

# Een opmerkelijke zonsondergang in Normandië

Werner POETS

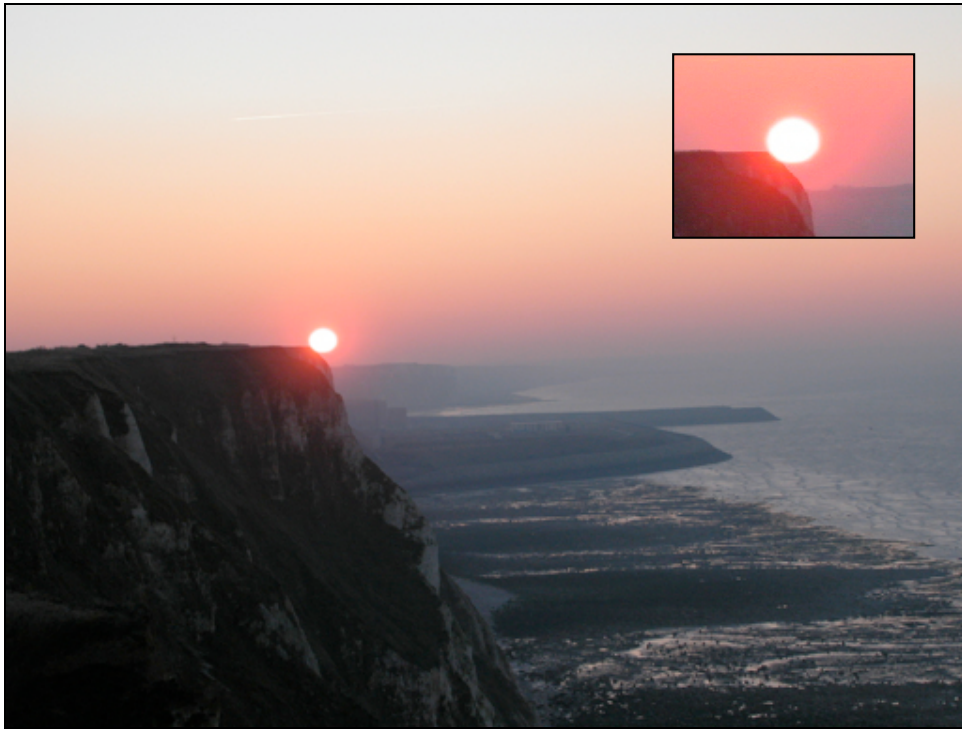
## 1. De waarneming

We hadden voor de kerstvakantie een vakantiehuisje gehuurd in Biville-sur-Mer. Een klein plaatsje in Normandië. Ons vakantiehuisje lag op 500 meter van de krijtrotsen die een scheiding vormen tussen het vasteland en de zee. Ik had dit reeds voor onze aankomst opgemerkt via Google Earth (zie Fig. 1).

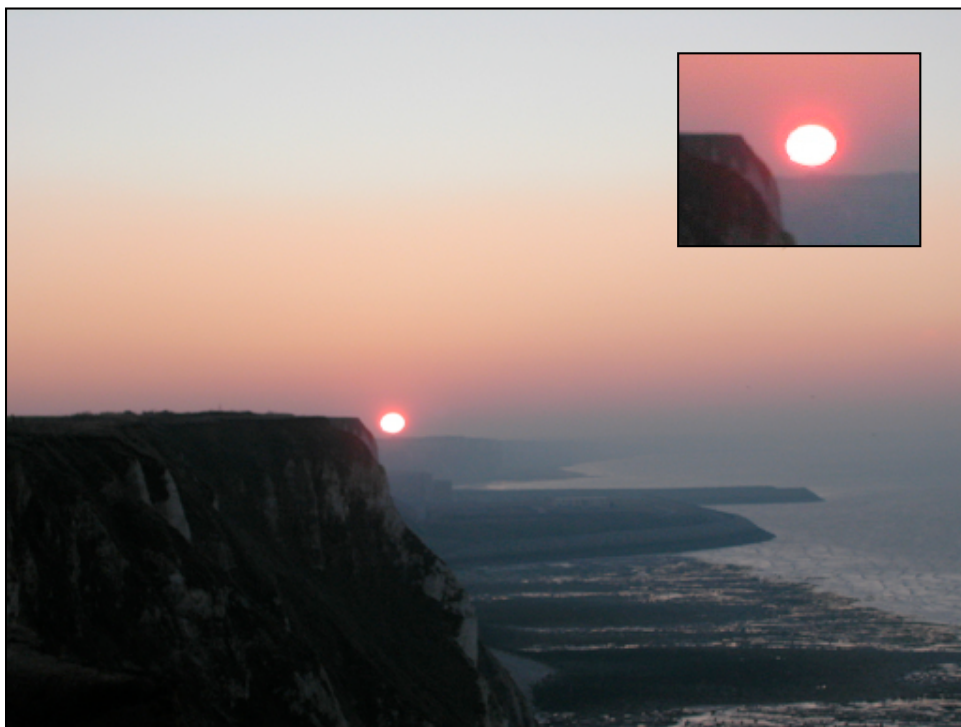


Fig. 1: Locatie van de waarnemingsplaats. Bemerkt in het midden de kustlijn de elektronnucleaire installatie van Penly.

