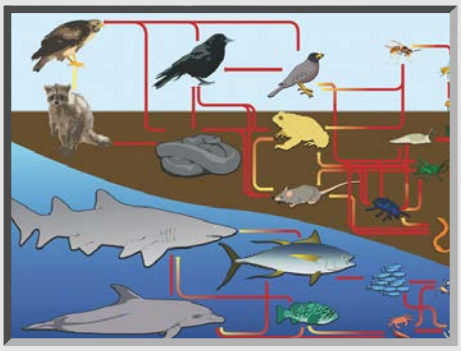
De duikomgeving

Dimensies & cycli



Naturalist

Chemie

Onderzoek

SCUBA
Courses & Publications

SCUBA
Courses & Publications

De duikomgeving
Scuba Publications – Daniela Goldstein
Jan Oldenhuizing

Alle rechten van de auteur en zijn licentiegevers voorbehouden

Deze uitgave, en alle delen daarvan, is beschermd door de wetgeving op het auteursrecht. Ieder gebruik buiten de grenzen van het auteursrecht is, zonder schriftelijke toestemming van de uitgever, niet toegestaan en strafbaar. Daaronder valt in het bijzonder het kopiëren, vertalen of het opslaan en distribueren in elektronische systemen.

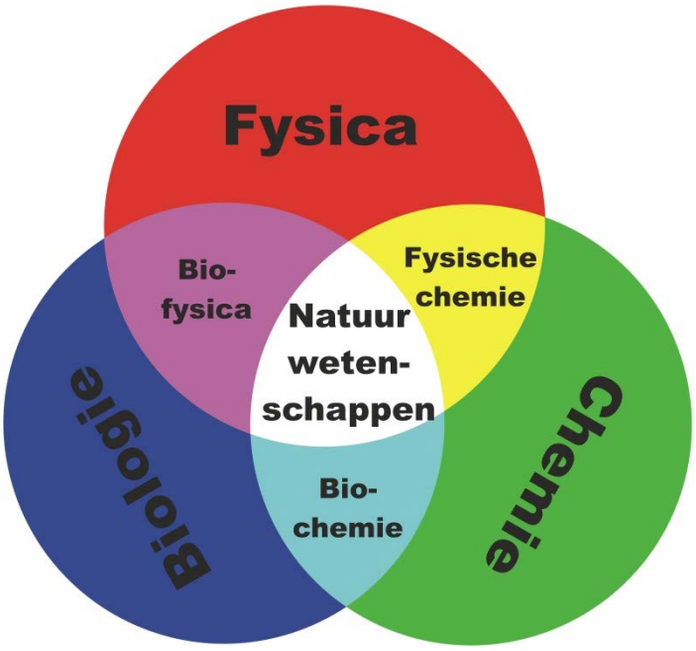
De weergave van gebruiksnamen, handelsnamen, logo's of merken, et cetera in dit werk geeft, ook zonder bijzondere markering, niet het recht tot de aanname dat deze in de zin van de wettelijke regelingen voor handelsmerken vrijgegeven zijn en daarom door een ieder gebruikt zouden mogen worden.

SCUBA Courses & Publications

Inhoudsopgave

Dimensies & cycli 2
De sferen van de planeet aarde 3
De hydrosfeer 3
Waarom water uniek is 4
De watercyclus 5
De energiecyclus 7
De koolstofcyclus 9
De stikstofcyclus 13
Naturalist 15
Land t.o.v. water 16
Dieren en duikers onder water 17
Het taxonomische systeem 18
Relaties onder water 24
Chemie 27
Meststoffen 28
Beperkende factoren 30
Stabiele toestanden 33
Consequenties van grootte 34
Onderzoek 37
Onderzoeksprojecten 38
Methoden voor onderzoek 41
Index 45

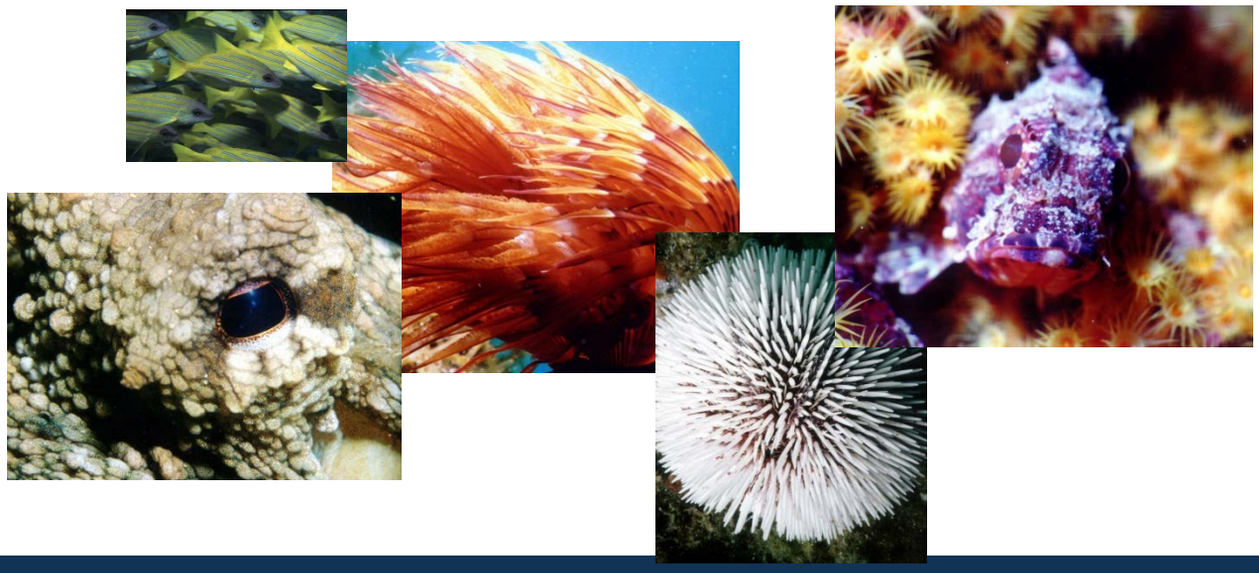
Introductie



Wanneer aan duikers gevraagd wordt waarom ze duiken, dan is het antwoord vaak om plezier te beleven aan de onderwaterwereld. Wanneer je echter niet begrijpt wat je ziet, dan is dat plezier beperkt. Naarmate je meer over de onderwaterwereld weet, zal je waardering steeds meer toenemen. Biologie springt daarbij het meeste in het oog. De variatie in organismen is enorm. Ze hebben allemaal een andere vorm, kleur en grootte. Ze zien er volledig anders uit, dan organismen aan land. Om zulke verschillen te kunnen verklaren moeten we rekening houden met fysica en chemie. Voor het begrijpen van de onderwaterwereld, is het combineren van kennis uit de verschillende natuurwetenschappelijke (of milieuwetenschappelijke) disciplines noodzakelijk. Dit boek is op de integratie van zulke kennis gebaseerd.

Er zijn verschillende cursussen waarin deze publicatie gebruikt wordt. Deelnemers aan een naturalist cursus gebruiken de eerste twee hoofdstukken (dimensies & cycli en naturalist). De naturalist cursus gaat in op de verschillende groepen van organismen en de relaties die deze onder elkaar hebben. Voor Scuba-Eco zijn het eerste en derde hoofdstuk relevant (dimensies & cycli en chemie). Het Scuba-Eco programma gaat in op (onzichtbare) uitdagingen voor het milieu, zoals verzuring en belasting met meststoffen. Het geeft uitleg over de gevolgen van de groeiende wereldbevolking voor de onderwaterwereld. Deelnemers aan een research cursus gebruiken het laatste hoofdstuk (research). Afhankelijk van het onderwerp dat voor het praktijkgedeelte van de cursus gekozen wordt, kan ook de informatie in andere hoofdstukken relevant zijn.

Natuurlijk kun je dit boek ook gewoon zelf lezen om je kennis van het milieu te verbeteren, zonder dat je aan één van de bovengenoemde cursussen deelneemt. Als duiker ben je ambassadeur van de onderwaterwereld. Zoveel te meer je weet, zoveel te beter kun je die rol vervullen.

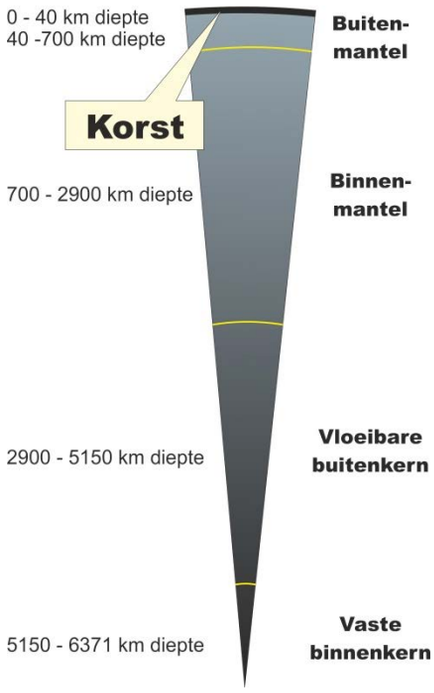


Dimensies & cycli

Om de fysische, chemische en biologische kenmerken van de onderwaterwereld te begrijpen is het vaak nodig je observaties in een “groter plaatje” te plaatsen. Processen die in de natuur plaatshebben worden vaak beïnvloed door factoren of omstandigheden die zich op grote afstand of in een andere sfeer bevinden. Zuur van industriële activiteit kan in een meer op duizenden kilometers afstand terecht komen. Planktonbloei in een rivier kan veroorzaakt worden door landbouwactiviteiten die ver stroomopwaarts zijn. Een zandstorm in een woestijn kan planktongroei in een verafgelegen oceaan bevorderen.

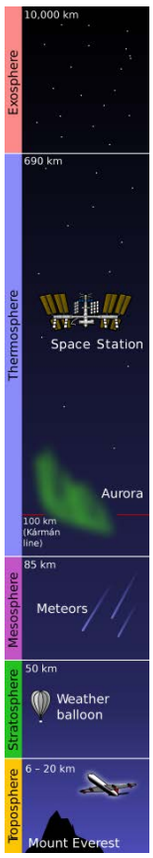
Natuurlijk zijn er ook veel lokale interacties en processen die zich min of meer geïsoleerd afspelen, maar voor een gedetailleerd begrip van de onderwaterwereld is het zinvol om eerst het “grote plaatje” door te nemen. Daartoe wordt ingegaan op dimensies en cycli. Eerst worden de dimensies van de verschillende sferen vergeleken. Daarna komen voorbeelden van cycli aan de orde. Specifiek gaat het daarbij om de energiecyclus, de koolstofcyclus en een korte introductie tot de stikstofcyclus. Deze zijn als voorbeelden gekozen, omdat ze zich er goed voor lenen om de noodzaak voor evenwicht te illustreren.

De sferen van de planeet aarde



De grootste invloeden op de duikomgeving resulteren van de aardkorst en de atmosfeer. De duikomgeving is deel van de hydrosfeer (wat alle plaatsen omvat die water bevatten). De aardkorst, de atmosfeer en de hydrosfeer zijn alle drie ontstaan uit materiaal dat afgegeven is door het bovenste deel van de mantel van de vroege aarde. De naam lithosfeer wordt gebruikt om de aardkorst samen met het bovenste deel van de mantel aan te duiden.

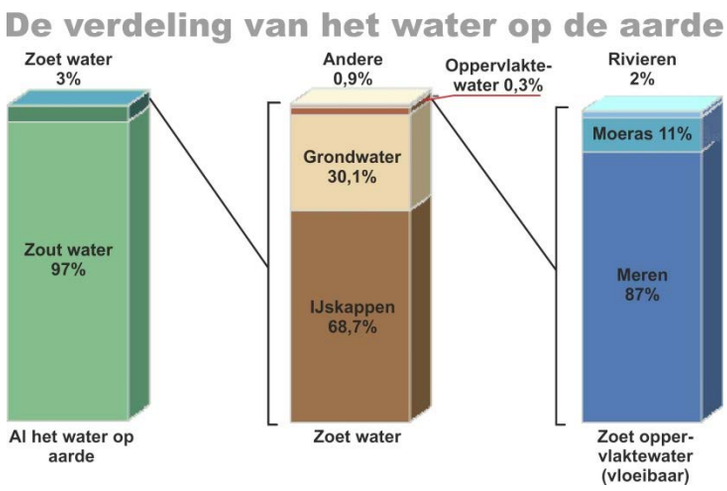
Wanneer het gaat om interactie met de hydrosfeer, dan moeten we de bovenste laag van de lithosfeer (de aardkorst) en het lagere deel van de atmosfeer (de troposfeer) in overweging nemen. De omstandigheden in dit deel van de aarde waren gunstig voor de ontwikkeling van leven. Alle levende organismen worden samen de biosfeer genoemd.



Interactie heeft plaats op locaties waar de biosfeer, de troposfeer, de lithosfeer en/of de hydrosfeer zich dicht genoeg bij elkaar bevinden om elkaar te beïnvloeden. Deze zone, waar die interacties plaats hebben, wordt ook pedosfeer of werkingssfeer genoemd. Dit is de som van alle organismen, de bodem, water en lucht. De pedosfeer is de buitenste schil van de aarde en ontwikkelt zich alleen op plaatsen waar er een dynamische interactie is tussen de lucht (in en boven de bodem), levende organismen, bodem (en vaste rotsen) en water in, op of onder de bodem. De pedosfeer is het fundament voor het leven op aarde.

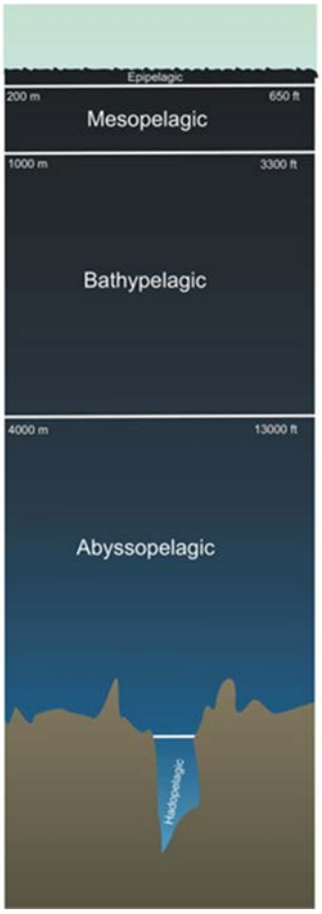
De hydrosfeer

Water bedekt 71% van de aarde. Het is essentieel voor alle levensvormen. De oceanen bevatten 97% van het water op onze planeet. 1% is grondwater en 2% is bevroren in gletsjers in ijskappen. Een kleiner deel is opgeslagen in andere grote wateren. 0,001% bevindt zich in de atmosfeer als luchtvochtigheid, water en neerslag. Slechts 3% is zoet water. Van dat zoete water is 99,1% opgeslagen als ijs of grondwater. Slechts 0,3% van het zoete water is in rivieren, meren en moerassen te vinden. Een nog kleiner deel (0,003%) is in organismen en geproduceerde producten vastgelegd.



De oceaan is diep. Het diepste punt (ongeveer 10.950 meter) is te vinden in de Marianentrog. Het is logisch om een zo grote waterkolom in verschillende zones te verdelen. De eenvoudigste manier is om

de oceaan (vanaf de oppervlakte tot de bodem) in twee zones te verdelen. Dit zijn de fotische zone, waarin genoeg licht doordringt om fotosynthese mogelijk te maken en de afotische zone, waar primaire productie niet mogelijk is (of waar helemaal geen licht doordringt).



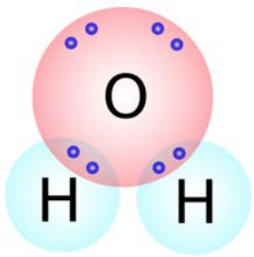
In een andere verdeling komt de epelagische zone overeen met de fotische zone. Deze begint aan de oppervlakte en reikt ongeveer 200 meter diep. De mesopelagische zone (200 tot 1.000 meter diepte) staat nog steeds toe dat een beetje licht doordringt (het wordt daarom ook de "twilight zone" genoemd). Het is te weinig licht voor voldoende fotosynthese om een ecosysteem te ondersteunen, maar wel voldoende om sommige organismen fluorescent te laten zijn.

De bathyale of bathypelagische zone (of middernachtzone) is volledig donker. De diepte is van 1.000 tot 4.000 meter. Er is wel leven, maar veel minder dan in de ondiepere waterlagen. Enkele van de grootste walvissen dalen tot deze diepte af om te eten. Op deze diepte leven geen jagers, omdat het te donker is om een prooi te zien. In het grootste deel van de oceaan rijkt de bathyale zone tot de bodem (wat de bentische zone heet).

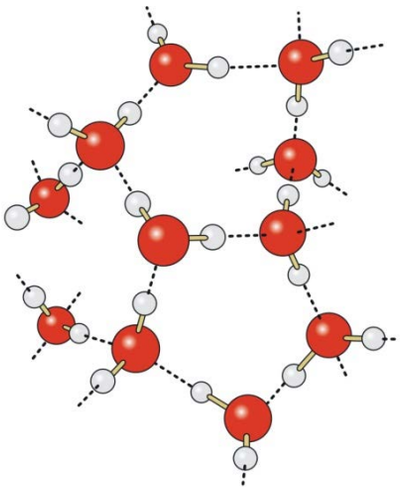
In de diepere delen van de oceaan is er ook een abyssale of abyssopelagische zone. De naam staat voor "bodemloos". Nog dieper dan de abbys is de hadale of hadopelagische zone. Tot deze zone behoren alleen de diepste troggen in de oceaan.

De bodem heet, ongeacht de diepte, de bentische zone. Organismen die op of in de bodem leven heten benthos. De bentische grenslaag is de zone waar het vaste materiaal van de bodem en de waterzuil in contact staan. Die zone heeft een grote invloed op biologische activiteit. De laag kan bestaan uit koraal, rots, zand of modder. Water dat dicht genoeg bij de bodem is om erdoor beïnvloed te worden heet de demersale zone. Vissen die daar leven heten demersale vissen. Vissen die midden in het water of dicht bij het wateroppervlak leven heten pelagische vissen.

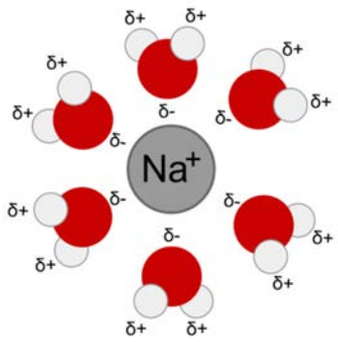
Waarom water uniek is



Leven op aarde zou zonder water niet mogelijk zijn. Water vervult vele functies die niet alleen leven mogelijk maken, maar ook een grote invloed hebben op de manier waarop de aarde en alle bewoners functioneren. Water wordt aangeduid als H_2O, wat betekent dat het samengesteld is uit een zuurstofmolecule en twee waterstofmoleculen. Zuurstof heeft in de buitenste schil zes elektronen en waterstof een enkele. Zuurstof en waterstof delen deze elektronen, wat resulteert in twee vrije elektronenparen. Die zorgen ervoor dat een watermolecule aan de ene kant een "positieve lading" heeft en aan de andere kant een "negatieve lading". Dat verschil in lading dwingt de watermoleculen in een vast patroon. Dit patroon heeft consequenties. Die consequenties geven water unieke kenmerken.



