

Portret van een bizarre vis

Mysterie aal bijna ontrafeld

De aal is en blijft een van de meest mysterieuze vissoorten. Vooral de extreme én geheimzinnige voortplanting spreekt tot de verbeelding. Aaldeskundige Jaap Quak vat de meest recente onderzoeken samen en komt tot de conclusie dat het 'mysterie aal' voor een belangrijk deel is ontrafeld.

Tekst Jaap Quak, Sportvisserij Nederland **Fotografie** Domin Dalessi, Sportvisserij Nederland en Yoshiaki Yamada

Sinds de Griekse oudheid houdt de mysterieuze voortplanting van de aal (*Anguilla anguilla*) de gemoederen bezig. Eeuwenlang was er wel de notie dat er bij de aal een relatie bestond tussen 'zoet en zout', maar daar bleef het dan wel bij. Pas toen aan het einde van de 19^e eeuw geslachtsorganen bij in zee gevangen aal kon worden vastgesteld, kreeg het onderzoek naar de voortplanting van de aal richting. Vooral toen werd ontdekt dat een al langer bekend, in zee gevangen visje met de naam *Leptocephalus*, niets meer of minder was dan de larve van de aal. In het begin van de 20^{ste} eeuw werd er baanbrekend onderzoek verricht door de Deen Johannes Schmidt. Door jarenlang de verspreiding en de grootte van de larven in kaart te brengen, wees hij

het gebied van de Sargassozee aan als de waarschijnlijke paaiplaats van de aal. Vanaf het einde van de jaren zeventig, kreeg het aalonderzoek, vooral door diverse expeditie nieuwe impulsen. Nieuwe genetische en micro-chemische technieken hebben de kennis over de voortplanting en het leven van de aallarven in de oceaan inmiddels aanzienlijk vergroot. De reden voor dit uitgebreide onderzoek is niet alleen meer wetenschappelijke interesse, maar wordt ook steeds meer ingegeven door de dramatische achteruitgang van het Europese aalbestand.



Mysterieuze migratie

De aal migreert twee keer in zijn leven over een afstand van circa 6000 km. Op de heenreis als larve, op de terugreis als schieraal. Van de andere aalsoorten uit het geslacht *Anguillidae*, heeft de Europese aal de langste migratie en het langste larvestadium. Biologisch gezien een bijzonder fenomeen, dat vragen oproept. Welk voordeel biedt deze leefwijze? Hoe heeft deze strategie zich ontwikkeld? Waarom is de morfologie van de larve (*Leptocephalus*) zo verschillend van die van de (glas) aal, zoals we die in het zoete water aantreffen?

De aal zoals wij die kennen, is het product van een lange evolutionaire ontwikkeling. Aalachtigen zijn in hun oorsprong pelagische zeevissen en de larven van alle soorten hebben de zogenoemde *Leptocephalus* vorm. Op basis van DNA-onderzoek wordt vermoed dat de oeraal zo'n vijftig miljoen jaar geleden leefde in het gebied van de huidige Indonesische archipel. Van daaruit hebben zich de huidige *Anguilla*-soorten ontwikkeld. De meeste leven in tropische regio's; de Japanse, de Amerikaanse en de Europese aal zijn de soorten van het noordelijk halfrond. De verbreiding naar de noordelijke regio's hangt waarschijnlijk samen met de continent-verschuiving. Vanuit de oerzee 'Thetys' ontstond een verbinding – de Atlantische corridor – met het (toen nog) smalle zeegebied tussen Noord-Amerika en Europa. De kern van dit gebied is wat nu de Sargassozee wordt genoemd. Ooit trof de gemeenschappelijke voorouder van de Europese en Amerikaanse aal daar omstandigheden aan die geschikt waren voor de voortplanting. Met het uiteendrijven van de continenten, ontwikkelden zich hieruit twee soorten: de Amerikaanse en de Europese aal. Er