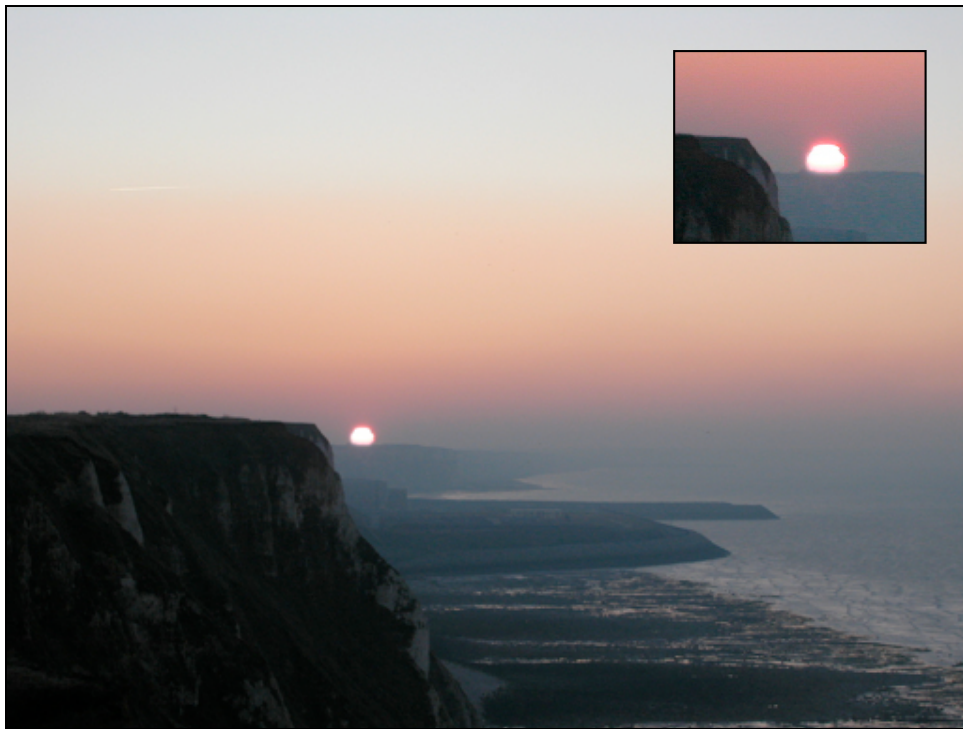
Heel de reis was er geen wolkje aan de lucht en dat bleef zo de dagen nadien. We kwamen op 27 december 2008 op onze bestemming aan om kwart voor vier. Nadat we onze bagage hadden uitgepakt gingen we op weg naar de kust om de zonsondergang te zien. We reden met de wagen naar de kust via een klein weggetje "Route de Mer". Aan een slagboom lieten we de wagen staan en wandelden verder naar de kust. Er was een deel van de krijtrots dat iets meer vooruitsprong ten opzichte van de rots in de onmiddellijke omgeving. Vanaf deze plaats ( $49^{\circ} 59' 44,20''$  N  $1^{\circ} 14' 41,34''$  O) hadden we een goed zicht in de zuidwestelijke richting. De hoogte van deze plaats boven de zeespiegel bedraagt volgens Google Earth 62 meter. We waren op post om 16 h 45 min lokale tijd. Het was behoorlijk fris, de temperatuur lag rond het vriespunt, maar ons geduld zou beloond worden. Nog voor een deel van de zon achter de kim verdween, viel op dat de bolvorm (zie Fig. 2) van de zon wijzigde in een ovaal (zie Fig. 3). De onderzijde van de zon had een rode kleur terwijl het bovenste deel oranje was. De zon ging onder om 15 h 54 min (UT). De horizon ter hoogte waar de zon onderging werd belemmerd door het vooruitstekend stuk krijtrots ter hoogte van Berneval-sur-Mer (zie Fig. 1). Deze krijtrots bevindt zich, ten opzichte van de waarnemingsplaats, op een afstand van 5,5 km. De hoogte van de krijtrots aldaar neemt toe van 70 m aan de kustlijn tot 100 m ter hoogte van het dorp.



