

# Optische effecten en optisch bedrog bij zonsverduisteringen

**In dit artikel laten wij een aantal randverschijnselen bij zonsverduisteringen de revue passeren die meestal wat minder in de aandacht staan. Het gaat hier om de blauw-groene schemer bij een diepe gedeeltelijke verduistering, zonnebeeldjes, sterren aan de hemel, de zwarteheid van de 'zonnenschijf' tijdens de totaliteit, schijnbare en werkelijke lichtafname, de donkerte van de hemelkoepel, kransen bij coronalicht en nog wat andere feiten.**

**G.P. Können\***

Zoals een toenemend aantal mensen kan beamen, is een totale zonsverduistering een fantastische ervaring. Wie de opgetogen verslagen van ooggetuigen in *Zenit* doorleest, ziet dat de corona, chromosfeer en andere zongerelateerde zaken het vaakst genoemd worden en dus blijkbaar de meeste indruk maken. Ondanks de algemene jammerklacht dat de totaliteit zo'n kortstondig gebeuren is, loont het de moeite om de blik toch even te verruimen. Rond om je heen spelen zich optische effecten af die zeker aandacht verdienen. Het aardige is dat een deel van deze verschijnselen gemengd zijn met 'gezichtsbedrog', dat voor subjectieve toevoegingen zorgt. Subjectief of niet – net als de 'opgezwollen' volle maan bij maansopkomst, is het de wereld zoals onze hersenen die ervaren, en in die zin is het een werkelijkheid waar men rekening mee moet houden en waar men even goed van kan genieten als van de fotografeerbare werkelijkheid.

## Lichtafname tijdens gedeeltelijke fase

De tijdspanne tussen de eerste aanraking van de maan en het begin van de totaliteit bedraagt doorgaans zo'n

zeventig tot negentig minuten. Een goede prikwaarde is tachtig minuten; deze waarde gebruiken wij in dit artikel als leidraad. Tijdens deze gedeeltelijke (ofwel partiële) fase neemt de grootte van de verduistering (ofwel eclipsgrootte), die wordt uitgedrukt als het deel van de zonnediameter dat door de maan is bedekt, vrijwel eenparig toe met de tijd. De fractie bedekt oppervlakte van de zon (en daarmee de afname van het zonlicht) blijft in het eerste deel van de gedeeltelijke fase nog wat achter: als een half uur na het begin eclipsgrootte 0,4 is bereikt, gaat nog maar 29% van het zonnoppervlak schuil achter de maan. Daarna gaat het sneller: de resterende vijftig minuten van de aanloop naar totaliteit neemt de lichtintensiteit vrijwel lineair af met de grootte van de verduistering en is dus recht evenredig met de tijd<sup>1,2</sup>. Zie tabel 1, waar de zonnehelderheid is uitgerekend onder verwaarlozing van de randverzwakking voor een typische eclips (maan 4% groter dan de zon), waarbij wij aantekenen dat het in rekening brengen van het verschil in diameter tussen maan en zon pas merkbaar wordt bij eclipsgrootten van meer dan 0,95.

Van de afname in omgevingslicht merkt het oog voorspand niets. Dit heeft drie oorzaken. Ten eerste reageert het oog (evenals bijvoorbeeld het oor) niet lineair, maar volgens de zogeheten Wet van Fechner<sup>3</sup> logaritmisch op prikkels; ten tweede nemen de helderheid van zon, blauwe hemel en het landschap hand in hand af zodat contrasten onveranderd blijven; en ten derde heeft het oog een enorm adaptatievermogen. Net als een goede videocamera doen onze hersenen er alles aan om bij gelijkblijvende contrasten voor de afname in absoluut lichtniveau te compenseren.\* Pas bij een eclipsgrootte van 0,9 – dat is zo'n tien minuten voor de totaliteit – begint het constant zakken van de lichtintensiteit voor het oog merkbaar te worden<sup>4</sup>. Het lichtniveau is dan inmiddels al een factor 8 lager dan aan het begin.

Andere zintuigen laten zich minder foppen, al zijn we

**Tabel 1. Helderheid zon bij gedeeltelijke fase**

eclipsgrootte*	tijdsduur tot totaliteit	helderheid zon	magnitudo zon
0	80 min**	100%	-26,70***
0,1	72 min	96%	-26,66
0,2	64 min	89%	-26,58
0,3	56 min	81%	-26,47
0,4	48 min	71%	-26,33
0,5	40 min	60%	-26,15
0,6	32 min	49%	-25,92
0,7	24 min	37%	-25,62
0,8	16 min	24%	-25,17
0,85	12 min	18%	-24,84
0,9	8 min	12%	-24,37
0,95	4 min	5%	-23,53
0,975	2 min	2,4%	-22,63
0,995****	24 sec	0,28%	-20,31

\* Deel van de zonnediameter dat door de maan bedekt is.

\*\* Waarde kan van eclips tot eclips wat verschillen.

\*\*\* Bij zonshoogte 45°.

\*\*\*\* Vanaf deze waarde blijft de helderheidsafname van het hemellicht achter bij die van de zon<sup>15</sup>.

\* Dit effect speelde de Nederlandse tv-ploeg in 1999 parten: terwijl de verslaggever vlak voor de totaliteit meldde dat het 'al behoorlijk donker begint te worden' was daar op tv totaal niets van te zien.

\* G.P. Können is fysicus en houdt zich al vele jaren bezig met optische verschijnselen aan de hemel. Het snijvlak van meteorologische optica en astronomie heeft zijn speciale belangstelling. Hij heeft twee keer een totale zonsverduistering meegemaakt: eerst in Luxemburg onder een vrijwel gesloten wolkendek, daarna in Turkije bij heldere hemel.

ons dat niet altijd bewust. Zo meldt bijna iedereen dat het bij eclipsgrootte 0,6 (zo'n half uur voor totaliteit) kil aan begint te voelen (zie bijvoorbeeld ref. 5). Metingen laten echter zien dat de luchttemperatuur dan met nog geen twee graden is teruggelopen<sup>6</sup> – te weinig om dat koudegevoel te verklaren. Wat speelt is dat de temperatuur die wij fysiek ervaren voornamelijk wordt bepaald door de hoeveelheid zonneschijn en nauwelijks door de echte temperatuur<sup>7</sup>: een afname in directe zonnestraling van 100% naar 75% geeft (bij windstil en niet te warm weer) een soortgelijke gewaarwording als een temperatuurfname van maar liefst vijf graden. Iedereen die wel eens op het strand heeft liggen zonnen weet wat een klein wolkje voor de zon vermag: ons kougevoel is klaarblijkelijk een beter zintuig voor absolute stralingsintensiteit (ofwel lichtintensiteit) dan ons adapterend oog.

Waar wij de lichtafname wél aan merken, is aan de intensiteit van een vaste lichtbron, zoals de planeet Venus of een ver lichtpunt. Met de voor ons gecamoufleerde afname van het omgevingslicht, worden deze 'standaardkaarsen' steeds feller. Omdat er verder schijnbaar niets aan de hand is, is dit een wat onwerkelijke sensatie.

### **Metallische blauwgroene schemering**

Na de verduistering van 1999 kwamen er vanuit Nederland, waar sprake was geweest van een diepe gedeeltelijke verduistering (maximale eclipsgrootte rond de 0,93), een flink aantal meldingen binnen van 'een geheimzinnige, metaal-blauwgroene zweem' die rond de maximale fase over het landschap hing. Voor veel mensen vormde deze blauwgroene schemering het hoogtepunt van de verduistering.

