STRALING EN TEMPERATUURVEREVENING

door

C. (Kees) le Pair
clepair@casema.nl

Samenvatting
De aarde inclusief atmosfeer is thermisch niet in evenwicht. Er vindt temperatuur verevening plaats o.a. door wind en door oceaanstromen. Die verevening beïnvloedt temperatuur gemiddelden. Dit opstel tracht een indruk te geven van de grootte van het effect door een berekening van het stralingsevenwicht van een plaat en een bol tussen zon en heelal mèt volledige- en zonder verevening. De gemiddelde temperatuur kan door verevening ~ 1,7 keer hoger worden.

Inhoud

1. Inleiding
2. Fysische parameters
    Zonneconstante
    Albedo
    Emissiviteit
3. Vlakke plaat
4. Bol
5. Temperatuurverevening
6. Dank

1. Inleiding

In tekst boeken[1])[2]) en verhandelingen over klimaat vergelijkt men vaak de aarde met een zwarte straler. Die ontvangt straling van de zon en van het heelal en stuurt om op een zelfde temperatuur te blijven evenveel straling terug in de ruimte. Door toepassing van de stralingswet van Stefan-Boltzmann (SB)

$$I = \sigma T^4 \quad (1)$$

en uitgaand van gemeten inkomende straling en reflexibiliteit (gereflecteerde straling heeft geen invloed op de temperatuur) komt men tot een gemiddelde oppervlakte temperatuur en dito atmosferische temperatuur van 255 K. $\sigma = 5{,}6703.10^{-8}$ $Wm^{-2}K^{-4}$ is een universele natuur-constante.

De gemeten gemiddelde oppervlaktetemperatuur is 288 K[2]). Het verschil tussen beide wordt dan toegeschreven aan broeikasgassen, die een deel van de straling absorberen.

Hierbij is de *bijbehorende veronderstelling* niet vermeld, dat die bol dan wel een uniforme temperatuur heeft. Of m.a.w. een ideale warmtegeleider is; beter nog: dat er volledige temperatuur verevening is. (Warmte wordt niet alleen door geleiding getransporteerd, ook door stroming en verder heeft rotatie een temperatuur vereveningseffect.)

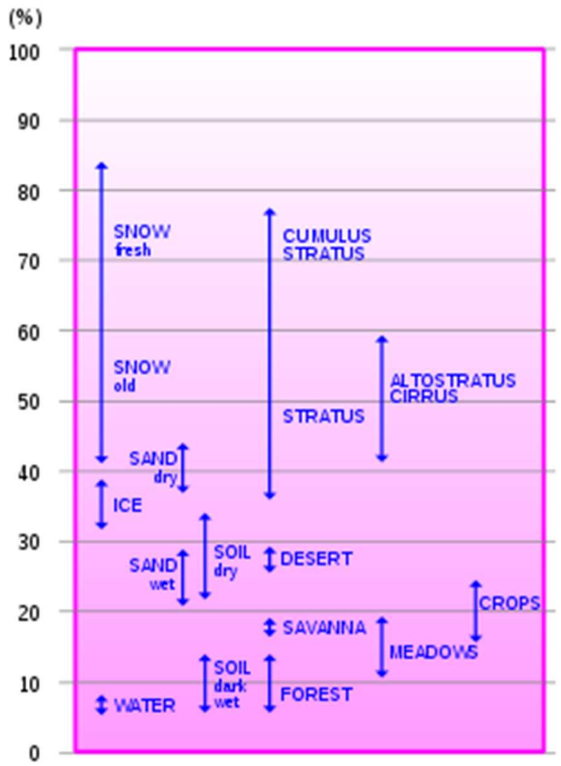
Laat men die verevening buiten beschouwing dan verschilt de oppervlaktetemperatuur van plaats tot plaats. Het stralingsevenwicht geldt dan plaatselijk. De gemiddelde oppervlakte-temperatuur van de bol zou dan 154 K zijn. Het verschil met de gemeten waarde van 288 K is niet 33° maar 134°. Verevening speelt dus een rol waaraan overigens Boeker e.a.[2]) later (p 44 e.v.) wel aandacht schenken.
In dit opstel licht ik de invloed van temperatuur verevening toe. Het is belangrijk, omdat bij gelijkblijvend verschil tussen berekende en gemeten waarden, verandering in de verevening een even grote maar tegengestelde verandering in de grootte van het 'broeikas effect' betekent.