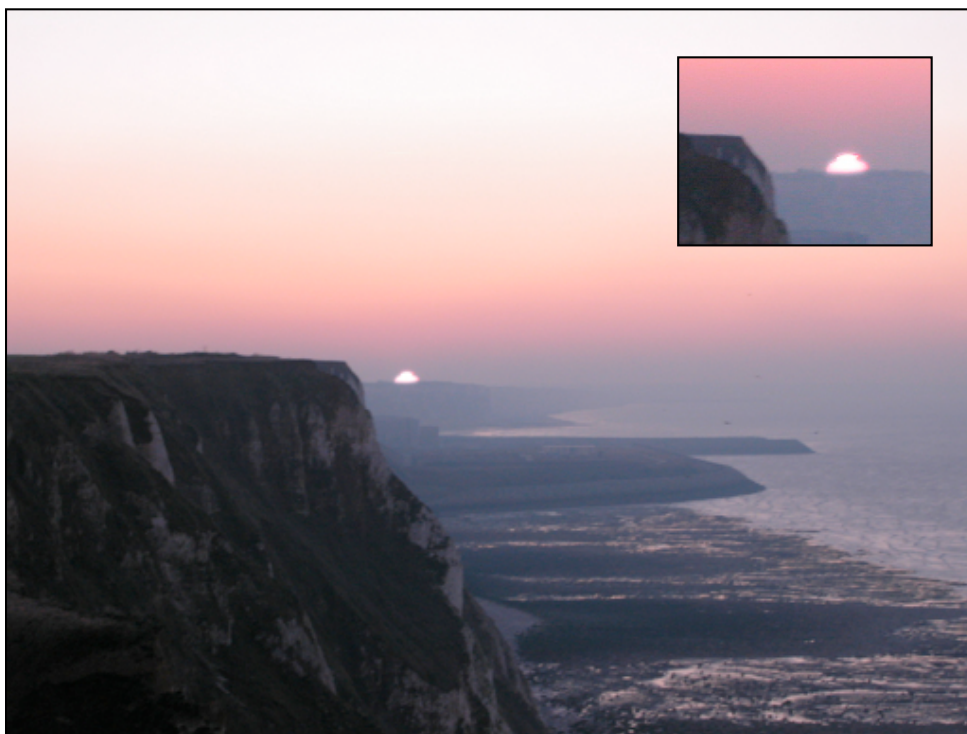
*Fig. 2 De zon om 15 h 51 min UT*



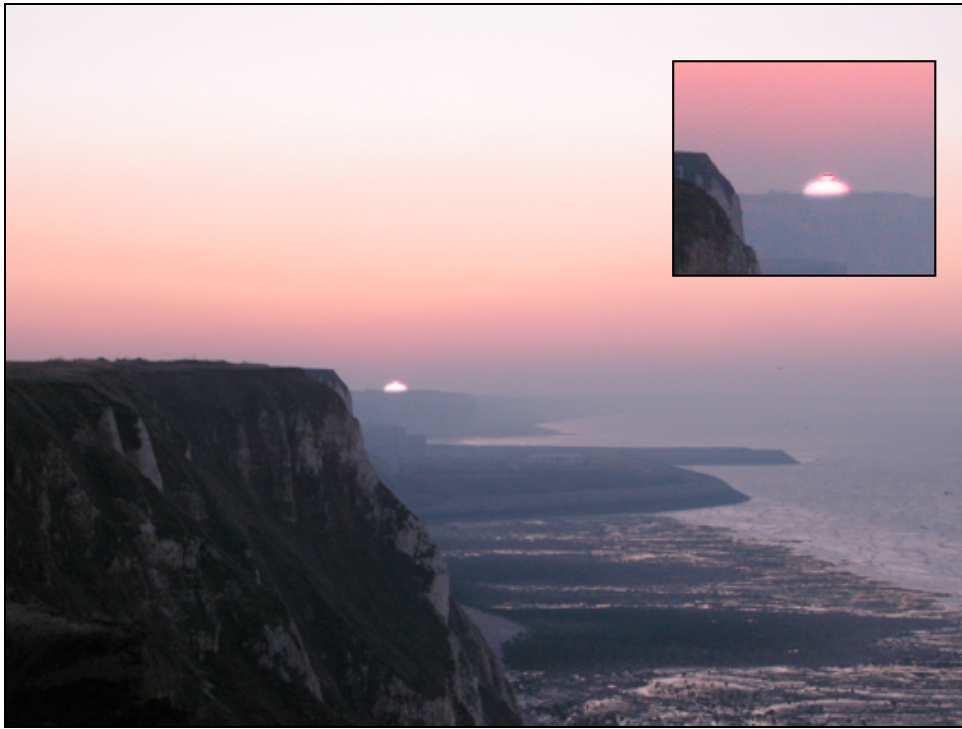
*Fig. 3 De zon om 15 h 54 min UT*



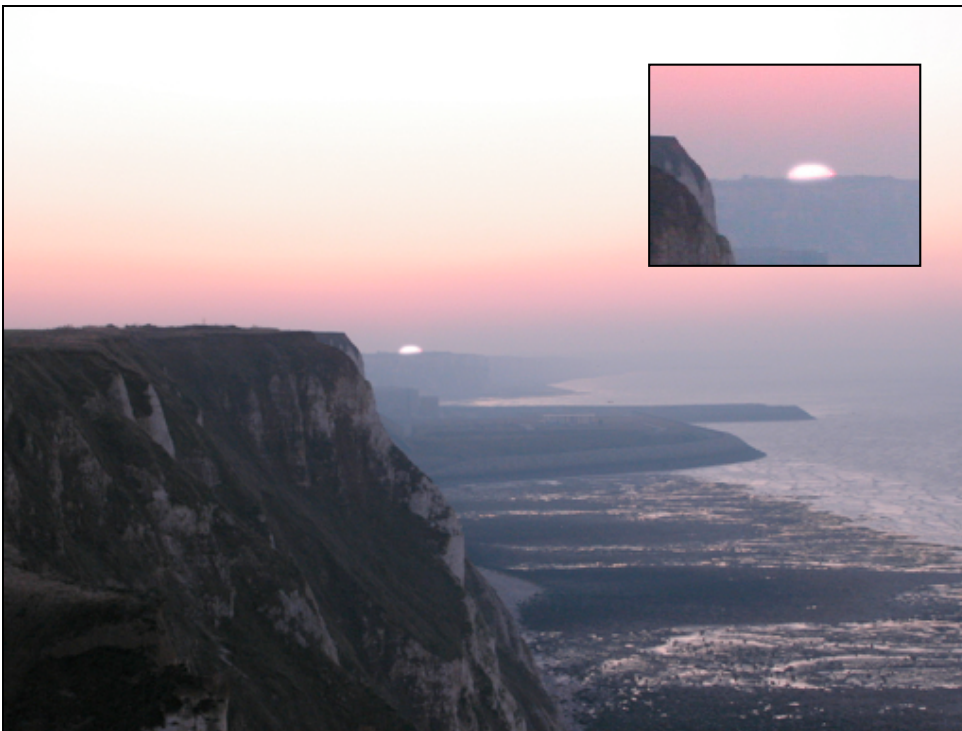
*Fig. 4 om 15 h 56 min UT*



*Fig. 5 om 15 h 57 min UT*



*Fig. 6 om 15 h 57 min UT*



*Fig. 7 om 15 h 58 min UT*

---

Ongeveer op het moment dat een deel van de zon achter de horizon verdween, werd de bovenzijde van de zon in de verticale richting uitgetrokken en in de horizontale richting afgeplat (zie Fig. 4). Dit bovenste gedeelte van de zon werd alsmaar smaller (zie Fig. 5).

Toen dit bovenste deel zeer smal was geworden, werd het afgesnoerd van de rest van de zon (zie Fig. 6). Dit klein stukje zon werd uiteindelijk zo klein dat het niet meer zichtbaar was. Kort nadien zonk de rest van het zichtbare deel van de zon weg achter de horizon (zie Fig. 7). Om 15 h 58 m (UT) was de zonsondergang afgelopen.

Visueel waren deze vormveranderingen nog duidelijker en meer afgelijnd dan op de foto's. Het hele spektakel oogde buitengewoon omdat de vormveranderingen elkaar snel opvolgden. Drie van deze foto's kan men in kleur bekijken in het maartnummer van "Heelal" onder de rubriek "actief en creatief".

Nadien hebben we nog drie maal onder goede omstandigheden de zon zien ondergaan, ondermeer op dezelfde plaats, zonder deze merkwaardige vormveranderingen te hebben kunnen waarnemen.

## 2. Verschijnselen bij een zonsondergang

Omdat bij een zonsondergang of een zonsopkomst het licht, afkomstig van de zon, een lange weg dient af te leggen door de atmosfeer, treden er een aantal verschijnselen die dan visueel op te merken zijn. Deze verschijnselen zijn de schijnbare elevatie van de zon, de afplating van de zon, de rodere kleur van de zon en, uitzonderlijk, de vormverandering van de zon. Deze verschijnselen worden hieronder behandeld.

