

Hogere regenbogen in 't vrije veld

Na eeuwen van misverstanden over de plaats en twijfel over de zichtbaarheid van de derde regenboog in de natuur, is hij in 2011 onomstotelijk vastgelegd. Daarna ging het hard: een maand later volgde de vierde boog, een jaar later de vijfde en nog een jaar later volgde de detectie van sporen van de zevende regenboog. Alles met dank aan de ontwikkeling van de digitale fotografie. Een simpele extrapolatie van de onderlinge posities van de eerste regenboog (op 42° van het tegenpunt van de zon) en tweede boog (8° buiten de eerste boog) legt de plaats vast waar eeuwenlang tevergeefs naar de derde regenboog is gezocht [1]: nóg ietsje verder richting zon. In 1701 toonde Halley aan dat dit een vergissing is: de derde boog staat aan de andere kant van de hemel, namelijk op zo'n 40° van de zon. Maar sinds deze 'nieuwe' aanwijzing zijn er de afgelopen driehonderd jaar toch maar een handvol mogelijke waarnemingen bekend, vaak van dubieus karakter: sommige

zijn terug te voeren op een misidentificatie van de 46° halo die in hetzelfde gebied verschijnt, andere hebben betrekking gehad op de 'overtallige bogen' aan de binnenkant van de eerste regenboog (figuur 1), en weer andere hebben betrekking gehad op een regenboog die is opgewekt door het spiegelbeeld van de zon in water [2]. Uiteindelijk bleven er sinds 1700 maar een drietal mogelijke waarnemingen over van de derde regenboog over – alle visueel.

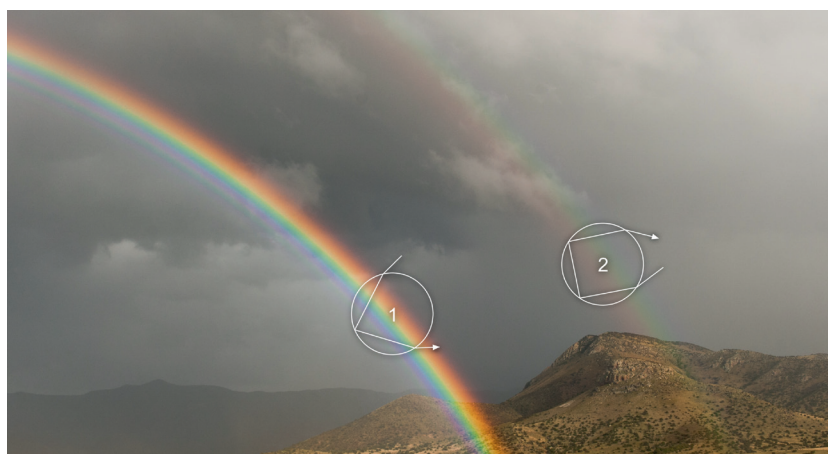
De plaats van een hogere-orde regenboog volgt uit een simpele vuistregel: een verplaatsing van 90° van een boog van orde n in de richting van zijn blauwe kleur geeft de positie van de boog van orde $n+1$. Dus: de verplaatsing van de eerste regenboog (via het tegenpunt van de zon) levert, op zo'n 50° van het tegenpunt, de tweede boog op met omgekeerde kleurvolgorde; de volgende verplaatsing gaat richting zon en levert de derde boog op, op zo'n 40° van de zon. Uit dit regeltje volgt dat de derde en vierde boog dicht

bij elkaar moeten staan, net als de eerste en tweede, met de rode kanten naar elkaar toe. De vijfde staat weer tegenover de zon, in het gebied waar ook de eerste en tweede te vinden zijn.

De tweede boog is een factor acht zwakker dan de eerste boog; de derde boog is nog een factor drie zwakker en de vierde een volgende factor drie. Op zich vormt dat geen belemmering, maar het probleem is dat de derde en vierde boog verschijnen in een gebied waar de achtergrondstraling twee ordes van grootte hoger is dan in het gebied van de eerste en tweede regenboog. Deze heldere achtergrondstraling is afkomstig van de *zero-order glow* (licht dat zonder inwendige reflectie door de druppels heen is gegaan) en is zelfs in optimale omstandigheden dus niet te vermijden.

In mei 2011 was het opeens raak: geïnspireerd door een analyse van de Amerikaan Raymond Lee en de Brit Philip Laven, richtte de Duitser Michael Grossmann tijdens een zware bui zijn camera lukraak op het betreffende gebied en na wat beeldbewerking was de derde regenboog daar! Grossmann zette zijn foto op een Duits weblog om anderen te inspireren – en een maand later maakte de Duitser Michael Theusner een iconische foto waar zowel de derde als de vierde regenboog prachtig op staan (figuur 2).