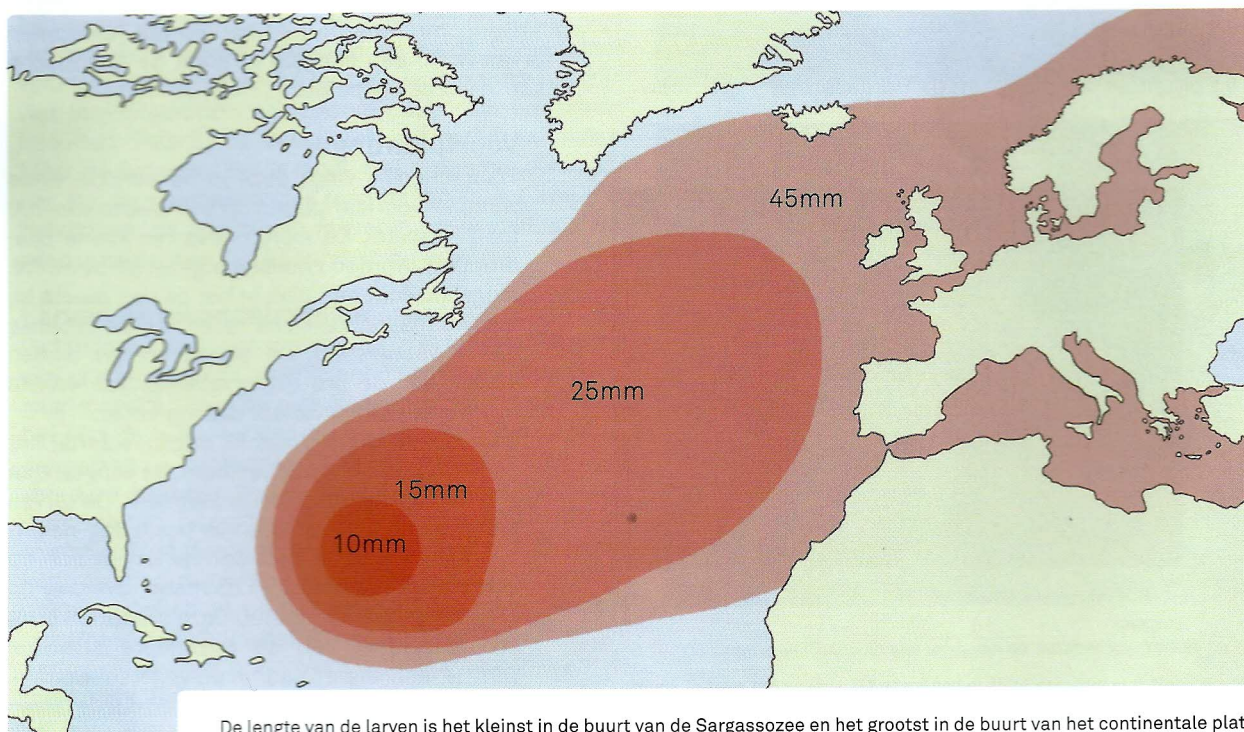
ontwikkelde zich bij de alen een strategie, waarbij het voordelen bood het zoete water van rivieren en meren te gebruiken als opgroeigebied, maar waarbij de voortplanting gebonden bleef aan specifieke gebieden in de oceaan. Dit betekende ook enkele potentiële nadelen:

- een lange, predatiegevoelige route tussen paaigebied en het zoete water vice versa;
- een zeer lang larvestadium, waarin ook voldoende energie en bouwstoffen moeten worden verzameld voor de metamorfose van larve naar de aalvorm;
- een lange opgroeiperiode in het zoete water, waarin voldoende lichaamsgewicht moet worden opgebouwd voor de migratie als schieraal en de aanmaak van geslachtsproducten;
- mede als gevolg daarvan: een eenmalige voortplanting.