### 2.1 De schijnbare elevatie van de zon

Een toepassing van het principe van Fermat is het verschijnsel dat men de zon in een hogere stand ziet dan de positie die de zon zou in nemen mocht er geen atmosfeer zijn. Dit verschijnsel is het meest uitgesproken als de zon zich dicht of zelfs net onder de geometrische horizon<sup>1</sup> bevindt. De grootte van dit positieverschil bedraagt dan ongeveer<sup>2</sup> 0,5° wat ongeveer overeenkomt met de hoekdiameter van de zon. Op die manier kan men bij zonsondergang de zon langer zien dan wanneer er geen atmosfeer zou zijn.

Dit is te verklaren als volgt. De brekingsindex van de lucht in de atmosfeer is niet overal hetzelfde. De brekingsindex van lucht neemt toe met de soortelijke dichtheid. De soortelijke dichtheid is evenredig met de luchtdruk en is omgekeerd evenredig met de temperatuur. In de

---

<sup>1</sup> Dit is de horizon die een waarnemer zou zien, bij een onbelemmerd zicht, mocht er geen atmosfeer zijn.

<sup>2</sup> Bij ongewone atmosferische omstandigheden, m.b.t. temperatuur, luchtdruk en relatieve vochtigheid, kan dit hoekverschil 2° tot 5° bedragen. Dit wordt het Novaya Zemlya effect genoemd omdat het daar voor het eerst werd waargenomen.

meeste gevallen neemt de temperatuur en de druk af naarmate men zich van het aardoppervlak verwijdert. Grofweg daalt de soortelijke dichtheid als de hoogte toeneemt. Dus op grotere hoogte is er een kleinere brekingsindex. De stralen zullen zich niet recht door de atmosfeer voortplanten omdat dan het licht te veel door luchtlagen dicht bij het aardoppervlak zou gaan waar de snelheid van het licht lager is dan in de bovenste delen van de atmosfeer. Volgens het principe van Fermat neemt het licht de weg met de minste reistijd. Het gevolg daarvan is dat de zonnestrallen gekromd zullen zijn zodat het licht een deel van zijn weg aflegt in hoger gelegen delen van de atmosfeer waar de snelheid van het licht hoger is. Op deze manier kan het zonlicht een waarnemer toch bereiken zelfs als de zon eigenlijk achter de horizon verdwenen is.

## 2.2 Afgeplatte vorm van de zon

De afplatting bedraagt ongeveer 20% ten opzichte van de cirkelvorm voor een normaal atmosferisch temperatuurprofiel en een waarnemer dicht bij de zeespiegel. Het varieert met de atmosferische omstandigheden, met name wanneer er abnormale temperatuursgradiënten zijn. Vanuit een vliegtuig kan de afplatting groter lijken.

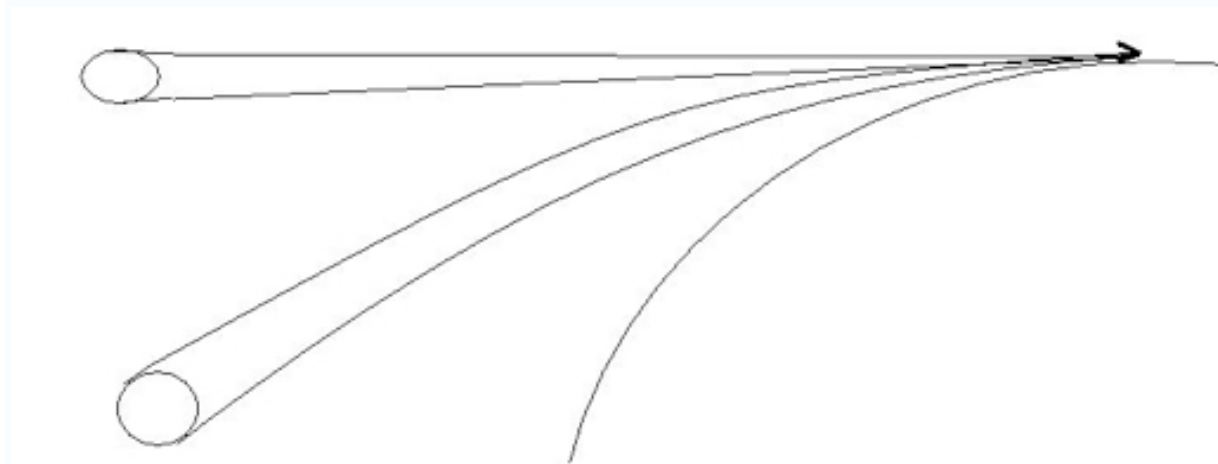


Fig. 8: Waarom de zon een afgeplatte vorm heeft als we ze dicht bij de horizon waarnemen.

