

Praktische Bouwfysica

Warmte- en Vochttransport in constructies en gebouwen



ir J.S. (Hans) Bosch J.S.Bosch@HR.nl

Warmte- en Vochttransport in constructies en gebouwen V.1.1 d.d. 29-6-2016. Dit dictaat is voor studenten die bouwkunde studeren aan de Hogeschool Rotterdam. Gaarne eventuele fouten melden bij de docent.

Disclaimer:

Bij een beoordeling van een bouwwerk dient men altijd Bouwbesluit en de daarin aangewezen normen te raadplegen.

Foto's en figuren waarbij geen bronvermelding is vermeld: © J.S. Bosch

Foto voorpagina: Zwamvorming achter voorzetwand (met dampdichte laag): foto J.S. Bosch en C. Snepvangers

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
1.1	Warmtetransport	2
1.2	Begrippen en eenheden	2
2	Warmtetransport door straling	4
2.1	Achtergronden	4
2.2	Stralingsoverdracht	10
3	Warmtetransport door convectie	14
4	Warmtetransport door geleiding	15
4.1	De warmteweerstand	16
4.1.1	De warmteweerstand van een enkelvoudige laag	17
4.1.2	De warmteweerstand van meerdere lagen	18
4.1.3	De warmteweerstand van een luchtlaag in een constructie	19
4.1.4	De warmteweerstandswaarden R_{si} en R_{se}	22
4.2	De warmtedoorgangscoefficiënt U_T	25
4.3	Het berekenen van de Warmtestroomdichtheid q	26
4.4	Overzicht	28
5	Berekenen van het temperatuurverloop in een constructie	29
5.1	Temperatuurverloop in een constructie met de "tabelmethode"	30
5.2	Temperatuurverloop in een constructie met de "directe methode"	34
6	Warmteweerstand en Warmtedoorgangscoefficiënt conform het Bouwbesluit	38
6.1	Warmteweerstand van een spouwmuur met spouwankers	39
6.2	Warmteweerstand van samengestelde constructies	40
6.3	Warmtedoorgangscoefficiënt van een pui	42
7	De energiebalans	44
7.1	Transmissie	46
7.2	Ventilatie	47
7.3	Zoninstraling	50
7.3.1	Q_{sun}	51
7.3.2	De zontoetredingsfactor g_{gl}	52
7.3.3	Interne warmtelast	53
7.4	Voorbeelden warmtebalans	54
7.5	Energiegebruik	58
8	Vochttransport	62
8.1	Damptransport in lucht	62
8.1.1	Beginsel van Watt	65
8.2	Relatieve vochtigheid	67
8.3	Oppervlakte condensatie	69

8.5	De dauwpuntstemperatuur	74
9	Dampdiffusie	75
9.1	Waterdamptransport	77
10	De berekening van het dampdrukverloop in een constructie	80
10.1	Dampspaningsverloop in een constructie met de “tabelmethode”	81
10.2	Dampdrukverloop in een constructie met de “directe methode”	85
10.2.1	Dampremmende lagen.....	91
11	Vochtbalans.....	93
12	Koudebruggen	98

Bijlagen

1. Voorbeeldberekening R_c waarde spouwmuur conform de NEN 1068
2. Dampdruk- en vochtconcentratietabel

1 Inleiding

In dit dictaat is de basiskennis beschreven die nodig is om een beeld te krijgen van warmte- en vochttransport in bouwkundige constructies.

In dit dictaat wordt behandeld:

1. Warmtetransport in bouwkundige constructies door geleiding, convectie en straling;
2. De energiebalans van een ruimte;
3. Vochttransport in bouwkundige constructies;
4. De vochtbalans van een ruimte.

In het dictaat wordt de theorie omschreven en worden voorbeelden gegeven waarmee het warmte- en vochttransport in bouwkundige constructies is te bepalen. In de praktijk zullen deze berekening grotendeels met behulp van software worden uitgevoerd. In de colleges zal dit ook worden gedaan, echter de student moet kunnen controleren (via de handmatige methoden) of de met de computer uitgevoerde berekeningen juist zijn.

Dit dictaat is nog in "ontwikkeling". Enkele hoofdstukken zijn daardoor nog beperkt uitgewerkt. Andere hoofdstukken worden in de toekomst nog toegevoegd (comfort, uitwerking van vochttransportmechanisme zoals optrekkend vocht). Hebt u opmerkingen, correcties en/of aanvullingen, geeft u deze dan door aan uw docent.

In dit dictaat worden geen afleidingen gegevens van formules, daarvoor wordt u naar aanvullende literatuur verwezen.

1.1 Warmtetransport

Kennis van warmtetransport door bouwkundige constructies is van belang uit het oogpunt van energiezuinigheid en het voorkomen van schades in constructies ten gevolge van inwendige condensatie of thermische spanningen. In dit dictaat gaan we uit van 1-dimensionaal warmtetransport in een constructie. Ook gaan we uit van vaste “randvoorwaarden”. Dit betekent dat er wordt uitgegaan van vaste binnen- en buitentemperaturen.

Ook is het van belang om kennis te hebben van andere warmtetransportmechanismen die in je omgeving kunnen optreden. Immers ook warmtestraling (zon) en luchtstromingen (denk aan “tocht”) zijn van invloed op het feit of je in een ruimte behaaglijk voelt of niet.

Warmtetransport treedt op via de volgende warmtetransportprocessen:

1. geleiding
2. stroming (convectief)
3. straling

Al deze processen vinden gelijktijdig plaats in ruimten en constructies, waarbij het belangrijk is om te weten dat warmtetransport altijd in de richting gaat van een hoge naar een lage temperatuur.

De kern van dit vak ligt op het maken van berekeningen van warmtetransport door geleiding. Echter omdat ook de stroming en straling belangrijke warmteoverdrachtsmechanismen zijn worden deze ook beschreven. In de “bouwkundige praktijk” wordt het warmtetransport door straling en convectie vaak vereenvoudigd en de effecten hiervan worden omschreven in de randvoorwaarden.

1.2 Begrippen en eenheden

Arbeid

Arbeid wordt verricht door een kracht. De eenheid van arbeid is het product van kracht en verplaatsing. De eenheid van een kracht is N. Dit is het product van de massa en de versnelling die een voorwerp ondergaat. Dus:

$$F = m \cdot a \quad [N] \tag{1.1}$$

Waarin:

F = Kracht in N (Newton) $kg \cdot m/s^2$

m = Massa in kg

a = Versnelling in m/s^2

Arbeid wordt gedefinieerd als:

$$W = F \cdot s \quad [J] \quad (1.2)$$

Waarin:

W = Arbeid in J (Joule) [kg.m²/s²] (Joule is dus een afgeleide eenheid)

F = Kracht in N

s = Afstand waarover kracht verplaatst is in m

Energie

Er zijn vele soorten energie: mechanische energie (arbeid), elektrische energie, chemische energie, kinetische energie, potentiële energie en kernenergie. Vaak wordt de ene vorm energie overgezet in een andere vorm van energie. Denk aan het verbranden van steenkool (oorspronkelijk opgebouwd met zonne-energie) in een elektriciteitscentrale. Bij het verbranden van de steenkool wordt vrijkomende energie omgezet in warmte die een turbine aandrijft (mechanische energie) waaruit elektriciteit stroomt en thuis weer wordt omgezet in warmte en/of mechanische energie (bijvoorbeeld een föhn). Er zijn nog steeds veel eenheden om energie in te benoemen: denk aan kWh voor elektriciteit en aan kcal (kilocalorieën) voor warmte (energie-inhoud van eten). Formeel moet energie worden uitgedrukt in Joule (J). Komt men nog de andere benamingen tegen dan kunnen de volgende omrekeningswaarden gebruikt worden:

$$1 \text{ kcal} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ J} = 4,19 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

Vermogen

Het vermogen is de per tijdseenheid geleverde of opgenomen hoeveelheid energie. Deze eenheid wordt Watt genoemd.

$$P = \frac{W}{t} \quad [W] \quad (1.3)$$

P = Vermogen in W (Watt) [J/s]

W = Arbeid in J (Joule)

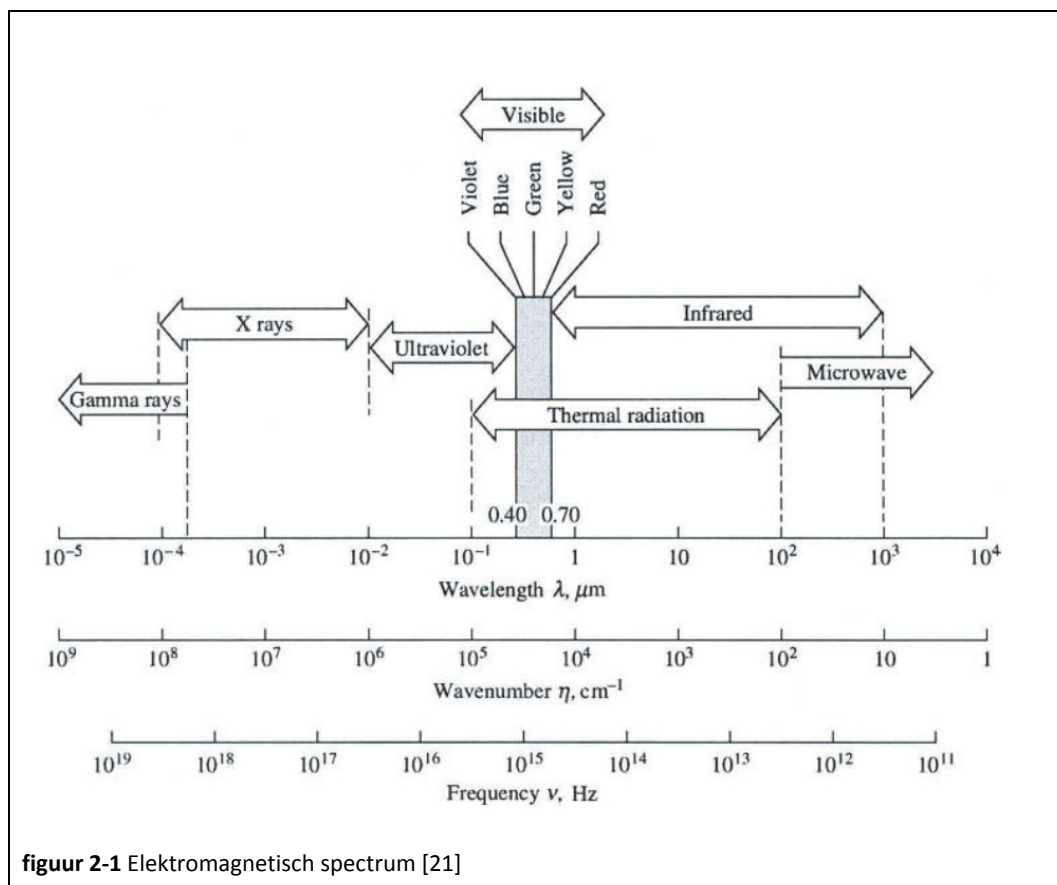
t = Tijdsduur in seconde [s]

2 Warmtetransport door straling

2.1 Achtergronden

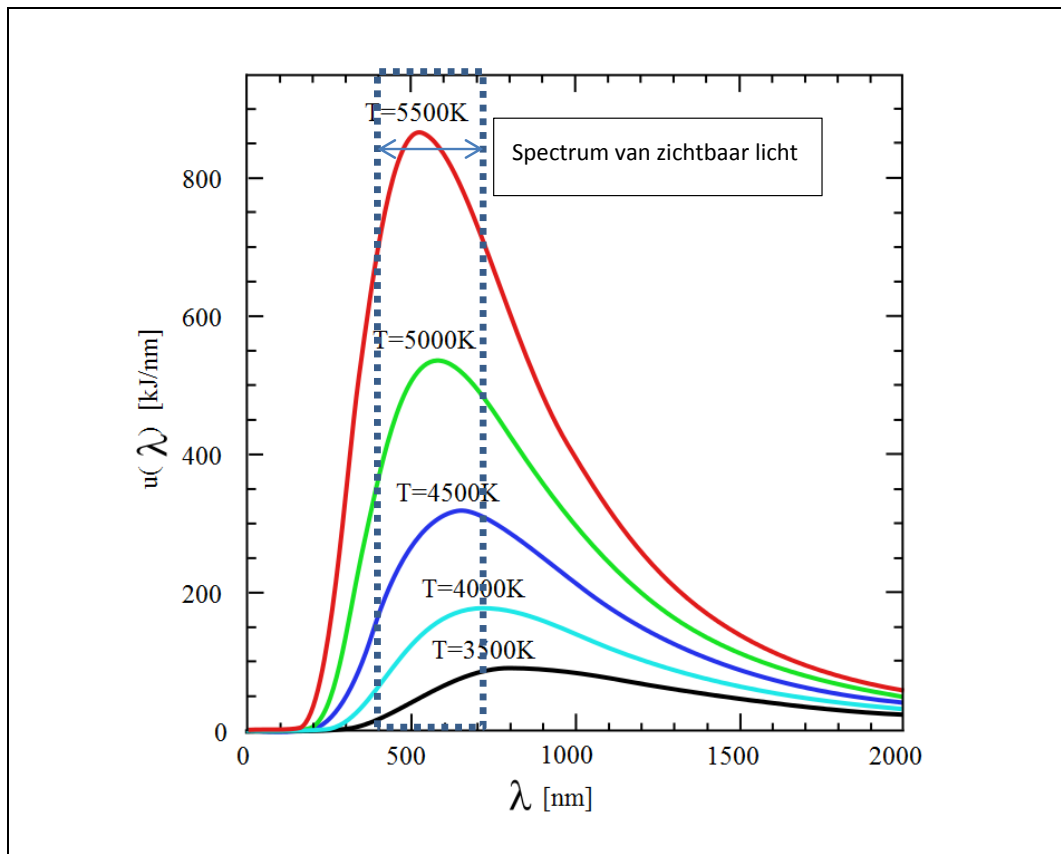
Elk materiaal met een temperatuur hoger dan 0 K (-273,15 °C) zendt warmte uit, dus praktisch gezegd: alle voorwerpen in je omgeving (dus ook mensen) zenden warmte uit en ontvangen ook warmte van elkaar. Dit natuurlijk onder de voorwaarde dat deze voorwerpen elkaar kunnen “zien”.

Warmtestraling is een elektromagnetische straling en heeft dus een relatie met andere elektromagnetische stralingen zoals licht, röntgenstraling en radiogolven, in figuur 2-1 is dit zichtbaar. Dit type straling heeft als eigenschap dat het geen medium nodig heeft om zich in te verplaatsen.



De warmte van de zon komt via de luchtledige ruimte naar de aarde door straling. Warmtetransport via straling is dus zeer belangrijk voor het leven op aarde, maar ook de warmteafgifte van de aarde aan de ruimte door middel van straling is van belang, zou dat niet gebeuren dan zou de aarde immers steeds warmer worden. Een voorwerp neemt dus warmte op, maar geeft ook warmte af door straling. Deze processen vinden gelijktijdig plaats. Ook in de bouwkundige praktijk speelt straling een rol, denk hierbij aan het warmteverlies door dubbel glas en aan het optreden van het “broeikaseffect”.

De hoeveelheid warmte die een lichaam uitzendt wordt bepaald door de oppervlaktestructuur en de temperatuur van dit voorwerp. Vooral de laatste is van groot belang. Wanneer we uitgaan van een ideaal stralend voorwerp (dus geen invloed van de stof en oppervlaktestructuur) dan straalt een voorwerp zijn energie af volgens de “Wet van Planck”. In **figuur 2-2** is zichtbaar dat naarmate de temperatuur stijgt de hoeveel uitgezonden stralingswarmte meer wordt en dat de golflengte steeds kleiner wordt (de “piek verschuift naar links”). Dit laatste effect wordt beschreven in de “verschuivingswet van Wien”.



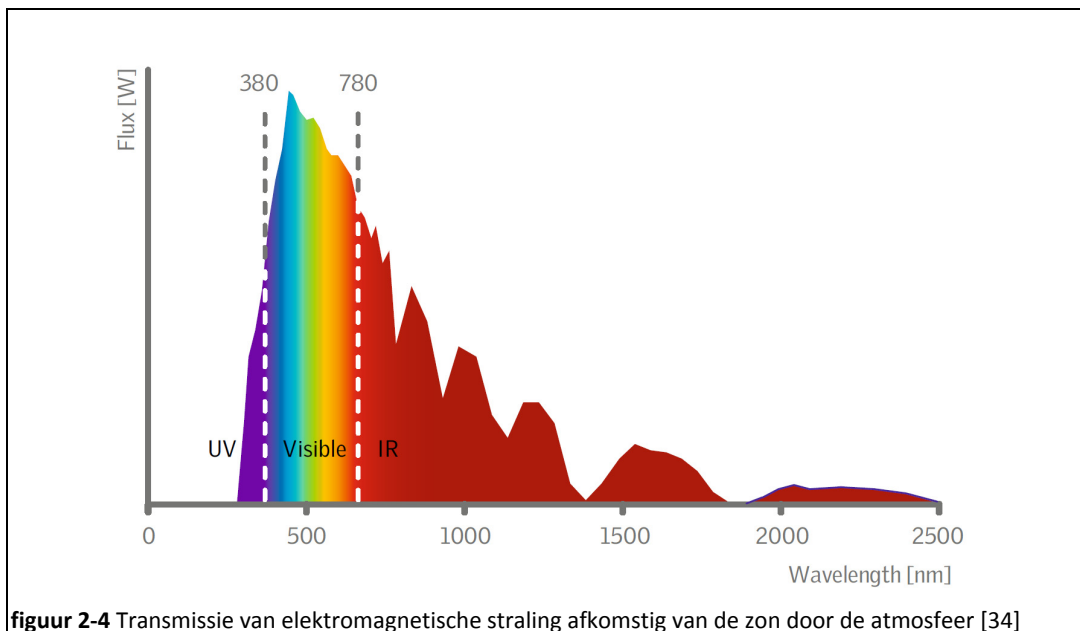
figuur 2-2 Stralingsintensiteit van een voorwerp als functie van de golflengte voor verschillende temperaturen [i2]

In **figuur 2-2** is het gebied weergegeven waartussen de golflengten van het zichtbare licht liggen (tussen 400 en 700 nm). Uit het verschuiven van de piek is dus te constateren dat naarmate een voorwerp warmer wordt deze meer energie gaat uitzenden in het spectrum van het zichtbare licht (denk hierbij bijvoorbeeld aan het gloeien van houtskool in de barbecue, de houtskool gaat van zwart over in roodgloeiend tot geel, zie figuur 2-3).



figuur 2-3 Gloeiend houtskool [i8]

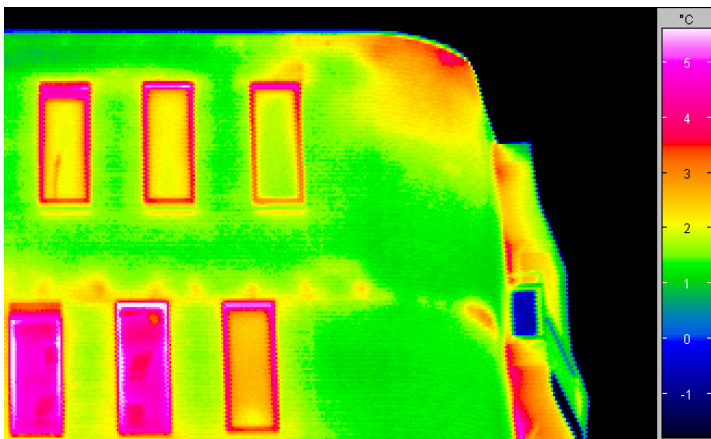
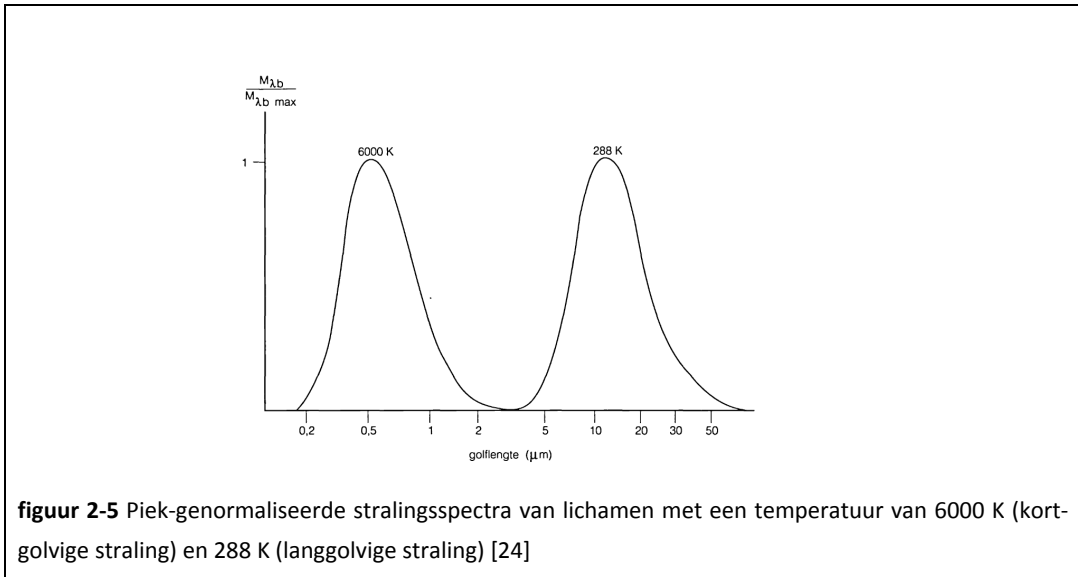
Het spectrum van het zichtbare licht is niet toevallig. De gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de zon bedraagt 5762 K en daarmee ligt de “piek” van de zonnestraling rond de 500 nm, bijna in het centrum van het zichtbare spectrum. Onze ogen zijn dus zo geëvolueerd dat deze zijn geoptimaliseerd om te kunnen waarnemen in het gebied waarin onze grootste energiebron: de zon, haar energie uitstraalt met de grootste intensiteit. Dit gebied met het zichtbare licht wordt ook grotendeels “doorgelaten” door de atmosfeer rond de aarde. Gelukkig worden veel voor mensen schadelijke vormen van straling “tegengehouden” door deze zelfde atmosfeer (gammastraling en UV). In figuur 2-4 is dit weergegeven.



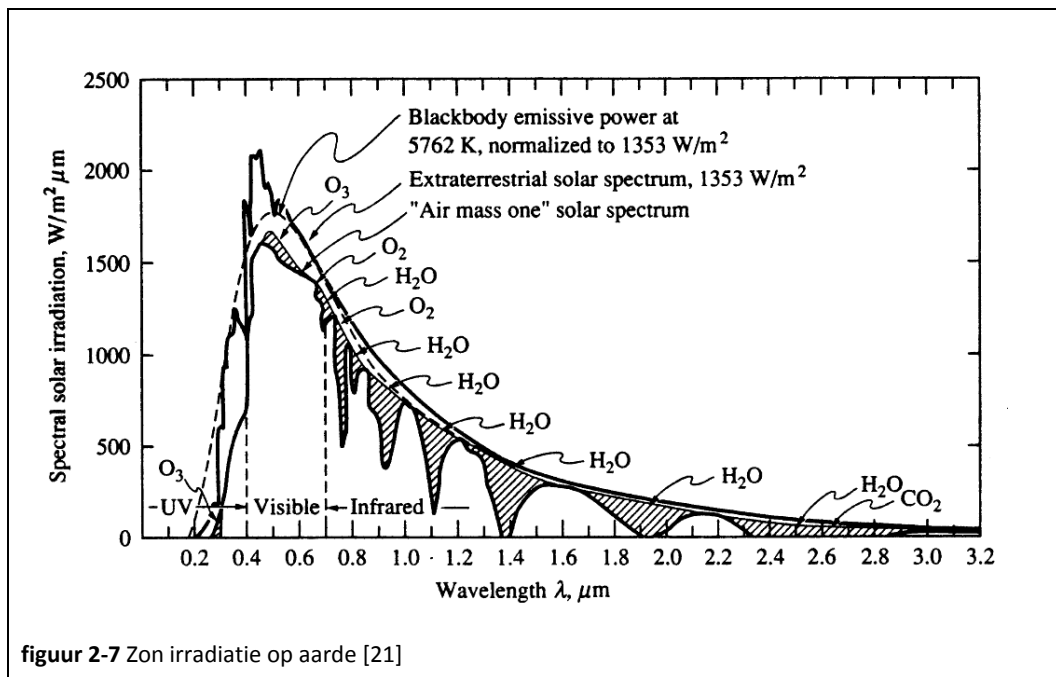
figuur 2-4 Transmissie van elektromagnetische straling afkomstig van de zon door de atmosfeer [34]

De temperaturen op aarde liggen gemiddeld zo rond de 288 K. In dat gebied ligt de uitgestraalde energie niet meer in spectrum van het zichtbare licht. Wij kunnen dan ook niet waarnemen met onze ogen of een verwarming 20°C of 100°C is. De door de zon uitgezonden energie noemen we kortgolvlige straling, de bij “aardse” temperaturen uitgestraalde warmte noemen we langgolvlige straling, zie figuur 2-5.

Aardse temperaturen zijn alleen waar te nemen door een infrarood camera die de oppervlaktetemperatuur van een voorwerp omzet naar voor ons zichtbare beelden. In figuur 2-6 is zo'n foto zichtbaar. Zo kunnen we bijvoorbeeld controleren of een gebouw wel goed geïsoleerd is.



figuur 2-6 Infrarood foto (thermografie) van een gevel [i9]

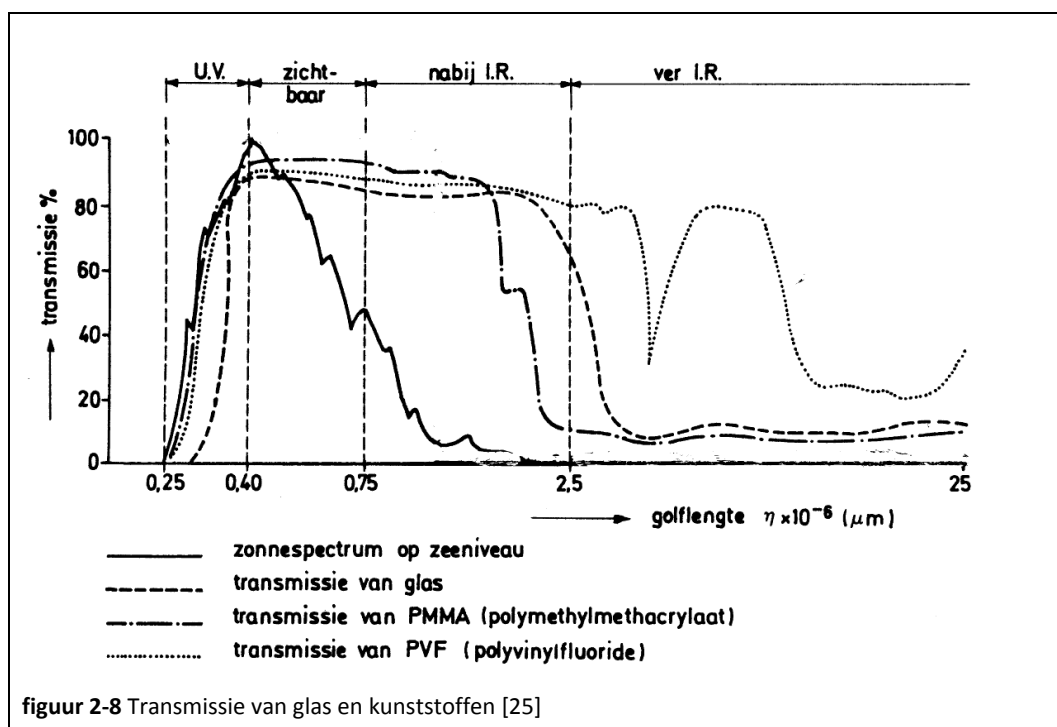


figuur 2-7 Zon irradiatie op aarde [21]

In figuur 2-7 is warmtestraling zichtbaar die de zon uitstraalt en de warmtestraling van de zon zoals deze uiteindelijk op aarde is waar te nemen. In deze figuur kunnen we het volgende waarnemen:

1. In deze figuur staat de intensiteit van straling in relatie tot de golflengte weergegeven. Het oppervlak onder de lijn is dus de totale hoeveelheid door de zon uitgezonden energie. Het zichtbare licht bevat slechts een deel van de warmtestraling van de zon (44%). Het grootste deel (49%) wordt door de aarde ontvangen in het gebied van het infrarood, echter dit is wel verdeeld over een groter gebied (zoals al eerder vermeld is wel de intensiteit het grootst in het zichtbare gebied van de straling). In het ultraviolet wordt nog 7% van de energie ontvangen.
2. Zichtbaar is ook dat niet alle door de zon uitgezonden straling de aarde uiteindelijk bereikt. In veel golflengten wordt de straling geabsorbeerd of gereflecteerd door de dampkring rond de aarde. De stoffen in de dampkring zijn "spectraal-selectief" en laten niet dus niet alle straling door. Zonder deze "beschermd laag" is leven op de aarde niet mogelijk. Voor alle stoffen geldt overigens dat deze spectraal-selectief zijn, groen glas absorbeert dus alle andere kleuren en laat alleen het groene licht door.

Nu het begrip “spectrale selectiviteit” bekend is kunnen we het broeikaseffect verklaren. Glas is ook spectraal selectief. Zoals in figuur 2-8 zichtbaar is laat glas in het gebied van het zichtbare licht (kortgolvig) circa 80% van de energie door. (Daardoor kunnen we ook zo mooi door glas kijken.) In het gebied met langgolvlige straling wordt echter maar circa 10% van de opvallende energie doorgelaten. In een gebouw met veel glas zal op de zuidzijde dus veel warmte van de zon via het glas binnenkomen (kortgolvlige straling). Deze warmte wordt in de ruimte geabsorbeerd door de wanden en vloeren (en alle andere goederen). De wanden zullen worden opgewarmd, echter doordat in de ruimte ook door ventilatie en geleiding warmte wordt afgevoerd zal de wand hoogstens 30 à 35 °C worden en dus zijn energie “langgolvig uitstralen”. Het glas laat echter deze langgolvlige straling niet meer door, de warmte blijft dus “gevangen” in de ruimte waardoor het steeds warmer wordt. In een zonnecollector maakt men gebruik van dit principe om het water goed te kunnen verwarmen.



figuur 2-8 Transmissie van glas en kunststoffen [25]

Het broeikaseffect is ook een term die gebruikt wordt om de opwarming van de aarde verklaren. De aarde wordt overdag door de kortgolvlige straling van zon verwarmd. In de nachtelijke uren geeft de aarde zijn warmte door langgolvlige straling weer af aan het heelal. Deze langgolvlige straling wordt echter deels geabsorbeerd door onder andere het “broeikasgas” koolstofdioxide (CO_2). Hoe meer er van deze warmte absorberende gassen aanwezig zijn, des te minder warmte kan de aarde afgeven, terwijl deze overdag wel weer wordt verwarmd door de kortgolvlige straling. De aarde wordt dus steeds warmer omdat deze niet meer goed kan “afkoelen”.

2.2 Stralingsoverdracht.

De warmte uitstraling van een voorwerp wordt berekend met de formule van Stefan-Boltzmann:

$$q_r = \sigma \cdot T^4 \quad [W/m^2]$$

Waarin:

q_r = De warmtestroomdichtheid van de afgegeven straling in W/m^2

σ = $5,6697 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ (constante van Stefan-Boltzmann)

T = Temperatuur in K ($\Theta + 273,15 =$ temperatuur in $^{\circ}C + 273,15$)

De hoeveelheid straling die een voorwerp afgeeft wordt mede bepaald door de aard van het oppervlak. Dit brengen we in rekening door de emissiecoëfficiënt ϵ . Voor een ideaal stralend materiaal bedraagt de emissiecoëfficiënt 1 (de perfecte zwarte straler). Voor de kleur wit kan men stellen dat in het kortgolfige gebied de emissiefactor 0,2 is (dus 80% van de opvallende straling in het zichtbare gebied wordt gereflecteerd), in het langgolfige infrarode gebied is de emissiecoëfficiënt 0,9. Voor de kleur zwart geldt dat deze voor alle golflengten 1 bedraagt. Voor alle niet metaalachtige bouwmaterialen wordt voor de emissiecoëfficiënt vaak 0,9 aangehouden (als gemiddelde waarde over het gehele spectrum). Een gepolijst metaaloppervlak heeft een emissiecoëfficiënt van circa 0,15. In

tabel 2-1 zijn enkele gemiddelde waarden voor de emissiecoëfficiënt weergegeven (alle waarden zijn natuurlijk ook afhankelijk van de golflengte).

tabel 2-1 Emissiecoëfficiënten ϵ voor bouwkundige toepassing (tussen $0^{\circ}C$ en $100^{\circ}C$)

Materiaal	Emissiefactor ϵ
Zilver, gepolijst	0,03
Koper, gepolijst	0,04
Koper, geoxideerd	0,82
Aluminium, spiegellend	0,05
Metaal, blank	0,16
Metaal, verroest	0,85
Glas	0,88
Linoleum	0,88
Papier	0,89
Hout	0,91
Beton	0,93
Dakpan	0,93
Lak, zwart mat	0,97
Lak, zwart hoogglans	0,88
Lak wit	0,89

Elk lichaam geeft warmte af en neemt warmte op. De mate waarin dit effect optreedt tussen 2 lichamen is afhankelijk van het feit hoe goed deze lichamen elkaar kunnen “zien”. Dit effect wordt in rekening gebracht door de “blikfactor”. In dit dictaat wordt dit verder niet behandeld.