Maar de voordelen van deze levenstrategie hebben blijkbaar altijd opgewogen tegen de mogelijke nadelen. De aal zoals wij die kennen is in termen van verspreiding en aantallen een succesvolle soort gebleken, zelfs toen de afstand tussen de Sargassozee en het zoete water toenam tot duizenden kilometers als gevolg van de continentverschuiving.

Baanbrekend onderzoek 1904-1922

Johannes Schmidt pakte voor zijn tijd het larvenonderzoek grootschalig aan. Met zijn schip *Margaretha* bevoer hij in de periode 1904 - 1922 allerlei transecten in kustgebieden, de Atlantische Oceaan en de Middellandse Zee. Daarbij ving hij aallarven, waarbij hij lengte en locatie vastlegde. Ook schakelde hij handelsschepen in die op hun trans-Atlantische reizen met netten aallarven verzamelden.



De lengte van de larven is het kleinst in de buurt van de Sargassozee en het grootst in de buurt van het continentale plat.

Schmidt trok na bestudering van het materiaal de volgende conclusies:

- gezien van oost (Europa) naar west neemt het aantal larven toe;
- de lengte van de larven neemt af (hoe westelijker, hoe kleiner);
- de kleinste larven met een lengte van circa 7 mm bevinden zich in de Sargassozee, dus het vermoedelijke paaigebied;
- de larven ondergaan de metamorfose naar glasaal op de rand van het continentale plat.

Het uiteindelijke bewijs voor zijn theorie dat de Sargassozee het paaigebied was, kon Schmidt echter niet leveren. Het is hem, en alle onderzoekers na hem, niet gelukt om paairijpe alen in de Sargassozee te vangen. Wat dit betreft is het mysterie van de aal ook anno 2011 dus nog niet geheel ontrafeld;

Schmidt baande met zijn onderzoek wel de weg voor vervolgexpedities. Amerikaanse, Deense en Duitse onderzoekers volgden, met zeer recent de Galathea-3 expeditie. Dit jaar vindt ook een Duits onderzoek plaats. Waar Schmidt het moest doen met tellen en meten, hebben recente expedities het onderzoeksarsenaal uitgebreid met onder andere genetische en micro-chemische technieken. Deze technieken zijn ingezet voor onderzoek aan voedsel, groei en herkomst van de larven. Hierbij is ook de chemische samenstelling van de otolieten (gehoorsteentjes) in kaart gebracht.

Unieke zee

Niet alleen aalbiologen bezoeken periodiek het gebied van de Sargassozee. Honderden hydrografische, limnologische en chemisch-fysische onderzoeken worden vermeld in een recente bibliografie over het gebied. Langzaam maar zeker groeit zo het beeld van deze 'zee in een zee', ook als een bijzonder ecosysteem met onderliggende processen en eigen nutriëntencycli. Een bijzonder kenmerk van de Sargassozee – ook voor

de aal – is de aanwezigheid van de Subtropische Convergence Zone (STCZ). Deze zone vormt voor de diepte van 0 -200 m de scheiding tussen het relatief koude water van de noordelijke Sargassozee en het relatief warme water van de zuidelijke Sargassozee.

De STCZ, ook front genoemd, is vooral prominent aanwezig in de winter en het voorjaar. De Sargassozee is een tamelijk voedselarm systeem met eigen, maar deels ook nog onbegrepen cycli van nutriënten als fosfaat, stikstof zwavel en koolstof. Ieder voorjaar treedt er een bloei op van fytoplankton, dat op zijn beurt weer dient als voedsel voor zoöplankton in velerlei vormen. Dit fungeert weer als voedsel voor vissen en andere dieren. De Sargasso Zee heeft bij benadering een oppervlakte van een miljoen km² en de diepte van de oceaan varieert tussen de 4500 en 6000 meter. Hoewel deze zee relatief geïsoleerd is, zijn er via wervelingen, draaikolken en jet-stromen diverse interacties met omliggende watersystemen zoals de golfstroom. In dit bijzondere systeem plant de aal zich voort en bevindt zich het opgroeigebied van de larven. Overigens is de relatie Sargassozee - aal niet uniek. In het gebied zijn tot nu toe larven (Leptocephali) van circa 40 aalachtigen aangetroffen, waaronder ook die van de congeraal.

