

Natuurkunde van de gebouwde omgeving



Hogeschool Utrecht

Instituut voor Gebouwde
omgeving
Ir. Marieke van der Laan
Mei 2010

Inhoud

Symbolen	3
1. Inleiding	4
1.1 Fysische aspecten in de bouwnijverheid	4
1.2 Regelgeving	5
1.3 Rekenen met het SI-stelsel	6
2. Warmtetransport en isolatie	8
2.1 Warmteaccumulatie	8
2.2 Warmtetransport	10
2.3 Stationair en niet-stationair warmtetransport	11
2.4 Warmtestroom en warmtestroomdichtheid	11
2.5 Geleiding	12
2.6 Temperatuurverloop en warmteweerstand	14
2.7 Temperatuurverloop in gelaagde constructies	16
2.8 Overgangsweerstanden	19
2.9 Temperatuurverloop van binnen- naar buitenlucht	22
2.10 Overgangscoefficiënt α	24
2.11 Warmtedoorgangscoefficiënt U	25
3. Ventilatie en energiebalans	27
3.1 Ventilatie en infiltratie	27
3.2 Ventilatievoud	28
3.3 Energieverlies door ventilatie	30
3.4 Energieverlies door transmissie	31
3.5 Warmtebalans	31
3.6 Energieprestatie	32
3.7 Duurzaam Bouwen	34

Symbolen

α_i (W/m ² K)	- warmteovergangscoefficiënt binnen (α : Griekse letter alfa)
α_e (W/m ² K)	- warmteovergangscoefficiënt buiten
α_{sp} (W/m ² K)	- warmteovergangscoefficiënt in een spouw
α_s (W/m ² K)	- warmteovergangscoefficiënt voor straling
Δ	- de Griekse letter delta, wordt gebruikt om een verschil of verandering aan te geven.
λ (W/mK)	- de warmtegeleidingcoëfficiënt (λ : Griekse letter lambda)
ρ (kg/m ³)	- dichtheid (ρ : Griekse letter rho)
Σ	- sommatieteken (Σ : Griekse letter sigma)
Φ (J)	- hoeveelheid warmte of energie (Φ : Griekse letter phi)
c (J /kg·K)	- soortelijke warmte
d (m)	- de dikte van het materiaal
n (1/h)	- het gemiddelde ventilatievoud
Q (W)	- warmtestroom
q (W/m ²)	- warmtestroomdichtheid
$q_{geleiding}$ (W/m ²)	- warmtestroomdichtheid door geleiding
$q_{straling}$ (W/m ²)	- warmteoverdracht door straling tussen vlak 1 en 2, uitgedrukt per m ² oppervlak
qv (m ³ /s)	- het gemiddeld luchtdebiet
R (m ² K/W)	- warmteweerstand
R_x (m ² K/W)	- warmteweerstand van materiaallaag x
R_c (m ² K/W)	- warmteweerstand van de gehele constructie (alle materiaallagen samen)
R_{tot} (m ² K/W)	- warmteweerstand van de constructie en de warmteovergangsweerstanden binnen en buiten
r_i (m ² K/W)	- overgangsweerstand binnen
r_e (m ² K/W)	- overgangsweerstand buiten
T (K of °C)	- temperatuur
U (W/m ² K)	- warmtedoorgangscoefficiënt
V (m ³)	- volume
T (K of °C)	- temperatuur
V (m ³)	- bruto inhoud van verblijfsruimte, -gebied of gebouw

1. Inleiding

1.1 Fysische aspecten in de bouwnijverheid

Natuurkunde speelt een grote rol in ons dagelijks leven, vaak onopgemerkt. Maar bij de opleidingen van het Instituut voor Gebouwde Omgeving ontdekken we de natuurkunde om ons heen. De kunst is om er slim en energiezuinig gebruik van te maken. Hier zijn een paar voorbeelden:



Bij het Energie-onderzoekscentrum (ECN) in Petten is een kantoorgebouw beschermd door een atrium bedekt met zonnecellen. Het atrium vormt een buffer tussen binnen en buiten, waardoor de energiekosten voor verwarming omlaag gaan. De zonnecellen leveren elektriciteit op, en werken bovendien als zonwering.

Verkeerslawaai vormt overal in Nederland een probleem voor omwonenden. Dit is de Amsterdamsestraatweg in Utrecht. Slecht slapen, stress of verminderde concentratie kunnen het gevolg zijn. Verkeerslawaai kan je op verschillende manieren aanpakken:

- bij de *bron*: door stillere auto's of speciaal wegdek,
 - in de "*overdrachtsweg*" met geluidschermen of geluidwerende gevels,
 - of bij de "*ontvanger*" met gehoorbescherming.
- Behalve geluidhinder is ook de luchtkwaliteit een probleem (fijnstof).





Bouwen in extreme klimaten, vraag om een uitgekiend bouwkundig ontwerp. Dit is het nieuwe Belgische onderzoeksstation op de Zuidpool. Een zeer dikke isolatieschil, en een slimme indeling zorgen ondanks het Zuidpoolklimaat voor een laag energieverbruik. Zo zijn alle processen waarbij warmte vrij komt in het midden van het gebouw geplaatst, waardoor die warmte bijdraagt aan de verwarming van het gebouw.

LED-verlichting is erg energiezuinig, en vindt steeds meer toepassingen. Binnen, maar ook op straat. Maar is LED-verlichting wel zo energiezuinig als met veel enthousiasme nieuwe toepassingsmogelijkheden worden gezocht en gevonden? (GLOW-festival Eindhoven)



1.2 Regelgeving

De overheid stelt eisen aan (bijna) alles dat er in de gebouwde omgeving gebeurt. Dat geldt ook voor natuurkundige verschijnselen zoals geluid, licht en energie. De regels zijn bedoeld om hinder of gezondheidsproblemen te voorkomen, om schade aan gebouwen te beperken, en om het energieverbruik terug te dringen.

Voor ons zijn twee wettelijke regelingen belangrijk: het Bouwbesluit, en de Wet geluidhinder. In het Bouwbesluit, staan allerlei regels waaraan bouwwerken moeten voldoen, verdeeld over de "afdelingen":

- Bruikbaarheid
- Veiligheid
- Energiezuinigheid
- Gezondheid (met o.a. eisen over vocht, geluidisolatie en ventilatie)

De wet Geluidhinder stelt grenzen aan het bouwen in een lawaaierige omgeving.

1.3 Rekenen met het SI-stelsel

Het SI is bedoeld om internationaal gemakkelijk gegevens te kunnen uitwisselen. Oorspronkelijk hadden veel landen verschillende maatstelsels. De Britten en de Amerikanen gebruiken vaak nog steeds andere eenheden zoals pound, inch en yard.

Het SI vormt een samenhangend geheel. Het is opgebouwd rond een aantal **basiseenheden**, die in combinatie met elkaar afgeleide SI-eenheden vormen. De zeven, onderling onafhankelijke basiseenheden staan in tabel 1.

Grootheid	SI-basiseenheid	
	naam	symbool
Lengte	meter	m
Massa	kilogram	kg
Tijd	seconde	s
Elektrische stroom	ampère	A
Absolute temperatuur	kelvin	K
Hoeveelheid stof	mol	mol
Lichtsterkte	candela	cd

Tabel 1. Basiseenheden van het SI stelsel

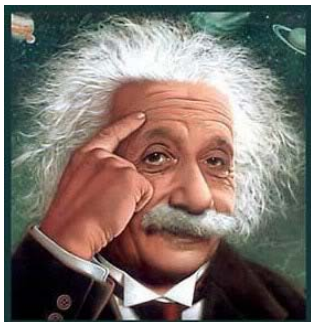
Afgeleide SI-eenheden

Van deze basiseenheden zijn afgeleide eenheden gemaakt, zoals m^2 (vierkante meter) voor oppervlakte, of hertz, gedefinieerd als s^{-1} .

Vaak gebruikte combinaties van de basiseenheden hebben een eigen naam gekregen. Zo heeft kracht heeft als eenheid Newton. Dat is een eenheid afgeleid uit de basiseenheden: $\text{Newton [N]} = [\text{kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2]$. En vermogen heeft als eenheid Watt. Ook een afgeleide eenheid: $\text{Watt [W]} = [\text{J} / \text{s}]$. De grootheden en eenheden die in ons vakgebied worden gebruikt staan in tabel 2.

Bij berekeningen is het gebruik van de juiste eenheden van groot belang, het is de verantwoordelijkheid van iedere professional (en student) om hier goed op te letten. De gevolgen van foutieve eenheden in de beroepspraktijk kunnen groot zijn. Afmetingen, draagkracht van constructies, of energiegebruik van gebouwen moeten met grote zekerheid worden bepaald.

Het belang van de juiste eenheden - 1..... ☺



Newton, Pascal en Einstein spelen verstoppertje. Einstein telt. Pascal rent weg om zich te verstoppen, maar Newton blijft staan. Hij buigt voorover, en tekent een vierkant van 1 bij 1 meter om zich heen op de vloer. Als Einstein tot honderd heeft geteld draait hij zich om, en ziet Newton staan. "Ik heb je gevonden, Newton", roept hij enthousiast. "Nee, zegt Newton", en hij wijst naar de vierkante meter waar hij in staat: "Newton per vierkante meter, dat is Pascal!" (zie tabel 2)

Grootheid	Naam	SI-symbool	Uitdrukking in SI-grond-eenheden	
Hoek	radiaal	rad	1	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$
Frequentie	hertz	Hz	s^{-1}	
Kracht	newton	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$	
Energie, arbeid, warmte	joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Vermogen	watt	W	$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
Druk, mechanische spanning	pascal	Pa	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Dichtheid, soortelijke massa	kilogram per kubieke meter		$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	
Moment	newton·meter		$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Soortelijke warmte	joule per kelvin·kilogram		$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
Thermische geleiding	watt per meter·kelvin		$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$

Tabel 2. Afgeleide eenheden die in de bouwnijverheid worden gebruikt.

Het belang van de juiste eenheden 2

Een student wordt gevraagd te berekenen hoeveel warmte er verloren gaat via het ventilatierooster in een gevel. Hij krijgt de volgende gegevens en gaat aan de slag:

- o ventilatiehoeveelheid via het rooster: $q_v = 50 \text{ m}^3/\text{uur}$
- o warmtecapaciteit van lucht $1200 \text{ J/m}^3\text{K}$
- o temperaturen: $T_i = 20^\circ\text{C}$ (binnen) en $T_e = -10^\circ\text{C}$ (buiten)
- o formule voor ventilatieverlies $Q_v = 1200 \cdot q_v \cdot (T_i - T_e)$ in [W]

Het resultaat van deze student: $Q_v = 1200 \cdot 50 \cdot 30 = 1800000 \text{ W}$
(NB: er zouden circa 75 CV-ketels nodig zijn om dit te compenseren!)

Wat doet hij fout?