2. Fysische parameters

De straling die de aarde met inbegrip van zijn atmosfeer van de zon ontvangt is niet alzijdig, maar gericht. De zonneconstante, I_z = de energieflux is gemeten, 1350 [W/m^2] (ref.1 p 9) of 1370 (ref.2 p 3). Wikipedia[3]) meldt gemiddeld 1360,8. Dankzij de elliptische baan om de zon is het maximum 1412 in januari en het minimum 1312 in juli in, In dit opstel reken ik met:

$$\mathbf{I_z = 1350\ W/m^2} \quad (2)$$

De fractie α, het albedo, van de gereflecteerde zonnestraling, heeft geen invloed op de temperatuur. α is afhankelijk van materiaal, golflengte van het licht, invalshoek van de straling en structuur van het reflecterend oppervalk. Vanuit de ruimte gezien is het albedo van de aarde 37% à 39% [4]). In werkelijkheid is die van plaats tot plaats verschillend, zie fig.1 en tabel I.



Figuur 1. Albedo

Tabel 1, albedo[4])

Verse sneeuw of ijs : 80-95%
Oude smeltende sneeuw : 40-70%
Wolken : 40-90%
Woestijnzand : 30-50%
Grondaarde : 5-30%
Toendra : 15-35%
Grasland : 25-30%
Bos : 10-20%
Water : 10-60%

De maan 7% (vulkanisch gesteente)
Venus 72%

De albedo verschillen en variaties maken een directe berekening van de op aarde plaatselijk ontvangen straling ondoenlijk. Daardoor verandert ook de zekerheid van de uitkomst van de plaatselijk berekende temperatuur. In dit opstel reken ik met verschillende waarde van α. In de genoemde tekstboeken en verhandelingen rekent men doorgaans met α = 0,3. De effectief inkomende zonnestraling wordt nu

$$\mathbf{I_{eff} = I_z.(1 - \alpha)} \quad (3)$$

Materie in een stralingsveld is geen zwarte straler. De emissiviteit ε is materiaal afhankelijk. Daarvoor is bij evenwicht op elke plaats de energieflux van de uitgaande straling I_u dankzij de stralingswet SB

$$\mathbf{I_u = I_{eff} = I_z.(1 - \alpha) = \varepsilon\sigma T^4} \quad (4)$$

Voor een zwarte straler is ε maximaal: ε = 1. Voor enkele andere materialen zie tabel II. Ook ε is op aarde dus plaatsafhankelijk.

Tabel II [5])

materiaal	**ε**
zuiver water	0,96
zout	0,34
sneeuw	0,8
asfalt	0,88
zand	0,76
cement	0,54
beton	0,91
ijzer roest	0,61
lijmsteen	0,92

In de derde plaats hebben we bij de aarde wat de straling betreft ook te maken met de materiaal afhankelijke transmissie. Materialen die de straling 100% doorlaten, warmen net als bij volledige reflectie niet op. Bij afnemende transmissie is er absorptie met als gevolg opwarming, die tevens afhangt van de warmtecapaciteit van het materiaal. Transmissie speelt een rol, bijvoorbeeld bij atmosfeer en water. Transmissie is golflengte afhankelijk. Indien I_0 de inkomende straling is en I de straling na passeren van de materie, geldt voor de geabsorbeerde straling I_{eff}:

$$I_{eff} = I_0 - I = I_0 - I_0 \,.\, e^{-kd} \quad (5)$$

Waarin k de absorptieconstante van het materiaal bij die golflengte is. d is de dikte van het materiaal.