De stralingsuitwisseling tussen 2 oneindig evenwijdige vlakken (die dicht bij elkaar liggen) wordt uitgerekend met:

$$q_r = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W/m}^2]$$

Waarin:

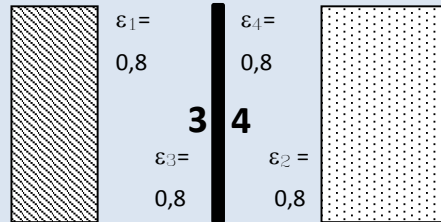
- q_r = De warmtestroomdichtheid van de afgegeven straling in W/m^2
- ε_1 = Emissiecoëfficiënt van oppervlak 1
- ε_2 = Emissiecoëfficiënt van oppervlak 2
- σ = $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ (constante van Stefan Boltzmann)
- T = Temperatuur in K ($=^\circ\text{C} + 273,15$)

voorbeeld 2-1

Twee evenwijdige wanden met de temperaturen $T_1 = 400 \text{ K}$ en $T_2 = 300 \text{ K}$ bezitten beiden een emissiecoëfficiënt $\varepsilon = 0,8$. Bereken de warmteoverdracht per m^2 door straling?

$$q_r = \frac{0,8 \cdot 0,8}{0,8 + 0,8} \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot (400^4 - 300^4) = 661 \quad [\text{W/m}^2]$$

voorbeeld 2-2



Tussen twee evenwijdige wanden met de temperaturen $T_1 = 400 \text{ K}$ en $T_2 = 300 \text{ K}$ wordt een dun warmteschild aangebracht. Alle materialen bezitten een emissiecoëfficiënt $\varepsilon = 0,8$. Bereken de temperatuur van dit schild en de uiteindelijke warmteoverdracht per m^2 door straling?

Voor het bepalen van de temperatuur van het schild (**dun** dus 1 temperatuur) moet worden aangenomen dat de situatie stationair is, dus het opgenomen vermogen is gelijk aan het afgegeven vermogen.

Dus:

$$q_{r(1-3)} = q_{r(4-2)}$$

$$\frac{0,8 \cdot 0,8}{0,8 - 0,8 \cdot 0,8 + 0,8} \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot (400^4 - T_X^4) = \frac{0,8 \cdot 0,8}{0,8 - 0,8 \cdot 0,8 + 0,8} \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot (T_X^4 - 300^4) \Rightarrow$$

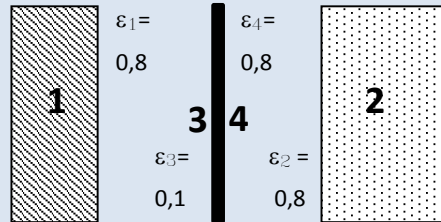
$$(400^4 - T_X^4) = (T_X^4 - 300^4) \Rightarrow (400^4 + 300^4) = 2 T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{400^4 + 300^4}{2}} = 360 \text{ K}$$

De warmteoverdracht door straling bedraagt dan:

$$q_{r(1-3)} = \frac{0,8 \cdot 0,8}{0,8 - 0,8 \cdot 0,8 + 0,8} \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot (400^4 - 360^4) = 333 \text{ [W/m}^2 \text{]}$$

Dus het plaatsen van bijvoorbeeld een houten scherm reduceert de warmteoverdracht al met circa 50% (vergelijk met voorbeeld 2-1)

voorbeeld 2-3



Tussen twee evenwijdige wanden met de temperaturen $T_1 = 400 \text{ K}$ en $T_2 = 300 \text{ K}$ wordt een dun warmteschild aangebracht. Zijde 3, die naar de warme muur gericht is wordt voorzien van een glimmend metaal met een emissiecoëfficiënt $\varepsilon = 0,1$. Alle andere materialen bezitten een emissiecoëfficiënt $\varepsilon = 0,8$. Bereken de temperatuur van dit schild en de uiteindelijke warmteoverdracht per m^2 door straling?

Ook hier geldt weer:

$$q_{r(1-3)} = q_{r(4-2)}$$

$$\frac{0,8 \cdot 0,1}{0,8 - 0,8 \cdot 0,1 + 0,1} \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot (400^4 - T_x^4)$$

$$= \frac{0,8 \cdot 0,8}{0,8 - 0,8 \cdot 0,8 + 0,8} \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot (T_x^4 - 300^4)$$

$$0,09756 \cdot (400^4 - T_x^4) = 0,66666 \cdot (T_x^4 - 300^4) \Rightarrow T_x = 319 \text{ K}$$

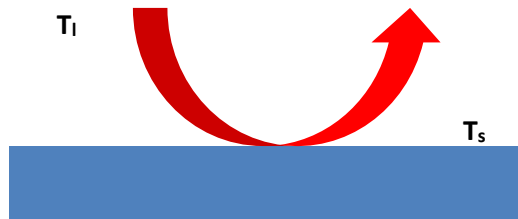
De warmteoverdracht door straling bedraagt dan:

$$q_{r(1-3)} = \frac{0,8 \cdot 0,1}{0,8 - 0,8 \cdot 0,1 + 0,1} \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot (400^4 - 319^4) = 84 \text{ [W/m}^2 \text{]}$$

Dus het plaatsen van bijvoorbeeld een glimmend aluminium scherm reduceert de warmteoverdracht aanzienlijk, vergelijk dit met voorbeeld 2-1. Het scherm moet echter wel mooi glimmend blijven, anders zal de emissiecoëfficiënt ε weer 0,8 gaan bedragen (door het stof).

3 Warmtetransport door convectie

In gassen en vloeistoffen wordt energie getransporteerd door de verplaatsing van de moleculen van die stof. Treedt dit op ten gevolge van temperatuurverschil in de stof (waardoor een verschil in dichtheid optreedt) dan noemen we dit natuurlijke convectie. Treedt dit echter op door bijvoorbeeld een ventilator, dan noemen we dit gedwongen (of geforceerde) convectie.



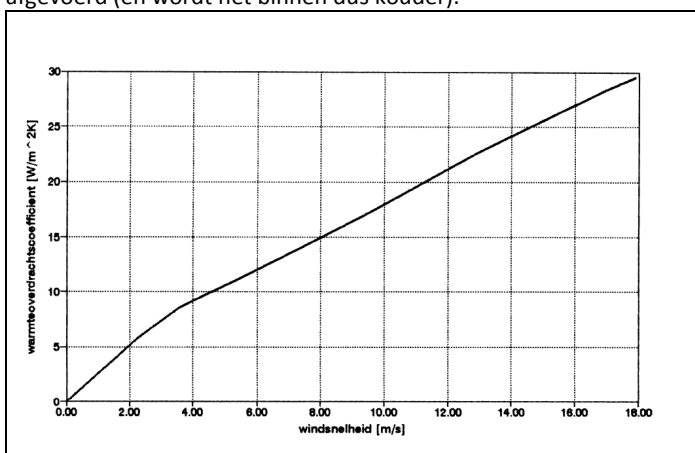
De hoeveelheid warmte die naar een oppervlak wordt toegevoerd (of afgevoerd) wordt als volgt berekend:

$$q_c = h_c \cdot (\theta_s - \theta_a) \quad [\text{W/m}^2]$$

Waarin:

- q_c = De warmtestroomdichtheid W/m^2
- h_c = De warmteoverdrachtcoëfficiënt in $\text{W/m}^2\text{K}$
- θ_s = Oppervlaktetemperatuur in $^\circ\text{C}$ of K
- θ_a = Luchttemperatuur in $^\circ\text{C}$

De warmteoverdrachtscoëfficiënt wordt grotendeels bepaald door de snelheid van de lucht. In figuur 3-1 is dit zichtbaar. Wanneer het hard waait zal (in de winter) dus meer warmte van een gebouw worden afgevoerd (en wordt het binnen dus kouder).



figuur 3-1 Warmteoverdrachtcoëfficiënt t.g.v. convectie

4 Warmtetransport door geleiding

De hoeveelheid warmte die door een muur heen “verdwijnt”¹ wordt uitgedrukt met de warmtestroomdichtheid q_{cd} . Deze hoeveelheid warmte is afhankelijk van de volgende factoren:

- **Het temperatuurverschil:** des te groter het temperatuurverschil, des te groter is het warmtetransport (dus hoe kouder het buiten is des te meer warmte gaat er door een constructie);
- **De dikte van het materiaal:** een “dikker” materiaal houdt de warmte beter tegen dan een dun materiaal;
- **De materiaal eigenschappen:** een isolatiemateriaal houdt warmte “beter tegen” dan bijvoorbeeld metselwerk. Isolatiemateriaal, zoals glaswol, heeft dus minder warmtegeleiding dan metselwerk.

Het bovenstaande geven we weer in de volgende formule:

$$q_{cd} = \left(\frac{\lambda}{d} \cdot \Delta\theta \right) \quad [\text{W/m}^2]$$

Waarin:

q_{cd} = De warmtestroomdichtheid in W/m^2 (subscript cd staat voor conduction)

d = De dikte van constructie in m.

λ = De warmtegeleidingscoëfficiënt in W/mK

$\Delta\theta$ = Het temperatuurverschil over de beschouwde constructie in $^{\circ}\text{C}$

De in de formule weergegeven materiaalafhankelijke factor λ/d noemen we de warmtedoorgangscoefficiënt, ook bekend als de U-waarde. De reciproke² van de warmtedoorgangscoefficiënt is warmteweerstand d/λ . In de volgende paragraaf wordt de warmteweerstand (R) verder uitgewerkt.

¹ Dit is natuurlijk spreektaal, energie gaat niet verloren en verdwijnt dus niet, maar de warmte gaat wel naar buiten en blijft dus niet behouden voor de ruimte.

² Het omgekeerde of de reciproke van een getal of grootheid is 1 gedeeld door dat getal of die grootheid. Het omgekeerde van een breuk ontstaat door teller en noemer te verwisselen.

4.1 De warmteweerstand

Het begrip warmteweerstand wordt veel gebruikt in de bouwwereld. Dit omdat de eisen die in het Bouwbesluit gesteld worden aan de thermische kwaliteit van een constructie zijn uitgedrukt in de warmteweerstand R_c (met de index "c" van construction). In het Bouwbesluit zijn, bij nieuwbouw, de volgende eisen van toepassing voor de warmteweerstand: $R_c = 6,0 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ voor een dakconstructie, $R_c = 4,5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ voor een gevel en $R_c = 3,5 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ voor een vloerconstructie. Dit zijn waarden die "ten minste" behaald moeten worden. Een hogere waarde voor deze warmteweerstand betekent een betere isolatie van de gevel, dus minder energieverlies. Bij de bepaling van warmteweerstand R_c moet onder andere rekening worden gehouden met de invloed van veroudering van materialen en de wijze waarop de isolatiematerialen zijn aangebracht (op de bouwplaats zelf of in de fabriek). Dit laatste maakt dat er veel rekenstappen moeten worden uitgevoerd om de R_c -waarde conform de volgens het Bouwbesluit vereiste rekenmethodiek (NEN 1068) te bepalen. De warmteweerstand is dus ook van belang om energieverliezen van een gebouw te berekenen. In die situatie gebruiken de "totale warmteweerstand" R_T . Deze laatste waarde gebruiken we ook als we het temperatuurverloop door een constructie willen berekenen of wanneer we een oppervlaktetemperatuur van een constructie willen bepalen.

De totale warmteweerstand wordt als volgt bepaald:

$$R_T = R_{si} + \sum_i (R_{m,i}) + R_{se} \quad [(\text{m}^2\text{K})/\text{W}]$$

Waarin:

- R_T = De totale warmteweerstand van een constructie, zonder correctie op de U-waarde, in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
- R_{si} = De warmteovergangsweerstand aan de binnenzijde van de constructie in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.
De index s staat voor "surface" de index i voor inside.
- $R_{m,i}$ = De warmteweerstand van de materiaallagen (inclusief luchtspon) in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.
- R_{se} = De warmteovergangsweerstand aan de buitenzijde van de constructie in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$.
De index e staat voor "external".

In de volgende paragrafen zullen deze te berekenen en te bepalen weerstanden nader toegelicht worden.

4.1.1 De warmteweerstand van een enkelvoudige laag

De warmteweerstand van 1 materiaallaag berekent men als volgt:

$$R_m = \frac{d}{\lambda_{\text{calc}}} \quad [\text{m}^2 \text{ K/W}]$$

Waarin:

R_m = De warmteweerstand van een materiaallaag in $\text{m}^2\text{K/W}$

d = De dikte van de materiaallaag in m.

λ_{calc} = De rekenwaarde van warmtegeleidingscoëfficiënt in W/mK

De warmtegeleidingscoëfficiënt λ_{calc} van een materiaal wordt bepaald in een laboratorium. Belangrijke parameters die de grootte van deze coëfficiënt bepalen zijn: de massa, de porositeit en het vochtgehalte.

In

tabel 4-1 staan enkele veel gebruikte waarden³.

tabel 4-1: Warmtegeleidingscoëfficiënt van enkele materialen. De in deze tabel vermelde waarden moeten worden gezien als een richtlijn en deze worden dan ook gebruikt in de voorbeelden.

Materiaal	Warmtegeleidingscoëfficiënt λ_{calc} in W/mK
RVS (Roest vast staal)	17
Beton (gewapend)	2
Metselwerk (buiten, nat)	1
Kalkzandsteen (toepassing binnen)	0,9
Hout	0,18
EPS ("piepschuim")	0,040
Mineralewol (glas- en steenwol)	0,035
Polyurethaanschuim (PUR)	0,023

voorbeeld 4-1

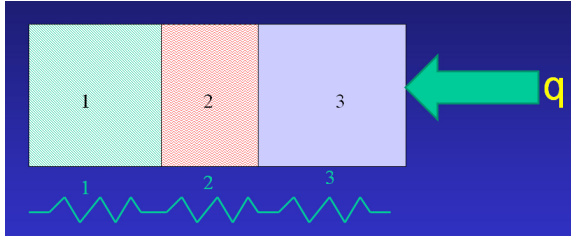
Bereken de warmteweerstand van een "steens" buitenmuur (220 mm metselwerk).

$$R_m = \frac{d}{\lambda_{\text{calc}}} = \frac{0,220}{1} = 0,22 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

³ Haal de juiste waarde voor een warmtegeleidingscoëfficiënt altijd uit KOMO-attesten en NEN normen (bijv: NEN 1068).e.d. In veel tabellenboeken staan onjuiste waarden weergegeven (vaak heel gunstig omdat geen rekening is gehouden met de invloed van vocht of veroudering). Ook op veel websites van veel fabrikanten zijn vaak onjuiste waarden weergegeven (niet onderbouwd d.m.v. officiële metingen).

4.1.2 De warmteweerstand van meerdere lagen

Het rekenen met “warmteweerstanden” heeft als voordeel dat eenvoudiger kan worden bepaald wat de totale warmteweerstand van een constructie is: warmteweerstanden kun je namelijk eenvoudig bij elkaar optellen. In de Figuur 4-1 is dit weergegeven.



Figuur 4-1 Optellen van warmteweerstanden van lagen

Voor de hierboven weergegeven 3 verschillende materialen bedraagt de totale warmteweerstand van de materiaallagen $\sum_i (R_{m,i})$:

$$\sum_i (R_{m,i}) = R_{m;1} + R_{m;2} + R_{m;3} = \left(\frac{d_1}{\lambda_{\text{calc};1}} + \frac{d_2}{\lambda_{\text{calc};2}} + \frac{d_3}{\lambda_{\text{calc};3}} \right) \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

voorbeeld 4-2


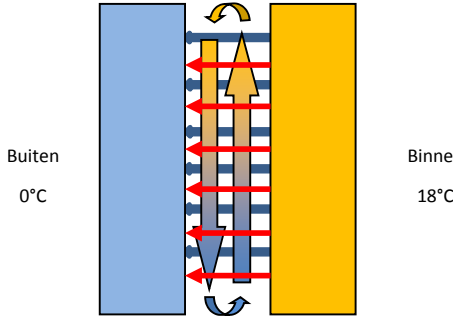
Bereken de warmteweerstand $R_{m,\text{tot}}$ van een “steens” buitenmuur (220 mm metselwerk) met aan de buitentzijde 100 mm EPS.

$$R_{m,\text{tot}} = R_{\text{metselwerk}} + R_{\text{EPS}} = \left(\frac{d_{\text{metselwerk}}}{\lambda_{\text{metselwerk}}} + \frac{d_{\text{EPS}}}{\lambda_{\text{EPS}}} \right) = \frac{0,220}{1} + \frac{0,1}{0,04} = 2,72 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

De volgende stap is het in rekening brengen van de warmteweerstand van een luchtlaag in een constructie (de “spouw” of “luchtsouw”).

4.1.3 De warmteweerstand van een luchtlaag in een constructie

In Nederland bestaan gevels vaak uit een spouwconstructie. Door het aanbrengen van een spouw wordt er een constructie gecreëerd waarbij wordt voorkomen dat het binnenblad nat kan worden. Een droog binnenblad voorkomt schimmel in de woning en is gunstig voor de thermische isolatie. De lucht in een spouw van een spouwmuur staat echter niet “stil”. In het buitenblad van een spouwmuur zijn vaak openingen aanwezig (open stootvoegen) en aan de bovenzijde van de spouw zijn vaak openingen om de spouw goed te kunnen ventileren. Dus in een spouw zijn vaak luchtstromingen aanwezig t.g.v. de winddruk op de constructie (geforceerde convectie).

	
<p>Figuur 4-2 Openingen langs kozijnen naar spouw</p>	<p>Figuur 4-3 Warmteoverdracht t.g.v. straling , convectie en geleiding in een spouw.</p>

Een ander aspect dat de lucht in een spouw in beweging is wordt veroorzaakt door het feit dat lucht aan de buitenzijde van het binnenspouwblad, doordat deze warmer is, zal stijgen en aan de binnenzijde van het buitenblad zal afkoelen. Dit zijn dus luchtstromingen ten gevolge van vrije of natuurlijke convectie. Doordat de isolatie in een spouwmuur steeds beter wordt zal dit effect steeds kleiner worden (weet u dit te verklaren?). De warmteweerstand van stilstaande lucht (geleiding) worden dus grotendeels tenietgedaan door de effecten van de warmteoverdracht door straling en convectie. Om nu niet voor iedere situatie een aangepaste warmteweerstand voor de spouw te berekenen worden alle warmte-overdrachtsmechanismen samengevoegd in een samengestelde warmteweerstand voor de spouw (R_{cav}). Voor een luchtspouw wordt een “genormeerde” warmteweerstand in rekening gebracht, hierin zijn de effecten van de warmteoverdrachtsmechanismen, geleiding, straling en convectie verwerkt.

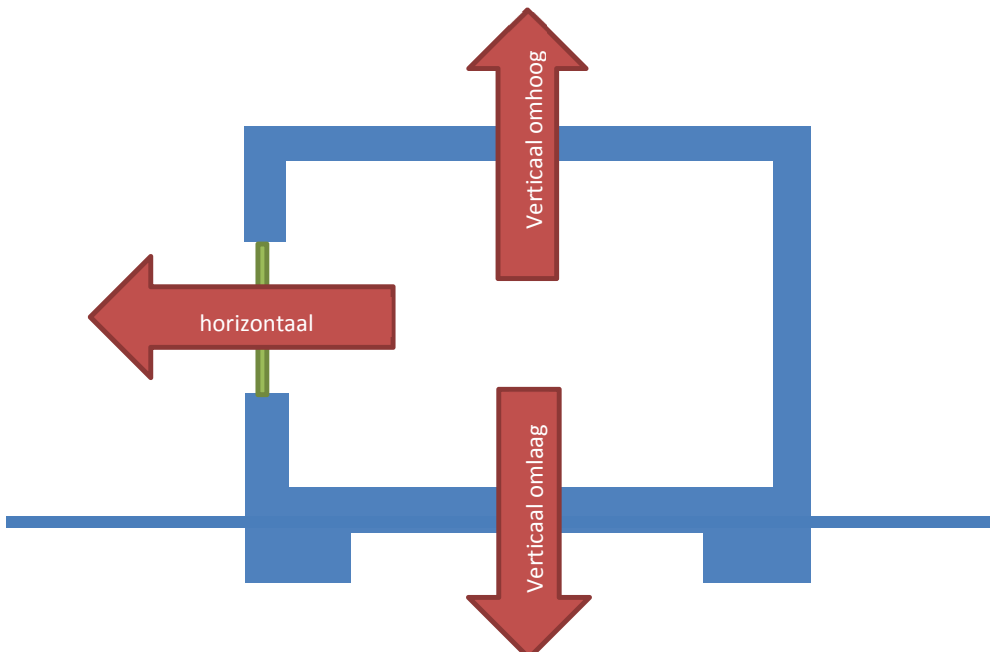
In de **tabel 4-2** zijn de warmteweerstanden weergegeven die voor een luchtspouw in rekening moeten worden conform de NEN 1068. Zoals u in deze tabel kunt zien zijn de warmteweerstanden afhankelijk van de richting van de warmtestroom. (Weet u waarom?)

Door veel fabrikanten van isolatiematerialen worden “warmte reflecterende” lagen aangebracht op de spouwzijde van de isolatieplaten. Hierdoor wordt de warmteoverdracht door straling in een spouw beperkt. De waarden die in rekening mogen worden gebracht voor de R_{cav} worden dan gunstiger. Wanneer een spouw “sterk geventileerd” wordt is het niet meer toegestaan om R_{cav} in rekening te brengen. Ook de warmteweerstand R_m van de lagen aan de buitenzijde van de spouw (zoals een buitenspouwblad) mogen dan niet meer in rekening gebracht worden.



Figuur 4-4 Isolatie met een warmte-reflecterende laag aan de spouwzijde (Bron: Kingspan Kooltherm K8)

tabel 4-2 Warmteweerstand van luchtspouw R_{cav} conform de NEN 1068. (Voor een spouw groter dan 20 mm)



Warmtestroom horizontaal (voor spouw ≥ 20 mm):

	Niet geventileerd ($R_{cav;nv}$)	Zwak geventileerd ($R_{cav;zv}$)	Sterk geventileerd ($R_{cav;sv}$)
Zonder reflectie	0,18	0,16	-
Met reflectie	0,57	0,45	-

Warmtestroom verticaal omhoog (voor spouw ≥ 20 mm):

	Niet geventileerd ($R_{cav;nv}$)	Zwak geventileerd ($R_{cav;zv}$)	Sterk geventileerd ($R_{cav;sv}$)
Zonder reflectie	0,16	0,13	-
Met reflectie	0,41	0,30	-

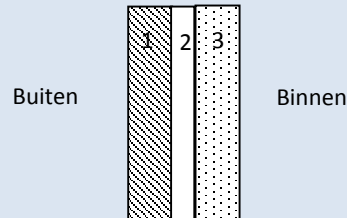
Warmtestroom verticaal omlaag:

Spouw dikte d [mm]		Niet geventileerd ($R_{cav;nv}$)	Zwak geventileerd ($R_{cav;zv}$)	Sterk geventileerd ($R_{cav;sv}$)
20 tot 25	Zonder reflectie	0,18	0,18	-
	Met reflectie	0,57	0,57	-
25 tot 30	Zonder reflectie	0,19	0,18	-
	Met reflectie	0,66	0,66	-

(voor afmetingen groter dan 30 mm, zie de NEN 1068)

voorbeeld 4-3

Bereken de warmteweerstand $\sum_i (R_{m,i})$ van een spouwmuur die bestaat uit een buitenspouwblad van 100 mm metselwerk (laag 1), een niet geïsoleerde, sterk geventileerde, luchtspouw van 40 mm (laag 2) en een binnenspouwblad van 100 kalkzandsteen (laag 3). Dit is een constructie die tot 1974 veel in woningen werd toegepast.



Antwoord:

De warmteweerstand van de spouw zoeken we op in tabel 4.2: bij een dikte van een luchtspouw van 40 mm en een horizontale richting van de warmtestroom volgt: $R_{cav}=0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$



$$\sum_i (R_{m,i}) = R_{m_1} + R_{m_2} + R_{m_3} = \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + R_{cav} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right) = \frac{0,1}{1} + 0,18 + \frac{0,1}{0,9} = 0,39 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

LET OP:

Een veelgemaakte fout is om alsnog de dikte van de luchtspouw delen door warmtegeleidingscoëfficiënt van stilstaande lucht of nog erger: door de R_{cav} uit de tabel. In het eerste geval zou u dan de volgende waarde krijgen:

$$R_{m_2} = \left(\frac{d}{\lambda} \right) = \frac{0,04}{0,025} = 1,6 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$



In het tweede geval:

$$R_{m_2} = \left(\frac{d}{\lambda} \right) = \frac{0,04}{0,18} = 0,222 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$



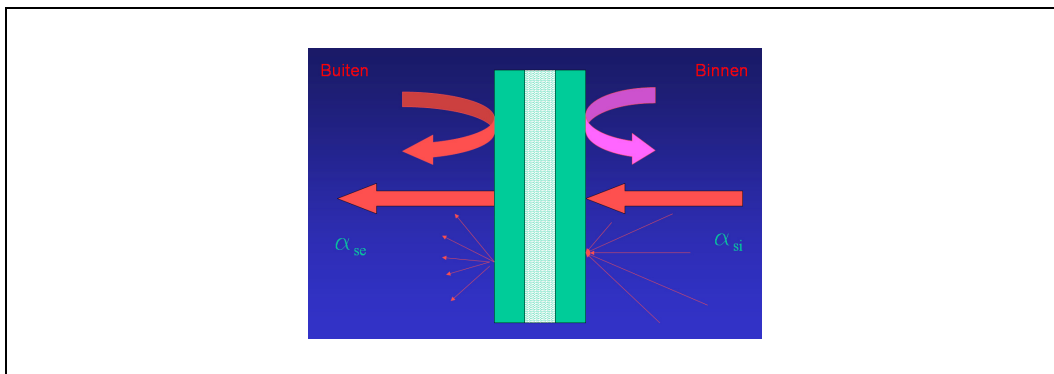
De beide situaties zijn fout!!

4.1.4 De warmteweerstandsweerstanden R_{si} en R_{se}

Om de totale warmteweerstand (R_T) te bepalen van een constructie moeten ook de warmteoverdrachtsweerstand aan de binnen- en de buitenzijde van de constructie in rekening gebracht worden.

Wanneer men een buitengevel bekijkt wordt er aan de binnenzijde van deze gevel vaak warmte toegevoerd door de warmtetransportmechanismen straling en convectie en wordt er aan de buitenzijde vaak warmte afgeven aan de omgeving door de effecten van straling en convectie. Bijvoorbeeld: hoe harder het waait, des te meer warmte wordt er afgevoerd.

Omdat de klimaatomstandigheden steeds verschillen (de temperaturen en windsnelheden, binnen en buiten, wisselen continu) zijn ook deze waarden genormeerd.

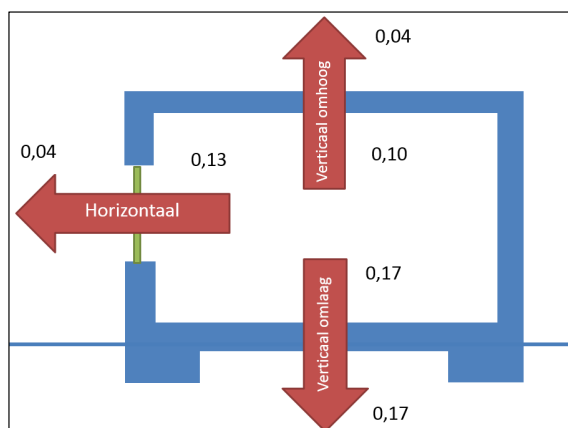


Bij een constructie met een horizontale warmtestroom wordt aan de binnenzijde een warmteoverdrachtscoëfficiënt aangehouden van $h_{si} = 7,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ en aan de buitenzijde een warmteoverdrachtscoëfficiënt van $h_{se} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$. Omdat we graag weerstanden bij elkaar optellen rekenen we met de reciproke waarde van de warmteoverdrachtscoëfficiënt, deze waarde noemen we de warmteoverdrachtsweerstand. Voor een **horizontale** warmtestroom krijgen we dan de volgende waarden voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt:

$$\text{Binnenzijde: } R_{si} = \frac{1}{h_{si}} = \frac{1}{7,5} = 0,13 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

$$\text{Buitenzijde: } R_{se} = \frac{1}{h_{se}} = \frac{1}{25} = 0,04 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

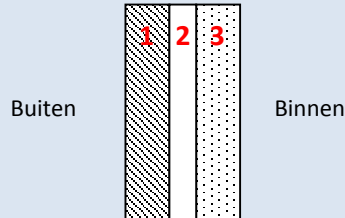
In figuur 4-5 zijn voor de verschillende richtingen van de warmtestromen, en afhankelijk van de situatie of een constructie direct aan buiten grenst of aan een besloten ruimte zoals een kruipruimte, de verschillende aan te houden warmteovergangsweerstanden weergegeven.



figuur 4-5 Warmteoverdrachtsweerstandens $[\text{m}^2\text{K/W}]$ conform de NEN 1068

voorbeeld 4-4

Bereken de warmteweerstand R_T van een spouwmuur die bestaat uit een buitenspouwblad van 100 mm metselwerk (laag 1), een niet geïsoleerde luchtspouw van 40 mm (laag 2) en een binnenspouwblad van 100 kalkzandsteen (laag 3).



Antwoord:

De warmteweerstand van de spouw zoeken we op in **tabel 4-2** : bij een dikte van een luchtlaag van 40 mm en een horizontale richting van de warmtestroom volgt: $R_{cav}=0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$.

De warmteoverdrachtsweerstand zoeken we op in figuur 4-5, de constructie grenst aan buitenlucht en er is een horizontale warmtestroom aanwezig, hieruit volgt dat $R_{si}=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ en $R_{se}=0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$.

$$\begin{aligned} R_T &= R_{se} + \sum_i (R_{m;i}) + R_{si} = R_{se} + (R_{m_1} + R_{m_2} + R_{m_3}) + R_{si} \\ &= R_{se} + \left(\frac{d_1}{\lambda_{calc 1}} + R_{cav} + \frac{d_3}{\lambda_{calc 3}} \right) + R_{si} \end{aligned}$$

$$R_T = 0,04 + \frac{0,1}{1} + 0,18 + \frac{0,1}{0,9} + 0,13 = 0,56 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

voorbeeld 4-5

Bereken de warmteweerstand R_T van een begane grondvloer gelegen boven een kruipruimte. Vanuit de leverancier wordt opgegeven dat de $R_{m;tot}$ waarde van deze vloer $3,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ bedraagt. (Natuurlijk vastgelegd in een KOMO-attest met certificaat.)

Antwoord:

De warmteoverdrachtsweerstand zijn zichtbaar in figuur 4-5. De constructie grenst aan een kruipruimte: hieruit volgt dat $R_{si}=0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$ en $R_{se}=0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$.

$$R_T = 0,17 + 3,0 + 0,17 = 3,34 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

4.2 De warmtedoorgangscoefficiënt U_T

De warmtedoorgangscoefficiënt U (ook wel de "U-waarde" genoemd) is een term die vaak gebruikt wordt, vooral de thermische kwaliteit van beglazing, deuren en kozijnen wordt uitgedrukt in de U-waarde. Zo wordt er in het Bouwbesluit, wanneer men spreekt over beglazing (U_{gl}), deurbladen/panelen (U_p) en kozijnen (U_{fr}), een eis gesteld dat de gemiddelde U-waarde hiervan (uitgedrukt met U_w) ten hoogste 1,65 W/m^2K mag bedragen. De U-waarde is de reciproke waarde van de warmteweerstand (R_T). Dus wanneer men de U-waarde afleest is dat dus inclusief de eerder omschreven warmteoverdrachtsweerstand.

In formulevorm:

$$U_T = \frac{1}{R_T} \quad [W/m^2K]$$

Waarin:

U_T = De warmtedoorgangscoefficiënt in W/m^2K

R_T = De totale warmteweerstand in m^2K/W

voorbeeld 4-6

Bereken de warmtedoorgangscoefficiënt U_T van de begane grondvloer zoals is gebruikt in het voorbeeld 4.5.

Antwoord:

De U_T -waarde is:

$$U_T = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{3,34} = 0,299 \quad [W/m^2K]$$

voorbeeld 4-7

Enkel glas (5 mm) heeft een warmtedoorgangscoefficiënt U_g van 5,7 W/m^2K . Bereken de warmteweerstand R_m van deze ruit?

Antwoord:

$$U_g = \frac{1}{R_T} \Rightarrow R_T = \frac{1}{U_g} = \frac{1}{5,7} = 0,17544 \quad [m^2K/W]$$

$$R_T = R_{se} + R_m + R_{si} \Rightarrow R_c = R_m - R_{se} - R_{si} = 0,17544 - 0,04 - 0,13 = 0,00544 \quad [m^2K/W]$$

Dit is dus een heel klein getal.

