



Een regenboogreflectie die naar binnen krult

Onlangs verschenen op internet een paar foto's van een merkwuurde, naar binnen gekrulde weerspiegeling van een regenboog. De weerspiegeling trad op in een gerimpeld wateroppervlak. De oorzaak van de krulling is dat wij bij een weerkaatsing op golfjes die v er van ons weg zijn, alleen de 'voor-kant' van de golfjes zien. Daardoor komt dicht bij de horizon het spiegelend vlak van lichtgolvend water scheef te staan.

G.P. Können en C. Floor

G. P. Können houdt zich bezig met halo's, regenbogen en andere verschijnselen in de vrije natuur. C. Floor verzorgt cursussen, workshops, lezingen en geschreven teksten over het weer en aanverwante onderwerpen. Beide auteurs zijn gepensioneerd vanuit het KNMI. Hun eerdere bijdragen aan Zenit (en andere tijdschriften) zijn te vinden op guntherkonnens.com en op keesfloor.nl.

Figuur 1: regenboog boven het Ontariomeer, 23 juni 2008. Vlak bij de horizon krult zijn weerkaatsing naar binnen. Foto: Gary Lynch, Burlington, Canada (43°19' NB, 79° 48' WL). (Bron: Weather Underground)

Figuur 1 toont een heldere regenboog, tegen zonsondergang gefotografeerd vanaf de Canadese westoever van het Ontariomeer. Het exacte tijdstip van de foto is niet gerapporteerd, maar gemakkelijk te achterhalen: omdat wij weten dat de straal van de regenboog 42 graden is, volgt uit het simpel opmeten

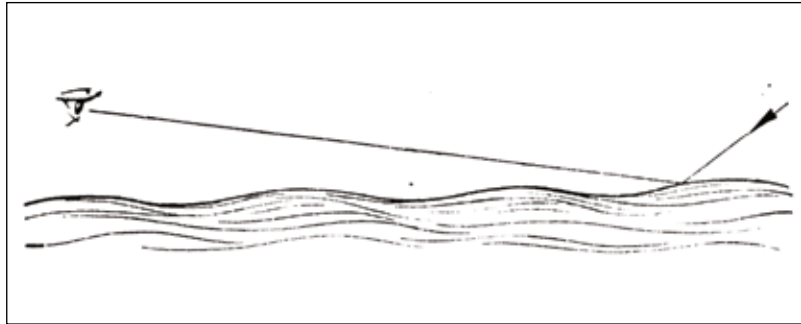
van de foto dat de zonshoogte ongeveer $3,6^\circ$ was. Dit betekent dat de foto om 20:36 plaatselijke (zomer) tijd is genomen – dat wil zeggen 26 minuten voor zonsondergang (zie ref. 1). De zon stond in het noordwesten, op azimut $299,4^\circ$. Voor het tegenpunt van de zon volgt daaruit een azimut van $299^\circ - 180^\circ = 119^\circ$ en voor de gefotografeerde linkervoet van de regenboog dus $119^\circ - 42^\circ = 77^\circ$. Dit betekent dat de foto vrijwel precies in de lengterichting van het 300 kilometer lange meer is genomen, zodat er geen landkenmerken boven de horizon kunnen uitsteken.

Wat kunnen wij verder nog uit de foto opmaken? We zien dat de regenboog abrupt door de horizon wordt afgesneden. Dit betekent dat het onderste deel van het regenscherm van de bui zich achter de horizon moet bevinden – anders zou de boog beneden de horizon door moeten lopen. Bij een ooghoogte van 2 meter is de horizon op 5 kilometer van de waarnemer: het scherp afsnijden van de boog vertelt ons dus dat de bui ten minste 5 kilometer van de fotograaf verwijderd was.

Het merkwaardige van de foto is echter niet de boog zelf, maar zijn weerspiegeling. De vorm hiervan is grotendeels zoals die je die zou verwachten van het spiegelbeeld in een horizontale spiegel, maar dicht bij de horizon gaat het mis:



Figuur 2: detail van figuur 1.



Figuur 3: Minnaert's illustratie van de oorzaak van de scheefheid van het spiegelend vlak van golvend water bij scherpe kijkrichting. Omdat de waarnemer slechts de voorkant van verre golven ziet, werken deze golven als een spiegel die scheef naar boven is gericht.

het spiegelbeeld krult daar naar binnen (zie figuur 2).