Dit verschijnsel kan verklaard worden doordat de lichtstralen van de onderzijde van de zon sterker worden afgebogen dan de lichtstralen afkomstig van de bovenzijde van de zon. Zie Fig. 8. De lichtstralen afkomstig van de onderzijde van de zon dienen door meer lucht te bewegen en zullen, overeenkomstig het principe van Fermat, er relatief meer baat bijhebben om door de hogere ijle lagen van de atmosfeer te bewegen om hun reistijd te minimaliseren. Bijgevolg zullen deze stralen meer gebogen zijn. Het gevolg is dat de hoek die wordt waargenomen tussen de lichtstralen afkomstig van de onderzijde en de bovenzijde van de zon kleiner zal zijn dan in het geval er geen atmosfeer zou zijn. De lichtstralen afkomstig van de linker en de rechterzijde van de zon zullen op een onderling vergelijkbare manier afgebogen worden zodat de vorm van de zon in zijn totaliteit als een ovaal wordt waargenomen.

## 2.3 Rode kleur van de zon

De kleur van de zon als deze hoog aan de hemel staat lijkt geel te zijn. Als de zon dicht bij de horizon staat dan lijkt de kleur van de zon meer oranje of zelfs rood. Dit is een gevolg van een verschijnsel dat verstrooiing wordt genoemd.

---

Verstrooiing van het licht wordt veroorzaakt door de moleculen in de lucht. Deze moleculen zijn elektrisch neutraal maar bestaan uit positieve kernen en negatieve elektronen. Licht zijn wisselende elektro-magnetische velden. Wanneer licht afkomstig uit een bepaalde richting, bijvoorbeeld uit de richting waar de zon staat, in interactie treedt met de moleculen waaruit de lucht bestaat dan komen de positieve en negatieve ladingen in beweging<sup>3</sup>. De ladingen worden a.h.w. uit elkaar getrokken, en er ontstaan kleine dipolen die zullen trillen in het ritme van de wisselingen van de velden. En doordat ze nu zelf als een zend-antenne gaan werken, zenden ze licht uit met precies dezelfde frequentie (dus dezelfde kleur), als het oorspronkelijke licht. Het verschil is dat dit uitgezonden licht nu wel alle kanten op gaat. Het resultaat is dus dat licht door de lucht wordt verstrooid.

Voor moleculen en kleine stofdeeltjes is de verstrooiingsintensiteit omgekeerd evenredig met de vierde macht van de golflengte. En omdat blauw een veel kleinere golflengte heeft dan rood (dat scheelt bijna een factor 2), is de verstrooiing daarvan veel sterker dan van rood (dus bijna een factor 16). Dit verstrooiingseffect lijkt het sterkst voor blauwlicht<sup>4</sup> vandaar dat op een onbewolkte dag de lucht een blauwe kleur heeft. Dit blauw licht is dus zonlicht dat zonder atmosfeer ons oog niet zou bereiken. Door de aanwezigheid van lucht wordt dit zonlicht verstrooid in alle richtingen en bereikt het ons oog. Deze verstrooiing gebeurt voor alle kleuren uit het zonnenspectrum maar is het sterkst voor kleuren met een kortere golflengte.

De kleur van de zon waargenomen aan het aardoppervlak zal dus enigszins verschillen met de kleur van de zon als men deze in de ruimte zou waarnemen. De kortere golflengten zullen dus qua intensiteit minder vertegenwoordigd zijn in het zonnenspectrum van de zon dat waargenomen aan het aardoppervlak dan wanneer dit wordt waargenomen vanuit de ruimte. Dit effect zal het sterkst zijn naarmate het zonlicht zich langer door lucht verplaatst. Als de zon laag bij de horizon staat wordt de luchtlaag waar de straling doorheen moet erg dik, en dus de verstrooiing erg groot. Het blauwe licht zal er nu bijna niet meer doorkomen: het wordt alle kanten op verstrooid. Het rode deel van het spectrum wordt weinig verstrooid, gaat gewoon rechtdoor, en zorgt zo voor de prachtige oranje rode kleur van de ondergaande zon.

