

Zien Onderwater, Fysica en Fysiologie

Underwater Vision, Physics and Physiologie

Nico A.M. Schellart

Samenvatting

De optische eigenschappen van duikwaters overheersen in sterke mate het zien onderwater. Er treedt een sterke beperking op van de zichtafstand, en daardoor het zien van details. Naast een sterke kleurvertekening is ook het onderscheiden van kleuren minder goed mogelijk.

Fluorescerend gele voorwerpen zijn i.h.a. het best zichtbaar (veiligheid).

Het masker geeft problemen bij het schatten van afstand en grootte, maar de vertekening en beeldkromming zijn van geen belang.

Fysiologische effecten t.g.v. van de hogere pN_2 en pO_2 zijn voor diepten tot ca. 50 meter van weinig belang. Zowel de gezichtsscherpte, de contrastgevoeligheid, de spectrale gevoeligheid en het kleuronderscheidend vermogen zijn nauwelijks of niet aangetast.

Summary

The optical properties of diving waters strongly dominate under water vision. Generally, the distance of vision is strongly reduced and consequently the vision of details. In addition to a strong distortion of colour, also the discrimination of colour is diminished.

In general, fluorescent yellow objects are best visible (safety).

The face mask gives problems in the estimation of distance and size, but the distortion of shape and image curvature are irrelevant.

Physiological effects due to the higher pN_2 and pO_2 are up to a depth of ca. 50 meter hardly of importance. Acuity, contrast sensitivity, spectral sensitivity, and the ability of colour discrimination are hardly or not affected.

1. Inleiding

Onze gezichtszin is het belangrijkste zintuig onderwater (OW) om onze omgeving waar te nemen. Ten opzichte van het zien boven water zijn er echter een aantal belangrijke verschillen die het zien OW beperken. Deze hebben allereerst betrekking op de vraag wat er OW overblijft van het hemellicht of evt. kunstlicht en wat de invloed van het masker is. Dit wordt behandeld in §2. Daarna, §3, komt aan de orde in hoeverre hoge partiële gasdrukken en psychologische factoren het zien beïnvloeden. Afstand en grootte schatten zijn voor de duiker belangrijke aspecten van de interpretatie van het visuele onderwaterlandschap. Ook dit wordt in deze paragraaf behandeld.

2. Fysica van het zien onderwater

Onderwateroptica De maximale zichtafstand in de lucht (dampkring) op zeeniveau is meestal vele kilometers, met uitschieters tot 20 m enerzijds (zware mist, afgezien van sneeuwstormen) en 200 km anderzijds. Hieruit blijkt dat zuivere lucht het zichtbare licht nauwelijks absorbeert. Daarentegen wordt het licht in het water sterk geabsorbeerd. De maximale zichtafstand in natuurlijke wateren is 80 m (Saragoza zee) terwijl het minimum ca. 10 cm (Gele Rivier) is. Na breking (en reflectie, beide met i.h.a. gedeeltelijke polarisatie) van het daglicht aan het wateroppervlak vindt in het water naast absorptie verstrooiing plaats. De genoemde verschijnselen zijn sterk afhankelijk van de golflengte (λ) van het licht. Bij toenemende diepte neemt daarom niet alleen de lichtintensiteit af, ook de kleur (spectrale samenstelling) verandert

sterk (Fig. 1). Ook wordt deze samenstelling steeds minder afhankelijk van de blikrichting. In helder water (deeltjes kleiner dan λ) wordt in alle richtingen het achtergrondlicht blauwer omdat blauw licht ongeveer