4.3 Het berekenen van de Warmtestroomdichtheid q

De warmtestroomdichtheid is de hoeveelheid warmte door geleiding die per tijdseenheid door één m² stroomt en heeft als symbool q (W/m²). De warmtestroomdichtheid berekenen we als volgt:

$$q_{cd} = \frac{\Delta\theta}{R_T} \quad [W/m^2]$$

Waarin:

q_{cd} = De warmtestroomdichtheid in W/m² (de index cd staat voor conduction)

$\Delta\theta$ = Het temperatuurverschil over de beschouwde constructie in °C of K

R_T = Totale warmteweerstand in m²K/W

Of, omdat:

$$U_T = \frac{1}{R_T}$$

$$q_{cd} = U_T \cdot \Delta\theta \quad [W/m^2]$$

Waarin:

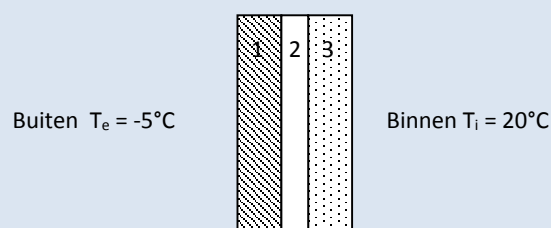
q_{cd} = De warmtestroomdichtheid in W/m²

$\Delta\theta$ = Het temperatuurverschil over de beschouwde constructie in °C of K

U_T = De warmtedoorgangscoefficiënt in W/m²K

voorbeeld 4-8

Bereken de warmtestroomdichtheid van de in voorbeeld 4-4 weergegeven constructie bij een binnentemperatuur T_i van 20°C en een buitentemperatuur T_e van -5°C.



Antwoord:

$$q_{cd} = \frac{\Delta\theta}{R_T} = \frac{\theta_i - \theta_e}{R_T} = \frac{20 - (-5)}{0,56} = \frac{25}{0,56} = 44,64 \quad [W/m^2]$$

voorbeeld 4-9

Enkel glas (5 mm) heeft een warmtedoorgangscoefficiënt U_g van $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Bereken de warmtestroomdichtheid door deze ruit bij een binnentemperatuur Θ_i van 18°C en een buitentemperatuur Θ_e van -10°C .

Antwoord:

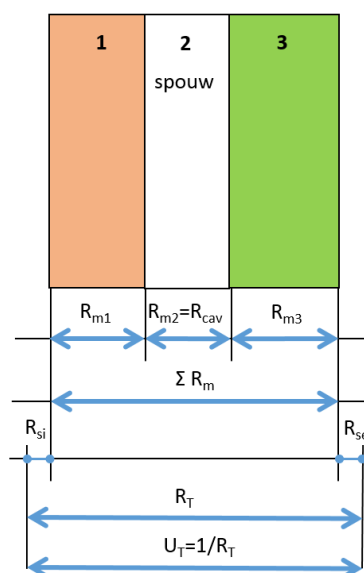
$$q_{cd} = U_g \cdot \Delta\theta = 5,7 \cdot (18 - -10) = 159,6 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

4.4 Overzicht

Om de warmtestroomdichtheid door een constructie te berekenen houden we de volgende volgorde aan:

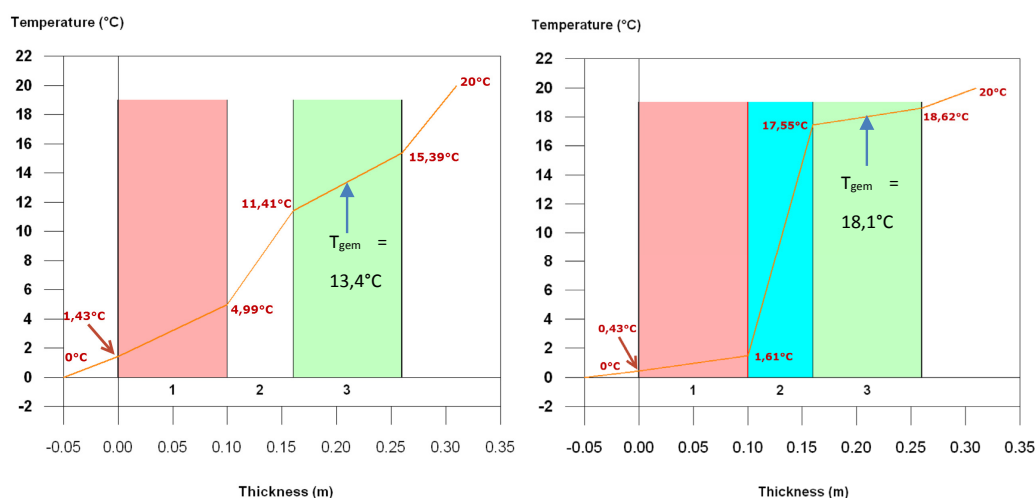
1	Bereken de warmteweerstand van de afzonderlijke materiaallagen.	$R_m = \left(\frac{d}{\lambda}\right)$
2	Lees de warmteweerstand van de eventueel aanwezig spouw af uit, zie tabel 4-2.	R_{cav}
3	Bereken de som van de warmteweerstanden van alle materiaallagen (dus inclusief de spouw).	$\sum_{i=1}^{i=n} R_{m_n}$
4	Bepaal de warmteoverdrachtsweerstand, zie figuur 4-5	R_{si} en R_{se}
5	Bereken de totale warmteweerstand.	$R_T = R_{si} + \sum R_m + R_{se}$
6	Bereken de warmtestroomdichtheid q .	$q_{cd} = \frac{\Delta\theta}{R_T}$

Hieronder is een overzicht gegeven van de verschillende warmteweerstanden en de U-waarde.



5 Berekenen van het temperatuurverloop in een constructie

In figuur 5-1 is het verloop gegeven van een temperatuur in een spouwmuur zonder isolatie. Te concluderen is dat, doordat de spouw in deze constructie niet geïsoleerd is, de temperaturen aan het binnenoppervlak laag zijn (15,39 °C) en de temperaturen in de constructie ook (gemiddelde temperatuur binnenspouwblad = 13,4 °C). Lage temperaturen aan de binnenzijde van een constructie vinden we niet “comfortabel”, en kunnen ook leiden tot schimmelgroei. In figuur 5-1 is ook een voorbeeld gegeven van dezelfde constructie waarbij de spouw is voorzien van 60 mm isolatie (navulling). De binnenoppervlaktetemperatuur van de constructie is nu veel hoger (18,6 °C) en ook de gemiddelde temperatuur van het binnenspouwblad is hoger (18,1 °C).



figuur 5-1 Temperatuurverloop in een spouwmuur zonder isolatie (links) en een spouwmuur met 60 mm isolatie (rechts).

Na het isoleren van de spouw in deze muur verliest de constructie dus minder energie, is de binnenoppervlaktetemperatuur hoger, is er meer comfort voor de bewoners van de woning en is de kans op oppervlaktecondensatie kleiner. Er zijn constructies waarbij door toepassing van isolatie de temperaturen in een constructie zo laag kunnen worden dat daar schimmelgroei kan ontstaan of dat door verandering van temperaturen in een constructie thermische spanningen kunnen optreden met als gevolg constructieve schade. Daarom is het van belang om en goed beeld te hebben hoe het temperatuurverloop in een constructie is.

Temperatuurverloop in een constructie kunnen we via 3 methoden bepalen:

1. De “tabelmethode”, deze wordt uitgewerkt in § 5.1
2. De “directe methode”, deze wordt uitgewerkt in § 5.2
3. Grafische methode (wordt nog niet beschreven)

In de eerste methode wordt het temperatuurverschil per laag berekend. Bij de tweede methode wordt direct de temperatuur op een punt in de constructie berekend. De eerste methode is geschikt wanneer men zelf het verloop van temperaturen in een constructie wil tekenen. De tweede methode is geschikt om snel een temperatuur in een constructie te bepalen, dit om bijvoorbeeld snel een berekening te controleren die gemaakt is met software.

5.1 Temperatuurverloop in een constructie met de “tabelmethode”

Om het temperatuurverloop in een constructie uit te rekenen moet de volgende werkvolgorde aangehouden worden:

1. Bepaal de warmteweerstand per laag (R_{mi})
2. Bepaal de totale warmteweerstand R_T (dus inclusief R_{si} en R_{se})
3. Bepaal het temperatuurverschil tussen de binnen- en de buitenlucht $\Delta\theta_{tot}$
4. Bepaal het temperatuurverschil per laag $\Delta\theta_{mi}$ per laag
5. Bereken de optredende temperaturen

Het temperatuurverschil per laag wordt bepaald met de volgende formule:

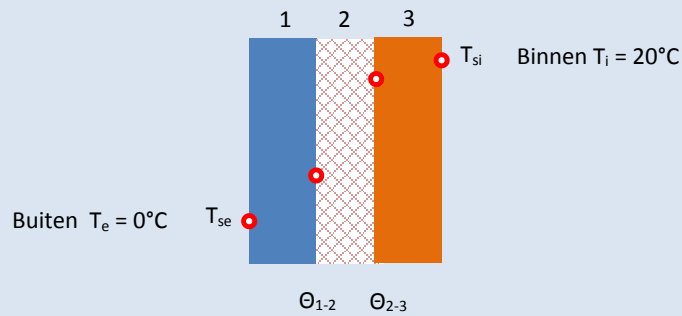
$$\Delta\theta_{mi} = \frac{R_{mi}}{R_T} \times \Delta\theta_{tot} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Waarin:

- $\Delta\theta_{mi}$ = Het temperatuurverschil over de beschouwde laag in $^{\circ}\text{C}$
 R_{mi} = De warmteweerstand van de beschouwde materiaallaag in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$
 R_T = De totale warmteweerstand in $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$

In voorbeeld 5-1 wordt deze methode verder uitgewerkt.

voorbeeld 5-1



Opbouw spouwmuurconstructie:

Laag 1: Buitenspouwblad metselwerk, $d_1 = 100 \text{ mm}$, $\lambda_1 = 1 \text{ m}^2\text{K/W}$

Laag 2: Isolatie, minerale wol navulling, $d_1 = 60 \text{ mm}$, $\lambda_2 = 0,040 \text{ m}^2\text{K/W}$

Laag 3: Binnenspouwblad kalkzandsteen, $d_1 = 100 \text{ mm}$, $\lambda_3 = 0,9 \text{ m}^2\text{K/W}$

Bereken het temperatuurverloop in deze constructie.

In het voorbeeld wordt per stap aangegeven wat er bepaald moet worden, de toegevoegde onderdelen zijn **rood** weergegeven.

Stap 1 : Bepaal de warmteweerstand per laag (R_{mi})

Laag	Materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R_{mi} [$\text{m}^2\text{K/W}$]
3	kalkzandsteen	0,1	0,9	0,111
2	minerale wol	0,06	0,04	1,500
1	metselwerk	0,1	1	0,100

Stap 2: Bepaalde totale warmteweerstand R_T (inclusief R_{si} en R_{se})

Laag	Materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R_{mi} [$\text{m}^2\text{K/W}$]
	R_{si}			0,13
3	metselwerk	0,1	1	0,100
2	minerale wol	0,06	0,04	1,500
1	kalkzandsteen	0,1	0,9	0,111
	R_{se}			0,04
	R_T			1,881

Stap 3: Bepaal het temperatuurverschil tussen de binnen- en de buitenlucht $\Delta\theta_{tot}$

$$\Delta\theta_{tot} = \theta_i - \theta_e = 20 - 0 = \mathbf{20 \text{ }^\circ\text{C}}$$

Stap 4: Bepaal het temperatuurverschil per laag $\Delta\theta_{mi}$ per laag

Het temperatuurverschil per laag wordt bepaald met de volgende formule:

$$\Delta\theta_{mi} = \frac{R_{mi}}{R_T} \times \Delta\theta_{tot} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Dit temperatuurverschil moet voor alle lagen en ter plaatse van de warmteovergangsweerstanden bepaald worden.

Warmteovergangsweerstand binnen	$\Delta\theta_{si} = \frac{0,13}{1,881} \times 20 = 1,382 \quad [^{\circ}\text{C}]$
Laag 1	$\Delta\theta_1 = \frac{0,10}{1,881} \times 20 = 1,063 \quad [^{\circ}\text{C}]$
Laag 2	$\Delta\theta_2 = \frac{1,5}{1,881} \times 20 = 15,948 \quad [^{\circ}\text{C}]$
Laag 3	$\Delta\theta_3 = \frac{0,111}{1,881} \times 20 = 1,180 \quad [^{\circ}\text{C}]$
Warmteovergangsweerstand buiten	$\Delta\theta_{se} = \frac{0,04}{1,881} \times 20 = 0,425 \quad [^{\circ}\text{C}]$

Stap 5: Bereken de optredende temperaturen

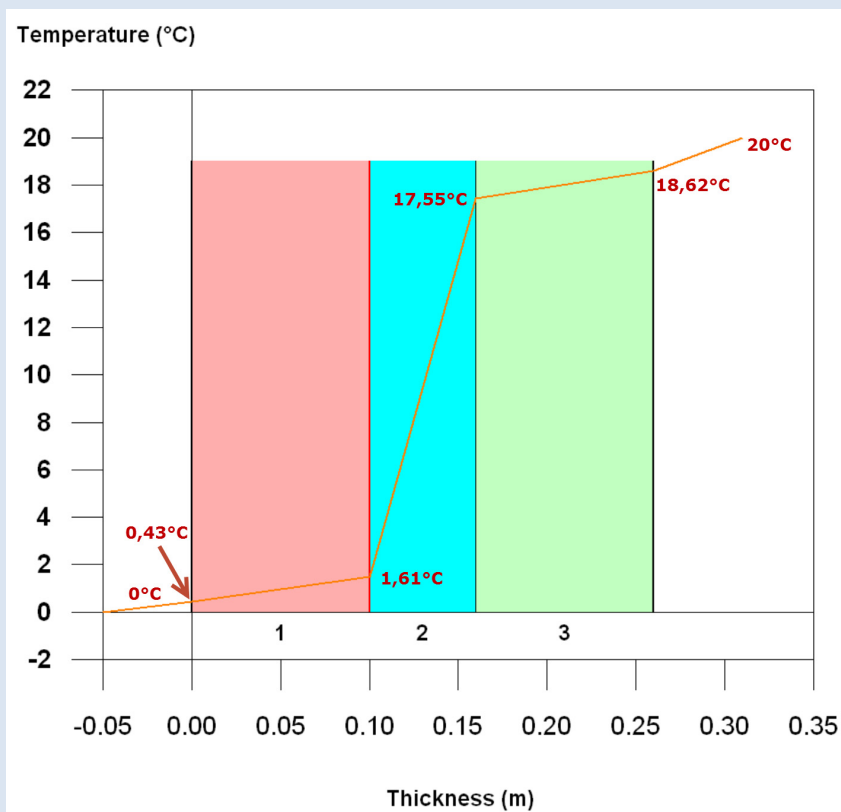
We plaatsen alle berekende temperaturen en temperatuurverschillen in de tabel:

Laag	Materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R_{mi} [m ² K/W]	$\Delta\theta_{mi}$ °C
	R_{si}			0,13	1,382
3	metselwerk	0,1	1	0,100	1,063
2	minerale wol	0,06	0,04	1,500	15,948
1	kalkzandsteen	0,1	0,9	0,111	1,180
	R_{se}			0,04	0,425
	R_T			1,881	

Hierna worden we de temperaturen op de "overgangen" tussen de materiaallagen bepaald.

Laag	Materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R_{mi} [m ² K/W]	$\Delta\theta_{mi}$ °C	θ_{laag} °C
						20
	R_{si}			0,13	1,382	
						18,62
3	metselwerk	0,1	1	0,100	1,063	
						17,55
2	minerale wol	0,06	0,04	1,500	15,948	
						1,61
1	kalkzandsteen	0,1	0,9	0,111	1,180	
						0,43
	R_{se}			0,04	0,425	
						0,00
	R_T			1,881		

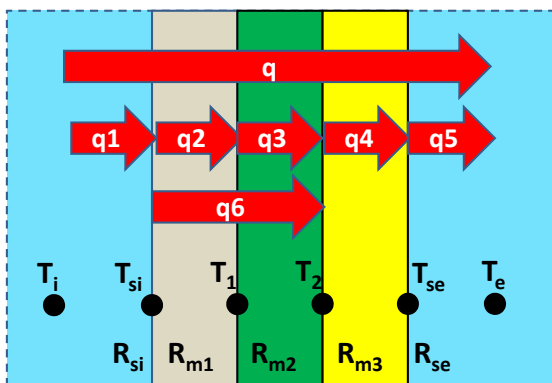
In de onderstaande figuur is het temperatuurverloop getekend.



5.2 Temperatuurverloop in een constructie met de “directe methode”.

In hoofdstuk 4 is de bepalingsmethode gegeven voor de totale warmteweerstand (R_T), warmtedoorgangscoëfficiënt (U_T) en de warmtestroomdichtheid (q_{cd}). Zijn deze waarden bekend dan is het mogelijk om op elke plaats in een te beschouwen constructie de temperatuur te bepalen.

Bij een stationaire situatie (dus geen wisselingen van temperaturen aan het oppervlak van de constructie en zonder de rekening te houden met de warmtecapaciteit van de constructie) is de warmtestroomdichtheid q_{cd} door elk deel van een constructie constant. Dus tussen de binnen- en de buitenlucht stroomt er net zoveel warmte als tussen de binnenlucht en het binnenoppervlak van de constructie, zie onderstaande figuur.



Uit het bovenstaande volgt:

$$q_{cd} = q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = q_6 \quad \text{W/m}^2$$

$$q_{cd} = \frac{\Delta\theta}{R_T} = \frac{\theta_i - \theta_e}{R_{si} + R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{se}} \quad \text{W/m}^2$$

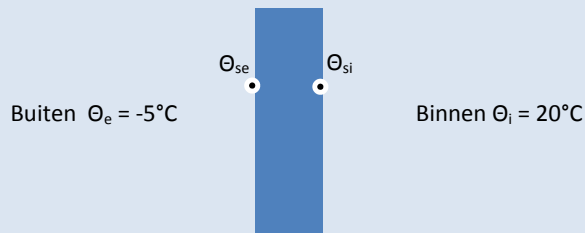
De warmtestroomdichtheid tussen binnen en het binnenoppervlak is:

$$q_{cd} = q_1 = \frac{\theta_i - \theta_{si}}{R_{si}} \quad \text{W/m}^2$$

De warmtestroomdichtheid tussen het binnenoppervlak en de overgang tussen laag 2 en 3 is:

$$q_{cd} = \frac{\theta_{si} - \theta_2}{R_{m1} + R_{m2}} \quad \text{W/m}^2$$

voorbeeld 5-2



Bereken de oppervlaktetemperaturen Θ_{si} en Θ_{se} van een “steens” buitenmuur (220 mm metselwerk) bij de gegeven binnen- en buitentemperatuur.

Stap 1 :Bereken de warmteweerstand

$$R_m = \left(\frac{d}{\lambda_{\text{calc}}} \right) = \frac{0,220}{1} = 0,22 \text{ m}^2\text{K/W}$$

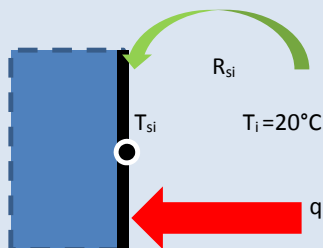
Stap 2: Bereken de totale warmteweerstand

$$R_T = R_{si} + R_m + R_{se} = 0,13 + 0,22 + 0,04 = 0,39 \text{ m}^2/\text{KW}$$

Stap 3: bereken q_{cd}

$$q_{cd} = \frac{\Delta\theta}{R_T} = \frac{20 - -5}{0,39} = 64,103 \text{ W/m}^2$$

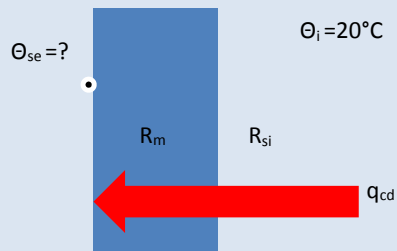
De uitkomsten van q_{cd} zo min mogelijk afronden, deze waarde heeft u verder nodig in de berekening en teveel afronden leidt tot een te grote onnauwkeurigheid!



Stap 4: Bereken T_{si} (alleen T_{si} is nog een onbekende)

$$q_{cd} = \frac{\theta_i - \theta_{si}}{R_{si}} = \frac{(20 - \theta_{si})}{0,13} = 64,103 \Rightarrow 20 - \theta_{si} = 0,13 * 64,103$$
$$\Rightarrow \theta_{si} = 11,66 \text{ }^\circ\text{C}$$

Vervolg voorbeeld 5-2



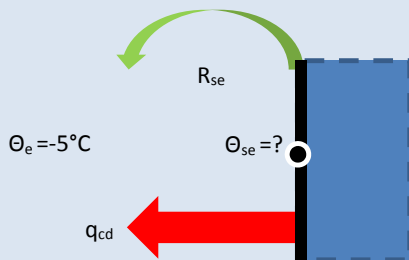
Stap 5: Bereken θ_{se} (alleen θ_{se} is nog een onbekende).

Tussen de bekende binnentemperatuur θ_i en de te bepalen temperatuur θ_{se} komt de bekende warmtestroom q_{cd} de 2 warmteweerstanden R_{si} en R_m "tegen". Deze moeten dan ook worden beschouwd.

$$q_{cd} = \frac{\theta_i - \theta_{se}}{R_{si} + R_m} = \frac{(20 - \theta_{se})}{0,13 + \left(\frac{0,22}{1}\right)} = \frac{(20 - \theta_{se})}{0,35} = 64,103$$

$$\Rightarrow 20 - \theta_{se} = 0,35 * 64,103 \Rightarrow \theta_{se} = -2,436^\circ\text{C}$$

Stap 5a: TER CONTROLE VAN STAP 5: We kunnen de buitenoppervlaktetemperatuur T_{se} ook nog berekenen vanuit de bekende buitentemperatuur, hier onder volgt dan de uitwerking

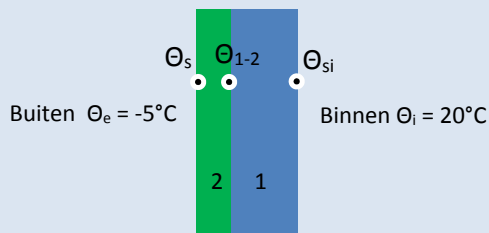


$$q_{cd} = \frac{\theta_{se} - \theta_e}{R_{se}} = \frac{(\theta_{se} - -5)}{0,04} = 64,103 \Rightarrow \theta_{se} + 5 = 0,04 * 64,103$$

$$\Rightarrow \theta_{se} = -2,436^\circ\text{C} \quad (\text{dit is hetzelfde antwoord bij als bij stap 5, dus goed berekend})$$

Op deze wijze kan men dus op iedere positie in een constructie een temperatuur bepalen, ook in het midden van een element of op de overgang tussen twee elementen. In voorbeeld 5-3 is dit verder uitgewerkt.

voorbeeld 5-3



De hierboven weergegeven constructie is opgebouwd als een “steens” buitenmuur (220 mm metselwerk) met aan de buitenzijde 100 mm EPS. Bereken de oppervlaktetemperaturen Θ_{si} en Θ_{se} en temperatuur Θ_{1-2} (de temperatuur ter plaatse van de overgang van materiaal 1 naar materiaal 2).

Stap 1 :Bereken de warmteweerstand van materiaallagen

$$R_{m_1} = \left(\frac{d_1}{\lambda_1}\right) = \frac{0,220}{1} = 0,220 \text{ m}^2\text{K/W} \quad R_{m_2} = \left(\frac{d_2}{\lambda_2}\right) = \frac{0,1}{0,04} = 2,50 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Stap 2: Bereken de totale warmteweerstand

$$R_T = R_{si} + R_m + R_{se} = 0,13 + 0,22 + 2,50 + 0,04 = 2,89 \text{ m}^2/\text{KW}$$

Stap 3: bereken q_{cd}

$$q_{cd} = \frac{\Delta\theta}{R_T} = \frac{20 - -5}{2,89} = 8,65 \text{ W/m}^2$$

Stap 4: Bereken de temperaturen

$$\Theta_{si} = ? \quad q = \frac{\Theta_i - \Theta_{si}}{R_{si}} = \frac{(20 - \Theta_{si})}{0,13} = 8,65 \Rightarrow \Theta_{si} = 18,88 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{1-2} = ? \quad q = \frac{\Theta_i - \Theta_{1-2}}{R_{si} + R_{m_1}} = \frac{(20 - \Theta_{1-2})}{0,13 + 0,22} = 8,65 \Rightarrow \Theta_{1-2} = 16,97 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Theta_{se} = ? \quad q = \frac{\Theta_i - \Theta_{se}}{R_{si} + R_{m_1} + R_{m_2}} = \frac{(20 - \Theta_{se})}{0,13 + 0,22 + 2,5} = 8,65 \Rightarrow \Theta_{se} = -4,65 \text{ }^\circ\text{C}$$

6 Warmteweerstand en Warmtedoorgangscoefficiënt conform het Bouwbesluit

In het Bouwbesluit wordt aangegeven dat de warmteweerstand (R_c) van een uitwendige scheidingsconstructie moet worden bepaald conform de rekenmethode zoals omschreven is in de NEN1068. In deze rekenmethodiek wordt ook rekening gehouden met de doorbreking van isolatielagen door bijvoorbeeld spouwankers en de te verwachten bouwkwaliteit (wordt een constructie in de fabriek gemaakt of op de bouwplaats). Ook worden er eisen gesteld aan constructieonderdelen waarbij de constructie wordt onderbroken door bijvoorbeeld een houten stijl- en regelwerk (samengestelde constructie). Verder wordt er een methode beschreven om de gemiddelde U_w waarden van een kozijn met glas te bepalen. In de eerdere hoofdstukken is de basis omschreven van het warmtetransport in constructies. In dit hoofdstuk wordt omschreven hoe de R_c en U waarden kunnen worden bepaald volgens de eisen die in het Bouwbesluit worden gesteld.

In het Bouwbesluit worden in artikel 5.3 de volgende eisen gesteld aan de thermische isolatie van de uitwendige scheidingsconstructie:

Onderdeel	Eis
Verticale constructie (bijv. een gevel)	R_c is ten minste $4,5 \text{ m}^2\text{K/W}$
Horizontale en schuine constructie (Dak)	R_c is ten minste $6,0 \text{ m}^2\text{K/W}$
Scheidingsconstructie die grenst aan grond of water (bijv. een begane grondvloer)	R_c is ten minste $3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$
Ramen, deuren en kozijnen	U_w is ten hoogste $2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$. De gemiddelde U_w van alle puien van een gebouw (waarvoor een energieprestatieberekening is gemaakt) bedraagt ten hoogste $1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ zijn.

De volgende situaties worden behandeld:

1. Warmteweerstand van een spouwmuur met spouwankers
2. Warmteweerstand van een samengestelde constructie
3. Warmtedoorgangscoefficiënt van een pui

6.1 Warmteweerstand van een spoumuur met spouwankers

In de rekenmethode, zoals omschreven is in hoofdstuk 4 van dit dictaat, wordt geen rekening gehouden met de invloed van het warmteverlies van spouwankers op de warmteweerstand. Deze effecten zijn echter wel van invloed, immers een perfect isolerende laag in een spoumuur wordt onderbroken door metalen ankers met een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt. In de praktijk worden berekeningen meestal gemaakt met de daarvoor beschikbare software. In bijlage 1 is voorbeeld uitgewerkt zodat duidelijk is wat de waarden inhouden die uiteindelijk in de resultaten van de computerberekeningen worden vermeld.

Het bepalen van de warmteweerstand van een spoumuur met spouwankers wordt beschreven in bijlage 1. Zoals zichtbaar is in bijlage 1, is de methode om een R_c waarde te bepalen volgens het Bouwbesluit zeer bewerkelijk. Gelukkig zijn er tools beschikbaar waarmee de R_c waarde voor de meest voorkomende constructies kan worden berekend. In figuur 6-1 zijn de resultaten gegeven wanneer de constructie uit het voorbeeld in bijlage 1 wordt berekend met de SBRCURnet rekentool (www.sbrcur.net).

Laag	Bron	Materiaal	Dikte (mm)	λ_{calc} (W/m·K)	R_m ($m^2 \cdot K/W$)
Binnenspouwblad	Eigen invoer	kalkzandsteen	100	0.900	0.1111
Isolatie	Eigen invoer	isolatie	170	0.035	4.8571
Extra isolatielaag	N.v.t.				
Spouwankers	SBR-Referentiedetails	Spouwanker RVS Diameter: 4 mm Aantal: 4 per m^2		17.000	
Spouw		Ongeventileerd	30		0.1800
Buitenspouwblad	Eigen invoer	metselwerk	100	1.000	0.1000
Totale dikte constructie:			400		

R_{si}	= 0.13 $m^2 \cdot K/W$	R_c Bouwbesluit = 4.9 $m^2 \cdot K/W$	U_T	= 0.18 $W/m^2 \cdot K$
R_{se} Buitenlucht	= 0.04 $m^2 \cdot K/W$		ΔU	= 0.01 $W/m^2 \cdot K$
R_T	= 5.42 $m^2 \cdot K/W$		$U_C = U_T + \Delta U$	= 0.20 $W/m^2 \cdot K$
ΔU_{la}	= 0.00 $W/m^2 \cdot K$		$R_C = 1/U_C - R_{si} - R_{se}$	= 4.91 $m^2 \cdot K/W$
$\Delta U_w = 0.05 \cdot U_T$	= 0.01 $W/m^2 \cdot K$		R_C Bouwbesluit	= 4.9 $m^2 \cdot K/W$

figuur 6-1 Berekening van de R_c -waarde van een spoumuur met de invloed van spouwankers, bepaald met de SBRCURnet rekentool [15]



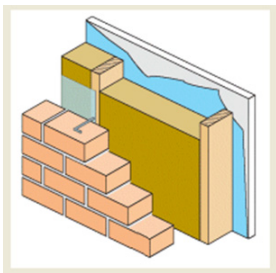
figuur 6-2 Voorbeeld van “het doorbreken” van de thermische isolatie door ankers en leidingen ter plaatse van een vloer van een woning boven een parkeergarage.



figuur 6-3 Het gevolg van het aanbrengen van bevestigingsmiddelen: doorbreking van de thermische isolatie (dus extra warmteverlies)

6.2 Warmteweerstand van samengestelde constructies

Een veel voorkomende constructie is dat het binnenblad van een spouwmuur is opgebouwd uit een houten stijl- en regelwerk waarin isolatie is aangebracht. In die situatie wordt de isolatielaag, vaak met een warmtegeleidingscoëfficiënt $\lambda_{\text{calc}} = 0,035 \text{ W/mK}$ of beter, onderbroken door hout met een warmtegeleidingscoëfficiënt λ_{calc} van circa $0,17 \text{ W/mK}$. De warmteweerstand van deze laag is dan niet meer te bepalen met een 1-dimensionale berekening maar moet dan eigenlijk worden bepaald via een 2-d of 3-d rekenmethode (eindig elementen model). Voor veel praktijksituaties is het echter niet nodig om zulke ingewikkelde berekeningen te maken en daarom is in de NEN1068 dan ook een rekenmethode opgenomen die de werkelijke warmteweerstand van deze constructie dan ook benaderd.



figuur 6-4 Binnenspouwblad samengestelde wand [i6]

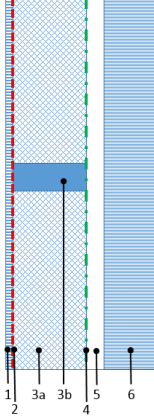
De invloed van het stijl- en regelwerk op de gemiddelde warmteweerstand is groot. Een gemiddelde gevelconstructie kan voor 15-20% uit stijl- en regelwerk bestaan. De berekening van deze samengestelde constructie is nog complexer dan voor een spouwmuur. Ook voor deze berekening geldt dat deze in de “praktijk” met behulp van software wordt uitgevoerd. In voorbeeld 6-1 is de R_c -waarde van deze constructie bepaald. Uit het rekenresultaat volgt dat wanneer een laag isolatie met een dikte van 170 mm wordt toegepast, in combinatie met stijl- en regelwerk, de R_c waarde van de constructie nog maar $3,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ bedraagt. Deze constructie voldoet dus niet aan de eis die wordt gesteld in het Bouwbesluit ($R_c \geq 4,5 \text{ m}^2\text{K/W}$).



Figuur 6-5 Houtskeletbouwconstructie

voorbeeld 6-1

Berekening van de R_c -waarde van een samengestelde constructie met de SBRCURnet rekentool. Aangezien de dampremmende en waterkerende lagen een zeer kleine warmteweerstand hebben, zijn deze niet bepaald.



