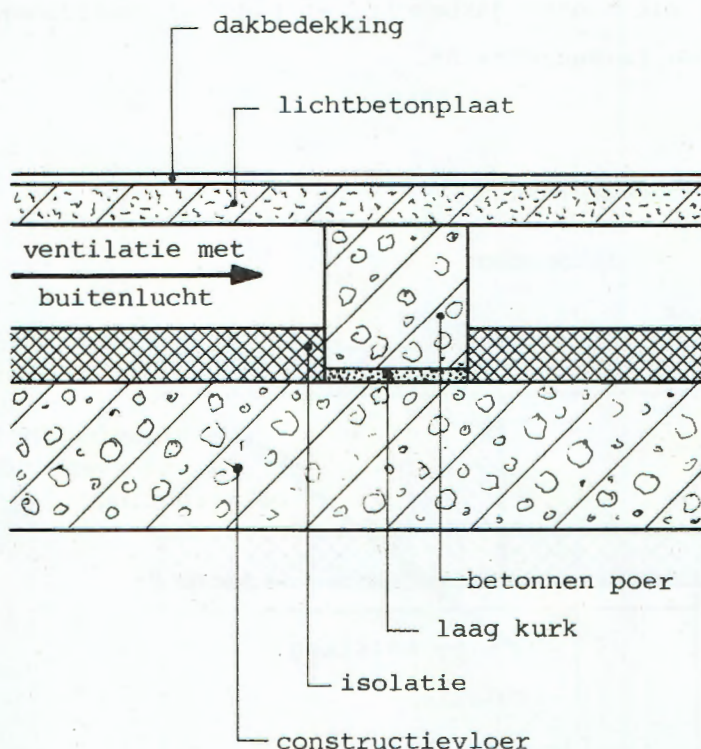
Een veel voorkomende constructie is bijvoorbeeld de houten balklaag met houten dakbeschot en plafond waartussen een isolatiedeken is aangebracht.



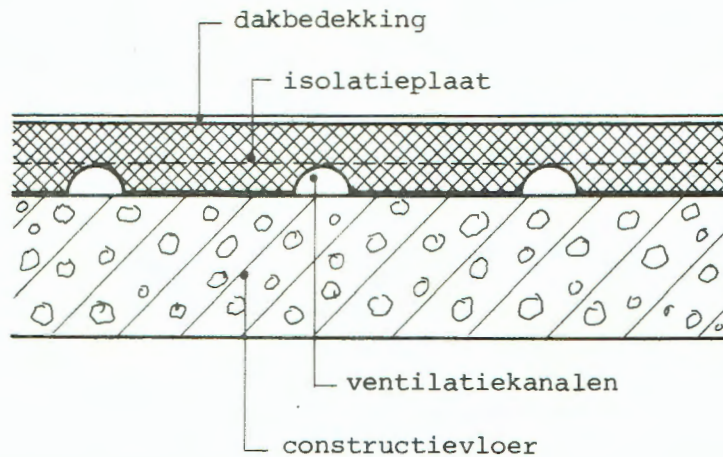
Afhankelijk van het materiaal van het dakbeschot en de conditie van de binnenlucht worden eisen gesteld aan de ventilatieopeningen, variërende van 3 cm^2 tot 25 cm^2 per m^1 dakrand. De ventilatie moet evenwijdig aan de balkrichting en tussen ieder stel balken geschieden. Bij daken breder dan 10 m moeten andere voorzieningen worden getroffen. Wanneer ventilatie via pijpjes in de dakrand niet mogelijk is kan eventueel via ontluhtingskapjes worden geventileerd.

Het doorstroomoppervlak moet dan echter worden vergroot en er is een zeer groot aantal kapjes nodig. Zie verder ook boeken als (2), (3) en (4). De dampremmende laag moet een $\mu.d$ -waarde van minimaal 5 m hebben. Principeel maakt het weinig verschil of het dakbeschot van hout, gebonden vezels, staal of beton is. Hetzelfde geldt voor het plafond en de draagconstructie.

Onderstaande betonconstructie verschilt niet wezenlijk van de hiervoor behandelde houtconstructie, alleen kan door de grote dampweerstand van de betonplaat de dampremmende laag veelal achterwege blijven.



Dak met ribbenplaten



Dit dak is feitelijk een tussenvorm van een warm en een koud dak. Een voordeel is dat de constructie eenvoudiger is dan bij een koud dak (en daardoor ook goedkoper). De platen worden veelal gevormd uit met cement of kunststof gebonden organische vezels of andere isolerende materialen.

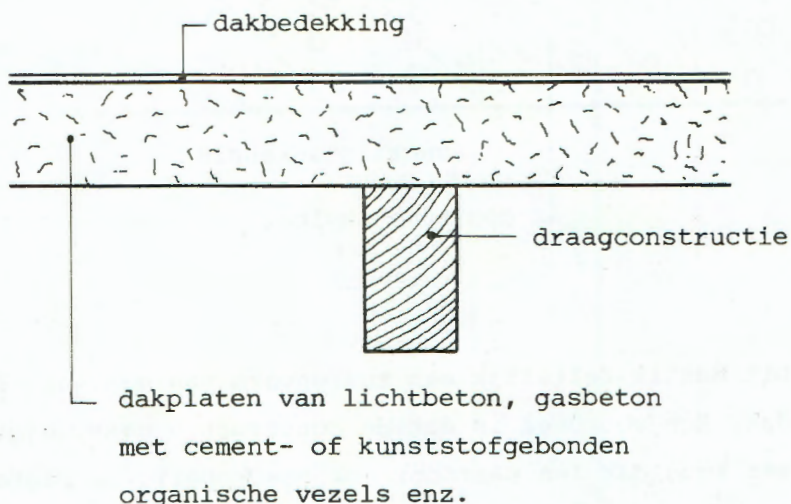
De kanalen worden geventileerd om bouwvocht (wat in deze platen in grote hoeveelheden aanwezig kan zijn; nat worden op dak) en diffunderend woonvocht af te voeren.