Net als vrijwel alle andere vloeistoffen en gassen, wordt water dichter naarmate het kouder wordt. Dit weet je als duiker, omdat warme waterlagen zich dicht bij de oppervlakte bevinden en koude waterlagen "onder de thermocline" gezocht moeten worden. Water begint zich echter anders te gedragen wanneer het afgekoeld wordt tot een temperatuur van ongeveer 4° Celsius. Op dat punt veranderen de eigenschappen. Wanneer water verder afgekoeld wordt, totdat het ijs wordt, dan neemt het ongeveer 9% meer plaats in dan water van 4° Celsius (wat nog vloeibaar is). Dat verklaart waarom een ijsberg deels boven water steekt. Wanneer water zich "normaal" zou gedragen, dan zou het ijs naar de bodem zinken. Daar zou het de vaste vorm waarschijnlijk behouden, omdat het ijs op diepte buiten het bereik van zonlicht is.



Dankzij de polaire eigenschappen van water (een verschil in lading tussen de twee kanten), is water een goed oplosmiddel. Zeezout (NaCl) kan daartoe als voorbeeld dienen. In water splitst het zout in een positief geladen Na^+ en een negatief geladen Cl^- ion. De watermoleculen positioneren zich dan rond deze ionen (dat zijn moleculen met een elektron teveel of te weinig, waardoor ze "geladen" zijn). Daardoor worden de ionen deel van de structuur van de vloeistof. Moleculen die in water oplossen heten "hydrofiel". Moleculen die niet in water oplossen heten "hydrofoob". Zouten, suikers, zuren, basen en gassen zoals zuurstof of koolstofdioxide zijn hydrofiel. Belangrijke componenten in de cellen van het lichaam, zoals DNA of proteïnen, zijn ook hydrofiel. Vetten zijn hydrofoob. Het gevolg is dat gelekte olie niet oplost, maar aan de oppervlakte blijft drijven, waar het een gevaar is voor vogels en vanwaar het op de kust terecht kan komen. Olie kan ook naar de bodem zinken, waar het de bacteriële activiteit doet toenemen.

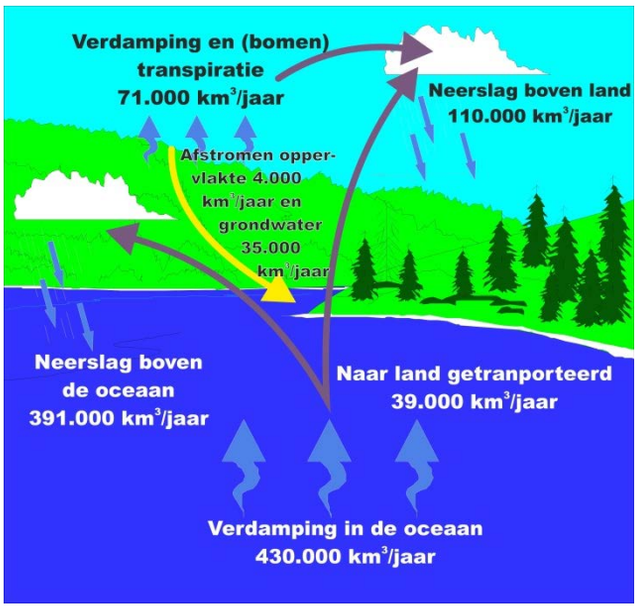
Een andere consequentie van de polariteit is de sterke aantrekkingskracht tussen de individuele watermoleculen. Dat geeft water een sterke oppervlaktespanning, wat resulteert in capillaire kracht. Capillaire kracht betekent dat water zich, tegen de zwaartekracht in, omhoog beweegt in een buis (of vergelijkbare vorm) van kleine diameter. Je kent dit waarschijnlijk van een blad papier waarvan de rand in het water gehouden wordt. Het water kruipt door het papier omhoog. Hetzelfde mechanisme staat grondwater toe om door de bodem omhoog te kruipen, totdat het in de aardlagen komt waar het opgenomen kan worden door de wortels van planten. Ook planten maken van dit principe gebruik om water naar de hogere delen van de plant te transporteren (planten beschikken echter ook over andere mechanismen die ook een rol spelen).

Water heeft zowel een hoge warmtecapaciteit als een hoge verdampingswaarde. De hoge warmtecapaciteit helpt erbij het klimaat in grote delen van de wereld mild te houden. In warme regio's (of gedurende het warme seizoen in dezelfde regio) warmt het water op en wordt de bijbehorende energie opgeslagen. Dit dempt het lokale klimaat. Verder van zee zijn de fluctuaties in temperatuur veel groter dan aan de kust. Water wordt over grote afstanden getransporteerd. Daardoor wordt energie uit warme gebieden beschikbaar in koelere gebieden. Dankzij het aangevoerde warme water is het klimaat milder. De hoge verdampingswaarde van water is belangrijk voor processen die voor afkoeling zorgen, waaronder zweten. Moleculen hebben als gas meer energie nodig dan als vloeistof. Wanneer een vloeistof toegestaan wordt een gas te worden, dan ontstaat daardoor koeling. De huid en de bloedvaten onder de plaats waar het zweet verdampt geven warmte af om het gas meer energie te geven. Dat heeft een koelend effect.

De watercyclus

Water is niet gebonden aan een vaste locatie, maar is deel van de watercyclus. Hoe indirect dan ook, uiteindelijk is al het water op de wereld verbonden. De oceanen staan in direct contact, maar ook zoet water zal op een bepaald moment terugkeren naar de oceaan waar het uit voortgekomen is.

De watercyclus begint met verdamping. De hoeveelheden zijn enorm. In het totaal komen ieder jaar 501.000 km³ water per jaar in de atmosfeer terecht. Het meeste daarvan door verdamping. Een kleiner deel komt van transpiratie van bomen en planten. Al dit water komt als neerlag weer naar beneden. Van de 430.000 km³ water die uit de oceaan verdampt, valt 391.000 km³ ook weer in de oceaan terug (als regen of een andere vorm van neerslag). De overige 39.000 km³ verplaatst zich via de atmosfeer en komt boven land terecht. Daar kan het opgeteld worden bij de 71.000 km³ die, door verdamping en transpiratie van bomen, vanaf het land in de atmosfeer terecht is gekomen. Dat brengt de totale hoeveelheid neerslag boven land op 110.000 km³. Om het systeem in evenwicht te houden moet de 39.000 km³ die vanaf zee naar boven het land getransporteerd is (via de atmosfeer), weer terug naar de oceaan. Dit stroomt in rivieren en kanalen over het oppervlak terug (4.000 km³), of onder de grond als grondwater (35.000 km³).



Het feit dat (uiteindelijk) al het water verbonden is, heeft consequenties voor vele milieukwesties (en ook politieke). Omdat er slechts een beperkte hoeveelheid zoet water beschikbaar is wordt het, vanwege de toenemende wereldbevolking, steeds waardevoller. Het meeste water dat voor consumptie en voor besproeiing gebruikt wordt, moet door het grondwater en het aan de oppervlakte stromende water geleverd worden (dit zijn de kleinste stromen in de watercyclus). Wanneer een regio meer van dat water neemt dan eerlijk zou zijn, dan kan dit reden voor een groot conflict worden. Voor het milieu betekent dit dat een toenemend aantal wateren boven hun capaciteit belast worden. Daardoor daalt het waterniveau in meren en rivieren tot ver onder het peil dat tien of twintig jaar geleden nog “normaal” was.

De watercyclus is een eenrichtingsweg voor schadelijke stoffen. Het is mogelijk dat via verdamping verontreinigingen in de lucht terecht komen, maar dat zijn slechts sporen. Het grondwater en het via de oppervlakte stromende water dragen enorme hoeveelheden stoffen mee naar de oceaan. Neerslag “reinigt” ook de atmosfeer van verontreinigingen op kosten van de oceanen. Het is waar dat de oceanen groot zijn. Bij een gemiddelde diepte van 3.790 meter en een oppervlakte van ongeveer 360.000.000 km², hebben ze tezamen een volume van meer dan 1.300.000.000 km³. In een dusdanig groot volume kunnen grote hoeveelheden schaadstoffen onopgemerkt blijven. Er zijn echter grenzen aan de hoeveelheden stoffen die in de oceaan gedumpt kunnen worden, zonder dat dit consequenties heeft. De verzuring van de oceaan en de dode zones die zich in de Golf van Mexico en de Oostzee ontwikkelen zijn alarmerende voorbeelden die later in dit boek aan de orde komen. Zulke voorbeelden zijn in het bijzonder beangstigend, wanneer we ons realiseren dat het nauwelijks mogelijk is om verontreinigingen uit de oceaan te verwijderen (wanneer dat überhaupt mogelijk is). Het duurt lang voordat in de oceaan een kritische grens overschreden is, maar wanneer het zover is, dan is dit waarschijnlijk onomkeerbaar.

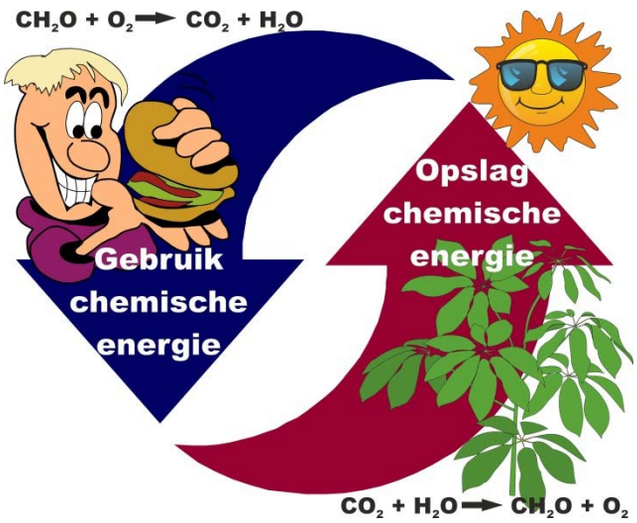
De energiecyclus

De formules voor primaire productie en consumptie zijn (in sterk vereenvoudigde vorm):

$$CO_2 + H_2O \rightarrow CH_2O + O_2 \text{ (voor productie)}$$

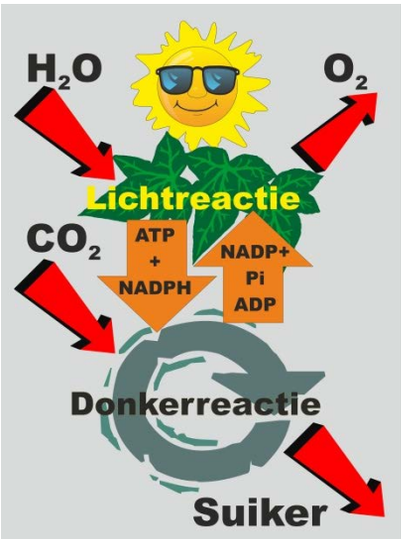
$$CH_2O + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O \text{ (voor consumptie)}$$

Primaire producenten zijn organismen die de energie van de zon gebruiken kunnen om moleculen met een grote energie-inhoud te maken. Die moleculen kunnen dan elders in het organisme gebruikt worden voor levensprocessen zoals reproductie, verdediging tegen fysische uitdagingen of een pathogeen, groei, et cetera. Sommige van die moleculen worden opgeslagen voor later gebruik of voor het nageslacht (bijvoorbeeld fruit). Planten en algen (waaronder fytoplankton) zijn primaire producenten.



Andere organismen zijn niet in staat om hun eigen energie te produceren en moeten energierijk voedsel eten. Organismen die zich direct met primaire producenten voeden heten herbivoren (planteneters) en dieren die herbivoren eten heten carnivoren (vleeseters). Sommige dieren (zoals de mens) hebben een gemengd dieet, wat ze tot omnivoren maakt. Bij consumptie wordt de fotosynthesereactie omgedraaid om de energie uit de suikers beschikbaar te maken. Vergeet niet dat primaire producenten dat zelf ook doen. Primaire productie heeft alleen plaats in de buitenste laag van het organisme (de groene delen van een plant). Op alle andere locaties, zoals de stam, wordt van energierijke moleculen gebruik gemaakt. Die energie is per slot van rekening niet voor consumenten vastgelegd. Het is bedoeld voor de eigenbehoefte van de plant.

Primaire producenten nemen alle benodigde stoffen op uit water, de bodem en lucht. Hun omgeving is hun bron van nutriënten. Consumenten zijn, voor alles wat ze nodig zijn, afhankelijk van primaire producenten. Voor hen is voedsel niet alleen een bron van energie, maar ook voor andere behoeften, zoals vitaminen. Wanneer het zover komt dat primaire producenten te langzaam groeien om in de behoefte van consumenten te voorzien, dan is de cyclus onderbroken en zullen consumenten verhongeren.

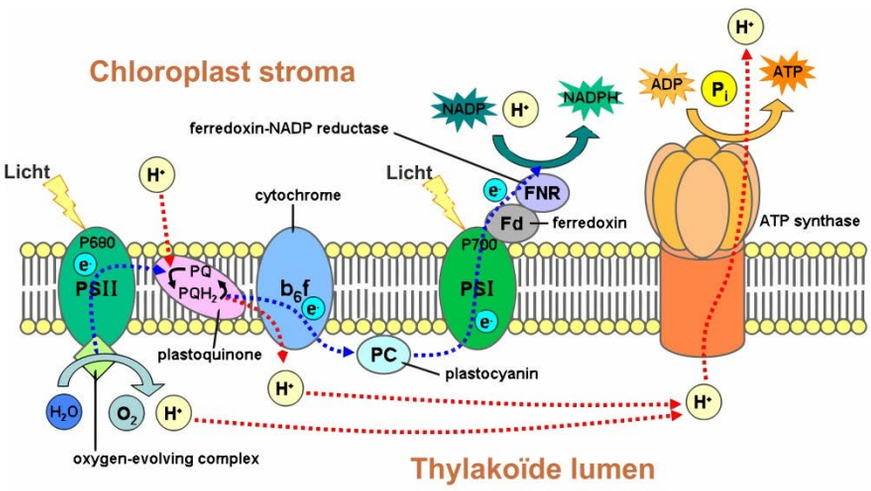


Denk eraan dat de chemische reacties voor productie en consumptie elkaar spiegelen. Wanneer de ene reactie veel sneller zou verlopen dan de andere, dan zouden de stoffen die nodig zijn voor die reactie opraken, omdat de andere het tempo niet kan bijhouden. Wat ook belangrijk is, is de locatie van de benodigde stoffen. Het helpt een consument in een stad niet dat de planten in een regenwoud veel energierijke moleculen produceren. Op dezelfde manier is een algenbloei een lokaal evenement. De lokale productie gaat in dat geval de lokale consumptie ver te boven. Ook wanneer wereldwijd gezien consumptie en productie in evenwicht

zijn, dan kan toch de lokale cyclus verstoord zijn.

De vereenvoudigde formule $CO_2 + H_2O \rightarrow CH_2O + O_2$ doet ons geloven dat fotosynthese een eenvoudig te begrijpen proces is. Dat is niet het geval. Het is zeer complex. De vereenvoudigde formule geeft de indruk dat een C van CO_2 gesplitst wordt en dat deze met een watermolecule verbonden wordt om suiker te produceren. Het O_2 zou daarbij dan als afvalproduct ontsnappen. Dat is echter niet hoe het gaat. Het is niet nodig om fotosynthese volledig te begrijpen, of om het proces te onthouden. Het is voldoende te weten dat fotosynthese alleen mogelijk is wanneer aan bepaalde criteria voldaan wordt. Om dat duidelijk te maken gaan we hieronder meer gedetailleerd op het proces in.

Als eerste wordt de energie van de zon gebruikt om water te splitsen in protonen (H^+), elektronen (e^-) en zuurstof. De protonen en elektronen worden dan gebruikt om tussenproducten te maken (die geladen zijn met "energie"). Deze tussenproducten worden in een tweede reactie in de reeks gebruikt. Die heet de Calvincyclus (deze wordt ook de donkerreactie genoemd, wat eigenlijk fout is omdat die reactie zowel in het licht als bij donker plaatsheeft).

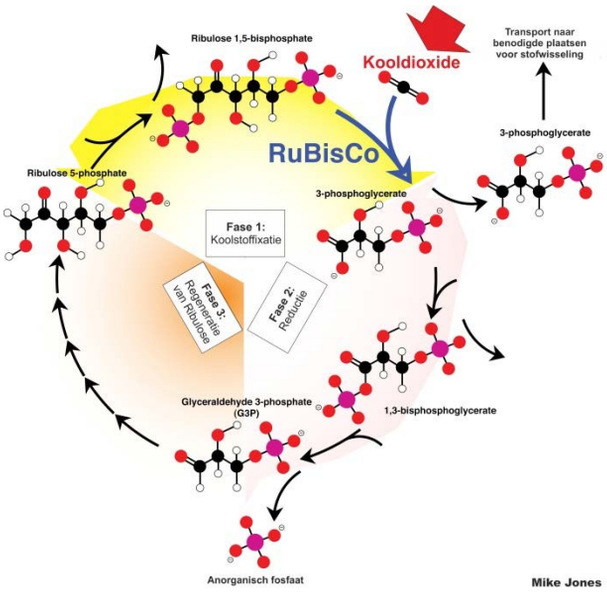


Zonder teveel in detail te gaan, kun je je de lichtreactie als volgt voorstellen: de energie van de zon wordt gebruikt om een negatieve lading (de e^-) aan de ene kant van het membraan te brengen en de positieve lading (H^+) aan de andere kant. Zuurstof ontsnapt als afvalproduct. Voor dit doel "springen" de elektronen over een ketting van moleculen. Een proton "kanon" dat ATP synthase genoemd wordt, maakt gebruik van het positief/negatief potentieel om de protonen naar de andere kant van het membraan "te schieten". Daar binden de protonen zich tot een tussenproduct (NADP wordt NADPH). De energie die door de beweging van de protonen ontstaat wordt gebruikt om een fosformolecule aan ADP te binden (de D staat hier voor Di, ofwel twee) wat daardoor ATP wordt (hier staat de T voor Tri ofwel drie). De energie die in dit tussenproduct opgeslagen is wordt dan in de donkerreactie gebruikt. Dat is de reactie waar suiker gemaakt wordt. ATP is dus transporteerbare energie. Het staat een organisme toe om energie, die op de ene plaats vastgelegd is, op een andere plaats te gebruiken. Vergelijk dat met elektriciteit die ook "getransporteerd" kan worden. De elektriciteitscentrale staat ver weg van je huis, maar je kunt de energie in je huis gebruiken.

Kooldioxide speelt een rol in de "donkerreactie" of "Calvincyclus". De kooldioxidemoleculen gaan de cyclus één voor één binnen (zie de rode pijl). Nadat de energie van ATP gebruikt is (en dus weer in ADP en moleculaire fosfor gesplitst is, gaat het terug naar de lichtreactie. De protonen die in de suiker ingebouwd worden, worden aangevoerd als NADPH, wat daarna zonder het proton als NADP naar de lichtreactie terugkeert.