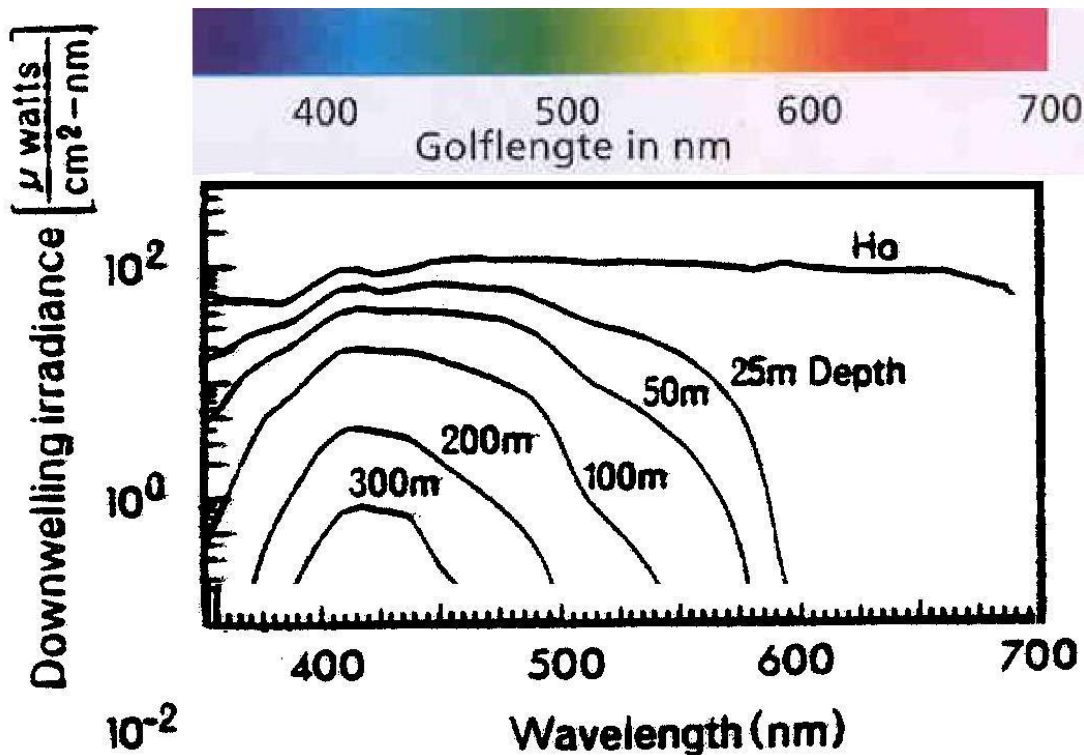


Fig. 1 Intensiteit van het van boven invallend licht voor diverse diepten als functie van golflengte (horizontale as). De gegevens zijn afkomstig van het extreem heldere meer Crater Lake te Oregon (Lythgoe 1970, naar Tyler and Smith, 1967). Het water van dit zoetwatermeer is zo zuiver dat verstrooiing vrijwel alleen plaats vindt aan de watermoleculen. Absorptie onder de 380 en boven de 500 nm is het dominerende proces dat het spectrum bepaald.

12 maal sterker verstrooid wordt dan rood licht, immers, Rayleighverstrooiing gaat met λ^4 . Weliswaar wordt rood licht daardoor beter doorgelaten, maar anderzijds wordt dit licht zeer sterk geabsorbeerd. In helder water ziet op 10 m diepte een rood voorwerp er daarom uit als een zwart voorwerp. Groen ziet eruit als geel. Er is dus een sterke kleurvertekening. In troebel water (colloïdale deeltjes) is de verstrooiing minder λ -afhankelijk. De verstrooiing t.o.v. helder water is echter enorm toegenomen: de sterkte van de verstrooiing gaat met de 6de macht van de deeltjesdiameter (Tyndall verstrooiing). Daarnaast is er sterke absorptie van alle golflengten, zij het in het geelgroene gebied minder. Hierdoor wordt het achtergrondlicht vaak grauwgroen.

Wat er tenslotte van het daglichtspectrum overblijft, is bovendien afhankelijk van de golflengte, het uur van de dag, de zonnestand, de tijd van het jaar, de breedtegraad, de bewolking, de blikrichting, de diepte en de bodemdiepte, het voorkomen van plantaardig micro-organisme (seizoensafhankelijk), en - in mindere mate - van de temperatuur- en zoutgradiënten. Voor kunstlicht geldt in principe hetzelfde als voor natuurlijk licht. Vanzelfsprekend is wel van belang wat voor type lamp gebruikt wordt (gasontlading, jodium of wolfram), omdat dit de "witheid" van het licht bepaald.

Neemt men alle typen water van helder naar troebel tesamen, dan zijn gele voorwerpen gemiddeld het best zichtbaar. Fluorescerende voorwerpen geven een betere zichtbaarheid dan niet fluorescerende voorwerpen. Ook nu zijn gele voorwerpen gemiddeld over alle watersoorten het best zichtbaar.

Zoals uit het bovenstaande duidelijk is, geven absorptie en verstrooiing een sterke afname van helderheids- en kleurcontrast. Omdat de helderheidsniveaus onderwater i.h.a. veel lager zijn dan boven water (Fig. 1) wordt de herkenbaarheid van voorwerpen negatief beïnvloedt. Fig. 2 illustreert de bovengenoemde effecten van verstrooiing en absorptie op het contrast tussen voorwerp en achtergrond.