## 2.4 Vormverandering

### 2.4.1 Temperatuursinversie

Vormveranderingen zijn eerder zeldzaam. Hiervoor is temperatuursinversie vereist in de atmosfeer die voldoende uitgesproken is. In het onderste deel van de atmosfeer, de troposfeer, neemt de temperatuur in het algemeen af met de hoogte. De mate waarin de temperatuur daalt is gemiddeld 6°C per km. Maar af en toe doet zich een situatie voor dat boven een koude luchtlaag die aan het aardoppervlak grenst, een warmere luchtlaag ligt. Dit noemt men een temperatuursinversie.

---

<sup>3</sup> Men kan dit vergelijken met het bewegen van de elektronen in een antenne wanneer deze in interactie treedt met een passerende radiogolf, wat ook wisselende elektromagnetische velden zijn zij het met langere golflengten dan deze van licht.

<sup>4</sup> De verstrooiing in het zichtbare deel van het elektromagnetische spectrum is het sterkst voor violet. Het menselijk oog is echter weinig gevoelig voor violet licht zodat het verstrooide blauwe licht door ons oog als het sterkst wordt ervaren.

Op de hoogte waar een inversie aanwezig is, is de temperatuursopbouw over korte afstand juist even omgekeerd: een aantal tientallen meters hoger is het beduidend warmer in plaats van iets kouder. Een mogelijke soort van temperatuursinversie is de subsidentie-inversie.

Een subsidentie-inversie ontstaat vlakbij of onder de kern van een hogedrukgebied. In een hogedrukgebied daalt de lucht. De koude lucht van op grote hoogte, die daalt in een hogedrukgebied, warmt op, met ongeveer 1 °C per 100 m. Op een bepaalde hoogte zal op die manier de lucht warmer worden dan de lucht die zich eronder bevindt. Op die hoogte vinden we dus een inversie, meer bepaald een subsidentie-inversie. Door de rustige nachten die bij hogedrukgebieden voorkomen, koelt de onderste laag door uitstraling, echter steeds verder af. Hierdoor ontstaat een sterker temperatuurcontrast met de hoogte. Vermoedelijk deed zich een subsidentie-inversie voor toen we de vorm van de zon zagen veranderen tijdens het ondergaan (zie Fig. 9).

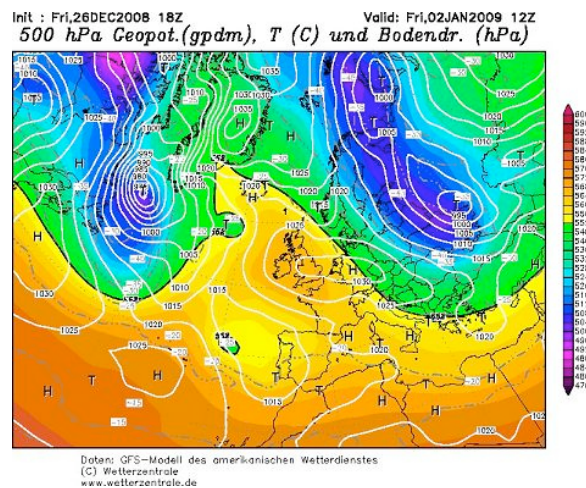


Fig. 9: Ligging hogedrukgebied op 26 december 2008.

#### 2.4.2 Temperatuursinversie op 27 december 2008

Volgens de ballonwaarneming vanuit Trappes (zie <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html> stationnummer 07145) om 12 h 00 UT, 27 december 2008, trad er tussen een hoogte van 745 m en 989 m een temperatuurstoename op van 9,7 °C (zie Fig. 10). Dit is een gemiddelde temperatuurgradiënt van 4,0 °C/100 m. Zo een sterke temperatuursinversie zorgt ervoor dat de stralengang van de verschillende delen van de zon een ander pad nemen in de atmosfeer waardoor de schijnbare vorm van de zon wijzigt. Naarmate de positie van de zon wijzigt, wijzigen ook de vorm van de lichtbanen door de atmosfeer en hun relatieve positie wat zichtbaar is als schijnbare vormveranderingen.



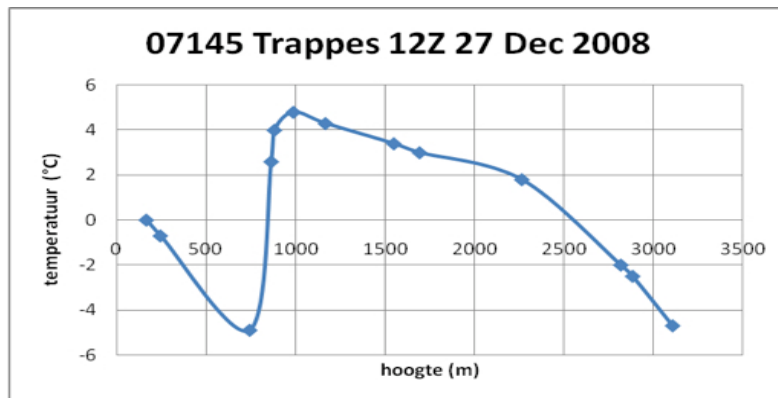


Fig. 10: Temperatuur als functie van de hoogte gemeten door een weerballon opgelaten te Trappes op 27 december 2008 om 12 UT.