Merk op dat ADP en ATP fosfor bevatten (de P aan het einde). Dit geeft aan dat dit element essentieel is om leven mogelijk te maken. Wanneer er geen fosfor is, dan is fotosynthese niet mogelijk omdat geen ADP en ATP gemaakt kan worden.

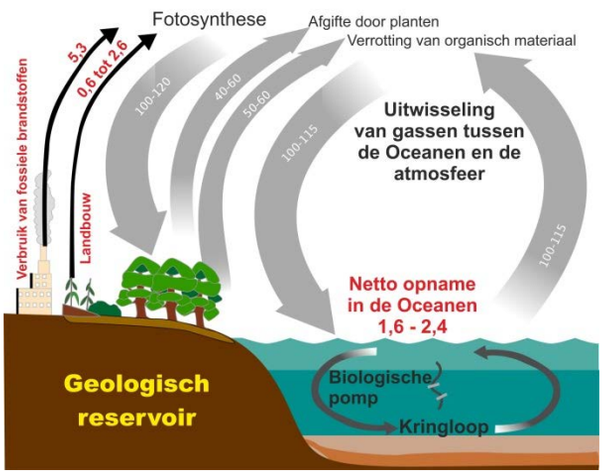
In de lichtreactie is een ketting van zeer gespecialiseerde moleculen te vinden. Voor de opbouw van ieder van deze moleculen is een specifiek aantal van verschillende elementen nodig. Dat zijn niet alleen koolstof, waterstof, zuurstof stikstof en fosfor, maar in veel gevallen ook metalen of andere moleculen. De benodigde hoeveelheid van deze moleculen is zuur klein (net genoeg om een aantal gespecialiseerde moleculen te maken). Ze worden daarom sporenelementen genoemd. Sporenelementen kunnen dus een "beperkende factor" zijn. Zo is in de oceanen, op het zuidelijke halfrond, actief ijzer (Fe) een beperkende factor voor algengroei.



De energiecyclus geeft de indruk dat de relatie tussen productie en consumptie geen (grote) vertraging kent. In de regel is dat waar. Boeren verbouwen gewassen, die onmiddellijk op de markt gebracht worden. Er zijn echter uitzonderingen. Wanneer de productie groter is dan de consumptie, dat ontstaat een overschot dat (onder specifieke omstandigheden) opgeslagen kan worden. Deze koolstofrijke suikers hopen zich dan ondergronds op. In het verleden hebben zich gedurende miljoenen van jaren enorme hoeveelheden opgehoopt. Die ophopingen zijn inmiddels afgebroken tot kolen, olie en aardgas. Het gebruik van deze fossiele brandstoffen brengt nu de koolstofcyclus uit evenwicht. Dat is het onderwerp van het volgende deel.

De koolstofcyclus

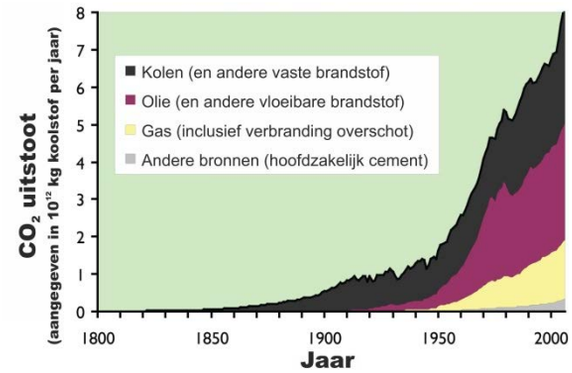
Om de koolstofcyclus te begrijpen moeten we onderscheid maken tussen de geologische en de biologische cyclus. De geologische cyclus en extreem langzaam. Het gaat om een orde van grote van miljoenen jaren. De geologische cyclus beperkt de hoeveelheid elementen (specifieke moleculen zoals zuurstof of stikstof) die beschikbaar is voor snellere cycli, zoals de biologische cyclus. In een snellere cyclus zijn elementen veel sneller voor hergebruik beschikbaar. Het gaat daar om uren, dagen, maanden of jaren. Elementen in een snelle cyclus zijn toegankelijk voor de gebruikers, terwijl elementen in een geologische cyclus buiten bereik zijn. Deze zijn diep onder de grond begraven of liggen op de bodem van de oceaan. Om elementen uit een geologische cyclus weer beschikbaar te maken voor de snellere cycli is een geologische gebeurtenis nodig. Een vulkaanuitbarsting is daarvan een voorbeeld. De mens heeft het evenwicht tussen de geologisch en biologische cycli verstoort, door miljoenen jaren oude afzettingen uit de grond of van de bodem van de oceaan te halen. De winning van aluminium uit bauxiet is daarvan een voorbeeld. Om de consequenties van ingrepen in de geologische cyclus duidelijk te maken, zullen we de koolstofcyclus als voorbeeld gebruiken.



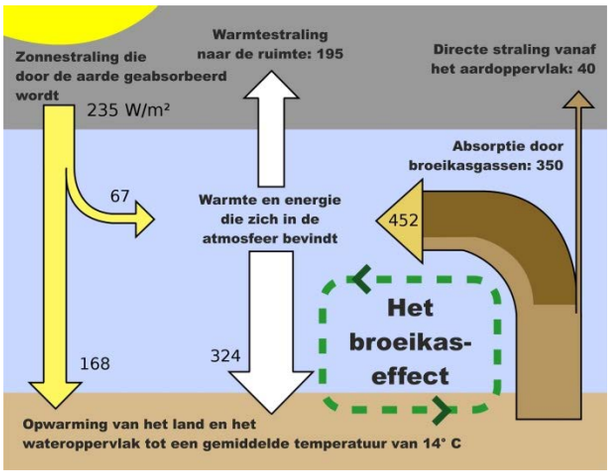
De hoeveelheid koolstof die iedere dag in natuurlijke processen wisselt tussen kooldioxide een koolhydraten is enorm. De zon staat aan de basis van die reactie en dat was het onderwerp van het voorgaande deel. Je zou dus mogen aannemen dat de productie van koolhydraten gedurende de nacht stopt en dat de productie lager is in de winter dan in de zomer. Op een langere tijdschaal

moeten productie en consumptie echter in evenwicht zijn. Wanneer dat niet het geval zou zijn, dan zou één van de reacties de benodigde stoffen volledig opgebruiken. Het product van die reactie zou zich dan ophopen. Het evenwicht tussen primaire productie en consumptie is echter nagenoeg perfect. Het vrijwel gelijkblijvende zuurstofgehalte in de atmosfeer is een indicator voor de juistheid van deze uitspraak.

Een deel van de koolhydraten wordt voor langere tijd aan de cyclus onttrokken. Biomassa is daarvan een voorbeeld. Bomen, vee en alle andere levende wezens bestaan grotendeels uit koolhydraten en water. Zolang het organisme leeft is die koolstof niet beschikbaar. Een ander deel (meest van de kalkskeletten van micro-organismen) zink als calciumcarbonaat ($CaCO_3$) naar de bodem van de oceaan. Pas miljoenen jaren later komt het weer aan de oppervlakte waar het (bijvoorbeeld) als kalksteen aan de cyclus kan deelnemen. Een deel van de biomassa komt terecht in een omgeving zonder zuurstof. Hier kan het niet gebruikt worden. In een dergelijke omgeving vervallen de koolhydraten langzaam. Ze verliezen hun zuurstof en worden moleculen die alleen uit koolstof en waterstof bestaan. Ze heten dan koolwaterstoffen. De koolwaterstoffen zijn gedurende miljoenen jaren aan de cyclus onttrokken. De energierijke moleculen worden eerst turf, en vervolgens bruinkool, kolen, olie en tenslotte aardgas. We noemen al deze koolwaterstoffen fossiele brandstoffen. Fossiele brandstoffen komen terug in de cyclus als gevolg van geologische processen, zoals erosie. Dit houdt de cyclus in evenwicht. Het verlies van koolhydraten in zuurstofarme omgevingen wordt gecompenseerd door de terugkeer van koolwaterstoffen miljoenen jaren later.



De mens heeft deze cyclus verstoord. Gewonnen fossiele brandstoffen worden in een veel te hoog tempo verbrand. Om de fossiele brandstoffen die we per jaar verbranden te vervangen zouden we de volledige primaire productie aan land en in de oceaan voor de komende 400 jaar moeten investeren. Er blijft in die 400 jaar niets voor consumptie over. Daardoor komt 21,3 biljoen ton kooldioxide in de atmosfeer terecht. Daarvan kan slechts de helft opgenomen worden door natuurlijke processen. Dit lijkt enorm veel te zijn, maar het is slechts 4% van de totale jaarlijkse productie van kooldioxide. Het verschil is echter dat voor de natuurlijke productie een tegenpool bestaat. Andere organismen gebruiken de geproduceerde kooldioxide in ongeveer hetzelfde tempo. Voor het verbranden van fossiele brandstoffen is er geen tegenpool. De geproduceerde kooldioxide wordt niet verbruikt en hoopt zich op in de atmosfeer en de oceaan. Die ophoping van kooldioxide veroorzaakt verschillende problemen, waarvan klimaatverandering de meeste aandacht krijgt. Ook de minder bekende problemen zijn echter belangrijk. Dat zijn onder andere de verzuring van de oceaan en de snellere groei van planten.

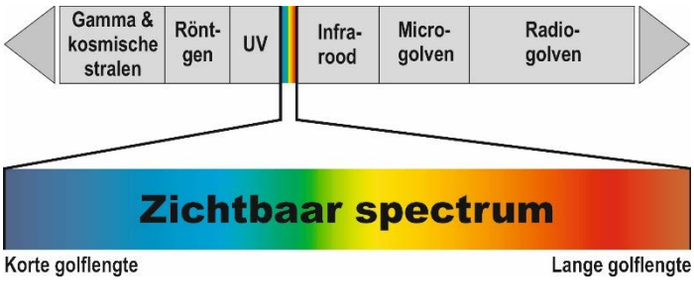


Klimaatverandering

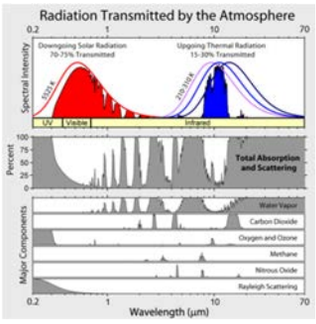
Zonlicht verwarmt het aardoppervlak. Het gevolg is dat de opgewarmde aarde warmte terug straalt richting de ruimte. Net als een radiator begint de aarde warmte uit te stralen wanneer deze op temperatuur is. De gemiddelde temperatuur op aarde is het gevolg van de verhouding tussen binnenkomende en uitgaande straling. Je kunt je voorstellen dat een verstoring in de hoeveelheid binnenkomende en uitgaande straling het

systeem doet veranderen. De gemiddelde temperatuur zal veranderen.

Variërende temperaturen zijn niets nieuws. Een periodische cyclus van zulke veranderingen wordt veroorzaakt door veranderingen in de straling van de zon. Ook wanneer de gemiddelde temperatuur min of meer constant is, zijn er lokale variaties. Het warme zomerweer op het noordelijk halfrond wordt gecompenseerd door een koude winter op het zuidelijk halfrond. Temperatuurverschillen tussen twee locaties hebben luchtbeweging tot gevolg. Wanneer de verschillen groter worden, wordt ook de luchtbeweging intensiever. Er zijn ook factoren die temperatuurverschillen temperen. Water speelt een belangrijke rol bij het bufferen tegen temperatuurverschillen. Water kan zeer veel warmte-energie opnemen (vanwege de hoge warmtecapaciteit is veel warmte nodig om water op te warmen). Die opgeslagen energie is dan beschikbaar voor koudere gebieden of koudere perioden in hetzelfde gebied.



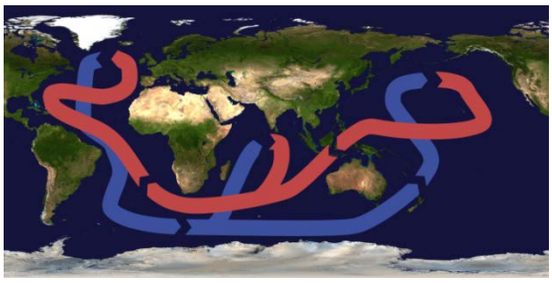
De gassen in de atmosfeer filteren de binnenkomende en uitgaande straling. De kleur van het binnenkomende en uitgaande licht is verschillend. De binnenkomende straling is hoofdzakelijk zichtbaar en ultraviolet licht. De uitgaande straling is grotendeels infrarood. Verschillende gassen filteren verschillende frequenties. Ultraviolet wordt door ozon gefilterd. Gelukkig is dat zo, want ultraviolet licht beschadigt cellen die fotosynthese doen en kan huidkanker veroorzaken. Het binnenkomende zichtbare licht wordt deels door wolken geblokkeerd. Infrarood licht is een verzamelnaam voor een hele reeks van frequenties. Een deel van het infrarode licht wordt ook door wolken geblokkeerd. Andere infrarode frequenties worden geblokkeerd door bepaalde gassen in de atmosfeer. Die gassen worden broeikasgassen genoemd. Dankzij deze gassen, en in het bijzonder waterdamp en wolken, is de gemiddelde temperatuur op aarde ongeveer 30°C hoger dan het zonder atmosfeer zou zijn. Zonder broeikasgassen zou de aarde te koud zijn voor leven.



Wanneer we de binnenkomende en uitgaande straling zowel aan het aardoppervlak, als in de atmosfeer (satelliet) meten, dan wordt duidelijk welke frequenties in welke mate gefilterd worden. De absorptie van frequenties in de atmosfeer loopt uiteen van vrijwel 0% tot complete absorptie (100%). De meeste ultraviolette frequenties worden geabsorbeerd door ozon en zuurstof en de meeste infrarode frequenties door waterdamp. Er zitten echter gaten (atmosferische vensters) in het spectrum dat door waterdamp geabsorbeerd wordt. Door deze atmosferische vensters kan infrarood licht de atmosfeer ontsnappen. Het zijn dus de atmosferische vensters die voorkomen dat de aarde te warm wordt. Broeikasgassen tenderen ertoe de atmosferische vensters te sluiten. Dat brengt het evenwicht tussen binnenkomende en uitgaande straling uit balans. Het is de oorzaak van de opwarming van de aarde. Waterdamp is het belangrijkste broeikasgas. Het vervult een essentiële rol die het leven op aarde mogelijk heeft gemaakt. Ons huidige probleem zijn de gassen die de atmosferische vensters, die door waterdamp zijn opgelaten, sluiten. Kooldioxide en methaan zijn voor een groot deel van dit probleem verantwoordelijk.

Mogelijke consequenties van klimaatverandering

Het is moeilijk te voorspellen hoe ernstig de gevolgen van de opwarming van de aarde zullen zijn, wanneer bepaalde grenzen overschreden worden. Door uitzettend water en het smelten van gletsjers en ijskappen zal het zeeniveau stijgen. Het is mogelijk om te berekenen hoeveel de zeespiegel stijgt als al het ijs smelt, maar dat zal waarschijnlijk niet het geval zijn. Het is ook moeilijk te bepalen hoeveel het water zal opwarmen. Daardoor is ook de uitzetting van water onduidelijk. De stijging in temperatuur is



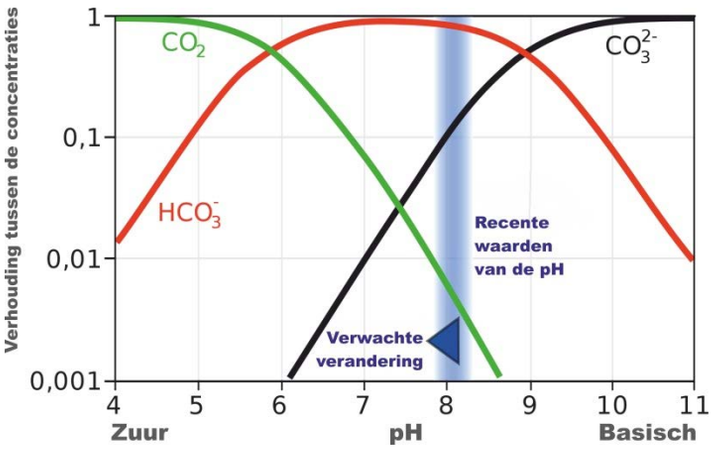
niet gelijkmatig over de wereld verdeeld. De gemiddelde temperatuur zal stijgen, maar dat betekent niet dat er overal een temperatuurstijging zal zijn.

Een voorbeeld. De thermohaliene circulatie brengt warm water naar de regio tussen Noorwegen en Groenland. De energie die in het water opgeslagen is wordt daar afgegeven aan de atmosfeer, waardoor het klimaat in de regio redelijk mild is. Het afkoelende water wordt steeds zwaarder. Uiteindelijk zinkt het duizenden meters diep naar de bodem, waar het een stroming langs de bodem op gang brengt. Die stroming gaat richting de Grote en Indische Oceanen.

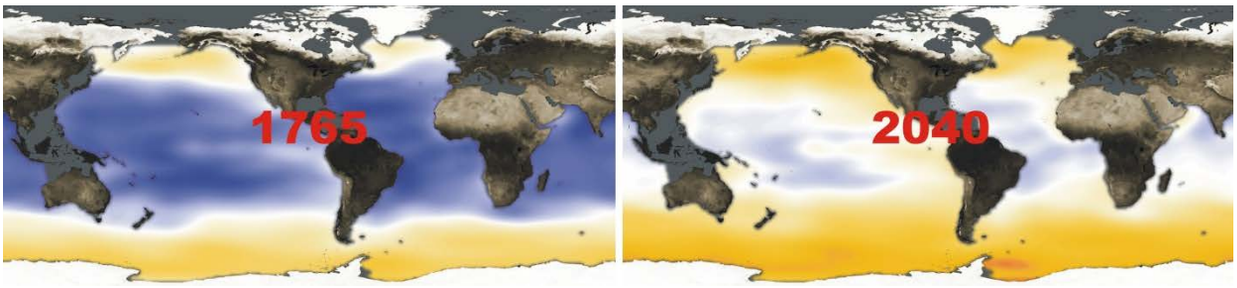
Wanneer het ijs van de Noordpool en op Groenland smelt, dan komt zoet water terecht in de regio waar de thermohaliene circulatie begint. Zoet water is lichter dan zout water. Wanneer zoet water zich met het afkoelende zoute water mengt, dan zal het niet meer naar de bodem zinken. De stroming zal daardoor steeds langzamer worden of stil komen te liggen. Wanneer dat gebeurt, dan zal aan de oppervlakte geen warm water meer naar de regio stromen. Daardoor zal het plaatselijke klimaat kouder worden (ondanks een stijging van de gemiddelde temperatuur op de wereld). Dit zou het begin van een nieuwe ijstijd kunnen zijn. Daardoor wordt de ijskap dikker en zal het zeeniveau weer dalen. Dit is precies het omgekeerde van wat gebeurd wanneer de thermohaliene circulatie actief blijft. Het is gemakkelijk te voorspellen dat de gemiddelde temperatuur zal stijgen. De consequenties zijn echter niet te voorspellen. Dat is dan ook de reden voor de vele tegenstrijdige meldingen in de media.