Bijna alle gegevens in de opgave zijn keurig in SI-eenheden weergegeven. Op één na: de luchthoeveelheid in m^3 per uur. De SI-eenheid voor tijd is seconden. Die komt ook in de gebruikte afgeleide eenheden weer voor, want een Watt is een Joule per seconde. Door niet eerst om te rekenen naar SI-eenheden krijg je rare (foute) resultaten. Hoe dan wel?

- o Luchthoeveelheid: $50 \text{ m}^3/\text{uur} = 50/3600 = 0,014 \text{ m}^3/\text{s}$

Invullen (met alle eenheden om vergissingen te voorkomen!)

- o $Q_v = 1200 \text{ J/m}^3\text{K} \cdot 0,014 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 30 \text{ K} = 505 \text{ W} (= \text{J/s})$

Ga na of de eenheden kloppen!

(Omdat 1°C “even groot” is als 1 K, levert de temperatuur geen problemen op met eenheden)

PS Deze fout wordt vaak gemaakt. Je bent dus gewaarschuwd.

2. Warmtetransport en Isolatie

Wat is temperatuur?

Vreemde vraag, dat weet iedereen toch wel? Probeer het eerst zelf eens te omschrijven....

Temperatuur is een maat voor de gemiddelde bewegingsenergie van de atomen of moleculen.

Als een voorwerp opwarmt, gaan de moleculen van die stof steeds sneller bewegen. Bij een bepaalde temperatuur bewegen de moleculen zo snel dat de stof smelt, of de vloeistof verdampt.

En wat is warmte?

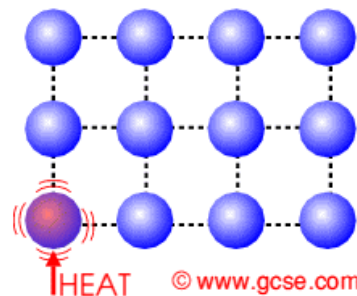
Warmte is niets anders dan een bijzondere vorm van energie. In feite gaat het om energie die van het ene voorwerp naar het andere voorwerp gaat. Warmte gaat daarbij *altijd* vanzelf van een plaats met een hogere temperatuur naar een plaats met een lagere temperatuur.

Energie?

Energie komt in vele vormen voor. Denk aan de bewegingsenergie die een rijdende auto heeft. Of de zwaarte-energie die een bloempot op het balkon van de derde verdieping heeft. Er vinden voortdurend energieomzettingen plaats. Warmte is ook een verschijningsvorm van energie.

Wet van behoud van energie:

“Energie kan worden omgezet van de ene vorm in de andere, maar verdwijnt niet.”



Trillende atomen in een vaste stof krijgen een hogere snelheid als er warmte wordt toegevoerd. Door onderlinge botsingen wordt die energie doorgegeven, en stijgt langzamerhand de temperatuur in het materiaal.

2.1 Warmteaccumulatie

Warmteaccumulatie kent iedereen uit eigen ervaring. Op een warme 's zomerse dag blijft het in een gebouw met veel massa zoals een kasteel of bunker aangenaam koel, terwijl het in een licht gebouw (bouwkeet) zeer warm wordt. Het verschil in massa is belangrijk. Het duurt lang voordat een *zwaar* gebouw is opgewarmd, het duurt ook lang voordat dit gebouw weer is afgekoeld. In een licht gebouw treden temperatuurveranderingen veel sneller op. Bij een zwaar gebouw is de “warmtecapaciteit” groot.

De hoeveelheid **opgeslagen warmte Φ** (*griekse letter phi*) in Joule kan worden berekend :

$$\Phi = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

- V – volume (m^3)
- ρ – dichtheid (kg/m^3)
(ρ : griekse letter rho)
- c – soortelijke warmte ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)
- ΔT – verschil t.o.v. de referentietemperatuur
(Δ : de griekse letter delta, wordt gebruikt om een verschil of verandering aan te geven)



Materiaal	Dichtheid ρ (kg/m³)	Soortelijke warmte c (J/kg.K)
Staal	7800	530
Gevelklinkers	1900	840
Kalkzandsteen	1900	840
Gewapend beton	2500	840
Cellenbeton	1000	840
Hardhout	800	1880
Naaldhout	550	1880
Polystyreenschuim	40	1470
Water	1000	4200
Lucht	1,2	1000

Tabel 3. Materiaaleigenschappen: dichtheid en soortelijke warmte.

In formule (1) is Φ de hoeveelheid warmte (W) die in het materiaal wordt opgeslagen in het aanwezige volume (m³) van het materiaal. Het gaat daarbij steeds om hoeveel energie (warmte) er nodig is om een bepaalde *temperatuurverandering* (ΔT) in het materiaal te realiseren. De dichtheid ρ (kg/m³) en de soortelijke warmte c van het materiaal zijn hierbij maatgevend.

De soortelijke warmte c geeft aan hoeveel energie (J) er nodig is om 1 kg van het materiaal 1 K (of °C) op te warmen. Voor veel steenachtige bouwmaterialen is $C = 840$ J/kgK. Houtachtige materialen hebben een hogere soortelijke warmte (zie tabel).

Voorbeeld 1:

Hoeveel warmte is nodig om 1 liter kraanwater (10°C) aan de kook te brengen? (1 liter = 1 dm³ = 1 * 10⁻³ m³ SI-eenheden, controleer !)

Er is:

$$\begin{aligned}\Phi &= V * \rho * c * \Delta T \quad \text{aan warmte nodig. Ingevuld wordt dit:} \\ \Phi &= (1 * 10^{-3}) * 1000 * 4200 * (100-10) \\ &= 378000 \text{ J} \\ &= 3,78 * 10^5 \text{ J} \\ &= 0,378 \text{ MJ} \rightarrow \text{controleer de eenheden!} \\ &\text{(Hiervoor is ongeveer 0,01 m}^3 \text{ aardgas nodig, dat kost minder dan 1 cent.)}\end{aligned}$$

Voorbeeld 2:

Een woning is gebouwd van ongeveer 60 m³ beton. Hoeveel warmte is er nodig om de hele woning op te warmen van 10°C naar 20°C?

$$\Phi = V * \rho * c * \Delta T \quad [\text{J}]$$

$$\begin{aligned}\Phi &= 60 * 2500 * 840 * 10 \\ &= 1260000000 \text{ J} \\ &= 1,26 * 10^9 \text{ J} \\ &= 1260 \text{ MJ}\end{aligned}$$

(Dat komt overeen met ongeveer 40 m³ aardgas, en kost 24,40 euro (2009))

2.2 Warmtetransport

Als er tussen twee plaatsen een verschil in temperatuur heerst, dan vindt er warmtetransport plaats. Warmte stroomt altijd van hoge naar lage temperatuur. Net zo als water dat altijd van een hoge naar een lagere plek zal stromen.

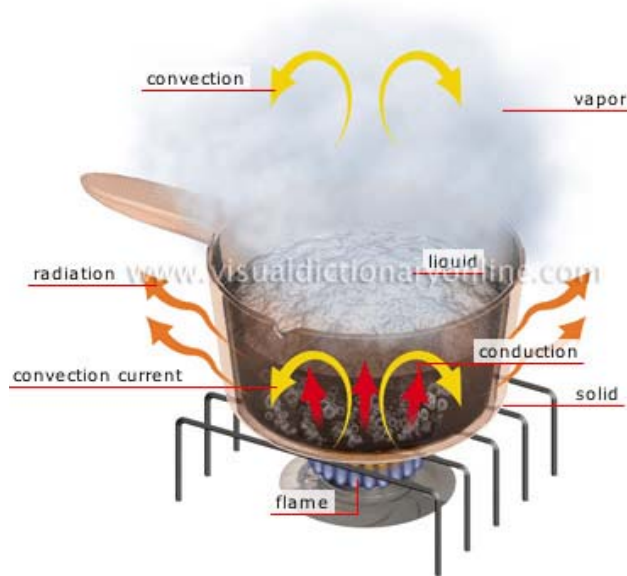
Warmte is een vorm van energie en wordt dus ook in joule uitgedrukt.

Warmtestroom drukken we uit in J/s, ofwel Watt [W] (zie tabel 2). Het gaat dus om de verplaatsing van energie per tijdseenheid. Warmtetransport kan op drie manieren plaatsvinden:

1. Geleiding
2. Convectie
3. Straling

Figuur . Bij het aan de kook brengen van een pan water zijn alle drie de vormen van warmtetransport te herkennen.

conduction= geleiding
radiation = straling



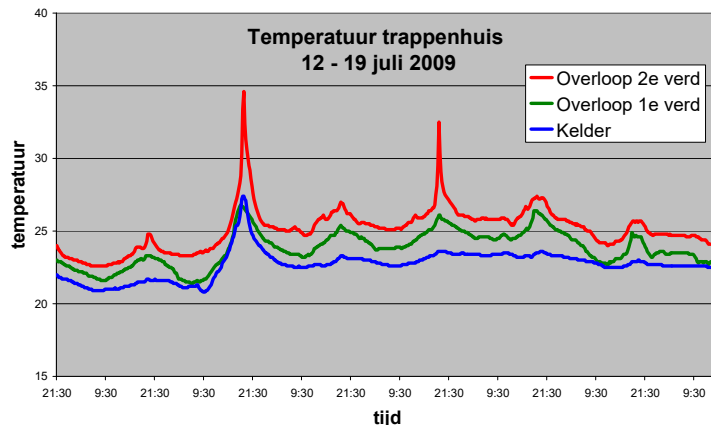
Geleiding treedt voornamelijk op in vaste stoffen. Warmte wordt doorgegeven omdat moleculen trillingsenergie door aanstoting aan elkaar doorgeven. Metalen zijn goede warmtegeleiders. Isolatiematerialen geleiden warmte heel slecht (ze isoleren dus tegen warmtetransport). Steenachtige en houtachtige (bouw)materialen zitten daar tussen in.

Convectie treedt op als warmte wordt meegevoerd met een "stromend medium" zoals water of lucht. Je kan hierbij denken aan de warmte die door circulerend water in cv-leidingen wordt getransporteerd. Ook (warme) lucht die door een geopend raam naar buiten stroomt is een vorm van convectieve warmteoverdracht.

Straling voel duidelijk je als je in de zon zit, of bij een haardvuur. Maar ieder voorwerp of oppervlak zendt stralingswarmte uit. Verwarmingsradiatoren geven warmte af door stralingsoverdracht naar oppervlakken in de omgeving: wanden en de vloer, maar ook naar huid- of kledingoppervlak. Ook voorwerpen met een lagere temperatuur zenden stralingsenergie uit.

2.3 Stationair en niet-stationair warmtetransport

We noemen warmtetransport stationair, als er een tijd lang geen veranderingen optreden. Dat wil zeggen als temperaturen langere tijd constant blijven. In werkelijkheid is dit natuurlijk niet het geval. De buitentemperatuur verandert voortdurend, ook de binnentemperatuur varieert als gevolg van zoninstraling, veranderingen in de thermostaatstand, het openen van ramen enzovoort.



Figuur: Meetgegevens van het temperatuurverloop in een trappenhuis. Een duidelijk voorbeeld van "niet-stationair gedrag".