3. Vlakke plaat

Om het effect van temperatuur verevening op de *gemiddelde* temperatuur van een bestraald materiaal te berekenen beschouw ik eerst twee vlakke platen vrij in het heelal loodrecht op de inkomende zonnestraling even ver van de zon als de aarde in stralingsevenwicht. De ene plaat is een perfecte geleider, waarvan zon- en schaduwzijde altijd dezelfde temperatuur hebben. De andere is een ideale warmteïsolator. De zonzijde is in evenwicht met de inkomende zonnestraling, de achterzijde met die van het heelal, 3 K. Met het oog op paragrafen verderop kies ik voor het albedo, $\alpha = 0{,}3$, voor de emissiviteit, $\varepsilon = 1$ en $k = 0$ (ondoorzichtig). De ideaal geleidende plaat straalt naar beide zijden evenveel uit, terwijl slechts één zijde de zonnestraling ontvangt.

(4) & (2) wordt nu: $0{,}7.I_z = 2\,\sigma T^4$

De gemiddelde temperatuur van een ideaal warmte geleidende plaat is dus:

$$T = 302 \text{ K}$$

Voor de isolator is het anders. De voorkant is in evenwicht met de inkomende zonnestraling, de achterkant met die van het heelal, d.w.z. $T_a = 3$ K. De temperatuur van de voorzijde, T_v, wordt bepaald door de zon. De straling bij 3 K verwaarloos ik. (4) & (2) wordt nu:

$$0{,}7.I_z = \sigma Tv^4$$

De gemiddelde temperatuur van een ideaal warmte geïsoleerde plaat is:

$$\langle T \rangle = 0{,}5\ .\ (\ T_v + T_a\ )$$

$$\langle T \rangle = 181$$

Temperatuur verevening door warmtegeleiding maakt de gemiddelde temperatuur van de geïsoleerde plaat 1,67 keer zo hoog.

4. bol

Het geometrische verschil tussen plaat en bol heeft invloed op de gemiddelde temperaturen.
Ook hier onderscheiden we weer een ideaal warmtegeleidende bol en een zonder temperatuur verevening door geleiding, warmtestroming en rotatie. De straal van de bol is R.
In een bol met ideale warmtegeleiding is de temperatuur uniform en gelijk aan de gemiddelde temperatuur, maar wel afhankelijk van emissiviteit ε en albedo α. Met verwaarlozing van de heelal straling is de ontvangen stralingsenergie: flux x doorsnede van de bol ($= \pi R^2$). De hele bol met oppervlak $4\pi R^2$ straalt energie uit met gelijke (= gemiddelde) temperatuur. Het resultaat staat in tabel III.

$$I_z.(1 - \alpha)\,\pi R^2 = 4\,\pi R^2 \sigma\varepsilon T^4$$

$$T = \{0{,}25\ I_z.(1 - \alpha) / \sigma\varepsilon\}^{0{,}25}$$

Tabel III

Temperatuur van bol in de ruimte met ideale warmtegeleiding, emissivity ε en albedo α.										
α \ ε	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	493,9	415,3	375,3	349,3	330,3	315,6	303,7	293,7	285,2	277,8
0,1	481,1	404,6	365,6	340,2	321,7	307,4	295,8	286,1	277,8	270,5
0,2	467,1	392,8	354,9	330,3	312,4	298,5	287,2	277,8	269,7	262,7
0,3	451,8	379,9	343,3	319,5	302,1	288,7	277,8	268,6	260,8	254,1
0,4	434,7	365,6	330,3	307,4	290,7	277,8	267,3	258,5	251,0	244,5
0,5	415,3	349,3	315,6	293,7	277,8	265,4	255,4	247,0	239,8	233,6
0,6	392,8	330,3	298,5	277,8	262,7	251,0	241,5	233,6	226,8	220,9
0,7	365,6	307,4	277,8	258,5	244,5	233,6	224,7	217,4	211,1	205,6
0,8	330,3	277,8	251,0	233,6	220,9	211,1	203,1	196,4	190,7	185,7
0,9	277,8	233,6	211,1	196,4	185,7	177,5	170,8	165,2	160,4	156,2
1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Bij $\alpha = 0{,}3$ en $\varepsilon = 1$ komt het resultaat 254,1 K overeen met in de inleiding genoemde resultaat gemeld door anderen, 255 K. Die gingen derhalve uit van een bol met totale temperatuur-verevening. De vergelijking met aardse omstandigheden gaat mank, omdat de temperatuur op aarde van plaats tot plaats verschilt.