Verzuring van de oceaan

Zoals voorheen vermeld kan ongeveer de helft van de kooldioxide die voortkomt uit de verbranding van fossiele brandstoffen door natuurlijke processen opgenomen worden. Het meeste van die kooldioxide wordt door de oceaan opgenomen. Je zou dus kunnen zeggen dat de oceaan buffert tegen klimaatverandering.



Bij normale concentraties heeft kooldioxide een bufferende werking voor de zuurgraad. Het houdt de pH (zuurgraad) van de oceaan op een waarde van ongeveer pH8. Dit gaat als volgt. In het water wordt een deel van het CO_2 (kooldioxide) koolzuur (H_2CO_3) doordat water (H_2O) en CO_2 zich binden. Het koolzuur staat dan een proton (H^+) af en wordt bicarbonaat (HCO_3^-). Het bicarbonaat kan nog een proton afstaan, waarna het carbonaat (CO_3^{2-}) zou worden. Naarmate het water meer protonen bevat wordt de pH lager (Zuurder). Carbonaat en bicarbonaat verbinden zich in zuur water met protonen totdat de pH weer ongeveer 8 is. Dat is de normale pH voor de oceaan. Wanneer de pH omhoog gaat (basisch) dan splitsen carbonaat en bicarbonaat weer protonen af totdat de pH gestabiliseerd is.

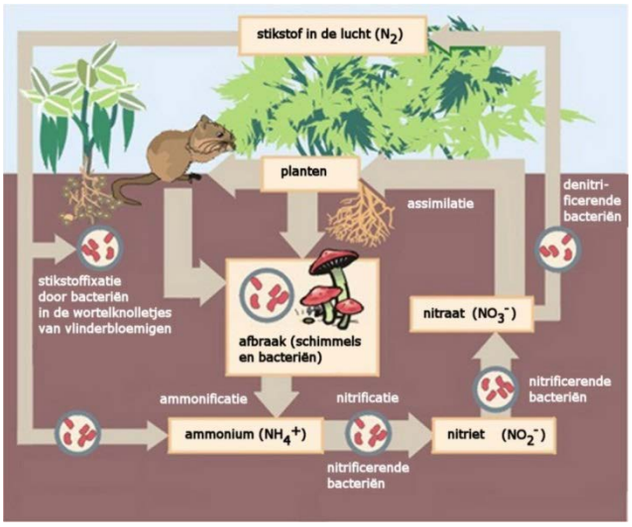


Vanwege het huidige zeer hoge kooldioxidegehalte in de oceaan is het buffersysteem uit balans. De verschuiving naar een lagere pH is al meetbaar. Het is de verwachting dat de oceaan steeds zuurder zal worden. De bovenstaande illustratie geeft een projectie weer, op basis van metingen. Het geeft aan dat de verzadiging met kooldioxide al tot grote diepte is doorgedrongen. Dit proces heet verzuring van de oceaan. Die verzuring heeft consequenties voor organismen met structuren van calciumcarbonaat ($CaCO_3$) zoals schelpen of een skelet. Dergelijke structuren worden door zuur beïnvloed. Ze worden zwakker omdat calciumcarbonaat in zuur oplost.

Wanneer je het schema met de toestanden van koolzuur in water van voorheen bekijkt, dan wordt een ander potentieel probleem duidelijk. We zien in dat schema dat de hoeveelheid carbonaat (CO_3^{2-}) snel afneemt wanneer de pH daalt. Dieren die structuren van calciumcarbonaat hebben kunnen die alleen met carbonaat maken (niet van bicarbonaat of koolzuur). Wanneer minder carbonaat beschikbaar is, dan zal dit de groei van organismen remmen. De omvang van dit probleem is nog niet duidelijk. In onderzoek zijn groeistoringen voor verschillende organismen aangetoond (schaaldieren, koralen, algen, et cetera).

De stikstofcyclus

De stikstofcyclus is het laatste voorbeeld van een cyclus dat in dit hoofdstuk gegeven wordt. Natuurlijk zijn er cycli voor alle stoffen. De watercyclus was een voorbeeld voor uitsluitend hoeveelheden. Het laat zien waar de verschillende ophopingen van dezelfde stof (water) te vinden zijn en hoe deze zich van het ene naar het andere reservoir verplaatsen. De energiecyclus heeft aangegeven hoe twee reacties elkaars tegengestelde zijn en hoe de productieve activiteiten van het ene organisme in de energie voor het andere voorzien. De koolstofcyclus heeft daarmee een directe samenhang, maar heeft een aantal aanvullende consequenties en complexiteiten in beeld gebracht. We gebruiken de stikstofcyclus nu om te laten zien dat we van bacteriën afhankelijk zijn, om bepaalde cycli naar behoren te laten functioneren.



Stikstof (N_2) is onder normale omstandigheden inert. De oorzaak daarvoor is de zeer sterke drievoudige binding van N_2. Dit betekent dat twee elementaire N atomen drie elektronenparen met elkaar delen wanneer N_2 gevormd wordt. Voordat stikstof met een ander element, zoals zuurstof, reageren kan, moet die sterke binding verbroken worden. Daarvoor is veel energie nodig, of moeten speciale hulpmiddelen beschikbaar zijn. Levende organismen hebben stikstof nodig om te leven, te groeien en zich voort te planten. Ze kunnen echter niet van stikstof uit de atmosfeer gebruik maken.

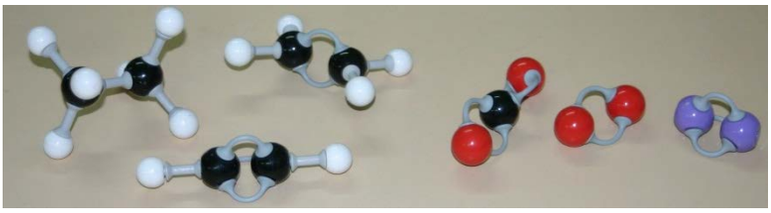
Er zijn omstandigheden waarin er wel genoeg energie beschikbaar is om de sterke binding van stikstof te verbreken. Dat is bijvoorbeeld het geval in de motor van een auto. De temperatuur (energie) is daar hoog genoeg om stikstof (uit de lucht of als vervuiling in de benzine) met de zuurstof uit de lucht te laten reageren. Dit resulteert in stikstofoxiden, wat een reactieve stikstofverbinding is. Stikstofoxiden behoren tot de veroorzakers van milieuproblemen, zoals zure regen, overmatige broeikasgassen (stijging van de gemiddelde temperatuur) en overbemesting (eutrofiëring). Stikstofoxiden zijn niet de enige oorzaak van deze problemen, maar dragen daar wel aan bij.

Sommige organismen hebben speciale hulpmiddelen (enzymen zoals nitrogenase) om van atmosferische stikstof (N_2) reactieve stikstofverbindingen te maken. Bij ecologische landbouw wordt soms klaver gebruikt voor stikstofbinding, in plaats van kunstmest. Klaver heeft de unieke eigenschap om atmosferische stikstof tot andere stikstofhoudende moleculen om te zetten. De klaver wordt niet gewied, maar wordt op het land gelaten zodat de andere planten de reactieve stikstofverbindingen kunnen opnemen die door de klaver geproduceerd zijn. In de meeste gevallen zijn organismen die reactieve stikstofverbindingen aanmaken echter bacteriën.

Een probleem met de reactieve stikstofverbinding nitraat (NO_3^-) is dat deze in water oplost. Die eigenschap verklaart waarom nitraat snel uit de bodem spoelt en zo in het water terecht komt. Andere verbindingen zoals inert N_2 en ammoniak (NH_3) gaan verloren naar de atmosfeer (ammoniak is verantwoordelijk voor de geur wanneer landbouwgrond bemest wordt).

Er zijn ook bacteriën nodig die de omgekeerde reactie uitvoeren. Deze zetten reactieve stikstofverbindingen om in atmosferische stikstof (denitrificatie). De ophoping van reactieve stikstofverbindingen in de grond en in het water zou enorm zijn wanneer deze omgekeerde reactie niet uitgevoerd wordt. De atmosfeer zou dan stap voor stap alle stikstof kwijtraken. Bacteriën spelen dus een belangrijke rol in de cyclus. Er is echter bewijs dat de denitrificatie minder effectief is wanneer antibiotica zich in het water ophopen. Die antibiotica komen via rioolwater (antibiotica die door de mens uitgescheiden zijn) en door het gebruik van antibiotica voor viskweek in het water terecht.

Om de sterke drievoudige binding van stikstof te illustreren toont de foto ethaan (C_2H_6), ethyleen (C_2H_4) en acetyleen (C_2H_2). Rechts is kooldioxide (dubbele binding, zuurstof en stikstof met drievoudige binding te zien (paars).

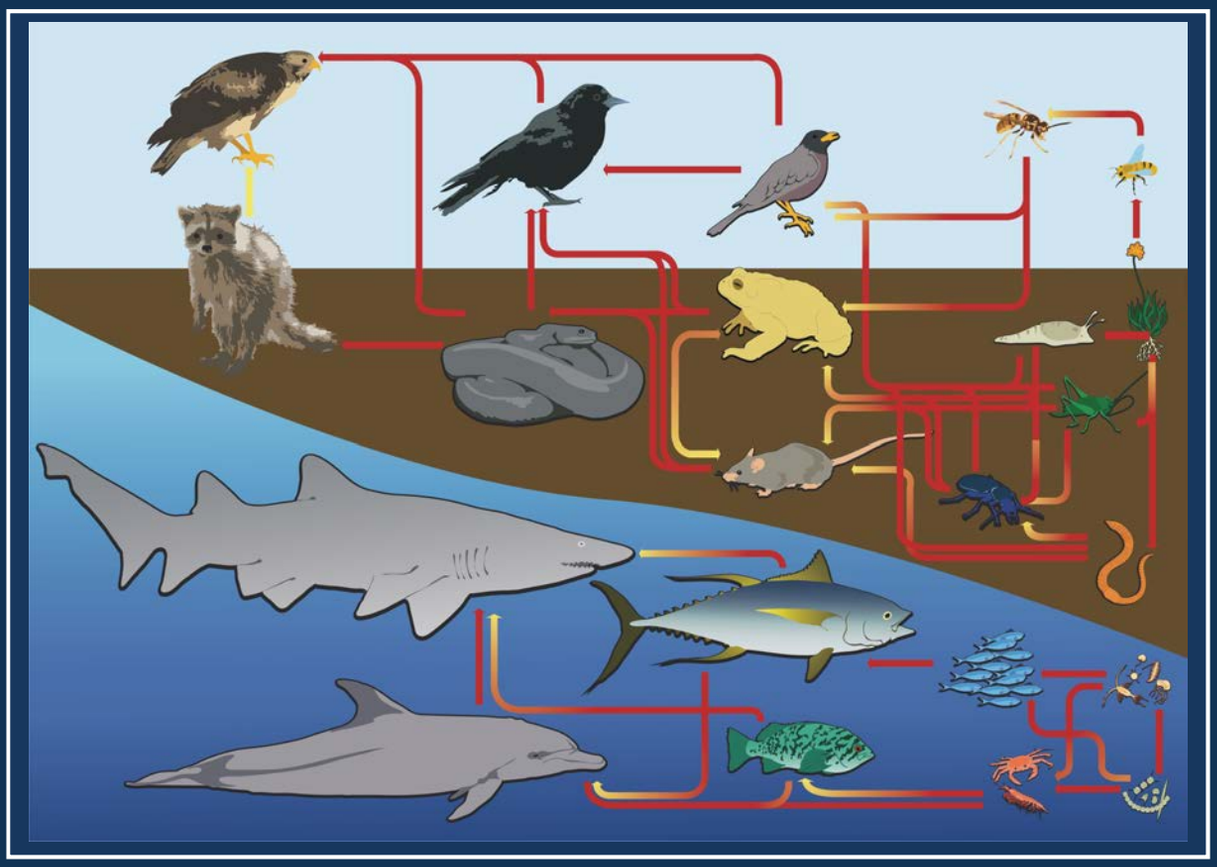


Naturalist

Oorspronkelijk was het studiegebied van de biologie de verschillende levensvormen, de omstandigheden en wetten die daarop van toepassing zijn en de oorzaken waardoor deze beïnvloed worden. Het werd geïntroduceerd als de leer van levende wezens, levensvormen en levensverschijnselen. Het werk van vroege biologen was hoofdzakelijk het documenteren van verschillende categorieën van leven op aarde. Aan organismen werden namen gegeven om ze in te delen in groepen op basis van hun (aangenomen) relaties met andere organismen.

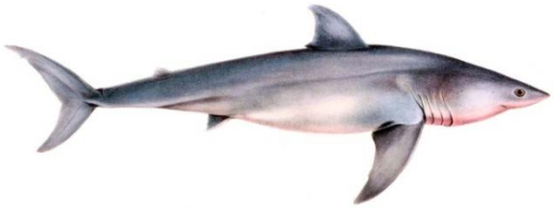
De moderne biologie kan beschreven worden aan de hand van vijf verenigende principes. Ten eerste zijn cellen de basale bouwstenen van het leven. Hier wordt de nadruk gelegd op erfelijke informatie die via DNA doorgegeven wordt. Ten tweede is er de evolutietheorie die beschrijft dat bepaalde organismen nog steeds in leven zijn en andere niet als gevolg van natuurlijke selectie. Als derde is er de genetica die ervan uitgaat dat (weer) DNA een cruciale rol speelt. Ten vierde is er de homeostase die verklaart dat levende organismen hun interne milieu via diverse dynamische aanpassingen in evenwicht houden. De vijfde is energie, die uitlegt hoe de energie van de zon wordt vastgelegd en dan een weg vindt door de daaropvolgende voedselketen.

Dit hoofdstuk begint met de verschillen tussen de wereld onder water en aan land, wat in het licht van de evolutie geplaatst kan worden. Het gaat dan verder met de indeling van levensvormen. De interacties die daarna besproken worden zijn een inleiding tot de ecologische aspecten van biologie. De onderstaande tekening is een voedselweb wat voortkomt uit de ecologie.



Land t.o.v. water

De onderwaterwereld is volledig verschillend van de wereld boven water. Dat wordt veroorzaakt door fysische en structurele verschillen. Organismen onder water zien er volledig anders uit dan organismen aan land. We gaan hier op enkele van die fysische en structurele verschillen en hun consequenties in.



Water is ongeveer 800 keer dichter dan lucht. Dat maakt het stroomlijnen van de lichaamsvorm belangrijker. Sommige dieren aan land, zoals de poema, zijn gestroomlijnd, maar er is nauwelijks een relatie tussen hun snelheid en lichaamsvorm. Alle jagers onder water hebben een gestroomlijnde vorm, wat noodzakelijk is om snel genoeg te kunnen bewegen om te jagen.

Ook de zwaartekracht brengt verschillen met zich mee. Boven water moeten zelfs vogels tegen de zwaartekracht vechten. Ze moeten regelmatig gaan zitten omdat het vliegen veel kracht kost. Een kleine vogel of een insect moet een enorm aantal vleugelbewegingen maken om "bewegingsloos te zweven", om te eten en om te drinken. Een schorpioenvis hoeft nauwelijks te bewegen om op dezelfde plaats te blijven. Organismen onder water bemerken de zwaartekracht. Ze zwemmen immers met de juiste kant naar boven. Ze worden echter veel minder door de zwaartekracht beïnvloed.

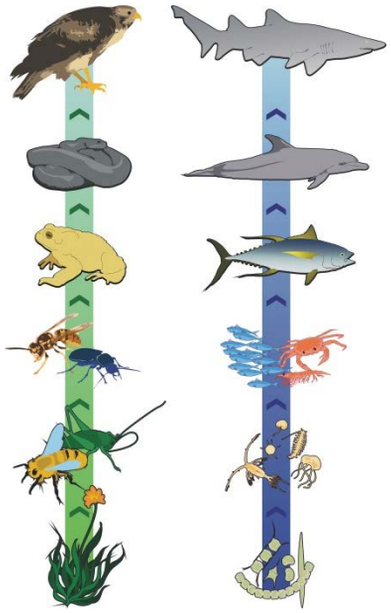
Vanwege de zwaartekracht moeten dieren aan land een stevig skelet en sterke spieren hebben. Onder water kun je dieren tegenkomen die helemaal geen skelet hebben. Bijvoorbeeld kwallen. Aan land moet iedere kilo lichaamsgewicht tegen de zwaartekracht "gedragen" worden. Dat beperkt de potentiële grootte van organismen. Die beperking bestaat onder water niet. Onder water komen veel grotere dieren voor dan aan land.

Eieren moeten aan land tegen de zwaartekracht beschermd worden, wat onder water niet het geval is. Eieren onder water zien eruit als gelei. Sommige dieren die aan land leven, hebben geen harde schaal voor hun eieren ontwikkeld en moeten daarom in het water terugkeren om eieren te leggen (bijvoorbeeld padden). Landdieren die naar het water zijn teruggekeerd en die al eieren met harde schaal ontwikkeld hadden komen aan land om eieren te leggen. Dat zijn bijvoorbeeld zeeschildpadden. Beweging onder water heeft plaats in drie dimensies, waardoor andere bewegingspatronen ontstaan dan aan land. Dit heeft consequenties voor de verdeling van zuurstof en meststoffen. Plankton kan zelf niet bewegen. Het beweegt mee met het stromende water. Dieren die zich met plankton voeden volgen daarom de stroom.

Veel dieren onder water hoeven niet op zoek naar voedsel. Het voedsel komt haar hun toe, wat ze toestaat op hun plaats te blijven. Dit is het geval voor anemonen, koralen, wormen, et cetera. Op land zou het voor een op een plaats gefixeerd dier niet mogelijk zijn om te overleven. In het water kunnen larven en zaden over enorme afstanden getransporteerd worden. Zelfs een aantal landplanten zijn voor de distributie van hun zaden afhankelijk van water (andere planten gebruiken wind, vogels of andere

transportmogelijkheden voor hetzelfde doel).

De zuurstof in de lucht is gelijkmatig verdeeld. Dit is onder water niet het geval. Hier kunnen zuurstofrijke lagen afgewisseld worden door waterlagen waarin vrijwel geen zuurstof is. Longen werken niet voor de opname van zuurstof uit het water. Om onder water te kunnen "ademen" zijn kieuwen nodig. Zoogdieren die in het water leven moeten aan de oppervlakte terugkeren om te ademen. Met toenemende diepte neemt de intensiteit van licht af. Ook kleuren verdwijnen. Planten hebben licht nodig om te leven en om zuurstof te produceren. Ze komen daarom alleen in de bovenste waterlagen voor. De maximum diepte waarop voldoende licht kan doordringen voor fotosynthese is 180 meter. Dat kan afhankelijk van het zicht echter beduidend minder zijn.



Ecosystemen aan land worden door planten gedomineerd. Dat is te herkennen aan namen zoals grasland, regenwoud, prairie, et cetera. De onderwaterwereld wordt door dieren gedomineerd. Denk daarbij aan namen zoals koraalrif, oesterbank, mosselbank, et cetera. Vergeleken met de situatie boven water, zijn het aantal en de variatie van planten onder water zeer bescheiden. De voedselketen onder water kan langer zijn dan die aan land. Aan land eten grotere dieren direct van planten. Op hun beurt worden die door jagers gegeten. In het water wordt het plantaardige plankton eerst door dierlijk plankton gegeten. Dierlijk plankton wordt dan door kleine vissen gegeten die op hun beurt op het menu van de jagers staan. Er wordt dus een stap aan de voedselketen toegevoegd. Deze "langere" keten is echter zeer theoretisch. Zowel aan land als onder water zijn relaties veel gecompliceerder. We spreken daarom vaak van een voedselweb. Een voorbeeld is gegeven in de illustratie op de eerste pagina van dit hoofdstuk.