Essentieel front

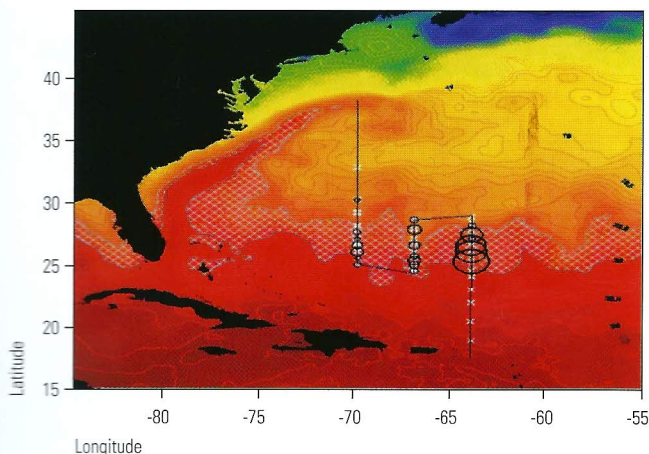
Er komt steeds meer informatie beschikbaar over de essentiële functies van het front voor de aal. Nabij het front worden telkens de hoogste dichtheden kleine larven gevangen, soms nog maar van een dag oud. De feitelijke paailocaties kunnen dan niet ver weg zijn. Er wordt vermoed dat het front voor de aal de volgende functies heeft:

- orientatie van schieraal en aggregatie van schieraal;
- aggregatie van voedsel (plankton) voor kleine larven;
- het vasthouden van de larven tot een bepaalde lengte;
- als 'larvenpomp', waarbij met behulp van jetstromen de larven vanaf een bepaald formaat de Atlantische Oceaan in worden gepompt.

Voortplanting

Waarschijnlijk vindt deze in de periode einde winter – voorjaar plaats op een diepte van 100 tot 250 meter. De eieren bevatten kleine oliedruppels, worden zwevend afgezet en bevrucht. Mogelijk vindt een piek in het paaien plaats bij nieuwe maan, zoals ook recent bij de Japanse aal is vastgesteld. De eieren komen binnen 48 uur uit: de pre-Leptocephalus van enkele millimeters groot, verlaat daarna het ei.

Dit stadium duurt 7 tot 12 dagen, waarbij het dooiermateriaal wordt verteerd. De vangtanden zijn een opvallend uiterlijk kenmerk. De larven groter dan 5 mm vertonen verticale dag-nachtmigratie. 's Nachts bevinden de larven zich op een diepte tussen 30 -120 meter, overdag op een diepte tot 300 meter. Deze migratie vormt een onderdeel van de bijzondere strategie van de aal: eten, maar niet gegeten worden. Verschillende onderzoekers melden dat de larven



De aal paait zeer waarschijnlijk in het grensvlak tussen het relatief warme zuidelijke deel en het relatief koude, noordelijke deel van de Sargassozee.

actieve visjes zijn die sterk op allerlei prikkels reageren. Zelfs actieve mijding van vangtuigen lijkt een eigenschap.