Samengestelde constructie, gevel

Opbouw:

Laag	Materiaal	d [mm]	λ_{calc} [W/mK]
1	Gipskartonplaat	12,5	0,30
2	Dampremmende laag		
3a	Isolatie	170	0,035
3b	Stijl- en regelwerk, hout 15%	170	0,143
4	Waterkerende dampopenlaag		
5	Spouw (niet geventileerd)	30	
6	Metselwerk	100	1,00

Thermische isolatie van de folies wordt niet in rekening gebracht.



Laag	Bron	Materiaal	Dikte (mm)	λ_{calc} (W/m·K)	R_m (m ² ·K/W)
Wandafwerking 1	Eigen invoer	Gipskartonplaat	12.5	0.300	0.0417
Wandafwerking 2	N.v.t.				
Folie binnenzijde	N.v.t.				
Samengestelde laag					3.3203
Hout en regelwerk	SBR-Referentiedetails	naaldhout, algemeen Percentage hout: 15%	170	0.143	
Isolatie	SBR-Referentiedetails	Isolatie houten binnenspouwblad	170	0.035	
Extra isolatie laag	N.v.t.				
Ankers	N.v.t.				
Folie buitenzijde	N.v.t.				
Spouw		Ongeventileerd	30		0.1800
Buitenspouwblad	Eigen invoer	Metselwerk	100	1.000	0.1000
Totale dikte constructie:			312.5		

R_{si}	= 0.13 m ² ·K/W	R_c Bouwbesluit = 3.4 m²·K/W	U_T	= 0.26 W/m ² ·K
R_{se} Buitenlucht	= 0.04 m ² ·K/W		ΔU	= 0.01 W/m ² ·K
R_T	= 3.81 m ² ·K/W		$U_c = U_T + \Delta U$	= 0.28 W/m ² ·K
ΔU_{ta}	= 0.00 W/m ² ·K		$R_c = 1/U_c - R_{si} - R_{se}$	= 3.46 m ² ·K/W
$\Delta U_w = 0.05 \cdot U_T$	= 0.01 W/m ² ·K		R_c Bouwbesluit	= 3.4 m ² ·K/W

6.3 Warmtedoorgangscoefficiënt van een pui

In het Bouwbesluit worden ook eisen gesteld aan de warmtedoorgangscoefficiënt van een pui (U_w). Een pui kan bestaan vaak uit een kozijn waarin opgenomen beglazing, een paneel of een deur (of een combinatie van deze onderdelen). Maar het is niet correct om een U_w te bepalen op basis van de “oppervlakte gewogen gemiddelde waarde”, ook moet er rekening worden gehouden met het warmteverlies door afstandshouder die tussen de glasbladen is geplaatst. De U_w -waarde van een pui (kozijn, glas, paneel, deur) wordt bepaald met:

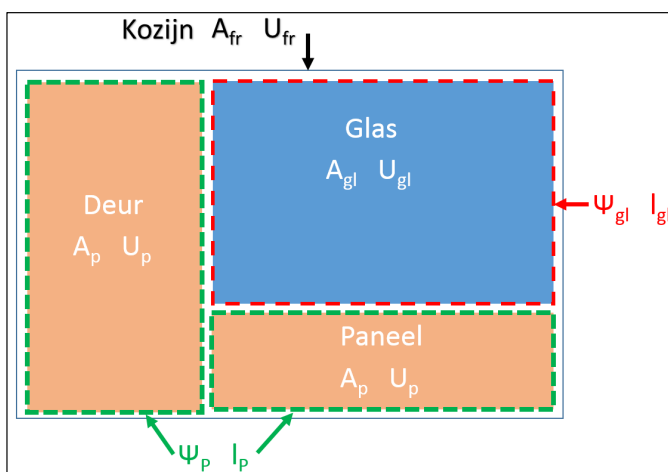


figuur 6-6 Afstandshouder

$$U_w = \frac{A_{gl} \times U_{gl} + A_{fr} \times U_{fr} + A_p \times U_p + \sum(I)_{gl} \times \psi_{gl} + \sum(I)_p \times \psi_p}{A_{gl} + A_p + A_{fr}}$$

- U_w = Warmtedoorgangscoefficiënt van het raam (kozijn, paneel en glas) [W/m²K]
- A_g = Zichtbaar glasoppervlakte [m²]
- U_{gl} = Warmtedoorgangscoefficiënt van het glas [W/m²K]
- A_p = Zichtbaar paneeloppervlakte (een deurblad is ook een paneel)[m²]
- U_p = Warmtedoorgangscoefficiënt van het paneel [W/m²K]
- A_{fr} = Geprojecteerde kozijnoppervlakte [m²]
- U_{fr} = Warmtedoorgangscoefficiënt van het kozijn [W/m²K]
- I_g = Zichtbare omtrek van het glas [m]
- ψ_g = Lineaire warmtedoorgangscoefficiënt als gevolg van de gecombineerde effecten van beglazing, afstandshouder en het kozijn [m].
- I_p = Zichtbare omtrek van het paneel [m]
- ψ_p = Lineaire warmtedoorgangscoefficiënt als gevolg van de gecombineerde effecten van paneel en kozijn [m].

Een deurblad wordt in de bovenstaande formule ook beschouwd als een paneel. In figuur 6-7 zijn de omschrijvingen weergegeven.



figuur 6-7 Overzicht positie U waarden en ψ waarden

Voor de lineaire warmtedoorgangscoefficiënt kunnen de in NEN-EN ISO 10077-1 vermelde forfaitaire waarden worden aangehouden. Deze zijn vermeld in **tabel 6-1**.

tabel 6-1 Lineaire warmtedoorgangscoefficiënt beglazingsrand (bron: [30])

Frame	Lineaire warmtedoorgangscoefficiënt ψ_g [W/mK]	
	Dubbele of drievoudige beglazing (ongecoat) met gas- of luchtvlulling	Dubbele of drievoudige beglazing (gecoat) met gas- of luchtvlulling
Hout of PVC	0,06	0,08
Metaal zonder thermische onderbreking	0,02	0,05
Metaal met thermische onderbreking	0,08	0,11

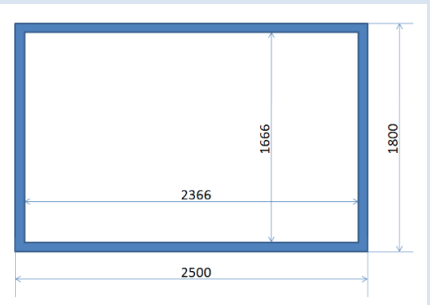
voorbeeld 6-2

De warmtedoorgangscoefficiënt U_{fr} van het kozijn bedraagt $2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$.

De warmtedoorgangscoefficiënt U_{gl} van de HR++ beglazing (glas met coating) bedraagt $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$.

De stijlen en dorpels zijn 67 [mm] breed.

De warmtedoorgangscoefficiënt U_w van het raam bedraagt:



$$U_w = \frac{3,942 \times 1,0 + 0,558 \times 2,4 + 8,064 \times 0,08}{3,942 + 0,558} = 1,317 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

7 De energiebalans

Iedereen heeft de ervaring dat wanneer de zon door het raam schijnt zal het warmer worden in een ruimte. Deze “warmte” zal ook weer uit de ruimte “verdwijnen”, anders zou het oneindig warm worden in deze ruimte. De energie die afkomstig van de zon, en er voor zorgt dat dat de ruimte warmer wordt, zal weer worden afgevoerd door bijvoorbeeld ventilatie of een airco⁴. Daardoor zal de temperatuur van de ruimte weer lager worden, en ontstaat er een aangenaam binnenklimaat.

De som van de ingaande en de uitgaande energiestromen zal uiteindelijk de temperatuur in een ruimte bepalen. Wordt het te warm in een ruimte, dan zullen we om een aangenaam binnenklimaat te creëren moeten koelen, wordt het te koud in een ruimte dan zullen we moeten verwarmen. In dit hoofdstuk wordt de basis gegeven van hoe de energieverliezen in ruimte kunnen worden berekend⁵.

Het totaal van warmtestromen in ruimte is altijd in balans. Oftewel: het totaal van de toegevoerde energie, afgevoerde energie en geaccumuleerde energie in een ruimte is nul. In deze inleiding zal het onderdeel accumulatie niet behandeld worden. De energiebalans van een ruimte is daarom te omschrijven als:

$$\Phi_{\text{totaal}} = \Phi_{\text{toevoer}} + \Phi_{\text{afvoer}} = 0 \quad [\text{W}]$$

Waarin:

Φ_{totaal} = De totale som van alle warmtestromen [W]

Φ_{toevoer} = De som van de toegevoerde warmtestroom [W]

Φ_{afvoer} = De som van de afgevoerde warmtestroom [W]

⁴ “airco” is eigenlijk de afkorting van airconditioning. Hoewel in de “spreektaal” dit wordt gezien als een machine die kan koelen, kunnen deze apparaten vaak ook verwarmen.

⁵ In de praktijk wordt gebruik gemaakt van rekenmethoden zoals de EPG (NEN 7020 “de EnergiePrestatie voor Gebouwen”), om de energiezuinigheid van een bouwwerk te kunnen bepalen en van de rekenmethode zoals is omschreven ISSO 51 om de capaciteit van een verwarmingsinstallatie te berekenen. Tevens zijn er “dynamische” rekenmethoden zoals Bink DYWAG⁵, VABI VA114 en TRNSYS waarmee met variabele randvoorwaarden (zoals het klimaat) wordt gerekend en rekening wordt gehouden met de massa van de materialen in een ruimte.

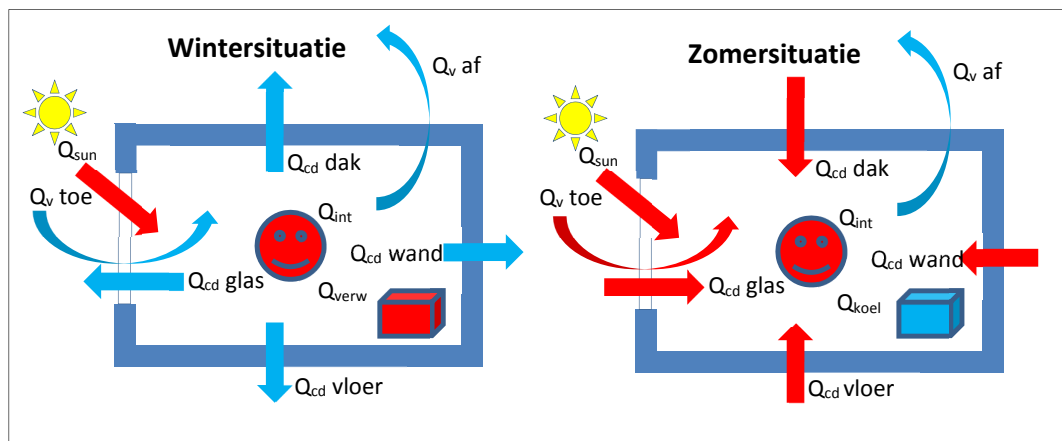
Of er energie (warmte) wordt toegevoerd in ruimte is afhankelijk van randvoorwaarden, hieronder verstaat men in stationaire situatie de buitentemperatuur en de aanwezigheid van zonnestraling. In de winterperiode, wanneer het buiten kouder is dan binnen, zal er warmte door een uitwendige scheidingsconstructie worden afgevoerd, in de zomersituatie, wanneer het buiten warmer kan zijn dan binnen (omdat er binnen wordt gekoeld) wordt er juist warmte door een uitwendige scheidingsconstructie toegevoerd.

Voordat men een warmtebalans van een ruimte opstelt moet men dus eerst alle warmtestromen in beeld brengen.

De warmtestromen in een ruimte worden bepaald door de:

- Transmissie (ϕ_{cd})
- Ventilatie (ϕ_v)
- Zoninstraling (ϕ_{sun})
- Warmteproductie (ϕ_{int})

In de volgende paragrafen zullen deze warmtestromen worden besproken.



figuur 7-1 Energiestromen in winter en zomerperiode (energietoevoer naar ruimte is rood, energieafvoer uit ruimte is blauw)

Bij het berekenen van de warmtestromen in een ruimte moet men goed kijken naar richting van de warmtestroom, dus wordt er energie in de ruimte toegevoerd of afgevoerd. Internationaal [32] is afgesproken dat wanneer er energie naar de ruimte wordt toegevoerd we dit beoordelen als positief, afgevoerde energie is negatief.

Dus energie de ruimte in = + (hierdoor warmte de ruimte op)

Energie de ruimte uit = - (hierdoor koelt de ruimte af)

7.1 Transmissie

In hoofdstuk 4.3 is bepaald dat we de warmtestroomdichtheid door geleiding als volgt bepalen:

$$q_{cd} = U \cdot \Delta\theta \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

Het is nu echter zo dat we niet de warmtestromen per m^2 willen bepalen maar we willen weten hoe groot de totale warmtestroom is door een wand. Dit wordt bepaald door q_{cd} te vermenigvuldigen met de oppervlakte van het onderdeel. De dan gevonden warmtestroom geven we weer met een ϕ (phi).

$$\phi_{cd} = U \cdot A \cdot \Delta\theta \quad [\text{W}]$$

Waarin:

- ϕ_{cd} = De warmtestroom door transmissie in W
- U = De warmtedoorgangscoefficiënt in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (Deze kan bestaan uit de warmtedoorgangscoefficiënt voor geleiding (U_T), glas (U_{gl}), kozijn (U_{fr}) of paneel (U_p))
- A = Het oppervlak van het beschouwde element in m^2
- $\Delta\theta$ = Het temperatuurverschil over de beschouwde constructie in $^\circ\text{C}$ of K

Omdat internationaal de afspraak is gemaakt dat we toegevoerde energie in een ruimte positief in rekening brengen en afgevoerde energie negatief krijgen we de volgende formule:

$$\phi_{cd} = U \cdot A \cdot (\theta_e - \theta_i) \quad [\text{W}]$$

Waarin:

- ϕ_{cd} = De warmtestroom door transmissie in W
- U = De warmtedoorgangscoefficiënt in $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
- A = De oppervlakte van het beschouwde onderdeel in m^2
- θ_e = De buitentemperatuur in $^\circ\text{C}$ of K
- θ_i = De binnentemperatuur in $^\circ\text{C}$ of K

voorbeeld 7-1

Bepaal de energiestromen door een "steensmuur" (220 mm) met een oppervlakte van 5 m^2 . De buitentemperatuur bedraagt -5°C en de binnentemperatuur bedraagt 19°C . De warmtegeleidingscoëfficiënt λ bedraagt $1,0 \text{ W}/\text{mK}$.

$$R_T = R_{si} + R_m + R_{se} = 0,13 + \frac{0,22}{1} + 0,04 = 0,39 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$U_T = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,39} = 2,5641 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$$

$$\phi_{cd} = U \cdot A \cdot (\theta_e - \theta_i) = 2,5641 \cdot 5 \cdot (-5 - 19) = -430,7 \quad [\text{W}]$$

(er wordt dus warmte uit de ruimte afgevoerd)

7.2 Ventilatie

Ook door het ventileren van ruimte wordt er energie toe- en afgevoerd in de ruimten. Wanneer we in de winter het raam openen wordt er koude lucht van buiten toegevoerd, tegelijkertijd wordt er warme lucht afgevoerd, anders zou de lucht niet van buiten naar binnen kunnen stromen. In de zomerperiode is het andersom, dan kunnen we warme lucht van buiten toevoeren, terwijl we de koude (elektrisch gekoelde) lucht naar buiten afvoeren.

Warmtestromen door ventilatie zijn als volgt te bepalen:

$$\phi_v = c_a \cdot m_a \cdot (\theta_{il} - \theta_i) \text{ [W]}$$

Waarin:

- ϕ_v = De warmtestroom door ventilatie in W
- c_a = Specifieke warmtecapaciteit van lucht. Voor lucht tussen de -50°C en 40°C bedraagt dit getal $1000 \text{ kJ}/(\text{kgK})$
- m_a = Massa van de luchtstroom in kg/s
- θ_{il} = De temperatuur waarmee de lucht in de ruimte komt in $^\circ\text{C}$ of K.
Dit is de "inlet air temperature", dit is vaak de buitenluchttemperatuur θ_e .
- θ_i = De binnentemperatuur in $^\circ\text{C}$ of K

De massa van de luchtstroom wordt bepaald door de volumestroom (debiet) en de dichtheid van de lucht. De dichtheid van lucht, aangeduid met ρ , is afhankelijk van de temperatuur, zie tabel 7-1. Voor indicatieve berekeningen wordt vaak uitgegaan van een dichtheid van $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$.

tabel 7-1 Dichtheid van lucht

Temperatuur $^\circ\text{C}$	Dichtheid van lucht kg/m^3
35	1,1455
30	1,1644
25	1,1839
20	1,2041
15	1,2250
10	1,2466
5	1,2690
0	1,2922
-5	1,3163
-10	1,3413
-15	1,3673
-20	1,3943
-25	1,4224

voorbeeld 7-2

Bepaal de energiestromen door ventilatie in een woonkamer. De buitentemperatuur (en dus de temperatuur van de inblaaslucht) bedraagt -5°C , de binnentemperatuur bedraagt 19°C . De woonkamer heeft een oppervlakte van 33 m^2 . De volgens het Bouwbesluit vereiste ventilatiecapaciteit bedraagt $0,9\text{ dm}^3/\text{s}$ per m^2 verblijfsgebied. De dichtheid van lucht bedraagt $1,2\text{ kg}/\text{m}^3$.

De benodigde ventilatie bedraagt:

$$33\text{ m}^2 \times 0,9\text{ dm}^3/\text{s per m}^2 = 29,7\text{ dm}^3/\text{s} = 0,0297\text{ m}^3/\text{s}$$

$$m_a = 0,0297 \times 1,2 = 0,03564\text{ kg/s}$$

$$\phi_v = c_a \cdot m_a \cdot (\theta_{il} - \theta_i) = 1000 \times 0,03564 \times (-5 - 19) = -855,4[\text{W}]$$

(er wordt dus warmte uit de ruimte afgevoerd)

voorbeeld 7-3

Bepaal de energiestromen door ventilatie in een kantoor in een zomerperiode. De buitentemperatuur (en dus de temperatuur van de inblaaslucht) bedraagt 30°C . De binnentemperatuur, van de geklimatiseerde ruimte, bedraagt 22°C . De ruimte wordt met een capaciteit van $350\text{ m}^3/\text{h}$ geventileerd. De dichtheid van lucht bedraagt $1,2\text{ kg}/\text{m}^3$

De aanwezige ventilatiecapaciteit bedraagt $350\text{ m}^3/\text{h}$, dit is $0,0972\text{ m}^3/\text{s}$:

$$m_a = 0,0972 \times 1,2 = 0,11666\text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\phi_v = c_a \cdot m_a \cdot (\theta_{il} - \theta_i) = 1000 \times 0,11666 \times (30 - 22) = 933,33[\text{W}]$$

Door het ventileren wordt dus warmte van buiten naar de ruimte toegevoegd. De ruimte zal dus warmer worden en de aanwezige klimaatinstallatie zal dus meer moeten koelen om de gewenste temperatuur in de ruimte te behouden.

Vereenvoudiging

Zoals eerder is omschreven wordt voor indicatieve berekeningen voor lucht uitgegaan van een dichtheid van $1,2 \text{ kg/m}^3$. Tevens is het in de "bouwkundige" branche gebruikelijk om uit te gaan van ventilatiecapaciteiten die vermeld zijn in dm^3/s .⁶ Het is dus eenvoudig om de formule om te werken naar een vorm waarin de waarde voor de ventilatiecapaciteit kan worden ingevuld in dm^3/s .

$$m_a = q_v (\text{dm}^3/\text{s}) \times 0,001 \times 1,2 (\text{kg/m}^3) \quad [\text{kg/s}]$$

$$\phi_v = q_v \times 1000 \times 0,001 \times 1,2 \times (\theta_{ii} - \theta_i) [\text{W}]$$

Dus:

$$\phi_v = q_v \times 1,2 \times (\theta_{ii} - \theta_i) [\text{W}]$$

Waarin:

ϕ_v = De warmtestroom door ventilatie in W

q_v = Ventilatiecapaciteit in dm^3/s

θ_{ii} = De temperatuur waarmee de lucht in de ruimte komt in °C of K.

θ_i = De binnentemperatuur in °C of K

⁶ Door installateurs en installatietechnisch adviseurs worden de luchthoeveelheden vaak vermeld in m^3/h .

7.3 Zoninstraling

De energie zoals wordt uitgestraald door de zon levert een aanzienlijke warmtewinst op in een ruimte. In de winter wordt dit gezien als een “positieve” eigenschap, het is immers gratis energie, dus de verwarming in een ruimte hoeft niet aangezet te worden. In de zomer wordt de zoninstraling vaak gezien als een “negatieve” eigenschap, door de zoninstraling kan het in een ruimte te warm worden, waardoor we juist actief (met een airconditioning) moeten gaan koelen om het in een ruimte behaaglijk te hebben, en dat kost geld en het heeft een negatief milieueffect. Het is voor een gebouw dus van belang om de positieve eigenschappen van de zoninstraling volledig te benutten, maar in de zomer de zoninstraling zo te beperken dat we niet actief hoeven te koelen.

De warmtewinst ten gevolge van de door de zon uitgestraalde energie is als volgt te bepalen:

$$\phi_{\text{sun}} = A_{\text{gl}} \cdot q_{\text{sun}} \cdot g_{\text{gl}} \quad [\text{W}]$$

Waarin:

- ϕ_{sun} = De warmtestroom ten gevolge van de door de zon uitgestraalde energie. in W
- A_{gl} = De oppervlakte van het glas in m²
- q_{sun} = De totale zoninstraling op het glas (direct en indirect) in W/m², zie paragraaf 7.3.1.
- g_{gl} = De zontoetredingsfactor, geeft het gedeelte aan van de aan de buitenzijde opvallende zonne-energie die in het vertrek komt (werd voorheen omschreven als ZTA) (dimensieloos), zie paragraaf 7.3.2.

Een mooi voorbeeld van het gebruik maken van de “positieve” eigenschappen van zoninstraling gedurende herfst-, winter-, en lenteperiode is een kas. Hierdoor wordt er een “overgangsklimaat” gecreëerd tussen de binnen- en buitenlucht met een aangenaam klimaat. Een voorbeeld hiervan is de door de Hogeschool Rotterdam / SUS ateliers ontwikkelde kaswoning (CHIBB) op de Heyplaat.



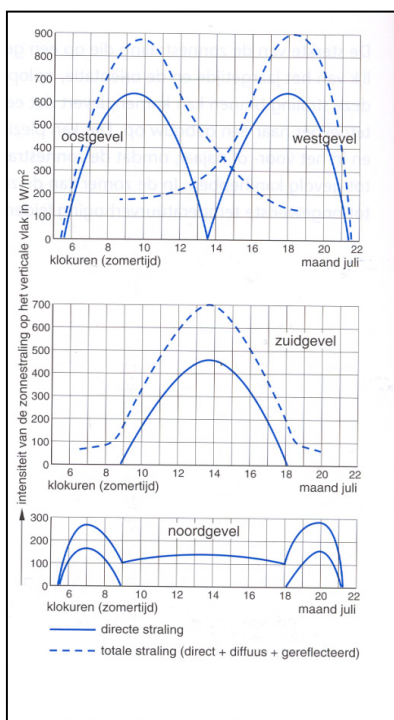
7.3.1 Q_{Sun}

De hoeveelheid zonnewarmte die op een oppervlak kan komen wordt bepaald door:

- De positie op aarde
- Het seizoen
- De hoek van het vlak ten opzichte van de zon (verticaal, schuin of horizontaal)
- De oriëntatie ten opzichte van de zon
- De hoeveelheid indirecte straling (t.g.v. reflectie)
- Weersomstandigheden (bewolkt of helder)

In energieberekeningen, zoals de energieprestatieberekening EPG, worden voor de zonnewarmte vaak maandgemiddelde waarden aangehouden, dit is een goed uitgangspunt om een oordeel te kunnen geven over het gemiddelde energiegebruik van een gebouw. Om het vermogen van bijvoorbeeld een airco te bepalen moet men juist uitgaan van de piekwaarde die kan optreden. In figuur 7-2 zijn deze waarden af te lezen.

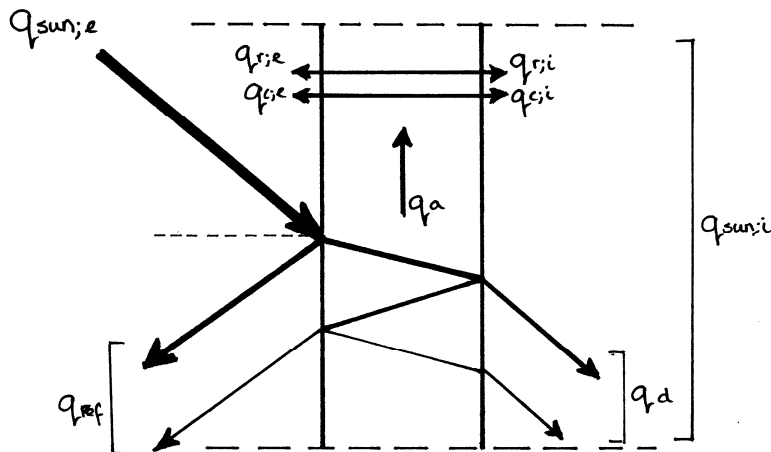
De zoninstraling is opgebouwd uit een directe en diffuse component. Voor een verticaal vlak komt daar ook nog een deel reflectie bij (bijvoorbeeld van grond, balkon of dak).



figuur 7-2 Intensiteit van de zonstraling voor de maand juli, bron figuur [1]

7.3.2 De zontoetredingsfactor g_{gl}

De zontoetredingsfactor (ook vaak zonnefactor genoemd), geeft het gedeelte aan van de aan de buitenzijde opvallende zonne-energie die in het vertrek komt. Dit is niet alleen het zichtbare deel van zonlicht, maar ook de warmte die in het langgolvlige (infrarode) deel door de zon wordt uitgestraald, zie hoofdstuk 2.



Figuur 7-3 Warmtestromen op en door glas

In

Figuur 7-3 zijn de warmtestromen zichtbaar in een glas t.g.v. opvallende zonnestraling. Hieruit volgt de g_{gl} -waarde.

$$g_{gl} = \frac{q_d + q_{ci} + q_{ri}}{q_{sun}} = \frac{q_{si}}{q_{sun}}$$

De g_{gl} waarde is dus een verhoudingsgetal en heeft daarom geen eenheid. In tabel 7-2 zijn enkele veel voorkomende g_{gl} waarden gegeven.

tabel 7-2 Overzicht van g_{gl} voor verschillende type beglazingen. Voor specifieke waarden wordt verwezen naar productinformatie van leveranciers.

Materiaal	g_{gl} waarde
Enkel glas	0,8
Normale dubbel beglazing	0,7
Dubbel beglazing HR ⁺⁺	0,6
Drievoudige beglazing (Tripple glass)	0,52
Zonwerend glas	0,22 - 0,45
Buitenzonwering (screens)	0,1 - 0,2

7.3.3 Interne warmtelast

Onder de interne warmtelast verstaan de warmteproductie in en ruimte door mensen, installaties, verlichting, computers en printers enz. In de onderstaande tabellen worden waarden gegeven voor deze gemiddelde warmtelast. De totale warmtestroom door de interne lasten wordt aangegeven met ϕ_{int}

tabel 7-3 Interne warmtelast door personen

activiteit	W/persoon *)
rustig zitten	80
zittend kantoorwerk	100
staand kantoorwerk	110
laboratoriumwerk	110
zittend licht montagewerk	115
staand licht montagewerk	150
kuieren (0,5 m/s)	110
wandelen (0,8 m/s)	120
lopen (1,2 m/s)	150
gymnastiek	160
tennis	240
squash/basketball	300

*) geldend voor lichte kleding (0,6 clo)

tabel 7-4 Interne warmtelast door verlichting

soort verlichting	W/m ² vloeroppervlakte
werkplekverlichting (TL/PL) (<i>lighting tube</i>)	2,5
algemene verlichting 400 à 500 lux	
- afgezogen armaturen	5
- niet-afgezogen armaturen	10
halogeenspots 200 lux	20

tabel 7-5 Interne warmtelast door apparatuur

apparatuur	W per gebruiker	W/m ² vloeroppervlakte
1 PC/persoon	100	10
1 printer/persoon	100	10
meer apparatuur/persoon	200 - 300	20 - 30

7.4 Voorbeelden warmtebalans

In voorbeeld 7-1 wordt een balans uitgewerkt van een ruimte in de wintersituatie, in voorbeeld 7-4 wordt de balans opgesteld voor de zomersituatie.

voorbeeld 7-3

Warmtebalans voor een wintersituatie

Wanneer er moet worden bepaald wat het vermogen moet zijn van een verwarmingstoestel brengen we alleen de transmissie- en ventilatieverliezen in rekening. Immers de zon schijnt niet zo vaak in de winter en een kantoorruimte kan ook 's avonds gebruikt worden, dus dit is een onzekere factor, en interne bronnen kunnen ook niet aanwezig zijn, terwijl de ruimte toch op temperatuur gebracht moet worden.

Voor een kantoorruimte met een afmeting van 7,2 m * 5,4 m * 2,6 m (l*b*h) moet de capaciteit van de verwarming worden bepaald. In het gevelvlak (met een afmeting van 5,4 m * 2,6 m) is glas aanwezig (HR++) met een g_{gl} -waarde van 0,6, een U_w van 1,1 W/m²K en een afmeting van 4 m * 1,2 m. Het gevelvlak en het dakvlak hebben beiden een ΣR_m -waarde van 4,0 m²K/W. De overige wanden en vloeren grenzen aan andere kantoorruimten, aangezien daar de temperaturen gelijk zijn hoeft er geen warmteverlies naar die ruimten te worden bepaald. In de ruimte werken 5 personen. Geventileerd wordt volgens de in het Bouwbesluit voor kantoren vermelde eis van 6,5 dm³/s per persoon. De temperatuur in deze ruimte dient 20°C te bedragen. De buitentemperatuur bedraagt -5°C.

De balans van de ruimte is:

$$\Phi_{\text{totaal}} = 0$$

$$\Phi_{\text{totaal}} = \Phi_{\text{cd}} + \Phi_v + \Phi_{\text{inst}} = 0$$

Waarin:

Φ_{cd} = De warmtestroom door transmissie in W

Φ_v = De warmtestroom door ventilatie in W

Φ_{inst} = De warmtestroom door door de installatie

Stap 1: Φ_{cd}

Voor het bepalen van de warmte verliezen door het dak en de voorgevel moeten we eerst de U-waarde bepalen. (zie hoofdstuk 4.2).

$$R_{T,\text{gevel}} = R_{\text{se}} + \Sigma R_m + R_{\text{si}} = 0,04 + 4,0 + 0,13 = 4,17 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

Dus de U-waarde van de gevel is:

$$U_{T,\text{gevel}} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{4,17} = 0,240 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

$$R_{T,dak} = R_{se} + \Sigma R_m + R_{si} = 0,04 + 4,0 + 0,10 = 4,14 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

Dus de U-waarde van de gevel is:

$$U_{T,dak} = \frac{1}{R_{T,dak}} = \frac{1}{4,14} = 0,242 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Oppervlak van de gevelelementen:

$$A_{gevel} = 5,4 \times 2,6 - 4 \times 1,2 = 9,24 \text{ m}^2.$$

$$A_{glas} = 4 \times 1,2 = 4,8 \text{ m}^2$$

$$A_{dak} = 5,4 \times 7,2 = 38,88 \text{ m}^2.$$

$$\phi_{cd} = U \cdot A \cdot (\theta_e - \theta_i) \text{ [W]}$$

$\phi_{cd,gevel}$	=	$0,240 \times 9,24 \times (-5 - 20)$	=	-55,44 W
$\phi_{cd,glas}$	=	$1,1 \times 4,8 \times (-5 - 20)$	=	-132,00 W
$\phi_{cd,dak}$	=	$0,242 \times 38,88 \times (-5 - 20)$	=	-235,22 W
$\phi_{cd \text{ totaal}}$			=	-422,66 W

Stap 2 ϕ_v

De totaal benodigde ventilatie in de ruimte is: 5 personen * 6,5 dm³/s p.p. = 32,5 dm³/s.

$$\phi_v = q_v \times 1,2 \times (\theta_{il} - \theta_i) \text{ [W]}$$

$$\phi_v = 32,5 \times 1,2 \times (-5 - 20) = -975 \text{ [W]}$$

Stap 3 invullen balans

$$\phi_{totaal} = \phi_{cd} + \phi_v + \phi_{inst} = 0$$

$$\phi_{totaal} = -422,66 - 975 + \phi_{inst} = 0 \quad \Rightarrow \quad \phi_{inst} = 1397,66 \text{ W}$$

De in de ruimte aanwezige verwarming (de toegevoerde warmtestroom moet positief zijn) moet dus een vermogen hebben van 1398 W om bij een buitentemperatuur van -5°C een binnentemperatuur van 20°C te kunnen behalen.

voorbeeld 7-4

Warmtebalans voor een zomersituatie

Voor een kantoorruimte met een afmeting van 7,2 m * 5,4 m * 2,6 m (l*b*h) moet de capaciteit van de koeling worden bepaald. In het op het zuiden georiënteerde gevelvlak (met een afmeting van 5,4 m * 2,6 m) is glas aanwezig (HR++) met een g_{gl} -waarde van 0,6, een U_{gl} -waarde van 1,1 W/m²K en een afmeting van 4 m * 1,2 m. Het gevelvlak en het dakvlak hebben beiden een ΣR_m -waarde van 4,0 m²K/W. De overige wanden en vloeren grenzen aan andere kantoorruimten, aangezien daar de temperaturen gelijk zijn hoeven er geen warmtestromen naar die ruimten te worden bepaald. In de ruimte werken 5 personen met een eigen PC met beeldscherm. Er is 1 printer aanwezig en de verlichting (HF-TL) heeft een warmtelast van 10 W/m². Geventileerd wordt volgens de in het Bouwbesluit voor kantoren vermelde eis van 6,5 dm³/s per persoon. De temperatuur in deze ruimte dient 20°C te bedragen. De buitentemperatuur bedraagt 28°C.