### 2.4.3 Temperatuursinversie op 31 december 2008

Op 31 december hebben we, eveneens bij een onbewolkte hemel, op deze zelfde plaats de zonsondergang waargenomen. Hierbij werden er, buiten de ovaal vorm, geen opmerkelijke vormveranderingen van de zon waargenomen. Volgens de ballonwaarneming van 07145 Trappes om op deze dag trad er tussen een hoogte van 504 m en 836 m een temperatuurstoename op van 1,7 °C (zie Fig. 11). Dit is een gemiddelde temperatuurgradiënt van 0,5 °C/100 m. Er was dus ook een temperatuursinversie maar deze was veel minder uitgesproken dan op 27 december.

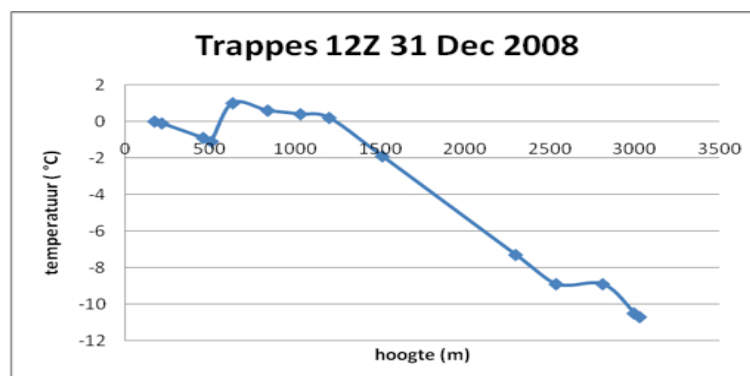


Fig. 11: Temperatuur als functie van de hoogte gemeten door een weerballon opgelaten te Trappes op 31 december 2008 om 12 UT.

---

#### 2.4.4 Verklaring van de vormverandering op 27 december 2008

De sterke temperatuursinversie op 27 december veroorzaakte een discontinuïteit in de dichtheid van de lucht en dus ook in de brekingsindex. Hierdoor ontstond er een discontinuïteit in het beeld van de zon. Dit is goed te zien op de figuren 4, 5 en 6.

De lichtstralen gingen door de temperatuursinversielaag op een afstand van ongeveer 100 km van de waarnemingsplaats. Deze afstand kan men schatten op basis van het feit dat de inversielaag zich ongeveer op  $0,5^\circ$  boven de horizon bevond dat de dikte van de temperatuursinversielaag ongeveer  $0,1^\circ$  bedroeg. De hoek die een raaklijn met de inversielaag op deze afstand tot de waarnemer maakte met de lokale horizon van de waarnemer bedroeg ongeveer  $0,87^\circ$ .

De lichtstralen zullen zich niet rechtdoor de temperatuursinversielaag voortgeplant hebben maar zullen iets naar boven afgebogen zijn om de reisweg door de temperatuursinversielaag te vergroten om zo de reistijd te minimaliseren. De lichtstralen die het oog van de waarnemer bereikten, vertrokken dus van een hogere hoogte dan wanneer de temperatuursinversielaag er niet was geweest. Hierdoor zag men er allerlei vormen bovenop de normale vorm van de zon gesuperponeerd. Op Fig. 4 ziet men dat, horizontaal bekeken, het breedste deel van de zon door de temperatuursinversielaag laag ging wat aanleiding gaf tot de breedste superpositiestructuur. Op het moment van de opname die als Fig. 5 weergegeven is deze superpositiestructuur smaller geworden. Op Fig. 6 ziet men dat de bovenste top van de zon ongeveer  $0,1^\circ$  zichtbaar was boven de rest van wat zichtbaar was van de zon. Toen de zon verder zakte waren er geen vormveranderingen meer te zien omdat er geen lichtstralen door de temperatuursinversielaag bewogen, althans gezien vanuit onze waarnemingsplaats toen.

#### 2.5 Conclusie

Als men de gelegenheid heeft om een zonsondergang of zonsopgang te bekijken op een plaats waar men een vrij zicht heeft op de lokale horizon dan is het zeker aan te raden om dit te doen en zich te voorzien van een foto toestel op een statief.

Werner POETS