Voor dit vak zullen we ons toch beperken tot stationair warmtetransport. We gaan dus uit van constante temperaturen. Het rekenen wordt daardoor veel eenvoudiger, en het maakt de principes van warmtetransport duidelijk. Maar ook voor sommige praktische toepassingen is het de gewoonte om te rekenen met constante, temperaturen.

2.4 Warmtestroom en warmtestroomdichtheid

De totale hoeveelheid warmte (energie) die per seconde wegstroomt van een plek met een hogere temperatuur naar een plek met een lagere temperatuur noemen we de **warmtestroom Q** . Deze warmtestroom wordt uitgedrukt in J/s ofwel Watt. Je kan bijvoorbeeld denken aan de hoeveelheid warmte die in de winter door de dak van een woning naar buiten toe stroomt:



Figuur: Totale Warmtestroom Q door de dak van een huis [W]. De warmtestroom gaat van warm (binnen) naar koud (buiten).



Figuur: De Warmtestroomdichtheid q is de warmtestroom per vierkante meter [W/m^2].

De **warmtestroomdichtheid** is diezelfde warmtestroom, maar dan uitgedrukt per vierkante meter oppervlak (kleine letter) **q** in **W/m²**. Dus J per seconde en per vierkante meter.

Voorbeeld: De *warmtestroomdichtheid* q door een zeer goed geïsoleerd dak is 7 W/m². Als het dakoppervlak 40 m² groot is, wat is dan de totale warmtestroom door het dak?

→ De warmtestroom $Q = 40 \text{ m}^2 * 7 \text{ W/m}^2 = 280 \text{ W}$

De *warmtestroomdichtheid* q door een ongeïsoleerd dak kan wel 100W/m² zijn! Wat is in dit geval de totale warmtestroom? (het dakoppervlak is weer 40 m²)

2.5 Geleiding

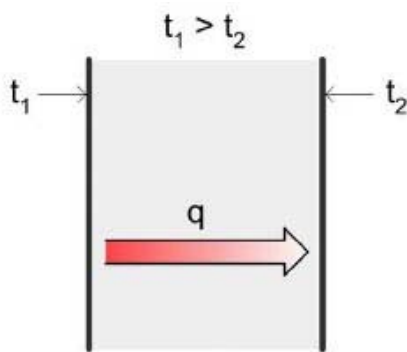
Geleiding van warmte treedt op als in een materiaal de moleculen elkaar aanstoten en zo trillingsenergie aan elkaar doorgeven. Dit verschijnsel is vooral belangrijk in vaste materialen. De grootte van deze warmtestroom is afhankelijk van het temperatuurverschil tussen twee plaatsen in het materiaal, van de eigenschappen van het materiaal en van de afstand tussen de twee meetpunten. Metalen zijn goede warmtegeleiders, daarom wordt een lepel in een kom soep ook aan de bovenkant warm. Isolatiematerialen geleiden de warmte juist heel erg slecht, daarop berust hun werking. Later meer hierover.

In formulevorm kan de hoeveelheid warmte die door geleiding door een materiaal wordt getransporteerd worden berekend met formule (2) op de volgende bladzijde. Bepalend is het *temperatuurverschil* aan weerszijde van het materiaal, de *materiaaleigenschap voor geleiding*, en de *dikte* van het materiaal:

$$q_{\text{geleiding}} = \frac{\Delta T \cdot \lambda}{d} \quad (2)$$

$q_{\text{geleiding}}$ (W/m ²)	- warmtestroomdichtheid door geleiding
ΔT (K)	- het temperatuurverschil aan weerskanten
λ (W/mK)	- de warmtegeleidingcoëfficiënt (λ : de griekse letter lambda)
d (m)	- de dikte van het materiaal

De **warmtegeleidingcoëfficiënt λ** is een materiaaleigenschap die aangeeft hoe goed of slecht in een bepaald materiaal warmte wordt doorgegeven door geleiding. Formeel gezegd geeft de *warmtegeleidingcoëfficiënt* aan hoeveel warmte er stroomt door een één meter dikke laag van een materiaal, bij een temperatuurverschil van 1 K (of °C). Het ene materiaal geleidt warmte beter dan het andere. Hoe groter de warmtegeleidingcoëfficiënt λ hoe beter het materiaal warmte geleidt. Daarom hebben metalen een hoge λ , terwijl isolatiematerialen (denk aan piepschuim) een hele lage λ hebben. De meeste bouwmaterialen zitten hier tussenin (zie tabel 4).



Figuur: Warmtestroom q door een materiaal. De warmtestroom ontstaat als er een temperatuurverschil tussen beide zijden van het materiaal.

Materiaal	λ (W/mK)	
	droog	nat
Koper	372	-
Staal	52	-
Zandsteen	1,60	1,80
Baksteen	0,70	1,20
Kalkzandsteen	0,90	1,40
Gewapend beton	2,00	2,00
Cellenbeton	0,35	0,90
Glas	0,80	-
Cement	0,90	1,50
Naaldhout	0,14	0,17
Polystyreenschuim	0,035	-
Lucht	0,023	-

Tabel 4. Materiaaleigenschap: warmtegeleidingscoëfficiënt

Voorbeeld: Een metrotunnel heeft een wand van betonnen schaalementen. Het beton is 30 cm dik. Als de temperatuur aan één kant van het beton 20°C is, en aan de andere kant 10°C, wat is dan de warmtestroomdichtheid door de tunnelwand?

Uit tabel 4 blijkt dat beton een warmtegeleidingcoëfficiënt $\lambda = 2 \text{ W/m K}$ heeft.

$$q_{\text{geleiding}} = \Delta T * \lambda / d = (20 - 10 \text{ K}) * 2 \text{ W/m K} / 0,3\text{m} = 66,7 \text{ W/m}^2$$

Bereken wat de warmtestroomdichtheid zou zijn als het beton maar 20cm dik is, bij een gelijk temperatuurverschil.

Over de warmtegeleidingcoëfficiënt λ vallen nog een paar bijzonderheden op:

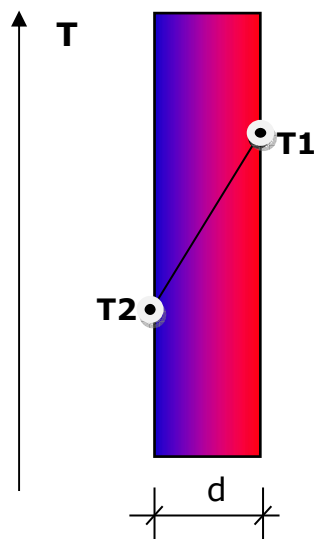
- o Droge, stilstaande lucht geleid warmte bijzonder slecht ($\lambda = 0,023 \text{ W/m K}$). Anders gezegd stilstaande lucht *isoleert* warmte zeer goed.
- o Een zwaar materiaal geleidt warmte beter dan een licht materiaal. Een poreus materiaal geleidt slecht (isoleert goed). Dat komt door de stilstaande lucht die in de poriën van het materiaal is ingesloten.
- o Als een poreus materiaal nat is, wordt die stilstaande lucht in de poriën vervangen door water. Water heeft een $\lambda = 0,5 \text{ W/m K}$, dus geleidt vele malen beter dan lucht. Het gevolg is dat de λ van natte (bouw)materialen hoger is dan van hetzelfde materiaal in droge toestand. Zie: tabel 4!

2.6 Temperatuurverloop en Warmteweerstand

In het voorbeeld hierboven hebben we de warmtestroomdichtheid door een laag beton berekend als de temperaturen aan weerszijde van de laag bekend zijn. Maar hoe is nu het temperatuurverloop *in* de betonwand? Zoals we hebben gezien in paragraaf 2.5 gebruiken we formule (2):

$$q_{\text{geleiding}} = \frac{\Delta T \cdot \lambda}{d}$$

Deze formule kan ook gebruikt worden om het temperatuurverloop in de wand te berekenen. Onder stationaire omstandigheden zal er in een homogene materiaallaag een rechtlijnig temperatuurverloop ontstaan van de zijde met de hoogste temperatuur naar de laagste.



We definiëren nu de warmteweerstand R:

$$R = d/\lambda \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

Een materiaal heeft dus een hogere warmteweerstand (isoleert beter) als het dikker is, en als de warmtegeleidingcoëfficiënt klein is. Ingevuld in formule 2 krijgen we dan:

$$q_{\text{geleiding}} = \frac{\Delta T}{R} \quad (5)$$

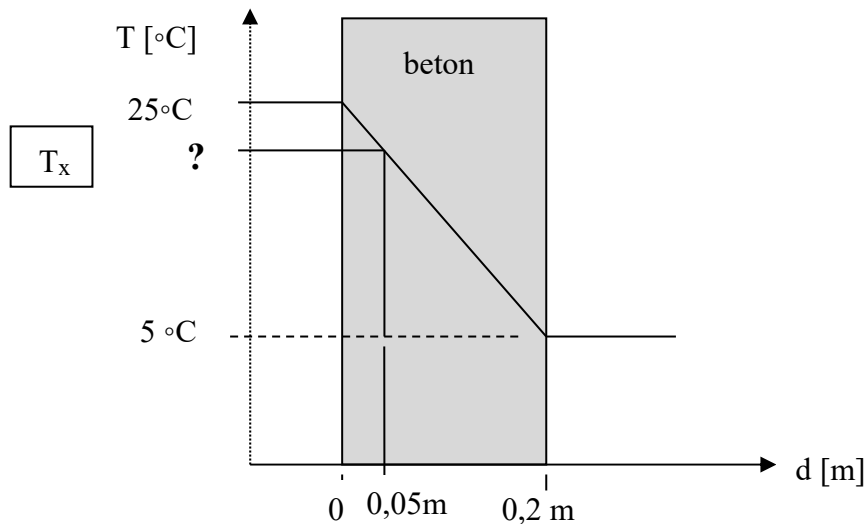
Voorbeelden:

Een laag van 20 cm metselwerk: $d = 0,2$; $\lambda = 0,7 \rightarrow R = 0,2/0,7 = 0,28 \text{ m}^2\text{K/W}$
 Een laag polystyreen ook 20 cm: $d = 0,2$; $\lambda = 0,035 \rightarrow R = 0,2/0,035 = 5,7 \text{ m}^2\text{K/W}$

Ter informatie: de minimumeis voor gebouwen (bouwbesluit) is $R \geq 3,5 \text{ m}^2\text{K/W}$

Temperatuurverloop in een homogene constructie

In stationaire toestand is het berekenen van het temperatuurverloop in een enkele materiaallaag eenvoudig. Als de temperaturen aan weerszijden van de laag bekend zijn, kan de temperatuur op iedere plek in de laag simpelweg *naar verhouding* worden berekend:



Voorbeeld: Een massieve wand (20 cm beton) heeft aan één zijde een temperatuur van 25°C, en aan het andere oppervlak is het 5°C. Wat is nu de temperatuur in het beton op 5cm diepte (zie figuur)?

