

Door de ogen van een vis

**TEKST**

Arno van 't Hoog

ILLUSTRATIES

Janny Bosman en Shutterstock

Wie wil snappen hoe evolutie heeft geselecteerd op eigenschappen van organismen, moet eens goed kijken naar vissen. Omdat vissen zo soortenrijk zijn en zulke uiteenlopende milieus bewonen, is er een grote variatie aan oog-eigenschappen ontstaan. Veel vissoorten zien meer kleuren, contrast en detail dan mensen. En moeder natuur experimenteert zelfs met vier ogen.

Vrouwelijke guppy's zien vooral oranje en rode kleuren goed. Dit speelt een belangrijke rol in de partnerkeuze.



De ogen van een mahi mahi zijn afgestemd op het zien van contrast tijdens zijn horizontale jacht in de bovenste waterlaag.

Er was een tijd – een paar decennia geleden – dat de wetenschap echt ernstig twijfelde over de vraag of vissen kleuren konden zien. Maar simpele experimenten met kleurlampen en voerbeloning toonden dat een eenvoudige goudvis een flink deel van het kleurspectrum waarneemt. Inmiddels is duidelijk dat veel andere soorten niet alleen kleuren prima waarnemen, maar ook ultraviolet en gepolariseerd licht. Verder is de gevoeligheid van het vissenoog bijzonder. Sommige soorten zien vage lichtschijnsels in de diepzee, die zelfs het meest gespecialiseerde nachtdier op land niet zou opmerken. De wetenschap heeft de laatste jaren meer opmerkelijke basiseigenschappen van vissenogen in kaart gebracht. Medici kijken er inmiddels met grote belangstelling naar, vanwege het opmerkelijke vermogen om schade aan het netvlies te herstellen. Als bij mensen en andere zoogdieren het netvlies beschadigd raakt door bijvoorbeeld een bloeding, is dat meestal definitief. Bij vissen groeit het beschadigde deel weer terug.

Plastisch netvlies

Die eigenschap is waarschijnlijk een bijkomstigheid van een evolutionair basisonwerp: anders dan zoogdieren stoppen vissen nooit echt met groeien. Die zogenaamde *indeterminate growth* zorgt ervoor dat ook op hoge leeftijd alle lichaamscellen nog kunnen delen. De ogen groeien mee en het netvlies

blijft zich vernieuwen.

De lichtgevoelige zenuwcellen – de kegeltjes en staafjes – kunnen dus door deling worden vervangen en aangevuld. Het netvlies van de vis is dus in biologentermen 'plastisch'. Dat heeft de basis gelegd voor nog meer interessante eigenschappen, bijvoorbeeld om de lichtgevoelige eiwitten (*opsines*) in de kegeltjes en staafjes aan te passen tijdens de ontwikkeling. Zo heeft het guppy (*Poecilia reticulata*) een repertoire van elf verschillende opsines, die afhankelijk van de ontwikkeling in verschillende verhoudingen worden ingezet.

Seksuele selectie

Jonge guppen maken in hun netvlies vooral opsines die korte golflengtes opvangen. Zulke blauwe en groene tinten zijn de kleuren die goed doordringen in het water en zijn handig om kleine, doorschijnende prooien te zien. Naarmate de vissen geslachtsrijp worden verschuift het opsine-repertoire in het netvlies richting langere golflengtes. De ogen worden gevoeliger voor geel en rood.

Daarmee zijn guppenmannen in het voordeel als ze zoeken naar roodgekleurd carotenoïde-rijk voedsel. Met dat dieet kunnen ze namelijk felgekleurde, rood en oranje huidvlekken maken, die zo in de smaak vallen bij de guppenvrouw. De vrouwtjesogen worden op hun beurt gevoeliger voor dat uiterlijke vertoon van de man. Op die manier

heeft seksuele selectie de oogontwikkeling bij de gup vormgegeven.