Dieren en duikers onder water

Of dieren als gevaarlijk of ongevaarlijk ondervonden worden hangt voornamelijk af van de hoeveelheid angst die ze teweegbrengen. Vaak gaat het om onterechte angsten dat een dier vanwege kwaadaardigheid, wraak of dergelijke beweeggronden zou kunnen aanvallen. Zulke ongerechtvaardigde emoties worden vaak toegeschreven aan haaien, murenes, stekelroggen, krokodillen, barracuda's, zeeslangen, orka's en andere. Andere dieren die ook letsel zouden kunnen veroorzaken wekken geen angst. Dat zijn bijvoorbeeld anemonen, koralen, zee-egels, conusschelpen en sommige naaktslakken. Je zult niet zo snel iemand horen zeggen dat een zee-egel onder z'n voet gesprongen is toen hij het water inliep.

Dieren vallen niet aan vanwege emoties zoals kwaadaardigheid of wraak. Er zijn vier werkelijke redenen voor potentiële aanvallen:

- Zelfverdediging wanneer je bijvoorbeeld je hand in het hol van een murene steekt.
- Het verdedigen van het territorium, een partner of een jong, zoals dit in het conische territorium van de trekkervis vaak gebeurt.
- Om voedsel te verkrijgen. Dit gebeurt echter niet vaak bij duikers, omdat we niet op het menu van onderwaterdieren staan (wellicht met uitzondering van zoutwaterkrokodillen).
- Per vergissing. Een bekend voorbeeld is dat een surfer, door een haai, voor een schildpad aangezien wordt.

Voor het voorkomen van aanvallen zijn de volgende drie punten belangrijk:

- Ten eerste dien je dieren op het eerste gezicht juist te identificeren.
- Ten tweede dient je kennis van het onderwaterleven voldoende goed te zijn om de ernst van een potentiële aanval of aanraking juist in te schatten.
- Ten slotte dien je je opties te kennen voor corrigerende of ontwijkende handelingen.

De indrukken van mensen kunnen ook domweg fout zijn en daardoor consequenties hebben voor hunzelf en de onderwaterwereld. Dieren kunnen gezien worden als levenloze objecten. Een duiker kan koraal voor een rots aanzien en er zonder bij na te denken overheen lopen of het afbreken. Een duiker kan een dier ook voor een bloem of plant aanzien. Aan land zien we er geen been in om over planten heen te lopen of erin te klimmen. Over een grasveld of door een bos lopen wordt gedaan zonder de geringste gedachte bij het gras of de planten. Wanneer we onder water een dier, zoals een anemoon, voor een plant aanzien, dan is onze houding ten opzichte van die organismen waarschijnlijk net als aan land.

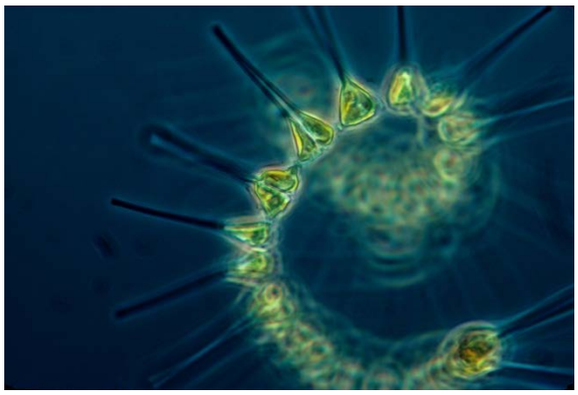
Vaak zijn verkeerde indrukken hoofdzakelijk gevaarlijk voor de onderwaterwereld. Gevaar voor de duiker kan het gevolg zijn van het als ongevaarlijk schatten van dieren die menselijke trekjes hebben. We zijn eraan gewend om zeeleeuwen in voorstellingen en dierentuinen te zien. Wanneer we denken dat deze zich in de vrije natuur net zo gedragen, dan zouden we ze op dezelfde manier kunnen benaderen. Dat zou het dier ertoe kunnen brengen zich te verdedigen, wat zware verwondingen tot gevolg kan hebben.

Het taxonomische systeem

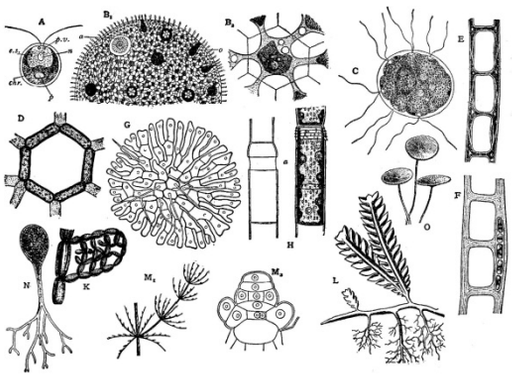
Met 1,5 miljoen verschillende bekende levende wezens op aarde, is het noodzakelijk systeem te brengen in de identificatie. Door het proces van de evolutie hebben al deze wezens op de een of andere manier een relatie tot elkaar. Vaak zijn deze relaties echter niet onmiddellijk herkenbaar. Het is bijvoorbeeld gemakkelijk te zien dat een barracuda en zalm beiden vis zijn, maar het is minder duidelijk dat een dolfijn dichter aan een kat verwant is, dan aan een haai. Om relaties duidelijker in beeld te brengen is een systeem voor classificatie ontwikkeld. Dit heet het taxonomische systeem. In de taxonomie wordt begonnen met een brede groep en wordt stap voor stap naar een meer specifieke identificatie toegewerkt.

Populaire naam	Octopus	Zakpijp	Grote tuimelaar	Mens
Domein	Eukarya	Eukarya	Eukarya	Eukarya
Rijk	Animalia	Animalia	Animalia	Animalia
Onderrijk	Eumetazoa	Eumetazoa	Eumetazoa	Euetazoa
Afdeling of stam	Mollusca	Chordata	Chordata	Chordata
onderafdeling of onderstam		Tunicata	Vertebrata	Vertebrata
Klasse	Cephalopoda	Ascidiacea	Mammalia	Mammalia
Orde	Octopoda	Stolidobranchia	Odentoceti	Primates
Familie	Octopodidae	Pyruridae	Delphinidae	Hominidae
Geslacht	Octopus	Halocynthia	Tursiops	Homo
Soort	O. vulgaris	H. pupillosa	T. truncatus	H. sapiens

De wetenschappelijke naam wordt in het Latijn gegeven. Het is een combinatie van het geslacht en de soort. Vaak wordt echter de populaire naam in de eigen taal gebruikt.

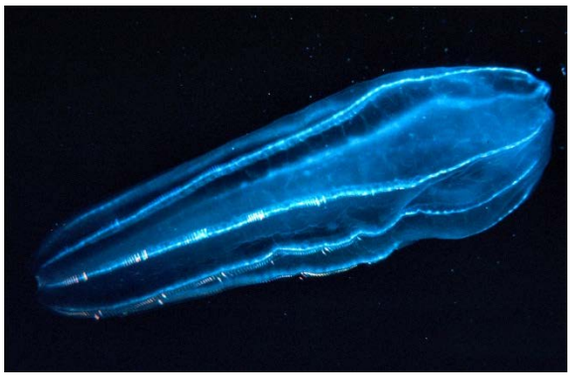


Planten (Plantae) zijn de eerste stap in de voedselketen. Ze hebben zonlicht en kooldioxide nodig om materiaal te maken dat als voedsel kan dienen. In het water zijn er drie verschillende groepen van planten. Fytoplankton is plantaardig plankton. Het zijn eencelligen die alleen onder een microscoop zichtbaar zijn. Plankton drijft in het water. Meestal dicht bij de oppervlakte. Zonder fytoplankton als begin van de voedselketen zou er geen leven in het water zijn.



Algen zijn de meest voorkomende planten onder water. Algen komen zowel in zout als in zoet water voor. Grotere algen (verankert) heten macroalgen, maar worden over het algemeen zeewier genoemd. Algen hebben geen echte stengel, bladeren of bloemen. Grotere algen hebben een structuur die op wortels lijken. Deze houden de plant vast op een harde rotsbodem, maar het zijn geen echte wortels, omdat ze geen voedingstoffen uit de bodem kunnen opnemen. De hele plant neemt water met voedingsstoffen op. Sommige algen worden rechtop gehouden door blaasjes die met gas gevuld zijn. De drie groepen zijn bruine, rode en groene algen. De rode alg is de enige die op grotere diepte gevonden wordt, omdat deze alleen van groen en blauw licht gebruik maakt. Om zich voort te planten laten grotere soorten sporen los in het water.

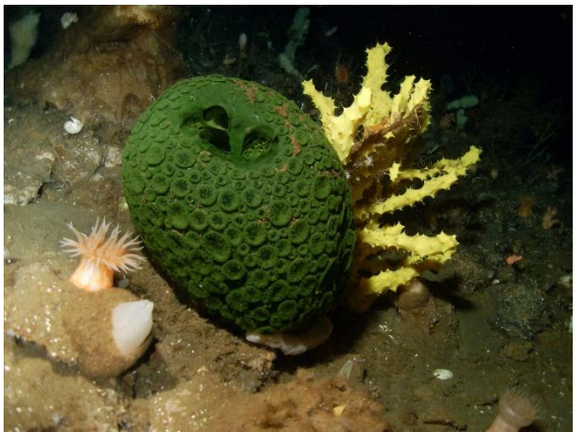
Waterplanten zijn planten die van land naar het water teruggekeerd zijn. Slechts 0,018% van alle planten zijn onder water te vinden. Ze worden vaak verward met zeewier, maar ze hebben een echte stam, bladeren en bloemen. Vaak zijn ze in ondiep water te vinden op een zandige bodem.



Eencellige dieren (Animalia) behoren tot het onderrijk Protozoa en de afdeling **Protozoa**. Net als de eenvoudigste planten maken de Protozoa deel uit van het plankton. Dierlijk plankton = zoöplankton. Plankton beweegt zelf niet, maar wordt meegevoerd in het stromende water. Bij eencelligen worden alle lichaamsfuncties in een enkele cel uitgevoerd. Ze hebben geen gespecialiseerde cellen zoals dat bij grotere dieren het geval is. Protozoa voeden zich met een variatie aan organische stoffen. Sommigen absorberen die stoffen direct uit het water, terwijl andere actief bacteriën of andere Protozoa vangen. In sommige gevallen leven meerdere eencellige dieren samen in een kolonie van losjes aan elkaar gerelateerde cellen. Zowel in zoet als in zout water komen grote aantallen Protozoa in verschillende vormen voor.

Sponzen behoren tot het onderrijk Parazoa en de afdeling **Porifera**. Dit is een tussengroep tussen eencelligen en meercellige dieren. Alleen sponzen behoren tot de afdeling Porifera. Sponzen bestaan sinds 200 miljoen jaar en zijn in die tijd niet veranderd. Ze zijn perfect aangepast aan hun leefomgeving.

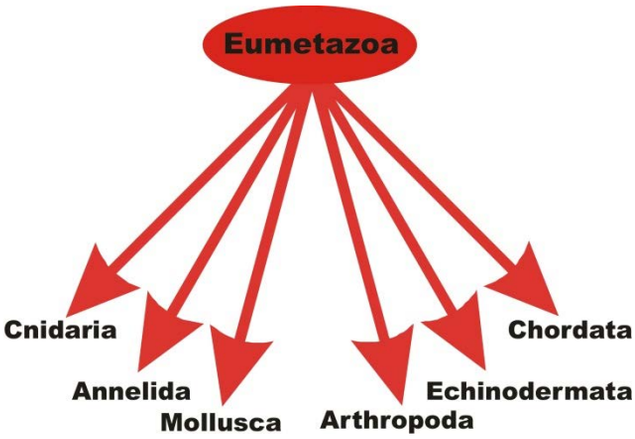
Sponzen zijn een groep van samenwerkende cellen, zonder echt weefsel of organen. Iedere spons bestaat uit drie verschillende soorten cellen. Die cellen zijn gepositioneerd rond een systeem van poriën, kanalen en kamers. Alle cellen bestaan uit zacht weefsel en naaldachtige structuren (spicula). De spicula bepalen de vorm van de spons. De vorm en de grootte van de spicula zijn voor ieder soort spons anders. Er zijn twee hoofdgroepen. Ten eerste zijn er sponzen die de vorm van een vaas hebben. Het tweede soort zijn sponzen die zich plat op de bodem uitspreiden. Alle sponzen hebben zich aan een harde steenbodem gehecht.



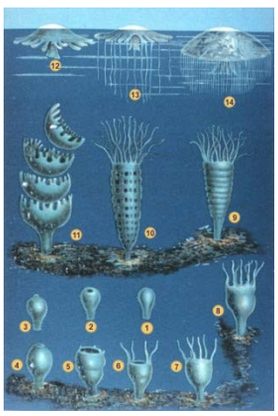
De buitenkant van de spons is overdekt met poriën die door speciale cellen omringd zijn. Deze worden kraagcellen genoemd. Deze cellen hebben een zweephaar. Het enige wat deze cellen doen is de zweephaar in beweging houden. Hierdoor wordt water in het lichaam van de spons getrokken. De cellen filteren voedseldeeltjes uit het water. In vaasvormige sponzen ontsnapt het water dan uit de grote opening die het osculum genoemd wordt. Vlakke sponzen hebben meerdere kleinere oscula.

Een gemiddeld grote spons kan iedere dag honderden liter water filteren. Dit maakt sponzen tot het reinigingsfilter van de zee. Sponzen zijn gevoelig voor verstoord sediment. Wanneer duikers de bodem verstoren, dan kan sediment op een spons vallen. Een deel zal er weer afvallen, maar wanneer teveel poriën verstopt raken, dan zal de spons verhongeren.

Het onderrijk **Eumetazoa** groepeert alle dieren die gespecialiseerde cellen hebben, die in de vorm van een organisme samenwerken. De meeste van die cellen hebben geen direct contact met de omgeving, wat de noodzaak voor een zenuwstelsel en een spijsverteringskanaal met zich meebrengt. Alle dieren die we op de eerste blik als "dier" herkennen (zowel aan land als onder water) behoren tot deze groep. Het bestaat uit gewervelde en ongewervelde. We zullen de verschillende afdelingen doornemen:

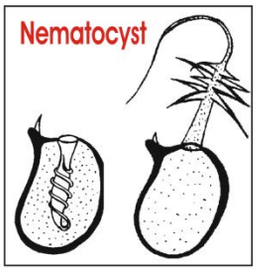


- Afdeling Cnidarians – anemonen, koralen, kwallen
- Afdeling Annelida – ringwormen
- Afdeling Mollusca – keverslakken, tweekleppige schelpen, slakken, octopus, pijlinktvissen
- Afdeling Arthropoda – insecten, spinnen, krabben, kreeften, garnalen
- Afdeling Echinodermata – zeesterren, zeekomkommers, zee-egels
- Afdeling Chordata – zakpijpen, gewervelden

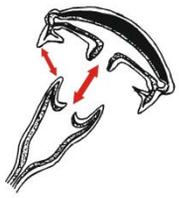


Zeeanemonen, koralen en kwallen behoren tot de afdeling **cnidarians**. Deze dieren zijn radiaal symmetrisch (hun lichaam ziet eruit als de spaken van een wiel). Ze hebben zeer eenvoudige organen en een onvolledig spijsverteringskanaal. Een enkele opening als mond en anus, die omringd is door tentakels. Allen zijn carnivoor (vleeseters). Ze vangen hun prooi met de tentakels.

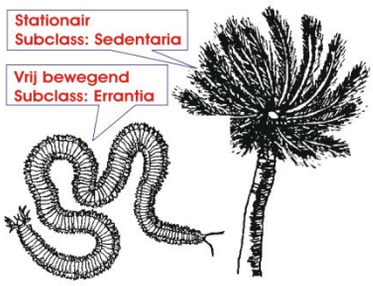
Een opmerkelijke eigenschap die alle Cniderians hebben, zijn netelcellen. Deze bevinden zich in de tentakels. De cel heeft een blaasvormige structuur waarin een neteldraad met een harpoentje zit. Die cel wordt nematocyst genoemd.



Wanneer de cel geactiveerd wordt (door aanraking, chemische stimulans of een zenuwimpuls van het dier zelf), dan wordt de neteldraad door druk uit de cel geschoten. De harpoen met weerhaken schiet dan het doel binnen, waar een verlammende vloeistof afgegeven wordt. Een nematocyst kan slechts één keer geactiveerd worden. Er zijn honderden netelcellen nodig om een invloed op de prooi te hebben.



Er zijn twee basisvormen van Cnidarians die belangrijke eigenschappen gemeenschappelijk hebben: dit zijn de poliepvorm en de medusavorm. De twee vormen wisselen elkaar af (voor sommige soorten is er slechts één vorm). De poliepvorm is bekend van dieren zoals zeeanemonen en koralen. Ze zijn met de onderkant aan iets hards bevestigd. De mond (en tegelijkertijd anus) steekt naar boven. De medusavorm is bekend van kwallen. Ze zwemen vrij rond en de mond wijst over het algemeen naar beneden.

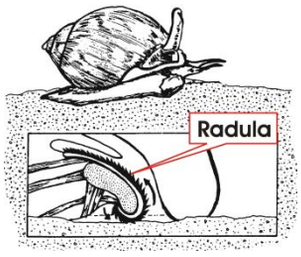


Ringwormen behoren tot de afdeling **Annelida**. Wormen kunnen vrijwel overal leven. Ze zijn aan land, in zoet water, in zout water en als parasiet in het lichaam van andere dieren te vinden. Er zijn meer afdelingen van wormen, maar de afdeling Annelida is de belangrijkste (Annelida = geringd). Het zijn dieren die uit segmenten zijn opgebouwd. De segmenten lijken op ringen. De meeste wormen in de zee behoren tot de klasse Polychaeta (met veel borstelachtig haar). Dit zijn borstelwormen. De andere twee klassen (Oligochaeta en Hirudinea) komen vaker in zoet water en aan land voor.

Vanaf deze afdeling zijn alle dieren bilateraal symmetrisch. Dat betekent dat ze in een rechter en linker kant, die elkaar spiegelen, verdeeld zijn. De organen zijn toenemend beter ontwikkeld. Ze hebben een eenrichting spijsverteringskanaal en worden groter. Om die reden is er een noodzaak voor circulatie en ademhaling.

Alle segmenten, met uitzondering van de eerste twee lichaamssegmenten, zijn gelijk. Het eerste segment bevat de zintuigen en het tweede segment de mond. Er zijn twee belangrijke ondergroepen. Sessiele wormen (Sedentaria) en vrij bewegende wormen (Errantia).

