

2. Straling

2.1 Inleiding

In dit hoofdstuk gaan we dieper in elektromagnetische straling. Straling is essentieel voor het weer op aarde omdat de zon ons voorziet van warmte waardoor weersverschijnselen kunnen ontstaan. Straling bestaat uit een heel spectrum van fotonen met wisselende golflengte en energie (2.2). Naast de zon zenden ook alle andere voorwerpen straling uit (2.3). Het blijkt dat naast het uitzenden van straling voorwerpen afhankelijk van vorm en eigenschappen ook fotonen kunnen absorberen, reflecteren en doorlaten (2.4). De gassen in de atmosfeer laten een groot deel van de zonnestraling ongehinderd door maar in sommige golflengtegebieden vindt ook significante absorptie plaats door bepaalde moleculen zoals de bekende broeikasgassen O_3 , H_2O en CO_2 (2.5). Een bijzondere vorm van reflectie is verstrooiing. Afhankelijk van de golflengte van de straling en de straal van het deeltje waar de straling opvalt kunnen verschillende vormen van reflectie optreden (2.6).

Straling is ook van zeer groot belang voor metingen aan het aardoppervlak en de aardse atmosfeer vanaf de ruimte. Satellieten meten in verschillende golflengtegebieden de invallende straling. Uit de sterkte van het invallende signaal worden zodoende gegevens verkregen over de temperatuur van de aardse atmosfeer en het aardoppervlak, albedo van bewolking, land- en zeeoppervlakken en de relatieve vochtigheid in de hogere regionen van de troposfeer tussen grofweg 300 en 600 hPa. Hierop wordt dieper ingegaan in hoofdstuk 4.

2.2 Elektromagnetische golven

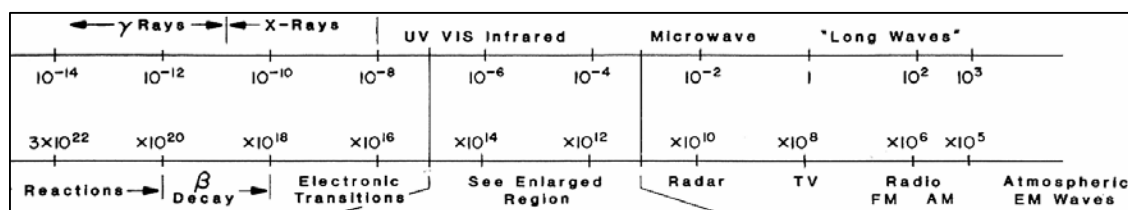


Fig 1: Het elektromagnetisch spectrum omvat een zeer grote range van stralingstypen variërend van de hoogerenergetische gammastraling tot de zeer langgolvlige radargolven. De lengte is weergegeven in meters.

Alle voorwerpen met een temperatuur boven het absolute nulpunt, $-273\text{ }^0\text{C}$, zenden straling uit. Elektromagnetische straling kan worden opgevat als een stroom van deeltjes die fotonen worden genoemd. Deze planten zich voort in met een snelheid van $c = 3.0 \cdot 10^8\text{ ms}^{-1}$. Fotonen hebben een bepaald statistisch gedrag waardoor ze een golfkarakter krijgen. Er kan een golflengte λ (m) en een frequentie f (s⁻¹) aan straling worden toegekend. λ en f hangen op een eenvoudige manier met elkaar samen: $\lambda \cdot f = c$. Straling blijkt in een groot spectrum van golflengten voor te komen. Zeer korte golven zoals gammastraling hebben een hoge energie terwijl zeer lange golven zoals radiogolven een lage energie hebben. In figuur 1 is het elektromagnetische spectrum weergegeven.

Een heel bekende bron die elektromagnetische straling uitzendt is de zon die afgebeeld is in figuur 2. De aarde ontvangt straling van de zon die nodig is voor alle weersverschijnselen. Een deel van de straling kunnen wij waarnemen als zichtbaar licht. De aarde zelf zendt ook straling uit maar de golflengte hiervan is veel groter en de frequentie veel kleiner.

2.3 Zwarte stralers

Een begrip dat regelmatig opduikt in de stralingstheorie is de zogenaamde 'zwarte straler' of 'black body'. Een zwarte straler is een hypothetisch voorwerp met twee belangrijke kenmerken

Ten eerste wordt alle binnenkomende straling (van alle golflengten) door het voorwerp volledig geabsorbeerd. Er vindt dus geen terugkaatsing plaats en ook wordt er geen straling doorgelaten. Dit verklaart de term 'zwart'.

Ten tweede zendt het voorwerp in alle golflengten en in alle richtingen de maximaal mogelijke hoeveelheid straling uit.



Fig 2: De zon is de meest nabij staande ster en voorziet ons van een grote hoeveelheid elektromagnetische straling. Deze is essentieel voor het leven op aarde maar ook voor het weer.