Plasticiteit maakt dat vissen ook kunnen reageren op lichtomstandigheden. In bruin of algenrijk water of onder bladrijke omstandigheden dringt weinig licht door. Veel vissen reageren hierop door het palet van opsines in hun oog aan te passen. De gup staat daar weer model voor. Onderzoek heeft laten zien dat de lichtkleur tijdens de jeugd sterke invloed heeft op de gevoeligheid van het oog voor bepaalde golflengtes. Exemplaren die opgroeien onder oranje lampen zijn in gedragsexperimenten veel gevoeliger voor oranje licht dan nestgenoten die bij groen licht zijn groot geworden. Op die manier kan het oog van de vis worden afgestemd op de lokale omstandigheden.

Kleur en contrast

Nu staan guppen niet model voor alle soorten, want de evolutie heeft ook oplossingen gemaakt voor heel andere milieus. Soorten zoals guppen en koraalvissen, die in de bovenste waterlagen leven, hebben ogen die gevoelig zijn voor vrijwel het hele lichtspectrum, inclusief UV. Maar voor veel soorten die wat dieper in de waterkolom leven, heeft het geen nut om bijvoorbeeld rode tinten goed te kunnen zien. Zulke langere golflengtes worden namelijk snel geabsorbeerd en dringen niet door in de milieus van veel vissoorten. ➤

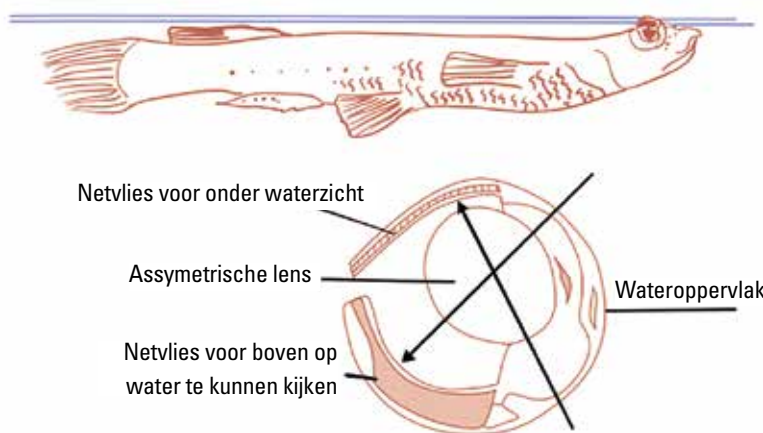
Voor veel soorten geeft het zien van rood of geel licht geen selectief voordeel, dus tijdens de evolutie is die eigenschap niet ontwikkeld. Zo kan de kabeljauw alleen groene en blauwe tinten waarnemen en dat geldt nog veel sterker voor soorten die in de schemer leven en vooral gevoelig zijn voor de zeer korte golflengtes: het koelblauw van de diepzee.

Het draait niet alleen om kleur, maar ook om contrast. Veel soorten hebben een opsine-repertoire dat is afgestemd op het creëren van het optimale beeld tijdens de jacht. Zo heeft de pacifische blauwvintonijn drie extra opsines die elk een deel van het blauwgroene spectrum kunnen waarnemen. Het helpt om subtiel contrast te zien tussen prooien in een heldere blauwgroene oceaan.

Kattenogen voor schemerzicht

Evolutionaire aanpassingen gaan nog veel verder. Zo belaaft de skipjacktonijn vooral prooien zoals sardine, van onderaf. Hij jaagt eigenlijk op silhouetten onder het oppervlak en daarvoor is een dominant blauwgevoelig opsine voldoende. De dolfin (*Coryphaena hippurus*) of mahi mahi jaagt juist horizontaal in de bovenste waterlaag onder lichtrijke omstandigheden op bijvoorbeeld vliegende vis. De dolfin heeft drie dominante opsines in zijn netvlies die onderscheid mogelijk maken in groene en gelige tinten. Dat is ook functioneel voor het zien van de fraaie geelgroene kleurpatronen van mannelijke soortgenoten. Tot slot zijn er flink wat vissoorten met 'kattenogen': ze hebben een reflecterende laag (*tapetum lucidum*) achter het netvlies of reflecterende deeltjes in het netvlies, die licht

Door de aanwezigheid van een lichtreflecterende laag kan snoekbaars onder lichtarme omstandigheden prooivissen waarnemen.