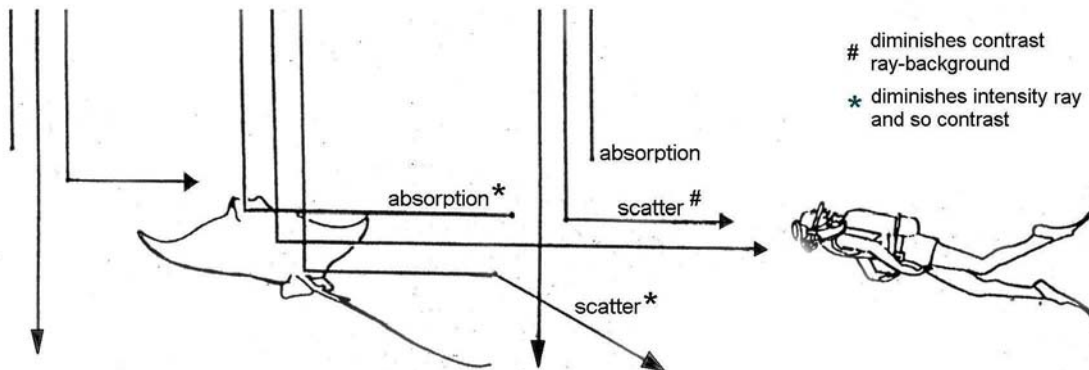


Fig. 2 Verstrooiing en absorptie geven een verlaging van de lichtstroom vanuit de rog. Door verstrooiing van achtergrondlicht komt er bovendien een extra lichtstroom vanuit de richting van de rog. Hierdoor neemt het contrast van de rog t.o.v. de achtergrond met toenemende afstand af.

Uit de richting van het voorwerp, de rog, komt er door verstrooiing ook "vals" licht het oog van de duiker binnen, terwijl een deel van het licht van de rog op weg naar het oog door absorptie en verstrooiing het oog niet bereikt. Hierdoor neemt het contrast en daardoor de zichtbaarheid van de rog sterk af, een effect dat met de afstand tussen duiker en rog toeneemt. De contrastdrempel is ca. 0.04 bij lage fotopische helderheden en 0.005 bij de hoogst bereikbare helderheden onderwater. Hierbij is het contrast C gedefinieerd als $C = \frac{\text{helderheid voorwerp} - \text{helderheid achtergrond}}{\text{helderheid voorwerp} + \text{helderheid achtergrond}}$. Bij hoge helderheden betekent dit dat de helderheid van voorwerp en achtergrond op 0.5% na gelijk zijn. Kent men de contrastdrempel C_{drempel} en de afstand a_{half} waarover het contrast halveert, dan is bij gegeven contrast C_0 op afstand 0 uit te rekenen op welke afstand a_{verdwijn} het voorwerp onzichtbaar wordt:

$$a_{\text{half}} = a_{\text{verdwijn}} / 2 \log(C_0/C_d), \text{ dus } a_{\text{verdwijn}} = 3,32 a_{\text{half}} \log(C_0/C_d).$$

Aan de hand van deze formule is nu in te zien dat verstrooiing + absorptie een enorm effect hebben. Stel dat "het zicht" OW 40 m is (zoals in Rode Zee), dan is a_{verdwijn} ook ca. 40 m. Een zwart duikpak heeft bij flinke helderheid (Rode Zee) een C_0 van ca. 0.8. Stel dat de drempel $C_d = 0.01$, dan volgt direct uit de formule dat $a_{\text{half}} = 6.3$ m. M.a.w. elke 6 m halveert het contrast. Vandaar dat er wat verder weg op foto, film en video nog minder overblijft dan wat wij zien. Immers, onze contrastgevoeligheid is veel beter dan die van fotografische emulsies en het elektronische foto- en video proces.

Het duikmasker Zonder masker zijn we 41 dptr hypermetroop (dit is sterk verziend) ten opzichte van de situatie in de lucht, wat als volgt is te berekenen:

$$d_{\text{water}} = [n_{\text{cornea}} - n_{\text{lucht}}]/r - [n_{\text{cornea}} - n_{\text{water}}]/r, = 46 - 5 \text{ dptr}.$$

met $n_{\text{cornea}} = 1,37$, $n_{\text{lucht}} = 1.0$, $n_{\text{water}} = 1,3$, en r de kromtestraal van de cornea (0.008 m). De bijdrage van de cornea OW is dus toch nog 5 dptr, iets wat vaak vergeten wordt. We kunnen ons zonder masker wel redelijk oriënteren, maar van duik- of snorkelplezier is geen sprake en vislijnen of fijne netten zijn onzichtbaar.