2.3.1 Wet van Stefan-Boltzmann

De hoeveelheid straling die een voorwerp uitzendt hangt sterk af van de temperatuur die het voorwerp heeft. Volgens de wet van Stefan-Boltzmann geldt voor de totale hoeveelheid straling die door een zwarte straler wordt uitgezonden:

$$E = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Waarin: E ~ de intensiteit van de totale in alle golflengten uitgezonden straling (Wm^{-2})
 σ ~ de Boltzmann constante ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)
 T ~ de absolute temperatuur (K)

Het blijkt dat de uitgezonden straling recht evenredig is met de vierde macht van de absolute temperatuur.

2.3.2 Wet van Wien

Elk voorwerp zendt straling uit over een breed spectrum van golflengten. De uitgezonden straling kan uitgezet worden als functie van de golflengte. Hierbij wordt een curve verkregen met een aantal karakteristieke kenmerken. Ten eerste is er een maximum in stralingsintensiteit dat bij een bepaalde karakteristieke golflengte wordt gevonden. Ten tweede is er een scherpe afname van de intensiteit van de straling bij afname van de golflengte. Een minder scherpe afname van de intensiteit van de straling treedt op bij toename van de golflengte vanaf het intensiteitmaximum

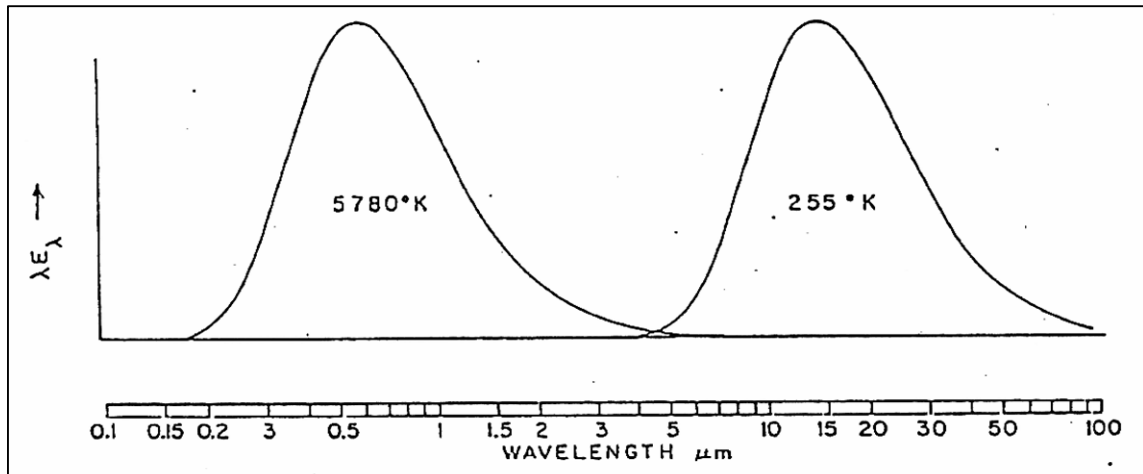


Fig 3: De aarde ontvangt precies evenveel kortgolvlige straling als ze langgolvlige uitzendt. De intensiteit van de zon wordt echter bij een veel kortere golflengte maximaal dan de aardse straling.

De golflengte λ_m waar de straling maximaal is, volgt uit de ‘verschuivingwet van Wien’:

$$\lambda_m = 2897/T (\mu\text{m}) \quad (T \text{ in graden Kelvin})$$

Hieruit volgt dat de golflengte waarbij de stralingsintensiteit maximaal is, omgekeerd evenredig is met de absolute temperatuur. Hoe hoger de temperatuur van een voorwerp, des te kleiner de golflengte waarbij de intensiteit van de straling maximaal is.

De zon heeft aan het oppervlakte een temperatuur van ongeveer 6000 K en de aarde van 280 K. Met behulp van de wet van Wien kan uitgerekend worden bij welke golflengten de aarde en de zon hun maximale hoeveelheid straling uitzenden. De maximum golflengte van zonnestraling ligt in het kortgolvlige, zichtbare gebied, $2897/6000 = 0.48 \mu\text{m}$. De maximale stralingsintensiteit die daarentegen door de aarde wordt uitgezonden ligt in het langgolvlige, infrarode gebied, $2897/280 = 10.3 \mu\text{m}$.

Wanneer we de uitgezonden straling door de aarde en de zon met elkaar vergelijken zoals ze

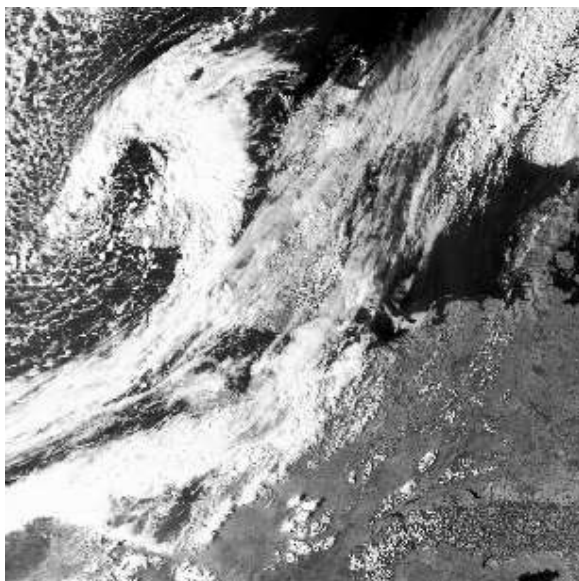


Fig 4: Noaa VIS-beeld 12 september 1999 14:17



Fig 5: Noaa IR-beeld 12 september 1999 14:17

in figuur 3 afgebeeld zijn zien we een aantal opvallende dingen. De curves overlappen elkaar vrijwel niet. Dit houdt in dat bij waarnemingen in het golflengtegebied van het zonlicht de gemeten intensiteiten uitsluitend worden veroorzaakt door zonlicht. Bij metingen van infrarode straling heeft de waargenomen intensiteit uitsluitend betrekking op straling afkomstig van de aarde of de daarboven gelegen atmosfeer.