Hoe indrukwekkend ook, de blauwgroene schemering is geen fotografeerbare werkelijkheid, maar speelt zich af in onze hersenen. Ze is gerelateerd aan de zogeheten kleurconstantheid<sup>8</sup> van het menselijk oog, die er voor zorgt dat een voorwerp voor de waarnemer zijn eigen kleur lijkt te behouden, ook als het belicht wordt door het rode licht van bijvoorbeeld de ondergaande zon.

Het mechanisme werkt als volgt. Tijdens een helderheidsafname zoals die bij heldere hemel tijdens zonsopgang optreedt, komen in onze hersenen twee processen op gang die de lichteffecten bij zonsopgang gedeeltelijk compenseren. In de eerste plaats wordt, zoals gezegd, sterk gecompenseerd voor de helderheidsafname zelf, die makkelijk een factor 10 kan zijn, maar door de adaptatie van het oog zeker niet als zo groot wordt ervaren. Maar daarnaast mengen onze hersenen een blauwgroene kleur bij, om hiermee te compenseren voor de roodkleuring van onze omgeving die veroorzaakt wordt door de steeds roder wordende ondergaande zon. Bij een diepe zonsverduistering treden dezelfde twee mechanismen in werking. Een flinke helderheidsafname – bij de eclips van 1999 voor Midden-Nederland een factor 12 – wordt dus nauwelijks als zodanig ervaren omdat het oog compenseert. En net



**1. Het mechanisme achter de 'blauwgroene schemer' tijdens een diepe gedeeltelijke zonsverduistering. Op deze foto, rond zonsopgang met een niet-digitale camera genomen van het hetzelfde huis dat te zien is in figuur 3, zijn de muren veel roder dan wat we ervaren met het blote oog. Reden: het oog mengt onder schemeringscondities een blauwgroenachtige tint bij om voor de overmaat aan rood te compenseren. Hetzelfde doet het oog bij de (ongekleurde) schemer die het gevolg is van een diepe gedeeltelijke verduistering. (Foto G.P. Können; Soest)**

als bij schemer mengt het oog blauwgroen bij. Maar omdat een verduisterde zon het landschap niet rood kleurt, heeft dat voor ons oog de 'blauwgroene schemering' tot gevolg.

Ofschoon het verschijnsel zelf niet te fotograferen is, is het mechanisme dat er aan ten grondslag ligt dat wel: een niet-digitale foto die in de stralen van de ondergaande zon is genomen, valt meestal roder uit dan 'de werkelijkheid' zoals wij ons die herinnerden (zie fig. 1). Dit soms tot aan het teleurstellende toe. Het kan zelfs aanleiding zijn te besluiten de 'mislukte' foto digitaal te manipuleren totdat het beeld aansluit op dat in onze (subjectieve) herinnering, of om hem maar gewoon over te nemen.

### **Vervormde zonnebeeldjes**

Alvorens verder af te stevenen op de totaliteit, richten we eerst nog de blik naar de zonnebeeldjes – dat wil zeggen naar de projecties van het zonnebeeld onder een boom. Ze vertonen zich in het schaduwbeeld van het bladerdek. Het zijn er talloze, omdat ze ontstaan doordat de talloze kleine openingen tussen bladeren die zonlicht doorlaten, werken als even zovele 'gaatjescamera's'. Op de grond zie je dus tijdens de gedeeltelijke fase sikkeltjes; tijdens een ringvormige verduistering ellipsjes – zie figuur 2. Hoe dieper een verduistering is, des te scherper lijkt de vorm van de zon zich in deze beeldjes af te tekenen.

Als we de beeldjes van de zonneseikkeltjes in figuur 2 (rechts) op één van de vlakken (bijvoorbeeld de rechtermuur) nader bekijken, zijn die onderling evenwijdig: hun openingen staan allemaal dezelfde kant op. Maar, zoals ook Karel Knip in zijn rubriek 'Alledaagse Weten-

**Tabel 2. Grensmagnituden bij verduistering\***

eclipsgrootte	tijdsduur tot totaliteit	grensmagnitude	planeten/sterren zichtbaar
0	80 min	-3,5	Venus
0,75	20 min	-2,5	
0,913	7 min	-1,5	Jupiter, Sirius
0,968	2,5 min	-0,5	Canopus
0,987	60 sec	+0,5	Saturnus, Mercurius, Wega, Arcturus, Rigel, Capella, Procyon
0,992	40 sec	+1,0	Achenar, $\beta$ Cen, Altair, Aldebaran, $\alpha$ Crucis
totaliteit	0	+3,0	

\* Op 3000 meter hoogte is de grensmagnitude 1 punt hoger.





**2. Zonnebeeldjes tijdens een ringvormige zonsverduistering.** De vele gaatjes tussen het bladerdek van een boom werken als evenzo vele gaatjescamera's en projecteren hun beeldjes op de grond en twee muren. Tijdens de ringvormige fase (links) zijn de zonnebeeldjes ellipsjes, die op de verschillende vlakken verschillende oriëntaties aannemen. Tijdens de gedeeltelijke fase (rechts) zijn de zonnebeeldjes sikkeltjes. De verbindingslijnen tussen de uiteinden van de sikkeltjes wijzen op het ene vlak in een andere richting dan op het andere vlak. (Foto G.P. Können; Madrid, 3 oktober 2005)

schap' in de *NRC* opmerkt<sup>9</sup>, de openingen op het ene vlak wijzen in een andere richting dan die op een ander vlak. Dit alles is prima te zien in de buurt van de snijlijnen van de vlakken.

Dit vreemd aandoende verschijnsel is makkelijk te imiteren met een stok. Laten wij ons voorstellen dat de stok evenwijdig wordt gehouden met de twee uiteinden van de zonneseikel. En laat de stok een schaduw werpen op twee verticale muren. Dan zien wij dat het schaduwbeeld op de ene muur in het algemeen niet evenwijdig is met dat op de andere muur: bij de snijlijn van de twee muren vertoont de schaduw een knik (zie fig. 3).

De enige manier om de knik te vermijden is om de waarnemer in het vlak zon-stok te plaatsen. Vanuit de waarnemer gezien is dat het vlak door het schaduwbeeld van zijn oog en evenwijdig met de stok – oftewel de uiteinden van de sikkeltjes. Hoe verder men van dit vlak vandaan kijkt, des te sterker is de knik. En des te sterker het niet-parallel zijn van de zonnebeeldjes op vlak 1 ten opzichte van die op vlak 2. Dus als wij van boven naar beneden langs de twee muren kijken, moeten wij ergens een punt passeren waar de knik afwezig is.

Het aardige is, dat het effect losstaat van de elliptische vervorming van de zonnebeeldjes die ontstaat doordat de projectievlakken (de muren) niet loodrecht op de



**3. De schaduw van een rechte dakgoot vertoont op de overgang van de ene muur naar de andere een knik.** Dit is hetzelfde effect dat het niet-parallel zijn van de zonnebeeldjes in figuur 2 veroorzaakt. (Foto G.P. Können; Soest)

**Tabel 3. Helderheden**

	magnitude	relatief t.o.v. van elkaar	bron
zon in zenit	-26,80	420.000×VM	ref. 41
zonnecorona	-12,0	0,48×VM	ref. 28, 29,
'bijna-volle' maan* (VM)	-12,74		
'precies-volle' maan	-13,07	1,35×VM	ref. 36-38
schijfje blauwe hemel van 0,5° diameter, overdag** (HemelOv)	-12,6	0,9×VM	ref. 11, 12, 41 en fig. 9
Eerste Kwartier (EK)	-10,02	VM/12	ref. 40, 42
Eerste Kwartier, oppervlaktehelderheid schijfje blauwe hemel van 0,5° diameter, tijdens totaliteit (HemelEcl)	-4,3	HemelOv/2000; VM/2200	
asgriuwe schijnsel van de verduisterende maan (Asgr)	-3,0	HemelEcl/3; VM/8000	
totaal verduisterde maan	-2	0,4×Asgr	ref. 39
grensmagnitude overdag, zeeniveau resp. 3000m (POD*** = 98%)	-3,5/-2,5		ref. 12
grensmagnitude overdag, zeeniveau resp. 3000m (POD = 50%)	-2,7/-1,7		idem
grensmagnitude totaliteit, zeeniveau resp. 3000 m (POD = 98%)	+3/+4		ref. 24

\* De 'bijna-volle maan' is het gemiddelde over alle Volle Manen (opposities in lengte), met uitsluiting van die in de aardschaduw. Het betreft hier dus de opposities in lengte, waarbij zijn breedte tussen de 1,2° en 5° kan liggen<sup>40</sup>. De helderheid van deze 'bijna-volle' maan blijkt equivalent te zijn aan die van de echte maan op 3° afstand van het tegenpunt van de zon<sup>38</sup>.