Voedsel

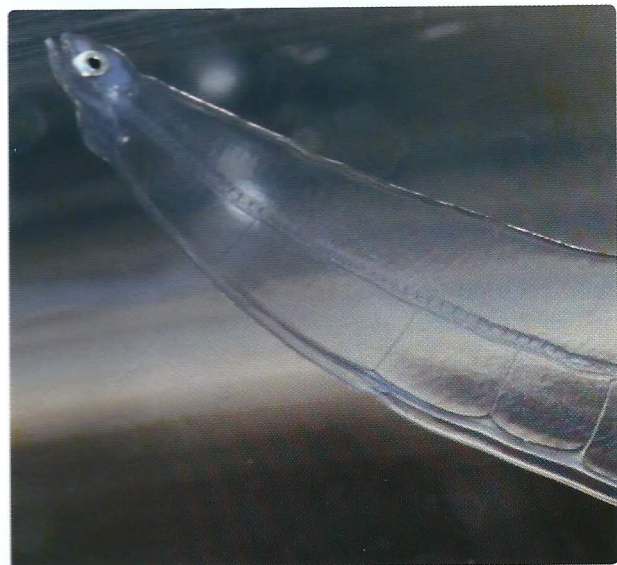
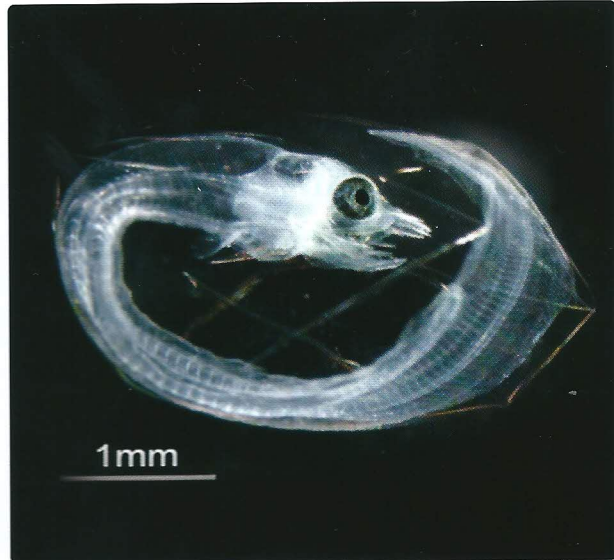
Lange tijd was het volstrekt onduidelijk waarmee en hoe aallarven zich voeden, zowel in de Sargassozee als in de oceaan. De resultaten van de in 2007 gehouden Galathea 3 expeditie werpen een nieuw licht op dit onderwerp. DNA-barcodes onderzoek geeft aan dat de Sargassozee larven zich voeden met een breed scala aan plankton, zoals Copepoden, maar dat zogenoemde gelatineus plankton de hoofdmoot vormt. Dit omvat bijvoorbeeld ook jonge levensstadia van verschillende soorten kwallen. De vangtanden zijn functioneel om deze prooien te vangen. De productie en aggregatie van dit plankton is nabij het front het grootst. Dit zou mede de relatief hoge dichtheid van aallarven nabij het front verklaren. De mogelijke voorkeur voor gelatineus plankton lijkt niet toevallig. De chemische samenstelling lijkt duidelijk overeen te komen met die van de larven zelf. Een andere mogelijke voedselbron wordt gevormd door de zogenoemde DOM's, in water opgelost organisch materiaal dat de larven mogelijk via de huid kunnen opnemen. Er zijn echter aanwijzingen dat deze vorm van voedselopname tijdens de migratie in de oceaan mogelijk van (veel) grotere betekenis is.

Migratieroute(s)

Lange tijd is gedacht dat de Golfstroom een belangrijke rol speelt in de migratie van de larven naar het Europese continent. Maar lang niet alle wetenschappers zetten hun kaarten langer op deze route. Zowel de expeditie van de zeventiger en tachtiger jaren, als de Galathea 3 expeditie, duiden namelijk ook op andere routes dan wel andere mechanismen. Een recente theorie is dat de larven vanaf een lengte van 25 millimeter door jetstromen aan de rand van het front worden gestuurd en zo de Sargassozee verlaten. Hydrografisch onderzoek wijst op het bestaan van stromingen richting de Azoren, die de larven kunnen benutten. Waarbij de larven ook zelf actief zwemmen. Maar de Sargasso Zee is groot. Het is daarom denkbaar dat aan de noordwestelijke rand de larven nog wel met behulp van de Golfstroom migreren, maar dan overwegend in de richting van Noordwest-Europa.