Met het masker wordt het gezichtsvermogen hersteld. De vraag is echter of het masker (onbeslagen, schoon) toch afwijkingen geeft t.o.v. het zien boven water. Allereerst is bij gebruik van maskers het totale binoculaire gezichtsveld (dus met twee ogen) sterk beperkt ten opzichte van zien in de lucht. In de breedte is het ten hoogste 90° en in de hoogte tot $55-70^\circ$. Dus in beide richtingen ruim een halvering ('tunnel zien') ten opzichte van boven water (zonder masker). Hierbij is de begrenzing aan de onderkant het

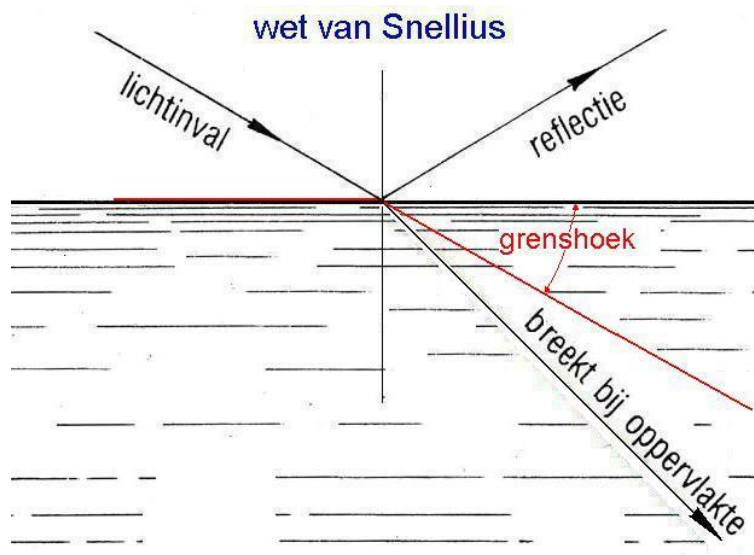


Fig. 3 De wet van Snellius. Is de hoek van inval kleiner and de grenshoek dan wordt al het licht tegen de wateroppervlakte weerkaatst.

meest hinderlijk omdat de uitrusting daardoor slecht te zien is. Een masker bestaande uit twee vlakke glazen heeft als nadeel dat er een verticale band in het binoculaire veld links en rechts een monoculaire band krijgen. Een ander nadeel is dat als het vlak van beide glazen niet in hetzelfde vlak liggen maar een hoek van minder dan 179° maken de binoculaire velden meer dan 20' dispaaraat zijn (verschoven ten opzichte van elkaar). Dit kan hoofdpijn veroorzaken. Een masker met een gebogen glas is het meest ideaal, want het heeft als voordeel dat het gezichtsveld breder is en bovendien minder vertekening geeft (zie hieronder).

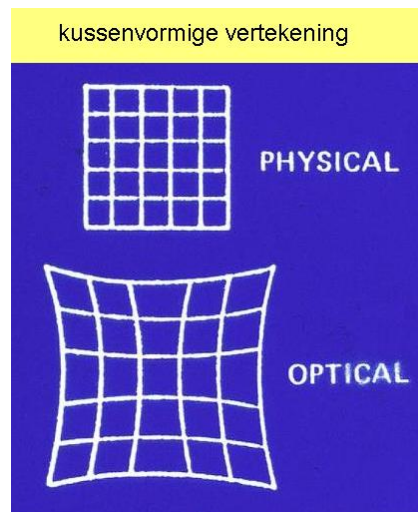


Fig. 4 Kussenvormige vertekening

Als refractie (breking) optreedt vindt er ook altijd reflectie (weerkaatsing) plaats (zie Fig. 3), wat helderheidsverlies geeft van de gebroken lichtstraal. Gezien de beperkte gezichtshoek van het masker is dit echter onder alle omstandigheden een verwaarloosbaar effect.

De beeldvergroting op de optische as is gelijk aan de brekingsindex n van water, dus 1.33. Algemeen geldt dat de vergroting k gelijk is aan:

$$k = n(1 - \sin^2 \theta)^{0.5} / (1 - n^2 \sin^2 \theta)^{0.5}, \quad (\theta \text{ is de hoek van inval})$$

wat direct uit de wet van Snellius volgt. k blijkt progressief met θ toe te nemen, wat betekent dat we met kussenvormige vertekening (Fig. 4) te maken hebben. Uit de noemer volgt ook onmiddellijk de waarde van de grenshoek θ_{max} , te weten 49° ($\sin \theta_{max} = 1/1,33$).