Voor deze homogene en stationaire situatie, is er eigenlijk geen bouwfysica nodig om dit te bepalen. De temperatuurverdeling volgt uit de onderlinge verhoudingen onder de temperatuurlijn:

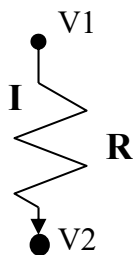
$$\frac{25 - 5}{0,2} = \frac{T_x - 5}{0,15} \longrightarrow \frac{20}{0,2} = \frac{T_x - 5}{0,15} \longrightarrow T_x = 20$$

De wet van Ohm vertaald naar de warmtegeleiding

De naam "warmteweerstand" is ingevoerd, omdat er een analogie bestaat tussen stationaire warmtestroom en elektrische stroom. Door aan elke grootheid die in de warmtestroom een belemmering vormt een weerstandswaarde toe te kennen, is het mogelijk het warmte-overdrachtsmechanisme te vertalen in een elektrisch analogon.

De wet van Ohm

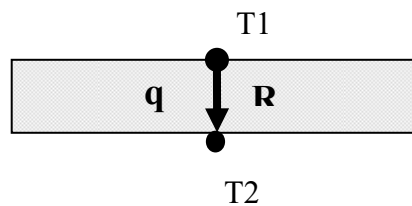
$$I = \frac{\Delta V}{R}$$



I = elektrische stroom [Ampere]
 ΔV = potentiaal verschil [Volt]
 R = elektrische weerstand [Ohm]

Warmtegeleiding

$$q = \frac{\Delta T}{R}$$



q = warmtestroomdichtheid [W / m^2]
 ΔT = temperatuurverschil [Kelvin]
 R = warmteweerstand in [$\text{m}^2 \text{K} / \text{W}$]

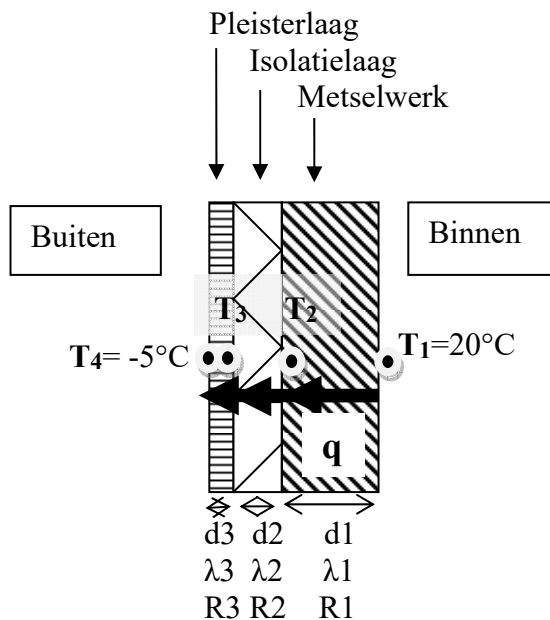
Links is het potentiaalverschil en rechts het temperatuurverschil de drijvende kracht achter de stroming die binnen deze mechanismes ontstaat.

2.7 Temperatuurverloop in gelaagde constructies

De meeste (bouwkundige) constructies zijn opgebouwd uit meerdere lagen, bijvoorbeeld een steensmuur met isolatiemateriaal en een stuc laag. Het berekenen van het temperatuurverloop is dan minder simpel dan in de vorige paragraaf. Hiernaast zie je een renovatieproject waarbij een gemetselde gevel wordt voorzien van een isolatielaag. We gaan er aan rekenen:



Stel dat op een winterse dag op het binnenoppervlak 20°C is en op het buitenoppervlak -5°C . Zie ook de figuur hiernaast.



Heel belangrijk is dat de warmtestroomdichtheid q (van binnen naar buiten) door iedere laag van de gevel gelijk is. De warmtestroomdichtheid q door het metselwerk (laag1) is gelijk aan de warmtestroom door de isolatie (laag 2), en ook door het pleisterwerk (laag 3).

Immers, als er meer warmte de constructie in zou stromen dan er weer uit gaat, dan zou die constructie steeds warmer worden.

De warmtestroom-dichtheid is dus overal in de constructie gelijk. Ook geldt dat de

warmtestroom door de *totale* constructie gelijk is aan de warmtestroom door de *afzonderlijke* lagen.

Die warmtestroomdichtheid q kan daarom op verschillende manieren worden berekend:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_1} \text{ of } \longrightarrow q = \frac{T_2 - T_3}{R_2} \text{ of } \longrightarrow q = \frac{T_3 - T_4}{R_3} \text{ of } \quad (6)$$

$$q = \frac{T_1 - T_4}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_1 - T_4}{R_c}$$

Waarbij R_c de warmteweerstand van de constructie wordt genoemd, ofwel de som van alle weerstanden waaruit de constructie bestaat:

$$R_c = \sum_{n=1}^n R_n = R_1 + R_2 + R_3 \quad (7)$$

Formule 6 kan gebruikt worden om de temperaturen te berekenen op alle scheidingsvlakken van de constructie.

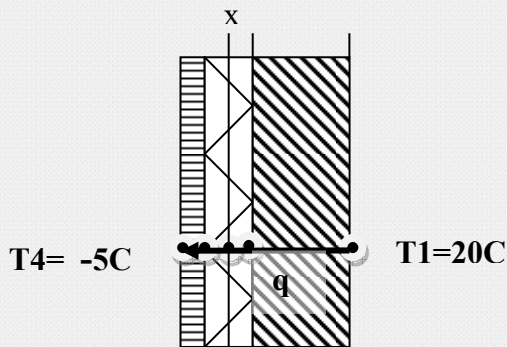
Als T_1 en T_4 , en de warmteweerstanden bekend zijn, dan kan voor een *willekeurige punt x* ergens in de constructie geschreven worden dat:

$$\frac{T_1 - T_x}{R_x} = \frac{T_1 - T_4}{R_c}$$

Waarbij R_x de totale warmteweerstand is van de materialen tussen T_1 en T_x . Deze vergelijking kan worden opgelost voor T_x :

$$T_x = T_1 - \left(\frac{T_1 - T_4}{R_c} \right) \cdot R_x \quad (8)$$

Waarbij: $R_x = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{x}{\lambda_2}$ en $R_c = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}$



$$\begin{matrix} d_3 & d_2 & d_1 \\ \lambda_3 & \lambda_2 & \lambda_1 \\ R_3 & R_2 & R_1 \end{matrix}$$

Voorbeeld:

We rekenen de gevel door met realistische waarden om het temperatuurverloop door de gevel te bepalen:

Laag	Dikte d [m]	Warmte-geleidings-coëfficiënt λ [W/mK]	Warmte-weerstand R = d / λ [m²K/W]
1: Metselwerk	0,2	0,7	R1 = 0,29
2: Isolatie	0,1	0,035	R2 = 2,86
3: Pleisterwerk	0,02	0,9	R3 = 0,02
Totaal:			Rc = 3,17

De temperatuur aan de binnenzijde van de gevel is $T_1 = 20\text{ °C}$, de temperatuur aan de buitenkant $T_4 = -5\text{ °C}$. Wat zijn nu de temperaturen T_2 en T_3 ?

T2 (tussen metselwerk en isolatie)

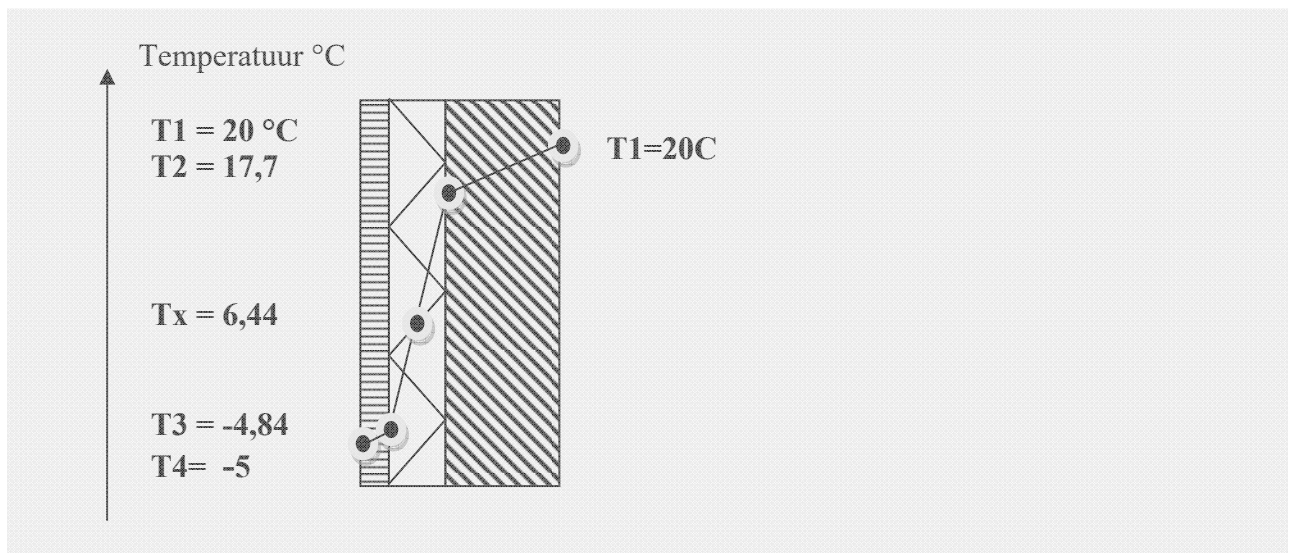
$$T_2 = T_1 - \left(\frac{T_1 - T_4}{R_c} \right) \cdot R_1 = 20 - \frac{(20 - (-5))}{3,17} \cdot 0,29 = 17,7\text{ °C}$$

T3 (tussen isolatie en pleisterwerk)

$$T_3 = T_1 - \left(\frac{T_1 - T_4}{R_c} \right) \cdot (R_1 + R_2) = 20 - \frac{(20 - (-5))}{3,17} \cdot (0,29 + 2,86) = -4,84\text{ °C}$$

En T_x (bijvoorbeeld halverwege de isolatielaag)

$$T_x = T_1 - \left(\frac{T_1 - T_4}{R_c} \right) \cdot (R_1 + 0,5 \cdot R_2) = 20 - \frac{(20 + 5)}{3,17} \cdot (0,29 + 0,5 \cdot 2,86) = 6,44\text{ °C}$$



Op basis van de berekeningen hierboven is nu het temperatuurverloop door de constructie te tekenen. Een paar dingen zijn opvallend:

- Het temperatuurverloop door iedere materiaallaag is **steeds een rechte lijn**.
- Door slecht isolerende lagen (metselwerk en pleisterwerk) verloopt die lijn met een flauwe helling
- In de **isolatielaag** verloopt de temperatuurlijn met een **steile helling**. Dat klopt natuurlijk ook met je gevoel: aan de binnenkant van de isolatielaag is het "warm", aan de buitenkant is het "koud". De isolatielaag doet zijn werk!
- Deze rekenmethode is handig, maar gaat ervan uit dat de oppervlakte-temperaturen aan beide zijden van de constructie bekend zijn. Helaas is het nauwkeurig *meten* van een oppervlakte-temperatuur niet zo makkelijk. Daarom werken we liever met de temperatuur van de lucht aan beide zijden van de constructie. De luchttemperatuur in een ruimte is (meestal) niet gelijk aan de oppervlakte-temperatuur. Kennelijk gebeurt er iets met de temperatuur tussen de lucht in de omgeving van een wand, en het wandoppervlak. Lees paragraaf 2.8 voor meer informatie.