Omdat de ventilatie onder (in) de isolatie plaatsvindt kan niet worden gesproken van een echt koud dak. De ventilatie moet plaatsvinden door pijpjes in de dakrand met een onderlinge afstand van hooguit één meter en een diameter van ca. 20 mm. Van ventilatiekapjes op het dak mag geen voldoende effect worden verwacht. Bij erg vochtige binnencondities is een extra dampremmende laag vereist. Bij klimaatklasse I en II vertegenwoordigt de beton een voldoende dampdiffusieweerstand.

In het algemeen kan worden gezegd dat een "koud dak" constructie (en, zij het in iets mindere mate, een dak met ribbenplaten), bij een goed gekozen ventilatie een veilige dakconstructie is. In de zomer bestaat nog het voordeel van afvoer van warmte door de ventilatielucht, waarbij de eigenlijke dakhuid een soort warmteschild vormt.

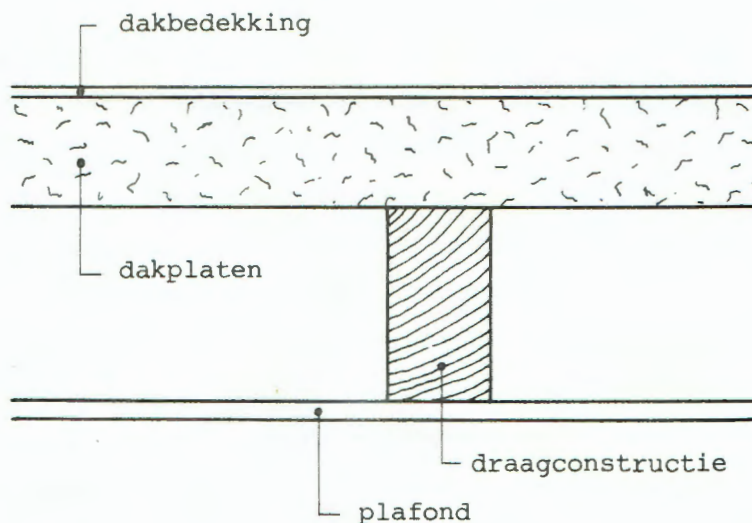
Warm dak

Hoewel het principe van een warm dak steeds hetzelfde is moet er onderscheid worden gemaakt met betrekking tot de materialen waaruit dakplaten en isolatielaag zijn opgebouwd.



Een dak kan worden samengesteld uit platen die zelf "voldoende" warmteweerstand hebben.

Zo ontstaat een zeer eenvoudige (goedkope) constructie. De warmteweerstand blijft overigens vaak wel aan de magere kant. Bij berekening blijkt dat onder de dakbedekking stellig inwendige condensatie op zal treden. Ook de hoeveelheden condensvocht kunnen vrij groot zijn. Toch kan een dergelijke constructie meestal zonder bezwaar worden toegepast (zij het niet voor ruimten met klimaatklasse IV). Dit berust op het feit dat onder invloed van de zwaartekracht en van capillaire werking het water dat zich onder de dakhuid verzamelt naar het oppervlak zakt waar herverdamping plaatsvindt.



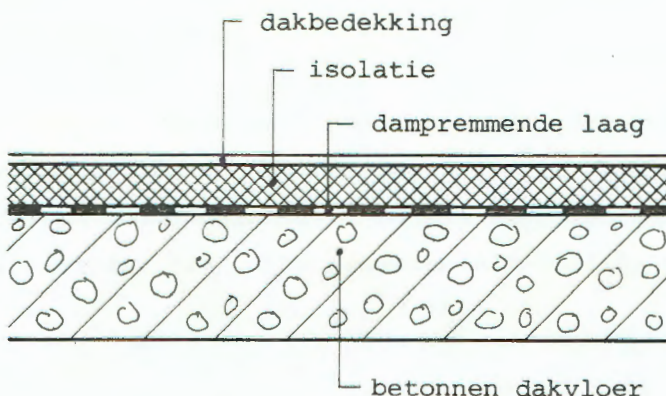
Bij aanwezigheid van een (verlaagd) plafond wordt de situatie moeilijker. Algemeen wordt aangenomen dat bij plafonds met een geringe warmteweerstand (gipsplaat, stucwerk) toepassing van deze constructie geen gevaar oplevert.

Bij plafonds met grote warmteweerstand (akoestische tegels uit minerale wol) is de beste oplossing op de dakplaten een extra isolatielaag aan te brengen (op een dampremmende laag). Hierbij moet de warmteweerstand van de isolatielaag zo worden gekozen dat er geen inwendige condensatie onder de dampremmende laag op kan treden.

Een tweede mogelijkheid is het plafond als raster uit te voeren of zodanig vrij te houden van de wanden of te voorzien van openingen dat in de ruimte tussen plafond en dakplaat dezelfde (binnen)luchtconditie heerst als in het vertrek.

Veelal zal echter om aan de gewenste warmteweerstand te voldoen een extra isolatielaag onontkoombaar zijn.

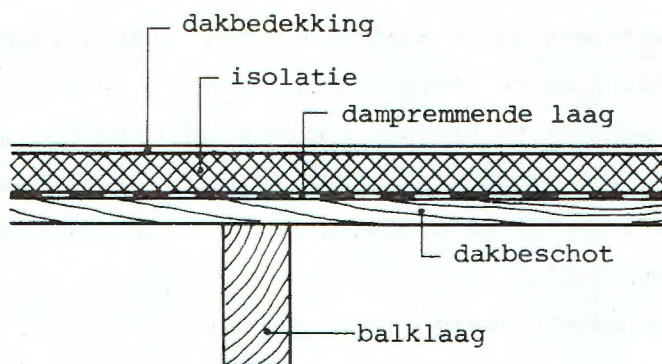
Betondak



Bij dit type dak (betonnen dakvloer) is bij klimaatklasse I en II de betonlaag als voldoende dampdicht te beschouwen.

Bij klimaatklasse III moet de som van de $\mu.d$ -waarde van de constructie zonder dakbedekking groter zijn dan 5 m. Bij klimaatklasse IV is dat 25 m. Deze waarden kunnen worden bereikt door toepassing van een dampremmende laag of van isolatiemateriaal dat zelf sterk dampremmend is. In dit laatste geval moet wel zeer veel aandacht worden besteed aan een goede afdichting van de naden. Bij berekening moet aangetoond kunnen worden dat er geen inwendige condensatie onder de dampremmende laag optreedt. In het algemeen is dit het geval als het dauwpunt (de dauwpuntstemperatuur) van de binnenlucht boven de dampremmende laag ligt, is dit niet het geval, dat is de isolatielaag te dun.