We beschouwen daarom ook een bol, waarin geen temperatuurverevening plaatsvindt.
Eén zijde is op de zon gericht. Eén punt ontvangt een flux van 1350 . (1 - α) W/m^2, de achterzijde heeft de heelal temperatuur 3 K. Er tussen varieert de flux met cos φ , waarin φ de hoek is tussen de richting waaruit de straling komt en die waar vanuit het centrum gezien het punt zich bevind. Een ring op het boloppervlak met breedte R.dφ en straal r = R.sin φ heeft dezelfde temperatuur, T_φ.

- R = straal van de bol
- r = straal van de cirkel op de bol
- Het oppervlak van een *halve* bol is $2\pi R^2$
- Het ringoppervlak is $2\pi R^2.\sin\varphi.d\varphi$

De temperatuur op het oppervlak van de besproken ring is door SB bepaald:

$$I_z.(1 - \alpha)\cos\varphi = \sigma\varepsilon T_\varphi^{\,4}$$

$$T_\varphi = \{ I_z.(1 - \alpha)\cos\varphi / \sigma\varepsilon \}^{0,25}$$

Op de achter helft van de bol is de temperatuur 3 K.

De gemiddelde temperatuur van deze bol is:

$$\langle T\rangle = \left\{ \int_0^{\pi/2} T_\varphi.\,2\pi R^2.\sin\varphi.d\varphi + 3K.2\pi R^2 \right\} / 4\pi R^2$$

$$\langle T\rangle = \tfrac{1}{2}\,.\left\{ \int_0^{\pi/2} T_\varphi.\sin\varphi.d\varphi + 3K \right\}$$

$$\langle T\rangle = \tfrac{1}{2}\,.\,\{I_z.(1 - \alpha)/\sigma\varepsilon\}^{0,25}\,.\left\{ \int_0^{\pi/2} (\cos\varphi)^{0,25}.\sin\varphi.d\varphi \right\} + 1{,}5\ K$$

Oplossing[6]) van de integraal $\int_0^{\pi/2} (\cos\varphi)^{1/4}.\sin\varphi.d\varphi$
We gebruiken: $\sin\varphi.d\varphi = -\,d\cos\varphi$ (want $d\cos\varphi / d\varphi = -\sin\varphi$)

De integraal wordt dan $-\int_0^{\pi/2} (\cos\varphi)^{1/4}\, d\cos\varphi$ met φ tussen de grenzen 0 en π/2.
De corresponderende grenzen voor cos φ zijn dan 1 en 0.
Als ik voor cos φ nu voor het gemak x substitueer krijg ik:

$$-\int_1^0 (x)^{1/4}\, dx$$

en dit is – 4/5 x 5/4 tussen de grenzen 0 en 1,
Ofwel +4/5.

$$\langle T\rangle = 2/5\{I_z.(1 - \alpha)/\sigma\varepsilon\}^{0,25}\} + 1{,}5K$$

$$\langle T\rangle = 157{,}124.\{(1 - \alpha)/\varepsilon\}^{0,25}\} + 1{,}5K$$

In onderstaande <u>tabel IV</u> is de gemiddelde temperatuur berekend voor verschillende waarden van α en ε.