Larven en levensstrategie

De lange reis naar het zoete water is in feite een kwestie van zo snel mogelijk, zo efficiënt mogelijk en zo onzichtbaar mogelijk. Eten en niet gegeten worden. Dat lijkt in het kort de levensstrategie. De Leptocephalus-vorm en het gedrag zijn componenten van de biologische invulling van deze strategie. De dieren zijn transparant en daardoor relatief onzichtbaar. Er is sprake van verticale migratie en de dieren zijn negatief fototactisch. Dit betekent overdag migreren tot dieptes van meer dan 300 meter en 's nachts tot dieptes van 30-120 meter. Actieve opname van voedingsstoffen door de huid (DOM) lijkt ook aannemelijk. Deze optie heeft zelfs sterke papieren: de larve heeft een groot lichaamsoppervlak ten opzichte ➤



- De aallarven (afgebeeld een larve van de Japanse aal) komen na ca. 48 uur uit.
- De Leptocephalus larven zijn nagenoeg volkomen doorzichtig.

van het volume. En de oceaan lijkt een onuitputtelijke bron van DOM's. Het actief fourageren op zoöplankton zou zelfs wel eens nadelig kunnen zijn want dit kost tijd, energie en betekent het risico zelf te worden gepredeerd.

Over het leven van de larven in de oceaan is echter nog veel onbekend. Er zijn indicaties dat de larven circa 5 mm per maand groeien, de migratieperiode tussen de 250 -500 dagen kan duren en de vissen dus (ook) actief zwemmen. Hoe de larven zich in de oceaan oriënteren is onduidelijk. Er zijn wel aanwijzingen dat het aardmagnetisch veld daarbij een rol speelt. De aal heeft een succesvolle levensstrategie kunnen ontwikkelen. Dat is nodig ook: de natuurlijke sterfte onder de larven zou extreem hoog zijn en wordt voorzichtig geschat op minimaal 99,8 procent. Dat betekent dat minder dan 0,2 procent arriveert bij het continentale plat (lijn waar de oceaan circa 1000 meter diep is) en de metamorfose tot glasaal plaatsvindt. Een dergelijke sterfte lijkt gigantisch, maar ligt in de lijn van de natuurlijke sterfte van veel andere organismen. Het is overigens niet bekend of sinds de achteruitgang van het aalbestand op het continent, de relatieve, natuurlijke sterfte onder de larven is veranderd.

Legertje eigenschappen

De larve bestaat voor het grootste deel uit tussen de lichaamscellen opgeslagen energiedragers. Dit zijn vooral glycosamineglycanen (GAG), opgebouwd uit polysaccharide-disaccharide verbindingen. GAG's komen bij de mens bijvoorbeeld voor in de gewrichten. Deze GAG's hebben een aantal eigenschappen:

- veel zee-organismen produceren GAG's;

- drukbestendig (larven leven onder 'grote' waterdruk, deze eigenschap geeft de larve ook stevigheid zonder een skelet, wat op zijn beurt actief zwemmen mogelijk maakt;
- transparant (tegen predatie);
- energiedragers (migratie, metamorfose);
- binden water (bijdrage aan zout- en waterhuishouding; osmose);
- factor bij cel-specialisatie (tijdens metamorfose);
- binden groeifactoren.

Een klemmende reden te meer om de soort maximaal te beschermen.

Kortom, een legertje eigenschappen die voor de aal functioneel en daarmee ook essentieel zijn. Bij (Japanse) aallarven zijn enzymen aangetoond die de GAG's als het ware tussen de lichaamscellen 'spinnen'. En ook voor dit biochemische proces lijkt het buitengewoon functioneel als er sprake is van actieve opname van bouwstoffen, dus uit het water van de oceaan en door de huid van de larve heen.

Synthese

Verschillende stukjes van de aal-puzzel hebben recent meer vorm en kleur gekregen. Bij de aal is sprake van een unieke strategie, ontwikkeld in een lang, evolutio-

Nog geen vijftig jaar geleden was er een overvloed aan glasaal.