Naar aanleiding van deze successen, die al na vier maanden in *Applied Optics* gepubliceerd werden, besloot de Nederlandse fysicus Harald Edens, werkzaam als bliksemonderzoeker op het Langmuir Laboratory for Atmospheric Research in New Mexico (Verenigde Staten), de volgende uitdaging aan te gaan: de vijfde regenboog. Deze boog is drie keer zwakker dan de vierde regenboog, maar terwijl het rode deel van deze boog schuil gaat achter de tweede regenboog, verschijnt het groene en blauwe deel van deze (brede) regenboog in het donkere gebied



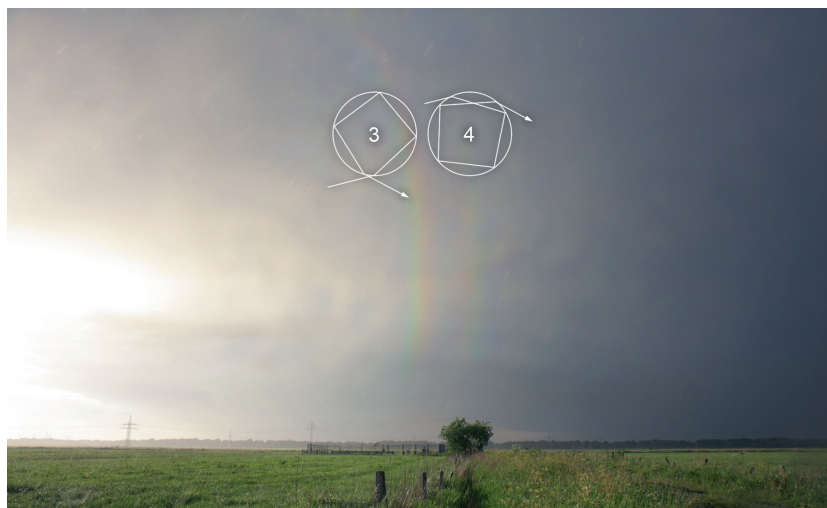
Figuur 1 De welbekende eerste en tweede regenboog; de diagrammen tonen van de betreffende boog de lichtweg van de regenboogstraal. Tussen de bogen in is de hemel het donkerst. Deze donkere strook, de band van Alexander, staat bij regenboogjagers ook wel bekend als de *window of opportunity*. Bij afwezigheid van andere strooiers dan druppels, levert uitwendige reflectie op de druppels de dominante bijdrage tot zijn licht. De extra boogjes aan de binnenkant van de eerste regenboog, die ontstaan door interferentie, worden soms ten onrechte aangezien voor de derde regenboog. (Foto door H.E. Edens, Magdalena NM, Verenigde Staten, 22 september 2013, 23:36 UTC; zonshoogte 17.6°).

tussen de eerste twee regenbogen in, het gebied dat door regenboogjagers ook wel eens wordt aangeduid als het *window of opportunity*.

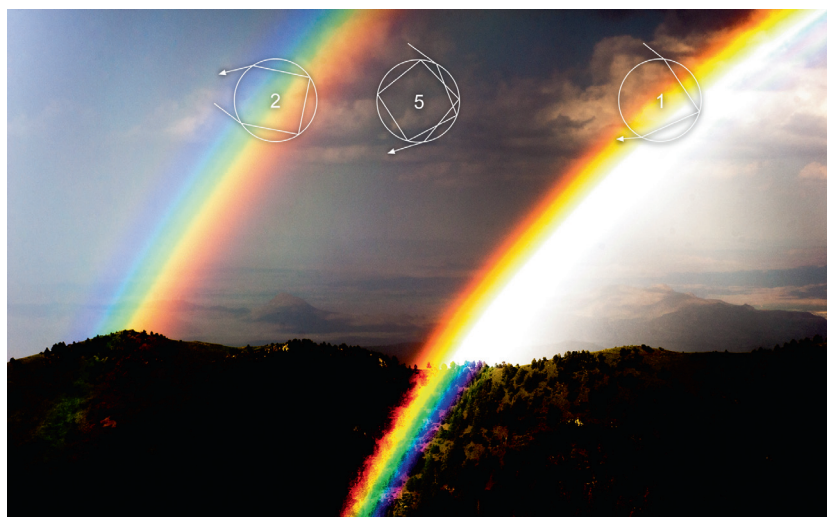
Edens woont in een gebied met zeer heldere luchten en daardoor met een meer dan gemiddelde kans op exceptioneel heldere regenbogen. In 2012 had hij beet: het groen en blauw van de vijfde regenboog manifesteerde zich niet alleen in de contrastversterkte foto (figuur 3), maar zelfs in het origineel (figuur 4). Ook op eerdere regenboogfoto's die hij in New Mexico maakte, bleek de vijfde zichtbaar. Niemand had dit verwacht: zijn presentatie van deze waarnemingen tijdens de elfde Conference on Light and Color in the Open Air (Fairbanks, 2013) sloeg dan ook in als een bom.