Houten dak



Een warm dak met houten dakbeschot (of houtachtig plaatmateriaal) kan niet worden toegepast bij de vochtigste binnenklimaten.

Bij klimaatklasse III moet de dampremmende laag een $\mu.d$ -waarde van minimaal 5 m hebben.

Stalen dak

Bij een dak van staalplaat kan deze plaat zelf dienen als dampremmende laag, mits de naden tussen de platen zorgvuldig worden afdicht en er geen lekken door mechanische bevestiging van dakplaten of isolatie aanwezig zijn. Bij twijfel hierover of

bij zeer zware klimaatcondities dient een extra dampremmende laag op de dakplaten te worden aangebracht, zodat de gebruikelijke dampdiffusieweerstand voor dakconstructies zonder de dakbedekking ontstaat. Ook kan met vrucht gebruik worden gemaakt van een absoluut dampdicht isolatiemateriaal, maar dat geldt voor alle warmdakconstructies.

4.4.3 Verlaagde plafonds

Verlaagde plafonds en met name akoestische plafonds kunnen een behoorlijk grote warmteweerstand hebben. Hierdoor wordt de vochthuishouding in het dak ernstig beïnvloed. Zie ook 3.4 "Oppervlaktecondensatie in constructies".

De isolatie op het dak moet aan de warmteweerstand van het verlaagde plafond worden aangepast.

4.4.4 Invloed van het soort isolatiemateriaal

Alle soorten isolatiemateriaal kunnen in warme daken worden toegepast: geschuimd glas, kunststofschuimplaten, geëxpandeerde kurkplaten, geëxpandeerde perlite, minerale wol (stijf geperst), gebonden organische vezels enz.

Geschuimd glas

Geschuimd glas heeft het voordeel dat het vrijwel absoluut dampdicht is als de naden tussen de platen met bitumen zijn gevuld tijdens het plakken van de platen. Omdat het materiaal bros is verlangt het een goede vlakke ondergrond. Het heeft echter ook een grote stijfheid waarvan bijvoorbeeld bij plakken van deze platen op een stalen dak (wat goed mogelijk mogelijk is) een gunstige werking op de stijfheid van het dakvlak uitgaat. Door de dampdichtheid is een dampremmende laag altijd overbodig, waardoor dit vrij prijzige materiaal toch zeker kan worden toegepast. De geringe warmteuitzettingscoëfficiënt is gunstig met betrekking tot de levensduur van de dakbedekking en een geheel geplakte dakbedekking behoort hierdoor ook tot de mogelijkheden.

Kunststofschuimplaten

Vooral de geslotencellige polystyreen en polyurethaanschuimen kunnen een vrij grote dampweerstand hebben, zodat in sommige gevallen van een dampremmende laag kan worden afgezien. Vooral bij polystyreenschuim kan de grote warmteuitzettingscoëfficiënt tot problemen met de dakbedekking aanleiding geven (zie ook 2.5 "Temperatuurspanningen"). De dakbedekking dient dan ook ter plaatse van de plaatnaden niet te worden geplakt. Hiervoor kunnen losse stroken dakbedekking over de naden worden gelegd. Dit geldt trouwens ook voor andere materialen als de plaatafmetingen groter worden. Kunststofschuimplaten kunnen weinig vocht bufferen, zodat een goede dampremming steeds noodzakelijk is.

Geëxpandeerde kurk, perlite, minerale wol, gebonden organische vezels enz.

Deze materialen zijn alle meer poreus en hebben een geringe dampweerstand. In vrijwel alle gevallen zal dan ook een dampremmende laag moeten worden toegepast. Door de grotere porositeit kunnen ze meer vocht opnemen (bufferen) voordat hinderlijke effecten optreden (zie ook hierna "Blazen in de dakbedekking").

Los gestorte isolatiematerialen

Hiervoor worden gebitumineerde perlitekorrels of polystyreenkorrels gebruikt die na verdichting een homogene laag vormen. Ook gebruikt men wel polystyreenkorrels als toeslagstof in een afwerkvloer. Voor deze materialen geldt hetzelfde als voor de andere poreuze materialen met geringe dampweerstand.

De schadelijke invloed van temperatuurspanningen ter plaatse van plaatnaden is hier natuurlijk niet aanwezig.

Bij een cementafwerkvloer met een toeslag van polystyreenkorrels is er wel het probleem van bouwvocht dat moet worden afgevoerd (water voor de verharding en de verwerking van de specie) dat niet altijd goed is op te lossen.

Ontluchtingskapjes zonder een bijbehorend kanalenstelsel hebben weinig effect.

4.4.5 De dampremmende laag

Polyetheenfolie is al verkrijgbaar in diktes van 0,02 mm. Vaak zou men theoretisch al met een zeer dunne folie kunnen volstaan. Het is echter verstandig geen al te dunne folies (minimaal 0,1 mm) toe te passen daar deze zeer kwetsbaar zijn, zodat het heel moeilijk is verzekerd te zijn van een goede uitvoering. Bovendien zijn erg dunne folies vaak statisch geladen en daardoor praktisch niet te verwerken.

De kosten maken niet zoveel verschil.

Het aanbrengen is doorgaans duurder dan het materiaal.

