

Meting van de  
luminantie van  
de hemel.



## De zonsverduistering in Turkije van 29 maart 2006 Het licht tijdens het verloop van de verduistering

Janneke van der Weerd, Remy Wenmaekers en Martin de Wit\*

**Een groep studenten en docenten van de Technische Universiteit Eindhoven keek in Turkije met wetenschappelijke ogen naar de totale zonsverduistering van 29 maart 2006. Het verloop van de verlichtingssterkte en de spectrale verdeling van zonlicht bieden een onverwachte kijk op het verschijnsel. Spreekt het oog wel de waarheid?**

\* Janneke van der Weerd studeert momenteel af aan de TU Eindhoven bij de master Physics of the Built Environment. Remy Wenmaekers is pas afgestudeerd aan dezelfde opleiding en sinds enkele maanden werkzaam als (zaal)akoestisch onderzoeker/adviseur (bij Level Acoustics bv). Martin de Wit is hoogleraar aan de faculteit bouwkunde van de TU/e. Meer informatie over de meetexpeditie is te vinden op de website van studievereniging Flux: [www.bwk.tue.nl/flux](http://www.bwk.tue.nl/flux).

**V**eertien studenten en drie docenten bouwfysica van de capaciteitsgroep BPS van de Technische Universiteit Eindhoven waren op het moment van de zonsverduistering op meetexpeditie in de Turkse streek Cappadocië. Het doel van de meetexpeditie was het doen van bouwfysisch onderzoek, op het gebied van licht, klimaat en geluid, onder bijzondere omstandigheden. Bijzonder aan de streek Cappadocië is het sprookjesachtige landschap van vulkanisch gesteente. Door erosie van dit zachte tufsteen is er een landschap van valleien en rotspartijen ontstaan. In deze rotsen zijn woningen en zelfs hele steden uitgehakt en bewoonbaar gemaakt. Interessant voor deze expeditie was het achterhalen van de bouwfysische kwaliteit van deze woningen en steden, zoals het ventilatiesysteem en de geluidsoverdracht binnen de ondergrondse stad Derinkuyu.

Een spectaculair verschijnsel als de zonsverduistering konden de bouwfysici niet zomaar aan zich voorbij laten gaan. Vandaar dat één van de vijf onderzoeksgroepen zich heeft toegelegd op onderzoek van de zonsverduis-

tering. Doel van dit onderzoek was een verband te leggen tussen zintuiglijke belevingen, waarover al veel geschreven is, en objectieve waarnemingen – een thema dat centraal staat in de bouwfysica. Hier toe is met medewerking van de gehele groep een groot aantal metingen verricht.

### **Beleving versus meting**

De weersomstandigheden op 29 maart waren, net als de dag ervoor, uitstekend: een onbewolkte heldere hemel en een temperatuur van 18°C. Om 11 uur lokale tijd waren drie lokaties in het gebied bemand om metingen uit te voeren. De verduistering zette om 13.00 uur in, totdat om 14.03 uur de totaliteit bereikt was. Op een heuvel, in een stad en in een dierrijke vallei zijn metingen verricht. Enkele expeditieleden deden waarnemingen en maakten foto's. Tevens was er enkele dagen rondom de zonsverduistering op de heuvel een boom ingericht als meetstation.

In de tijd na het eerste contact, het moment waarop de maan de zon 'raakt', werd het voelbaar kouder. Metin-

gen lieten zien dat gedurende de verduistering de luchttemperatuur, op twee meter boven de grond, uiteindelijk met 4°C daalde. Voor je gevoel wordt het echter veel kouder. Dit komt doordat ook de zonnestraling bijdraagt aan de thermische behaaglijkheid. De afname van de gevoelstemperatuur hangt dus samen met zowel de afname van luchttemperatuur als de afname van de zonnestraling.

De luchttemperatuur vlak bij de aarde, op een hoogte van twintig centimeter, daalde het meest: met 8°C. Dit komt doordat de afname van de zonnestraling zorgt voor een daling van de oppervlaktetemperatuur van de aarde en daarmee een sterkere daling van de luchttemperatuur er vlak boven.