Door de begrenzing van het gezichtsveld t.g.v. het masker valt deze vertekening in een natuurlijke omgeving niet erg op. Zelfs in het zwembad (tegeltjes) is het moeilijk te zien, vermoedelijk door cognitieve beïnvloeding. Behalve de met de excentriciteit (dit is naar buiten) toenemende vertekening neemt ook de kromming van het beeld (naar de waarnemer toe) met de excentriciteit toe (Fig. 5). Kijkt men loodrecht naar de bodem dan blijkt deze aan de randen van het gezichtsveld iets minder diep te zijn. Onderzoek toonde aan dat er na enige tijd onderwater gedeeltelijk gewenning aan deze beeldkromming optreedt, die sneller plaatsvindt naarmate de duiker beter geoefend is (Ross, 1970). Overigens wordt bij de toenemende excentriciteit het beeld snel ietsje onscherp; bij 20° (met $n=1.33$ en een voorwerpafstand van 1 m) is dit maar 8" (boogseconde) maar bij 45° al 35". Maar dit valt al buiten het gezichtsveld van het masker. Onscherpheid impliceert vermindering van de scherptediepte. Ook dit valt mee, respectievelijk 0,3 en 1,2 mm. Dan is er nog kleurschifting ten gevolge van de λ -afhankelijke brekingsindex. De kleurschifting speelt alleen vlak bij de grenshoek een rol (Fig. 6). Tenslotte valt de intensiteit bij grotere hoeken steeds mee af (Fig. 6). Al deze effecten zijn geheel verwaarloosbaar ten gevolge van de kleine gezichtshoek van het masker. Dit geldt niet altijd voor de OW fotografie want de diafragma-openingshoeken kunnen veel groter zijn dan die van onze pupil.

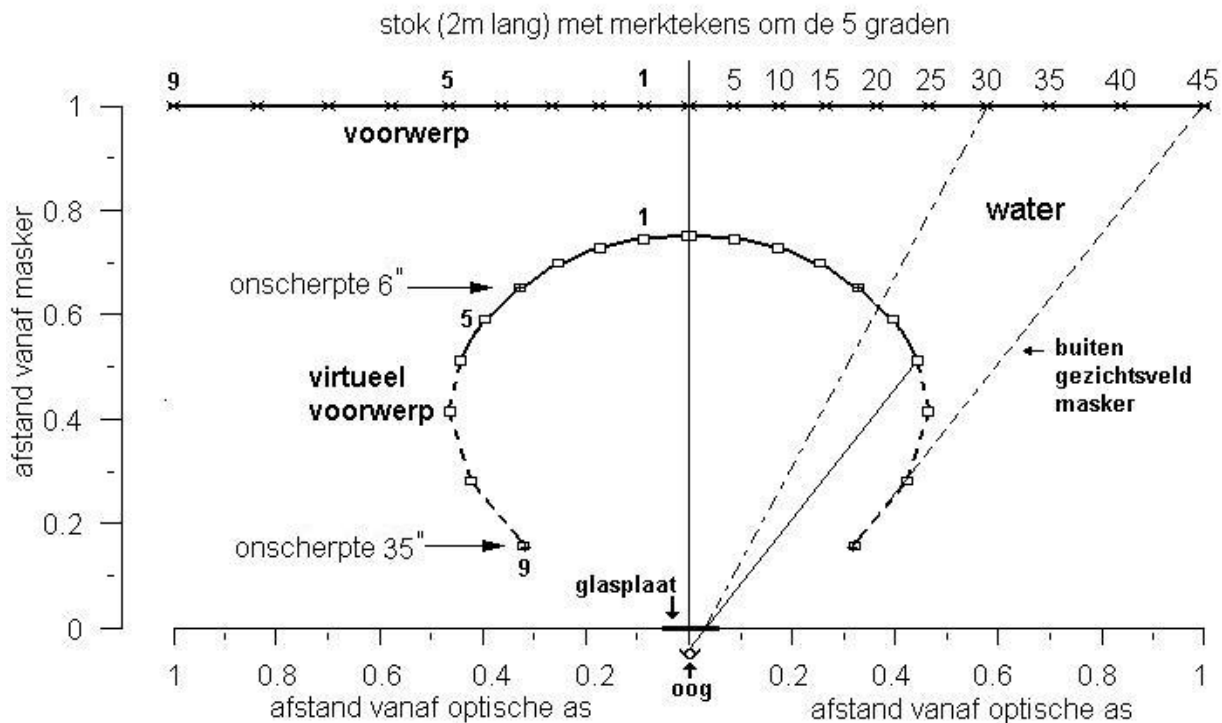


Fig. 5 beeldkromming. De beeldkromming is berekend voor een voorwerpsafstand van 1 m voor een voorwerp (lijn) met een openingshoek van 90° (vanuit de glasplaat gezien), loodrecht op de blikrichting en een intreepupil op de glasplaat van 4 mm. De verticale streepjes op het voorwerp liggen 5° uit elkaar. Zie voorts de tekst.

Het zgn. planparallele-plaat-effect ¹ is al helemaal verwaarloosbaar (in de orde van $1''$, dus zelfs

¹ Het planparallele-plaat-effect is het evenwijdig verspringen van de uittredende straal ten opzichte van de

beduidend onder de "hyperacuity"-drempel²).