\*\* Dwars op de zon en op 45° hoogte.

\*\*\* POD is *Probability of Detection* (zie ref. 10, 13).

zonnestrallen staan. Ook dit uit zich op de foto: op de grond en de rechtermuur zijn de sikkeltjes gevormd aan de scherpe kant van de tot ellipsen vervormde zonnebeeldjes, terwijl de sikkeltjes op de linkermuur juist aan de stompe kant van de ellipsjes verschijnen. Kennelijk geeft de richting van de assen van de ellipsen ons geen informatie over wélk punt op zo'n ellips de projectie is van bijvoorbeeld het bovenste puntje van de zon.

Bij de foto tijdens de gedeeltelijke fase lopen dus twee effecten door elkaar heen, namelijk het niet parallel staan van de sikkeltjes en de verschillen in 'elliptische oprekking'. Het niet-parallel zijn is alleen te zien omdat de posities op de zonneshijf tijdens de gedeeltelijke fase gemarkeerd zijn: de hap uit de zon plaatst merktekens op de zonnerand die ervoor zorgen dat we kunnen zien of zonnebeeldjes ten opzichte van elkaar gedraaid zijn. Tijdens de ringvormige fase (fig. 2, links) vallen die merktekens tijdelijk weg, waardoor wij geen onderscheid meer kunnen maken tussen posities aan de zonnerand. Wij kunnen dan dus niet meer zien of de zonnebeeldjes al dan niet ten opzichte van elkaar gedraaid zijn. Er blijft dan alleen het effect van de elliptische vervorming zichtbaar. In dat opzicht is het zonnebeeldje van de ringvormige fase even oninteressant als dat van een niet-verduisterde zon!

### **Een ster kruipt tevoorschijn**

Het licht van de blauwe hemel neemt evenredig af met dat van zijn veroorzaker, de zon. Met deze afname wordt ook de grensmagnitude hoger. Bij klaarlichte dag is die op zeeniveau ongeveer gelijk aan magnitude  $-3,5$ , zoals uit diverse metingen uit de jaren 1940 blijkt<sup>10-12</sup>. Dit is in overeenstemming met het ervaringsfeit dat Venus overdag redelijk makkelijk met het blote oog kan worden gezien. In het hooggebergte gaat het nog beter, want op hoogten van drieduizend meter of meer is de grensmagnitude een volle punt hoger (magnitude  $-2,5$ )<sup>13</sup>. Dit brengt Sirius op de rand van zichtbaarheid en

onder gunstige omstandigheden er zelfs overheen (zie ook tabel 3), zoals ik inderdaad samen met enkele collega's in juni 1988 op La Palma Observatory<sup>14</sup> (hoogte 2800 meter) heb kunnen ervaren, toen wij rond het mid-daguur langs de meterslange zoeker van een telescoop keken die op Sirius was gericht.

Met het afnemen van de hemelhelderheid tijdens het voortschrijden van de partiële fase neemt Venus' zichtbaarheid toe. De toename in grensmagnitude gaat echter trager dan het verzwakken van het hemellicht: als het hemellicht vijf magnituden zwakker wordt, neemt de grensmagnitude met slechts vier magnituden toe<sup>13</sup>. Tabel 2 toont dat Jupiter en Sirius pas een vijftal minuten voor de totaliteit zichtbaar kunnen worden (op 3000 meter hoogte gebeurt dat trouwens al een kwartier eerder). Zo'n anderhalve minuut voor totaliteit doorkruist de grensmagnitude het nulniveau. Berekening en praktijk kloppen goed met elkaar, want in 2006 is Mercurius (magnitude  $+1,0$ ) al in de laatste minuut voor de totaliteit met het blote oog gezien<sup>4</sup>.

Tot het laatst aan toe blijft de zon echter de alles bepalende lichtbron, hetgeen blijkt uit het feit dat de daling in hemelintensiteit en zonne-intensiteit lang in elkanders pas blijven gaan. Pas als het oppervlak van de zon voor 99,7% is bedekt, beginnen hemelhelderheid en zonnehelderheid uit elkaar te lopen<sup>15</sup> – een teken dat de zon zijn centrale rol begint te verliezen. Dit gebeurt bij een eclipsgrootte van meer dan 0,995, dus in de laatste halve minuut voor de totaliteit (tabel 1). De prominente rol die de zon tot op het allerlaatste moment blijft spelen wordt gedemonstreerd door het feit dat zijn stralen nog in de laatste paar seconden voor de totaliteit een (pollen)krans\*\* kunnen opwekken (zie fig. 4 en soortgelijke foto's op de website van de Finse waarneemster Emma Herranen<sup>17</sup>).

### **Op de grens van totaliteit**

Bij het naderen van de totaliteit treden een paar effecten tegelijk op die de belichting en daarmee het aanzien van de omgeving radicaal veranderen. Ten eerste valt het directe zonlicht (tot tien seconden voor de totaliteit nog van magnitude  $-19$ ) weg. Het landschap wordt dus door de blauwe lucht beschenen in plaats van door de zon. Net als wanneer bij klaarlichte dag een wolk voor de zon trekt, is het adaptatievermogen van het oog niet groot genoeg om voor deze snelle lichtafname te compenseren. Er ontstaat dus een gevoel van lichtafname, alsof men een reuzendimmer omlaag draait. Ook de lucht boven ons wordt niet meer direct door de zon beschenen. Kijken wij rond het begin van totaliteit naar de hemel, dan zien wij een groot helderheidscontrast tussen het deel dat nog wél en het deel dat níét meer door de zon beschenen wordt. Het grensvlak ertussen loopt op dat moment precies door de zon en tekent zich scherp af, omdat wij precies evenwijdig met het vlak van de maanschaduw kijken (zie fig. 5). Het onverlichte deel van de atmosfeer blijkt niet geheel donker, omdat het licht ontvangt dat afkomstig is van de zonbeschenen hemel buiten de maanschaduw.