In figuur 4 is een satellietfoto gegeven van West-Europa. Het betreft een opname van het zichtbare licht van de zon dat door de aarde is teruggekaatst. Wolken kaatsen bijna al het zonlicht terug en komen hierdoor wit over. Land- en vooral zeeoppervlakken doen dit in veel mindere mate en zijn doordoor grijs tot zwart.

In figuur 5 is hetzelfde gebied afgebeeld. Nu betreft het de straling die afkomstig is van het aardoppervlak en wolken. Oppervlakken met een hoge temperatuur, zoals het land overdag, zenden meer straling uit dan zee en wolken. Landoppervlak komt daarom donker over en wolken, afhankelijk van de hoogte van de toppen, grijs tot wit.

2.4 Niet-zwarte stralers

In de praktijk heeft geen enkel voorwerp de eigenschap dat het een volledige zwarte straler is. Niet alle inkomende straling wordt geabsorbeerd en tevens zendt het voorwerp ook niet in alle golflengten de maximale straling uit.

2.4.1 Absorptie, reflectie en transparantie

Een voorwerp kan zich in de praktijk op een aantal manieren t.o.v. binnenkomende straling gedragen. Dat gedrag hangt onder meer af van de golflengte van de straling en de aard van het voorwerp. Dit kan aan de hand van een voorbeeld duidelijk gemaakt worden. Wanneer de zon schijnt op een wateroppervlak dan zal een deel van de invallende straling worden geabsorbeerd. Hierdoor stijgt het water in temperatuur. Een ander deel van het zonlicht zal worden gereflecteerd. De mate waarin zonlicht door water wordt gereflecteerd hangt af van de hoek waaronder de stralen aan het wateroppervlak raken en de ruwheid van de zee. Tenslotte zal een deel van de straling door het water doorgelaten worden en een grotere diepte kunnen bereiken.

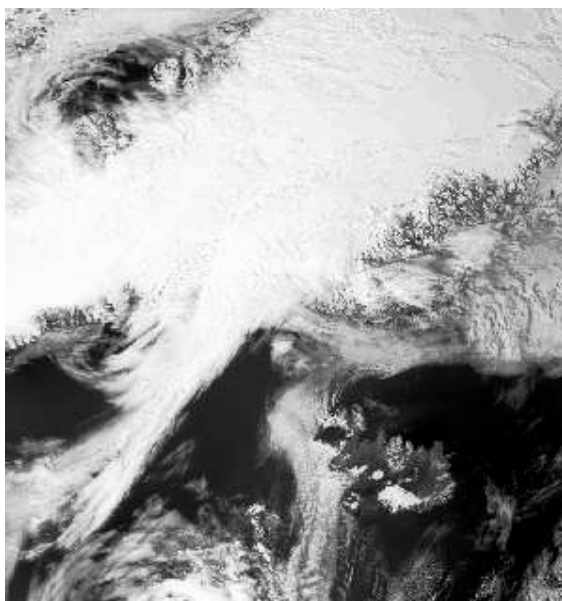
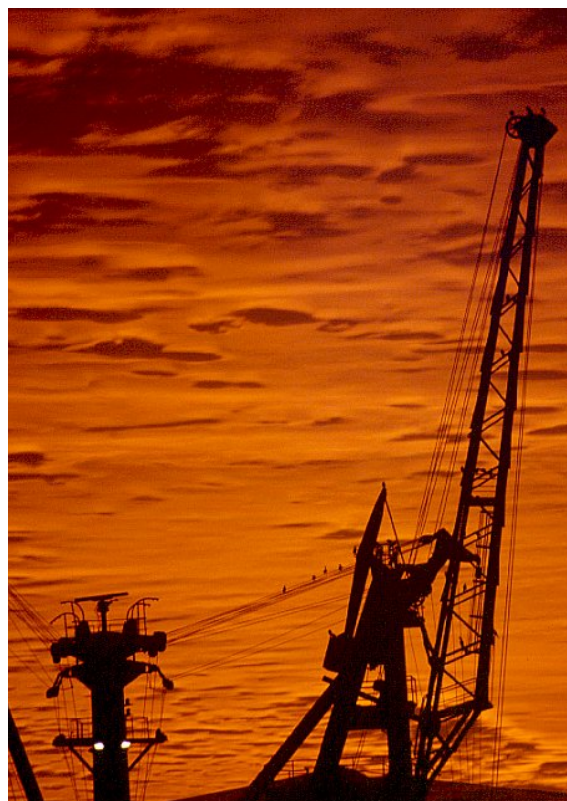


Fig 6: Gletsjers zoals op IJsland en Groenland reflecteren het merendeel van de zonnestraling.