<u>Tabel IV</u>

Temperatuur van bol in de ruimte met emissivity ε en albedo α, warmtegeleiding = 0

α \ ε	**0,02**	**0,05**	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	419,3	333,8	280,9	236,5	213,8	199,1	188,4	180,0	173,3	167,6	162,8	158,6
0,1	408,5	325,1	273,6	230,3	208,3	193,9	183,5	175,4	168,8	163,3	158,6	154,5
0,2	396,6	315,7	265,8	223,7	202,3	188,4	178,2	170,3	164,0	158,6	154,1	150,1
0,3	383,7	305,4	257,1	216,4	195,7	182,2	172,4	164,8	158,6	153,5	149,1	145,2
0,4	369,2	293,9	247,4	208,3	188,4	175,4	166,0	158,6	152,7	147,7	143,5	139,8
0,5	352,8	280,9	236,5	199,1	180,0	167,6	158,6	151,6	145,9	141,2	137,2	133,6
0,6	333,8	265,8	223,7	188,4	170,3	158,6	150,1	143,5	138,1	133,6	129,8	126,5
0,7	310,7	247,4	208,3	175,4	158,6	147,7	139,8	133,6	128,6	124,5	120,9	117,8
0,8	280,9	223,7	188,4	158,6	143,5	133,6	126,5	120,9	116,4	112,6	109,4	106,6
0,9	236,5	188,4	158,6	133,6	120,9	112,6	106,6	101,9	98,1	94,9	92,2	89,9
1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Bij een ideaal warmtetransport (temperatuurverevening) is bij α = 0,3 en ε = 1 de gemiddelde temperatuur 1,75 x zo groot als bij een bol zonder verevening.
De berekende gegevens van de twee verschillende bollen bij α = 0,3 zijn in fig. 2 in beeld gebracht, samen met een horizontale lijn voor de gemeten gemiddelde temperatuur van het aardoppervlak.

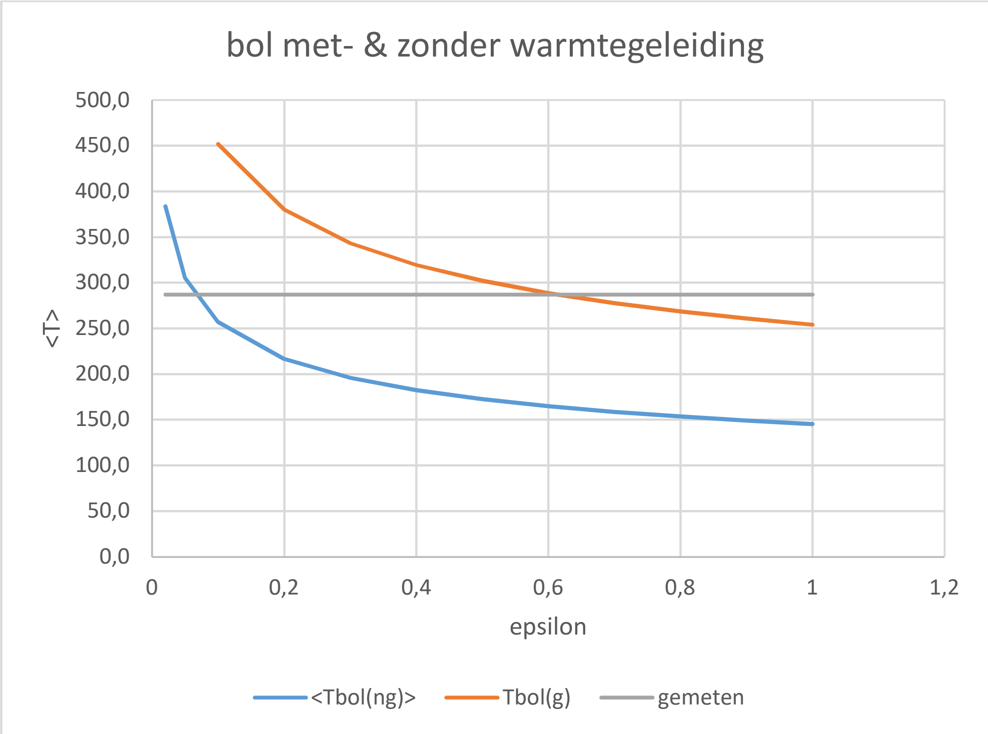


Fig. 2; ng = niet warmte geleidend, g = ideaal geleidend, gemeten gemiddelde aardoppervlak.