Schematische weergave van de werking van de ogen van de vieroogvis.



De vieroogvis *Anableps anableps* heeft een gedeeld netvlies waarmee gelijktijdig boven- en onderwater kan worden gekeken.

weerkaatsen. Snoekbaars is daarvan het meest sprekende voorbeeld in onze streken. Veel haaien beschikken er ook over. De reflectie wordt verzorgd door guaniekristallen die ook in glinsterende vissenschubben zijn te vinden. Onder matige lichtomstandigheden heeft zo'n spiegellaag een flink voordeel, al wordt het zicht er door lichtverstrooiing waarschijnlijk iets minder scherp door. Verder kan het lastig zijn bij een overgang naar felle lichtomstandigheden. Vandaar dat sommige haaien de spiegellaag overdag bedekken met een donker pigment.

Buiskijkers in de diepte

Bij diepzeevissen heeft de evolutie bijzondere oogvarianties doen ontstaan. Alles in de schemering van de diepte is gericht op het opvangen van het kleinste spoortje licht. Vooral buisvormige ogen met zeer grote lenzen zijn bij veel diepzee soorten ontstaan. Beide ogen staan als bij een uil parallel voorwaarts of zijn naar boven gericht voor scherp beeld. Zo'n ontwerp zorgt voor uitstekend zicht in een bepaalde

richting maar licht dat bijvoorbeeld van de zijkanten komt wordt heel slecht waargenomen. Als er al licht via de zijkant in het oog komt ontstaat er geen scherp beeld omdat het netvlies te dicht bij de lens zit. Sommige diepzee soorten zoals *Scopelarchus* hebben daarvoor een oplossing: een venstertje in de zijkant van het oog, dat licht van opzij doorlaat.

Vreemde vieroogvis

Het toppunt van evolutionaire creativiteit is te vinden in de vieroogvis (*Anableps anableps*). De kop van deze levendbarende tandkarper ziet er op het eerste gezicht uit als een ongelukje. Zijn grote uitpuilende ogen hebben twee van elkaar gescheiden pupillen. De ene zit boven water, de andere naar beneden gericht op de onderwereld. Voor een vis die aan het oppervlak leeft in ondiepe wateren van Midden- en Zuid-Amerika is dat handig. In het oog zit een asymmetrische lens en een netvlies dat duidelijk opgedeeld is voor lichtwaarneming uit lucht en water. De vieroogvis voedt zich met insecten

op het wateroppervlak en met waterprooien en algen. De dubbele oogstructuur helpt om beide werelden te verkennen en eventuele rovers letterlijk in het oog te houden. Op die manier maakt de vis optimaal gebruik van zijn favoriete leefgebied: zoet- en brakwatergetijdegebieden waar tweemaal daags het waterniveau enorm fluctueert. Voor onderzoekers die willen begrijpen hoe evolutie nieuwe structuren kan voortbrengen is de vieroogvis een interessant dier om te bestuderen, zegt bioloog Patricia Schneider, werkzaam bij het Evo & Devo lab van de Federale Universiteit van Pará in Belem, in het noordoosten van Brazilië. Ze publiceerde in april dit jaar over een onderzoek naar oogontwikkeling in de embryonale fase van de vieroogvis.