Fig 7 (rechts): 's Avonds moet het zonlicht een langere weg door de atmosfeer afleggen waardoor ook rood licht in sterke mate verstrooid wordt door aërosolen



Een ander voorbeeld is sneeuw. Zichtbaar licht wordt vooral door verse sneeuw in sterke mate gereflecteerd (dit verklaart de witte kleur van sneeuw) en voor een veel kleiner deel geabsorbeerd of doorgelaten. In figuur 6 is een voorbeeld gegeven waarbij de Gletsjers vrijwel alle inkomende straling van de zon reflecteren en daardoor wit afsteken tegen de omgeving. In het infrarode gebied wordt straling door sneeuw in sterke mate geabsorbeerd en uitgezonden en heeft het de eigenschappen van een zwarte straler. Deze voorbeelden zijn bedoeld om te illustreren dat het gedrag van straling t.o.v. een voorwerp afhangt van de materie waaruit het voorwerp is opgebouwd en de golflengte van de straling.

Er kunnen nu een aantal begrippen gedefinieerd worden met betrekking op de karakteristiek van een bepaald voorwerp ten opzicht van inkomende straling.

absorptie-coëfficiënt a_λ : Het gedeelte van de binnenkomende straling met golflengte λ dat door een substantie wordt geabsorbeerd.

reflectie-coëfficiënt r_λ : Het gedeelte van de binnenkomende straling met golflengte λ dat door een substantie wordt gereflecteerd.

doorlaatbaarheids-coëfficiënt d_λ : Het gedeelte van de binnenkomende straling met golflengte λ dat door een substantie wordt doorgelaten.

Wanneer de binnenkomende hoeveelheid straling op 1 wordt gesteld moet gelden:

$$a_\lambda + r_\lambda + d_\lambda = 1$$

Hiermee wordt dus gezegd dat de straling deels wordt geabsorbeerd,

deels wordt gereflecteerd en deels wordt doorgelaten. Duidelijk zal ook zijn dat naarmate een substantie beter absorbeert, een kleiner deel van de straling gereflecteerd wordt of doorgelaten. In figuur 8 staat schematisch weergegeven welke processen er allemaal op kunnen treden wanneer zonnestraling de aardse atmosfeer binnenkomt.

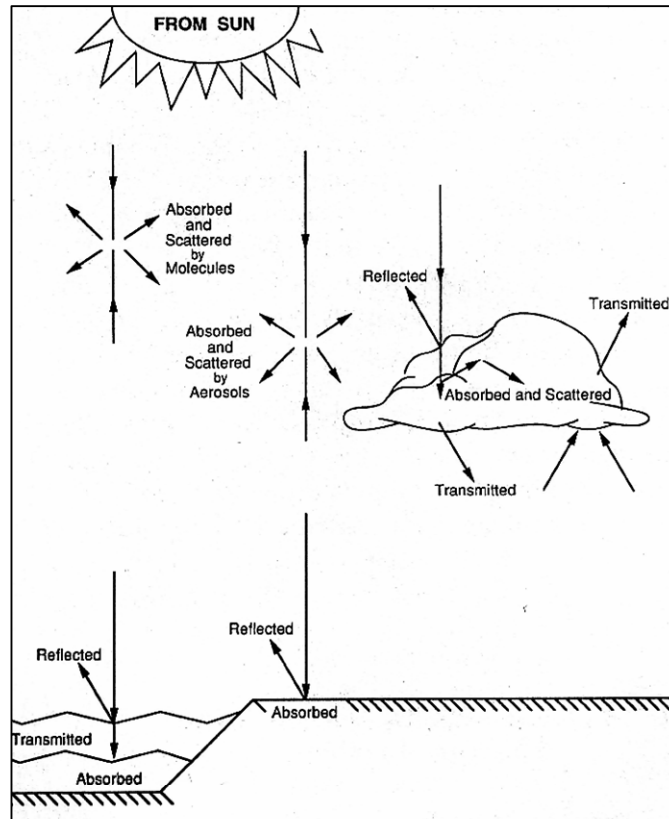


Fig 8: De inkomende zonnestraling wordt door lucht moleculen, aërosolen, wolken en het aardoppervlak geabsorbeerd, verstrooid, gereflecteerd en uitgezonden waarbij er over langer tijd gezien sprake is van een stralingevenwicht.

2.4.2 Wet van Kirchhoff

Volgens de wet van Kirchhoff absorbeert een lichaam even goed als het uitstraalt bij dezelfde golflengte zodat:

$$a_\lambda = \varepsilon_\lambda$$

Dit geldt alleen voor voorwerpen die in lokaal thermodynamisch evenwicht zijn, hetgeen betekent dat de toestand gekarakteriseerd kan worden door één enkele thermodynamische temperatuur. Dit is een redelijke aanname voor de atmosfeer beneden 100 km hoogte. Boven de 100 km zijn botsingen tussen de moleculen zo zeldzaam, dat verschillende chemische stoffen een andere thermodynamische temperatuur hebben. Voor de meeste toepassingen van de satellietmeteorologie kan de aardse atmosfeer als in thermodynamisch evenwicht worden verondersteld.