Hieronder volgen nog de $\mu.d$ -waarden van enige dampremmende lagen (zie ook 5.3).

materiaal	$\mu.d$ (m)
eenzijdig gebitumineerd	0,7
polyesterfolie (0,1 mm)	1,3
p.v.c. folie (0,1 mm)	1-10
polystyreenfolie (0,1 mm)	4,2
polytheenfolie (0,1 mm)	5-10
aluminiumfolie (0,06 mm) eenzijdig met kunststof gecacheerd	100

4.4.6 Nat worden van de isolatie

Bij alle poreuze (wateropnemende) isolatiematerialen moet ernstig nat worden tijdens de bouw worden voorkomen. Na voltooiing van het dak zit dit bouwvocht namelijk opgesloten tussen twee dampremmende lagen (dakheid en bijvoorbeeld betonvloer) waardoor het zeer lang kan duren voor het door duffisie is verdwenen. Grof bezande of anderszins "ventilerende" lagen dakleer hebben weinig waarde als afvoermogelijkheid voor bouwvocht. Daarvoor is de stromingsweerstand van de kanaaltjes te groot. Ze zijn echter wel geschikt (en als zodanig ook ontworpen) als dampdrukverdelende laag, waardoor plaatselijke hoge dampspanningen over een groter oppervlak worden geëgaliseerd zodat bijvoorbeeld blazen op het dak worden voorkomen (zie ook hierna).

4.4.7 Blaasvorming op daken

Het is bekend dat op daken blazen kunnen ontstaan wanneer de buitenluchttemperatuur nog laag is terwijl de zon reeds behoorlijke kracht heeft. De narigheid ten gevolge van blazen op dakconstructies vormt nog altijd één van de grootste schadeposten in de bouw.

Over het ontstaan van blazen bestaan verschillende theorieën waarvan de juistheid momenteel nog ter discussie staat.

Het zou kunnen zijn dat naar de ontstaansvorm verschillende typen blazen moeten worden onderscheiden.

Blazen die ontstaan tussen twee lagen dakleer

Beschouw een dakconstructie afgedekt met twee lagen dakleer, waarbij op een bepaalde plaats geen goede hechting tussen de beide lagen is verkregen. Onder invloed van zonbestraling zal de lucht die zich tussen beide lagen bevindt op de plaats waar geen hechting aanwezig is worden opgewarmd. Tengevolge hiervan zal de lucht willen uitzetten en de druk toenemen.

Aangezien de bovenste laag dakleer plaatselijk beduidend warmer zal kunnen worden en daardoor zachter (tussen beide lagen dakleer bevindt zich nog het goed isolerende laagje lucht!) zal het dakleer de ontstane overdruk niet kunnen weerstaan en omhoog worden gedrukt. Het begin van een blaas is hiermee gevormd. Wanneer er geen zonbestraling meer plaatsvindt koelt het dakleer snel af tot de buitenluchttemperatuur, waardoor het week geworden dakleer snel minder elastisch wordt. In de pril gevormde blaas zal nu door de weer lagere temperatuur een onderdruk heersen en om het evenwicht te herstellen zal 's nachts diffusie van lucht naar deze plaats optreden.

Iedere dag zal het verhaal van opwarming-uitzetting-afkoeling-diffusie worden herhaald, met als gevolg een steeds groter wordende blaas. Wanneer zich tussen de beide lagen dakleer bovendien nog oplosmiddel of vocht bevindt wordt het uitzetmechanisme versterkt waardoor blazen kunnen ontstaan met een doorsnede van een halve meter tot een meter of meer.

Blazen die ontstaan tussen dakleer en isolatie

Wanneer tussen dakleer en droge isolatie ergens geen goede hechting aanwezig is (bij volledig geplakte dakbedekking) kan een blaas ontstaan tengevolge van ingesloten lucht, op dezelfde wijze als hiervoor beschreven. Wanneer de isolatie tijdens een regenbui zou zijn aangebracht kan tussen dakleer en isolatie opgesloten vocht de blaasvorming alleen maar versterken. Dit alles geldt overigens slechts voor sterk dampremmende isolatiematerialen. Bij poreuze isolatiematerialen kan er geen grote druk ontstaan omdat de dampdruk zich door het poreuze materiaal kan verdelen waardoor drukvereffening plaatsvindt.

Dampdrukverdelende laag

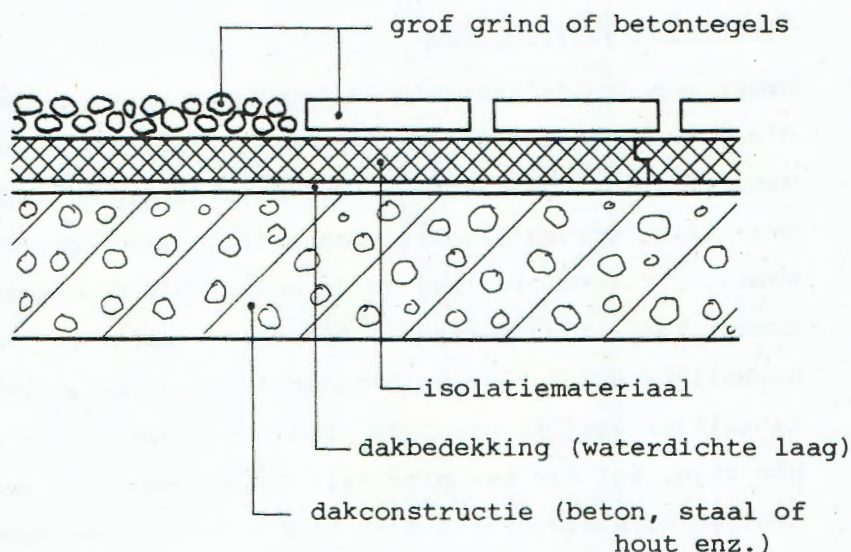
Onder dampdrukverdelende lagen verstaat men lagen dakleer die bijvoorbeeld aan één zijde zijn voorzien van een laag grof zand (fijn grind) waarmee ze op de ondergrond worden gelegd. Deze lagen worden slechts plaatselijk (met noppen) vastgegoten waardoor tussen die laag en de ondergrond een netwerk van zeer kleine kanaaltjes ontstaat. Afvoer van waterdamp hierdoor heeft nauwelijks enige betekenis omdat de stromingsweerstand van de kanaaltjes veel te groot is, zodat van ventilatie geen sprake kan zijn. Wel kan een plaatselijk hoge dampdruk worden vereffend en zo blaasvorming door bijvoorbeeld inwendige condensatie voorkomen.