De balans van de ruimte is:

$$\phi_{\text{totaal}} = 0$$

$$\phi_{\text{totaal}} = \phi_{\text{cd}} + \phi_{\text{v}} + \phi_{\text{sun}} + \phi_{\text{int}} + \phi_{\text{inst}} = 0$$

Waarin:

ϕ_{cd} = De warmtestroom door transmissie in W

ϕ_{v} = De warmtestroom door ventilatie in W

ϕ_{sol} = De warmtestroom ten gevolge van de door de zon uitgestraalde energie. in W

ϕ_{int} = De warmtestroom ten gevolge van de interne warmtelasten in W

ϕ_{inst} = De warmtestroom door toegevoerd of afgevoerd door de installatie

Stap 1: Q_{cd}

Zie voorbeeld **voorbeeld 7-** voor de bepaling van de oppervlakten en de U/waarde.

$\phi_{\text{cd,gevel}}$	=	$0,240 \times 9,24 \times (28 - 20)$	=	17,7 W
$\phi_{\text{cd,glas}}$	=	$1,1 \times 4,8 \times (28 - 20)$	=	42,2 W
$\phi_{\text{cd,dak}}$	=	$0,242 \times 38,88 \times (28 - 20)$	=	75,3 W
ϕ_{cd}			=	135,2 W

Stap 2 ϕ_{sun}

In figuur 7-2 kunnen we aflezen dat de maximale totale stralingswarmte (incl. diffuse component) circa 700 W/m² bedraagt.

$$\phi_{\text{sun}} = A_{\text{gl}} \cdot q_{\text{sun}} \cdot g_{\text{gl}} \quad [\text{W}]$$

$$\phi_{\text{sun}} = 4,8 \times 700 \times 0,6 = 2016 \quad [\text{W}]$$

Stap 3 ϕ_v

De totaal benodigde ventilatie in de ruimte is: 5 personen * 6,5 dm³/s p.p. = 32,5 dm³/s.

$$\phi_v = q_v \times 1,2 \times (\theta_{il} - \theta_i) \text{ [W]}$$

$$\phi_v = 32,5 \times 1,2 \times (28 - 20) = 312 \text{ [W]}$$

Doordat het buiten warmer is dan binnen wordt er door de buitenlucht dus warmte toegevoerd in de ruimte.

Stap 4 ϕ_{int}

Hierbij maken wij gebruik van tabellen uit hoofdstuk 7.3.3

5 personen: 100 W pp	500,0 W
Verlichting: 10 W/m ² * 38,88 m ² =	388,8 W
5 pc's en 1 printer = 5*100 + 1* 100 =	600,0 W
ϕ_{int} Totale interne warmtelast =	1488,8 W

Stap 5 invullen balans

$$\phi_{\text{totaal}} = \phi_{\text{cd}} + \phi_v + \phi_{\text{sun}} + \phi_{\text{int}} + \phi_{\text{inst}} = 0$$

$$\phi_{\text{totaal}} = 135,2 + 312 + 2016 + 1488,8 + \phi_{\text{inst}} = 0 \Rightarrow \phi_{\text{inst}} = -3952 \text{ W}$$

De in de ruimte aanwezige koeling moet dus een vermogen hebben van 3942 W (wordt in de praktijk afgerond op 4 kW) om bij een buitentemperatuur van 28°C een binnentemperatuur van 20°C te kunnen behalen. Ook is te zien dat de warmtestroom afkomstig van de zon een zeer groot aandeel heeft in het te leveren vermogen van de koelmachine. Ook de interne warmtelasten leveren een aanzienlijke bijdrage. Dit zijn dan ook de belangrijkste onderdelen waarvan in een kantoor de warmtelast gereduceerd moet worden.

7.5 Energiegebruik

Behalve dat het van belang is om de capaciteit van een verwarmings- of koelinstallatie te bepalen, die onderdelen bepalen immers of het gewenste binnenklimaat kan worden behaald, is het ook van belang om te weten hoeveel energie een installatie uiteindelijk gebruikt. Voor de hoeveelheid gebruikt energie betaal je uiteindelijk de rekening bij de energieleverancier.

De hoeveelheid verbruikte energie wordt bepaald met:

$$Q = \phi \cdot t \quad [J]$$

Waarin:

Q = De geleverde of ontvangen energie in J (Ws)

ϕ = De warmtestroom of het vermogen in W

t = Tijd in seconden (s).

voorbeeld 7-5

Energiegebruik van verwarming (vervolg op voorbeeld 7-3)

Een in een ruimte geplaatste verwarming heeft een vermogen van 1398 W nodig om bij een buitentemperatuur van -5°C een binnentemperatuur van 20°C te kunnen behalen. Hoeveel energie wordt gebruikt gedurende een periode van 2 uur (let op: uren omrekenen naar seconden).

$$Q = \phi \cdot t \quad [J]$$

$$Q = 1398 \times 2 \times 60 \times 60 = 10065600 \quad [J]$$

Dit kan ook worden uitgedrukt als 10,066 MJ ($1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$) of 2,80 kWh (1 kWh = 3,6 MJ)

voorbeeld 7-6

Energiegebruik van een airco (vervolg op voorbeeld 7-4)

Een in een ruimte geplaatste airco heeft een vermogen van 4 kW nodig om bij een buitentemperatuur van 28°C een binnentemperatuur van 20°C te kunnen behalen. Hoeveel energie wordt gebruikt gedurende een periode van 2 uur (let op: uren omrekenen naar seconden).

$$Q = 4000 \times 2 \times 60 \times 60 = 28,8 \quad [MJ]$$

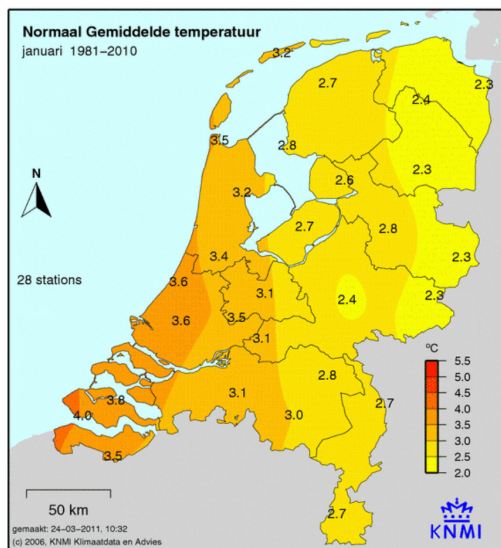
De kosten per kWh verbruikte elektriciteit bedragen 0,22 €. De totale kosten van het gebruik van deze airco gedurende een periode van 2 uur bedragen:

$$4 \text{ kW} \times 2 \text{ h (uur)} \times 0,22 = 8 \text{ kWh} \times 0,22 \text{ €/kWh} = 1,76 \text{ €}$$

Om schattingen te kunnen maken van het gemiddelde energiegebruik van een gebouw gedurende een periode wordt vaak een berekening per maand gemaakt. Per maand zijn dan de gemiddelde klimaatomstandigheden bepaald.

tabel 7-6 Gemiddelde van de zon ontvangen energie per maand [33]

maand	<i>MJ/m² (helling in graden t.o.v. horizontaal)</i>										
	horizontaal	Schuin naar boven gekeerd 45					Verticaal 90				
		0	ZW	W	NW		Z	ZW	W	NW	
	Z	ZO	O	NO	N	Z	ZO	O	NO	N	
januari	65	109	93	61	42	41	107	85	46	31	31
februari	112	161	142	101	71	64	143	117	73	51	49
maart	260	342	308	234	160	126	275	236	165	110	97
april	375	436	408	337	247	189	310	294	239	166	129
mei	515	520	508	458	374	328	322	341	321	247	189
juni	571	547	543	506	429	394	321	354	353	283	221
juli	517	505	496	454	383	347	305	325	312	248	195
augustus	496	555	527	446	333	263	374	371	318	222	164
september	295	364	335	268	193	146	279	252	194	132	110
oktober	173	253	223	158	104	89	222	183	114	75	69
november	78	134	115	73	47	45	131	104	54	35	35
december	51	90	77	49	33	33	92	72	39	25	24



Figuur 7-4 Gemiddelde temperatuur in de maand januari in de periode 1981-2010 (bron:KNMI [i12])

voorbeeld 7-7

Energiegebruik van een woonkamer van een woning gedurende een langere periode

Een woonkamer met een oppervlakte van 35 m², heeft een gevel opgebouwd uit 20 m² spouwmuur ($\Sigma R_m = 4,5 \text{ m}^2\text{K/W}$), met daarin opgenomen een op het zuiden georiënteerde glazen pui van 5 m² ($U_w=1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$, $g_{gl}=0,6$), effectieve oppervlakte glas $A_{gl} = 4,0 \text{ m}^2$. De woning wordt geventileerd volgens de eisen uit het Bouwbesluit, echter, wordt er niet altijd in “volstand” geventileerd. Er mag van worden uitgegaan dat gedurende deze periode 50% van de vereiste capaciteit aanwezig is. Gemiddeld kan gesteld worden dat de interne warmtelast (mensen, verlichting en apparaten) 3 W/m² bedraagt. Bereken het totale energiegebruik gedurende de maand januari (gemiddelde temperatuur 3,6°C), de gemiddelde binnentemperatuur in woonkamer bedraagt 17°C.

De balans van de ruimte is:

$$Q_{\text{totaal}} = 0$$

$$Q_{\text{totaal}} = Q_{\text{cd}} + Q_v + Q_{\text{sun}} + Q_{\text{int}} + Q_{\text{inst}} = 0$$

Stap 1: Q_{cd}

$$R_{T;\text{spouwmuur}} = R_{\text{se}} + \Sigma R_m + R_{\text{si}} = 0,04 + 4,0 + 0,13 = 4,17 \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

$$U_{T;\text{spouwmuur}} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{4,17} = 0,240 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Oppervlak van de gevelelementen:

$$A_{\text{gevel}} = 20 - 5 = 15 \text{ m}^2.$$

$$A_{\text{pui}} = 5 \text{ m}^2$$

$\Phi_{\text{cd;gevel}}$	=	$0,240 \times 15 \times (3,6 - 17)$	=	-48,2 W
$\Phi_{\text{cd;glas}}$	=	$1,1 \times 5 \times (3,6 - 17)$	=	-73,7 W
Φ_{cd}			=	-121,9 W

(Januari heeft 31 dagen)

$$Q_{\text{cd}} = -121,9 \times 31 \times 24 \times 60 = -326,5 \text{ [MJ]}$$

Stap 2 Q_v

De totaal benodigde ventilatie in de ruimte is: $35 \text{ m}^2 * 0,9 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2 = 32,5 \text{ dm}^3/\text{s}$. 50% van deze capaciteit is er gemiddeld aanwezig, dus $q_v = 15,75 \text{ dm}^3/\text{s}$

$$\phi_v = 15,75 \times 1,2 \times (3,6 - 17) = -253,26 \text{ [W]}$$

$$Q_{cd} = -253,26 \times 31 \times 24 \times 60 \times 60 = -678,3 \text{ [MJ]}$$

Stap 3 Q_{sun}

Het raam is georiënteerd op het zuiden, uit tabel 7-6 volgt dat in de maand januari, op een verticaal vlak, q_{sun} 107 MJ/m² bedraagt. De oppervlakte van het glas is 4 m².

$$Q_{sun} = 4 \times 107 \times 0,6 = 256,8 \text{ [MJ]}$$

Stap 4 ϕ_{int}

De interne warmtelast bedraagt:

$$\phi_{int} = 3 \times 35 = 105 \text{ [W]}$$

$$Q_{int} = 105 \times 31 \times 24 \times 60 \times 60 = 281,2 \text{ [MJ]}$$

Stap 5 Bepaling van het totale energiegebruik voor verwarming:

$$Q_{totaal} = Q_{cd} + Q_v + Q_{sun} + Q_{int} + Q_{inst} = 0$$

$$Q_{totaal} = -326,5 - 678,3 + 256,8 + 281,2 + Q_{inst} = 0$$

$$\Rightarrow Q_{inst} = 466,8 \text{ [MJ]}$$

Het getal is positief, dus dat betekent dat er inderdaad in deze maand verwarmd moet worden.

De verbrandingswarmte van aardgas bedraagt: 31,65 MJ/m³. Dit betekent dat er voor deze woonkamer circa 14,75 M³ aardgas nodig was om deze ruimte te verwarmen.

8 Vochttransport

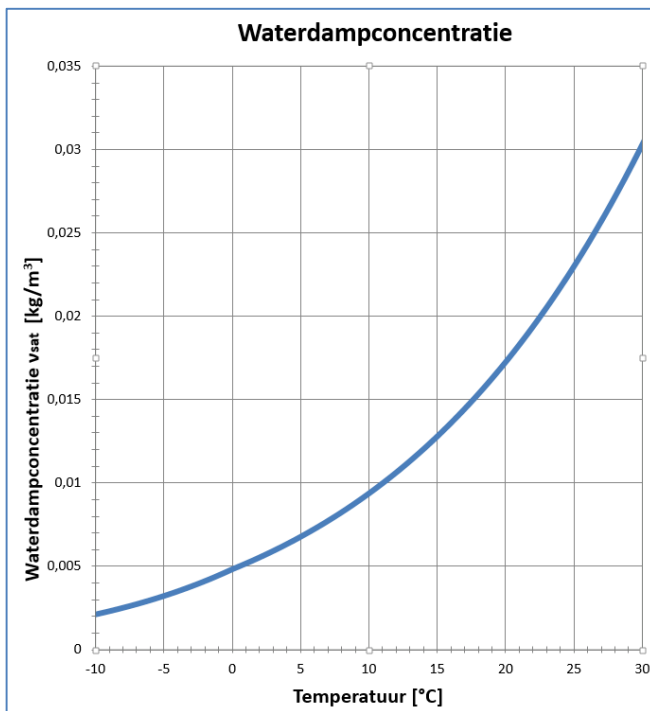
Vocht in onze omgeving is zeer belangrijk, wanneer de binnenlucht te droog is krijgen wij last van onze ogen maar, te vochtige lucht leidt er weer toe dat wij ons niet behaaglijk voelen. Vochtige lucht in een ruimte kan ook leiden tot het optreden van schimmelgroei en te veel vocht in bouwmaterialen kan leiden tot bijvoorbeeld houtrot waardoor de draagkracht kan worden aangetast. In de bouw uit vocht zich in het algemeen als:

- Oppervlaktecondensatie (t.g.v. vochtproductie in ruimte)
- Inwendige condensatie (t.g.v. vochtproductie in ruimte)
- Optrekkend vocht (in metselwerk t.g.v. capillaire werking)
- Doorslaand vocht (kelders t.g.v. waterdruk)
- Lekkages (regen)
- Vochtschades t.g.v. ijsvorming
- Bouwvocht

In de bouwwereld spreken we altijd over vocht, daarmee bedoelen we natuurlijk water. De stof water komt voor in een gasvormige fase (damp), vloeibare fase (water), en vast (ijs). Dit worden aggregatiefases genoemd. In dit college beperken we ons tot de gasvormige fase.

8.1 Damptransport in lucht

Lucht is mengsel van vele gassen, het grootste gedeelte bestaat uit stikstof (78%) en zuurstof (21%), het resterende deel bestaat hoofdzakelijk uit waterdamp en andere gassen. Lucht kan niet oneindig veel waterdamp opnemen, de opnamecapaciteit is afhankelijk van de temperatuur. Warme lucht kan dus meer waterdamp opnemen dan koude lucht. In figuur 8-1 is de maximale waterdampconcentratie (v_{sat}) weergegeven, afhankelijk van de temperatuur. De waterdampconcentratie wordt weergegeven in kg/m^3 lucht. Waterdamp heeft dus een massa. De werkelijke hoeveelheid aanwezige waterdamp wordt daarom de **absolute vochtigheid** genoemd.



figuur 8-1 maximale waterdampconcentratie v_{sat} als functie van de temperatuur

De aanwezige hoeveelheid vocht in de lucht kunnen we ook uitdrukken in een spanning, voor waterdamp wordt dit de dampdruk genoemd. Zoals al eerder is vermeld bestaat lucht uit vele gassen, die allemaal een eigen spanning hebben, ook wel partiële drukken genoemd. Bij elkaar vormen deze partiële drukken de totale luchtdruk (wet van Dalton).

De relatie tussen de waterdampconcentratie en de waterdampdruk wordt omschreven door de wet van Boyle-Gay Lussac (ook wel algemene gaswet of ideale gaswet genoemd):

$$\frac{p \cdot V}{T} = m \cdot R_s$$

Waarin:

p = Dampdruk in Pa (N/m²)

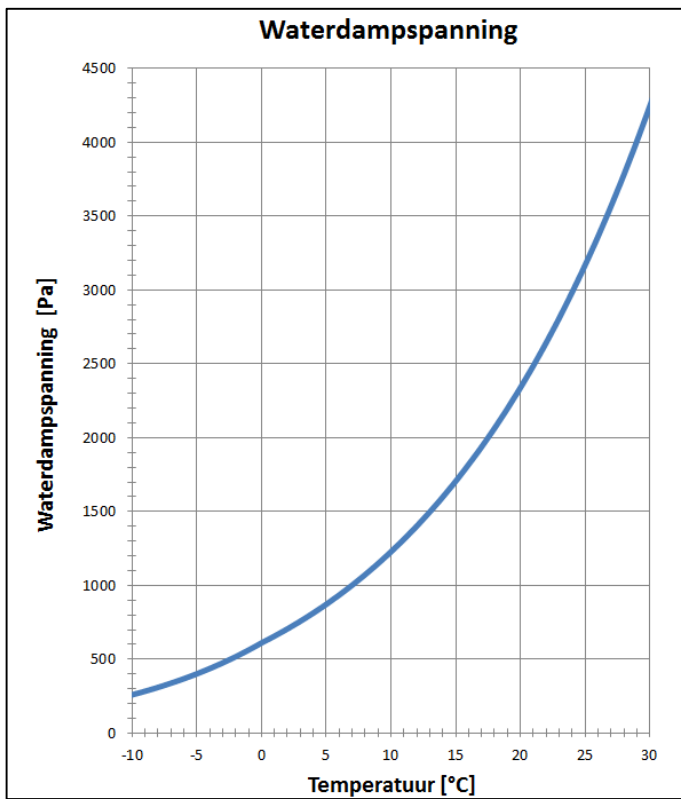
V = Volume in m³

T = Temperatuur in K (=°C+273,15)

m = Massa in kg

R_s = Specifieke gasconstante in J/(kg.K)

Deze R_s is voor verschillende gassen of dampen anders en lijkt op een "soortelijke massa" voor gas of damp. Voor waterdamp is de R_s : 462 J/(kg.K)



figuur 8-2 maximale waterdampdruk p_{sat} als functie van de temperatuur

In figuur 8-2 is de relatie zichtbaar tussen de maximale waterdampdruk en de temperatuur.

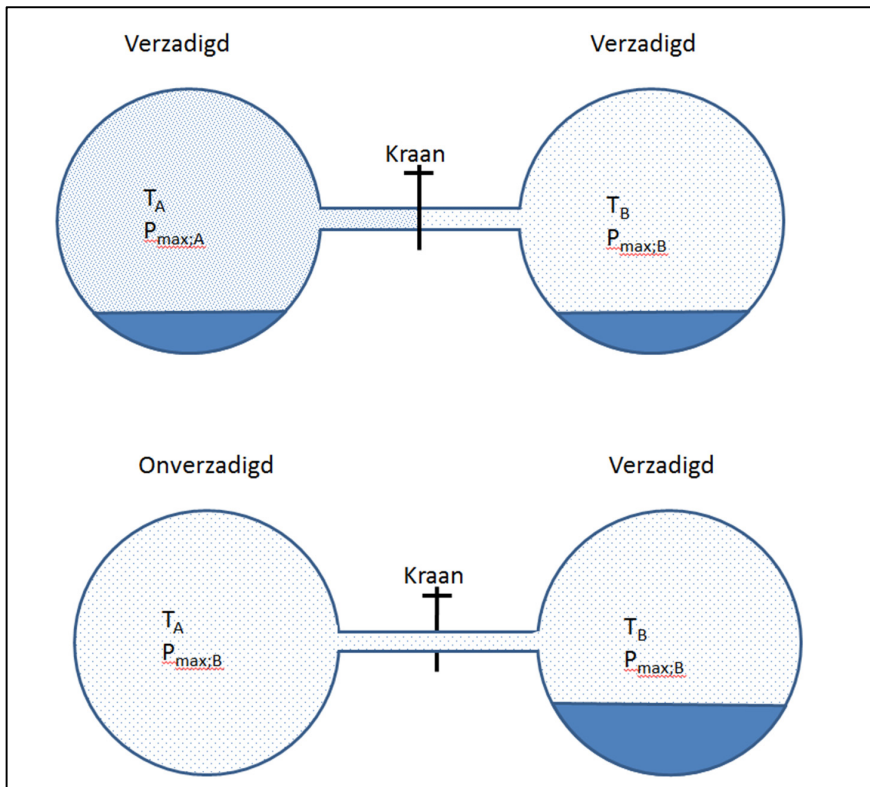
In bijlage 2 zijn tabellen opgenomen met daarin weergegeven de maximale dampdruk en vochtconcentratie. Deze tabellen zijn belangrijk en worden in alle voorbeelden en opgaven gebruikt.

8.1.1 Beginsel van Watt

Dampen en gassen hebben de eigenschap dat ze van een gebied met een hoge druk naar een gebied met een lage druk gaan. Dit gebeurt ook met de partiële dampdrukken in een ruimte. Een damp zal zich in een ruimte blijven verdelen totdat de druk gelijk is. In een afgesloten ruimte nemen we dan ook aan dat de dampdruk overal gelijk is. Vocht kan ten gevolge van dit effect naar een andere ruimte wordt getransporteerd en daar condenseren, of vocht in een ruimte condenseert op een kouder oppervlak in een ruimte (denk aan de “beslagen” spiegel in je badkamer na het douchen).

Het beginsel van Watt wordt als volgt gedefinieerd:

“Indien zich in twee ruimten een vloeistof en zijn damp in evenwicht bevinden en de temperatuur in de ene ruimte is hoger dan de temperatuur in de andere ruimte, dan zal er, bij het met elkaar in verbinding stellen van die ruimten, damptransport plaatsvinden van de ene ruimte met een hoge temperatuur naar de ruimte met de lage temperatuur terwijl de druk in het systeem ongeveer gelijk is aan de maximum dampdruk van de ruimte met de laagste temperatuur”



figuur 8-3 Beginsel van Watt

In figuur 8-3 is het principe van het "Beginsel van Watt" weergegeven.

In vat A bevinden zich een verzadigde damp en vloeistof met de temperatuur Θ_A en in vat B bevinden zich een verzadigde damp en vloeistof met de temperatuur Θ_B . Er geldt $\Theta_A > \Theta_B$ (dus in vat B is het kouder dan in vat A).

Als de kraan geopend wordt, dan zal het volgende gebeuren: (Omdat $\Theta_A > \Theta_B$ geldt $p_{\text{sat};A} > p_{\text{sat};B}$)

- Er stroomt damp van A naar B
- In A wordt de druk even lager dan $p_{\text{sat};A}$, waardoor er in dit vat vloeistof verdampt
- In B wordt de druk heel even hoger dan $p_{\text{sat};B}$, waardoor hier vloeistof condenseert
- Dit proces gaat door totdat alle vloeistof in vat A verdampt is en de druk in vat A gelijk is aan de druk in vat B ($p_{\text{sat};B}$).
- Bij het uiteindelijk te bereiken evenwicht zal alle vloeistof zich in vat B bevinden.

Praktische voorbeelden: het condenseren van damp op de binnenzijde van uw buitenruit en wilt u thuis in de een praktische proef uitvoeren waar u uw hele familie mee kunt overtuigen: zet de vriezer maar een paar uur open.

8.2 Relatieve vochtigheid

De relatieve vochtigheid (ϕ) is voor velen, in tegenstelling tot de absolute vochtigheid, een bekend begrip. De relatieve vochtigheid is vooral in de “biologische” wereld van mens, dier en plant belangrijk. Is de relatieve vochtigheid te laag, dan zullen mensen last krijgen van droge ogen en een droge huid en planten die in omgeving staan met een lage relatieve vochtigheid zullen uitdrogen⁷. Ook materialen reageren op de relatieve vochtigheid, bij een lage relatieve vochtigheid zal een materiaal krimpen, bij een hoge relatieve vochtigheid uitzetten. Dit laatste is bijvoorbeeld de reden dat in een museum de relatieve vochtigheid zo constant mogelijk moet blijven om “het werken van” bijvoorbeeld schilderijen te voorkomen, dit voorkomt craquelé vorming van de verflaag (zie figuur 8-4). Een groot voordeel van de relatieve vochtigheid is dat wij deze kunnen meten, de absolute vochtigheid is alleen uit deze waarde, in combinatie met de temperatuur, te bepalen.



figuur 8-4 Schilderij met craquelé.

De relatieve vochtigheid wordt meestal in procenten aangeduid. Bij de maximaal aanwezige dampdruk of vochtconcentratie in de lucht is de relatieve vochtigheid 100%. De relatieve vochtigheid is dan ook de verhouding tussen de werkelijke aanwezig vochtconcentratie of dampdruk en de dampdruk of vochtconcentratie die bij de beschouwde temperatuur maximaal aanwezig kan zijn. Zoals we eerder hebben gezien kan lucht, afhankelijk van de temperatuur, maar een maximale hoeveelheid waterdamp bevatten, komt er meer waterdamp dan zal deze condenseren. Een relatieve vochtigheid van meer dan 100% is dan ook niet mogelijk.

⁷ Voor cactussen geldt het omgekeerde. Deze gaan “rotten” wanneer zij in een omgeving staan met een te hoge relatieve vochtigheid.

De relatieve vochtigheid bepaald men als volgt:

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{sat}}} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{of} \quad \varphi = \frac{v}{v_{\text{sat}}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Waarin:

ϕ = De relatieve vochtigheid in procenten

p = Aanwezige dampdruk in Pa

p_{sat} = bij de heersende temperatuur maximaal mogelijke dampdruk in Pa

v = Aanwezige waterdampconcentratie in kg/m^3

v_{sat} = bij de heersende temperatuur maximaal mogelijke waterdampconcentratie in kg/m^3

Het maakt dus voor het bepalen van de relatieve vochtigheid niets uit of men rekt in dampdrukken of in concentraties. Door afrondingen in de tabellen ziet men vaak wel enige verschillen in waarden, deze afwijkingen zijn voor bouwkundige en civieltechnische situaties toelaatbaar.

voorbeeld 8-1

In een ruimte met een temperatuur van 20°C bedraagt de relatieve vochtigheid ϕ_i 60% .

Bepaal de maximale en de aanwezige dampdruk en vochtconcentratie?

Uit de tabellen (zie bijlage 1) volgt dat de maximale dampdruk p_{sat} bij een temperatuur van 20°C : 2339 Pa bedraagt en dat de maximale waterdampconcentratie v_{sat} bij 20°C : $17,27 \text{ g}/\text{m}^3$ bedraagt.

De aanwezige dampdruk bedraagt:

$$p_i = \frac{60}{100} p_{\text{sat}} = 0,6 * 2339 = 1403 \text{ Pa}$$

De aanwezige vochtconcentratie bedraagt:

$$v_i = \frac{60}{100} v_{\text{sat}} = 0,6 * 17,27 = 10,36 \text{ g}/\text{m}^3$$

voorbeeld 8-2

In een ruimte met een temperatuur van $18,4^\circ\text{C}$ is bepaald dat de waterdampconcentratie v_i $11,5 \text{ g}/\text{m}^3$ bedraagt. Bepaal de relatieve vochtigheid?

$v_{\text{sat } 18,4^\circ\text{C}}$ lezen we af uit de tabel en bedraagt $15,72 \text{ g}/\text{m}^3$

$$\varphi_i = \frac{v}{v_{\text{sat}}} \cdot 100\% = \frac{11,5}{15,72} \cdot 100\% = 73\%$$

8.3 Oppervlakte condensatie

Bij het verwarmen van lucht zal de relatieve vochtigheid lager worden, hoewel er geen vocht wordt afgevoerd. Het is dus zo dat de verhouding tussen de hoeveelheid vocht die in de lucht aanwezig kan zijn en het aanwezige vocht (de absolute vochtigheid) verandert.

Het verhogen van de temperatuur leidt tot een lagere relatieve vochtigheid

Bij het afkoelen van lucht zal de relatieve vochtigheid hoger worden, hoewel er geen vocht wordt toegevoerd. Het is dus in deze situatie zo dat de verhouding tussen de hoeveelheid vocht die in de lucht aanwezig kan zijn en het aanwezige vocht (de absolute vochtigheid) verandert.

Het verlagen van de temperatuur leidt tot een hogere relatieve vochtigheid

Wanneer men de temperatuur blijft verlagen zal men op een gegeven moment het punt bereiken dat er meer vocht aanwezig is dan dat bij die lage temperatuur aanwezig kan zijn in de lucht, men bereikt dan de grens dat de relatieve vochtigheid 100% wordt. Op dat moment gaat het vocht condenseren totdat de hoeveelheid vocht bereikt dat maximaal bij die lage temperatuur aanwezig kan zijn (beginsel van Watt). Voorbeelden hiervan zijn: het koude flesje bier (circa 5°C) dat in de zomer uit de koelkast wordt gehaald en het condens dat in de winter aan de binnenzijde van een raam aanwezig is.



figuur 8-5 Oppervlaktecondensatie op de binnenzijde van dubbele beglazing

voorbeeld 8-3

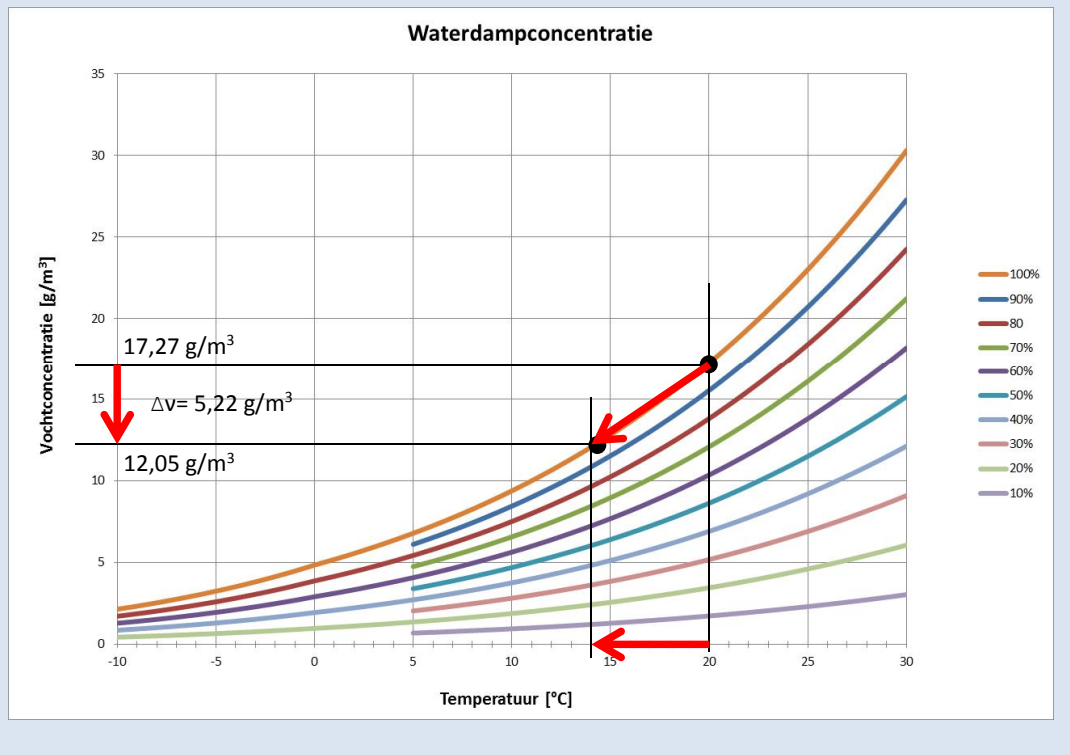
Bepaal hoeveel vocht per m³ lucht condenseert wanneer de temperatuur van lucht van 20°C en een relatieve vochtigheid van 100% wordt verlaagd naar 14°C.

$$v_{\text{sat};20^{\circ}\text{C}} = 17,27 \text{ g/m}^3, v_{\text{sat};14^{\circ}\text{C}} = 12,05 \text{ g/m}^3$$

$$\Delta v = 17,27 - 12,05 = 5,22 \text{ g/m}^3$$

Dus per m³ lucht condenseert er 5,22 gram water.