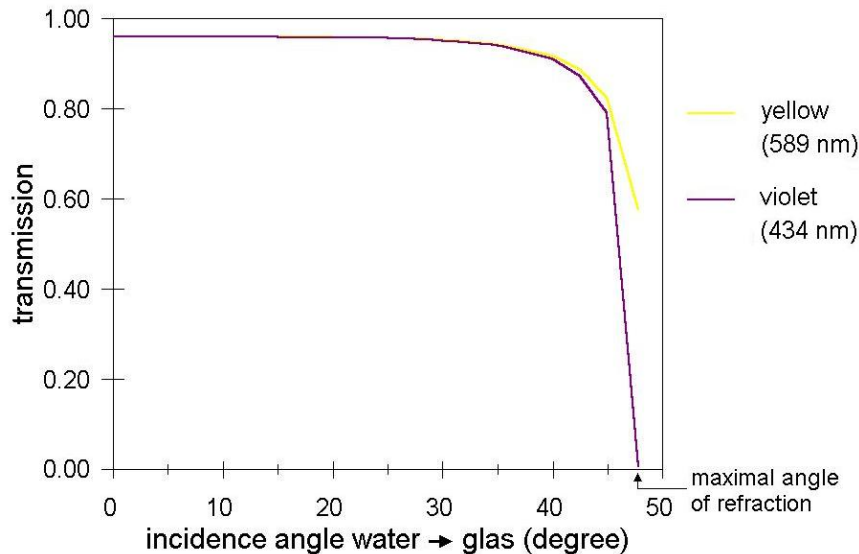


Fig. 6 Fractie van geel en violet licht dat het masker doorlaat Vanwege de overgang water glas lucht is twee maal de wet van Snellius en twee maal de Fresnel³ vergelijking toegepast.

3. Fysiologische en psychologische factoren

Schatten van afstand en grootte Het schatten van afstand en grootte is iets waar duikers vaak mee te maken hebben, zoals bij het bepalen van de grootte van bijv. vissen en bij de OW fotografie. De optische vergroting geeft behoorlijk problemen bij het schatten van afstand. Bij de experimenten over dit schatten ging het bijna altijd om onbekende "2-dimensionale" (weinig diepte) voorwerpen in een omgeving met weinig cues voor diepte-zien. Doordat het object groter lijkt, wordt de afstand groter geschat dan de optische afstand. Dit is bij beginnende duikers zelfs iets meer dan een factor 1.33, dus verder dan de fysische afstand. Bij geoefende duikers ligt deze factor dicht bij 1.33, de vergroting op de optische as. Hun schatting komt dus goed overeen met de fysische afstand. Overschatting van de afstand neemt toe met verkleining van het voorwerp (wat op grond van Snellius juist niet verwacht wordt) en met de afstand (Ross, 1971). Duidelijk is dat we hier met een gecompliceerd psychofysiologisch proces hebben te maken. Ook in de lucht is het schatten van afstanden niet altijd correct. In de mist wordt de afstand schijnbaar groter geschat dan bij helder weer. Onderwater geeft troebelheid ook grotere schattingen. In feite kunnen zowel onder- als overschatting van de afstand en grootte van een object optreden. Het punt waar onderschatting overgaat in overschatting ligt verder naarmate het water helderder is. Tenslotte is er ook nog een afhankelijkheid van het contrast. Naarmate voorwerpen minder contrasteren met de achtergrond lijken ze verder verwijderd (Ross 1971). Vermeldenswaard is dat bij het afstand schatten van bekende 3-dimensionale voorwerpen (bierflesjes) bleek dat geoefende duikers dit zeer goed kunnen.

Invloed van stikstof en zuurstof Nu de optische effecten in kaart zijn gebracht is de vraag of er ook fysiologische effecten van belang zijn. Experimenten in zee toonden aan dat de gezichtsscherpte (visus) afnam bij toenemende diepte. De visus neemt echter ook af bij afnemende helderheid. Dit begint bij de hoogste helderheden die we onderwater aantreffen (ca. 200 cd/m², wat vergelijkbaar is met een

intredende straal na passeren van een glasplaat. Bij microscopische dekglasjes is het effect zo groot dat 100x lenzen

² De acuity wordt gemeten met een letterkaart of Landolt C's. De norm is visus 1, is 1 boogminuut. Hyperacuity is het iets verspringen van een verticale lijn na onderbreking, a la het planparaleleplaat-effect. De hyperacuity bedraagt een paar boogseconden.

³ De wet van Fresnel geeft de fractie van het licht dat gereflecteerd wordt:

reflectie-fractie = $(\sin^2(\theta-\zeta) / \sin^2(\theta+\zeta) + \tan^2(\theta-\zeta) / \tan^2(\theta+\zeta)) / 2$ met θ en ζ resp. de hoek van in- en uitval.

omgevingsverlichting van 60 lux, wat ongeveer huiskamerverlichting is.). Onderzoek naar de gezichtsscherpte uitgevoerd met Landolt C's in een droge drukkamer tot 60 m wees uit dat er ten opzichte van 0 m geen verschil was (Schellart, 1976). Wel duurde het benoemen van de oriëntatie van de Landolt C op 60 m iets langer.