De verklaring van dit verschijnsel kan afgeleid worden uit Minnaerts boek *De natuurkunde van 't vrije veld* (ref. 2). In paragraaf 23 daarvan behandelt hij het wonderlijke verschijnsel dat men in een groot golvend wateroppervlak vrijwel nooit een weerspiegeling ziet van schepen, bomen aan de overkant en andere lage objecten. De onderste 30° van de hemel wordt doorgaans gewoon niet weer- spiegeld! Alvorens de regenboog-reflectie te behandelen, gaan wij hier nader op in.

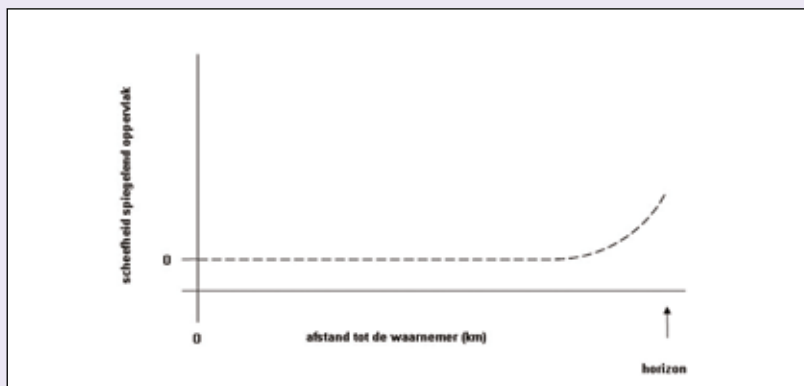
Golfoppervlakken als spiegels

Spiegelbeelden op golven komen hoofdzakelijk tot stand via weerkaatsingen op de steilste delen van een golf, oftewel op de buigpunten van de golven. De weerkaatsing van objecten via andere delen van een golf – die als bolle of holle spiegels werken – leveren een zoveel zwakker en diffuser spiegeling op, dat ze in deze beschouwing verwaarloosd kunnen worden. Uiteraard heeft iedere golf die van ons wegloupt, twee buigpunten: één die naar ons toe helt en één die van ons af helt. Omdat een golvend oppervlak doorgaans bestaat uit vele golfjes van allerlei steilheden en afmetingen die door elkaar heen

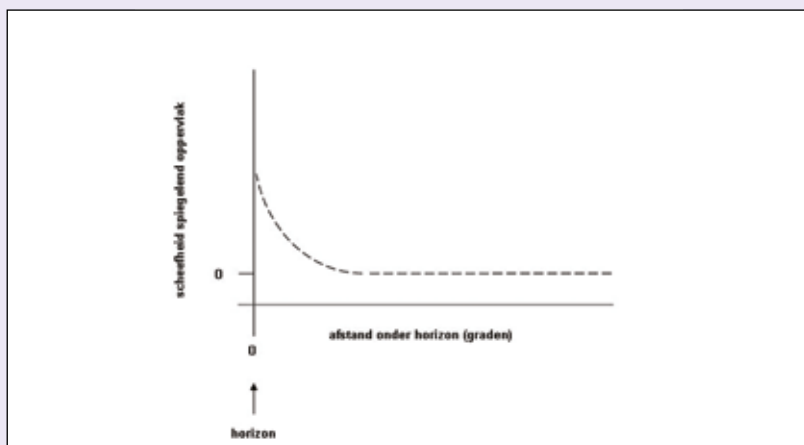
lopen, komt de spiegelende werking tot stand door buigpunten die verschillende hoeken met de horizon maken.

Als wij nu steil naar beneden in lichtgolvend water kijken naar de weerspiegeling van een voorwerp boven de horizon, dan zien wij in zekere zin het spiegelbeeld zoals je dat in een horizontale spiegel zou verwachten: gemiddeld gesproken is de hoek van inval namelijk gelijk aan hoek van uittrede. Weliswaar danst het spiegelbeeld van een ver, helder lichtpunt voortdurend alle kanten op, maar intussen blijft het toch steeds in de buurt van de plaats waar je bij vlak water het spiegelbeeld zou verwachten. Het feit dat een golvend oppervlak zich hier toch als een spiegel manifesteert – zij het een slechte – komt doordat de golfjes even vaak hun voorkant als hun achterkant naar de waarnemer keren.