2.4.3 Emissiviteit

Omdat alle bestaande materie geen perfecte zwarte straler is, moet er een manier gevonden worden om aan te geven hoe goed een bepaalde materie een zwart lichaam benadert. Daarvoor is de emissie-coëfficiënt gedefinieerd: het quotiënt van de straling die daadwerkelijk in een bepaalde golflengte wordt uitgezonden in verhouding tot de uitstraling van een zwarte straler bij dezelfde temperatuur en in dezelfde golflengte

$$\varepsilon_{\lambda} = e_{\lambda} / E_{\lambda}$$

Waarin: $\varepsilon_{\lambda} \sim$ de emissiviteit bij golflengte λ

$e_{\lambda} \sim$ de intensiteit van de daadwerkelijk uitgezonden straling in golflengte λ

$E_{\lambda} \sim$ de intensiteit van de zwarte straler in λ

De emissiviteit heeft altijd een waarde tussen 0 en 1. Emissiviteit is onder meer van belang bij interpretatie van infraroodbeelden. Hier wordt de gemeten intensiteit vertaald naar de temperatuur. Dit gebeurt door gebruik te maken van de wet van Stefan-Boltzman, die geldt voor zwarte stralers. Er moet rekening worden gehouden met het feit, dat het buiten beschouwing laten van de emissiviteit, tot een te lage interpretatie van de temperatuur zou leiden. Rekening houdend met de emissiviteit verandert de wet van Stefan-Boltzmann voor de daadwerkelijke stralingsintensiteit in:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Dus als de stralingsintensiteit is gemeten, volgt de temperatuur uit:

$$T = \sqrt[4]{(E / \varepsilon \sigma)} \text{ (K)}$$

De emissiviteit blijkt sterk af te hangen van de golflengte. Mede daarom wordt bij het maken van IR-beelden in een golflengte-gebied gekeken, waar de emissiviteit zoveel mogelijk tot waarde 1 nadert. En hier doet zich een probleem voor. De emissiviteit (dus de reductie van de stralingsintensiteit) is niet voor alle soorten materie hetzelfde, maar varieert voor verschillende soorten aardoppervlak en bewolking. Er blijkt dus als met één bepaalde emissiviteitswaarde rekening wordt gehouden, sprake te zijn van een fout in de temperatuurbepaling. Het is niet mogelijk om voor deze fout een vaste waarde te geven. De herleide temperatuur kan afhankelijk van het bekeken oppervlak iets te hoog of iets te laag zijn. De gekozen correctie is zodanig dat de temperatuur van de bewolking zo goed mogelijk wordt weergegeven. Daardoor komt onbewolkt



Fig 9: Zonnestraling met een veel kleinere golflengte dan de diameter van regendruppeltjes wordt volgens de brekingswet van Snellius onder een vaststaande hoek gebroken

aardoppervlak te koud over, terwijl bewolking zowel iets te koud als iets te warm kan zijn weergegeven. Meestal is de fout in de temperatuurbepaling in de orde van grootte van enkele graden.

2.5 Absorptie en atmosferische vensters

De mate waarin straling wordt gereflecteerd, geabsorbeerd of doorgelaten wordt hangt af van de golflengte van de straling maar ook van de soort materie waar de straling op valt. Zo laat glas straling met een golflengte in het zichtbare licht door maar absorbeert straling in het infrarode gebied. Steen laat helemaal geen straling door in het zichtbare licht.

In de atmosfeer komen gassen voor die bepaalde golflengtes van straling in het infrarode gebied goed absorberen. Ozon bijvoorbeeld absorbeert straling met een golflengte van ca 9,5 μm vrijwel volledig.

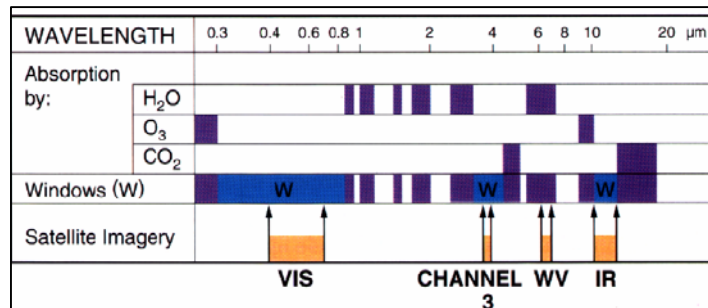


Fig 10: Absorptie van zonnestraling door diverse atmosferische gassen zoals H₂O, CO₂ en O₃ treedt bij verschillende golflengte-intervallen op.