De gemeten gemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak, 288 K, is de gemiddelde temperatuur van een schil. Die is belangrijk voor het leefmilieu, maar hij is niet hetzelfde als de temperatuur van het deel van de aardbol inclusief atmosfeer dat verantwoordelijk is voor het stralingsevenwicht. Indien dat het geval zou zijn, zou bij 288 K en deze α & ε = 1 de aarde 1,65 maal zoveel energie uitstralen als de meest efficiënte straler bij volledige temperatuurverevening doet en als de aarde van de zon ontvangt.
De temperatuurverevening op aarde ligt tussen de twee extremen van geen en van volledige verevening. Bij α = 0,3 is dan de ε-afhankelijkheid van de gemiddelde temperatuur (≠ de zgn. gemeten 'gemiddelde temperatuur') een lijn tussen de getekende blauwe en gele lijn in.
De aarde is in het stralingsevenwicht geen ondoorzichtig voorwerp. Het gedeelte dat aan de stralingwisselwerking deelneemt is deels transparant (atmosfeer en water). Dat deel absorbeert, transporteert en emitteert en beïnvloedt zo eveneens het evenwicht.

Vier parameters bepalen dus de aardse straling evenwichtstemperatuur: α, ε, partiële transmissie en temperatuurverevening. Ze zijn plaatsafhankelijk. Middelen kan op veel manieren tot evenwicht leiden. Net als bij de temperaturen. Merk op dat bv. alle temperaturen in de tabellen III en IV evenwichtstemperaturen zijn.

5. Temperatuurverevening

De aarde verevent de temperatuur gedeeltelijk. Extremen als 0 K en 350 K komen aan het oppervlak niet voor. Maar tussen polen en op sommige plaatsen in de tropen kan het verschil wel 100° zijn. Het is kleiner dan die op een niet geleidende zwarte bol. Er is dus warmtetransport. We mogen aannemen dat warmtetransport door geleiding tussen plaatsen verwaarloosbaar is. (Het binnenste van de aarde is > 5000 K. Indien de warmtegeleiding goed zou zijn, hadden we verbrande voeten.) Toch speelt geleiding een rol bij het plaatselijk opslaan van warmte die dankzij de rotatie dan weer op andere plaatsen ter beschikking komt. De voornaamste temperatuur-vereveningsmechanismen zijn:

1. Stroming van de oceanen
2. Stroming van de atmosfeer (wind)
3. De rotatie van de aarde. (verevening in Oost↔West richting en via Coriolis kracht ook op de stromingen)

Totale verevening of helemaal niet heeft bij een effectieve $\varepsilon = 1 > 100°$ verschil in gemiddelde temperatuur tot gevolg en bij $\varepsilon = 0{,}1$ zelfs ~200°. Verandering van ε tussen 0,1 en 1 verandert bij totale verevening de gemiddelde temperatuur 112° en bij geen verevening 200°.
Verevening verdient nader onderzoek. Die is veranderlijk en heeft een invloed op de temperatuur vergelijkbaar met veranderingen in albedo en emissiviteit, waaraan broeikasgassen als H_2O, CO_2, CH_4 e.a. bijdragen.

6. Dank

Arthur Rörsch en Frans van den Beemt vestigden mijn aandacht op de rol die temperatuur verevening speelt in de in klimaat processen. (Hun publicatie, waarin zij o.a. een vergelijking maakten met de atmosfeerloze maan, is in voorbereiding.)
Jo Hermans, o.a. auteur van het schitterende boek 'Energie survival gids' [1]), verschafte daarin enkele gegevens en hielp met de oplossing van een essentiële berekening.

Noten

[1]) J. Hermans: Energie survival gids; BetaText 2008, p 76
[2]) E. Boeker & R. v. Grondelle: Environmental Physics, p 4
[3]) https://nl.wikipedia.org/wiki/Zonlicht (2017 05 07)
[4]) https://nl.wikipedia.org/wiki/Albedo (2017 05 07)
[5]) The engineering toolbox,
http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html
[6]) De oplossing dank ik eveneens aan Jo Hermans, RUL.