2.8 Overgangsweerstanden

De gevel uit de vorige paragraaf is deel van een woning. Er bevindt zich aan de binnenzijde de binnenluchttemperatuur T_i (i staat voor interieur) en aan de buitenzijde de buitenluchttemperatuur T_e (e staat voor exterieur). Op de oppervlakken geldt dan T_{io} en T_{eo} ofwel de oppervlakte-temperaturen aan de binnen- en buitenzijde. Tussen de lucht en het oppervlak bevindt zich een overgangsgebied of grenslaag. In deze grenslaag vindt warmteoverdracht vooral plaats door straling en convectie. Zo heeft de langsstromende lucht (denk aan de wind buiten) grote invloed. Maar ook de overdracht van warmte in de vorm van stralingsuitwisseling met andere oppervlakken in de omgeving (vloer, plafond, radiator) heeft invloed op wat er in de grenslaag precies gebeurt met de temperatuur. Al deze effecten brengen we in rekening met de "overgangsweerstanden".



De grootte van deze overgangsweerstanden wordt bepaald door de warmteoverdracht door straling en convectorie aan het grensooppervlak. Met name het effect van convectorie kan grote verschillen opleveren. Afhankelijk van de windsnelheid verandert dit voortdurend. Dat is lastig om mee te rekenen en daarom worden er vaak vaste waarden gebruikt:

Overgangsweerstand binnen:

$$r_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Overgangsweerstand buiten:

$$r_e = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}.$$

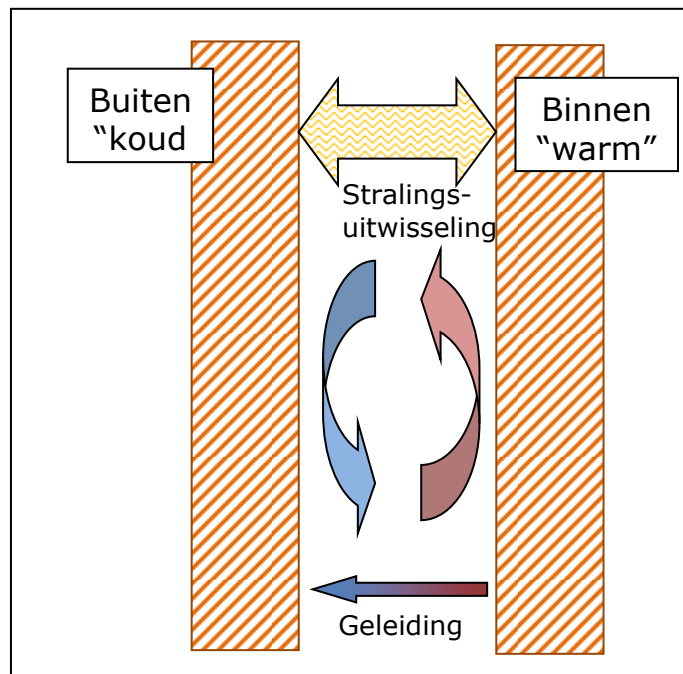
Buiten is door de wind de grenslaag dunner, daarom is de warmteovergangsweerstand daar kleiner.

In de norm NEN1068 wordt voor verschillende situaties precies aangegeven met welke waarde voor de overgangsweerstand gewerkt moet worden (zie tabel 5)

Een bijzondere situatie is de warmteoverdracht in een (lucht)spouw tussen twee materiaalagen. Je kan hierbij denken aan een ongeïsoleerde spouwmuur, of aan de spouw bij dubbele beglazing.

In de figuur hiernaast zie je de hoe **warmte-overdracht in een spouw** plaats vindt.

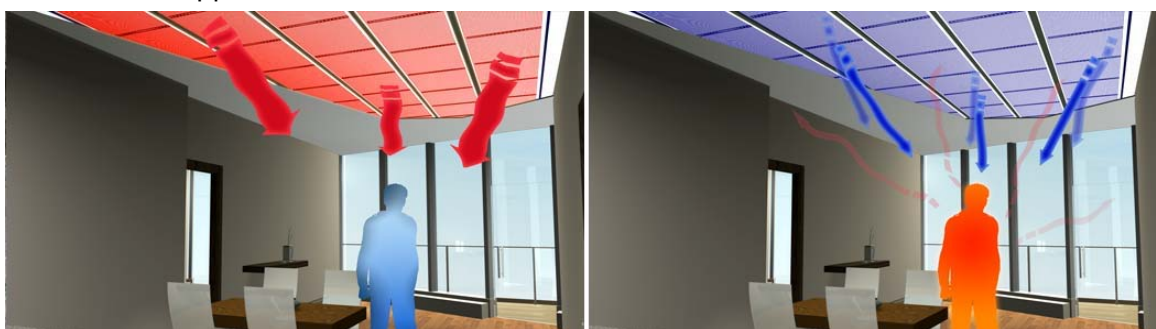
Overdracht vindt plaats door straling, door luchtstroming in de spouw en door geleiding. Als de spouw erg dun is (minder dan ongeveer 15 mm), dan vindt er nauwelijks luchtbeweging plaats. Er is dan sprake van stilstaande lucht (een goede isolator zie tabel 4), en dus weinig convectorie. Een dunne spouw isoleert daarom vrij goed. Hierop berust de werking van dubbel glas! Wel vindt er nog overdracht door straling plaats van het warme oppervlak naar het koude oppervlak aan de andere kant van de spouw. In moderne glassoorten is om die reden een warmtereflecterende metaallaag aangebracht aan één kant van de spouw. Door die reflectie blijft ook de stralingsoverdracht beperkt: We spreken van HR glas.



Bij een bredere luchtsponw ontstaan steeds meer luchtstromen in de spouw. Aan de warme kant ontstaat een stijgende luchtstroom (omdat warme lucht opstijgt), aan de koude kant daalt die luchtstroom weer. Daarom is de warmteovergangsweerstand van een hele brede spouw niet beter dan die van een smallere spouw. Voor een verticale spouw van minstens 15mm breed en zonder speciale voorzieningen wordt een overgangsweerstand $r_{sp} = 0,17 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ aangehouden.

Intermezzo - Warmtestraling

Voorwerpen zenden aan hun oppervlak warmtestraling uit. Hoeveel straling is sterk afhankelijk van de temperatuur van het oppervlak. Pas bij het absolute nulpunt (0K ofwel $-273,15^\circ\text{C}$) is er geen sprake meer van straling. Omdat **alle** voorwerpen straling uitzenden (en ontvangen!) is er overal om ons heen sprake van *stralingsuitwisseling*. Ook tussen mensen en hun omgeving. Soms is dat voelbaar (zon, open haard, koud glasvlak), maar meestal zijn we ons er niet van bewust. Stralingsoverdracht tussen twee voorwerpen is een complex proces dat we hier sterk vereenvoudigd behandelen. Belangrijke factoren zijn de temperaturen van de oppervlakken, de emissiecoëfficiënten van de materiaaloppervlakken, en de mate waarin beide oppervlakken elkaar "zien"



Figuur: Warmteoverdracht door straling tussen een stralingsplafond en een mens. Dit plafond kan worden gebruikt om te verwarmen (links) of om te koelen (rechts). In beide gevallen is er sprake van stralingsoverdracht van het plafond naar de persoon eronder, maar ook omgekeerd van de persoon naar het plafond.

Tabel 5 – Warmteovergangsweerstanden NEN1068

Constructie-onderdeel	r_i ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)	r_e ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$)
Vloeren bij een naar boven gerichte warmtestroom	0,10	0,10
Vloeren boven buitenlucht	0,17	0,04
Vloeren boven onverwarmde ruimte of kruipruimte	0,17	0,17
Uitwendige scheidingsconstructies boven verwarmde ruimte, waarvan de grootste hellingshoek met de horizontaal kleiner of gelijk is aan 75°	0,10	0,04
Overige scheidingsconstructies grenzend aan buitenlucht	0,13	0,04
Overige scheidingsconstructies	0,13	0,13

2.9 Temperatuurverloop van binnen- naar buitenlucht

Wanneer de overgangssweerstanden worden meegenomen in de berekening van het temperatuurverloop door een constructie dan kunnen we gebruik maken van de (makkelijk meetbare) luchttemperaturen aan weerszijden van de constructie. We zijn niet meer afhankelijk van de vaak onbekende oppervlaktetemperaturen. In de berekening komen er simpelweg 2 weerstanden in serie bij. Alsof er twee extra materiaallaagjes aanwezig zijn. De grenslagen binnen en buiten.

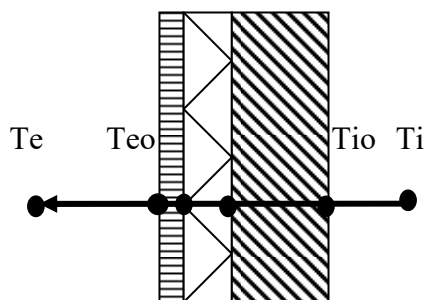
Wordt de formule (6) toegepast voor de warmtestroomdichtheid en als de binnentemperatuur T_i hoger is dan de buitentemperatuur T_e . Dan wordt deze:

$$q = \frac{T_i - T_{io}}{r_i} = \frac{T_{io} - T_{eo}}{R_c} = \frac{T_{eo} - T_e}{r_e} = \frac{T_i - T_e}{r_i + R_c + r_e} = \frac{T_i - T_e}{R_{tot}} \quad (9)$$

grenslaag binnen constructie grenslaag buiten totaal

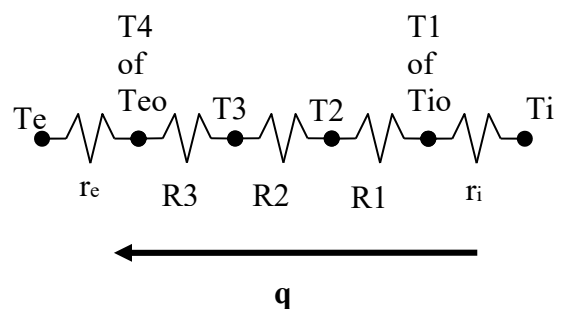
Waarbij de R_{tot} in de norm meestal de warmteweerstand lucht-op-lucht wordt genoemd in de normen. Dit is dus de totale warmteweerstand van de constructie samen met de warmteovergangssweerstanden aan beide zijden.

$$R_{tot} = r_i + R_c + r_e \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \quad (10)$$



	d_3	d_2	d_1	
	λ_3	λ_2	λ_1	
	R_3	R_2	R_1	
r_e				r_i

Warmtestroom door een gevel



"Elektrisch analogon" van de zelfde warmtestroom, waarbij de warmteweerstanden worden weergegeven als elektrische weerstanden.