gebied goed absorberen. Ozon bijvoorbeeld absorbeert straling met een golflengte van ca 9,5 μm vrijwel volledig. Waterdamp absorbeert sterk in golflengtes tussen 5 en 8 μm . Andere stoffen absorberen sterk in andere golflengtegebieden. Het gevolg hiervan is dat aardse straling in sommige golflengtegebieden niet ongehinderd de atmosfeer passeert terwijl deze in andere

golflengtegebieden transparant is. In figuur 10 zijn voor drie atmosferische moleculen de golflengte-intervallen aangegeven waar sterke absorptie optreedt. Bij sommige golflengte-intervallen treedt praktisch geen absorptie door de moleculen. Dit worden atmosferische

vensters genoemd. In figuur 11 zijn een tweetal spectra afgebeeld die de zonnestraling weergeven. Het blijkt dat zonnestraling niet volledig ongehinderd de aardse atmosfeer kan passeren. In diverse golflengtegebieden zijn er moleculen aanwezig die de straling absorberen. Dit zijn met name O₃, H₂O, CO₂ en O₂. Dit is in het kortgolvlige deel van het spectrum van levensbelang voor het leven op aarde. De ultraviolette straling heeft namelijk een dermate hoge energie dat deze dierlijk- en plantaardig leven onherstelbaar beschadigt.

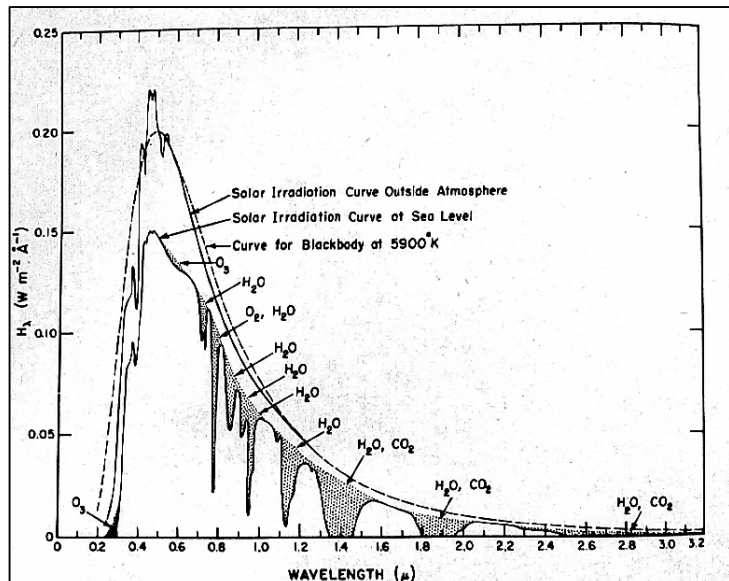


Fig 11: Inkomende kortgolvlige zonnestraling kan niet ongehinderd de aardse atmosfeer doorkruisen. Diverse moleculen van gassen en dampen hebben de eigenschap dat ze straling absorberen

2.6 Verstrooiing

Verstrooiing is het verschijnsel dat de richting van straling wordt veranderd onder invloed van een botsing met de moleculen van het medium waar de straling door valt. Bij verstrooiing gaat de stralingsenergie niet verloren maar wordt in meerdere richtingen verspreid. Het netto-effect hiervan is dat de stralingsbundel in de richting waarvan het zich voortplant verzwakt wordt. Dit is dus met name het geval bij de lichtbundel van de zon. Deze bereikt ook bij een heldere hemel verzwakt het aardoppervlak ten gevolge van verstrooiing. In de aardse atmosfeer komen een groot aantal verschillende stoffen voor die voor verstrooiing zorgen. Zowel zuurstof-, stikstof-, argon-, waterdamp- en koolstofdioxidemoleculen (dit zijn de luchtmoleculen), als wel aërosolen dragen bij aan verstrooiing van zichtbare en infrarode straling. Ook vindt er aan het aardoppervlak een vorm van verstrooiing plaats: reflectie.

De wijze waarop straling wordt verstrooid is zoals voor veel stralingsverschijnselen, in sterke mate afhankelijke van de golflengte van de straling. Ook de golflengte van de straling speelt een belangrijke rol. Om precies te zijn hangt de wijze van verstrooiing af van de verhouding tussen de molecuulgrootte en de golflengte van de straling. In dit verband is het zinvol het verhoudingsgetal α te beschouwen, dat is gedefinieerd als:

$$\alpha = r/\lambda$$

waarbij r de straal van de verstrooiende moleculen en λ de golflengte van de straling is. Er kunnen nu drie vormen van verstrooiing worden gedefinieerd.

Wanneer α groter is dan ongeveer 10 (dit houdt in dat de straal van de verstrooiende moleculen in de orde van 10 maal (of meer) groter is dan die van de golflengte van de straling) zal er verstrooiing volgens de regels van de geometrie plaatsvinden. Er is dan sprake van reflectie.