Na het intreden van de totaliteit stopt de lichtafname van het landschap niet, maar zet zich voort. Dit omdat het zonbelichte deel van de hemel wegtrekt. Met een snelheid van de maanschaduw van zo'n zestig kilometer per



**4. Een (pollen)krans rond de bijna totaal verduisterde zon. De krans is gecentreerd rond het laatste stukje onverduisterde zon. Deze foto is 9 seconden voor de totaliteit genomen; eclipsgrootte 0,998. De afbeelding illustreert dat het directe zonlicht alles domineert tot aan zelfs het laatste moment voor totaliteit. Het licht van de corona heeft op dit tijdstip nog niets in te brengen. (Foto Emma Herranen; Belek, Zuid-Turkije, 29 maart 2006; zie ook <http://www.iki.fi/mellon/>)**

\*\* In tegenstelling tot normale kransen, ontstaat een pollenkrans niet door zwevende wolkendruppeltjes maar door stuifmeelkorrels in de lucht. De pollenkrans is, met een diameter van circa 1 graad, vijf keer kleiner dan de bekende krans in wolken- of mistdruppeltjes<sup>16</sup>.





minuut (zoals in Zuid-Turkije) en een effectieve hoogte van acht kilometer van de atmosfeer duurt het zo'n 25 seconden voordat het grensvlak van 30° hoogte aan de ene kant van de hemel tot 30° hoogte aan de andere kant is getrokken. Het gevoel van de dimmer houdt hierdoor aan. Naar mijn ervaring bij de Turkse eclips duurt deze sensatie circa dertig seconden. Deze tijdspanne is niet noodzakelijkerwijs precies gecentreerd rond het tijdstip van tweede contact. Na deze halve minuut kan het adaptatievermogen van het oog een verdere lichtafname weer aan. Even later is de totaliteit in volle gang en wordt het landschap beschenen door hemellicht vergelijkbaar met dat in de schemer, een half uur tot drie kwartier na zonsondergang.

Als het geheel bewolkt is, vindt deze neergang in lichtintensiteit uiteraard ook plaats. De afname van het licht, en het fysiek ervaren ervan, is echter nog sterker dan bij onbewolkte hemel. De reden is dat de effectieve hoogte van de beschenen atmosfeer veel lager is dan bij onbewolkte lucht, namelijk op hoogte van de top van het wolkendek. Bij een effectieve hoogte van drie kilometer duurt het slechts tien seconden voordat het grensvlak van 30° hoogte aan de ene kant tot 30° hoogte aan de andere kant is getrokken.

In 1999 hebben wij in Dudelange (Luxemburg) zo'n situatie aan den lijve meegemaakt: een totale eclips bij totale bewolking<sup>18</sup>. De snelheid van de lichtafname, en misschien nog meer die van de terugkomst van licht, zorgde voor een duizelingwekkende ervaring. Deze sensatie duurde voor het gevoel ongeveer tien seconden; daarna verdween de dynamiek in het verschijnsel en was het lichtniveau voor het oog gestabiliseerd. Inspectie van een video-opname van Rob van Dorland met gefixeerd diafragma van dezelfde verduistering<sup>19</sup> leverde een tijdspanne van tien tot vijftien seconden op, in overeenstemming met onze schatting. De visuele perceptie van de helderheidsafname was duidelijk korter en intenser dan bij de onbewolkte eclips in Turkije. Een heldere hemel is uiteraard te prefereren bij verduisteringen, maar wat betreft dit éne aspect is een verduistering onder een wolkendek superieur.

### **Nacht in de middag**

Als het zonbeschenen deel van de hemel na een vijftiental seconden is weggetrokken en wij dus steeds die-

**5. Op de rand van totaliteit. De scheidingslijn tussen en direct en indirect beschenen lucht is de zon tot op 30° genaderd. Deze scheidingslijn tekent zich scherp af omdat wij vrijwel evenwijdig met de begrenzing van de maanshaduw meekijken. Omdat bij deze verduistering de baan van de maanshaduw over het aardoppervlak vrijwel samenviel met de richting van de zon en wij dicht bij de centrale lijn stonden, tekent de scheidingslijn zich min of meer horizontaal af tegen het uitspannel. (Foto G.P. Können, opgenomen 10 seconden vóór het einde van de totaliteit op 3,7 kilometer ten noordwesten van de centrale lijn; Side/Colakli, Zuid-Turkije, 29 maart 2006. Het horizontale beeldveld van deze opname beslaat 135°.)**

per in de maanshaduw komen, blijft de helderheid van het hemellicht toch vrijwel constant. De hemel wordt beschenen door het blauwe hemellicht verderop, buiten de maanshaduw. Voor een waarnemer op zeeniveau is dit deel van de hemel achter de horizon, maar voor deeltjes op acht kilometer hoogte niet. Hij kan andere deeltjes op acht kilometer 'zien' tot op afstanden van vijf-honderd kilometer, terwijl de grens van de maanshaduw nooit verder weg is dan honderdvijftig kilometer. Het hemellicht is dus – net als bij gewone schemering – ontstaan door licht dat tweemaal verstrooid is: eenmaal in het zonlicht, en eenmaal in de maanshaduw. Het licht van de 'eclipshemel' is dan ook aanzienlijk blauwer dan dat van een normale hemel<sup>20</sup> en zijn polarisatiepatroon is ontkoppeld geraakt van de positie van de zon<sup>21-23</sup>. Aan de horizon zien wij ons omringd door licht in orangerode schemeringkleuren, omdat het licht daarvan scherend langs het aardoppervlak is gegaan (fig. 6). De helderheid van de hemel is nu ongeveer tweeduidzende keer lager dan overdag. Deze factor 2000, die ongeveer tweemaal groter is dan zijn klassieke waarde<sup>15,24</sup>, kan worden afgeleid uit metingen die deels na het verschijnen van deze vroegere schatting zijn verricht<sup>21,25-27</sup>. Deze hemelhelderheid tijdens totaliteit komt overeen met die tijdens een normale schemering met de zon op 5-5,5° onder de horizon<sup>20</sup>. Dit is de helderheid tegen het aflopen van de burgerlijke schemering die, afhankelijk van het seizoen, zo'n 30-45 minuten na zonsondergang optreedt. Echt donker is het dus niet tijdens een totale verduistering, maar de helderste sterren worden wel zichtbaar. In een vijftal gevallen zijn er zelfs sterren van de 3<sup>e</sup> magnitude gezien<sup>24</sup>, waarbij aangetekend moet



6. De hemel tijdens totaliteit. De luchtdeeltjes worden beschenen door het hemellicht dat wordt uitgestraald door de hoge atmosfeer buiten de maanschaduw. Dit licht is voor een waarnemer op zeeniveau onzichtbaar, omdat het achter de horizon is. Geheel rondom de waarnemer, dicht bij de horizon, heeft de hemel schemeringskleuren aangenomen omdat de baan van het licht dicht langs het aardoppervlak heeft gescheurd. Op het origineel is Venus zichtbaar, rechtsonder de verduisterde zon. De corona is overbelicht. (Foto G.P. Können; Side/Colakli, Zuid-Turkije, 29 maart 2006)



7. 'Rolbevestigende' eclipsfoto. De corona is iets overbelicht en daardoor ongeveer twee keer uitgestrekter dan met het blote oog. De zonnescijf lijkt zwart – net zoals, dankzij een gezichtsbedrog, met het blote oog. (Uitsnede van een foto van C. Brinkerink; Side, Zuid-Turkije, 29 maart 2006; zie ook <http://www.dekoe-pel.nl/zenit/eclipsweb/verslag2006.html>)

worden dat hier eerder sprake is geweest van toevalstreffers dan van het resultaat van systematische waarnemingen. Een grensmagnitude van +3 klopt inderdaad met de factor 2000 verzwakking van het hemellicht. Doormeting van figuur 5 laat zien dat het helderheidsverschil over  $20^\circ$  dwars op de scheidingslijn een factor 4 bedraagt. Dit komt overeen met een verschil in grensmagnitude van circa 1,2. Het traject in de grensmagnitude van +1,5 naar +3 (tabel 2) wordt klaarblijkelijk bijna sprongsgewijs doorlopen.