Belem is Schneiders geboortestad en ze zag als kind deze vissen zwemmen vanaf de rivierstranden. Toen ze na haar promotieonderzoek in de Verenigde Staten terugkeerde naar Brazilië, wilde ze gaan werken aan evolutionaire nieuwigheden in deze vissoort. Ogen in gewervelden – van guppy, via kikker naar koe – zijn opmerkelijk uniform van anatomie. Het standaardontwerp is bolvormig, met een iris, lens en netvlies. Het lijkt wel alsof het ontwerp of de ontwikkeling van het oog zo strak geregisseerd is dat afwijkingen gewoon niet zijn toegestaan. Alleen bij de vieroogvis is verdubbeling gelukt, net als twee andere, niet verwante vissoorten. Maar het blijft een uitzondering op de regel. “Dat is inderdaad een intrigerende eigenschap van het oog”, zegt Schneider. “Hoewel het oog een zeer geconserveerde structuur heeft, zien we in de natuur toch wel meer modificaties in de

anatomie. Oogverlies van vissen die in duisternis leven is het meest voorkomende voorbeeld.”

Een oog, twee beelden

Het begrip van de ecologische factoren en ontwikkelingsprocessen die afwijkingen van het standaardontwerp mogelijk maken, staat nog in de kinderschoenen, zegt Schneider. Ze probeert het antwoord te vinden in de interactie van ecologie, evolutie en ontwikkeling: eco-evo-devo. “We streven ernaar om in de nabije toekomst al deze aspecten te bekijken door gebruik te maken van *Anableps* als model.” De verdubbeling van de ogen gebeurt tijdens de embryonale ontwikkeling maar veel was daarover niet bekend, zegt Schneider. “Dus hebben we besloten om eerst het stadium te identificeren waarin dit precies optreedt en daarna de neuro-anatomische wijzigingen te vinden die nodig zijn voor de oog-splitsing.” Uit het onderzoek blijkt dat de vieroogvis in eerste instantie als een normaal vissenembryo ontwikkelt. De verdubbeling van de pupil komt pas vrij laat op gang. Tegelijkertijd gaan de schedel en oogkassen meegroeien om de langzaam steeds verder uitpuilende ogen goed te kunnen huisvesten. Ook zien de onderzoekers tegelijkertijd verschillen ontstaan in de anatomie van het netvlies. Het deel dat licht opvangt uit de lucht ziet er anders uit dan het deel dat licht vangt uit het water.

Flexibel oogontwerp

“Je moet je realiseren dat deze vis zwemt in het bruine water van de Amazone en zijn zijrivieren. Zichtbaarheid in deze wateren is erg laag waardoor zeer weinig licht uit het water het

netvlies bereikt. Aan de andere kant ontvangt het andere deel van het netvlies fel licht van boven het water. Dit verschil in lichtintensiteit verklaart het verschil in dikte tussen de verschillende onderdelen van het netvlies.” Nog een verrassing is dat de lichtgevoelige opsines in de kegeltjes en staafjes van lucht- en water-netvlies ook verschillen. Tot nu toe was bij vissen alleen bekend dat ze de gevoeligheid van hun ogen kunnen aanpassen, passend bij intensiteit, kleur en contrast in de omgeving. “Dat dit verschil al voor de geboorte kan ontstaan en dus voorgeprogrammeerd is, kwam als een verrassing. Het grootste deel van onderzoek aan vissen kijkt naar veranderingen in opsine-expressie in het netvlies, na de geboorte.” Schneider noemt het een enorm voordeel om aan zo'n afwijkend modeldier te werken. Ontwikkelingsbiologen hebben tot nu toe vergelijkbare modelorganismen gebruikt om de genetische basis van oogontwikkeling te onderzoeken. “Dat kan het idee hebben versterkt dat veranderingen in oogontwikkeling niet mogelijk zijn. De vieroogvis laat zien dat oogontwikkeling helemaal niet zo star is als eerder gedacht. Lucht- en watervisie in *Anableps* kan licht werpen op belangrijke, algemene thema's zoals beperkingen en flexibiliteit tijdens de ontwikkeling.” ■

Geraadpleegde literatuur

Ga voor de geraadpleegde literatuur naar www.invisionair.nl

Koraalvissen die in heldere ondiepe wateren leven, kunnen naast groen en blauw ook goed gele en oranje tinten waarnemen en soms zelfs ultraviolet.