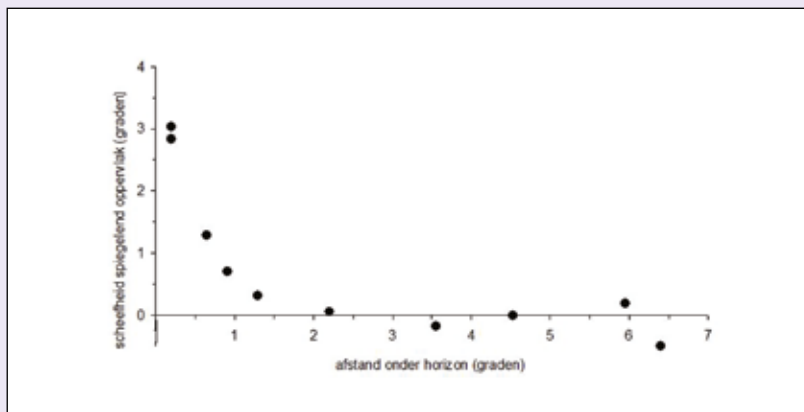
Anders wordt het als wij ver weg kijken, dus naar de spiegelende werking vlak bij de horizon (ref. 2,3). In dat geval doen de buigpunten achter de golven niet mee, omdat ze aan het zicht onttrokken zijn (zie figuur 3). Alleen de voorkanten van de golven spiegelen nog licht naar ons toe. Aangezien die golfdelen naar ons toe hellen, spiegelen ze licht naar ons toe dat afkomstig is van ho-



Figuur 4: schematische weergave van de scheefheid van het spiegelend vlak op lichtglowend water. Vlak bij de waarnemer weerkaatst het oppervlak zoals je dat van een horizontale spiegel zou verwachten; verderop zoals een scheefstaande spiegel dat zou doen.



Figuur 5: zoals figuur 4, maar nu is de scheefheid uitgezet als functie van de hoek waarmee de waarnemer onder de horizon kijkt.



Figuur 6: gemeten scheefheid van het spiegelend oppervlak als functie van de afstand onder de horizon. De meetpunten zijn verkregen uit metingen van de afstand van punten op de rode buitenkant van de regenboog tot aan hun spiegelbeeld(en). (zie het kaderstuk op blz. 176)

gere delen aan de hemel dan je van een horizontale spiegel zou verwachten.

Door dit alles werkt golvend water als een spiegel die in de verte naar boven krult – met onder meer het door Minnaert genoemde effect tot gevolg dat je van ver verwijderde objecten vrijwel nooit een spiegelbeeld ziet. In figuur 4 is de vorm van het reflecterend oppervlak schematisch weergegeven¹. Figuur 5 geeft aan hoe de scheefheid van de 'effectieve spiegel' is als functie van de afstand (in graden) tot de horizon². Er is een verband tussen de scheefheid van het spiegelend oppervlak en de steilheid van de golven, dat wil zeggen de verhouding hoogte/lengte van een golf. Dit wordt besproken in het kaderstuk op blz. 175.

Metingen en interpretatie van de scheefheid van spiegelend water

Via het uitmeten van de afstanden tussen de regenboog en zijn reflectie(s) hebben wij een echte versie van figuur 5 gemaakt. Het resultaat is te zien in figuur 6. De grafiek is tot stand gekomen door op verschillende plaatsen op de regenboog te meten hoe ver het midden van de verbindingslijn

¹ In feite begint de scheefheid bij een minder scherpe kijkrichting dan de figuur en tekst suggereren, omdat het van ons afgekeerde deel van de golf het licht minder effectief weerkaatst dan zijn voorkant. Dit komt doordat deze effectiviteit evenredig is met de sinus van de hoek die een lichtstraal met (het buigpunt van) een golf maakt, en die hoek is voor het afgekeerde deel van de golf kleiner. Dit effect laten wij hier verder buiten beschouwing.

² Uiteraard zijn figuur 4 en 5 direct in elkaar om te rekenen via transformatie van de horizontale as: als d de afstand in meters is en de ooghoogte 2 meter bedraagt, dan is bij verwaarlozing van de kromming van de aarde het verband van d met de hoekafstand a gegeven door $\tan a = 2/d$.

tussen een regenboogpunt en zijn reflectie boven de horizon ligt. Zie het kader op blz. 176 voor nadere uitleg. Bij de uitmeting werden punten langs de rode buitenkant van de boog beschouwd (en dus niet in het groen, zoals in het kaderstuk) – hetgeen leidt tot grotere nauwkeurigheid. De figuur toont dat de scheefheid van het spiegelen vlak merkbaar begint te worden bij reflecties die minder dan 2° van de horizon plaats vinden – dat

wil zeggen op meer dan 30 meter afstand van de waarnemer. Bij de horizon is de scheefheid van het spiegelen vlak opgelopen tot 3°, hetgeen overeenkomt met een steilheid H/L van de golven van 1/60. Deze steilheid is veel kleiner dan die van volgroeide golven (zie het kaderstuk hieronder). Dit suggereert dat de golven deininggolven zijn, hetgeen er op duidt dat de wind in de periode voorafgaand aan de foto aan het wegvallen was. Hoe hoog de

golven zijn geweest, is uit de reflectie van figuur 6 niet af te leiden.