De meest prominente lichtbron aan de hemel is uiteraard de zonnecorona. Deze is twee maal zwakker dan de volle maan<sup>28,29</sup> en daarmee een miljoen keer zwakker dan de onverduisterde zon, dus magnitude  $-12,0$ . Met een helderheidsafname van slechts een factor 2000 van

het hemellicht is de verhouding hemellicht/corona vergelijkbaar met die van de hemel en de maan in Eerste Kwartier als de zon  $6,5-7^\circ$  onder de horizon staat. In tegenstelling tot de zon overdag of de maan 's nachts, speelt het licht van de corona geen enkele rol bij de belichting van het landschap. De corona werpt dan ook geen schaduwen.

#### 'Een inktzwarte schijf aan de hemel'

De grootste blikvanger tijdens totaliteit is uiteraard de achterkant van de maan met daaromheen de corona. De verduisterde zonnescijf biedt een merkwaardige aanblik: hij vertoont zich inktzwart en dus veel donkerder dan de blauwe hemel verderop. Deze zwarte schijf, die bij alle beschrijvingen en tekeningen van zonsverduisteringen terugkomt (zo ook bijvoorbeeld in Flammarions klassieker<sup>30</sup>) vertoont zich zelfs op foto's; zie figuur 7. Een korte overweging leert echter dat zwart licht niet kan. Hier is sprake van een zeer sterke vorm van gezichtsbedrog; het is het helderheidscontrast met de zonnecorona dat ons de impressie geeft van een zwarte schijf<sup>31</sup>. Dat de werkelijkheid anders is, maakt de (subjectieve) aanblik van de



8. 'Roldoorbrekende' eclipsfoto. De hemel is juist belicht, waardoor het binnenste deel van de corona overbelicht is geraakt. Door deze overbelichting strekt de corona zich veel verder uit dan wij met ons oog te zien krijgen. De 'zwarte' zonnescijf is nu niet zwart meer, maar blauw. (Foto G. Peeters; Verdun, Frankrijk, 11 augustus 1999). Het schijfje links is de 'zwarte' zonnescijf die, ontdaan van de corona, tegen de hemelachtergrond is gemonteerd. De schijf blijkt helderder dan de hemel eraan.



## De helderheid van de verduisterende maan

De achterkant van de verduisterende maan is niet helemaal donker, omdat deze kant door de 'volle aarde' wordt belicht. Dit verschijnsel, welbekend als het 'asgrauwe schijnsel' van het niet door de zon verlichte deel van de jonge maan, is van maximale intensiteit bij Nieuwe Maan.

De helderheid van de asgrauwe verduisterende maan is gemakkelijk te berekenen uit de gegevens in de appendices van de *Sterrengids*. De 'bijna-volle' maan\* (dus net buiten de aardschaduw) is bij de gemiddelde afstand aarde-maan (384.400 km) van magnitude  $-12,74$ . Bij een totale zonsverduistering staan maan en aarde wat dichter bij elkaar, namelijk gemiddeld 370.000 km. De 'bijna-volle' maan is dan van magnitude  $-12,8$ . De zon beschijnt dan de maan – net als de top van onze atmosfeer – met magnitude  $-27,0$ . Op 1 AE is de helderheid van de volle aarde  $-3,86$ , dus bij een zonsverduistering beschijnt de aarde de nachtzijde van maan als een object van magnitude  $-16,9^{**}$ , dat wil zeggen 10,1 magnitude (ofwel 11.000 keer) zwakker dan de zon. Dus het asgrauwe schijnsel van de 'bijna-nieuwe' maan is ook 10,1 magnitude zwakker dan de volle maan, dat wil zeggen van magnitude  $-2,7$ . Dit is vergelijkbaar met de helderheid van Jupiter bij oppositie, maar deze helderheid is wel uitgesmeerd over een schijf van 32,3' diameter.

Tijdens een zonsverduistering is de maan niet 'bijna-nieuw', maar *precies* nieuw. Om de helderheid van het asgrauwe schijnsel onder deze condities te berekenen, moeten we weten hoe helder de precies-volle maan is. Vanaf de aarde is zijn licht nooit te zien, omdat de precies-volle maan in de aardschaduw staat. Uit Apollo 8-metingen<sup>36-38</sup>, blijkt dat de precies-volle maan door het optreden van de heiligen-schein in glasachtige bolletjes op het maanoppervlak 1,35 maal, ofwel 0,33 magnitude, helderder is dan de bijna-volle maan. Het asgrauwe schijnsel van de verduisterende maan is dus van magnitude  $-3,0$ .

\* De 'bijna-volle maan' is het gemiddelde over alle Volle Manen met uitsluiting van die in de aardschaduw.

\*\* Doordat de maanschaduw op de aarde valt, is bij een zonsverduistering het licht van de Volle Aarde iets verzwakt. Dit effect is echter klein – minder dan 0,1 magnitude.

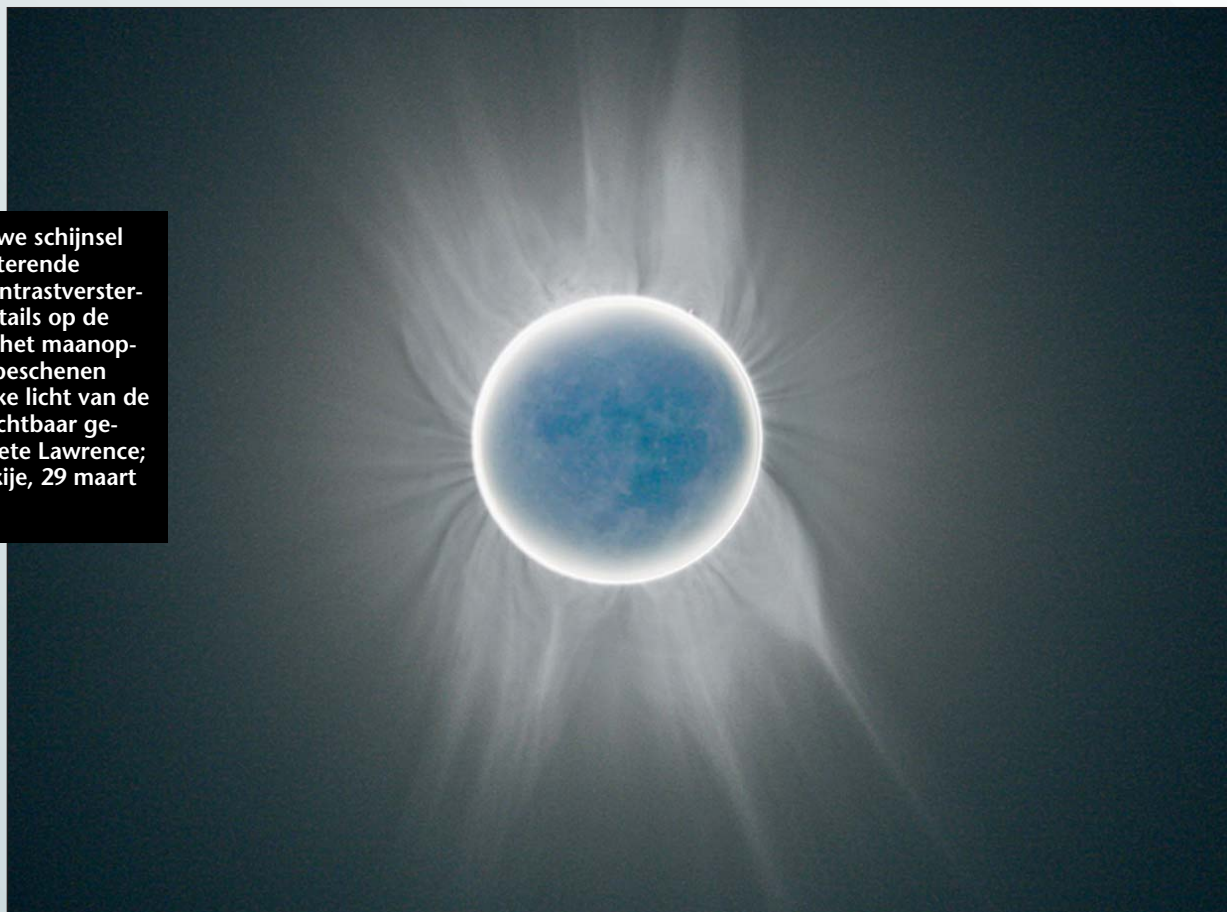
zwarte schijf niet minder indrukwekkend. De 'zwarte schijf' moet op zijn minst even helder zijn als