Als α een waarde tussen 0,1 en 10 aanneemt (dit houdt in dat de verstrooiende moleculen een straal van dezelfde grootteorde hebben als de golflengte) dan vindt verstrooiing plaats op

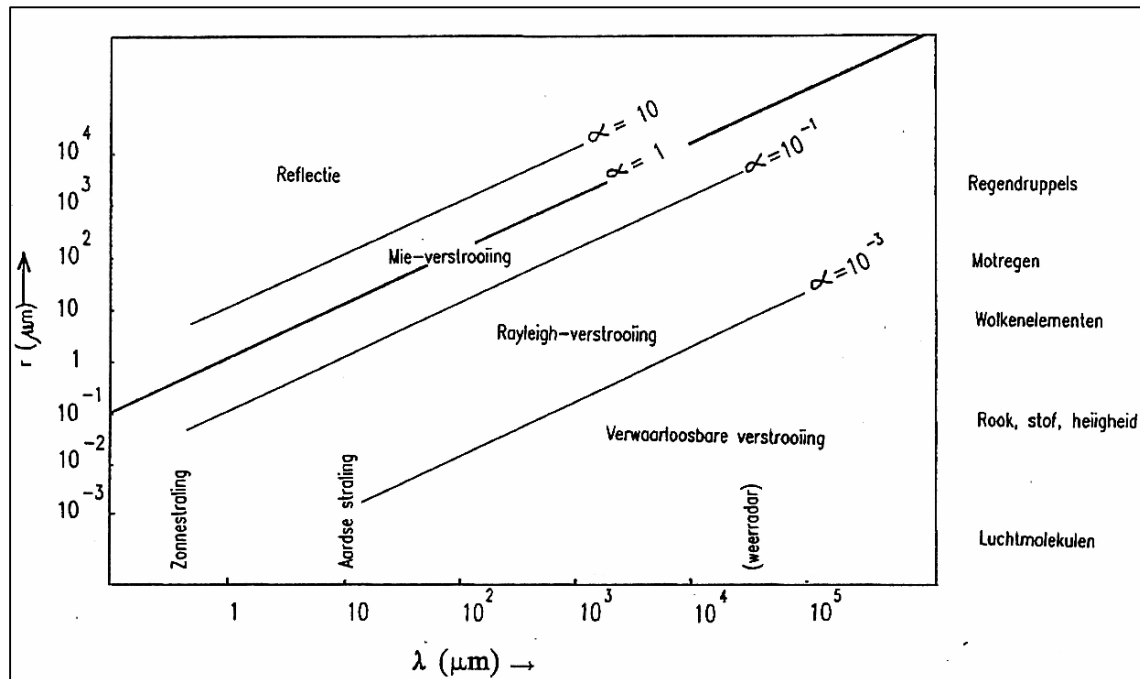


Fig 12: Afhankelijk van de grootte van het deeltje en de golflengte van de straling kunnen er verschillende vormen van reflectie optreden.

een wijze die in het begin van de 19^e eeuw werd beschreven door Gustav Mie. Deze vorm van verstrooiing wordt dan ook Mie-verstrooiing genoemd. Aangezien de hoek waaronder het afbuigen van de straling plaatsvindt in sterke mate afhangt van α , is de ruimtelijke verdeling van de verstrooide straling complex. Kleine veranderingen in de verhouding tussen de straal van de moleculen en de golflengte leveren aanzienlijke veranderingen op in de wijze waarop de straling wordt afgebogen. Voor straling in een golflengteband van beperkte breedte hangt de mate van verstrooiing dus sterk af van de grootte van de straal van de deeltjes in het medium.

Als α een waarde tussen 0,1 en 0,001 (de straal van de verstrooiende moleculen bedraagt slechts een tiende tot een duizendste van de golflengte) dan vindt de verstrooiing plaats op een wijze zoals in de 19^e eeuw door Lord Raleigh werd beschreven. Hij toonde aan dat de straling onder deze omstandigheden op regelmatige wijze wordt verstrooid. Dit betekent dat de straling na verstrooiing, zowel in voor- als achterwaartse richting is afgebogen. Deze vorm van verstrooiing wordt Raleigh-verstrooiing genoemd.

Indien α kleiner is dan 0,001 (de straal van de moleculen in het medium is duizend maal of meer kleiner dan de golflengte) dan is de mate van verstrooiing verwaarloosbaar. In de volgende drie sub-paragrafen worden de verschillende wijzen van verstrooiing gedetailleerd en speciaal met betrekking op de aardse atmosfeer beschreven.

In figuur 12 wordt een relatie gegeven tussen de stralingsgolflengte, grootte van het onderscheppende deeltje en het type reflectie dat optreedt.

2.6.1 Raleigh-verstrooiing

De golflengte van zonnestraling (circa $0.5 \mu\text{m}$) is veel groter dan de afmetingen van de luchtmoleculen (circa $10^{-3} \mu\text{m}$). Hierdoor verstrooien luchtmoleculen zonlicht volgens de wet van Raleigh. Deze wet houdt in dat de mate van verstrooiing omgekeerd evenredig is met de vierde macht van de golflengte. Blauw licht heeft met $0,4 \mu\text{m}$ een kortere golflengte dan rood licht ($0.7 \mu\text{m}$). Hierdoor wordt het blauwe deel van het licht dat afkomstig is van de zon veel sterker verstrooid dan het rode deel. Het voor mensen zichtbare strooiligheid bestaat dus vooral uit fotonen uit het blauwe deel van het stralingspectrum. Dit is de verklaring waarom de hemel op een heldere dag met weinig vuildeeltjes in de lucht blauw is. De aardse infrarood straling die een veel grotere golflengte heeft dan de zonnestraling wordt door de luchtmoleculen vrijwel niet verstrooid. Rook, stof en heiligheid daarentegen zorgen voor Raleigh-verstrooiing van IR-straling