Tegelijk met het inzetten van de temperatuurdaling, direct na het eerste contact, daalde ook de verlichtingssterkte. Pas na ongeveer een half uur was deze lichtafname voor het oog zichtbaar. Dit heeft te maken met de adaptatie van het oog. Het oog kan zich aanpassen aan de hoeveelheid aangeboden licht, waardoor tot een bepaalde grens gelijkmatige veranderingen in verlichtingssterkte niet opgemerkt worden. Andersom kan hiermee ook verklaard worden waarom het licht vlak na de totaliteit alweer gewoon leek, terwijl de verlichtingssterkte op dat moment nog erg laag was.

Voor ons oog werd de kleur van het landschap bij het dieper worden van de gedeeltelijke fase, blauwgrijs van tint. Maar de gemeten kleurtemperatuur daalde, wat juist duidt op een roodere spectrumverdeling van de lichtinval (zie beneden). Net als bij de waarneming van de verlichtingssterkte vindt bij de waarneming van kleur adaptatie plaats, waarbij het oog zich instelt op de gemiddelde kleur van het visuele veld. Door deze adaptatie lijken voorwerpen hun kleur te behouden, ook als de kleur van de lichtinval zich wijzigt. Bij zonsondergang gaat kleuradaptatie hand in hand met adaptatie in intensiteit. Bij de zonsverduistering reageert het oog als bij zonsondergang. Het landschap kleurt echter niet zo rood zoals bij een zonsondergang, het oog past zich niet juist aan waardoor de visuele kleurindruk verandert.

Naarmate de totaliteit dichterbij kwam, maakte de natuur zich klaar voor de nacht. Bijen stopten met zoemen, vogels stopten met fluiten, vliegen verdwenen. De mens daarentegen verzamelde zich met groepen bij elkaar op hooggelegen plaatsen en slaakten kreten van verrukking. Alles bij elkaar lieten de metingen van het achtergrondgeluidniveau in de diertjike vallei, met een gemiddelde van 25 dB(A), tijdens de totaliteit echter een duidelijke daling van 5 dB(A) zien. Boven op een heuvel, waar een achtergrondgeluidniveau heerste van gemiddeld 35 dB(A), zorgde het gejuich in de verte tijdens de totaliteit voor een niveau van 50 dB(A).

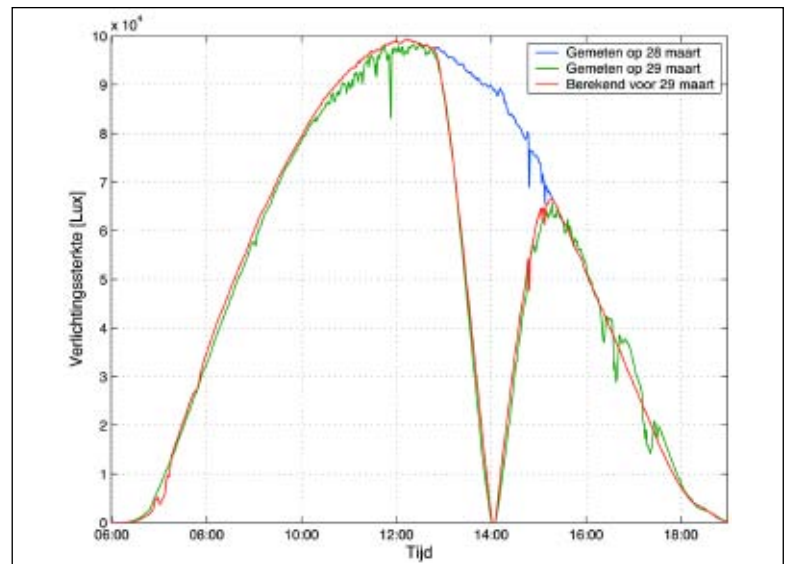
delijke daling van 5 dB(A) zien. Boven op een heuvel, waar een achtergrondgeluidniveau heerste van gemiddeld 35 dB(A), zorgde het gejuich in de verte tijdens de totaliteit voor een niveau van 50 dB(A).

Afgezien van boeiende metingen was de totale zonsverduistering een indrukwekkende ervaring. Schaduwbanden waren te zien op de goudgele rotsen in de omgeving vlak voor de totaliteit, niet veel later was de verduistering volledig en werd een heldere corona zichtbaar. Vol ontzag werd de terugkomst van de zon, na ruim drie minuten, ingeluid met de parels van Bailey, waardoor bijna vergeten werd de ogen weer te beschermen met een eclipsbril en de metingen voort te zetten.