**9. De maan overdag, een dag voor Laatste Kwartier. De signaal/achtergrondverhouding maan/hemellicht (circa 1:4 op deze foto) is vergelijkbaar met die tijdens totaliteit (zie fig. 8): het asgrauwe schijnsel van de verduisterende maan is per oppervlakte-eenheid 1700 keer zwakker dan de hier gefotografeerde maan, terwijl het hemellicht tijdens totaliteit zo'n 2000 keer zwakker is dan overdag. (Foto I.H. Mink-Können; Soest, 13 september 2006, 9:45 uur MEZT; maanshoogte 45°, elongatie 104°, maanfase  $k=0,62$ )**

het licht van de omringende hemel. In werkelijkheid is hij helderder, omdat de verduisterende maan door de aarde beschenen wordt en dus het zogeheten asgrauwe schijnsel vertoont. Bij Nieuwe Maan is de helderheid ervan maximaal; zijn magnitude bedraagt  $-3,0$  (zie kader 'De helderheid van de verduisterende maan'). Zijn oppervlaktehelderheid is dus ruim een factor 1000 lager dan die van de maan in Eerste Kwartier (zie tabel 3), maar ongeveer dezelfde factor (2000) zit tussen de helderheid van de hemel overdag en die tijdens totaliteit.

**10. Het asgrauwe schijnsel van de verduisterende maan. Door contrastversterking zijn de details op de nachtkant van het maanoppervlak, zoals beschenen door het zwakke licht van de Volle Aarde, zichtbaar gemaakt. (Foto Pete Lawrence; Side, Zuid-Turkije, 29 maart 2006)**





Dit betekent dat de verduisterende maan zich duidelijk moet aftekenen tegen de hemelachtergrond, en figuur 8 toont dat dit inderdaad het geval is. Zijn zichtbaarheid tegen de hemelachtergrond is vergelijkbaar met die van de maan overdag die in figuur 9 is afgebeeld.

Het toch nog heldere licht van de verduisterende maan schept de mogelijkheid zijn oppervlaktestructuren te fotograferen tijdens een totale verduistering. Dankzij de opkomst van digitale fotografie en de mogelijkheden tot beeldverwerking is dat minder moeilijk dan vroeger. Tijdens de recente eclips zijn er diverse pogingen ondernomen. Een zeer goed resultaat, behaald door de Brit Pete Lawrence<sup>32</sup>, is afgebeeld als figuur 10.

Ten slotte is er nog een facet van het coronalicht dat de moeite waard is te bespreken, namelijk zijn polarisatie. In feite is de zonnecorona het enige heldere astronomische object met een behoorlijke polarisatie. Met een polarisatiefilter (zoals in een polaroidzonnebril) voor het oog verandert de corona van vorm; bij rotatie van het filter draait deze vervorming met het filter mee. Het loont de moeite een paar seconden kostbare eclipsstijd in te ruimen voor deze waarneming.

### **Eclipskransen, halo's en regenbogen**

Omdat tijdens de partiële fase van een verduistering de intensiteit van zon en hemellicht op dezelfde wijze afneemt, kan een gedeeltelijk verduisterde zon net zo goed verschijnselen uit de meteorologische optica – regenbogen, kransen, halo's, etc. – genereren als de onverduisterde zon. Zoals eerder opgemerkt is het licht van het onverduisterde deel van de zon tot het laatste moment voor de totaliteit nog steeds zo prominent dat het nog steeds dit soort verschijnselen veroorzaakt – zie figuur 4.

De vraag kan worden gesteld of dit type verschijnselen ook tijdens totaliteit, door het licht van de corona, kan worden opgewekt. De helderheid van de corona moet op zich voldoende zijn, daar die vergelijkbaar is met die van de volle maan en er regelmatig kransen, halo's en

**11. Een krans rond de totaal verduisterde zon. Het licht van de corona blijkt sterk genoeg om de krans goed zichtbaar te maken tegen de schemerverlichte achtergrond van wolken en blauwe lucht tijdens de totaliteit. (Foto Monique van Boxtel; Gmunden, Oostenrijk, 11 augustus 1999)**

zelfs regenbogen bij volle maan zijn gezien. Anderzijds fungeert de corona niet als primaire bron van het omgevingslicht en is de hemelachtergrond duizend maal groter dan bij maanlicht.

Ondanks dit ongunstige uitgangspunt is de krans, de helderste van de optische verschijnselen, wel degelijk gezien rond de totaal verduisterde zon, en zeven jaar geleden zelfs gefotografeerd. Deze primeur komt op naam van de Nederlandse waarnemster Monique van Boxtel, die als eerste onomstotelijke beelden van dit verschijn-

### **Het asgrauwe schijnsel van de aarde**

Een maanbewoner ziet uiteraard ook asgrauw schijnsel op de 'nieuwe aarde'. Bij (vrijwel) Nieuwe Aarde – dus geen maansverduistering – is zijn totale helderheid  $m_{\text{aarde, asgrauw}}$  bovendien even groot als die van het asgrauwe schijnsel van de 'bijna-nieuwe' maan  $m_{\text{maan, asgrauw}}$ , dus magnitude  $-2,7$  (bij een maan-aarde afstand van 370.000 km). Dit misschien wat verrassende resultaat volgt simpel uit de volgende twee formuleetjes:

$$m_{\text{maan, asgrauw}} = m_{\text{maan, vol}} - (m_{\text{zon}} - m_{\text{aarde, vol}})$$

en

$$m_{\text{aarde, asgrauw}} = m_{\text{aarde, vol}} - (m_{\text{zon}} - m_{\text{maan, vol}}).$$

Uiteraard is de oppervlaktehelderheid van het asgrauwe schijnsel van de aarde kleiner dan die van de maan, omdat het licht over een bijna viermaal grotere schijf is uitgesmeerd. De helderheid per oppervlakte-eenheid is hierdoor dertien keer (2,8 magnitude) minder dan dat van de maan.



## Een zonsverduistering op de maan

Bij een totale zonsverduistering op de maan (dus voor ons een maansverduistering) ziet een maanbewoner in de richting van de zon duidelijk andere verschijnselen dan wij. Voor het gemak zullen de verschijnselen even volgen, waarbij wij ons een centrale verduistering voorstellen en de maanman op de oostkant van de maan situeren. Vóór de verduistering ziet onze maanman de zon naar de (stilstaande) 'nieuwe aarde' toe bewegen, die een asgrauw schijnsel van magnitude  $-2,7$  heeft. Als de zon achter de viermaal grotere aardschijf begint te schuiven, gaat de aardse dampkring oplichten. Na een uur begint de totaliteit voor de maanman, dus vanuit de aarde gezien verschijnt er een hap in de maan. De maanman ziet nog steeds het asgrauw schijnsel (nu van magnitude  $-2,0$ , omdat de maan al wat minder helder naar de aarde terugschijnt) en een dampkring die sikkelvormig rond de aardschijf oplicht. Naarmate voor hem het midden van de totaliteit nadert, verdeelt het licht van de dampkring zich steeds gelijkmatiger rond de aardschijf. Bij een transparante aardatmosfeer kan deze een helderheid van ongeveer magnitude  $-16$  bereiken, wat volgt uit het feit dat een totaal verduisterde maan vanuit de aarde gezien ongeveer van magnitude  $-2$  kan zijn<sup>39</sup>, en daarmee elf magnituden zwakker is dan wanneer de zon (magnitude  $-27$ ) hem vol beschijnt. De oplichtende atmosfeer rond de aardschijf vertoont aan de binnenkant een dieprode schemeringskleur die af en toe wordt onderbroken door wolkenpartijen in de dampkring; naar buiten toe wordt zijn licht snel zwakker en gaat over in blauw. De dikte van dit ringetje is voor de maanman niet veel meer dan  $0,2$  boogminuut, dus met zijn blote oog ziet hij die kleurovergang niet.