In onderstaande figuur is dit weergegeven:



voorbeeld 8-4

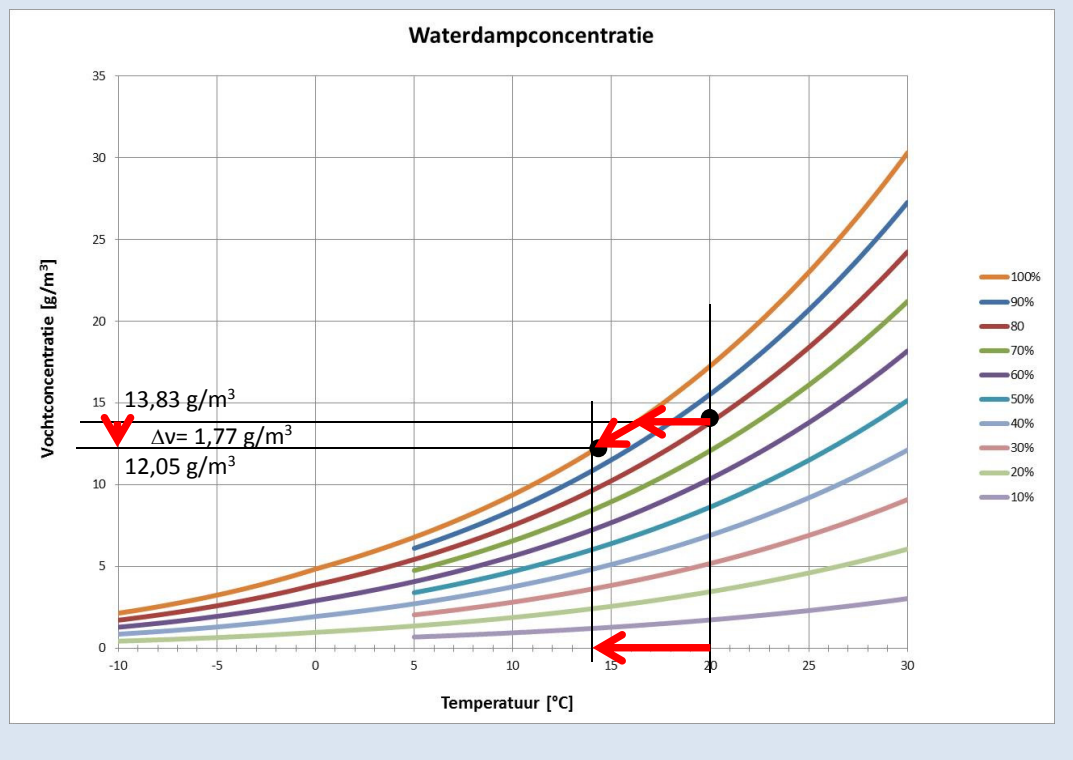
Bepaal hoeveel vocht er condenseert per m³ lucht wanneer de temperatuur van deze lucht met een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 80% wordt verlaagd naar 14°C.

$$v_{\text{sat};20^{\circ}\text{C}} = 17,27 \text{ g/m}^3, \quad v_{\text{sat};20^{\circ}\text{C};80\%} = 0,8 * 17,27 = 13,82 \text{ g/m}^3, \quad v_{\text{sat};14^{\circ}\text{C}} = 12,05 \text{ g/m}^3$$

$$\Delta v = 13,83 - 12,05 = 1,77 \text{ g/m}^3$$

Dus per m³ lucht condenseert 1,77 g water.

In onderstaande figuur is dit weergegeven:



voorbeeld 8-5

Bepaal hoeveel vocht condenseert wanneer de temperatuur van lucht met een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 60% wordt verlaagd naar 14°C.

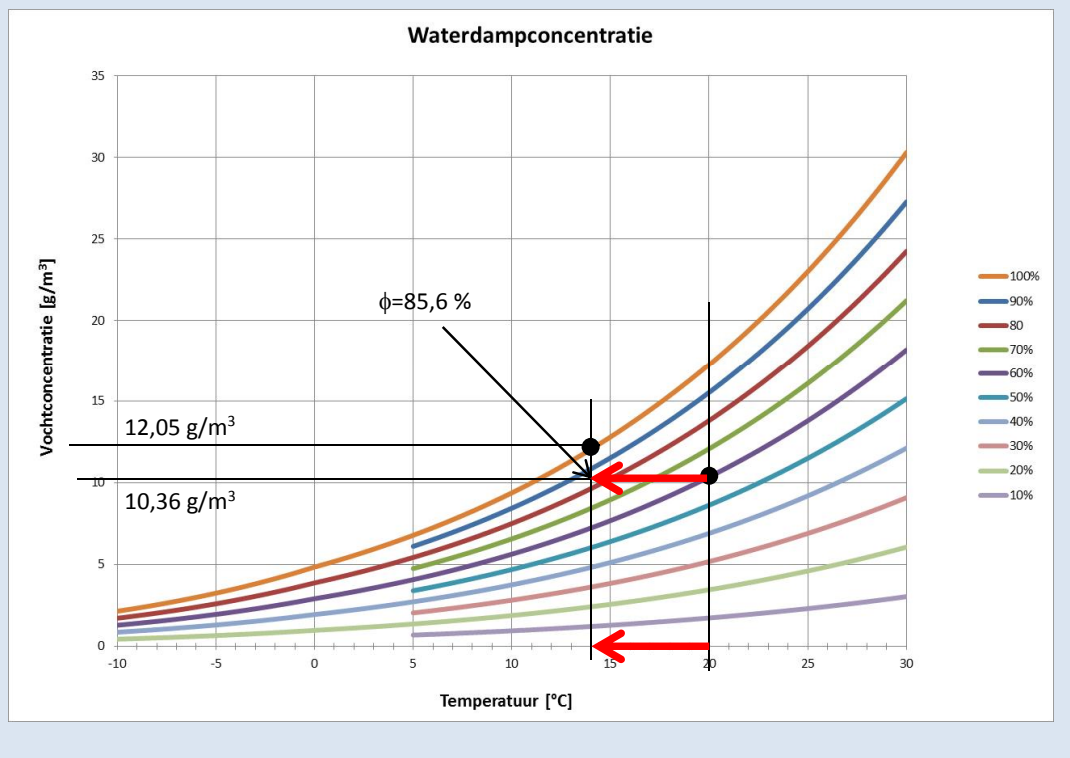
$$v_{\text{sat};20^{\circ}\text{C}} = 17,27 \text{ g/m}^3, \quad v_{i;20^{\circ}\text{C};60\%} = 0,6 \cdot 17,27 = 10,36 \text{ g/m}^3, \quad v_{\text{sat};14^{\circ}\text{C}} = 12,05 \text{ g/m}^3$$

De lucht van 14°C kan 12,05 g/m³ aan vocht bevatten, aanwezig is 10,36 g/m³, er condenseert dus geen vocht (in de lucht zou eventueel nog 12,05-10,36 = 1,69 g/m³ aan damp worden kunnen worden ingebracht voordat er condensatie optreedt).

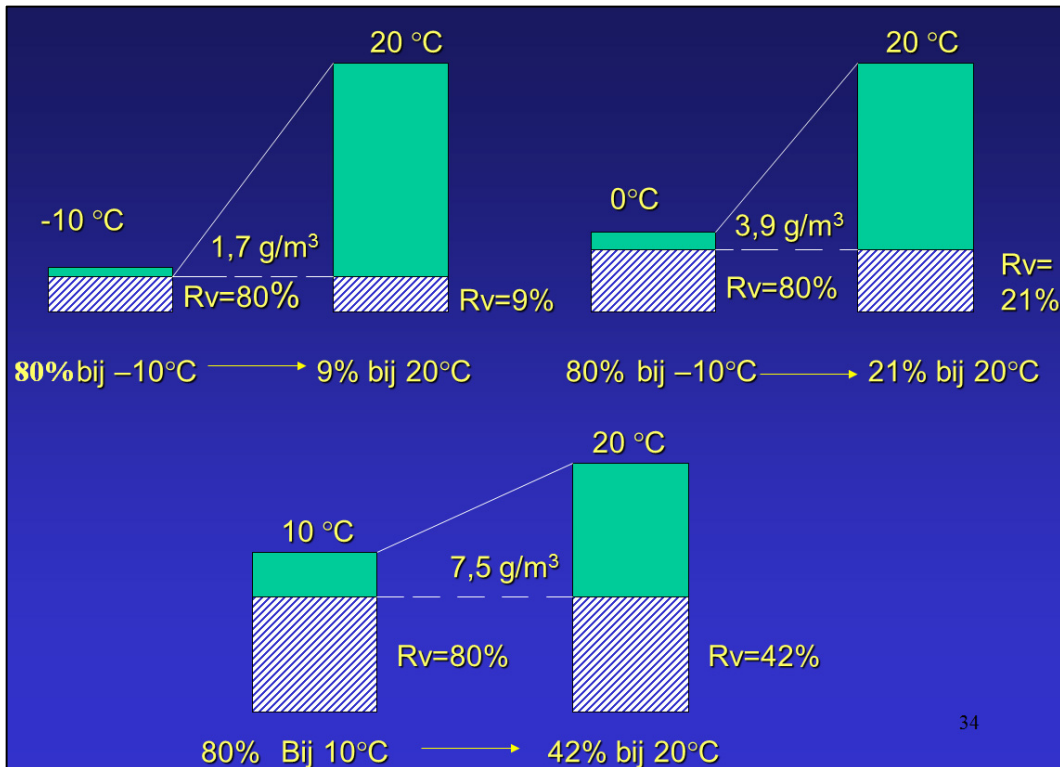
Door het verlagen van de temperatuur in de ruimte wordt de nieuwe relatieve vochtigheid in de ruimte:

$$\varphi_i = \frac{v_i}{v_{\text{sat};14^{\circ}\text{C}}} \cdot 100 = \frac{10,36}{12,05} \cdot 100 = 85,6\%$$

In onderstaande figuur is dit weergegeven:



In figuur 8-6 zijn nog enkele voorbeelden gegeven waarin zichtbaar is wat de consequenties zijn wanneer de temperatuur in een ruimte wordt verhoogd. Natuurlijk is het zo dat het absolute vochtgehalte altijd gelijk blijft (massa gaat immers niet verloren in een afgesloten ruimte).



figuur 8-6 Toename van een temperatuur in een ruimte leidt tot een lagere relatieve vochtigheid.

8.5 De dauwpuntstemperatuur

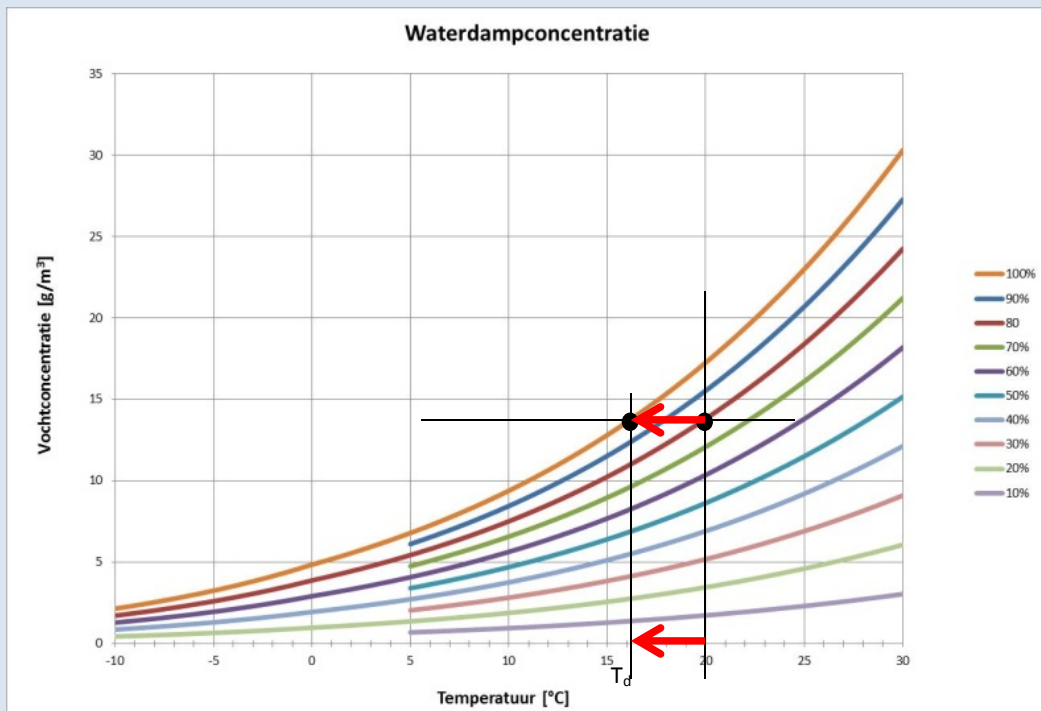
Zoals als eerder is omschreven zal, wanneer lucht afkoelt, op een gegeven moment de in de lucht aanwezige waterdamp condenseren. De temperatuur waarbij dit effect optreedt wordt de dauwpuntstemperatuur genoemd (Θ_c de index "c" staat voor condensation). Dit is dus de temperatuur waarbij de relatieve luchtvochtigheid 100% wordt. In figuur 8-5 kan men zien dat een deel van het glas, waarop de condensatie zichtbaar is, een temperatuur heeft die lager is dan de dauwpuntstemperatuur.

voorbeeld 8-6

Bepaal de dauwpuntstemperatuur van lucht met een temperatuur van 20°C en een relatieve vochtigheid van 80%.

$$v_{\text{sat};20^\circ\text{C}} = 17,27 \text{ g/m}^3, \quad v_{i;20^\circ\text{C};80\%} = 0,8 * 17,27 = 13,82 \text{ g/m}^3$$

Zoek in de tabel (bijlage 2) op bij welke temperatuur er ten hoogste 13,82 g/m³ aan waterdamp aanwezig kan zijn. Antwoord: tussen de 16,2° en 16,3 °C



Dezelfde opgave kan men ook maken maar dan m.b.v. de dampdrukken.

$$p_{\text{sat};20^\circ\text{C}} = 2339 \text{ Pa}, \quad p_{i;20^\circ\text{C};80\%} = 0,8 * 2339 = 1871 \text{ Pa}$$

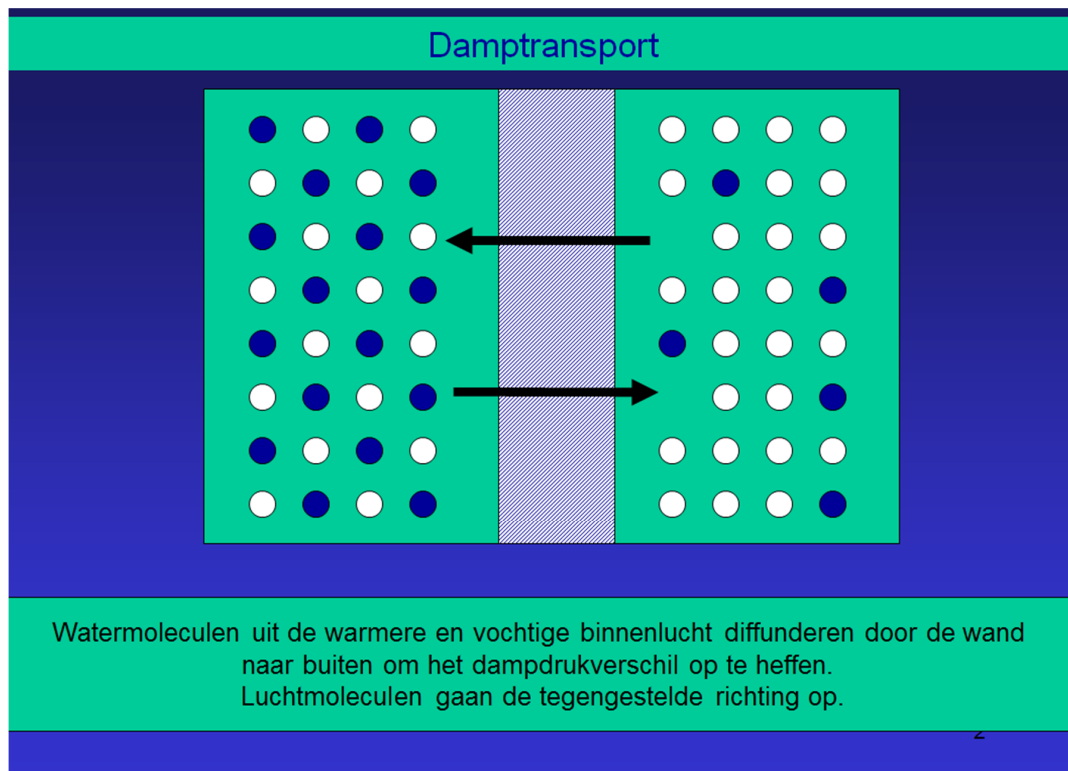
Zoek in de tabel op bij welke temperatuur de dampdruk ten hoogste 1871 Pa kan zijn.

Antwoord: tussen de 16,4° en 16,5 °C

Men ziet dus een klein verschil in vergelijking met het voorbeeld waarin men uitgaat van de vochtconcentratie, dit wordt veroorzaakt door afrondingen in de numerieke formules die gebruik worden om de waarden in de tabellen te bepalen. Voor bouwkundige en civieltechnische toepassingen is deze nauwkeurigheid echter voldoende.

9 Dampdiffusie

In dit onderdeel wordt ingegaan op het begrip diffusie. Diffusie is een proces ten gevolge van de willekeurige beweging van deeltjes. Deze deeltjes kunnen atomen, moleculen of ionen zijn. Deze willekeurige beweging is het gevolg van de kinetische energie die deze deeltjes bezitten. Bij verschillen in concentratie leidt diffusie tot een netto verplaatsing van deeltjes van plaatsen met een hoge concentratie naar plaatsen met een lage concentratie. Diffusie van waterdamp door een constructie vindt dus plaats door verschil in de partiële dampdruk aan beide zijden van een constructie.



Figuur 9-1 Principe van diffusie

Factoren die diffusie beïnvloeden

De hoeveelheid beweging die een deeltje per tijdseenheid kan uitvoeren hangt af van diverse factoren. Een hogere temperatuur zal er voor zorgen dat een deeltje meer kinetische energie krijgt, en dus sneller diffundeert. Ook de grootte van een deeltje is van belang: een klein ion diffundeert in een oplossing veel sneller dan een eiwit. Verder is de hoeveelheid wrijving die een deeltje ontmoet een belangrijke factor: een hogere viscositeit verlaagt de diffusiesnelheid. Belangrijk is ook de aggregatietoestand van een stof: in een gas verloopt diffusie veel sneller dan in een vloeistof. In een kristalrooster zijn de bewegingsmogelijkheden voor een deeltje beperkt⁸.

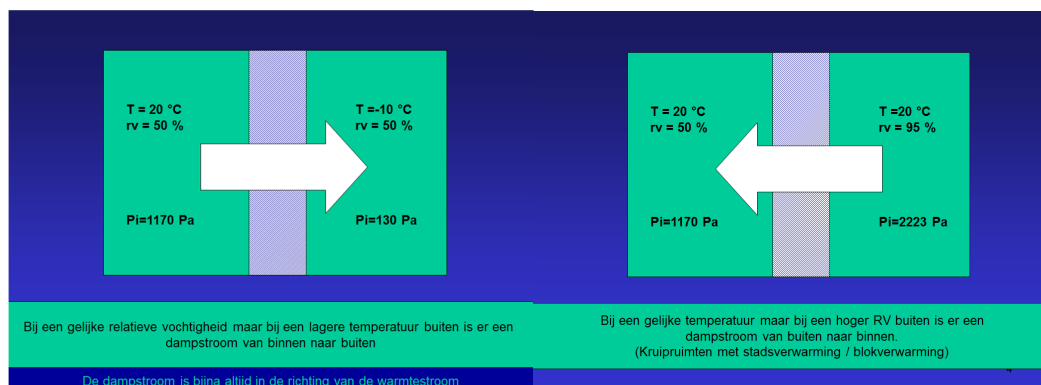
⁸ Bron: Wikipedia, zoekterm diffusie

Waterdampdiffusie

Waterdamp is water in gasvorm en is onzichtbaar. De hoeveelheid waterdamp in de lucht kan indirect gemeten worden⁹. Des te groter de absolute vochtigheid in de lucht is, des te groter is de waterdampdruk. Damptransport gaat altijd in de richting met een lagere dampdruk, zonder rekening te houden met de krachten zoals de zwaartekracht. De richting van het damptransport wordt dus door de grootte van de absolute vochtigheid bepaald, waterdamp zal dus altijd diffunderen in richting waar de absolute vochtigheid lager is. Diffusie vindt ook plaats door bouwstoffen omdat watermoleculen zeer klein zijn. De grootte van een watermolecuul is circa 0,3 nm (1 nanometer = 10^{-9} meter). Deze stoffen hebben echter toch nog een weerstand tegen deze dampdiffusie. Deze dampdiffusieweerstand wordt groter naarmate de stof een grotere dichtheid heeft. Voor zeer dichte stoffen in een constructie kan dus een "file" ontstaan van watermoleculen.

In de winterperiode is de waterdampdruk buiten lager dan de waterdampdruk binnen in een woning. Er is dan dus een dampdrukverschil aanwezig tussen binnen en buiten, dus de richting van de diffusie is van binnen naar buiten. Zoals we eerder hebben gezien zal, in deze situatie, ook de temperatuur afnemen in een constructie van binnen naar buiten. Op het punt waar de dauwpuntstemperatuur in de constructie wordt bereikt zal deze damp overgaan van een gasvormige toestand naar een vloeibare toestand, dat noemen we condensatie, en wanneer het in de bouwkundige constructie optreedt, noemen we het "inwendige condensatie". Na het optreden van de condensatie treden andere fysische processen op: het water zal zich dan verder via capillaire werking verspreiden. Inwendige condensatie in een constructie kan leiden tot schimmelgroei, geeft een afname van de warmteweerstand en het leidt tot het corroderen van bijvoorbeeld spouwankers.

In het algemeen kan men stellen dat de dampstroom dezelfde richting heeft als de warmtestroom.



Figuur 9-2 Principe van de richting van de dampstroom

⁹ Door het meten van de relatieve vochtigheid en de temperatuur kunnen we het absolute vochtgehalte bepalen.

9.1 Waterdamptransport

Het berekenen van vochttransport in/door een constructie heeft een grote analogie met het warmte-transport.

De hoeveelheid waterdamptransport die door een constructie van binnen naar buiten gaat wordt berekend met:

$$g = \delta_0 \frac{\Delta p}{s_d} \quad [kg/(m^2s)]$$

Waarin:

g = waterdamptransport in kg/m^2s

Δp = verschil waterdampdruk binnen en buiten ($p_i - p_e$)

s_d = dampdiffusieweerstand in m

δ_0 = de waterdampdoorlaatbaarheid van lucht, met betrekking tot partiële dampdruk.

In de berekeningen wordt, conform de NEN-EN-ISO 13788 [19], voor deze waarde $2 \times 10^{-10} \text{ kg/(m.s.Pa)}$ aangehouden.

De dampdiffusieweerstand s_d wordt als volgt bepaald:

$$s_d = \mu \cdot d \quad [m/s]$$

Waarin:

s_d = dampdiffusieweerstand in m/s

μ = dampdiffusieweerstandsgetal (geen eenheid)

d = dikte materiaallaag in m

Met de μ -waarde wordt de dampdiffusieweerstand aangegeven van een materiaal.

De μ -waarde wordt als volgt gedefinieerd:

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

Deze waarde wordt gemeten in een laboratorium. In tabel 9-1 zijn enkele waarden weergegeven.

tabel 9-1 Overzicht van enkele dampdiffusieweerstanden

Materiaal	μ	d [m]	s_d [m]
lucht	1	Spouw 0,04	0,04
Minerale wol	1,3	0,1	0,13
Beton	100	0,15	15
Gipskartonplaat	6	0,0125	0,075
PE folie	34000	0,0003	10,2

Uit tabel 9-1 kan men concluderen dat met PE-folie, met een dikte van 0,3 mm, eenvoudig een grote dampdiffusieweerstand is te halen. Er zijn overigens folies (kunststof en aluminium) die veel grotere waarden halen.

Net als bij een warmteweerstand kan men, om de totale dampdiffusieweerstand van een constructie te bepalen, de individuele dampdiffusieweerstanden van de verschillend materiaalagen bij elkaar optellen. De totale dampdiffusieweerstand van een constructie wordt dan:

$$s_{d,T} = \sum_{j=1}^N s_{d,j} = \mu_1 d_1 + \mu_2 d_2 + \mu_3 d_3 + \dots + \mu_N d_N \quad [\text{m/s}]$$

In tegenstelling tot de berekening van het warmtetransport in een constructie worden, in de handmatige berekeningen, de overgangsdifusieweerstanden niet in rekening gebracht (het effect hiervan is, in statische situaties, verwaarloosbaar).

In tabel 9-2 is een overzicht gegeven van de formules voor warmte- en vochttransport. Beide processen zijn gebaseerd op dezelfde principes.

tabel 9-2 Overzicht formules voor warmte- en vochttransport

	Warmtetransport		Vochttransport	
1	Bereken de warmteweerstand van de afzonderlijke materiaallagen.	$R_m = \left(\frac{d}{\lambda}\right)$	Bereken de dampdiffusieweerstand van een laag	$s_d = \mu \cdot d$
2	Lees de warmteweerstand van de eventueel aanwezig spouw af uit, zie tabel 4-2	R_{cav}	Lucht heeft een μ -waarde van 1	Vaak wordt als μd waarde 0 aangehouden (spouw heeft maar een klein effect)
3	Bereken de warmteweerstand R_c van alle materiaallagen (dus inclusief de spouw).	$\sum_{i=1}^{i=n} R_{m_n}$		
4	Bepaal de warmteoverdrachtsweerstand, zie Figuur 4-3	R_{si} en R_{se}	Geen overdrachtsdiffusieweerstanden	
5	Bereken de totale warmteweerstand.	$R_T = R_{si} + \sum R_m + R_{se}$	Bereken de totale dampdiffusieweerstand van een constructie	$s_{d,T} = \sum_{j=1}^N s_{d,j}$
6	Bereken de warmtestroomdichtheid q .	$q_{cd} = \frac{\Delta\theta}{R_T}$ Of: omdat $U_T = \frac{1}{R_T}$ $q_{cd} = U_T \cdot \Delta\theta \quad [W/m^2]$	Bereken de hoeveelheid waterdamptransport (g)	$g = \delta_0 \frac{\Delta p}{S_d}$

10 De berekening van het dampdrukverloop in een constructie

De bepaling van het dampdrukverloop in een constructie is belangrijk. Immers zo kan bepaald worden of er in een constructie condensatie zal optreden of dat er zodanige klimaatcondities in de constructie aanwezig zijn dat er schimmelgroei kan optreden.

In dit dictaat wordt een voorbeeld van vochttransport in een constructie berekend volgens “de Methode van Glaser”. Deze methode geeft een zeer vereenvoudigd beeld van de werkelijkheid. Echter de methode wordt in de “bouwwereld” aanvaard (het is een eenvoudige rekenmethode) waarbij vermeld moet worden dat wanneer deze methode aangeeft dat er geen kans is op condensatie in de constructie, de kans op het optreden van een vochtprobleem in werkelijkheid ook zeer gering is¹⁰.

Het verloop van de dampdruk in een constructie kunnen we via 3 methoden bepalen:

1. De “tabelmethode”, deze wordt uitgewerkt in § 10.1
2. De “directe methode”, deze wordt uitgewerkt in § 10.2
3. Grafische methode (wordt nog niet beschreven)

In de eerste methode wordt het dampdrukverschil per laag berekend. Bij de tweede methode wordt direct de dampdruk op een punt in de constructie berekend. De eerste methode is geschikt wanneer men een mooi tabellarisch overzicht wil hebben van de resultaten. De tweede methode is geschikt om snel een dampdruk in een constructie te bepalen, dit om bijvoorbeeld snel een berekening te controleren die gemaakt is met software.

Onafhankelijk van de gebruikte methode bestaat deze berekening uit drie belangrijke stappen:

1. Het bepalen van dampdrukverloop in een constructie
2. Het bepalen van een temperatuursverloop in een constructie, waarna bij de optredende temperaturen wordt bepaald wat de maximaal aanwezige dampdruk p_{sat} is die bij die temperatuur aanwezig kan zijn.
3. De onder punt 1 en 2 bepaalde waarden worden met elkaar vergeleken. Is de bepaalde dampdruk groter dan de maximaal aanwezige dampdruk p_{sat} , dan is er condensatie. Is deze waarde lager, dan is er geen condensatie aanwezig.

Overigens mag de volgorde van de stappen zoals vermeld onder punt 1 en 2 ook worden omgedraaid.

¹⁰ Vermeld moet worden dat de in de praktijk er weinig vochtschades optreden die het diffusieproces als oorzaak hebben, de meeste vochtschades met inwendige condensatie worden veroorzaakt door luchtlekkages in het binnenblad van de uitwendige scheidingsconstructie.

10.1 Dampspaningsverloop in een constructie met de “tabelmethode”

Om het dampdrukverloop in een constructie te bepalen moet de volgende werkvolgorde aangehouden worden:

1. Bepaal de dampdiffusieweerstand van een laag ($s_{d,i}$)
2. Bepaal de totale dampdiffusieweerstand $s_{d,T}$
3. Bepaal het dampdrukverschil tussen de binnen- en de buitenlucht Δp
4. Bepaal het dampdrukverschil per laag Δp_i per laag
5. Bereken de optredende dampdrukken

Het dampdrukverschil per laag wordt bepaald met de volgende formule:

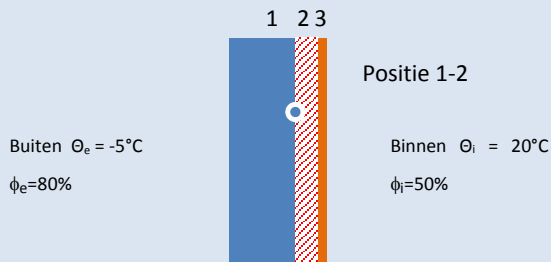
$$\Delta p_i = \frac{s_{d,i}}{s_{d,T}} \times \Delta p \quad [Pa]$$

Waarin:

- Δp_i = Het dampdrukverschil over de beschouwde laag in Pa
- $s_{d,i}$ = De dampdiffusieweerstand van een laag in m
- $s_{d,T}$ = De totale dampdiffusieweerstand van de gehele constructie in m
- Δp = Het dampdrukverschil tussen de binnen- en de buitenlucht ($p_i - p_e$) in Pa

In voorbeeld 10-1 wordt deze methode verder uitgewerkt.

voorbeeld 10-1



Het doel is om te onderzoeken of er condensatie optreedt in deze constructie.

De constructie is als volgt opgebouwd (van buiten naar binnen):

Laag	Omschrijving	d mm	λ W/mk	μ
1	Metselwerk, steens	220	1	9
2	Minerale wol	100	0,035	1,3
3	Gipskartonplaat	12,5	0,13	13

In het voorbeeld wordt per stap aangegeven wat er bepaald moet worden, de toegevoegde onderdelen zijn **rood** weergegeven.

Stap 1 : Bepaal de dampdiffusieweerstand per laag ($s_{d,i}$)

Laag	Materiaal	d [m]	μ	$S_{d,i}$ [m]
3	Metselwerk, steens	0,22	0,9	0,1980
2	Minerale wol	0,1	1,3	0,1300
1	Gipskartonplaat	0,0125	13	0,1625

Stap 2: Bepaalde totale dampdiffusieweerstand $s_{d,T}$

Laag	Materiaal	d [m]	μ	$S_{d,i}$ [m]
3	Metselwerk, steens	0,22	0,9	0,1980
2	Minerale wol	0,1	1,3	0,1300
1	Gipskartonplaat	0,0125	13	0,1625
	$S_{d,T}$			0,4905

Stap 3: Bepaal het dampdrukverschil tussen de binnen- en de buitenlucht Δp

Binnen: $p_{\text{sat};20^\circ\text{C}} = 2339 \text{ Pa}$, $p_{i;20^\circ\text{C};50\%} = 0,5 * 2339 = 1170 \text{ Pa}$

Buiten: $p_{\text{sat};-5^\circ\text{C}} = 402 \text{ Pa}$, $p_{e;20^\circ\text{C};80\%} = 0,8 * 402 = 322 \text{ Pa}$

$\Delta p = 1170 - 322 = 848 \text{ Pa}$

Stap 4: Bepaal het dampdrukverschil per laag Δp_i per laag

Het dampdrukverschil per laag wordt bepaald met de volgende formule:

$$\Delta p_i = \frac{S_{d,i}}{S_{d,T}} \times \Delta p \quad [Pa]$$

Dit dampdrukverschil moet voor alle lagen bepaald worden.