Stappenplan berekening temperatuurverloop

1. Randvoorwaarden (temperatuur binnen en buiten) moeten gegeven zijn
2. Opbouw van de constructie (laagdiktes, materialen en λ 's) moeten gegeven zijn of opgezocht worden.
3. Bereken voor elke laag de R-waarde
4. Bereken R_{tot}
5. Gebruik om de warmtestroomdichtheid door de constructie te berekenen

$$q = \frac{T_i - T_e}{R_{tot}}$$

6. Gebruik om het temperatuurverschil over elke laag te berekenen.

$$\Delta T_x = \left(\frac{T_i - T_e}{R_{tot}} \right) * R_x$$

Controle: het totaal van de temperatuurverschillen over alle lagen moet gelijk zijn aan $T_i - T_e$.

7. Uitgaande van T_e kan nu de temperatuur na elke laag worden bepaald door er ΔT_x bij op te tellen.

Voorbeeld:

Bereken het temperatuurverloop door een ongeïsoleerde spouwmuur

Laag	d [m]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	$\Delta T(\text{laagx})^{***}$ [°C]	T [°C]
					$T_i = 20^\circ\text{C}$
Overgang binnen			0,13*	5,70	
					$T_1 = 14,29$
Metselwerk	0,11	0,9	0,12**	5,26	
					$T_2 = 9,03$
Spouw	0,05		0,17*	7,46	
					$T_3 = 1,57$
Gewelsteen	0,11	1,0	0,11**	4,82	
					$T_4 = -3,2$
Overgang buiten			0,04*	1,75	
					$T_e = -5^\circ\text{C}$
Totaal		$R_{tot}:$	0,57		

* Standaard overgangswaarden. Zie paragraaf 2.8

** Warmteweerstand van de materiaallaag $R = d / \lambda$

$$*** \Delta T_x = \left(\frac{T_i - T_e}{R_{tot}} \right) * R_x = \left(\frac{25}{0,57} \right) * R_x$$

Reken nu zelf deze gevel door als de spouw wordt gevuld met isolatiemateriaal met $\lambda = 0,04$!

2.10 Overgangscoefficienten α

Een iets andere manier om deze warmteovergangseffecten aan de randen van constructies te beschrijven is in de vorm van warmteovergangscoefficienten. Een **warmteovergangscoefficient α ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)** is gelijk aan 1 gedeeld door de warmteovergangsweerstand. Voor de standaardwaarden uit de vorige paragraaf betekent dat:

Overgangscoefficient binnen:	$\alpha_i = 1 / r_i = 1/0,13 = 7,7 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$
Overgangscoefficient buiten:	$\alpha_e = 1 / r_e = 1/0,04 = 25 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$
Overgangscoefficient verticale spouw:	$\alpha_{sp} = 1 / r_{sp} = 1/0,17 = 5,9 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$

Bij de overgangsweerstanden geldt hoe groter de weerstand hoe *meer* isolerende werking. Bij de overgangscoefficienten is dat omgekeerd: hoe groter de overgangscoefficient hoe meer warmteovergang (dus minder isolatie).

In het algemeen geldt dat de warmteovergangscoefficient α een maat is voor hoe gemakkelijk de warmte van lucht naar de constructie of omgekeerd wordt overgedragen.

Met de invoering van α is het makkelijk om aan te geven dat de warmteoverdracht aan het oppervlak is opgebouwd uit meerdere warmtetransport mechanismen. De warmtestroomdichtheid bestaat uit de volgende componenten:

1. Warmteoverdracht aan het oppervlak door **stralingsuitwisseling** met de oppervlakken in de omgeving: $q_s = \alpha_s * (T_i - T_{io})$

In de gebouwde omgeving kan ruwweg worden aangenomen dat $\alpha_s = 5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Voor sommige materialen zoals aluminiumfolie gelden lagere waarden.

2. Warmteoverdracht door **convectie** aan het oppervlak (*langsstromende lucht*)
 $q_c = \alpha_c * (T_i - T_{io})$

De waarde van α_c is afhankelijk van de mate van luchtbeweging. Buiten wordt als gemiddelde aangenomen $\alpha_c = 20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, binnenshuis wordt dat ongeveer $2,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Bovendien geldt dat naarmate je dichterbij het wandoppervlak komt de luchtsnelheid wordt afgeremd. Dit heeft tot gevolg dat het temperatuurverloop in de dunne "grenslaag" gekromd verloopt:



Figuur : temperatuurverloop in de grenslaag dichtbij het oppervlak. Omdat de langsstromende lucht wordt afgeremd door het oppervlak, verandert de warmteoverdracht door convectie. Daardoor ontstaat dit karakteristieke temperatuurverloop. NB de "grenslaag" is ongeveer een centimeter dik.

3. Warmteoverdracht door **geleiding** van het oppervlak naar lucht. Meestal is dit effect erg klein, en wordt $\alpha_g = 0$:

$$q_g = \alpha_g * (T_i - T_{io})$$

Samen wordt dat:

$$q = (\alpha_s + \alpha_c + \alpha_g) * (T_i - T_{io})$$

Ofwel samengevoegd tot:

$$q = \alpha_i * (T_i - T_{io}) \quad (11)$$

Dus:

$$\alpha_i = \alpha_s + \alpha_c + \alpha_g = 5 + 2,5 + 0 = 7,5$$

Dit komt inderdaad ongeveer overeen met de waarde die we aan het begin van deze paragraaf hebben berekend uit de overgangsweerstand r_i .

Uiteraard geldt voor de warmteovergangcoëfficiënt buiten α_e hetzelfde verhaal:

$$\text{Warmteovergang buiten:} \quad q = \alpha_e * (T_i - T_{io}) \quad (12)$$

$$\text{waarbij: } \alpha_e = \alpha_s + \alpha_c + \alpha_g = 5 + 20 + 0 = 25$$

2.11 Warmtedoorgangscoefficiënt U

Ook de warmteweerstand R kan op een andere manier worden weergegeven. De warmtedoorgangscoefficiënt U ($\text{W/m}^2\text{K}$) is gelijk aan 1 gedeeld door R_{tot} van een constructie.

In eerste instantie was het:

$$q = \frac{T_i - T_a}{R_{\text{tot}}}$$

Dat wordt bij gebruik van de U-waarde:

$$q = U * (T_i - T_e) \quad (13)$$

Waarbij dus de volgende wordt berekend door:

$$U = \frac{1}{r_i + R_c + r_e} = \frac{1}{R_{\text{tot}}} \quad (14)$$

The screenshot shows a website with the following structure:

- Header: Comfortabel en energiezuinig wonen
- Navigation: Homepage > Details > Massieve bouw
- Main Menu:
 - Inspirerende ideeën
 - Wat is Multi-Comfort
 - Comfortabel wonen en besparen
 - Passiefhuis projecten
 - Praktische services
 - Zo bouwt u een Passiefhuis
 - Details
 - >> Massieve bouw
 - >> Houtskeletbouw
- Section: Aansluiting dakvoet

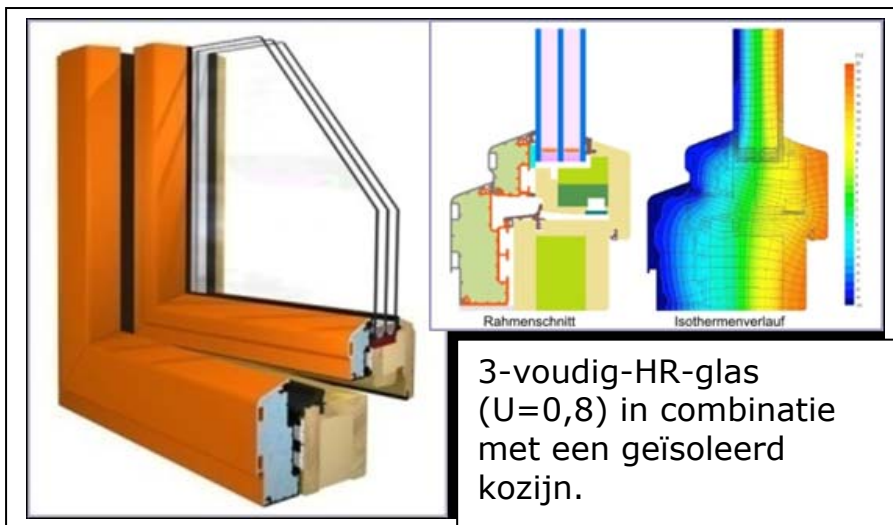
De isolatiewaarden van dit detail zijn:

 - Rc-waarde dak: 9,78 m².K/W
 - U-waarde dak: 0,10 W/m².K

De warmtedoorgangs-coëfficiënt U geeft aan hoe gemakkelijk warmte door de constructie kan worden afgevoerd. Dus hoe lager de U-waarde van de constructie des te hoger de warmteweerstand. Hierboven is dat te zien in de documentatie van een leverancier van een extreem goed isolerend bouwsysteem.

Opmerkingen:

1. Let op bij een gelaagde constructie kunnen de R-waarden van de lagen bij elkaar worden opgeteld. Bij U-waarden is optellen van lagen (rekenkundig) niet mogelijk. Bij een gelaagde constructie moet dus altijd eerst de R_{tot} worden berekend. Daarna kan de U-waarde eenvoudig worden bepaald.
2. Bij glas wordt altijd de U-waarde gebruikt, en wordt nooit gerekend met R-waarden. Zo is de U-waarde van enkel glas $5 \text{ W/m}^2\text{K}$, terwijl voor 3-voudig-HR-glas geldt $U = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
3. In oudere literatuurbronnen wordt de U-waarde ook wel geschreven als k-waarde.



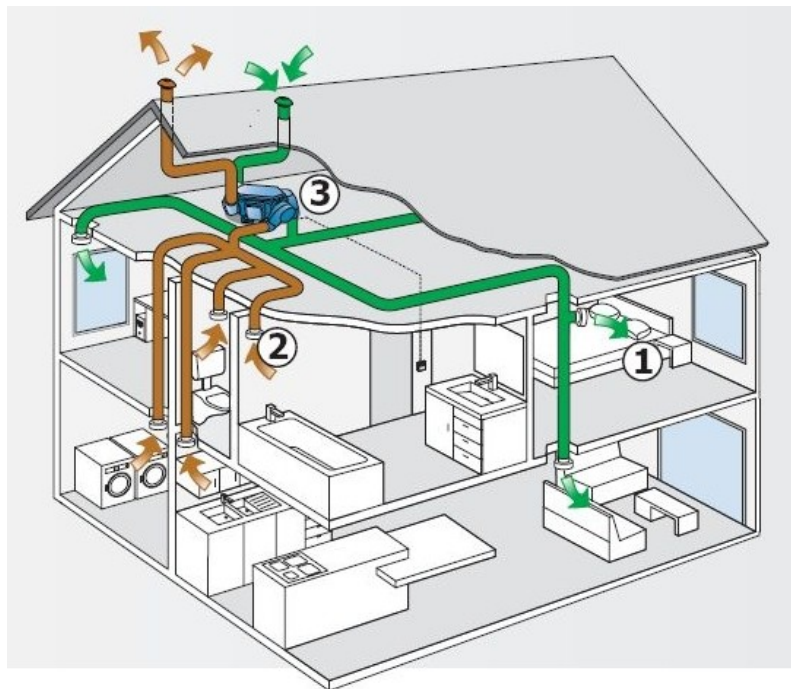
3. Ventilatie en Energiebalans

In hoofdstuk 2 hebben we het warmtetransport door de gebouwschil bekeken. Door goed te isoleren kan deze energiestroom zo veel mogelijk worden teruggedrongen. In dit hoofdstuk bekijken het energieverlies door ventilatie. Om de koude buitenlucht die 's winters een gebouw binnen komt op te warmen is energie nodig. Anders gezegd, gaat er door te ventileren energie verloren. Ventileren is nodig om de luchtkwaliteit in het gebouw op peil te houden.