Parallel aan het voortschrijden van de totaliteit voor onze maanman wordt het asgrauwe schijnsel steeds zwakker, tot het helemaal weg is gevallen als de hele maan in de kernschaduw van de aarde is verdwenen. Voor onze maanman is dat een uur na het begin van zijn totaliteit. Tegen het einde van de totaliteit heeft het sikkelvormige oplichten van de atmosfeer zich naar de andere kant van de aardschijf verplaatst, waarna de zon zich weer vertoont. Het asgrauwe schijnsel is dan nog onzichtbaar, maar keert voor onze maanman geleidelijk terug. Als een uur later de maan helemaal uit de kernschaduw van de aarde is getreden, is het asgrauwe schijnsel weer van magnitude  $-2,0$ ; nog een uur later is zijn helderheid weer op het oude niveau van magnitude  $-2,7$ .



**12. Een matig-heldere halo rond de diep-verduisterde zon. Tot aan de grens van totaliteit wist de halo zich te handhaven, maar tijdens de totaliteit verdween hij in het achtergrondlicht. Deze foto is ca. 3 seconden voor de totaliteit opgenomen; de eclipsgrootte is boven de  $0,999$ . Het contrast in de foto is iets versterkt, maar op de niet-bewerkte versie is de halo ook te zien. Het is niet bekend in hoeverre een helderder halovorm (zoals een bijzon) zichtbaar kan blijven tijdens totaliteit. (Foto Udo Hennig; Side/Colakli, Zuid-Turkije, 29 maart 2006, 10.54.52 uur UT)**

sel heeft weten vast te leggen (zie fig. 11). Nadere inspectie van video's van eclipsen leert dat er op vroegere opnamen van de totaliteit soms ook eclipskransen te ontwaren zijn, zoals bijvoorbeeld op de video die Anton van der Salm<sup>33</sup> in Mexico heeft gemaakt van de eclips van 1991. Deze kransen zijn echter lang niet zo makkelijk te herkennen als die op figuur 11, mede omdat meestal een flinke telelens is gebruikt.

Sporadisch hebben in de 20<sup>ste</sup> eeuw andere waarnemers het verschijnen van een eclipskrans ook wel eens gerapporteerd<sup>34</sup>, maar naar mijn weten nooit gefotografeerd. Interessant is dat de eclipskrans niet altijd als zodanig werd herkend, maar soms (zoals in 1998) werd aangezien voor een mogelijke (blauwige) voortzetting van de zonnecorona op  $3,5^\circ$  van de zon<sup>31</sup>.

Halo's zijn lichtzwakker dan de krans. Het is onduidelijk of halo's die door coronalicht worden opgewekt van voldoende helderheid kunnen zijn om tegen de schemerverlichte hemel gezien te worden. Rapporten over 'eclipshalo's' ontbreken, al kan hun bestaan niet bij voorbaat worden uitgesloten. Interessant is dat in 2006 een halo rond de diep-verduisterde zon optrad die door de Duitse waarnemer Udo Hennig tot op luttele seconden voor de totaliteit fotografeerbaar bleek (zie fig. 12), dus tot aan een eclipsgrootte ruim boven de waarde waar de afname van het hemellicht begint te stagneren. Op Hennigs foto's tijdens de totaliteit zelf is de halo niet meer te zien: blijkbaar was hij toen verdronken in de hemelachtergrond. Aangetekend moet hierbij worden dat betreffende halo, die ik zelf op enkele honderden meters van Hennig ook waarnam, slechts van matige intensiteit was. Het zou kunnen zijn dat helderder halo's, zoals de bijzon, wel degelijk boven de achtergrond uit kunnen komen. Een mogelijkheid om dit vermoeden te testen, is om na te gaan of er ooit bijmanen tijdens burgerlijke schemering zijn gerapporteerd. Zoals eerder opgemerkt, is de intensiteitsverhouding van corona en hemellicht-bij-totaliteit vergelijkbaar met die van de maan in Eerste Kwartier en hemellicht-bij-schemer bij een zonshoogte van  $-6,5^\circ$ , dus zo'n 45 minuten na zonsondergang. In tegenstelling tot maankransen zijn maanhalo's onder deze condities bij mijn weten nooit gerapporteerd, maar uitputtend onderzoek hiernaar heeft nog niet plaatsgevonden. Op dit moment ligt de kwestie van het bestaan van eclipshalo's nog open.

Regenbogen zijn veel lichtzwakker dan halo's. Gezien de hierboven beschreven analogie met de lichtcondities tijdens schemering, lijkt het bijna onmogelijk dat regenbogen die door het licht van de corona worden opgewekt, helder genoeg kunnen zijn om boven de hemelachtergrond uit te komen. Niettemin verscheen in 1970 een nogal ver gaande claim over de zichtbaarheid van eclipsregenbogen in het Engelse tijdschrift *Weather*<sup>34</sup>. Of dit serieus genomen moet worden is twijfelachtig. Aanleiding van dat stukje was namelijk een ingezonden brief van Prinses Margaret naar het tijdschrift *Country Life* over een maanregenboog, en wellicht heeft dit gegeven de schrijfster van het *Weather* artikeltje aangejaagd tot het poneren van iets meer dan verantwoord is. Uit een kritisch doorlezen van het eclipsverslag waarop de claim was gebaseerd (uit 1901, door Maunder<sup>35</sup>), blijkt dat de boog niet door de verslaglegger zelf is gezien, maar door waarnemers twintig kilometer verderop. Het betreft dus informatie uit de tweede hand, waarbij er geen enkele expliciete indicatie is dat de boog zich wist te handhaven tijdens de totaliteit. De gerapporteerde roze kleur in de boog, waarvan Maunder suggereert dat die misschien door het protuberansenlicht is veroorzaakt, kan even-



goed veroorzaakt zijn door het optreden van een overvallige boog. Zeer waarschijnlijk is deze 'eclipsboog' alleen gezien tijdens de partiële fase. Een regenboog tijdens totaliteit lijkt uitgesloten.

### Na de totaliteit

Na de totaliteit spelen zich dezelfde verschijnselen af als ervoor, uiteraard in omgekeerde volgorde. De terugkeer van het licht na totaliteit blijft een spectaculaire ervaring, maar alles wat daarna komt wordt als minder bijzonder ervaren. Dit omdat het een 'terugkeer naar normaal' is. Hetzelfde gevoel speelt bij de terugkeerfase na een ringvormige of een (diepe) gedeeltelijke verduistering. Als het hoogtepunt van een eclips voorbij is, houden de meeste waarnemers het dan ook voor gezien en wachten het laatste contact niet meer af.

C. Hinz, W.J. Jansen, J. Meeus, J. Sussenbach en R. Zappeij verschaffen hulp bij het achterhalen van een aantal getallen en feiten ten behoeve van dit artikel.