### Verlichtingssterkte

De metingen van verlichtingssterkte en kleurtemperatuur zijn nader onderzocht. De verklaringen van het verloop van deze verlichtingskundige aspecten bieden een interessante kijk op de zonsverduistering.

De horizontale verlichtingssterkte, ten gevolge van zonlicht en hemellicht, is gemeten gedurende de dag van de zonsverduistering en een referentiedag, een dag met gelijke weersomstandigheden. De verlichtingssterkte wordt gedefinieerd als de invallende lichtenergie per oppervlakte-eenheid. Op een zonnige zomerdag heerst bij



Verloop van de horizontale verlichtingssterkte tijdens de zonsverduistering.

### Schijfvormige lichtbron

Hoewel de zon in werkelijkheid een bol is, kan het schijnbare oppervlak van de zon opgevat worden als een schijf. Met schijnbaar oppervlak wordt het oppervlak van de lichtbron bedoeld dat vanuit het oog van de kijker zichtbaar is. Afschermden delen worden dus niet meegerekend. De verlichtingssterkte ( $E$ ) op een punt ten gevolge van een cirkelvormige lichtbron wordt beschreven door de volgende formule<sup>2</sup>:

$$E = \frac{I_{\text{schijf}}}{b^2} \cdot \frac{b^2}{b^2 + R^2} \quad [\text{lux}]$$

Wanneer de straal van de zon ( $R = 7 \times 10^8$  m) en de afstand van de aarde tot de zon ( $b = 1,5 \times 10^{11}$  m) hierin ingevuld worden, gaat de tweede term in de formule richting de waarde één. Hiermee is de verlichtingssterkte in een punt, ten gevolge van de zon, evenredig aan de lichtstroom ( $I_{\text{schijf}}$ ) in candela, wanneer de afstand gelijk blijft. Door het draaien van de aarde verandert de afstand tussen een vast punt op aarde en de zon echter. Deze afstandsverandering

is echter verwaarloosbaar ten opzichte van de totale afstand van aarde tot de zon ( $< 0,004\%$ ). Hierdoor kan de afstand  $h$  als constant worden aangenomen.

De lichtstroom die de zon uitzendt kan worden beschreven door:

$$I_{\text{schijf}} = L \cdot A_{\text{schijnbaar}} \quad [\text{candela}]$$

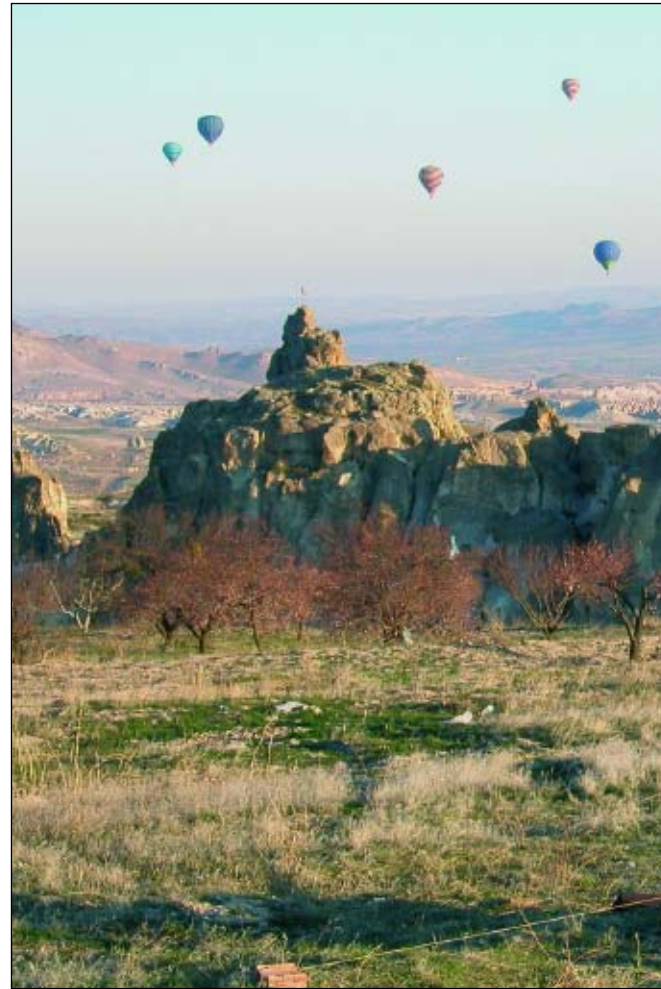
Uitgaande van het feit dat de zon als puntbron wordt beschreven en de luminantie ( $L$ ) per deeloppervlak van de zon gelijk is, betekent dit dat de afname van de verlichtingssterkte beschreven wordt met:

$$E = \frac{L}{b^2} \cdot A_{\text{schijnbaar}} \quad [\text{lux}]$$

Hierdoor wordt de verandering van de verlichtingssterkte op aarde afhankelijk van de verandering van het schijnbare oppervlak van de zonnenschijf. Tijdens de verduistering verandert dit schijnbare oppervlak niet alleen door het draaien van de aarde, maar ook door het afschermen van de zonnenschijf door de maan.



Projectie van de zon met een verrekijker.



's Ochtends uitlezen van de meetdata terwijl luchtballonnen opstijgen.



Opbouwen van meetopstelling in een boom.

voorbeeld een verlichtingssterkte van 60.000-100.000 lux, op een sombere winterdag 3000 lux en een kantoorverlichting zorgt voor een verlichtingssterkte van 400-800 lux. Door adaptatie van het oog worden deze grote verschillen tegengegaan, waardoor een kantoor niet veel donkerder lijkt dan wanneer men zich buiten bevindt. De grafiek van de verlichtingssterkte tijdens de zonsverduistering laat zien dat de verlichtingssterkte gedurende een uur lineair lijkt te dalen van 100.000 lux naar 0. Na de totaliteit vindt het omgekeerde proces plaats en stijgt de verlichtingssterkte van 0 naar 65.000 lux. Wanneer we dit verloop vergelijken met de verlichtingssterkte gemeten op 28 maart 2006, zien we dat het verloop, voor en na de verduistering, vrijwel gelijk is. Deze dag is dus bruikbaar als referentiedag.

De zon is een bolvormige lichtbron, maar gezien vanaf de aarde kan deze opgevat worden als een schijf. Bij een schijfvormige lichtbron is de lichtontvangst van het

Panorama-  
aanzicht van  
de meetloka-  
tie op een  
heuvel.



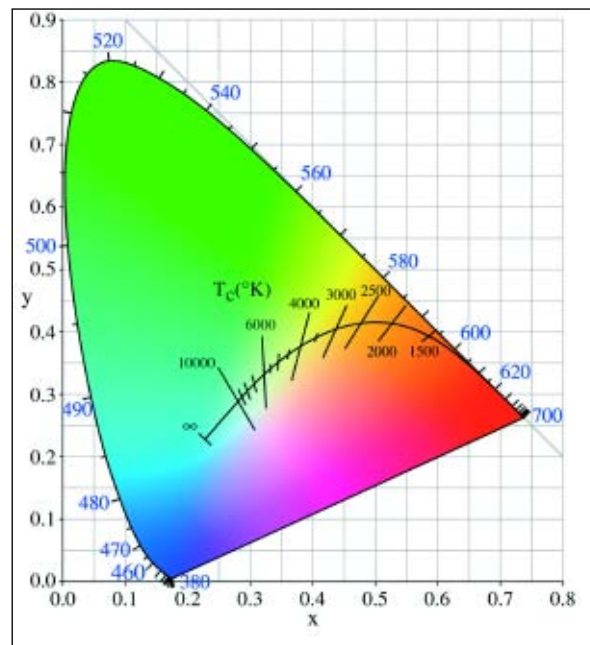


middelpunt van de schijf wat groter dan van de rand van de schijf, maar deze randverzwakking is klein genoeg om te worden verwaarloosd. De zon kan dan beschreven worden als een puntbron, waarbij de uitgezonden lichtsterkte recht evenredig is met de afname van het 'schijnbare' oppervlak van de schijf (zie kader 'Schijfvormige lichtbron').