Verder besteden we aandacht aan de "*warmtebalans*" van een gebouw. We gaan kijken hoe warmteverlies noodzakelijkerwijs wordt gecompenseerd door warmtewinst. Warmtewinst kan gratis zijn (zoals zon), maar kan tegen hoge kosten (de gasrekening) worden verzorgd.

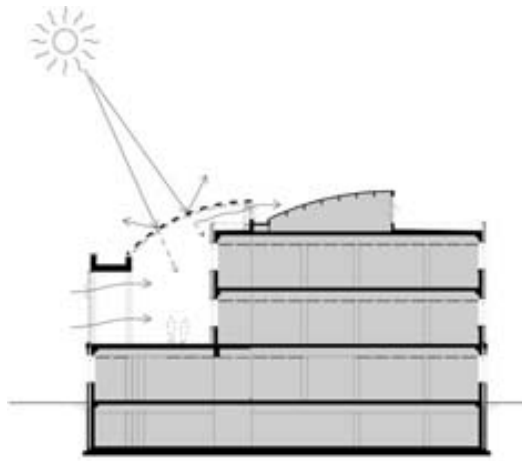
3.1 Ventilatie en infiltratie

Ventileren is het toevoeren van verse buitenlucht, en het afvoeren van vervuilde binnenlucht. Hoewel de kwaliteit van de lucht buiten vaak niet optimaal is, raakt de binnenlucht nog meer vervuild. In een gebouw zijn allerlei verontreinigingsbronnen aanwezig: mensen, huisdieren, gassen afkomstig van bouw- en stofferingsmaterialen en apparaten, stof, micro-organismen, tabaksrook, en verbrandingsgassen. Daarnaast moet vocht worden afgevoerd. In een woning wordt per dag 10 tot 12 liter waterdamp geproduceerd door ademen, koken, douchen, wasdrogen enz.



Als de luchtkwaliteit goed is presteren mensen beter. Zo halen schoolkinderen betere cijfers voor rekenen als de ventilatie in het klaslokaal goed is, zo is uit onderzoek gebleken. Om die reden worden er in het bouwbesluit, maar ook door de arbo-diensten eisen gesteld aan de ventilatie van gebouwen.

Met **infiltratie** wordt de onbedoelde ventilatie door naden en kieren bedoeld. Infiltratie is onwenselijk omdat het niet te regelen is. Daarom wordt met een goed ontwerp, en zorgvuldige uitvoering op de bouwplaats geprobeerd gebouwen zo luchtdicht mogelijk af te werken.



Figuur: Het atrium van een kantoorgebouw van de ECN in Petten wordt door natuurlijke ventilatie (thermische trek) geventileerd en gekoeld.

3.2 Ventilatievoud

De hoeveelheid lucht die door ventilatie en infiltratie een gebouw in en uit gaat is moeilijk te bepalen, vooral wanneer de ventilatie op natuurlijke wijze plaatsvindt. De hoeveelheid ventilatielucht door de woning varieert dan voortdurend en is afhankelijk van:

1. Luchtdoorlatendheid van de uitwendige scheidingsconstructie (kieren en naden)
2. Ventilatie via verticale luchtkanalen met als drijvende kracht de druk- en temperatuurverschillen
3. Drukverdeling rond het gebouw (door ligging, windsnelheid en windrichting)
4. Bewonersgedrag (het wel of niet openen van ramen en ventilatieroosters)

Deze factoren worden in dit dictaat niet verder besproken, maar komen later in de opleiding bouwkunde wel aan bod..

Afhankelijk van het gebouwtype worden bij de handberekeningsmethoden in de literatuur de warmteverliezen door ventilatie en infiltratie apart of gecombineerd in rekening gebracht. Voor de stationaire berekening voeren we een voor het stookseizoen gemiddelde ventilatie en infiltratie in, volgens:

$$q_v = \frac{n \cdot V}{3600} \quad (15)$$

Met:

q_v = het gemiddeld luchtdebiet in m^3/s

n = het gemiddelde ventilatievoud $1/\text{h}$

V = bruto inhoud van de ruimte, of het gebouw in m^3

Het begrip ventilatievoud van een ruimte is het getal dat aangeeft hoeveel keer per uur de ruimte van verse lucht wordt voorzien. Dus bij een ventilatievoud van $n=2$ wordt de totale luchtinhoud van de woning twee keer per uur ververs. Vermenigvuldigd met de woninginhoud V levert dit het ventilatiedebiet (hoeveelheid) in m^3/h op. Om hier SI-eenheden van te maken wordt gedeeld

door 3600 s/h, zodat een luchtdebiet in m^3/s ontstaat. Het ventilatiedebiet is belangrijk omdat dit gebruikt wordt om de luchtkwaliteit in een gebouw te beoordelen (zie 3.1), of om het energieverlies te berekenen (zie 3.3)

Voorbeeld: Een tussenwoning heeft een volume van 350 m^3 . Het ventilatievoud is gemeten: $n = 1,2 \text{ 1/h}$. Wat is het ventilatiedebiet q_v van deze woning?

$$q_v = n \cdot V = 1,2 \cdot 350 = 420 \text{ m}^3/\text{h}$$

of in SI-eenheden:

$$q_v = 420 / 3600 = 0,117 \text{ m}^3/\text{s}$$

Afhankelijk van de ouderdom van het gebouw en de bouwwijze kan het ventilatievoud sterk verschillen. Als richtwaarden worden hierna toch enige gemiddelde ventilatievouden n_{gem} gegeven.

Woningen met natuurlijke ventilatie:

a. bij eengezinshuizen:

-voor tussen- en hoekwoningen $n = 0.8 \text{ [1/h]}$

-voor vrijstaande woningen $n = 1.3 \text{ [1/h]}$

b. bij meergezinshuizen $n = 0.9 \text{ [1/h]}$

Woningen met mechanische ventilatie:

gemiddelde natuurlijke ventilatie en infiltratie: $n = 0.3 \text{ [1/h]}$ + verlies t.g.v. de mechanische ventilatie

Kantoren:

a. tijdens kantoortijd:

-bij natuurlijke ventilatie $n = 0.5 \text{ [1/h]}$

-bij mechanische ventilatie $35 \text{ m}^3/\text{h}$ per persoon

b. dag en nacht:

-infiltratie $n_{\text{infiltratie}} = 0.15 \text{ [1/h]}$



3.3 Energieverlies door Ventilatie

Door het steeds beter thermisch isoleren van gebouwen wordt het warmteverlies door transmissie door de gebouwschil steeds kleiner. Daarom wordt het warmteverlies door ventilatie en infiltratie een relatief steeds belangrijker deel van het totaal.

$$Q_v = \rho \cdot c \cdot q_v \cdot \Delta T \quad [W] \quad (3)$$

Q_v = warmteverlies door ventilatie [W]

ρ = dichtheid van het stromend medium ($\rho_{\text{lucht}} = 1,2 \text{ kg/m}^3$, zie tabel 2)

c = soortelijke warmte van ($c_{\text{lucht}} = 1000 \text{ J/kgK}$, zie tabel 2)

q_v = (lucht)volumestroom [m^3/s]

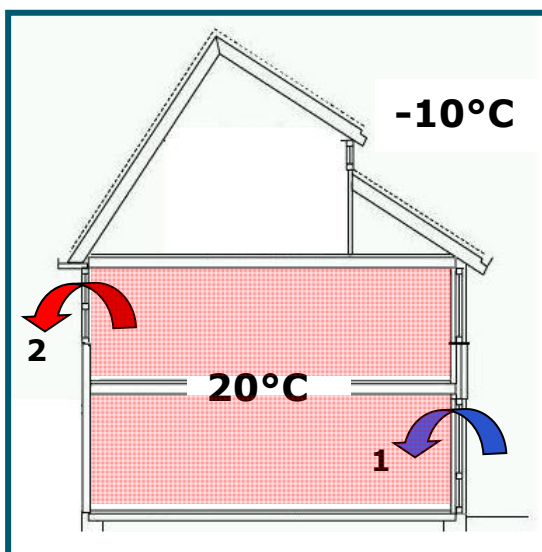
ΔT = temperatuurverschil tussen het stromend medium en z'n bestemming [K]

Warmteverlies door ventilatie wordt niet veroorzaakt door warme lucht die naar buiten verdwijnt, maar door de koude lucht die de woning binnenkomt. Deze koude lucht moet immers worden opgewarmd naar kamertemperatuur!

Voorbeeld: Een woning met een inhoud van 500 m^3 en een ventilatievoud van 1 h^{-1} wordt geventileerd met buitenlucht. De temperatuur in de woning is 20°C , de temperatuur buiten is -10°C . Wat is onder deze omstandigheden het energieverlies door ventilatie?

$$q_v = n \cdot V / 3600 = 1 \cdot 500 / 3600 = 0,139 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_v = \rho \cdot c \cdot q_v \cdot \Delta T = 1,2 \cdot 1000 \cdot 0,139 \cdot (20 - (-10)) = 5004 \text{ W}$$



Koude lucht komt de woning binnen (1) en moet worden opgewarmd van -10°C naar 20°C . Daar is energie voor nodig, de verwarming slaat aan: het ventilatieverlies. Warme lucht verdwijnt naar buiten (2). Voor het energieverbruik van de woning heeft dat geen gevolgen

3.4 Energieverlies door transmissie

In hoofdstuk 2 zijn we bezig geweest met de warmteweerstand van constructie, het temperatuurverloop door een constructie en de warmtestroomdichtheid door bijvoorbeeld een gevel. Nu gebruiken we deze kennis om het totale warmteverlies door de gebouwschil te berekenen, dit wordt het transmissieverlies genoemd. Door het steeds beter thermisch isoleren van gebouwen wordt het warmteverlies door transmissie door de gebouwschil steeds kleiner.

$$Q_{tr} = A \cdot U \cdot \Delta T \quad [W] \quad (3)$$

Q_{tr} = warmteverlies door transmissie [W]

A = oppervlak van het te berekenen bouwdeel (gevelvlak, dak, of raam) [m^2]

U = warmtedoorgangscoefficiënt (W/m^2K)

ΔT = temperatuurverschil tussen binnen en buiten [K]

Voorbeeld: De voorgevel van een woning meet 25 m^2 . Daarvan is 8 m^2 glas. Voor de dichte geveldelen is $R_{tot} = 3,5 \text{ m}^2K/W$. De U -waarde van het glas is $1,5 \text{ W/m}^2K$. De temperatuur in de woning is $20^\circ C$, de temperatuur buiten is $-10^\circ C$. Wat is onder deze omstandigheden het energieverlies door ventilatie?

$$U_{gevel} = 1 / R_{tot} = 1 / 3,5 = 0,286 \text{ W/m}^2K$$

$$Q_{tr,gevel} = A \cdot U \cdot \Delta T = (25-8) * 0,286 * (20 - (-10)) = 146 \text{ W}$$

$$Q_{tr,glas} = A \cdot U \cdot \Delta T = 8 * 1,5 * (20 - (-10)) = 360 \text{ W}$$

$$Q_{tr,voorgevel} = 146 + 360 = 506 \text{ W}$$

In het voorbeeld is het transmissieverlies door 1 gevel berekend. Op dezelfde wijze kan dat voor de andere gevels, voor het dak en voor de vloer worden berekend. Opgeteld is dat het totale warmteverlies door transmissie van de woning.