In het voorgaande is aangetoond dat blazen kunnen ontstaan zonder dat er ook maar enig vocht aanwezig is. Dat men de oorzaak zo vaak aan de aanwezigheid van vocht toeschrijft is gelegen in het feit dat men bij het opensnijden van blazen bijna altijd constateert dat er zich vocht tegen de blaaswand heeft afgezet. Dat men de oorzaak aan het vocht toeschrijft ligt voor de hand. Deze conclusie is echter gevaarlijk. Het opensnijden van een blaas gebeurt meestal niet op het heetst van de dag maar 's morgens vroeg. Het topje van de blaas is het koudste punt (extra geïsoleerd van de warme onderlaag door de luchtlaag, nachtelijke uitstraling, geen massa die de warmte vasthoudt). Het koudste punt heeft de laagste maximale waterdampspanning.

Er zal vocht van warmere gebieden naar deze plaats diffunderen. Hierdoor zal de dampspanning (p) stijgen totdat de maximale spanning (p_{\max}) is bereikt, waarna condensatie zal optreden. Later op de dag, wanneer de oppervlaktetemperatuur zal zijn gestegen vindt het reeds beschreven proces in omgekeerde zin plaats en is er van vocht niets meer te merken.

4.4.8 Het omgekeerde dak (6)

Omdat het heel anders is dan de hiervoor behandelde dakvormen wordt dit daktype hier apart behandeld.



Onder verwijzing naar 3.4 "plaats van isolatie en dampremmende laag", kunnen we stellen dat deze dakopbouw aan alle (bouwfy-sische) wensen voldoet: isolatie aan de buitenzijde (los gelegd, dus niet dampdicht), dampremmende laag aan de warme zijde van de constructie (dakbedekking onder de isolatie). Er is derhalve geen kans op inwendige condensatie.

Omdat de dakbedekking onder de isolatie ligt staat hij niet bloot aan sterke temperatuurschommelingen, wat de levensduur zeker ten goede komt. Ook kunnen hier heel goed losliggende

kunststoffolies worden toegepast. Doordat de platen los liggen kan het regenwater door de naden stromen. Dit heeft een kleine teruggang in de warmteweerstand tot gevolg omdat het regenwater de warmte transporteert. Bij goede uitvoering (platen met sponning) hoeft deze invloed echter niet groter te zijn dan ca. 5%. Doordat dakbedekking en isolatie los liggen is een belasting met grind of met betontegels noodzakelijk. Dit moet trouwens ook om het isolatiemateriaal tegen de invloed van de ultraviolette straling in het zonlicht te beschermen. Het "buiten" liggen van de isolatie stelt wel speciale eisen aan het materiaal. Op dit moment wordt vrijwel uitsluitend één soort geëxtrudeerd polystyreenschuim toegepast dat een te verwaarlozen wateropname heeft en rot- en schimmelbestendig is.

Renovatie

Ook voor renovatie of isolatie achteraf is dit type dak zeer geschikt. Na verwijderen van de oude grindbelasting of tegels, het schoonmaken van de oude dakbedekking en desnoods het aanbrengen van één nieuwe laag kunnen de isolatieplaten worden uitgelegd, waarna de grind- of tegelbelasting weer wordt aangebracht.

4.5 VLOEREN EN KELDERS

4.5.1 Vloeren boven buitenlucht

Vloeren boven onderdoorritten of boven in open verbinding met de buitenlucht staande niet of nauwelijks verwarmde ruimten moeten worden geïsoleerd. In de eerste plaats omdat er anders een te groot energie(warmte)verlies optreedt, in de tweede plaats omdat de temperatuur van het binnenoppervlak veel te laag zou worden (koude voeten).

Het beste kan deze isolatie aan de koude (buiten)zijde worden aangebracht, een (isolerend) verlaagd plafond of tegen de beton bevestigde (of zelfs meegestorte) isolatieplaten enz.

4.5.2 Vloeren boven kruipruimten

Isolatie van vloeren boven kruipruimten is niet zo'n duidelijke zaak. De kruipruimte is zwak geventileerd; de lucht in deze ruimte wordt verwarmd door de warmte die door de vloerconstructie heen dringt.

Verhoging van de isolatiewaarde van de vloer betekent vermindering van het warmtetransport.

Hierdoor daalt echter de temperatuur in de kruipruimte. Een groter temperatuurverschil betekent een groter warmtetransport en aldus ontstaat een soort vicieuze cirkel en heeft de isolatie niet dat effect dat men er van verwacht.

Ook de oppervlaktetemperatuur van de bovenkant van de vloer stijgt nauwelijks.

Isolatie van vloeren boven kruipruimten en de problematiek die hiermee samenhangt is nog weinig onderzocht, maar staat nu volop in de belangstelling zodat over enige tijd zeker meer gegevens beschikbaar zullen komen.

4.5.3. Kelders niet in het grondwater

Wanneer een kelder niet in het grondwater ligt is isolatie niet altijd noodzakelijk. De tegen vloer en wanden aanliggende zand-

pakketten vertegenwoordigen ook een warmteweerstand tussen kelderruimte en buitenlucht of dieper gelegen grondwater.

Vaak zal men echter, in ieder geval de kelderwanden toch isoleren omdat het bovenste gedeelte vlak onder of zelfs boven het maaiveld ligt, waardoor dit aan lage buitentemperaturen is blootgesteld.

Isolatie aan de buitenzijde is het beste (zie voor de wijze waarop ook hierna bij kelders in het grondwater) maar ook isolatie aan de binnenzijde is mogelijk waarbij de uitvoering met betrekking tot dampremmende lagen etc. hetzelfde is als bij het aan de binnenzijde isoleren van buitenmuren (4.3.7).

4.5.4 Kelders in het grondwater

In ons land heeft het grondwater een vrijwel constante temperatuur die afhankelijk van de plaats in het land kan variëren tussen ca. 7 en 13° C. Dit water staat tegen de kelderomrandingen en voert de warmte hiervan onmiddellijk af. Het is derhalve zinvol dit soort kelders te isoleren (voor zover ze verwarmd worden) om dit warmteverlies te beperken. De buitentemperatuur is wel niet zo laag, maar er moet wel het gehele jaar door worden verwarmd.