Waarom zo zeldzaam?

Met dit alles lijkt het verschijnsel op figuur 1 afdoende verklaard te zijn. Alle informatie over de toestand van de golven die te verkrijgen is, lijkt uit de foto te zijn geperst. Blijft de vraag waarom de gekrulde regenboogreflectie zo zeldzaam is. Hiervoor zijn verschillende redenen aan te voeren. Allereerst moeten de golven niet

Hoogte, vorm en steilheid van watergolven

De hoogte H van golven wordt in de oceanografie gemeten van golftop tot golfdal – dus de hoogte is twee maal de amplitude. Deze keuze komt voort uit de meetpraktijk vanaf schepen en stoelt op het feit dat watergolven niet symmetrisch zijn: de toppen zijn scherper dan de dalen. In zijn algemeenheid kan het profiel van een enkelvoudige watergolf beschreven worden door een omgekeerde trochoïde, waarbij een trochoïde de baan is die een knijper beschrijft als die ergens aan een spaak van het wiel van een rijdende fiets is vastgemaakt.

Naast hoogte H en lengte L is de steilheid een belangrijke afgeleide karakteristiek van watergolven. De steilheid H/L is de verhouding van de hoogte H tot zijn golflengte L . De waarde ervan wordt doorgaans uitgedrukt als een breuk, dus bijvoorbeeld 1/20 in plaats van 0,05.

Uit de theorie volgt dat golven met een steilheid groter dan 1/7 niet kunnen bestaan: steilere golven breken (storten over), zoals wij dat in de branding zien gebeuren. Golven die in evenwicht zijn met de windsnelheid en dus volgroeid zijn, hebben een steilheid van

ongeveer 1/25¹; windgolven die nog aan het groeien zijn, hebben een grotere steilheid. Volgroeide golven noemt men wel *zeegang*; als de wind wegvalt, lopen de eerder gevormde golven weg als *deining*, waarbij hun steilheid almaar afneemt en ze bovendien steeds gladder worden. Wordt de steilheid kleiner dan 1/40, dan is het profiel van de golf vrijwel symmetrisch en niet meer te onderscheiden van een sinus. Voor meer details, zie ref. 4-6. De tabel hiernaast geeft (voor een sinusvormige golf²) het verband tussen de steilheid H/L en de hoek die het buigpunt maakt met de horizontaal.

steilheid golf	scheefheid buigpunt
$1/\pi \approx 1/3^*$	45°
1/7**	24°
1/10	17°
1/12	15°***
1/25****	7°
1/40	4,5°
1/60	3°

* standaard sinusfunctie ($y = \sin x$). Deze steilheid komt bij watergolven niet voor.

** theoretisch maximum voor watergolven.

*** waarde die Minnaert (ref. 2) noemt in par. 23.

**** volgroeide golf.

¹ Dit getal is een constante, daar zowel de hoogte als de lengte van volgroeide golven kwadratisch afhangt van de (wind)snelheid.

² Het verband tussen de scheefheid van het buigpunt s en de steilheid H/L van de golven is gegeven door de formule $H/L = \text{tg}(s)/\pi$.

Het uitmeten van de regenboogreflectie

Het uitmeten van de scheefheid van het spiegelend oppervlak die tot de gekrulde regenboogreflectie leidt, gebeurt door de afstand te bepalen van een punt op de

regenboog tot zijn reflectie in het water. Het zoeken naar die reflectie wordt vergemakkelijkt als wij begrijpen dat figuur 4 in alle richtingen geldt; daardoor heeft

het effectief spiegelend oppervlak van golvend water de vorm van een soepbord, met de waarnemer in het midden. Het spiegelvlak helt dus niet zijdelings. Dit betekent dat een punt van de regenboog altijd recht boven zijn reflectie moet staan, oftewel: de verbindingslijn tussen regenboogpunt en zijn reflectie staat altijd loodrecht op de horizon.

De figuur in dit kader toont hoe een meting in zijn werk gaat. Het midden van de verbindingslijn regenboog/reflectie geeft de plek die het betreffende regenboogpunt spiegelt. Ligt dat punt midden op de horizon, dan is de spiegel horizontaal; ligt het boven de horizon, dan helt de spiegel (naar de waarnemer toe).