Fig 13: De aanwezigheid van relatief grote aërosolen zorgt voor een uniforme verstrooiing waardoor de hemel een melkachtig uiterlijk krijgt

2.6.2 Mie-verstrooiing

Mie-verstrooiing van zichtbaar licht vindt plaats door de aanwezigheid van rook, stof en zand. Dit zijn aërosolen met een relatief grote straal. Wanneer de verstrooiende deeltjes min of meer even groot zijn, zal het zonlicht een bepaalde tint krijgen. Zowel een roodachtige als een blauwachtige schakering is mogelijk. Meestal zullen de aërosolen echter niet zo'n uniforme opbouw vertonen. In het laatste geval is er sprake van diffuse verstrooiing, waarbij alle golflengtes in het zichtbaar licht in ongeveer even sterke mate worden verstrooid. De hemel krijgt dan in onbewolkte situaties een

melkachtig, wit uiterlijk zoals in figuur 13 is afgebeeld.

Een interessant verschijnsel is verstrooiing van sigarettenrook. Deze is, indien ze direct komt van een brandende sigaret, blauw van kleur. Dit betekent dus dat het dan om zeer kleine deeltjes gaat. Uitgeademde sigarettenrook is soms wit. Dat komt omdat de deeltjes waterdamp aantrekken en daardoor groeien. De deeltjes krijgen een klein waterhuidje. Een vergelijkbaar proces treedt ook in de atmosfeer op bij stofdeeltjes, die groeien in vochtige, nog onverzadigde lucht. Daardoor is de vochtige lucht vaak minder blauw.

2.6.3 Lichtbreking en reflectie

Indien de moleculen groot zijn ten opzichte van de golflengte van de straling die er op valt, vindt reflectie plaats.

Regen-, wolk- en dauwdruppeltjes zijn veel groter dan de golflengte van zichtbaar licht. Zonnestrallen worden daarom gebroken door deze druppels volgens de wetten van de geometrische optica (bijvoorbeeld volgens de wet van Snellius). Omdat de brekingsindex van water golflengteafhankelijk is treedt hierbij kleurschifting op. De druppels gedragen zich vergelijkbaar met een prisma. Dit verklaart het voorkomen van regenbogen tijdens regen en de prachtige kleuren, die we 's morgens vroeg in een bedauwd veld kunnen waarnemen. Ook kan zonlicht worden gebroken door ijsdeeltjes. Dit veroorzaakt verschijnselen als halo's (kringen om de zon of de maan) en bijzonnen zoals in figuur 14.

We hadden het in het begin van deze paragraaf al even over reflectie. Bij waterdruppeltjes is het dus zo dat afhankelijk van de invalhoek van zonnestraling een wisselend deel wordt doorgelaten waarbij breking optreedt. Het overige deel wordt gereflecteerd. Andere deeltjes

die ondoorzichtig zijn voor lichtstraling reflecteren en absorberen alleen. De mate van reflectie is afhankelijk van het albedo van de reflecterende materie. De albedo is een grootheid die aangeeft welk deel van de invallende zonnestraling (zonder absorptie) naar de ruimte wordt gereflecteerd. Behalve van de golflengte van de invallende straling blijkt de albedo in sterke mate af te hangen van de aard van het reflecterend materiaal.

In tabel 1 op de volgende bladzijde wordt het albedo van een aantal verschillende oppervlakken voor zichtbaar licht gegeven. Het blijkt dat er nog al een breed spectrum mogelijk is van albedowaarden waarbij de werkelijke reflectie sterk afhangt van de zonnestand en de geardeheid van het oppervlak. Bij sneeuw speelt ook de ouderdom een grote rol. Over het albedo van de diverse wolkensoorten is niks vermeld in de tabel. Deze wordt behandeld in het hoofdstuk waar de interpretatie van de wolkentypen aan de orde komt. Wel kan hier al worden opgemerkt dat bij wolkenelementen geen sprake is van een sterke golflengteafhankelijkheid voor wat betreft de reflectie van zichtbaar licht. Al het licht wordt in dezelfde mate gereflecteerd, reden waarom bewolking wit is.



Fig 14: Wanneer er zich in de koude hoge luchtlagen ijsdeeltjes bevinden kan breking plaats vinden die voor de verschillende golflengten van zichtbaar licht een vaststaande hoek heeft.

Soort oppervlak	albedo
Onbegroeide aarde (modder)	10-25
Zandgrond/woestijn	25-40
Gras	15-25
Bos	10-20
Sneeuw (schoon/droog)	75-95
Sneeuw (vies/nat)	25-75
Zeeoppervlak (zon meer dan 25 ^o boven de horizon)	<10
Zeeoppervlak (lage zonnestand)	10-70

Tabel 1: De albedo in % van zonnestraling met betrekking tot diverse soorten van oppervlakken