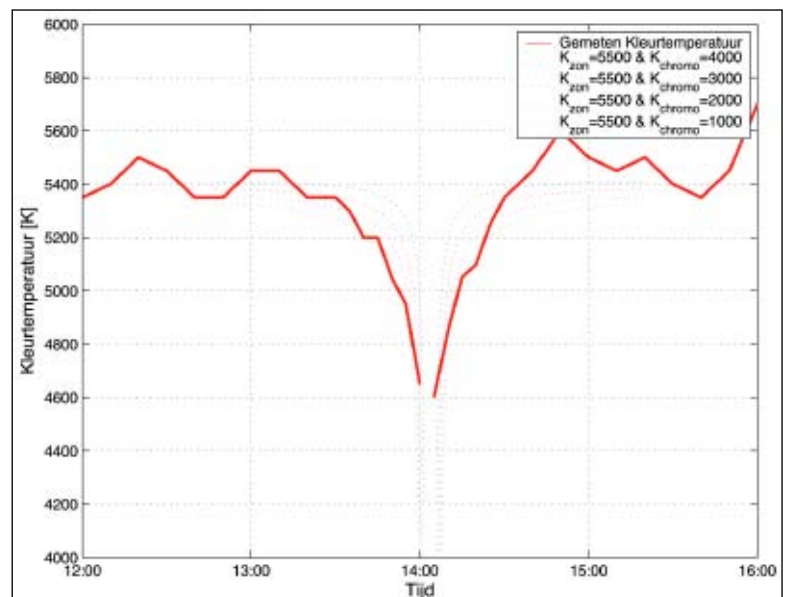
Het verloop van het schijnbare oppervlak van de zonneschijf tijdens de verduistering is berekend (zie kader 'Oppervlakte zonnenschijf tijdens verduistering'). Door het oppervlakteverloop van de zon te vermenigvuldigen met de verlichtingssterkte op de referentiedag is een voorspelling gedaan van de verlichtingssterkte tijdens de verduistering. Zoals te zien is in de grafiek 'verlichtingssterkte' tonen meting en voorspelling een goede overeenkomst.

### Kleurtemperatuur: de 'temperatuur' van licht

Een zwart lichaam dat (voldoende) verhit wordt, gaat licht uitzenden. Dat licht bestaat uit een mengsel van golflengten – het spectrum – en bij elke temperatuur hoort een eigen spectrum. Het spectrum van een stra-



Kleurtemperatuur van zwart lichaam in CIE-kleurendiagram.



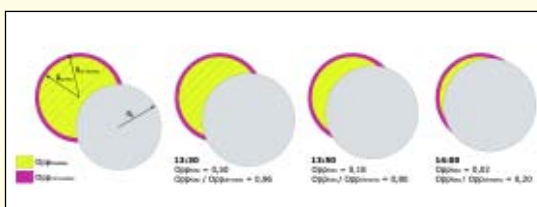
Verloop van de kleurtemperatuur tijdens de zonsverduistering.

### Voorspelling kleurtemperatuur

De oppervlakte van de zon als lichtbron is voor 97% een combinatie van fotosfeer en chromosfeer. De overige 3% bestaat enkel uit de chromosfeer. Tijdens een zonsverduistering verandert de verhouding tussen deze de schijnbare oppervlakten van deze twee sferen: het aandeel van de chromosfeer wordt groter, zoals in het kader 'Oppervlakte zonnenschijf tijdens verduistering' uitgelegd is. Met behulp van deze oppervlakteverhouding wordt de kleurtemperatuur van het daglicht als volgt bepaald:

$$K_{\text{daglicht}} = K_{\text{zon}} \cdot \frac{Opp_{\text{foto}}}{Opp_{\text{chromo}}} + K_{\text{chr}} \cdot \left(1 - \frac{Opp_{\text{foto}}}{Opp_{\text{chromo}}}\right) \text{ [kelvin]}$$

Hierin is  $K_{\text{zon}}$  de kleurtemperatuur van chromosfeer en fotosfeer samen, die aan de hand van de metingen wordt aangehouden als 5500 K. De kleurtemperatuur van de chromosfeer is niet bekend, maar het vermoeden bestaat dat deze lager is dan de laagst gemeten waarde van 4600 K. Voor het verkrijgen van de grafiek is er in stappen van duizend kelvin gevarieerd met de kleurtemperatuur van de chromosfeer.



De maan schuift voor de zon waardoor de oppervlakten van fotosfeer en chromosfeer afnemen.