### Referenties

1. Möllmann, K.-P. en Vollmer M. (2006), 'Measurements and predictions of the illuminance during a solar eclipse', *European Journal of Physics*, **27**, blz. 1299-1314
2. Van der Weerd, J. en Wenmaekers, R. (2007), 'De zonsverduistering in Turkije op 29 maart 2006: Het licht tijdens het verloop van de verduistering', *Zenit* **34**, blz. 14-19 (dit nummer).
3. Fechner, G.T. (1860), *Elemente der Psychophysik Teil II, Kapitel 16*, Breidkopf und Härtel, Leipzig; Engelse vertaling uit 1912 op <http://psychclassics.yorku.ca/Fechner/>.
4. Cowley, L. (2006), persoonlijke mededeling.
5. Cowley, L. (2006), *Eclipse, Turkey March 29, 2006*. <http://www.atoptics.co.uk/eclipse.htm>.
6. Vollmer M. en Möllmann, K.-P. (2006), 'Total eclipse aficionados seek out the best observational spots', *Physics Education*, **41**, blz. 193-195.
7. Den Tonkelaar, J.F. (1972), *Het Strandweer*, KNMI Wetenschappelijk rapport WR 72-10; zie ook Können, G.P. (1983), *Het weer in Nederland*, Thieme Zutphen blz. 57-58.
8. Lynch, D.K. en Livingston, W. (2006), *Licht en kleur in de natuur*, deel 84 van de Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur en Techniek, Uitgeverij Veen Magazines, Diemen, par. 7.6.
9. Knip, K. (2005), 'Zonnebeeldjes'. Rubriek 'Alledaagse Wetenschap', *NRC Handelsblad*, 16 oktober 2005.
10. Blackwell, H.R. (1946), 'Contrast thresholds of the human eye', *Journal of the Optical Society of America*, **36**, blz. 624-643.
11. Tousey, R en Hulburt, E.O. (1947), 'Brightness and polarization of the daylight sky at various altitudes above sea level', *Journal of the Optical Society of America*, **37**, blz. 886-896.
12. Tousey, R en Hulburt, E.O. (1948), 'The visibility of stars in the daylight sky', *Journal of the Optical Society of America*, **38**, blz. 177-183.
13. Tousey, R. en Koomen, M.J. (1953), 'The visibility of stars and planets during twilight', *Journal of the Optical Society of America*, **43**, blz. 177-183
14. Können, G.P., Schoenmaker A.A. en Tinbergen J. (1993), 'A polarimetric search for ice crystals in de upper atmosphere van Venus', *Icarus* **102**, blz. 62-75.
15. Sharp, W.E., Silverman, S. M. en Lloyd, J.W.F. (1971), 'Summary of sky brightness measurements during eclipses of the sun', *Applied Optics* **10**, blz. 1207-1210.
16. Hattinga Verschure, P.-P. (2007), *Optische verschijnselen: waarnemen en documenteren*. Vereniging voor Weerkunde en Klimatologie, Utrecht.
17. Herranen, E. (2006), *Total solar eclipse in Turkey 29.03.2006*, [http://www.ursa.fi/~mellon/aurinko/index2006\\_en.shtml](http://www.ursa.fi/~mellon/aurinko/index2006_en.shtml).
18. Können, G.P. en Baede, A.P.M. (1999), 'Totale verduistering tijdens totale bewolking', *Zenit*, **24** (11), eclipsbijlage, blz. 6.
19. Dorland, R. van (1999), *Video-opname met vast diafragma van de Europese zonsverduistering van 1999*, privé-opname.
20. Sharp, W.E., Lloyd, J.W.F en Silverman, S. M. (1966), 'Zenith intensity and color during the total solar eclipse of 22 July 1963', *Applied Optics* **5**, blz. 787-792.
21. Shaw, G.E. (1975), 'Sky brightness and polarization during the 1973 African eclipse', *Applied Optics* **14**, blz. 388-394.
22. Können, G.P. (1987), 'Skylight polarization during a total eclipse: a quantitative model', *Journal of the Optical Society of America A*, **4**, blz. 601-608.
23. Horváth, G., Pomozi, I. en Gál, J. (2003), 'Neutral points of skylight polarization observed during the total eclipse of 11 August 1999', *Applied Optics* **42**, blz. 465-475.
24. Silverman, S. M. en Mullen, E. G. (1975), 'Sky brightness during eclipses: a review', *Applied Optics* **14**, blz. 2838-2843.
25. Lloyd, J.W.F, Silverman, S. M. (1971), 'Measurements of the zenith sky intensity and spectral distribution during the solar eclipse of 12 November 1966 at Bage, Brazil, and on an aircraft', *Applied Optics* **10**, blz. 1215-1219.
26. Dandekar, B.S, en Turtle, J.P. (1971), 'Day sky brightness and polarization during the total solar eclipse of 7 March 1970', *Applied Optics* **10**, blz. 1220-1224.
27. Carman, E.H., Skinner, R.J. en Heeran, M.P. (1981), 'Zenith sky brightness and airglow emissions during the equatorial solar eclipse of 30 June 1973', *Applied Optics* **20**, blz. 780-785.
28. Mitchell, S.A. (1951), *Eclipses of the sun*, Columbia University Press, 5<sup>th</sup> edition, blz. 396.
29. Waldmeier M. (1941), *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung*, Becker & Erler, Leipzig, blz. 235.
30. Flammarion, C. (1879), *Astronomie Populaire, description générale du ciel*, Marpon et Flammarion, Paris; Nederlandse vertaling: *De Wonderen des Hemels*, Thieme Zutphen, blz. 206 van de 3<sup>e</sup> druk.
31. O'Mearn, S.J. (1999), 'Strange Eclipses', *Sky and Telescope* **98**, blz. 116-120.
32. Lawrence, P. (2006), *A total eclipse of the Sun, 2006 March 29th from Southern Turkey*, <http://www.digitalsky.org.uk/solar/tse-20060329/tse.html>.
33. Salm, A. van der (1991), *Video-opname van de Mexicaanse zonsverduistering van 1991*, privé-opname.
34. Botley, C.M. (1970), 'Lunar rainbow', *Weather* **25**, blz. 287-288 (ingezonden brief).
35. Maunder, E.W. (1901), 'The comet and the eclipse', *The Observatory* **24**, blz. 373-376.
36. Pohn, H.A., Radin, H.W en Widley, R.L. (1969), 'The Moon's photometric function near zero phase angle from Apollo 8 photography', *The Astrophysical Journal, 2nd series*, **157**, blz. L193-L195.
37. Pohn, H.A., Radin, H.W en Widley, R.L. (1969), 'Theoretical photometry', in *Analysis of Apollo 8 photography and visual observations*, NASA SP-201, blz. 40-41.
38. Whitacker, E.A. (1969), 'An investigation of the lunar heiligen-schein', in *Analysis of Apollo 8 photography and visual observations*, NASA SP-201, blz. 38-40.
39. Link, F. (1971), *Lunar eclipses*, in Z. Kopal (ed.) *Physics and astronomy of the Moon 1st Ed*, blz.161-227, Academic Press, New York, London.
40. Rougier, G. (1933), 'Photométrie photoélectrique globale de la lune', *Annales de l'observatoire de Strasbourg* **2**, blz. 205-339 (blz. 318).
41. Martynov, D.Ya. (1960), 'The visual stellar magnitude of the sun, the moon and the lux', *Sovjet Astronomy AJ*, **3**, blz. 633-644.
42. Hapke, B. (1971), *Optical properties of the lunar surface*, in Z. Kopal (ed.) *Physics and astronomy of the Moon 2nd Ed*, blz.155-211, Academic Press, New York, London, blz. 158.