Laag 3 (metselwerk)	$\Delta p_3 = \frac{0,1980}{0,4905} \times 848 = 342 \quad [Pa]$
Laag 2 (isolatie)	$\Delta p_2 = \frac{0,1300}{0,4905} \times 848 = 225 \quad [Pa]$
Laag 1 (gipskartonplaat)	$\Delta p_1 = \frac{0,1625}{0,4905} \times 848 = 281 \quad [Pa]$

Stap 5: Bereken de optredende dampdrukken

We plaatsen alle berekende dampdrukken in de tabel:

Laag	Materiaal	d [m]	μ	$S_{d,i}$ [m]	Δp_i Pa
	Buiten				
3	metselwerk	0,22	0,9	0,1980	342
2	minerale wol	0,10	1,3	0,1300	225
1	gipskartonplaat	0,0125	13	0,1625	281
	Binnen				
	$S_{d,T}$			0,4905	

Hierna worden de dampdrukken (p_n) op de "overgangen" tussen de materiaallagen bepaald.

Laag	Materiaal	d [m]	μ	$S_{d,i}$ [m]	Δp_i [Pa]	p_n [Pa]
	Buiten					322
3	metselwerk	0,22	0,9	0,1980	342	
						664
2	Minerale wol	0,10	1,3	0,1300	225	
						889
1	Gipskartonplaat	0,0125	13	0,1625	281	
	Binnen					1170
	$S_{d,T}$			0,4905		

Nu zijn de dampdrukken bekend in de constructie. Wel moet nog gecontroleerd worden of deze dampdrukken niet groter zijn dan de bij maximale dampdruk (p_{sat}) die optreedt in de constructie. Deze maximale

dampdruk is afhankelijk van de optredende temperatuur in de constructie. Deze wijze om dit te bepalen is opgenomen in § 5.1. In de onderstaande tabel zijn de resultaten vermeld.

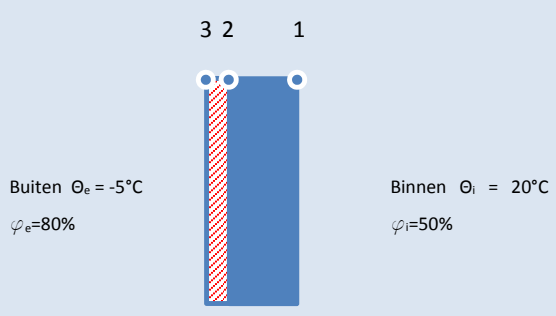
Laag	Materiaal	d [m]	λ [W/mK]	R_{mi} [m ² K/W]	$\Delta\theta_{mi}$ °C	θ_{laag} °C	p_{sat} [Pa]	μ	$S_{d,i}$ [m]	Δp_i [Pa]	p_n [Pa]
	Buiten					-5	402				322
	R_{se}			0,04	0,299						
						-4,7	412				322
3	metselwerk	0,22	1	0,220	1,645			0,9	0,1980	342	
						-3,1	472				664
2	Minerale wol	0,10	0,035	2,857	21,366			1,3	0,1300	225	
						18,3	2104				889
1	Gipskartonplaat	0,0125	0,13	0,096	0,718			13	0,1625	281	
						19,0	2198				1170
	R_{si}			0,13	0,972						
	Binnen					20	2339				1170
				$R_T=3,343$		$\Delta\theta =$ 25			$S_{d,T} =$ 0,4905		$\Delta P =$ 848

Conclusie: Op het grensvlak tussen het metselwerk en de minerale wol is de berekende dampdruk p_n groter dan de dampdruk (p_{sat}) die maximaal aanwezig kan zijn bij $-3,1^\circ\text{C}$. Op die positie treedt condensatie op.

10.2 Dampdrukverloop in een constructie met de “directe methode”

In voorbeeld 10-2 wordt weergegeven hoe de aanwezige dampdruk in een constructie via de “directe methode” wordt bepaald.

voorbeeld 10-2



Buiten $\Theta_e = -5^\circ\text{C}$
 $\varphi_e = 80\%$

Binnen $\Theta_i = 20^\circ\text{C}$
 $\varphi_i = 50\%$

Bereken het verloop van de dampdruk in de constructie (220 mm metselwerk met aan de buitenzijde 100 mm EPS). Bepaal op de posities 1,2 en 3 de aanwezige dampdruk.

Stap 1 :Bereken de dampdiffusieweerstanden van de materiaallagen
Uit het tabellenboek of leveranciersgegevens: $\mu_{\text{metselwerk}} = 9$ en $\mu_{\text{EPS}} = 35$
 $s_{d_{\text{metselwerk}}} = 9 \times 0,22 = 1,98 \text{ m}$
 $s_{d_{\text{EPS}}} = 35 \times 0,1 = 3,5 \text{ m}$

Stap 2: Bereken de totale dampdiffusieweerstand
 $s_{d,T} = s_{d_{\text{metselwerk}}} + s_{d_{\text{EPS}}} = (1,98 + 3,5) = 5,48 \text{ m}$

Stap 3: Bereken de aanwezige dampdrukken
Binnen: $p_{\text{sat},20^\circ\text{C}} = 2339 \text{ Pa}$, $p_{i,20^\circ\text{C};50\%} = 0,5 \cdot 2339 = 1170 \text{ Pa}$
Buiten: $p_{\text{sat},-5^\circ\text{C}} = 402 \text{ Pa}$, $p_{e,20^\circ\text{C};80\%} = 0,8 \cdot 402 = 322 \text{ Pa}$

Stap 4: bereken g
$$g = \delta_0 \frac{\Delta p}{s_{d,T}} = 2 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1170 - 322}{5,48} = 309,49 \cdot 10^{-10} [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$$

De uitkomsten van g zo min mogelijk afronden, deze waarde heeft u verder nodig in de berekening en teveel afronden leidt tot een te grote onnauwkeurigheid.

Stap 5: Bereken de dampdrukken op en in de constructie
De overdrachtdiffusieweerstand hoeft niet in rekening te worden gebracht.
Dus de aanwezige dampdruk op positie 3 is gelijk aan de dampdruk in de ruimte.

De dampdruk op positie 2 (p_2) wordt als volgt bepaald:

Het uitgangspunt is dat g door ieder vlak van de constructie gelijk is (zoals q dit is voor het warmte-transport).

Dus:

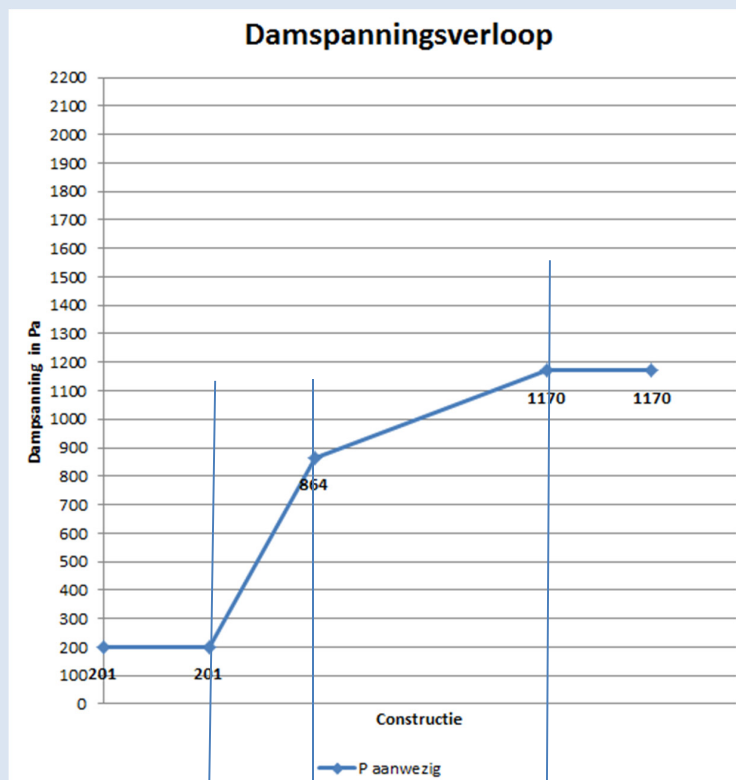
$$g = \delta_0 \frac{\Delta p}{S_{d,T}} = 2 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1170 - P_2}{1,98} = 309,49 \cdot 10^{-10} [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$$

$$\Rightarrow P_2 = 864 \text{ Pa}$$

De dampdruk op positie 1 is gelijk aan de aanwezige dampdruk binnen.

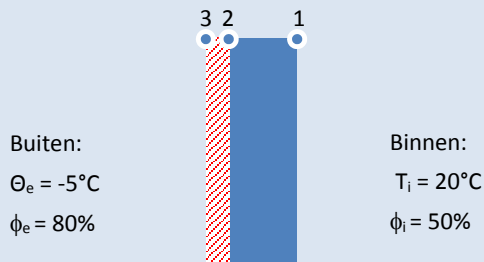
De dampdruk op positie 3 is gelijk aan de aanwezige dampdruk buiten.

Het dampdrukverloop in de constructie is in de onderstaande figuur weergegeven.



In voorbeeld 10-2 is bepaald hoe het verloop is van de aanwezige dampdruk in de constructie. We weten echter nu nog niet of er condensatie in de constructie optreedt. Daarvoor moet de bij de temperatuur aanwezige maximale dampdruk bepaald worden. Deze maximale dampdruk P_s kunnen we pas bepalen als het temperatuurverloop in de constructie bekend is (nu weten we waarom we dat in het eerste jaar hebben moeten leren). In het vervolg op dit voorbeeld (voorbeeld 10-3) zal dit verder uitgewerkt worden.

voorbeeld 10-3

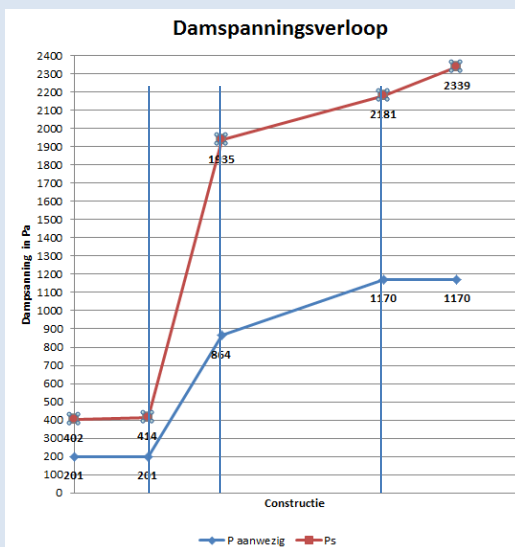


Het doel is nu om te onderzoeken of er condensatie optreedt in deze constructie (als vervolg op voorbeeld 10-2).

Stap 1: bepaal het temperatuurverloop in de constructie en bepaal hierbij de maximaal aanwezige dampdruk p_{sat}

In voorbeeld 5-3 zijn de temperaturen bepaald, in de onderstaande tabel is hiervan een overzicht gegeven. De bij de temperaturen behorende maximale dampdruk zijn opgezocht in de dampdruktabel in bijlage 1.

Positie	Temperatuur °C	p_{sat} (Pa)
Θ_i	20	2339
$\Theta_1 = \Theta_{\text{si}}$	18,88	2181
Θ_2	16,97	1935
$\Theta_3 = \Theta_{\text{se}}$	-4,65	414
Θ_e	-5	402



De aanwezige dampdruk in de constructie is nergens hoger dan de maximale dampdruk. In deze constructie treedt geen condensatie op.

Zoals zichtbaar is in voorbeeld 10-3 treedt er geen condensatie op in een constructie wanneer de aanwezige dampdruk niet boven de maximale dampdruk komt.

In het voorbeeld 10-4 wordt een constructie beoordeeld waarbij aan de binnenzijde van een steensmuur (220 mm metselwerk) 100 mm minerale wol wordt aangebracht met daarvoor een gipskartonplaat van 12,5 mm. Het vochtverloop in deze constructie wordt met behulp van een softwareprogramma berekend. Echter in 1 punt van de constructie wordt op analytische wijze gecontroleerd of constructie juist is ingevoerd en berekend.

voorbeeld 10-4

Buiten $\Theta_e = -5^\circ\text{C}$
 $\phi_e = 80\%$

Positie 1-2

Binnen $\Theta_i = 20^\circ\text{C}$
 $\phi_i = 50\%$

Het doel is om te onderzoeken of er condensatie optreedt in deze constructie en of de berekening juist is uitgevoerd in de software.

De constructie is als volgt opgebouwd (van buiten naar binnen):

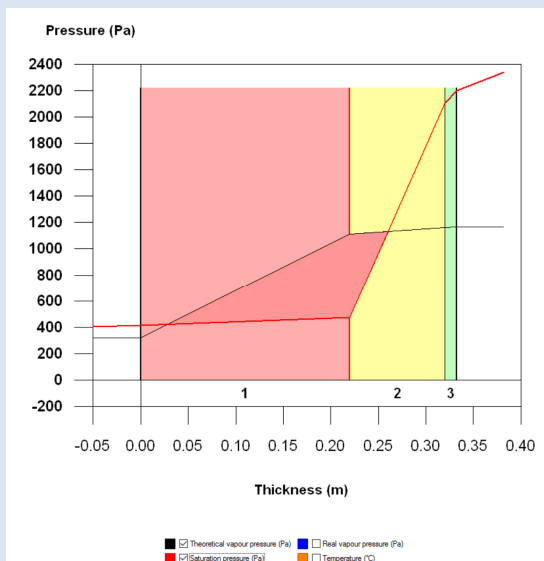
Laag	Omschrijving	d mm	λ W/mk	μ
1	Metselwerk, steens	220	1	9
2	Minerale wol	100	0,035	1,3
3	Gipskartonplaat	12,5	0,13	13

De resultaten zijn:

	θ ($^\circ\text{C}$)	P_{sat} (Pa)	P_n (Pa)	ϕ (%)
External air	-5.00	401.181	320.945	80.0
External surface	-4.70	411.571	320.945	78.0
Interface 1-2	-3.06	473.226	473.226	100.0
Interface 2-3	18.31	2103.235	1107.489	52.7
Internal surface	19.03	2199.977	1168.476	53.1
Internal air	20.00	2336.951	1168.476	50.0

where:
 θ : Temperature, $^\circ\text{C}$.
 p_{sat} : Water vapour saturation pressure, Pa.
 p_n : Water vapour pressure, Pa.
 ϕ : Relative humidity, %.

Uit de uitvoer kan men concluderen dat, op de scheiding van de minerale wol en het metselwerk (surface 1-2), de aanwezige dampdruk p_n groter is dan de maximale dampdruk p_{sat} . Dit betekent dat er condensatie optreedt in de constructie (de relatieve vochtigheid ϕ is op die positie dus 100%).



Controle berekening:

Op het grensvlak tussen de minerale wol en het metselwerk controleren we de achtereenvolgens de aanwezige dampdruk, de temperatuur, en de maximale dampdruk.

Aanwezige dampdruk:

Stap 1: Bereken de totale dampdiffusieweerstand

$$S_{d,T} = (0,22 * 9 + 0,1 * 1,3 + 0,0125 * 13) = 2,2725 \text{ m}$$

Stap 3: Bereken de aanwezige dampdrukken

Binnen: $p_{\text{sat},20^\circ\text{C}} = 2339 \text{ Pa}$, $p_{i,20^\circ\text{C};50\%} = 0,5 * 2339 = 1170 \text{ Pa}$

Buiten: $p_{\text{sat},-5^\circ\text{C}} = 402 \text{ Pa}$, $p_{e,-5^\circ\text{C};80\%} = 0,8 * 402 = 322 \text{ Pa}$

Stap 4: bereken g

$$g = \delta_0 \frac{\Delta p}{S_{d,T}} = 2 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1170 - 322}{2,2725} = 373,157 \times 2 \cdot 10^{-10} [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$$

(de factor $2 \cdot 10^{-10}$ werken we verder niet uit)

Stap 5: bereken de aanwezige dampdruk in punt 1-2

$$g = \delta_0 \frac{\Delta p}{S_{d,T}} = 2 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{1170 - p_{1-2}}{0,1 * 1,3 + 0,0125 * 13} = 373,157 \times 2 \cdot 10^{-10} [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$$

De factor $2 \cdot 10^{-10}$ kunnen we nu eenvoudig wegstrepen, dat voorkomt rekenwerk.

$$\frac{1170 - p_{1-2}}{0,2925} = 373,157 \Rightarrow p_{1-2} = 1061 \text{ Pa}$$

Aanwezige temperatuur:

Stap 1: Bereken de totale warmteweerstand

$$R_T = 0,13 + \frac{0,0125}{0,13} + \frac{0,1}{0,035} + \frac{0,220}{1} + 0,04 = 3,3433 \text{ m}^2/\text{KW}$$

Stap 3: bereken q

$$q = \frac{\Delta\theta}{R_{\text{tot}}} = \frac{20 - -5}{3,3433} = 7,4776 \text{ W/m}^2$$

Stap 4: Bereken de temperaturen op positie 1-2

$$\Theta_{(1-2)} = ? \quad q = \frac{\theta_i - \theta_{1-2}}{R_{s1} + R_{m3} + R_{m2}} = \frac{(20 - \theta_{1-2})}{0,13 + 0,0625 + 2,857} = 7,4776 \Rightarrow \theta_{1-2} = -3,06^\circ\text{C}$$

(in programma $\theta_{1-2} = -3,06^\circ\text{C}$, dus T is goed bepaald)

Maximaal aanwezig dampdruk:

Bij een temperatuur van $-3,06^\circ\text{C}$ lezen we uit de tabel (bijlage 1) af dat de maximale dampdruk 474 Pa kan bedragen.

Conclusie:

Met de "handmethode" is bepaald dat de er een dampdruk van 1061 Pa aanwezig is, maar dat de maximale dampdruk maar 474 Pa kan bedragen. Er treedt dus condensatie op. De werkelijk aanwezige dampdruk is dus 474 Pa. Dit komt bijna overeen met de waarde die bepaald is door de software (473 Pa). Dit kleine verschillen is onder andere te verklaren doordat:

- In de "handmethode" met minder cijfers "achter de komma" gerekend in vergelijking met de software;
- De tabel is een net iets minder nauwkeurige methode om de dampdrukken te bepalen dan dat de in software gebruikte formules dat kunnen berekenen.

10.2.1 Dampremmende lagen

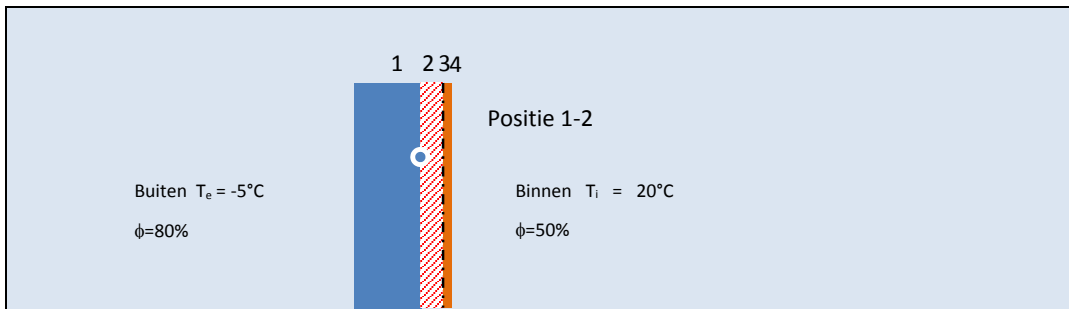
Om inwendige condensatie in een constructie te voorkomen dient men of de constructie aan de buitenzijde te isoleren of voor de isolatie aan de binnenzijde van de constructie (warme zijde) een dampremmende laag aan te brengen. In tabel 10-1 is een overzicht gegeven van dampremmende lagen.

tabel 10-1 Overzicht dampremmende lagen [10]

Dampremmende lagen		
materiaal	dikte (mm)	u
Estrich (15 mm) met bitumen	15,00	155
Bitumenpapier (enkelzijdig)	0,15	580
Bitumenpapier (dubbelzijdig)	0,30	3000
Latexverf	-	1500
Olieverf	0,03	3000-8000
Glasvlies	2,0	4000-60000
Gebitumineerd karton met kunststof tussenlaag	0,80	3500
p.v.c. folie	0,1	9000-45000
Polyethleen-folie	0,1	45000-140000
Polyethyleen folie (tape)	0,1	65000
Polyethyleen folie	0,3	34000
2x dakleer + 3 bitumenlagen	5,0	700000
Polyesterfolie	0,1	14000
Polystyreenfolie	0,1	40000
Asbesthoudende bitumineuze dakbedekking	-	2300
Asfaltbitumen vilt (vilt 500 g/m ² ; bit.1 kg/m ²)	-	5000-23000
Asfaltbitumen op glasvezelbasis	-	20000-90000
Teervilt	-	75000

Voor de constructie uitvoorbeeld 10-4 is in voorbeeld 10-5 het dampdrukverloop in de constructie bepaald echter met toepassing van een dampremmende laag aan de warme zijde van de constructie.

voorbeeld 10-5



Het doel is om te onderzoeken of er condensatie optreedt in deze constructie.

De constructie is als volgt opgebouwd (van buiten naar binnen):

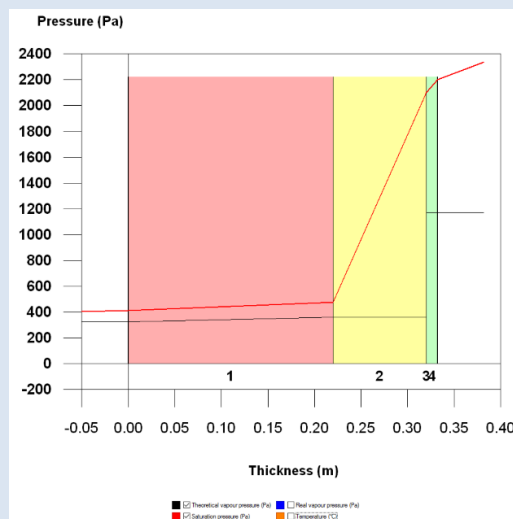
Laag	Omschrijving	d mm	λ W/mk	μ
1	Metselwerk, steens	220	1	9
2	Minerale wol	100	0,035	1.3
3	Polyethyleenfolie	0,1	0,2	45000
4	Gipskartonplaat	12,5	0,13	13

De resultaten zijn (bepaald met software):

	θ (°C)	P_{sat} (Pa)	P_n (Pa)	ϕ (%)
External air	-5.00	401.181	320.945	80.0
External surface	-4.70	411.571	320.945	78.0
Interface 1-2	-3.06	473.226	356.556	75.3
Interface 2-3	18.31	2103.235	358.895	17.1
Interface 3-4	18.31	2103.235	1168.251	55.5
Internal surface	19.03	2199.977	1168.476	53.1
Internal air	20.00	2336.951	1168.476	50.0

where:

- θ : Temperature, °C.
- P_{sat} : Water vapour saturation pressure, Pa.
- P_n : Water vapour pressure, Pa.
- ϕ : Relative humidity, %.
- g_c : Condensation flow density, $g/(m^2 \cdot g/(m^2 \cdot month))$.



Uit de rekenresultaten kan men concluderen dat, op de scheiding van de minerale wol en het metselwerk (interface 1-2), de aanwezige dampdruk ($P_n = 357$ Pa) kleiner is dan de maximale dampdruk P_{sat} (473 Pa). Dit betekent dat er geen condensatie optreedt in de constructie (de relatieve vochtigheid ϕ is dus lager dan 100% (en bedraagt 75,3%).

In de grafiek is dit goed zichtbaar:

11 Vochtbalans

In een gebouw wordt er door de gebruikers vocht geproduceerd. In industriële processen zijn dat vaak grote hoeveelheden (denk aan fabrieken, wasserijen) e.d. In de woning is de hoeveelheid vocht afkomstig van mensen of dieren (het vocht dat we uitademen of uitzweten) of van activiteiten die wij uitvoeren, zoals douchen, wassen, het drogen van de was en koken.



figuur 11-1 Drogen van was in slaapkamer (is een slaapkamer hiervoor geschikt?)

In tabel 11-1 is een overzicht gegeven van de vochtproductie in een woning. Dit vocht moet via het ventilatiesysteem worden afgevoerd. In een woning moet er daarom altijd een afvoerpunt van “vervuilde lucht” aanwezig zijn in de keuken, badkamer en toilet met een capaciteit van respectievelijk ten minste 21, 14 en 7 dm³/s.

tabel 11-1 vochtproductie in een woning

		Dampproductie (g/h)
Volwassene	Lichte fysieke activiteit	30-60
	Matige fysieke arbeid	120-200
	Zware inspanning	200-300
Baden	Ligbad	700
	Douche	<2600
Keuken	Koken, Afwassen	600 - 1500
	Daggemiddeld	100 a 150
Vrij water	M ²	40

In hoofdstuk7 is een energiebalans voor een ruimte opgesteld, het opstellen van een vochtbalans kan op een analoge wijze worden uitgevoerd.

Voor een stationaire toestand geldt:

$$\text{Toegevoerde hoeveelheid} + \text{Afgevoerde hoeveelheid} = 0$$

Wanneer men een ruimte ventileert met lucht dan betekent dit dat er net zoveel lucht moet worden toegevoerd als dat er wordt afgevoerd. Dit verklaart dan direct dat wanneer al één van ventilatievoorzieningen (een toevoer-, overstroom- of afvoervoorziening) in een woning niet werkzaam is, er dus ook geen lucht kan worden afgevoerd.

Zoals bekend is bevat buitenlucht altijd vocht. Dus als we ventileren halen we ook vocht van buiten. Echter doordat wij de lucht verwarmen, waardoor de lucht meer vocht kan bevatten, kan de lucht, ondanks dat we deze met een beetje vocht van buiten halen, veel meer vocht afvoeren. Een hogere vochtproductie in een ruimte heeft dus tot gevolg dat men meer moet ventileren (denk bijvoorbeeld aan het drogen van wasgoed in een ruimte en koken).



figuur 11-2 Principe vochtbalans

De vochtbalans voor een ruimte is dan (zie figuur 11-2):

$$v_e \cdot n \cdot V + G = v_i \cdot n \cdot V$$

Deze balans wordt weergegeven als:

$$v_i = v_e + \frac{G}{nV}$$

Waarin:

- n = Ventilatievoud van de ruimte [1/h] (aantal luchtwisselingen per uur in een ruimte)
- v_e = Vochtconcentratie (absolute vochtgehalte) van de buitenlucht [g/m^3]
- v_i = Vochtconcentratie (absolute vochtgehalte) van de binnenlucht [g/m^3]
- V = Volume van de ruimte [m^3]
- P = Vochtproductie [g/h].

De vochtconcentraties van de binnen- en buitenlucht worden in de praktijk bepaald door het meten van de temperatuur en relatieve vochtigheid, uit deze waarden wordt de vochtconcentratie berekend.

voorbeeld 11-1

In een klaslokaal met een oppervlakte van 50 m^2 en een hoogte van 3 m (150 m^3) zijn 30 personen aanwezig. In dit lokaal wordt de lucht 1 maal per uur verversd (dus het ventilatievoud = 1). De binnentemperatuur in het lokaal bedraagt 22°C en de buitentemperatuur bedraagt 0°C met een relatieve vochtigheid ϕ_e van 100% . Gevraagd: bepaal de relatieve vochtigheid ϕ_i in het lokaal?

$$v_i = v_e + \frac{G}{nV}$$

Stap 1: Bepaal de vochtconcentratie buiten:

$$v_{\text{sat}; 0^\circ\text{C}} = 4,84 \text{ g}/\text{m}^3, \quad v_i; 0^\circ\text{C}; 100\% = 1 * 4,84 = 4,84 \text{ g}/\text{m}^3$$

Stap 2: Bepaal de vochtproductie in de ruimte m.b.v. tabel 8.2

Luisteren naar een docent is een rustige activiteit: $G = 50 \text{ g}/\text{h}$ per persoon. Dus in het lokaal wordt door de 30 aanwezige personen 1500 gram vocht per uur geproduceerd.

Stap 3: Bepaal het ventilatievoud (is gegeven)

$$n = 1 \frac{1}{h}$$

De lucht in de ruimte wordt dus 1 maal per uur verversd.

Stap 4: Bepaal v_i

$$v_i = v_e + \frac{G}{nV} = 4,84 + \frac{1500}{1,0 \times 150} = 4,84 + 10,0 = 14,84 \text{ g}/\text{m}^3$$

Stap 5: Bepaal ϕ_i

Bij een binnentemperatuur van 22°C bedraagt de maximaal aanwezige vochtconcentratie:

$$v_{\text{sat}; 20^\circ\text{C}} = 19,4 \text{ g}/\text{m}^3$$

$$\phi_i = \frac{v_i}{v_{\text{sat}}} \cdot 100\% = \frac{14,85}{19,4} \cdot 100\% = 77\%$$

voorbeeld 11-2

In een slaapkamer met een oppervlak van 5 m² en een hoogte van 2,6 m slaapt één bewoner. Deze bewoner heeft zijn ventilatievoorziening geopend en deze heeft precies de "ten minste volgens het Bouwbesluit benodigde ventilatiecapaciteit" van 7 dm³/s. De binnentemperatuur in de slaapkamer bedraagt 16°C en de buitentemperatuur bedraagt 5°C met een relatieve vochtigheid ϕ_e van 85%.

Gevraagd: bepaal de relatieve vochtigheid ϕ_i in de slaapkamer?

Stap 1: Bepaal de vochtconcentratie buiten:

$$v_{\text{sat},5^\circ\text{C}} = 6,79 \text{ g/m}^3, \quad v_{i,5^\circ\text{C},85\%} = 0,85 \cdot 6,79 = 5,77 \text{ g/m}^3$$

Stap 2: Bepaal de vochtproductie in de ruimte m.b.v. tabel 11-1

Slapen is een rustige activiteit: $G = 30 \text{ g/h}$ per persoon

Stap 3: Bepaal het ventilatievoud

Het volume van de ruimte is $5 \cdot 2,6 = 13 \text{ m}^3$

De ventilatiecapaciteit is 7 dm³/s dit is gelijk aan 25,2 m³/h

Het ventilatievoud van de ruimte is dan:

$$n = \frac{25,2}{13} = 1,93 \frac{1}{h}$$

De lucht in de ruimte wordt dus 1,93 maal per uur ververst.