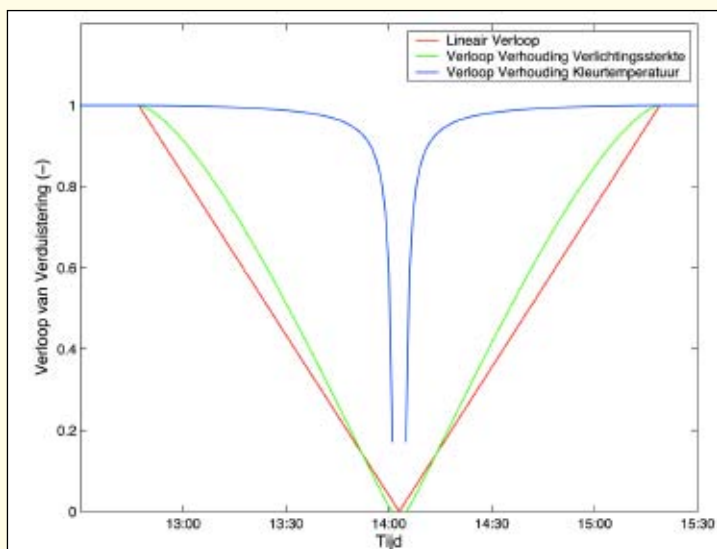
Het weerstation registreert het klimaat op het dak van het hotel.



### Oppervlakte zonschijf tijdens verduistering

Aan de hand van een geometrisch model van de zonsverduistering wordt er een voorspelling gedaan van het verloop van de oppervlakte-afname van de zonschijf. Met behulp van formules uit het artikel van Szalowski<sup>3</sup> is de verhouding onverduisterde tot gehele zonschijf berekend. De straal van de maan ( $R_L$ ) is groter dan die van de fotosfeer van de zon ( $R_S$ ), de zichtbare zonschijf.

- Voor de voorspelling van de verlichtingssterkte is de verhouding tussen de straal van de maan en de fotosfeer van de zon  $R_L/R_{S\text{-foto}} = 1,0483$  aangehouden volgens Espenak and Anderson<sup>4</sup>. Hierbij was het eerste contact om 12.47 uur, het tweede contact om 14.03 uur, het derde contact om 14.06 uur en het vierde contact om 15.19 uur. Voor de berekening is een constante snelheid aangenomen voor het passeren van de maan. Vervolgens is het verloop berekend van de verhouding van het schijnbare oppervlak en het totale oppervlak van de fotosfeer. Een waarde van 1 staat voor een geheel onbedekte zon en een waarde van 0 voor een geheel verduisterde zon.
- Voor de voorspelling van de kleurtemperatuur is de verhouding van de straal van de maan en de chromosfeer van de zon  $R_L/R_{S\text{-chromo}} = 1,0335$  genomen. Vervolgens is het verloop berekend van de verhouding van het schijnbare oppervlak van de fotosfeer en chromosfeer tijdens de zonsverduistering. Een waarde van 1 staat voor de verhouding bij een geheel onverduisterde zon. Wanneer de waarde 0,5 is, zijn beide oppervlakten even groot.



In de grafiek is het verloop uitgezet van de oppervlakteverhoudingen voor de berekening van de verlichtingssterkte en kleurtemperatuur.

lend lichaam, zoals de zon, kunnen we vergelijken met dat theoretische spectrum van een zwart lichaam. Wanneer deze spectra gelijk aan elkaar zijn, zeggen we dat het licht van het stralende lichaam een *kleurtemperatuur* heeft, gelijk aan de temperatuur van het zwarte lichaam. Zo zendt de zon overdag wit licht uit met een kleurtemperatuur van 5300-5800 kelvin; bij zonsondergang bedraagt deze 2000 kelvin. Hoe hoger de kleurtemperatuur van het licht, des te korter is de gemiddelde golflengte van het spectrum en dus des te blauwer het licht. Tegen je gevoel in doet wit licht dus koel aan wanneer de kleurtemperatuur hoog is en geeft het een warme indruk wanneer deze temperatuur laag is.

De kleurtemperatuur is gemeten tijdens het verloop van de verduistering. Hoewel zowel zonlicht als hemellicht gemeten zijn, kan aangenomen worden dat het zonlicht overheerst door haar hoge luminantie. De grafiek laat zien dat de kleurtemperatuur van het zonlicht op de dag van de zonsverduistering gemiddeld 5400 kelvin is. Als de zon meer dan 75% verduisterd is, begint de kleurtemperatuur te dalen. Vlak voor de totaliteit is zij naar 4600 K gezakt. Tijdens de totaliteit was het helaas niet mogelijk een meting uit te voeren, omdat er niet voldoende licht was. Het minimum van de kleurtemperatuur is dus niet bekend.