Het *rechter*staafje in de figuur doet wat je van een horizontale spiegel verwacht: zijn midden is op de horizon. Dit is niet zo bij het *linker*staafje, waarvan het midden ruim boven de horizon zit. Via de ijkingen die aan het begin van het artikel zijn beschreven, vind je dat het midden van het staafje zich $1,0^\circ$ boven de horizon bevindt. Dit betekent dat bij de onderkant van dat staafje (ongeveer $0,7^\circ$ onder de horizon) de spiegel 1° scheef staat. Het *tussengelegen* staafje heeft zijn midden weer ongeveer waar je het verwacht, dus op de horizon. Dit staafje blijkt echter een tweede spiegelbeeld te doorkruisen, namelijk in het gebied vlak bij de horizon, waar de gereflecteerde regenboog sterk naar binnen is gekruld. Bij de horizon staat het spiegelend vlak maximaal scheef.



Ieder verticaal staafje in deze figuur verbindt een plek in het groene deel van de regenboog met zijn weerkaatsing. Het midden van zo'n staafje geeft het spiegelpunt aan. Als dat midden boven de horizon is, staat het spiegelend vlak scheef. Merk op dat het middelste staafje twee spiegelbeelden lokaliseert: één onderaan het staafje en één vlak bij de horizon.



Figuur 7: regenboog boven de Grote Oceaan. De zeegolven bij de horizon zijn te ruw om voor een weerspiegeling te kunnen zorgen. Alleen in het dunne waterlaagje op het natte zand vlak bij de waterlijn is een weerspiegeling te zien. Foto: Jamie Heeringa, NW kust van Amerika, 31 oktober 2009. (Bron: Flickr)



Figuur 8: regenboog en weerspiegeling daarvan in water. Net als in figuur 1 krult de weerspiegeling bij de horizon naar binnen. Foto: Peter Shanks, Hobart, Tasmanië, Australië, 18 juli 2010. (Bron: Flickr)

te wild zijn, zodat ze een redelijk vlak oppervlak hebben dat het licht fatsoenlijk kan weerkaatsen. Een ruwe zee laat zelfs helemaal geen regenboogreflectie zien (figuur 7). Het lijkt ons dan ook geen toeval dat de golven waarin de gekrulde reflectie verscheen, deininggolven zijn geweest; deze hebben nu eenmaal een gladder uiterlijk dan groeiende of volgroeide golven. Een groot meer – zoals het Ontariomeer – heeft een grotere kans om met deining te maken te hebben dan een klein meertje, omdat de golven verder kunnen lopen voordat ze de oever bereiken. Een factor die wellicht ook bijdraagt is de golfrichting – als de kammen loodrecht op de zichrichting staan, worden verticale structuren makkelijker afgebeeld.

Toch is dit alles naar onze smaak niet helemaal voldoende om de

zeldzaamheid volledig te verklaren. Een belangrijke extra factor is de onbekendheid met het fenomeen: wat je niet kent, zie je vaak ook niet. En omgekeerd: als je weet waar je op moet letten, dan openbaart het effect zich bijna als vanzelf. In een vorig artikel (ref. 7) hebben wij daar ook al een paragraaf aan gewijd, onder het kopje ‘*Wat de boer niet kent, dat ziet hij niet*’. Tijdens het schrijven van dit artikel werden de auteurs meteen met de waarheid van deze bewering geconfronteerd, toen bij wat speurwerk op internet inderdaad meerdere voorbeelden opdoken. Ten bewijze hiervan, zie figuur 8.

Referenties:

1. Direct te berekenen op de website Naval Oceanography Portal, <http://www.usno.navy.mil/USNO/astronomical-applications/data-services>
2. Minnaert, M. (1968) *De natuurkunde van 't vrije veld, deel 1: Licht en kleur in het landschap*, Thieme, Zutphen, paragraaf 23, http://www.dbnl.org/tekst/minn004natu01_01/minn004natu01_01.pdf
3. Lynch, D.K. en Livingston, W (2006) *Licht en kleur in de natuur*, deel 84 van de Wetenschappelijke Bibliotheek van Natuur en Techniek, Van Veen Magazines, Amsterdam, paragraaf 3.15
4. Groen, P. (1974) *De wateren van de wereldzee*, De Boer Maritiem Handboeken, Bussum, ISBN 9022813010
5. Groen, P. en Dorrestein, R. (1976) *Zeegolven*, KNMI-opstellen op oceanografisch en maritiem meteorologisch gebied No 11, Staatsdrukkerij, UDC 5514663/4
6. Laing, A.K. (Editor), (1998), *Guide to wave analysis and forecasting*, Second Edition, WMO rapport 702, WMO Zwitserland, ISBN 92-63-12702-6. Te downloaden van <http://www.wmo.int/pages/prog/amp/mmop/documents/WMO%20No%20702/WMO702.pdf>
7. Können, G.P. (2008), *Halovlek bij ons schaduwpunt*, *Zenit* 35, 545-547