Stap 4: Bepaal v_e

$$v_i = v_e + \frac{G}{nV} = 5,77 + \frac{30}{1,93 \cdot 13} = 5,77 + 1,20 = 6,97 \text{ g/m}^3$$

Stap 5: Bepaal ϕ_i

Bij een binnentemperatuur van 16°C bedraagt de maximaal aanwezige vochtconcentratie:

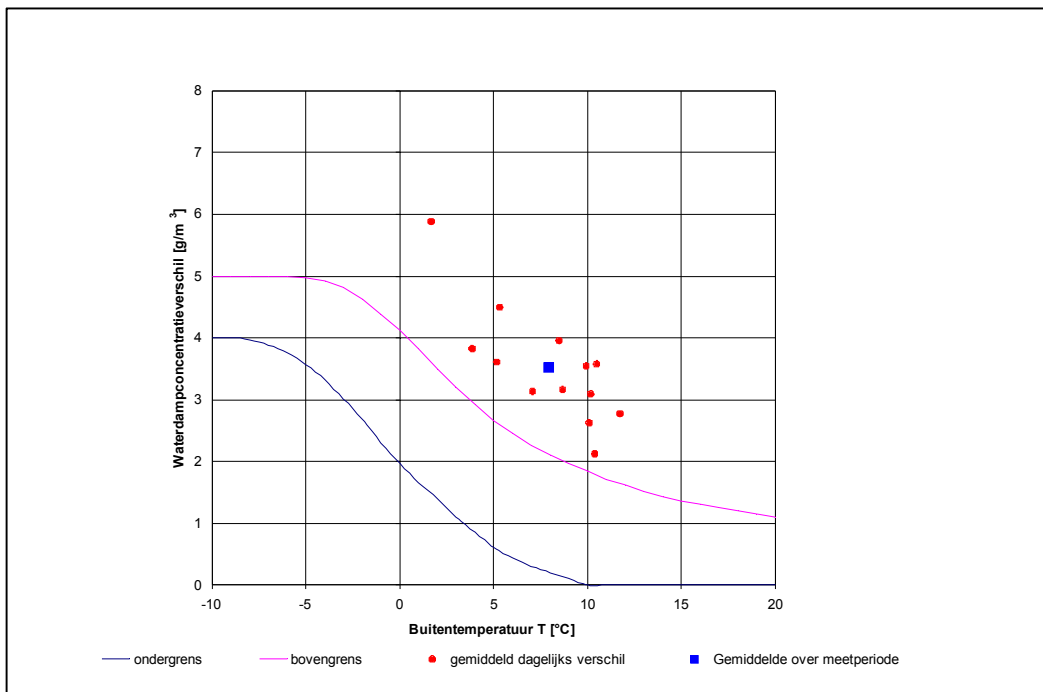
$$v_{\text{sat},16^\circ\text{C}} = 13,61 \text{ g/m}^3$$

$$\phi_i = \frac{v_i}{v_{\text{sat}}} \cdot 100\% = \frac{6,97}{13,61} \cdot 100\% = 49\%$$

Om te bepalen of door een bewoner te veel vocht wordt geproduceerd (dit hoeft niet altijd de bewoner te zijn, ook door een damp-open begane grondvloer kan er veel vocht in de woning komen), wordt gekeken naar het dampconcentratieverschil Δv tussen de binnen- en buitenlucht.

$$\Delta v = v_i - v_e = \frac{G}{nV}$$

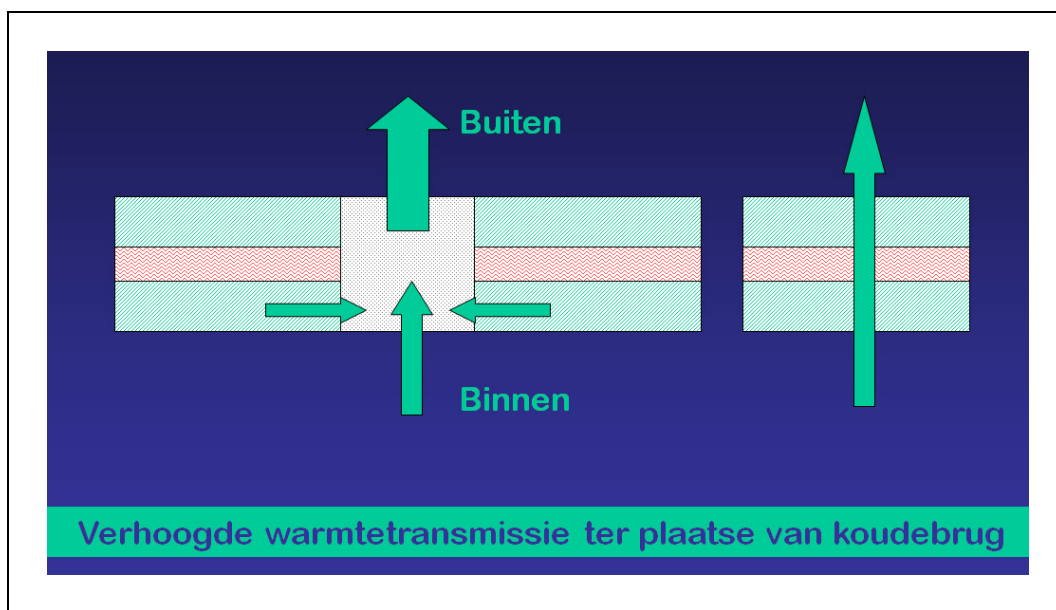
Uit het dampconcentratie verschil tussen de binnen- en buitenlucht ($c_i - c_e$) kan men oordelen of er goed of onvoldoende geventileerd wordt in een ruimte. Deze waarde zet men uit in het "Van der Kooi diagram". In het algemeen wordt gesteld dat wanneer een binnenklimaat binnen de grenzen van klimaatklasse 2 ligt (zie figuur 8.3) de kans op schimmelgroei op uitwendige scheidingsconstructies (gevels e.d.) beperkt blijft. In het "Van der Kooi diagram" gaat men uit van gemiddelde meetwaarden over een dag of een week. Het is niet juist om te oordelen over een binnenklimaat indien men uitgaat van 1 meetwaarde, immers de bewoner kan net gedoucht of gekookt hebben, of de bewoner heeft juist extra geventileerd voordat de onderzoeker in de woning kwam. Ook moet men de meting uitvoeren in een periode dat de gemiddelde "dag/nacht temperatuur" kleiner is dan 10°C.



figuur 11-3 "Van der Kooi diagram", het gemiddelde vochtconcentratieverschil ligt in klimaatklasse 3, in deze slaapkamer is (vooral bij thermisch matig geïsoleerde woningen, de kans op schimmelgroei zeer groot).

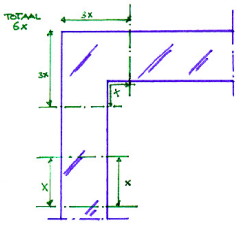
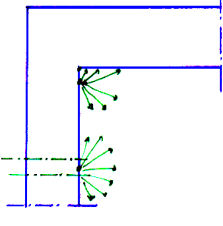
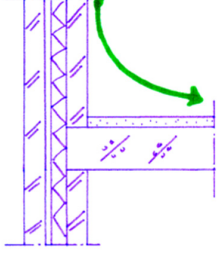
12 Koudebruggen

Een koudebrug is een plek in de buitenschil waar de warmtestroom naar buiten beduidend groter is dan in de aangrenzende gedeelten er omheen. Doordat op die plek meer warmte wordt afgevoerd zal de binnenoppervlaktetemperatuur lager zijn. Zoals bekend is leidt een lagere temperatuur tot een hogere relatieve vochtigheid en daardoor kunnen schimmel- en vochtproblemen ontstaan, in het algemeen kan men stellen dat de kans op schimmelgroei zeer groot wordt wanneer ter plaatse van een oppervlak, gedurende een langere periode de relatieve vochtigheid groter is dan 80%¹¹.



¹¹ Er zijn ook schimmels die ook bij een lagere relatieve vochtigheid kunnen groeien.

Dat de warmtestroom naar buiten groter is hoeft niet alleen het gevolg te zijn van een “directe” verbinding tussen binnen- en buiten, maar kan ook het gevolg zijn van het feit dat warmteverliezen buiten groter zijn en binnen kleiner.

		
<p>Verhoogde warmte-afgifte aan de buitenzijde. Doordat het oppervlak dat warmte afvoert groter is dan het oppervlak dat warmte toevoert (Koelvin-effect)</p>	<p>Ten gevolge van de blikfactoren wordt de warmtetoevoer t.g.v. straling van binnenuit beperkt</p>	<p>De warmtetoevoer t.g.v. convection wordt, door het afbuigen van de luchtstroming beperkt</p>

Of er nu uiteindelijk schimmelgroei optreedt op een koudebrug is afhankelijk van factoren als:

- Bewonersgedrag (vochtproductie en verwarmen van een ruimte)
- De kwaliteit van het ventilatiesysteem (en het gebruik hiervan)
- De wijze waarop aan de binnenzijde warmte kan worden toegevoerd naar de koudebrug en aan de buitenzijde wordt afgevoerd.
- Het buitenklimaat (temperatuur, wind, oriëntatie)
- Situatie (hoe is het pand georiënteerd t.o.v. de omgeving)

Het is natuurlijk bij het vaststellen van regels voor koudebruggen niet mogelijk om rekening te houden met al deze variabelen. Daarom is, uitgaande van gemiddeld bewonersgedrag m.b.t. ventileren en verwarmen, een gemiddelde buitentemperatuur, en het uitgangspunt dat de kans op schimmelgroei zeer groot is vanaf een relatieve vochtigheid van 80%, een methode ontwikkeld die een minimum eis stelt aan de binnenoppervlaktetemperatuur van een “uitwendige scheidingsconstructie”. Omdat deze binnenoppervlaktetemperatuur wordt uitgerekend bij een binnentemperatuur van 18 °C en een buitentemperatuur van 0 °C is het begrip binnenoppervlaktetemperatuurfactor, kortweg f-factor, ingevoerd.

De temperatuuroppervlaktefactor f_{ri} wordt als volgt bepaald:

$$f_{rsi} = \frac{\theta_{s,i} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Waarin:

- $\theta_{s,i}$ Binnenoppervlaktetemperatuur [°C]
- θ_e Buitentemperatuur [°C]
- θ_i Binnentemperatuur [°C]

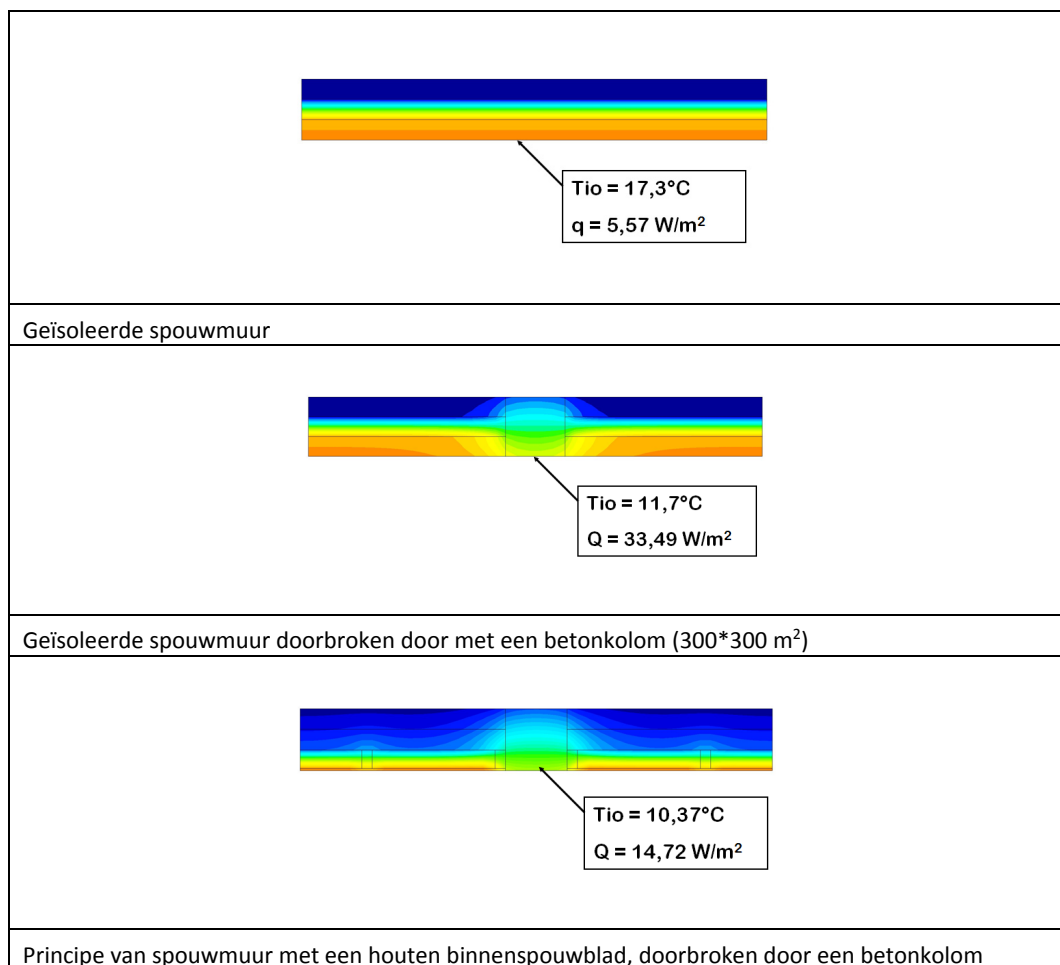
Omdat in de NEN norm wordt aangehouden dat de binnentemperatuur 0°C en de buitentemperatuur 18°C is, vereenvoudigd de bovenstaande formule tot:

$$f_{rsi} = \frac{\theta_{s,i}}{18}$$

In het Bouwbesluit een wordt een eis gesteld aan de temperatuuroppervlaktefactor. Deze eis is voor woningen en logiesgebouwen $f \geq 0,65$ en voor (andere) utiliteitsbouwwerken $f \geq 0,50$. Dit betekent dat de binnen-oppervlakte-temperatuur van deze gebouwen respectievelijk minstens 11,7 °C en 9 °C bedraagt bij een binnentemperatuur van 18 °C en een buitentemperatuur van 0 °C. Overigens is deze eis alleen van toepassing in verblijfsgebieden, badkamers en toiletten.

Behalve uit oogpunt van gezondheid is het ook uit energetisch oogpunt wenselijk om koudebruggen (in de energieberekening vaak lijnkoudebruggen genoemd) te beperken. Doordat inmiddels alle gevelvlakken goed geïsoleerd worden, onder invloed van de energieprestatieberekeningen, wordt de invloed van deze lijnkoudebruggen in het totale energieverlies van een gebouw steeds groter.

In figuur 12-1 is dit weergegeven.



figuur 12-1 Niet geïsoleerde “doorbrekingen” leiden niet alleen tot een lagere oppervlaktetemperatuur maar ook tot een verhoogd energieverlies.

Bronnen

Boeken en publicaties

- [1] Linden, A.C. van der, Bouwfysica, 6^e druk
- [2] Wiese, G, Wasserdampfdiffusion, Ein Beitrag zur praktischen Bauphysik, 1985
- [3] Hens, H, Toegepaste Bouwfysica 1, 2^e druk 1996
- [4] Bouwfysisch tabellarium, TU-delft, faculteit der Civiele Techniek, 1987
- [5] NEN-EN-ISO 13788:2001 Hygrothermal performance of building components en elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods.
- [6] E. Tammes en B.H. Vos, Vocht in bouwconstructies, Bouwcentrum 1966
- [7] E. Tammes en B.H. Vos, Warmte/ en vochttransport in bouwconstructies, Kluwer 1980
- [8] Seiffert K, Wasserdampfdiffusion im Bauwesen, Bauverlag GmbH, 1967
- [9] Fischer e.l. , Lehrbuch der Bauphysic, 6^e auflage, Vieweg + Teubner Verlag, 2008
- [10] DGMR: tabellarium 2010, www.dgmr.nl
- [11] NEN 1068, Thermische isolatie van gebouwen – Rekenmethoden, NEN, maart 2012
- [12] Hagentoft, Carl-Eric, Introduction to Building Physics, Studentliteratuur AB 2001
- [13] Lohmeyer, Gottfried C.O., Praktische Bauphysik, Teubner 2001
- [14] Fischer et al, Lehrbuch der Bauphysik, Vieweg en Teubner, 2008
- [15] P.J.J. Vervoort en W.A.M. Aarnink, Natuurkunde deel 2, Educaboek – Stam Technische Boeken, 1979
- [16] G. van der Linden en P. van Loon, Toegepaste Thermodynamica, HBuitgevers, 2004
- [17] Meininger W.J. , Inleiding tot de Bouwfysica, dictaat HTS Rotterdam, 1987
- [18] SBR Infoblad 064 Koudebruggen; inventarisatie van kritische plaatsen, SBR
- [19] NEN-EN-ISO 13788:2012 Hygrothermal performance of buildingcomponents and buildingelements-Internal surface temperature to avoid critical surface humidity en interstitial condensation – Calculation methods – NEN 2013
- [20] Bläsi, Walter, Bauphysic, 8e auflage, Europa Lehrmittel, 2011
- [21] Modest, Michel F, Radiative heat transfer, McGraw-Hill, 1993
- [22] Bosch JS, Energiegebruik van kunstijsbanen, afstudeerverslag TU Delft, 1994
- [23] Lienhard, John H (IV en V), A heat transfer textbook, Phlogiston Press, 2006
- [24] Veldst C.A, Zonnestraling in Nederland, KNMI 1992
- [25] ISSO, Zonneboilers ontwerp en uitvoering, ISSO publicatie 14, 1983
- [26] Verhoeven AC, Bouwfysica 1, DUM, 1984
- [27] ISSO publicatie 32, Uitgangspunten temperatuursimulatieberekeningen 1994
- [28] NEN 7120, Energieprestatie van gebouwen, NEN, April 2011
- [29] Handboek Gemeenten Energieprestatie gebouw, Publicatie-nr2 EGOW1218, Agentschap NL, juni 2012
- [30] NEN-EN-ISO 10077-1, Thermische eigenschappen van ramen, deuren en luiken, berekening van de warmtedoorgangscoefficiënt, deel 1 algemeen, NEN.
- [31] NEN 2778, Vochtwering in gebouwen, NEN, juni 2015

- [32] NEN-EN-ISO 13791:2012, Thermal performance of buildings. Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling. General criteria and validation procedures. NEN, April 2012.
- [33] NEN 5128, Energieprestatie van woonfuncties en woongebouwen, NEN 2004
- [34] VELUX, Daylight, Energy and Indoor Climate Basic Book, version 3.0 2014. (www.velux.com)

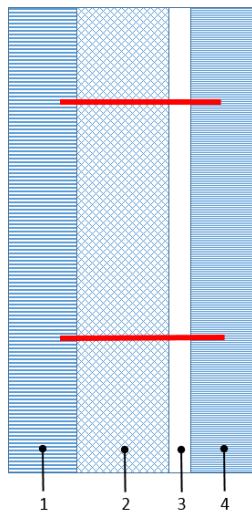
Internet / overige

- [i1] www.wikipedia.nl 2010 (Zoekterm: Diffusie)
- [i2] www.wikipedia.org juli 2011 (Zoekterm: Planck's law)
- [i3] www.wizer.nl 2010 (kennisnet bouw)
- [i4] www.binksoftware.nl
- [i5] www.sbrcur.net <http://www.isover.nl/>
- [i6] www.rockwool.nl
- [i7] www.mi.nl
- [i8] www.wikepedia.nl juli 2011 (zoekterm houtskool: foto door Romary)
- [i9] Foto Gemeente Rotterdam Stadsontwikkeling afdeling Vergunningen
- [i10] [TU-DELFT www.bk.tudelft.nl/bouwtechnologie/installaties/onderwijs/leermiddelen/leermidd_tekst.htm](http://TU-DELFT/www.bk.tudelft.nl/bouwtechnologie/installaties/onderwijs/leermiddelen/leermidd_tekst.htm) (2009)
- [i11] www.wikepedia.nl (zoekterm: elektromagnetische straling), oorspronkelijk bron NASA
- [i12] www.knmi.nl

BIJLAGE 1

Voorbeeldberekening R_c waarde spouwmuur conform de NEN 1068

Bijlage 1 Bepaling van de Rc-waarde van een spouwmuur.



Spouwmuur, metselwerk met spouwankers

Opbouw (van binnen naar buiten):

Laag	Materiaal	d [mm]	λ_{calc} [W/mK]
1	Kalkzandsteen	100	0,90
2	Isolatie	170	0,035
3	Spouw (niet geventileerd)	30	
4	Metselwerk	100	1,00

Spouwankers RVS: diameter 4 mm, 4 stuks per m^2 , $\lambda = 17$ W/mK

Het volgende stappenplan moet worden aangehouden:

1. berekenen van de totale warmteweerstand R_T
2. berekenen van de warmtedoorgangscoefficiënt U_T
3. bepalen van de toeslagfactor ΔU
4. bepalen van de warmtedoorgangscoefficiënt U_c
5. berekenen van de warmteweerstand R_c
6. presentatie van gegevens

Stap 1: berekenen van de totale warmteweerstand

$$R_T = R_{si} + \sum_i (R_{m,i}) + R_{se} \quad [(m^2K)/W]$$

$$R_T = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_{calc;1}} + \frac{d_2}{\lambda_{calc;2}} + R_{cav;nv} + \frac{d_4}{\lambda_{calc;4}} + R_{se} \quad [(m^2K)/W]$$

De waarden voor R_{si} en R_{se} worden afgelezen uit Figuur 4-3. R_{si} bedraagt 0,13 m^2K/W en R_{se} bedraagt 0,04 m^2K/W . De warmteweerstand van een niet geventileerde spouw ($R_{cav;nv}$) groter dan 20 mm bedraagt 0,18 m^2K/W , zie tabel 4-2.

$$R_T = 0,13 + \frac{0,1}{0,9} + \frac{0,170}{0,035} + 0,18 + \frac{0,1}{1} + 0,04 = 5,41825 \quad [(m^2K)/W]$$

Stap 2: berekenen van de warmtedoorgangscoefficiënt U_T

$$U_T = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{5,41825} = 0,184561 \quad [W/(m^2K)]$$

Stap 3: bepalen van de toeslagfactor ΔU

In dit deel van de berekeningen worden de toeslagen bepaald op de berekende U_T waarde:

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_{fa} + \Delta U_r + \Delta U_w \quad [W/(m^2K)]$$

Waarin:

ΔU_a : toeslagfactor voor convectieve invloeden ("Air voids"). Bijvoorbeeld: isolatie niet goed bevestigd tegen binnenblad spouwmuur

ΔU_{fa} : toeslagfactor voor bevestigingshulpmiddelen, zoals spouwankers

ΔU_r : toeslagfactor om de invloed van een "omgekeerd dak" in rekening te brengen

ΔU_w : toeslagfactor voor bouwkwaliteit

In deze situatie zijn allen de ΔU_{fa} en de ΔU_w van toepassing:

Berekening ΔU_w :

$\Delta U_w = 0,00 \times U_T$ Bij de toepassing van cellulair glas

$\Delta U_w = 0,02 \times U_T$ Wanneer de constructie onder een gecertificeerd kwaliteitsborgingssysteem wordt vervaardigd of geïnstalleerd

$\Delta U_w = 0,05 \times U_T$ In alle andere gevallen

In dit voorbeeld wordt de isolatie op de bouwplaats aangebracht dus:

$$\Delta U_w = 0,05 \times U_T = 0,05 \times 0,184561 = 0,009228 \quad [W/(m^2K)]$$

Berekening ΔU_{fa} :

Ten eerste wordt de correctiefactor α_{fa} voor bevestigingshulpmiddelen bepaald.

$$\alpha_{fa} = \left(0,8 \times \frac{d_{fa}}{d_{iso}}\right) \times \frac{(n_{fa} \times \lambda_{fa} \times A_{fa})}{d_{iso}}$$

Waarin:

α_{fa} = de correctiefactor voor bevestigingshulpmiddelen W/m^2K

d_{fa} = Indringingsdiepte van het bevestigingshulpmiddel in de isolatielaag in m

d_{iso} = Dikte van de isolatielaag in m

n_{fa} = Aantal bevestigingsmiddelen in de isolatielaag per m^2

λ_{fa} = Warmtegeleidingscoëfficiënt van de bevestigingshulpmiddelen in W/mK

A_{fa} = Netto-oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het bevestigingshulpmiddel in m^2

d_{iso} = Dikte van de isolatielaag in m

$$\alpha_{fa} = \left(0,8 \times \frac{0,170}{0,170}\right) \times \frac{\left(4 \times 17 \times \frac{1}{4} \times \pi \times 0,004^2\right)}{0,170} = 0,0040212$$

$$\Delta U_{fa} = \alpha_{fa} \times \left(\frac{R_{m2}}{R_T}\right)^2 = 0,0040212 \times \left(\frac{4,85714}{5,41825}\right)^2 = 0,0032315 \quad W/(m^2K)$$

De hierboven weergegeven waarde $R_{m,2}$ is in het voorbeeld de warmteweerstand van de isolatielaag (2^e laag)

$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_{fa} + \Delta U_r + \Delta U_w \quad [W/(m^2K)]$$

$$\Delta U = 0 + 0,0032315 + 0 + 0,009228 = 0,0124595 \quad [W/(m^2K)]$$

Stap 4: bepalen van de warmtedoorgangscoefficiënt U_c

$$U_c = U_T + \Delta U = 0,184561 + 0,0124595 = 0,1970205 \quad [W/(m^2K)]$$

Stap 5: berekenen van de warmteweerstand R_c

$$R_c = \frac{1}{U_c} - R_{si} - R_{se} = \frac{1}{0,1970205} - 0,13 - 0,04 = 4,9056142 \quad [(m^2K)/W]$$

Stap 6: Presentatie van gegevens

$$\Delta U = 0,01 \text{ W/m}^2 \text{ K (afroonden op 2 cijfers)}$$

$$U_T = 0,18 \text{ W/m}^2 \text{ K (afroonden op 2 cijfers)}$$

$$R_c = 4,9 \text{ m}^2\text{K/W (afgekapt op 1 cijfer)}$$

BIJLAGE 2

Dampdruk- en Vochtconcentratietabel

Temperatuur [C]	De verzadigde waterdampspanning in Pascal (Pmax)									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
40	7383	7423	7463	7502	7542	7583	7623	7664	7704	7745
39	6999	7036	7074	7112	7150	7189	7227	7266	7305	7344
38	6631	6667	6704	6740	6776	6813	6850	6887	6924	6961
37	6281	6315	6350	6384	6419	6454	6489	6525	6560	6596
36	5947	5979	6012	6045	6078	6112	6145	6179	6213	6247
35	5628	5659	5690	5722	5754	5785	5817	5849	5882	5914
34	5324	5354	5384	5414	5444	5474	5505	5535	5566	5597
33	5034	5063	5091	5120	5148	5177	5206	5236	5265	5294
32	4759	4786	4813	4840	4867	4895	4922	4950	4978	5006
31	4496	4522	4547	4573	4599	4626	4652	4678	4705	4732
30	4246	4270	4295	4320	4345	4369	4394	4420	4445	4470
29	4008	4032	4055	4078	4102	4126	4150	4173	4198	4222
28	3782	3804	3827	3849	3871	3894	3916	3939	3962	3985
27	3567	3588	3609	3631	3652	3673	3695	3717	3738	3760
26	3363	3383	3403	3423	3444	3464	3484	3505	3526	3546
25	3169	3188	3207	3226	3246	3265	3284	3304	3324	3343
24	2985	3003	3021	3039	3058	3076	3094	3113	3132	3150
23	2810	2827	2845	2862	2879	2897	2914	2932	2949	2967
22	2645	2661	2677	2694	2710	2726	2743	2760	2777	2793
21	2488	2503	2518	2534	2549	2565	2581	2597	2613	2629
20	2339	2353	2368	2383	2397	2412	2427	2442	2457	2472
19	2198	2212	2225	2239	2253	2267	2281	2296	2310	2324
18	2064	2077	2090	2104	2117	2130	2144	2157	2171	2184
17	1938	1950	1963	1975	1988	2000	2013	2026	2038	2051
16	1818	1830	1842	1854	1865	1877	1889	1901	1914	1926
15	1705	1716	1728	1739	1750	1761	1772	1784	1795	1807
14	1599	1609	1620	1630	1641	1651	1662	1673	1684	1694
13	1498	1508	1518	1527	1537	1548	1558	1568	1578	1588
12	1403	1412	1421	1431	1440	1450	1459	1469	1478	1488
11	1313	1321	1330	1339	1348	1357	1366	1375	1384	1393
10	1228	1236	1245	1253	1261	1270	1278	1287	1295	1304
9	1148	1156	1164	1172	1179	1187	1195	1204	1212	1220
8	1073	1080	1088	1095	1102	1110	1117	1125	1133	1140
7	1002	1009	1016	1023	1030	1037	1044	1051	1058	1066
6	935	942	948	955	961	968	975	982	988	995
5	872	879	885	891	897	903	910	916	922	929
4	813	819	825	831	837	843	848	854	860	866
3	758	763	769	774	780	785	791	796	802	808
2	706	711	716	721	726	732	737	742	747	753
1	657	662	667	671	676	681	686	691	696	701
0	611	616	620	625	629	634	638	643	648	652
0	611	606	601	596	591	586	582	577	572	567
-1	563	558	553	549	544	540	535	531	526	522
-2	518	513	509	505	501	496	492	488	484	480
-3	476	472	468	464	460	456	453	449	445	441
-4	437	434	430	426	423	419	416	412	409	405
-5	402	398	395	392	388	385	382	378	375	372
-6	369	366	362	359	356	353	350	347	344	341
-7	338	335	332	329	327	324	321	318	315	313
-8	310	307	305	302	299	297	294	292	289	286
-9	284	281	279	277	274	272	269	267	265	262
-10	260	258	255	253	251	249	246	244	242	240
-11	238	236	234	231	229	227	225	223	221	219
-12	217	215	213	212	210	208	206	204	202	200
-13	199	197	195	193	191	190	188	186	185	183
-14	181	180	178	176	175	173	172	170	168	167
-15	165	164	162	161	159	158	156	155	154	152

Temperatuur [C]	De waterdampconcentratie (g/m ³)									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
40	51,03	51,29	51,55	51,81	52,07	52,33	52,59	52,85	53,12	53,38
39	48,53	48,78	49,02	49,27	49,52	49,77	50,02	50,27	50,53	50,78
38	46,13	46,37	46,60	46,84	47,08	47,32	47,56	47,80	48,04	48,29
37	43,83	44,06	44,29	44,51	44,74	44,97	45,20	45,43	45,66	45,90
36	41,64	41,85	42,07	42,28	42,50	42,72	42,94	43,16	43,39	43,61
35	39,53	39,74	39,94	40,15	40,36	40,57	40,78	40,99	41,21	41,42
34	37,52	37,72	37,91	38,11	38,31	38,51	38,71	38,92	39,12	39,33
33	35,59	35,78	35,97	36,16	36,35	36,54	36,74	36,93	37,13	37,32
32	33,75	33,93	34,11	34,30	34,48	34,66	34,85	35,03	35,22	35,41
31	32,00	32,17	32,34	32,51	32,69	32,86	33,04	33,22	33,40	33,57
30	30,32	30,48	30,65	30,81	30,98	31,15	31,31	31,48	31,65	31,82
29	28,71	28,87	29,03	29,19	29,35	29,51	29,67	29,83	29,99	30,15
28	27,18	27,33	27,48	27,64	27,79	27,94	28,09	28,25	28,40	28,56
27	25,73	25,87	26,01	26,16	26,30	26,45	26,59	26,74	26,89	27,04
26	24,33	24,47	24,61	24,74	24,88	25,02	25,16	25,30	25,44	25,58
25	23,01	23,14	23,27	23,40	23,53	23,66	23,80	23,93	24,06	24,20
24	21,74	21,87	21,99	22,12	22,24	22,37	22,50	22,62	22,75	22,88
23	20,54	20,66	20,78	20,90	21,02	21,14	21,26	21,38	21,50	21,62
22	19,40	19,51	19,62	19,73	19,85	19,96	20,08	20,19	20,31	20,42
21	18,31	18,41	18,52	18,63	18,73	18,84	18,95	19,06	19,17	19,28
20	17,27	17,37	17,47	17,57	17,68	17,78	17,88	17,99	18,09	18,20
19	16,28	16,38	16,48	16,57	16,67	16,77	16,87	16,97	17,07	17,17
18	15,35	15,44	15,53	15,62	15,72	15,81	15,90	16,00	16,09	16,19
17	14,46	14,54	14,63	14,72	14,81	14,90	14,99	15,07	15,16	15,26
16	13,61	13,69	13,78	13,86	13,94	14,03	14,11	14,20	14,28	14,37
15	12,81	12,89	12,97	13,05	13,13	13,21	13,29	13,37	13,45	13,53
14	12,05	12,12	12,20	12,27	12,35	12,43	12,50	12,58	12,66	12,73
13	11,33	11,40	11,47	11,54	11,61	11,69	11,76	11,83	11,90	11,98
12	10,65	10,71	10,78	10,85	10,92	10,98	11,05	11,12	11,19	11,26
11	10,00	10,06	10,13	10,19	10,25	10,32	10,38	10,45	10,51	10,58
10	9,39	9,45	9,51	9,57	9,63	9,69	9,75	9,81	9,87	9,94
9	8,81	8,86	8,92	8,98	9,04	9,09	9,15	9,21	9,27	9,33
8	8,26	8,31	8,37	8,42	8,48	8,53	8,58	8,64	8,70	8,75
7	7,74	7,79	7,84	7,89	7,95	8,00	8,05	8,10	8,15	8,21
6	7,25	7,30	7,35	7,40	7,44	7,49	7,54	7,59	7,64	7,69
5	6,79	6,83	6,88	6,93	6,97	7,02	7,06	7,11	7,16	7,20
4	6,35	6,40	6,44	6,48	6,52	6,57	6,61	6,66	6,70	6,74
3	5,94	5,98	6,02	6,06	6,10	6,14	6,19	6,23	6,27	6,31
2	5,55	5,59	5,63	5,67	5,71	5,74	5,78	5,82	5,86	5,90
1	5,19	5,22	5,26	5,30	5,33	5,37	5,40	5,44	5,48	5,52
0	4,84	4,88	4,91	4,94	4,98	5,01	5,05	5,08	5,12	5,15
0	4,84	4,80	4,77	4,73	4,69	4,66	4,62	4,58	4,55	4,51
-1	4,48	4,44	4,40	4,37	4,34	4,30	4,27	4,23	4,20	4,17
-2	4,13	4,10	4,07	4,03	4,00	3,97	3,94	3,91	3,88	3,85
-3	3,81	3,78	3,75	3,72	3,69	3,66	3,63	3,60	3,58	3,55
-4	3,52	3,49	3,46	3,43	3,41	3,38	3,35	3,32	3,30	3,27
-5	3,24	3,22	3,19	3,16	3,14	3,11	3,09	3,06	3,04	3,01
-6	2,99	2,96	2,94	2,91	2,89	2,87	2,84	2,82	2,80	2,77
-7	2,75	2,73	2,71	2,68	2,66	2,64	2,62	2,59	2,57	2,55
-8	2,53	2,51	2,49	2,47	2,45	2,43	2,41	2,39	2,37	2,35
-9	2,33	2,31	2,29	2,27	2,25	2,23	2,21	2,19	2,17	2,16
-10	2,14	2,12	2,10	2,08	2,07	2,05	2,03	2,01	2,00	1,98
-11	1,96	1,95	1,93	1,91	1,90	1,88	1,86	1,85	1,83	1,82
-12	1,80	1,79	1,77	1,76	1,74	1,73	1,71	1,70	1,68	1,67
-13	1,65	1,64	1,62	1,61	1,60	1,58	1,57	1,55	1,54	1,53
-14	1,51	1,50	1,49	1,47	1,46	1,45	1,44	1,42	1,41	1,40
-15	1,39	1,37	1,36	1,35	1,34	1,33	1,31	1,30	1,29	1,28