Het roder worden van het licht tijdens de zonsverduistering moet niet verward worden met het rood worden van het licht bij ondergaande zon. De kleur van het licht is dan namelijk afhankelijk van de mate van Rayleigh-verstrooiing, die omgekeerd evenredig is met de golflengte van het licht. Wanneer de zon hoog staat, kleurt de hemel blauw door de grotere verstrooiing van het licht met een korte golflengte. Wanneer de zon laag staat, en de zonnestrallen een langere weg door de atmosfeer afleggen, wordt zoveel blauw licht verstrooid dat het licht roder wordt. Tijdens de zonsverduistering verandert deze af te leggen weg door de atmosfeer echter nauwelijks. Dit is dus geen verklaring voor het roder worden van het licht tijdens een zonsverduistering.

Wat wel een mogelijke verklaring kan zijn, is het verschil in kleurtemperatuur van het uitgezonden licht van verschillende lagen, ofwel sferen, van de zon. De fotosfeer en de daaromheen gelegen chromosfeer zijn van in-



Het achtergrondgeluid wordt gemeten tijdens het juichen van omstanders.

vloed op het licht op aarde. Het licht van de fotosfeer bestaat bijna uit het volledige zichtbare spectrum. Het licht van de chromosfeer bestaat uit een beperkt spectrum, het zogeheten flitspectrum, met een sterke roodcomponent<sup>1</sup>. Tijdens een zonsverduistering schermt de maan zowel de fotosfeer als de chromosfeer af, waarbij de oppervlakteverhouding van deze twee sferen verandert. Als gevolg van deze verandering neemt de kleurtemperatuur af.

Voor verschillende waarden van de kleurtemperatuur van de chromosfeer is er een voorspelling gedaan van het verloop tijdens de zonsverduistering (zie kader 'Voorspelling kleurtemperatuur'). De trends van de meting en de voorspellingen lijken overeen te komen. Bij een gekozen waarde van de kleurtemperatuur van de

chromosfeer van 1000 kelvin, lijkt de overeenkomst tussen meting en model het grootst. Het model lijkt een goede aanzet voor de voorspelling van de kleurtemperatuur. Er zijn echter meer factoren van invloed dan enkel de oppervlakteverhouding, zoals verschillen in lichtintensiteit van beide sferen.

**Bronnen:**

1. Rutten, R. (1999), 'Wat zagen we niet op 11 augustus?', *Zenit* november 1999
2. Rutten, A.J.F. (2000), *Bouwfysica Licht*, dictaat Technische Universiteit Eindhoven
3. Szalowski, K. (2002), 'The effect of the solar eclipse on the air temperature near the ground', *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **64** (2002) blz. 1589-1600
4. Espenak, F. en Anderson, J., 'Total Solar Eclipse of 2006 March 29', NASA Report TP-2004-212762 (2004)

**POLARIS OPTISCHE INSTRUMENTEN**  
 Nachtegaalstraat 78  
 3581 AM Utrecht  
 TEL 030-2322569  
[www.polarisoptiek.nl](http://www.polarisoptiek.nl)  
 optical@xs4all.nl

**GANYMEDES OPTISCHE INSTRUMENTEN**  
 MIDDELDORPSTRAAT 1  
 1102 HX AMSTELVEEN  
 TEL 020-64 12053 & 4538880  
[www.ganymedes.nl](http://www.ganymedes.nl)  
 ganymedes@xs4all.nl



**Celestron CG-S (XLT)**

- D=150mm F=1500mm
- Starbright XLT Coating
- 8x30 zoeker
- 25mm oculair: 1.25" visual back
- stevige montage met stabiele driepoot

CG-S XLT € 999,-  
 CG-SGT XLT € 1.395,-

Accessoires koffer met 5 plossel oculairs 5 filters  
 Barowlens € 200,-



**William Optics Megrez II 80 FD**  
 Doublet Fluoriet lens

- D=80mm F=621 (f/8.9)
- 2 speed fuser aluminium draagkoffer; prijs € 1399,-
- package met carbon dialektic 2" diagonaal; prijs € 1529,-



**SkyPod VMC110L** nieuwe reis-telescoop van Vixen met GOTO

- D=110mm F=1035mm (f/9.4)
- R.D.F en 20 mm plossel oculair compleet met tafelstatief € 999,-
- andere modellen en een hoger statief ook leverbaar
- informatie: [www.ganymedes.nl](http://www.ganymedes.nl)

Tevens hebben we een grote sortering van kijkers en microscoopen.  
 Voor meer informatie kijk op onze website.