De sessiele wormen leven meestal in een buis. Ze moeten afwachten tot voedsel naar hen toekomt. Deze wormen eten kleine deeltjes die uit het water gefilterd worden. Daarvoor maken ze gebruik van lange, dunne tentakels die uit de buis steken. Sommige wormen leven in het zand en eten het sediment rondom zich. Ze werpen dan uit wat niet gebruikt kan worden. Vrij levende wormen zijn echte jagers. Ze hebben zintuigen om hun prooi op te sporen en kaken om die te grijpen. Sommige grazen van sponzen of koraal.



De afdeling **Mollusca** bestaat uit keverslakken, tweekleppige schelpen, slakken, octopus en pijlinktvissen. Mollusk betekent hoofd op voet. Dat beschrijft de lichaamsvorm van deze dieren. Er zijn meer dan 75.000 soorten. Het is verrassend dat dieren met een zo verschillend uiterlijk zo nauw verwant zijn. De meeste Molusca hebben gemeenschappelijke kenmerken:

- Ze hebben een zacht en vleesachtig lichaam.
- De meeste hebben een gespierde voet (de vorm verschild) die meestal voor voortbeweging gebruikt wordt.
- Ze hebben een rasptong met kleine tandjes die radula heet en die gebruikt kan worden om te schrapen en te snijden.

- Een deel van het lichaam van de Molusca is de mantel, wat een soort huid is die het lichaam omhult. Voor Mollusca die schelpen hebben wordt de schelp door de mantel geproduceerd.

Mollusca bestaan in zoet water, in zout water en aan land. De vier klassen van Mollusca die voor duikers interessant zijn, zijn:

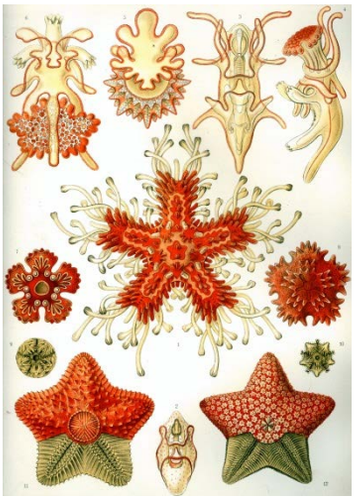
Klasse Placophora – keverslakken
Klasse Gastropoda – slakken
Klasse Bivalvia – schelpdieren, oesters, mossels
Klasse Cephalopoda – octopus, sepia,

De afdeling **Arthropoda** bestaat uit insecten, spinnen, krabben, kreeften en garnalen. Dit is de grootste afdeling in het dierenrijk, zowel in het aantal soorten als het aantal individuen. De meeste vertegenwoordigers van deze afdeling zijn insecten, maar die komen in het water niet veel voor. Arthropoda hebben een aantal eigenschappen gemeenschappelijk. Ze hebben een lichaam in segmenten. De segmenten verschillen in vorm en functie. Alle segmenten hebben ledematen.

Alle Arthropoda hebben een extern skelet dat van chitine gemaakt is. Het skelet geeft bescherming, maar is problematisch wanneer het dier groeit. Arthropoda moeten "vervellen" om te kunnen groeien. Dit proces wordt door hormonen gestuurd. Wanneer het dier er klaar voor is om te "vervellen" dan zwelt het lichaam. De schaal breekt dan en het dier vecht zich vrij van het oude externe skelet. Dat is het moment waarop de dieren kwetsbaar zijn voor jagers. Het duurt een poosje voordat de huid weer hard genoeg is om bescherming te bieden.

Arthropoda hebben goed ontwikkelde zintuigen. Velen hebben ogen die in facetten verdeeld zijn, of ze hebben ogen op steeltjes. Ze hebben ook zintuigen voor het evenwicht. Onder water behoren de meeste soorten tot de klasse crustaceeën. De meest bekende crustaceeën (krabben, kreeft en garnalen) behoren tot de orde Decapoda (tienpotigen).

Zeesterren, zee-egels en zeekomkommers behoren tot de afdeling **Echinodermata** (stekelhuidigen). Het zijn vijfvoudig radiaal symmetrische organismen (hun larven zijn bilateraal symmetrisch). Alle vertegenwoordigers leven in zee. Ze hebben een interne skeletstructuur. Ze hebben ook een uniek systeem van watervaten waarmee ze, net als bij hydrauliek, de voetjes kunnen bewegen. Ze gebruiken dit systeem voor voortbeweging met honderden voetjes.



We maken verschil in 5 klassen van Echinodermata:

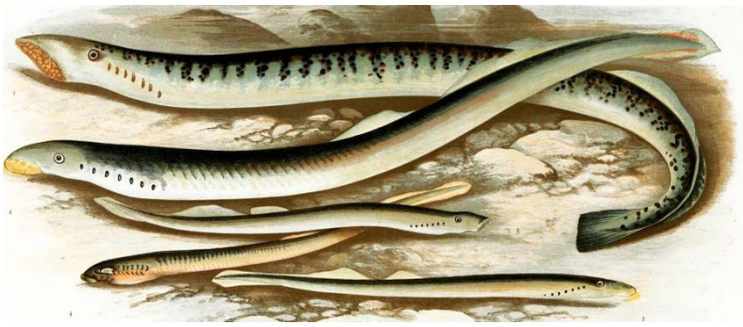
- Klasse Crinoidea zijn zeelelies. Dit is de enige groep van Echinodermata die tenminste een deel van hun leven met een staak aan de zeebodem bevestigd leven. Hun mond is naar boven gericht (dit in tegenstelling tot de andere Echinodermata). Ze hebben vijf armen waarmee ze voedsel kunnen vangen. De armen zijn behaard, waardoor ze plankton kunnen vangen.
- Klasse Asteroidea zijn zeesterren. Zeesterren bewegen zich vrij over de bodem. De meeste zeesterren hebben vijf armen. Er is geen duidelijke afscheiding tussen het lichaam en de armen. Ze gebruiken hun buisvormige voetjes om schelpen open te breken, zodat ze deze kunnen eten.
- Klasse Opiuroidea zijn slangsterren en brokkelsterren. Het lichaam is duidelijk afgezet van de armen. Ze hebben lange dunne armen die gebruikt worden om voedsel op te rapen. De armen kunnen gemakkelijk breken, maar groeien snel weer aan.
- Klasse Ecinoidea zijn zee-egels. In deze klasse van Echinodermata zijn de armen verdwenen, maar ze zijn nog wel 5-voudig radiaal symmetrisch. Ze hebben vijf rijen van buisvoetjes en vijf lange tanden die

in vorm van de lantaarn van Aristoteles gesorteerd zijn. Met dat mechanisme schrapen ze alles van de bodem.

- Klasse Holothuroidea zijn zeekomkommers. Deze klasse lijkt billateraal symmetrisch te zijn, maar ze zijn net als de anderen 5-voudig radiaal symmetrisch. Ze hebben een lang lichaam met de mond aan de ene kant en de anus aan de andere. Sommige voeden zich van plankton en andere zoeken organisch afval op de zeebodem.

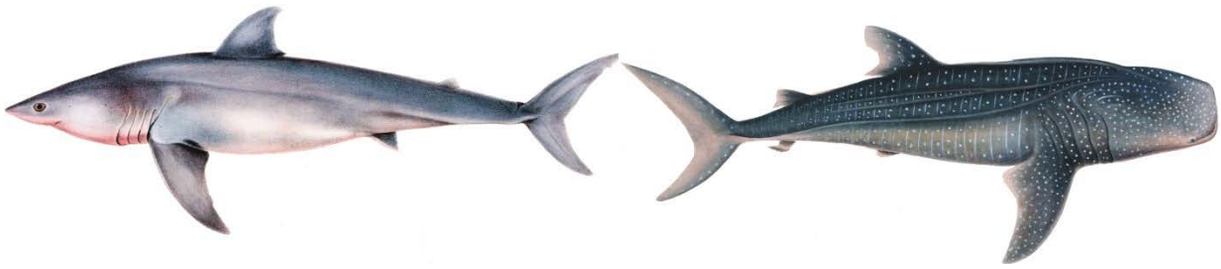
De afdeling **Chordata** bestaat uit gewervelden en zakpijpen. Dit is de afdeling waarover we het meeste weten, omdat de mens en een aantal van de meest bekende dieren tot de Chordata behoren. Zakpijpen behoren tot de onderafdeling Tunicata. Deze groep is geplaatst tussen echte gewervelde en echte ongewervelde. Als larve heeft dit dier de eigenschappen van een gewervelde. Ze zien er dan uit als een kikkervisje. Later verliezen ze echter de staart die het begin van een wervelkolom bevat. Na het verlies van de staart zetten ze zich vast op de bodem. Als volwassen dier lijken ze op een spons. Het lichaam is echter een taaie dikwandige cilinder uit een soort cellulose. Ze zien er eenvoudig uit, maar hebben een goed ontwikkeld orgaansysteem. Ze verkrijgen voedsel door het water te filteren. Omdat ze tot de afdeling Chordata behoren, zijn ze nauwer met de mens verwant, dan een octopus, kreeft of sepia.

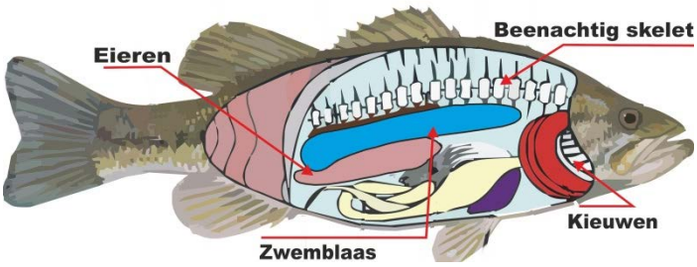
De onderafdeling **Vertebrata** zijn de echte gewervelden. Alle Vertebrata zijn bilateraal symmetrisch en hebben een wervelkolom. De belangrijkste zintuigen en het zenuwstelsel bevinden zich in het hoofd. Achteraan het lichaam is in principe een staart te vinden. De primaire waterdieren hebben kieuwen en de dieren die aan land leven ademen met longen. Alle gewervelden hebben een inwendig skelet dat meestal van bot gemaakt is (Chrondrichthys zijn een uitzondering).



De klasse **Mysini** zijn kaakloze vissen (slijmprikken en negenogen). Ze zijn de meest primitieve vissen, met slechts twee levende soorten. Negenogen hebben goed ontwikkelde ogen, terwijl slijmprikken helemaal geen ogen hebben.

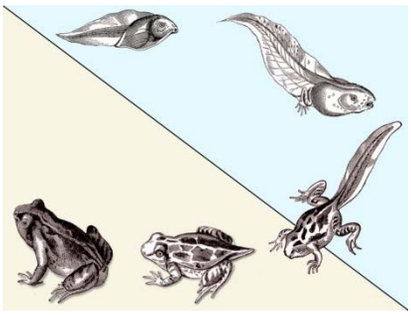
De klasse **Chondrichthyes** wordt gekenmerkt door een intern skelet dat van kraakbeen gemaakt is. Dit zijn roggen en haaien. Net als alle vissen hebben ze kieuwen en ledematen in de vorm van vinnen.





De klasse **Osteichtyes** zijn beenvisachtigen. Deze vissen hebben een intern skelet van echt bot. De buitenkant van het lichaam is bedekt met overlappende schubben. Het aantal verschillende soorten is enorm. Vissen verschillen in lichaamsvorm, grootte, kleur en andere (over de wereld verdeeld zijn er meer dan 20.000 soorten). Beenvisachtigen

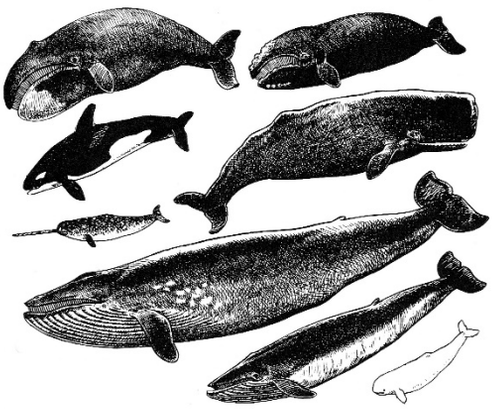
handhaven hun positie in de waterzuil dankzij een interne zwemblaas.



De klasse **Amphibia** hebben larven die in zoet water leven. De meeste volwassen dieren leven aan land in de nabijheid van water. Ze moeten het water in voor bevruchting en om eieren te leggen.

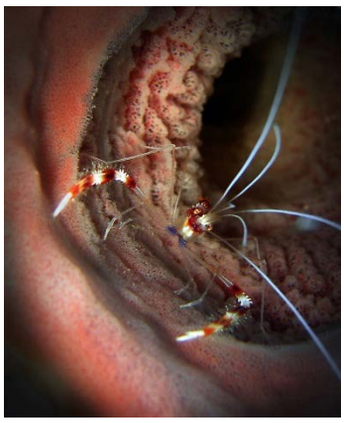
De klasse **Reptilia** bestaat uit schildpadden, krokodillen, alligatoren en slangen. Reptielen zijn dieren die aan land leven. Enkele soorten zijn echter teruggekeerd in het water. Dit is de eerste klasse die eieren met een harde schaal heeft, wat hen in het verleden heeft toegestaan de wereld aan land te veroveren. Ze hebben longen en moeten dus aan de oppervlakte om te ademen. Eieren moeten (in de meeste gevallen) aan land gelegd worden.

De klasse **Mammalia** bestaat uit dieren die als goed ontwikkeld jong geboren worden en die na de geboorte een tijd lang melk van het moederdier krijgen. Zoogdieren die in zee leven zijn soorten die van land naar de zee zijn teruggekeerd. Dat zijn bijvoorbeeld lamantijnen, dolfijnen, walvissen, et cetera. Dit zijn de meest complexe dieren in het dierenrijkdom. Ze zijn warmbloedig. Daardoor zijn ze niet afhankelijk van de omgevingstemperatuur, waardoor ze ook in koude gebieden kunnen leven. Allen moeten aan de oppervlakte terug om te ademen (behalve de zoogdieren die duikuitrusting dragen).



Relaties onder water

Dieren leven niet in een vacuüm, geïsoleerd van andere dieren. Dieren kunnen elkaar sterk beïnvloeden. De interactie tussen dieren kan op verschillende manieren plaats hebben. Jager en prooi is een van deze relaties. Het ene dier eet het andere als voedsel. Op dit gebied zijn er diverse technieken om het succes te vergroten, zowel voor de jager als voor de prooi. Dieren proberen te voorkomen prooi te worden met defensieve structuren, zoals schelpen of stekels. Ze kunnen ook slecht smaken of giftig zijn, of zichzelf camoufleren.

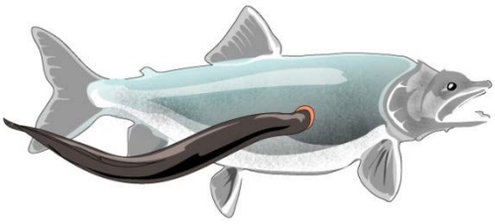


Een andere vorm van interactie is symbiose. Verschillende dieren die in dichte associatie leven. De partners in een symbiose heten over het algemeen de symbionten, maar het grotere dier wordt ook vaak de gastheer genoemd. Er zijn drie algemene soorten van relaties:

Mutualisme betekent dat de dieren die in symbiose leven beiden voordeel van de relatie hebben. Een bekend voorbeeld van mutualisme zijn poetsvissen (of garnalen). Deze kleine dieren verwijderen parasieten van grotere vissen. De poetser verkrijgt zo voedsel, terwijl de grotere vis van parasieten bevrijdt wordt. In deze symbiose kunnen de symbionten ook zonder elkaar leven. Er zijn echter ook relaties waarin de partners zonder elkaar niet kunnen overleven. Een voorbeeld van zo'n symbiose is de kleine alg zoöxanthellen. Wanneer deze alg verdwijnt, dan sterft (verbleekt) koraal.

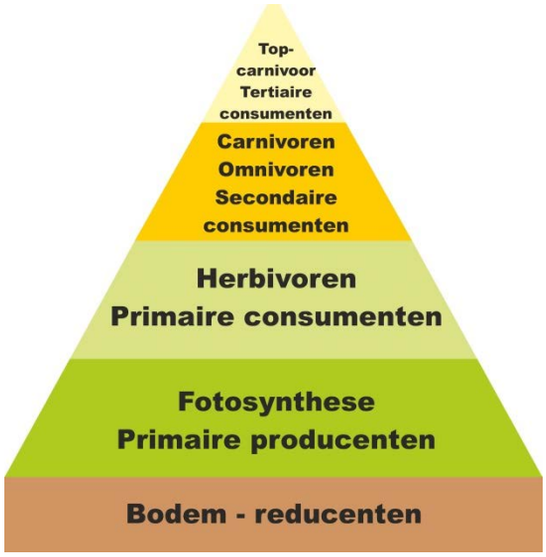
Commensalisme. In deze vorm van symbiose heeft de ene symbiont duidelijk voordeel, terwijl de gastheer geen voordeel heeft, maar ook geen schade ondervindt. De kleinere partner is meestal op zoek naar voedsel of bescherming. Pilootvissen willen bijvoorbeeld de resten die een etende haai laat vallen (of zoals in de foto kleine vissen die mee-eten bij een etende titaantrekkervis). De haai heeft hierbij geen voordeel, maar ook geen nadeel.

Parasitisme. De ene soort leeft op of in de gastheer en heet de parasiet. De parasiet heeft voordeel op kosten van de gastheer.



Het meest bekende voorbeeld, zijn parasieten die in de ingewanden van de gastheer leven. De gastheer heeft last van afnemende voedselreserves, minder weerstand tegen ziekte en minder kracht. De gastheer kan daardoor sterven door infectie, verhongering of wordt tot prooi. De parasiet is niet de directe doodsoorzaak.

Om dieren een plaats in het voedselweb te geven, worden vaak namen toegewezen zoals primaire producenten, primaire consumenten, secondaire consumenten, tertiaire consumenten, enzovoort. In deze weergave wordt het verlies aan energie op de verschillende niveaus duidelijk. Niet alle planten kunnen als voedsel dienen. De meeste dieren kunnen het hout van bomen niet eten. Sommige bladeren zijn voor diverse soorten niet toegankelijk, enzovoort. Slechts ongeveer 10% van de energie die in primaire productie wordt geproduceerd is beschikbaar voor de primaire consumenten. Primaire consumenten gebruiken wederom energie voor levensprocessen, zoals beweging, lichaamswarmte, voortplanting en andere. Ook worden niet alle primaire consumenten tot prooi. Sommigen leven totdat ze van ouderdom sterven. Je mag ervanuit gaan dat ongeveer 10% van de energie die door primaire consumenten opgenomen wordt, beschikbaar zal zijn voor secondaire consumenten.

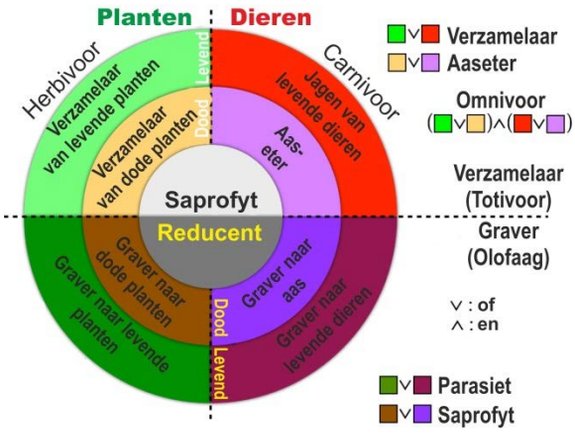


Om te illustreren hoe de energie van het ene trofische niveau naar het volgende afneemt, worden ze vaak in een voedselpiramide weergegeven. In een voedselpiramide nemen de hogere niveaus minder plaats in, wat aangeeft dat het aantal individuen (gerekend in hun gezamenlijke lichaamsgewicht) afneemt naarmate ze hoger in de voedselpiramide staan. Er is niet genoeg voedsel voor een grotere domweg populatie.