Hiermee is het verhaal niet ten einde. Nadere analyse wees uit dat er een kans bestaat dat ook de zevende regenboog boven zijn achtergrond uitgetild kan worden (dit in tegenstelling tot de zesde regenboog). Deze zevende regenboog, op zo'n 65° van de zon, verschijnt in een tweede, minder bekend *window of opportunity*, op een plaats waar de *zero-order glow* een factor vijf zwakker is dan bij de vierde boog. De brede gekleurde band van de zevende boog is weliswaar zo'n vijftien keer zwakker dan de vierde boog, maar dat verlies wordt deels goedge maakt door de minder sterke achtergrond. Daarnaast kan de situatie met een factor twee verbeterd worden door de (sterk gepolariseerde) boog te detecteren met een polarisatiefilter. Bij het doorspitten van zijn fotoarchief vond Edens inderdaad een geval waar sporen van de zevende regenboog aanwezig lijken te zijn.

Blijft de voor deze rubriek interessante vraag of de hogere bogen 'met de wijsheid van nu' ook visueel te zien zijn. Dat blijkt voor de derde regenboog zeker het geval: zowel bij de eerste fotografische waarneming als bij latere gelegenheden is hij visueel waargenomen. Je moet wel je best doen en de omstandigheden moeten meewerken: transparante lucht, regendruppels beschenen door de zon die zelf achter een geïsoleerde wolk zit, donkere achtergrond. Visuele waarnemingen van de vierde boog zijn nog niet gerapporteerd, al lijkt het gezien de onderlinge intensiteitverhouding met de derde boog (figuur 2) niet bij voorbaat een onmogelijkheid. Verder lijkt



Figuur 2 Tweede foto ooit van de derde regenboog en tevens eerste foto ooit van de vierde regenboog. De bogen verschijnen aan de zonzijde van de hemel en zijn zichtbaar gemaakt door middel van contrastversterking; het landschap op de voorgrond is niet contrastversterkt. Net als de eerste en tweede regenboog staan de derde en vierde regenboog met de rode zijden naar elkaar toe. Ze staan echter dicht bij elkaar. (Foto door M. Theusner (Schiffdorf, Duitsland), 11 juni 2011, 18:19 UTC; zonshoogte 10.9°).



Figuur 3 Eerste foto ooit van de vijfde regenboog. De groene en daarnaast de blauwe zweem zijn afkomstig van de vijfde regenboog. Ze zijn zichtbaar omdat ze in de donkere band van Alexander verschijnen, tussen de eerste en tweede regenboog. Het rode deel van de vijfde regenboog overlapt met de tweede regenboog en wordt daardoor overstraald. De foto is contrastversterkt; figuur 4 toont het origineel. (Foto door H.E. Edens, Langmuir Laboratory, NM, Verenigde Staten, 8 augustus 2012, 23:50 UTC; zonshoogte 26.4°).



Figuur 4 Oorspronkelijke versie van figuur 3. In deze onbewerkte foto is de groene zweem die afkomstig is van de vijfde regenboog nog steeds te zien.

G.P. Können heeft vanaf zijn promotie op AMOLF tot aan zijn pensionering gewerkt als fysicus op het KNMI.



konnen@planet.nl

het me zeer wel mogelijk de groene zweem van de vijfde regenboog visueel te zien, daar hij zo duidelijk op de foto staat. Serieuze pogingen in die richting zijn nog niet gerapporteerd – Edens zelf had het tijdens zijn waarnemingen te druk met fotograferen om een serieuze poging tot visuele waarneming er bij te doen. Het ver-

schijnsel is zwak, maar de ervaring in de atmosferische optica leert dat men vaak blind lijkt voor verschijnselen die men niet kent. En, dat als je eenmaal weet waar te kijken, je niet snapt dat je het verschijnsel ooit hebt kunnen missen. Zo is het gegaan met de groene straal bij zonsondergang, bepaalde halo's, de bundels van Haidinger en nog veel meer. Wellicht gaat het met het visueel waarnemen van de vierde of vijfde regenboog net zo.