De enige echt goede methode is hier het isoleren aan de buitenzijde, met materiaal dat geen water opneemt en niet aan rotting enz. onderhevig is. Bij isolatie aan de binnenzijde is een dampdichte laag nodig ter voorkoming van dampdiffusie vanuit de ruimte naar het inwendige van de wand. Die laag verhindert echter het verdampen van het (heel langzaam) door de constructie dringende grondwater aan het binnenoppervlak, zodat waterophoping achter de dampremmende laag optreedt.

Een heel goed materiaal voor het aan de buitenzijde isoleren van kelders is geschuimd glas, maar ook sommige platen van geëxtrudeerd polystyreenschuim komen in aanmerking.

De platen kunnen tegen de wanden worden geplakt (met bitumen enz.) en moeten dan worden afgewerkt om mechanische beschadiging te voorkomen tijdens het aanvullen van de grond enz. door middel van glasvlies en bijvoorbeeld coatings op bitumenbasis. Soms kan

een nog steviger bescherming van golfplaat of metselwerk noodzakelijk zijn.

Bij isolatie van de vloer kunnen de platen rechtstreeks op de geëgaliseerde ondergrond worden gelegd of op een eerste werkvloer. Hierbij moet ter voorkoming van beschadiging bij het plaatsen van de wapening op de platen een laag betontegels of een werkvloer worden gelegd ter ondersteuning van de wapening. Verder bevestigen van de platen is niet nodig.

4.6 VOORKOMEN VAN KOUDEBRUGGEN

Veel voorkomende koudebruggen worden gevormd door van binnen naar buiten doorlopende betonconstructies (zie ook 2.6).

Een gevelband kan bijvoorbeeld beter in prefab beton worden uitgevoerd, zodat hij slechts plaatselijk aan de vloerconstructie hoeft te worden verbonden. Balkons kunnen beter als aparte platen worden opgelegd op consoles die een veel kleinere koudebrug vormen dan een rechtstreeks doorlopende vloer. Vaak kunnen uitstekende betondelen van een isolatielaag worden voorzien en met een of andere beplating worden bekleed.

Ook bij prefab gevelelementen treden nogal eens koudebruggen op die niet altijd zijn te vermijden.

Zeker in gebouwen met luchtbevochtiging kunnen deze koudebruggen hinder of schade door condensatie veroorzaken.

Koudebruggen van raamprofielen nemen een aparte plaats in, zie hiervoor 2.6 ("Koudebruggen").

5 BEREKENINGSGRONDSLAGEN, MATERIAALGEGEVENS

5.0 INLEIDING

In deze paragraaf worden van een aantal materialen de thermische en hygrische eigenschappen gegeven.

Daarnaast komen als uitgangspunt voor de berekeningen enkele grootheden van buiten- en binnenklimaat aan de orde.

5.1 BUITENKLIMAAT

(bewerkt naar gegevens van het KNMI te De Bilt)

Maand	\bar{T}_a (°C)	\bar{p}_a (Pa)
januari	2,3	640
februari	2,5	640
maart	4,9	720
april	7,8	860
mei	12,4	1090
juni	14,8	1320
juli	16,6	1530
augustus	16,0	1570
september	13,6	1380
oktober	9,6	1090
november	5,0	850
december	2,9	710

tabel 5-1: Maandgemiddelden (te De Bilt) van temperatuur (\bar{T}_a),
waterdampspanning (\bar{p}_a)

Temperatuur (°C)	Aantal uren dat deze tempe- ratuur wordt onderschreden
- 10	35 (8)
- 5	180 (45)
0	781 (202)
5	2432 (661)

tabel 5-2: Aantal uren dat een bepaalde temperatuur jaarlijks wordt onderschreden. Tussen haakjes is aangegeven hoeveel van de aangegeven uren binnen kantoortijd (7.00 - 19.00 uur, 5 dagen per week) vallen

5.2 BINNENKLIMAAT

(bewerkt naar gegevens Stichting Bouwresearch, publikatie nr. 51)

Voor de verschillende binnenklimaatklassen zijn jaargemiddelde waarden van de waterdampspanning binnenshuis (\bar{p}_i) vastgelegd:

- I $1030 < \bar{p}_i < 1080$ Pa
gebouwen met te verwaarlozen vochtproductie, zoals schuurtjes, transformatorhuisjes, garages en opslagruimten
- II $1080 < \bar{p}_i < 1320$ Pa
gebouwen met vrij geringe vochtproductie, zoals woningen, kantoren en winkels (alle zonder luchtbevochtiging)
- III $1320 < \bar{p}_i < 1420$ Pa
gebouwen met een wat hogere vochtproductie, zoals scholen, bejaardentehuizen en gebouwen met geringe luchtbevochtiging
- IV $\bar{p}_i > 1430$ Pa
gebouwen met hoge vochtproductie, zoals wasserijen, badinrichtingen, zuivelfabrieken en gebouwen met sterke luchtbevochtiging, zoals drukkerijen en textielfabrieken

tabel 5-3: Klimaatklassen

Voor een globale berekening van de gedurende de winter door dampdiffusie in een constructie binnendringende hoeveelheid vocht, kunnen de hieronder aangegeven gemiddelde waterdampspanningen binnenshuis worden aangehouden.

Klimaatklasse	Gemiddelde waterdampspanning en relatieve vochtigheid (bij 20° C) gedurende de winter (condensatie)periode	
I	$\bar{p}_{i,winter} = 725 \text{ Pa};$	$\bar{\phi}_{i,winter} = \text{ca. } 30\%$
II	$\bar{p}_{i,winter} = 950 \text{ Pa};$	$\bar{\phi}_{i,winter} = \text{ca. } 40\%$
III	$\bar{p}_{i,winter} = 1150 \text{ Pa};$	$\bar{\phi}_{i,winter} = \text{ca. } 50\%$
IV	$\bar{p}_{i,winter} > 1400 \text{ Pa};$	$\bar{\phi}_{i,winter} > 60\%$

tabel 5-4: Gemiddelde waterdampspanning en relatieve vochtigheid gedurende de condensatieperiode

Bij de klimaatklasse I, II en III mag worden aangenomen dat al het in de winter binnenkomende vocht gedurende de zomermaanden weer uit de constructie verdwijnt.

Bij materialen die gezien hun absorptiecapaciteit best wat vocht kunnen opnemen, en hierdoor niet worden aangetast zijn daarbij wel de volgende maxima te stellen aan de hoeveelheid gedurende de winter binnendringend vocht.