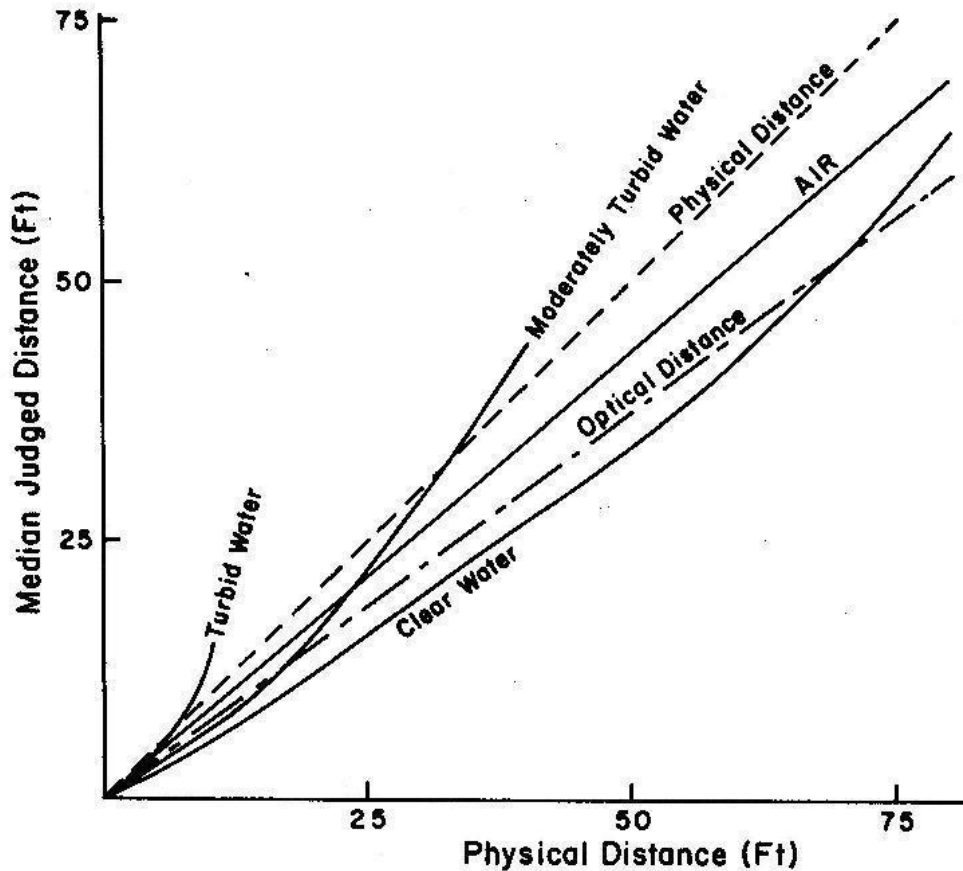


Fig. 7 Schatten van afstand

De visus hangt sterk samen met de gevoeligheid voor helderheidcontrast. Helderheidcontrastmetingen zijn met een fotografisch transparante verlichte plaat met een raster onderwater snel en vrij nauwkeurig uit te voeren. Door de fijnheid van een sinusraster horizontaal naar rechts te laten toenemen en de sterkte van het contrast in verticale richting te laten afnemen (Fig. 8) kan voor elke "fijnheid" (dit is de spatiële frequentie) de contrastdrempel bepaald worden.

Door het transparant kunstmatig te verlichten en de invloed van eventuele diepte afhankelijke troebeling van het water uit te sluiten door het omgevingswater tussen lichtbron en masker vrijwel geheel te vervangen door zoet water te vervangen wordt het oog op elke diepte op dezelfde wijze gestimuleerd. Het apparaat, afgebeeld in Fig. 9 illustreert dit. De enige overblijvende parameter die niet te controleren is, is een eventuele psychologische, diepte afhankelijke beïnvloeding van de meting. De experimenten zijn uitgevoerd onder ideale omstandigheden in de zomer aan de oostkust van Corsica en onder moeilijke omstandigheden (wind, koude, donker op 40 m) in de herfst in het Oostvoornse meer (Schellart, 1992). Omdat alle experimenten met geoefende sportduikers zijn uitgevoerd, die ervaring hadden met duiken tot deze diepte, mag verwacht worden dat er nauwelijks psychologische stress aanwezig was. Er werd een klein diepte-effect gevonden op 40 m waarbij de contrastcurve van 6 meter als referentie werd gebruikt (Fig. 9). Teruggerekend betekent dit een vermindering van de zichtafstand van 5%. De meest waarschijnlijke verklaring is dat dit een effect van hoge pN_2 is. Een dergelijk kleine vermindering is te

weinig om er tijdens het duiken last van te hebben.