G.P. Können

Referenties en noten

- 1 De eerste regenboog ontstaat via een lichtweg door de druppel die één inwendige reflectie ondergaat, de tweede boog via een lichtweg die twee inwendige

reflecties ondergaat, en zo verder. Licht dat géén inwendige reflectie ondergaat kan geen regenboog vormen, dit omdat de deflectiefunctie van deze lichtweg geen stationair punt heeft. Dit laatstgenoemde licht verschijnt aan de zonzijde van de hemelkoepel en wordt wel *zero-order glow* genoemd.

- 2 Het is ironisch dat deze boog vrijwel precies in het gebied verschijnt waar men vroeger dacht dat de derde regenboog zich moest bevinden.
- 3 De artikelen over de detectie van de derde en van de vierde regenboog en het artikel over vroegere mogelijke visuele waarnemingen van de derde regenboog verschenen in het *Feature Issue on Light and Color in the Open Air* van *Applied Optics* van 2011 (1 oktober). Het artikel over de detectie van de vijfde en het artikel over de mogelijke detectie van de zevende regenboog verschenen in het *Feature Issue on Light and Color in the Open Air* van *Applied Optics* van 2015 (1 februari).

Reactie

SolaRoad: een goed idee?

In het septembernummer van het NTvN stond een juichend verhaal over een innovatie in de wegenbouw: fietspaden (en later wellicht wegen) met in het wegdek ingebouwde zonnepanelen. De ontwikkelaars dromen ervan dat voertuigen met energie uit zulke wegdekken worden voortbewogen. Een mooie droom, maar laten we daaraan eens rekenen.

De gemiddelde zonne-instraling in Nederland is ongeveer 110 W/m^2 [1]. Met de in het stuk gemelde energie-opbrengst van 70 kWh/jaar levert dat met enig rekenwerk een efficiëntie op van een kleine 7%. Veel hoger zal niet kunnen, want je wil wel over dat wegdek kunnen rijden. Het moet niet te glad worden en zal dus een groter deel van het licht verstrooien dan een optisch goede glasplaat zal doen.

Een middenklasse auto heeft ongeveer 10 kW op de wielen nodig om

80 km/uur te kunnen rijden [2]. Met die 70 kWh kun je zo'n auto dus 7 uur op 80 km/uur laten rijden, aannemende dat je de opgewekte energie zonder verlies in de auto en op de wielen kunt krijgen. De gemiddeld kilometrage ligt rond de $15.000 \text{ km/jaar/auto}$. Voor die auto bij die snelheid is dus een kleine 30 m^2 SolaRoad nodig. Voor $7,5$ miljoen auto's komt dat op 225 km^2 . Dat is veel, maar zou moeten kunnen: er is in Nederland ongeveer 1000 km^2 'wegverkeersterrein' [3]. Als die auto harder rijdt of vaak afremt en versnelt of wanneer het onmogelijk blijkt om 100% van de elektrische energie op de wielen te krijgen, is evenredig meer energie nodig en dus ook meer fietspad. In de praktijk zal het al gauw gaan om ongeveer de helft van het in Nederland beschikbare oppervlak voor alleen ons personenautopark. En dan heb je uiteraard nog de proble-

men van accu-capaciteit en laadsnelheid. Ik zie dat niet voor mij. Laten we dus voorlopig nog niet aan bussen en vrachtauto's denken.

Ook economisch is het lastig. Die 70 kWh per jaar levert tegen de consumentenelektriciteitsprijs ongeveer 14 euro op. Daarvan moet je de SolaRoad aanleggen en onderhouden. De meerprijs ten opzichte van een gewone weg moet dan wel erg laag worden.

Tinus Pulles

Referenties

- 1 Zie onder andere Jo Hermans, *Energie Survival Gids*, BetaText, 2008.
- 2 David MacKay, *Sustainable Energy without the Hot Air*, www.withouthotair.com.
- 3 <http://statline.cbs.nl/Statweb/publication/?DM=SLNL&PA=70262ned&D1=0,3&D2=0,4,11,52,77,102,412,696&D3=3-6&VW=T>.

SolaRoad: een goed idee!

De berekeningen van de heer Pulles vormen een goede aanvulling op het artikel over SolaRoad in het NTvN. Op twee punten willen we graag een kanttekening toevoegen. In zijn reactie stelt

de heer Pulles dat het rendement niet veel hoger kan worden dan dat van de huidige, eerste pilot, namelijk circa 7%. In deze pilot is echter nog nauwelijks aandacht besteed aan optimalisatie

van de energieoutput. Het primaire doel was een *proof-of-concept* in de praktijk. Door het gebruik van hoogwaardiger zonnecellen, verbetering van de optische eigenschappen van de coating