In het algemeen mag deze niet meer zijn dan ca. 500 g/m².

Bij houtachtige materialen niet meer dan ca. 100 g/m² per 10 mm dikte van het materiaal, met een maximum van 500 g/m².

Bij materialen die weinig vocht kunnen opnemen, zoals polyurethaanschuim of polystyreenschuim in een dakconstructie is de toelaatbare hoeveelheid beperkt tot 50 à 110 g/m².

Bij klimaatklasse IV geldt dat de hoeveelheid vocht van jaar tot jaar zal toenemen.

Geheel voorkomen van inwendige condensatie is dan de beste, niet altijd de meest reële oplossing. Indien dit niet mogelijk is dient de hoeveelheid binnendringend vocht sterk te worden beperkt.

Er worden dan hoge eisen gesteld aan de dampweerstand van de constructie. Zie hiervoor echter bijvoorbeeld:

"Daken, vloeren en details gezien door een thermo-hygrische bril"
Stichting Bouwresearch, rapport B2-14, Rotterdam 1976.

Houtachtige materialen kunnen bij klimaatklasse IV nooit worden toegepast.

5.3 THERMISCHE EN HYGRISCHE EIGENSCHAPPEN VAN MATERIALEN

tabel 5-5: Dichtheid ρ , warmtegeleidingscoëfficiënt λ , soortelijke warmte c en dampdiffusieweerstandsgetal μ van bouwmaterialen

Bron: Stichting Bouwresearch publicatie nr. 9, 1974. Eigenschappen van bouw- en isolatiematerialen.

Materiaalsoort	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)		c (J/kg.K)	μ -
		I ')	II ')		
<u>Metalen</u>					
Lood	12250	35	35	130	∞
Koper	9000	370	370	390	∞
IJzer	7900	72	72	530	∞
Staal	7800	41-52	41-52	480-530	∞
Zink	7200	110	110	390	∞
Aluminium	2800	200	200	880	∞
<u>Natuursteen</u>					
Basalt	3000	3,5	3,5	840	-
Graniet	3000	3,5	3,5		-
Kalksteen	2750	2,3	2,9		-
Hardsteen	2750	2,3	2,9		-
Marmer	2750	2,3	2,9		-
Zandsteen	2000-2300	2-4	4-6		15
Tufsteen	1100-1500	0,35-0,50	0,5-0,7	5-10	
<u>Metselstenen</u>					
Gevelklinkers	2100	0,8	1,3	840	31
Hardgrauw	1700-1900	0,65-0,70	1,0-1,2		9-14
Rood/Boerengrauw	1700	0,65	1,0		9
	1500	0,55	0,85		8
Isolatiesteel	1300	0,45	0,75		7,5
	1000	0,30	-		-
Kalkzandsteen	2000	1,0	1,5	25	
<u>Grindbeton</u>					
Verdicht gewapend	2500	1,9	2,3	840	37-200
Verdicht ongewapend	2400	1,7	2,2		31-200
Niet verdicht gewapend	2300	1,4	1,9		27-200
Niet verdicht ongewapend	2200	1,3	1,7		23-200
<u>Lichte betonsoorten</u>					
Algemene indicatie	1900	0,95	1,4	840	13,0
	1600	0,70	1,2		8,0
	1300	0,45	0,8		7,5
	1000	0,35	0,5		6,5
	700	0,23	-		5,5
	500	0,17	-		4,5
300	0,12	-	3,5		
200	0,08	-	2,8		

1) Kolom I heeft betrekking op omstandigheden waarbij het vochtgehalte overwegend bepaald wordt door het binnenklimaat.
Kolom II slaat op omstandigheden waarbij gemiddeld op een hoger vochtgehalte moet worden gerekend.

Vervolg tabel 5-5

Materiaalsoort	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)		c (J/kg.K)	μ -
		I ')	II ')		
Bimsbeton	700-1000	0,23-0,35		840	6
	1000-1400	0,35-0,50			6,5-12
Beton met geëxpandeerde klei e.d. als toeslag	500-1000	0,18-0,35		840	5-6,5
	1000-1800	0,35-0,85			6,5-12
Polystyreenschuimbeton	220	0,07			4,5-5,5
	400	0,11			16-20
	650	0,20			-
	1300	0,50	1,2		7,5-9
Cellenbeton	1000	0,35	0,7	840	5,5-7,5
	700	0,23			4,5-7,5
	400	0,17			3-7,5
Cellenbeton op cementbasis	400-750	0,17-0,26			3,7-6,5
Cellenbeton op kalkbasis					
Hoogovenslakkenbeton	1900	0,70	1,0	840	14
	1600	0,45	0,7		10
	1300	0,30	0,45		8
	1000	0,23	0,35		6,5
<u>Andere anorganische materialen</u>					
Asbestcement	1600-1900	0,35-0,70	0,95-1,2		37-150
Gipsplaten	800-1400	0,23-0,46	(-)-0,65		6
Glas(spiegelglas en vensterglas)	2500	0,8	0,8	840	∞
Glaskeramiek	2500	1,4	1,4		∞
Schuimglas	120-150	0,05-0,06			∞
Minerale toeslag voor beton	50-800	0,04-0,23			-
Minerale wol	35-250	0,041			1,1-1,8
<u>Pleisterlagen</u>					
Cementpleister	1900	0,93	1,5	840	15-41
Kalkpleister	1600	0,70	0,8		9-41
Gipspleister	1300	0,52	0,8		7-10
<u>Tegels</u>					
Hardgebakken tegels	2000	1,2	1,3	840	28
Plavuizen	1700	0,8	1,1		23
<u>Organische materialen al dan niet gebonden</u> (met uitzondering van houtprodukten en kunststoffen)					
Geëxpandeerde kurk	100-200	0,041-0,046		1760	4,5-29
Geëxpandeerde geïmpregneerde kurk	100-200	0,041-0,046		1760	9-46
Linoleum	1200	0,17		1470	1800
Rubber	1200-1500	0,17-0,29		1470	900
Geëxpandeerde eboniet	100	0,035		1470	450-900
Rietvezelplaat	250-350	0,08-0,09		2100	3
Strovezelplaat	200-400	0,08-0,12		2100	3
Vlasschevenplaat gebonden met kunsthars	300-700	0,08-0,17		1880	7-46
Vlasschevencementplaat	330-700	0,08-0,12		1470	3,5-7
<u>Houtprodukten</u>					
Hardhout	800	0,71 ¹⁾	0,23 ¹⁾	1880	-
Naaldhout	550	0,14 ¹⁾	0,17 ¹⁾		-
Triplex-multiplex	700	0,17	0,23		-
Hardboard	1000	0,29		1680	46-75
Zachtboard	250-300	0,08		2100	-
Spaanplaat	450	0,10			-
	600	0,15		1880	-
	1000	0,29			-
Houtspaan-cementplaat	350-700	0,09-0,21		1470	3,7-10
Houtwolcementplaat					
Houtwolmagnesiumplaat	400-500	0,10-0,12			3,7-10