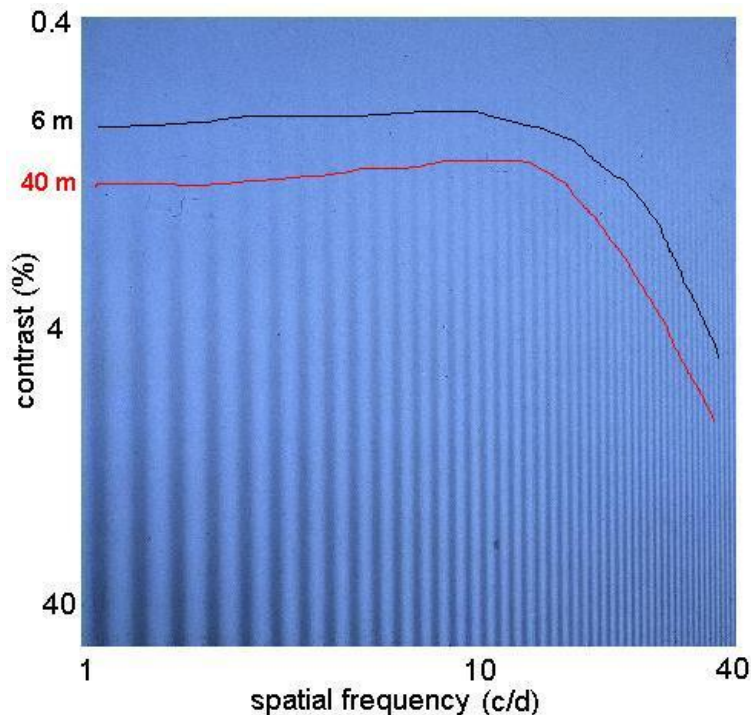


Fig. 8 Transparant sinus raster. De contrastdrempel op 6 meter en 40 m diepte is aangegeven.

Naast helderheidszien (gezichtsscherpte, contrastgevoeligheid) is kleurenszien, ondanks de filterende werking van het water, voor de duiker een belangrijk aspect van het zien. Daarom is het van belang te weten of een hoge pN_2 en pO_2 de kleurperceptie beïnvloeden. De gevoeligheid voor rood en groen (t.o.v. elkaar) blijken zo weinig te veranderen dat we er geen last van hebben (experimenten in droge compressietank; Schellart et al. 1997). Dit betekent dat tenminste het roodgroene gebied van de spectrale gevoeligheid van het oog niet verandert. Het vermogen kleurnuances te onderscheiden is op 30 m wel iets afgenomen.



Fig. 9 Contrast-apparaat 1 Halogeen lamp, 2 PVC koker met perspex vensters en gevuld met kraanwater, 3 houder met sinus raster, 4 arm/handsteunen, 5 maskerhouder.

Ondanks de zeer kleine effecten op 30 m zijn er wel degelijk andere drukinvloeden. Alle visuele testen, ook in een drukkamer, duren iets langer en worden onnauwkeuriger uitgevoerd. Dieper dan 60 m worden

door N₂-narcose visuele reactietijden duidelijk langer en reactietesten worden slechter als men tegen decompressieziekte aanzit.

Psychologische factoren Deze zijn van groot belang. Ervaring verbetert de interpretatie van de visuele onderwaterwereld beduidend terwijl angst of stress het omgekeerde effect heeft. Dit is gevonden voor alle typen experimenten. Zowel de gemiddelde afwijking ten opzichte van een referentie (boven water) als wel de variatie in de metingen neemt af met toenemende ervaring. Hetzelfde treedt ook tijdens een langdurig verblijf onder water.

Referenties

- Lythgoe JN, Vision. In: Underwaterscience, an introduction to experiments by divers, Woods JD and Lythgoe JN (ed.), Oxford Univ. Press, London, 1971, p. 103-139.
- Ross EH, Adaptation of divers to curvature distortion under water, Ergon., 13 (1970) 489-499.
- Ross EH, Perception under water. In: Underwaterscience, an introduction to experiments by divers, Woods JD and Lythgoe JN (ed.), Oxford Univ. Press, London, 1971, p. 69-101.
- Schellart NAM, Visual acuity at hyperbaric air pressure, Perceptual and Motor Skills, 43 (1976) 983-986.
- Schellart NAM, Contrast sensitivity of air-breathing nonprofessional scuba divers at a depth of 40 meters, Perceptual and Motor Skills, 75 (1992) 275-283.
- Schellart NAM, Pollen M, Van der Kley, A. The effect of dysoxia and moderate air-hyperbarism on the red/green color sensitivity. Undersea Hyperbaric Med, 1997;24:7-13.