3.5 Warmtebalans

Om het energieverbruik van een gebouw te berekenen zetten we een warmtebalans op. Hierbij worden alle warmteverliezen berekend (ventilatie paragraaf 3.3 en transmissie paragraaf 3.4). Maar daarnaast wordt er gekeken naar "warmtewinst". Warmtewinst is de hoeveelheid warmte die "gratis" in het gebouw vrijkomt. Dat kan zijn omdat de zon naar binnenschijnt, of door de warmteafgifte van apparaten, verlichting en personen(!) in de woning.

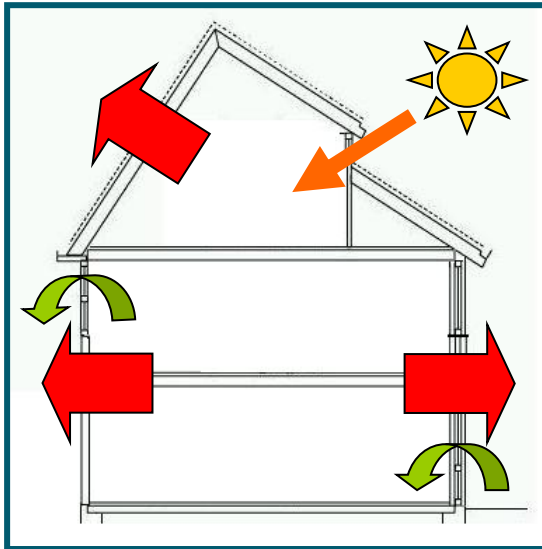
De warmteverliezen worden dus (deels) gecompenseerd door warmtewinst. De warmtestroom die overblijft moet worden gecompenseerd door de verwarmingsinstallatie:

$$Q_{\text{verwarming}} = Q_{\text{transmissie}} + Q_{\text{ventilatie}} - Q_{\text{warmtewinst}} \quad [\text{W}]$$

zie
paragraaf 3.4

zie
paragraaf 3.3

o.a. zon



Figuur: De warmtebalans van een woning.

Rood: warmteverlies door gevels en daken (hoofdstuk 2)

Groen: Ventileren met (koude) buitenlucht leidt ook tot warmteverlies.

Geel: Warmtewinst door zoninstraling. Als die warmtewinst onvoldoende is om de verliezen te compenseren, dan moet de verwarming aan!

3.6 Energieprestatie

De overheid stelt regels aan het energieverbruik van gebouwen. Sinds 1995 gebeurt dat aan de hand van de "Energieprestatienorm" (EPN). Het energieverbruik van een woning of ander gebouw wordt daarbij vertaald naar 1 getal: de energieprestatiecoëfficiënt (EPC). Hoe lager de energieprestatiecoëfficiënt hoe energiezuiniger het gebouw is. In 1995 was de vereiste EPC voor woningen nog 1,5. In 2010 is de eis gedaald naar 0,8. In de 2011 daalt de EPC naar 0,6, en enkele jaren later zal er opnieuw een aanscherping van de EPC plaatsvinden.

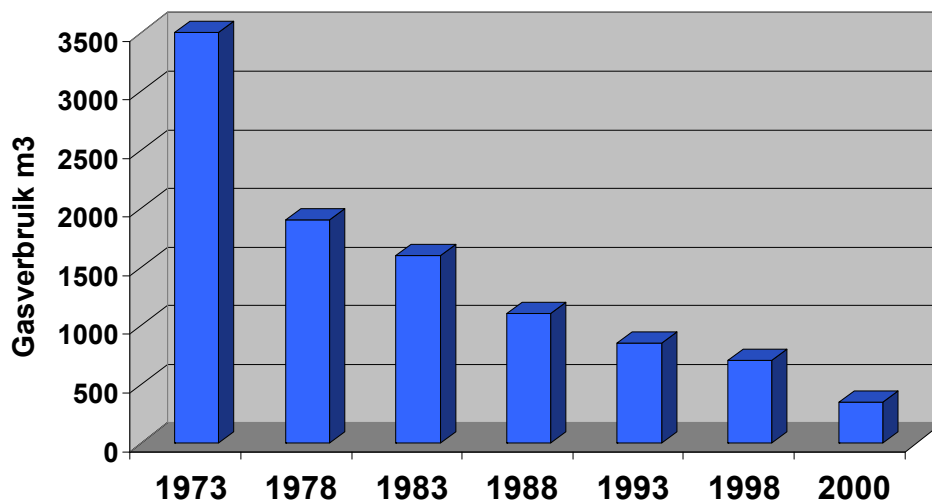
In de energieprestatienorm wordt het totale energieverbruik van een woning of gebouw berekend. Dat gebeurt aan de hand van een energiebalans zoals in paragraaf 3.5. Daarnaast wordt ook het verbruik voor warmtapwater, verlichting en soms koeling bepaald. Vervolgens wordt dit totale verbruik vergeleken met het toelaatbare energieverbruik voor dat gebouw. Een groter gebouw mag meer energieverbruiken dan een klein gebouw. Die vergelijking van totaal verbruik (Q_{totaal}) en toelaatbaar energieverbruik ($Q_{\text{toelaatbaar}}$) leidt tot de getalwaarde EPC:

$$EPC = Q_{\text{totaal}} / Q_{\text{toelaatbaar}} = Q_{\text{totaal}} / ((330 \cdot Ag + 65 \cdot Averlies) \cdot c)$$

Q_{totaal} = totaal energieverbruik gedurende het stookseizoen (MJ)
 berekend volgens de norm NEN5128
 $Q_{\text{toelaatbaar}}$ = $(330 \cdot Ag + 65 \cdot Averlies) \cdot c$
 Ag = gebruiksoppervlak (ongeveer gelijk aan het vloeroppervlak)
 $Averlies$ = verliesoppervlak (gevels, daken enz)

In de grafiek hieronder is goed te zien hoe door de regelgeving van de overheid en de gestegen energiekosten het gasverbruik van nieuwbouwwoningen enorm is gedaald sinds 1973. In 1973 was er voor het eerst een "energiecrisis", en ontstond het inzicht dat maatregelen nodig waren. De trend gaat nog steeds door. Tegenwoordig is er vooral aandacht nodig voor de "bestaande woningvoorraad". Oudere huizen zijn vaak nog onvoldoende geïsoleerd. Dat betreft veel grotere aantal woningen dan de jaarlijkse nieuwbouw, en het gemiddelde gasverbruik ligt nog erg hoog: 1650 m³ aardgas per jaar.

Gasverbruik voor woningverwarming nieuwbouw



Figuur: Gasverbruik voor woningverwarming van nieuwbouwwoningen. Let op: dit is alleen het verbruik voor het verwarmen van de woning. Warmtapwater (400-500m³ gas) en koken (70m³ gas) komt er nog bij.

3.7 Duurzaam Bouwen

Duurzaam bouwen (DuBo) staat voor het ontwikkelen en beheren van de gebouwde omgeving met respect voor mens en milieu. Duurzaam bouwen, milieubewust bouwen, ecologisch bouwen: deze termen worden steeds vaker gebruikt. Ze staan alle drie voor de aandacht die wordt besteed aan het beperken van de negatieve invloed van het bouwen en wonen (of gebruiken van een gebouw) op het milieu.



[Gebouw van het WNF in Zeist](#)

Volg de link voor meer info en een filmpje

Ambitieniveaus van duurzaam bouwen

Er zijn verschillende ambitieniveaus in duurzaam bouwen met betrekking tot het deelaspect energie te onderscheiden: energiezuinig, energieneutraal en energieleverend.

- o Energiezuinige gebouwen verbruiken minder energie dan traditionele gebouwen.
- o Energieneutrale gebouwen hebben gemiddeld over een jaar gezien een energieverbruik van 0. Dat wil zeggen dat er even veel energie wordt opgewekt als dat er wordt verbruikt in de woning.
- o Energieleverende gebouwen wekken meer energie op dan voor eigen gebouwgebruik nodig is, zuiveren lucht en water en verwerken afval tot energie. Dit ambitieniveau strookt met de *Cradle to Cradle*-filosofie van Michael Braungart en William McDonough.

Voor het ontwikkelen van duurzaam vastgoed zullen opdrachtgevers en opdrachtnemers vooraf het gewenste ambitieniveau moeten bepalen en op een nieuwe manier over ontwerp en uitvoering moeten nadenken. Het vergt een green mindset om te kunnen omschakelen van traditioneel bouwen naar een duurzamer ambitieniveau. In veel gevallen blijven de inspanningen beperkt tot pragmatisch voldoen aan de energieprestatiecoëfficiënt (EPC) en toepassing van materialen die als 'duurzaam' te boek staan.



Passiefhuis te Duiven

<http://www.passiefhuis.nl/>

Duurzaam bouwen moet aan een aantal basisvoorwaarden voldoen. Duurzame gebouwen moeten een blijvende gebruikswaarde hebben doordat ze flexibel zijn en dus aan te passen aan veranderd gebruik. Toepassing van minder en herbruikbare bouwmaterialen en onderhoudsvriendelijkheid spelen ook een belangrijke rol. Minder materialen gebruiken betekent ook minder energieverbruik voor productie en transport.

Er zijn nog vele andere vormen van en visies op duurzaam bouwen. Een voorbeeld van duurzaam bouwen is een passief huis. Een [passiefhuis](#) onderscheidt zich door de bijzondere combinatie van een zeer hoogwaardig en aangenaam binnenklimaat en een zeer laag energieverbruik.



Voorbeeld: Sleepellingstraat, Rotterdam. Voorbeeld van het passiefhuis-concept bij renovatie. De monumentale voorgevel is niet van uiterlijk veranderd. Desondanks is het gebouw nu extreem goed geïsoleerd, voorzien van een ventilatiesysteem met warmteterugwinning en andere geavanceerde installaties en zonne-energie.