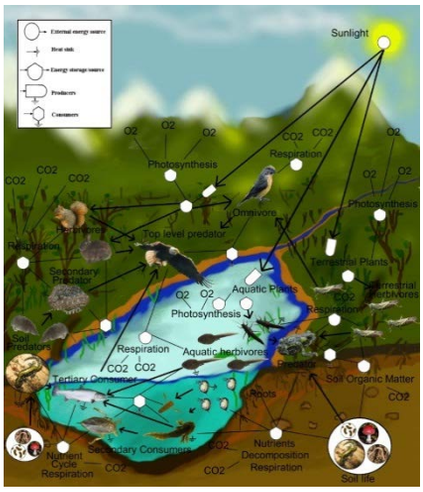
In werkelijkheid zijn de relaties in een voedselweb echter niet zo eenvoudig als deze illustratie doet geloven. Een keten waarin planten blaadjes maken die door kleine herbivoren gegeten worden, die vervolgens door kleine carnivoren gegeten worden en die dan op hun beurt door grote

carnivoren (of omnivoren die zowel planten als vlees eten) gegeten worden, is niet wat we in de werkelijkheid vinden. Walvishaaien en mantaroggen zijn primaire consumenten. Hun grootte maakt ze echter tot een onwaarschijnlijke prooi voor secondaire of zelfs tertiaire consumenten. Wanneer we ook nog de dieren die in de bodem leven bij het web betrekken, dan worden de relaties nog complexer. Topcarnivoren zijn niet alleen haaien en leeuwen, maar ook wormen en parasieten. Afhankelijk of grotere dieren levend of dood gegeten worden, zijn er andere consumenten.

Wanneer alle transformatie van biomassa in een voedselketen opgenomen dient te worden, dan is het niet meer voldoende om van primaire producenten, herbivoren, omnivoren en carnivoren te spreken. In de relatie dient te worden aangegeven of het voedsel dood of levend gegeten wordt en of het boven de grond of in de bodem verzameld wordt.



Populatie-ecologen zijn biologen die proberen de overdracht van biomassa in een ecosysteem in kaart te brengen. Op basis van hun bevindingen maken ze dan een voedselweb, in plaats van een voedselketen. Hieronder wordt een voorbeeld gegeven van een voedselweb.



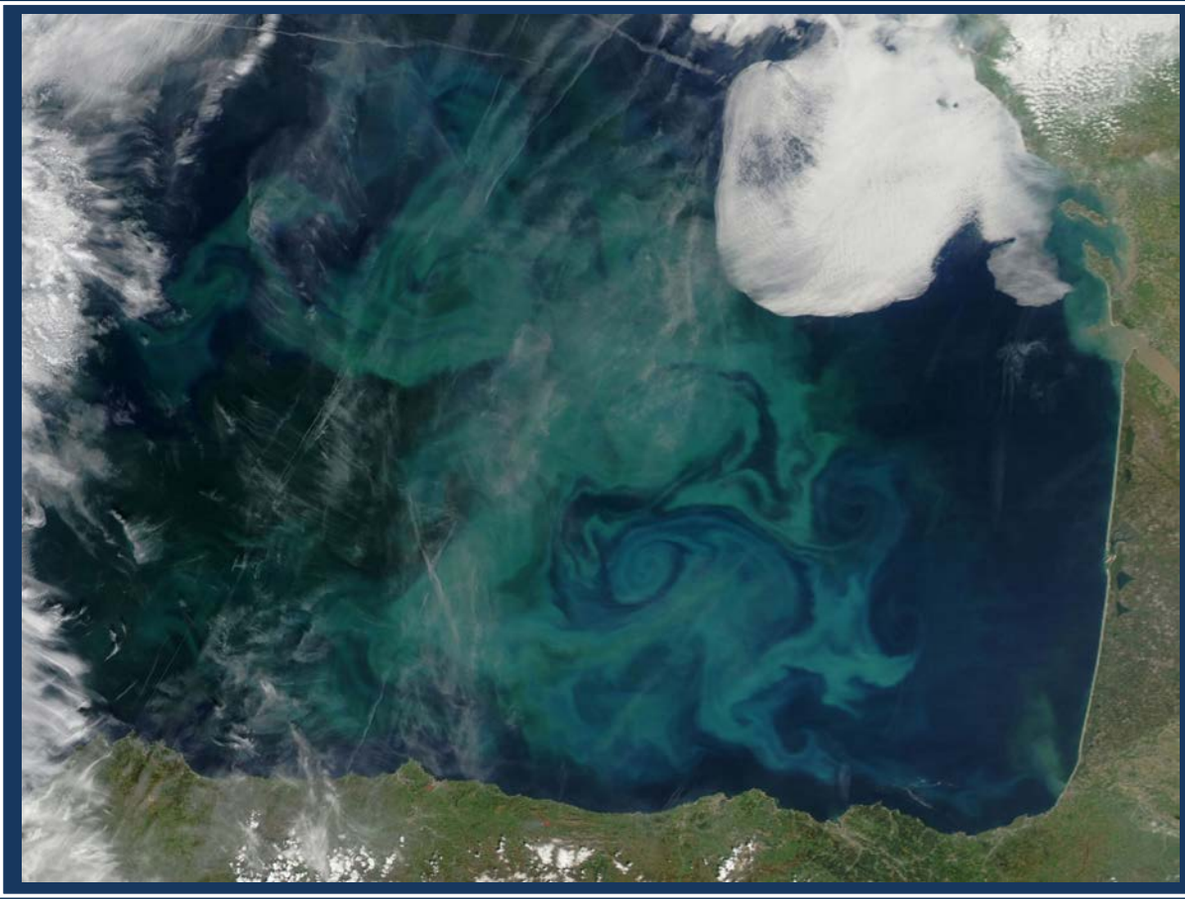
Bij een zo complex vlechtwerk van relaties over wie wat, waar en wanneer eet, is het vaak noodzakelijk om je op slechts één aspect van een ecosysteem tegelijk te concentreren. De voedselpiramide is daarvan een voorbeeld. Deze geeft aan dat het gezamenlijk gewicht van primaire producenten (hoofdzakelijk planten en bomen) ongeveer tien keer zo zwaar is dan het gezamenlijke gewicht van alle primaire consumenten. Wanneer slechts 10 % van de productie beschikbaar is als voedsel, dan kan de populatie van primaire consumenten domweg niet groter worden. In realiteit is de populatie zelfs beduidend kleiner. Een deel van de consumenten wordt vroegtijdig door secondaire consumenten gegeten en een deel van het voedsel wordt verbruikt voor beweging, reproductie, lichaamswarmte en andere doelen. De piramide geeft dus aan hoe groot de populatie op een bepaald trofisch niveau kan zijn. Een vergelijkbare benadering is mogelijk voor de stikstofcyclus en andere vereisten die organismen aan hun omgeving stellen. Onderzoek (wat in het laatste hoofdstuk behandeld wordt) concentreert zich meestal op een enkel aspect.

Chemie

Ondanks dat de naam van dit hoofdstuk chemie is, is het hier waar alle aspecten (fysica, biologie en chemie) samenkomen. Tot nu toe zijn onderwerpen (meestal) als losstaande feiten aan de orde geweest. In een ecosysteem heerst een delicaat evenwicht. Dit evenwicht wordt doorlopend verstoord. Daardoor wordt naar een nieuw evenwicht toegewerkt. Dat nieuwe evenwicht wordt waarschijnlijk nooit bereikt omdat het systeem voor die tijd weer verstoord wordt. De oorzaken van dergelijke verstoringen kunnen fysisch, chemisch of biologisch zijn. Het is daarom het doel van dit hoofdstuk om die drie aspecten met elkaar in verbinding te brengen.

Waterchemie is een zeer breed studiegebied. Er zijn diverse factoren die problemen veroorzaken. Dat kunnen resten van medicamenten of de pil zijn. Olievervuiling is een ander voorbeeld, net als sterke zuren of industrieafval. Voor dit hoofdstuk moesten dus keuzes gemaakt worden. Overbemesting is een vorm van vervuiling die het toestaat om verschillende mechanismen uit te leggen en met elkaar in verbinding te brengen. Dit is daarom gekozen als voorbeeld. Meststoffen zijn noodzakelijk. Wanneer in een meer of in de oceaan geen meststoffen zouden voorkomen, dan zou al het leven sterven. Wanneer we het over meststoffen hebben, dan gaat het er dus om een evenwicht te handhaven. Een toestand met te weinig meststoffen is net zo problematisch als een situatie met teveel meststoffen.

Wanneer de hoeveelheid meststoffen te groot is, dan ontstaat een toestand die eutrofiëring genoemd wordt. Dit heeft algenbloei tot gevolg (zie de onderstaande foto). Dit kan tot de ontwikkeling van dode zones voeren. In een dode zone is dicht bij de bodem geen zuurstof meer beschikbaar. Het gevolg is dat alle organismen die op, of dichtbij, de bodem leven sterven. Dit hoofdstuk geeft inzicht in de achtergronden van eutrofiëring en hoe dit voorkomen kan worden.

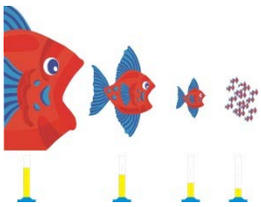


Meststoffen

Ecosystemen verschillen in de hoeveelheid aanwezige meststoffen. De hoeveelheid meststoffen bepaald, samen met factoren zoals het klimaat en het grondwaterpeil, welk soort ecosysteem zich op een specifieke locatie kan ontwikkelen. Aan land kan de hoeveelheid meststoffen ook over korte afstanden sterk verschillen. Meststoffen verplaatsen zich langzaam in de bodem. Een meststofarme omgeving kan zich op slechts enkele meters afstand van een meststofrijke omgeving bevinden. In het water vinden we echter een gelijkmatigere verdeling van meststoffen.

Met niveau van meststoffen wordt aangegeven als trofiegraad. Dit zijn meststofrijk (eutroof), gemiddeld (mesotroof) of meststofarm (oligotroof). De plaatselijke vegetatie is afgestemd op de omgevingsfactoren, waaronder ook de trofiegraad. Meststofarme omgevingen hebben meestal de grootste variatie in soorten. Het aanpassingsvermogen van die verschillende soorten staat ze allen toe gebruik te maken van een andere niche. Gevoelsmatig zou je het omgekeerde verwachten, maar een regenwoud is een ecosysteem met extreem weinig meststoffen in de diepere bodem. Wanneer een gebied eutroof is, dan wordt dit vaak gedomineerd door grote aantallen exemplaren van slechts enkele soorten. Dat zijn de soorten die het beste gebruik kunnen maken van het overschot en die daardoor het licht en water van andere soorten wegnemen.

Wanneer meststoffen zich ophopen in een mesotroof of oligotroof gebied, dan spreken we van overbemesting. Er zijn natuurlijke mechanismen die de oorzaak hiervan kunnen zijn, maar meestal is dit het gevolg van acties van mensen (of het gebrek daaraan). Overbemesting veroorzaakt ongeremde groei van soorten die het beste van het overschot gebruik kunnen maken. Die soorten leggen dan beslag op een groot deel van de beschikbare plaats. De “normale” soorten worden verdrongen door de dominante aanwezigheid van de “nieuwe” soort. De biodiversiteit heeft daaronder te lijden. De nieuwe situatie kan totaal verschillen van wat voorheen in het gebied te zien was. Algen zijn de soort die in het water het meest profiteren van een overschot aan meststoffen. Algenbloei kan ernstige gevolgen hebben voor de “traditionele” soorten in het water.



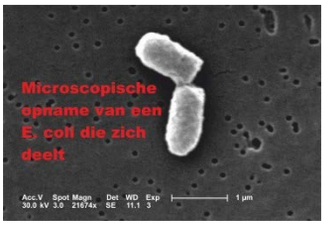
Sommige milieuproblemen zijn het gevolg van persistente, door de mens gemaakte, chemicaliën. “Persistent” betekent dat het voor de natuur moeilijk is om de stoffen af te breken. Deze stoffen blijven daardoor lang in het milieu, en kunnen zich ophopen in organismen die hoger in de voedselketen staan. Dit heet bio-accumulatie. Sommige van de grootste uitdagingen voor het milieu worden echter veroorzaakt door “normale” stoffen. In dat geval is de verdeling het probleem. Dat is de ophoping van een stof in de ene omgeving, terwijl een ander gebied uitgeput wordt.

De verdeling van meststoffen wordt op diverse manieren verstoord. De totale hoeveelheid meststoffen neemt toe door de productie van kunstmest en andere chemische producten. Die toegenomen hoeveelheid gaat de capaciteit van de natuur om het terug te veranderen in atmosferische stikstof te boven (zie de stikstofcyclus in hoofdstuk 1).

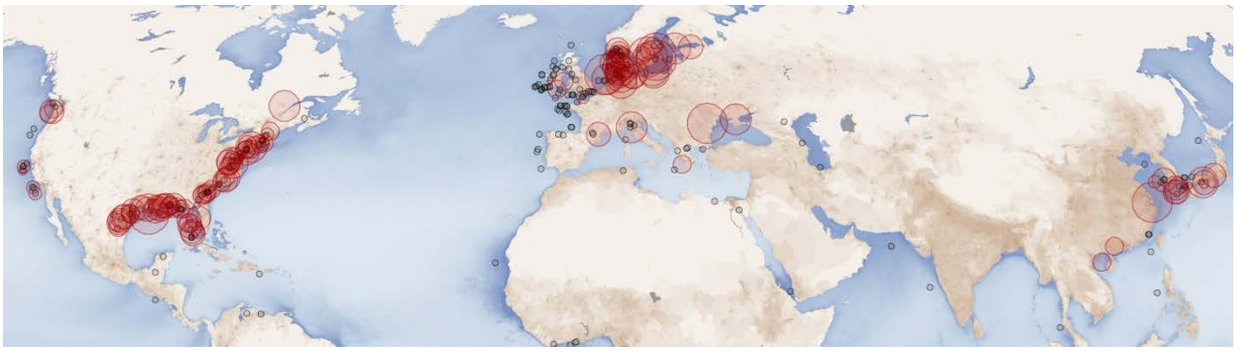
Een andere verstoring is de grote afstand tussen de productie van voedsel en de consumptie. Voedsel wordt in steden geconsumeerd en de meststoffen worden daar uitgescheden. Hier is echter weinig nut voor meststoffen. In landbouwgebieden worden de meststoffen echter uitgeput door het herhaald oogsten van gewassen. Daarom wordt kunstmest gebruikt om het weer aan te vullen. Nitraat in de mest gaat echter snel verloren omdat het in water oplost (hydrofiel) en daardoor in het oppervlaktewater terechtkomt. Fosfaat is persistenter, maar wanneer de bodem verzadigd is met fosfaat, dan zal ook dit

wegspoelen en in het grondwater terecht komen. Het grondwater komt uiteindelijk ook in het oppervlaktewater terecht (onze duikgebieden). Kunstmest heeft echter wel nut. Zonder kunstmest zou minder voedsel per vierkante meter geproduceerd worden. Er zou dan meer oppervlak nodig zijn als landbouwgrond, wat op kosten van de natuur zou gaan.

Primaire productie staat aan de basis van de voedselketen. Energie van de zon wordt omgezet in chemische energie door middel van fotosynthese (zie hoofdstuk 1). Planten en algen hebben chlorofyl waarmee het licht van de zon in bruikbare energie wordt omgezet. Andere levende wezens (waaronder de mens) zijn afhankelijk van de organismen die de energie van de zon kunnen omzetten. Algen en fytoplankton zijn dus, net als planten, belangrijk voor het leven op aarde. Wanneer er te weinig plankton zouden zijn, dan zouden vele organismen verhongeren.



De groei van alle levende organismen wordt op de een of andere manier beperkt. Dat moet zo zijn, anders zou een enkele soort snel alle andere soorten op aarde domineren. Organismen die geen partner nodig zijn om zich voort te planten (aseksuele reproductie) hebben het voordeel dat ze zich kunnen voortplanten zodra de omstandigheden gunstig zijn. Eencellige organismen kunnen door celdeling hun populatie verdubbelen. Celdelingen kunnen snel op elkaar volgen en de populatie explosief doen toenemen: 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 64 – 128 – 256 – 512 – 1024 – et cetera. Dit patroon kan bij bacteriën verwacht worden. Fytoplankton (of algen algemeen) behoort tot de soorten voor wie een explosieve groei van de populatie mogelijk is. Wanneer er weinig meststoffen zijn reproduceren zich veel algen geslachtelijk, maar wanneer er geen beperkende factoren zijn, dan kunnen veel algen sporen afgeven die zich tot volwassen plant ontwikkelen, zonder dat een tweede ouder nodig is. Wanneer dit gebeurt, dan spreken we van algenbloei.



Wanneer overmatige groei van fytoplankton te lang doorgaat, dan gaat de hoeveelheid biomassa in het water de honger van herbivoren te boven (veel herbivoren reproduceren zich seksueel en kunnen dus hun populatie niet snel aanpassen aan het enorme voedselaanbod). Het fytoplankton dat niet gegeten wordt zal dan sterven en naar de bodem zinken. Hier wordt het door bacteriën afgebroken. De bacteriën gebruiken daarbij zuurstof. Terwijl ze zich tegoed doen aan het enorme voedselaanbod vermeerderen ze zich exponentieel. Die grote populatie bacteriën verbruikt al het zuurstof in het diepere water. Wanneer alle zuurstof op is, dan gaat het afbreken van het plankton verder, maar nu door andere bacteriën. Dat zijn bacteriën die zonder zuurstof kunnen leven (sommige bacteriën kunnen zowel met, als zonder zuurstof). Andere organismen op de bodem kunnen niet zonder zuurstof. Wanneer de zuurstof in een gebied opraakt, dan moeten alle andere dieren vluchten (wanneer ze dat kunnen), of ze zullen sterven (organismen die zich niet kunnen verplaatsen). De locaties van zulke dode zones (permanent of seizoenafhankelijk) zijn weergegeven op de bovenstaande kaart.