Portret van een bizarre vissoort.

nair proces. Deze strategie is een respons op fysische, biologische en chemische variatie in een zeer groot ruimte-tijd venster. De strategie van de aal leidde uiteindelijk tot selectie van zoet water als opgroei-habitat. Dit bood voordelen in termen van productierecrutering versus mortaliteit. De soort bewoont in het zoete water geografisch gezien een zeer groot areaal. Tegelijkertijd vereist een dergelijke strategie lokale aggregatie van voldoende, zeer effectieve paaidieren. Dit vindt plaats in de Sargassozee. Voldoende rekrutering (overleving op oceaan en tijdens de migratie) vereist het tijdelijk vasthouden van larven en het bieden van opgroei-habitat aan jonge larven tot een bepaalde lengte. De lange migratieroute en de noodzakelijke metamorfose vereist ook het efficiënt opnemen van voedsel, snelheid en het vermijden van predatie. Morfologie en gedrag van de larven zijn aanpassingen aan deze eisen, waarbij GAG's een essentiële rol lijken te spelen. Actief zwemmen, gebruik van stromingen en mogelijk magnetische oriëntatie lijken belangrijke componenten van de strategie.

Bedreigingen

De aalstand is sinds 1980 dramatisch afgenomen. Vele factoren die hiervoor gecombineerd verantwoordelijk zijn liggen in het zoete water (dammen, stuwen, ziekten, gemalen en waterkracht, overbevissing, verontreiniging). Het aantal vruchtbare schieralen dat de Sargassozee nog bereikt lijkt zeer laag. Maar er komen toch ook steeds meer aanwijzingen dat de aal ook in het zoute water problemen ondervindt. Zo sluiten verschillende onderzoekers een negatief effect van klimaatverandering op de productie en overleving van aallarven niet uit. Een temperatuurstijging zou direct en indirect invloed kunnen hebben op de verschillende hydrodynamische en ecologische systemen in de Sargassozee en ook de Atlantische

ocean. Al een paar graden temperatuurverandering kan effecten hebben op de omvang, ligging en eigenschappen van het front die nutriëntencycli en ook verschuivingen in het voedselweb veroorzaken. De Sargassozee behoort ook tot een van de bekende gebieden in de oceanen waar zich onder andere plastic afval ophoopt. Afval dat niet direct bedreigend lijkt voor de aal, maar dat wel onder invloed van zonlicht langzaam wordt afgebroken in mogelijk ook voor de aal (larven) giftige stoffen. Ten aanzien van dergelijke onderwerpen zijn echter geen langjarige onderzoeksgegevens beschikbaar. Een analyse van trends en ontwikkelingen is niet mogelijk.

Zou de aal in staat zijn zich aan te passen aan bijvoorbeeld een klimaatverandering? Vanuit de lange en succesvolle evolutionaire ontwikkeling, komt een groot adaptief vermogen naar voren. In de historie van de aal is immers sprake geweest van ijstijden, omkeringen van het aardmagnetisch veld en veel andere dynamiek. De vraag is wel of de snelheid van veranderingen het aanpassingsvermogen van de soort niet overstijgt. Aanpassing vraagt om mutatie en voldoende fitness, genetische verankering en verspreiding. Echter, veel paaidieren en daarmee een hoge productie van eieren en larven is nodig om adaptie mogelijk te maken. Pas dan kan de aal als het ware nieuwe, geschikte eigenschappen evolueren, waarmee de soort een antwoord vindt op de veranderde omstandigheden. Wat de huidige aantallen aal en de trends daarvan betreft, lijkt het perspectief van geleidelijke adaptie niet rooskleurig. Een klemmende reden te meer om de soort maximaal te beschermen en de hoeveelheid en kwaliteit van de paaidieren te vergroten. **V**

Geraadpleegde literatuur

De voor dit artikel gebruikte literatuur is te vinden op www.invisionair.nl.