Vervolg tabel 5-5

Materiaalsoort	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)		c (J/kg.K)	μ -
		I ')	II ')		
<u>Harde kunststoffen</u>					
Polyesterplaat (met glasvezels versterkt)	1200	}	0,2	}	9000
Polyetheen	920-950				
Polymethacrylaat	1200				
Polypropeen	900				
Polyvinylchloride	1400				
ABS polymeren	1100				
<u>Kunststofschuimen</u>					
Polystyreenschuim geëxpandeerd	15-30	0,035	}	}	23-150
Polystyreenschuim geëxtrudeerd	30-40	0,027 ²⁾			150-300
Ureumharsschuim	8-20	0,054 ²⁾			1,5-3
Polyurethaanschuim (met freon geblazen)	30-60	0,021-0,035 ³⁾			23-185
Fenolharsschuim (hard)	25-200	0,035			3,7
Polyvinylchlorideschuim	25-50	0,035			92-260

Opmerking: wanneer twee waarden van ρ en λ zijn gegeven kan λ voor tussengelegen waarden van ρ lineair worden geïnterpoleerd.

- 1) Loodrecht op de vezels.
- 2) Bij toepassing als spouwvulling.
- 3) λ kan bij veroudering ten gevolge van het verdwijnen van de freonvulling stijgen tot 0,035 W (m.K).

- over de μ -waarden van houtprodukten is nog weinig bekend. Bovendien hangt de μ -waarde in zeer sterke mate af van het vochtgehalte.

Benaming	d (10 ⁻³ m)	μ (10 ³ -)	μd (m)
Gebblazen bitumen	-	70-120	1
Asfaltbitumenvilt 330-37	-	-	20
Gebitumineerd glasvlies	-	-	20-180
Bezand asfaltbitumenvilt 500-56	2,6	-	50
Teervilt 280-40/45	-	-	14
Eénzijdig gebitumineerd papier	0,1	-	0,7
Flintkote (bitumenmengsel)	-	0,75	-
Polyesterfoelie	0,1	13	1,3
Polystyreenfoelie	0,1	42	4,2
Polyvinylchloridefoelie	0,1	10-100	1-10
Polyetheenfoelie	0,1	50-100	5-10
Asaflbitumen met aluminiumfoelie inlage	-	-	100-∞
Eénzijdig met kunststof gecacheerd aluminiumfoelie 0,06 mm	-	-	100
Tweezijdig met kunststof gecacheerd aluminiumfoelie 0,08 mm	-	-	160

Bij de samenstelling van deze tabel werd ook gebruik gemaakt van enkele door "Vedidak" ter beschikking gestelde gegevens.

tabel 5-6: Dampremmende lagen

6 Literatuur

6.1 Literatuur waarnaar in deze syllabus wordt verwezen

- 1 N.A. Hendriks: Het bouwfysich ontwerpen van keurdaken. Vebidak, maart 1974.
- 2 Stichting Bouwresearch rapport B2-9: Dak- en wandconstructies gezien door een thermo-hygrische bril. S.B.R. R'dam 1973.
- 3 Stichting Bouwresearch rapport B2-14: Daken, vloeren en details gezien door een Thermo-hygrische bril. S.B.R. 1976.
- 4 Stichting Bouwresearch, publicatie nr. 51: Warmteisolatie en ventilatie van muren en daken. Samson, Alphen a/d Rijn 1976.
- 5 Stichting Bouwresearch, publicatie nr. 58: Vulling van spouwmuren. S.B.R. 1977.
- 6 Stichting Bouwresearch rapport B2-16: Het omgekeerde dak. S.B.R. 1976.

6.2 Literatuur betreffende materiaalgegevens en algemene tabellen

- Nederlands Normalisatie Instituut: Normblad NEN 1068, Thermische eigenschappen van woningen. N.N.I. Rijswijk (Z.H.) 1968.
- Stichting Bouwresearch, publicatie nr. 9: Eigenschappen van bouw- en isolatiematerialen. S.B.R. Rotterdam 1974.
- B.H. Vos en E. Tammes: Tabellen betreffende warmte- en vochttransport, Bouwcentrum Rotterdam (1970).
- Stichting Bouwresearch, rapport B2-15: Bouw- en isolatiematerialen vermeld onder hun handelsnaam.

6.3. Literatuur waarin de in deze syllabus aan de orde gekomen onderwerpen meer diepgaand worden behandeld.

- Stichting Bouwresearch/Samson, publicatie
 - nr. 10: Inwendige condensatie (1971)
 - nr. 51: Warmteisolatie en ventilatie van muren en daken (1976)

- nr. 58: Vulling van spouwmuren (1977)
- nr. 30: Koudebruggen (1971)
- nr. 33: Het vochtgehalte in niet-geventileerde daken van cellenbeton
- nr. 41: Het niet-geventileerde platte dak (1974)

- Stichting Bouwresearch rapporten
 - B2-9 : Dak- en wandconstructies gezien door een thermohygrische bril (1973)
 - B2-14: Daken, vloeren en details gezien door een thermohygrische bril (1976)
 - B2-16: Het omgekeerde dak (1976)

- E. Tammes en B.H. Vos: Hygrische aspecten van platte daken. Polytechnisch Tijdschrift B 1974 nr. 7 t/m 13.