Dode zones zijn niet het enige probleem dat door overbemesting

veroorzaakt wordt. Er groeien algen op koraalriffen. Niet veel, omdat een koraalrif (net als een regenwoud) normaalgesproken een meststofarm (oligotroof) ecosysteem is. Herbivoren, zoals de papegaaivis (foto), doktersvis en zee-egel, eten de algen wanneer deze nog jong (en klein) zijn. Wanneer een rif bemest wordt, dan zal de groei van lagen toenemen. Zolang er genoeg herbivoren zijn, zal dit geen schade veroorzaken. Wanneer overbemesting echter gecombineerd wordt met een afname van het aantal herbivoren, dan zullen de algen groter worden en uiteindelijk het rif domineren. Koraal kan de competitie voor beschikbare plaats niet van algen winnen. Het koraalrif zal een rif van algen worden. Biodiversiteit is belangrijk om een dergelijke omslag te voorkomen. Het kan altijd gebeuren dat een pathogeen (virus) de populatie van een bepaalde herbivoor uitroeit. Wanneer dat gebeurt, dan is het belangrijk dat een andere soort dat deel van de consumptie van algen kan overnemen. In Jamaica heeft het overbevissen van riffen, gecombineerd met een pathogeen dat de populatie van zee-egels uitgeroeid heeft, het omslaan van riffen tot gevolg gehad.

In ondiepe meren groeien waterplanten op de bodem. Algen kunnen echter de oppervlakte bedekken, of het zicht beperken. De waterplanten krijgen dan minder (of helemaal geen) licht op de bladeren, waardoor de fotosynthese stilvalt. De planten zullen dan sterven en de herbivoren die van die plant leven ook. Het ecosysteem dat een groot aantal soorten huisveste, zal nu gedomineerd worden door algen en bacteriën. Het daardoor ontstane troebele water is dan niet meer aantrekkelijk als duiklocatie.

Beperkende factoren

Naast de moleculen die gebruikt worden in de energiecyclus, zijn ook andere elementen nodig (andere dan waterstof, zuurstof en koolstof) om het lichaam van een organisme te “bouwen”. In iedere cel is een enorm aantal verschillende moleculen aanwezig. Voor ieder molecuul zijn specifieke elementen noodzakelijk (de bouwstenen). Die elementen moeten in het lichaam beschikbaar zijn om het “bouwen” van de moleculen mogelijk te maken (het lichaam van de mens kan de meeste benodigde moleculen zelf maken wanneer de elementen beschikbaar zijn. Andere moeten met het voedsel ingenomen worden. Die heten vitaminen). Wanneer een bepaald element ontbreekt of opraakt, dan valt de bouw stil, ongeacht hoeveel van de andere benodigde elementen beschikbaar zijn.

Het feit dat meststoffen “bouwmaterialen” zijn geeft aan dat een bepaalde hoeveelheid daarvan in het lichaam vastgelegd is. Constructiematerialen die al gebruikt zijn om een molecule te bouwen, zijn niet meer beschikbaar voor de “bouw” van een andere molecule. Meststoffen komen pas weer vrij voor een volgende cyclus nadat een organisme gestorven en verrot is. Meststoffen zijn elementen, waar grotere hoeveelheden van nodig zijn. Een aantal andere elementen is alleen benodigd voor zeer specifieke moleculen. Daarvan is dus veel minder nodig. Ze heten daarom sporenelementen.

Meststoffen zijn dus niet beschikbaar voor hergebruik gedurende de levensduur van het organisme waarin ze gebruikt is om het lichaam te “bouwen”. Dit kan een distributieprobleem veroorzaken wanneer teveel organismen op de ene plaats opgroeien, maar dan naar elders verhuizen om te sterven en te verrotten. Een dergelijk patroon zou de meststoffen in het ene gebied uitputten en in het andere gebied overbemesting veroorzaken. Kooldioxide en zuurstof zijn niet betroffen, omdat deze via de atmosfeer verdeeld worden.

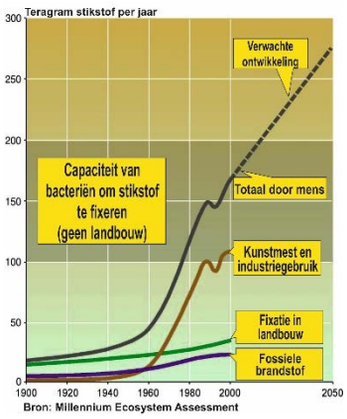
Stikstof (en ook fosfor) kan door de meeste organismen niet direct als bouwmateriaal gebruikt worden. Als duiker weet je dat atmosferische stikstof (N_2) inert is. Het reageert onder normale omstandigheden niet. De N_2 die met de ademhaling in de longen komt is dus niet als meststof te gebruiken. Wanneer stikstof moet reageren om een groter molecule te bouwen, dan moet het gepresenteerd worden in een vorm die niet inert is. De stikstof moet ingebouwd zijn in een molecule dat verteerd kan worden. Vaak

is dat nitraat (NO_3). In het lichaam wordt de N van dit molecule afgescheiden en worden de O's als afvalproduct afgegeven. Moleculen waarin stikstof als een belangrijk element voorkomt heten stikstofverbindingen. De moleculen die door organismen verteerd kunnen worden heten biologisch actieve stikstofverbindingen. Dit is niet voor iedere soort gelijk. Verschillende organismen hebben verschillende methoden voor vertering. Zoals in hoofdstuk 1 aan de orde is geweest, kunnen bepaalde bacteriën atmosferische stikstof verteren. Deze bacteriën zijn erg belangrijk om de cyclus in evenwicht te houden. Verloren gegane biologisch actieve stikstof moet tenslotte op de een of andere manier aangevuld worden.

De groei van een individueel organisme of van een populatie wordt door verschillende factoren beperkt. De beschikbare ruimte of voedsel is niet onbeperkt. Deze kunnen daarom beperkende factoren zijn. Een beperkende factor is iets waarvan niet genoeg aanwezig is om een "eindeloze" groei van een populatie toe te staan. Dit is belangrijk. Wanneer een bepaalde soort niet met een beperkende factor te maken zou hebben, dan zou die soort snel alle andere soorten domineren. De onbeperkte groei van de ene soort wordt dan de beperkende factor voor alle andere soorten.

Wat meststoffen betreft heeft de gemiddelde alg in de oceaan elementen nodig in een verdeling die de Redfield ratio genoemd wordt. Redfield heeft de verdeling van elementen in algen gemeten en daarbij vastgesteld dat de verdeling tussen koolstof, stikstof en fosfor voor de verschillende soorten relatief constant is, namelijk 106:16:1. Omdat de organismen de "bouwmaterialen" in deze verdeling gebruiken, zou de hoeveelheid die in het water is idealerwijs met de Redfield ratio overeen moeten komen. Wanneer in de oceaan meer dan zestien keer zoveel biologisch actieve stikstof dan fosfor aanwezig is, dan wordt fosfor de beperkende factor. Is er minder dan zestien keer zoveel stikstof dan fosfor beschikbaar, dan wordt stikstof de beperkende factor.

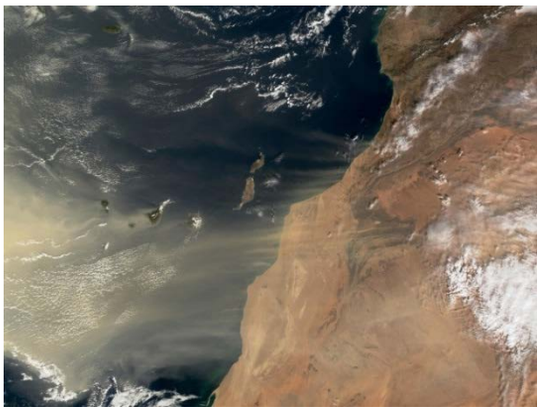
Denk eraan dat de Redfield ratio niet noodzakelijkerwijs op iedere soort van toepassing is en ook in zoet water anders zou kunnen zijn. In zoet water is de variatie tussen soorten groter dan in de oceaan. De Redfield ratio is echter een goed beginpunt.



Veranderingen in een ecosysteem kunnen de omstandigheden op duikplaatsen veranderen. Veel van zulke veranderingen zijn "natuurlijk", maar de grootste bedreigingen komen van menselijke invloeden. In veel wateren is de hoeveelheid stikstof (als nitraat) minder de zestien keer de hoeveelheid van biologisch actief fosfor. Dit kan het gevolg zijn van de enorme hoeveelheden fosfaat die door menselijk toedoen in het water belanden. Het was vele jaren gebruikelijk om fosfaat als wasverzachter aan wasmiddelen toe te voegen. In enkele landen is dit nu aan banden gebonden. Er zijn echter nog veel landen waar veel producten te vinden zijn, waarop aangegeven is dat ze fosfaat bevatten. De hoeveelheid biologisch actief stikstof die in het water terecht komt is in de afgelopen jaren sterk toegenomen. Naar verwachting gaat die groei nog door.

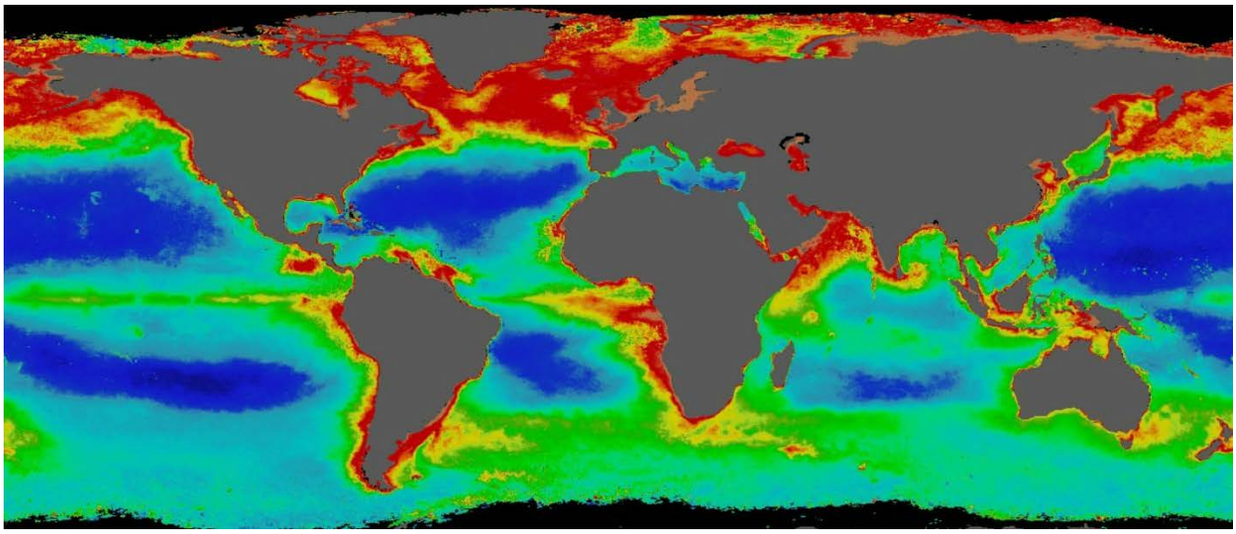
Een aanpassing in het gedrag van mensen (en daarmee een afname van de hoeveelheid meststoffen) kan de situatie verbeteren. De Zwarte Zee is daarvoor een goed voorbeeld. Na het uiteenvallen van de Sovjetunie is de waterkwaliteit sterk verbeterd. Tijdens de Sovjetunie periode was het gebruikelijk om de agrarische bedrijven van door de staat gesponsorde meststoffen te voorzien. De bedoeling was het maximaliseren van de voedselproductie door iedere hectare land tot de maximum capaciteit te gebruiken. De verstrekking van gratis meststoffen hield op toen de Sovjetunie uiteenviel. De boeren konden zich zelf de dure

meststoffen niet veroorloven, of hadden domweg niet de mogelijkheid deze te kopen. De Zwarte Zee die tot dan toe bekend was voor de regelmatige algenbloei en de bijbehorende problemen, zoals dode zones, begon zich te herstellen. Slechts weinige jaren nadat het overmatige gebruik van kunstmest beëindigd was herstelde het ecosysteem zich. Dit kan als voorbeeld dienen voor de ecologische winst die te behalen is, wanneer de invloed die de mens op het water heeft verminderd wordt.



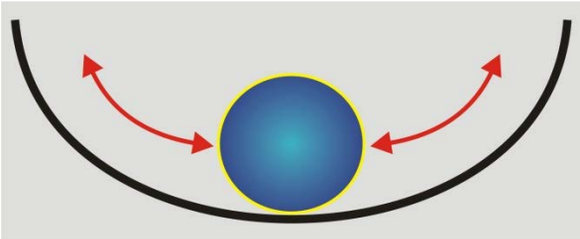
Een hoog gehalte aan meststoffen gecombineerd met veel zonne-energie hoeft nog niet te betekenen dat een ecosysteem in gevaar is. Wetenschappers hebben zich jarenlang afgevraagd waarom de algengroei in de oceaan op het zuidelijk halfrond zo gering is. In de zomer zijn er meer dan genoeg meststoffen en is er genoeg zon, maar toch blijft sterke algengroei uit. De reden die gevonden werd is de lage hoeveelheid van het sporenelement ijzer. In tegenstelling tot zoet water is zeewater arm aan biologisch actief ijzer. De grootste bron van reactief ijzer zijn zandstormen die vanuit de woestijn zand in zee blazen. Schijnbaar komt niet voldoende van dat zand in de oceaan op het zuidelijk halfrond terecht (wat logisch lijkt te zijn, omdat de meeste woestijnen zich op het noordelijk halfrond bevinden).

Een controversieel plan om de algengroei op het zuidelijk halfrond te stimuleren, om zo een deel van de atmosferische kooldioxide kwijt te raken, is gebaseerd op het bemesten met ijzer. Op die manier kan algenbloei uitgelokt worden. Het plan ging ervanuit dat de algen na hun dood naar duizenden meters diepte zouden zinken. Omdat de algen koolstof in hun lichaam hebben, zou die koolstof uit de biologische cyclus verwijderd worden (zie hoofdstuk 1) en in de geologische cyclus terechtkomen. Zo zou het kooldioxide gehalte in de atmosfeer lager worden. Dat helpt wederom bij het vertragen van klimaatverandering.



De bovenstaande afbeelding toont een satellietopname van de hoeveelheid chlorofyl in het water (de cellen van algen en planten waar fotosynthese plaatsheeft). De foto is in juli gemaakt, wat ten dele de lage waarden op het zuidelijk halfrond verklaard (in juli is het winter op het zuidelijk halfrond). Het zuidelijk halfrond toont echter het hele jaar door lagere waarden voor planktongroei.

Stabiele toestanden



Ecosystemen zijn doorlopend aan het veranderen en op weg naar een nieuwe "stabiele toestand". Een echte stabiele toestand wordt echter nooit bereikt. Er is altijd wel een factor die verandert en veel van die factoren worden dan een beperkende factor voor één of meer organismen. Wanneer het systeem in de ene richting veranderd is, dan is er meestal een moment waarop het systeem weer in de andere richting veranderd. Je kunt een ecosysteem vergelijken met de bal in de afbeelding. Die bal wordt telkens uit het midden weggedrukt, maar er zijn krachten in het spel die het "dwingen" om weer naar de stabiele toestand in het midden terug te keren.

Voorbeeld: *wanneer de populatie van konijnen in een ecosysteem sterk groeit, dan voelen vossen zich tot het gebied aangetrokken. De vossen eten meer konijnen, wat de populatie van konijnen doet afnemen. Wanneer de populatie van konijnen te klein wordt, dan moeten de vossen een andere voedselbron zoeken, het gebied verlaten, of verhongeren. De situatie keert zo terug naar het beginpunt. Wanneer de vossen echter uit het gebied vertrokken zijn, dan kan de populatie van konijnen opnieuw groeien.*

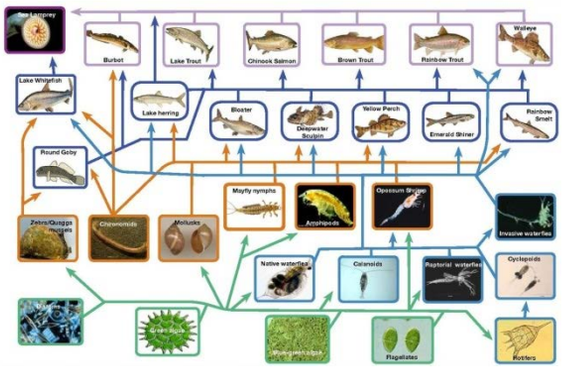
Wanneer er een verandering in een ecosysteem is, dan zullen de soorten die zich snel aan de nieuwe luxe (een groot aanbod van iets wat tot dan toe schaars was) het meeste profiteren. Soorten die snel kunnen groeien of zich snel kunnen vermeerderen kunnen tot een plaag worden wanneer beperkende factoren wegvallen.

Voorbeeld: *zowel waterplanten als fytoplankton gebruiken meststoffen om te groeien (wanneer er genoeg zonlicht is). Fytoplankton kan zich sneller reproduceren en zal dus meer profiteren van een groter aanbod van meststoffen.*

Sommige veranderingen gebeuren regelmatig. Dat kan in een vast ritme zijn (dag/nacht), onregelmatig (regen/droog weer), jaarlijks (zomer/winter) of anders. Andere veranderingen duren duizenden of miljoenen jaren (klimaatverandering, verandering van het zeeniveau, et cetera).

Voorbeeld: *wanneer een periode met sterke regenval gevolgd wordt door een zonnige periode, dan zal onkruid (snel groeiende planten) van de situatie gebruik maken en alle stukjes vrije grond vullen. Dit is waarom ze soms pioniersplanten genoemd worden. Ze nemen snel lege plaatsen in.*

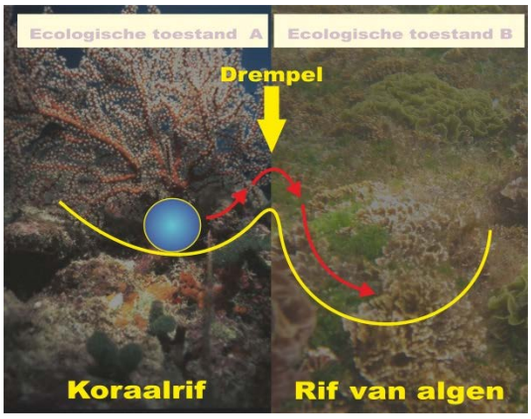
We spreken meestal van de voedselketen, maar het is beter om het over een voedselweb te hebben. Diverse soorten zijn in competitie met elkaar om dezelfde hulpbronnen. Wanneer een hulpbron ontbreekt, dan kunnen (en zullen) de meeste soorten van een alternatieve bron gebruik maken. Zoveel te groter de biodiversiteit, zoveel te meer soorten competitie voeren om dezelfde hulpbron. Dit vergroot het weerstandsvermogen van een ecosysteem. De NOAA illustratie van een voedselweb in de grote Amerikaanse Meren is een voorbeeld hoe verschillende soorten strijden om dezelfde hulpbronnen.



Voorbeeld: *Jonge algen op een koraalrif worden door diverse soorten gegeten, waaronder papegaaivissen, doktersvissen en zee-egels. Ze concurreren elkaar voor het verkrijgen van dit voedsel. Wanneer vissers teveel papegaai- en doktersvissen vangen, dan hebben zee-egels toegang tot meer voedsel dan ze kunnen eten. De populatie kan dan groeien, wat een verandering van het ecosysteem met zich meebrengt. Wanneer de populatie van zee-egels niet groeit, dan zal een toenemend aantal algen een volwassen leeftijd bereiken (wanneer ze zo groot zijn, dan zijn ze niet meer aantrekkelijk als voedsel). Op het rif nemen ze ruimte in, die dan niet meer voor koraal beschikbaar is. Wanneer om de een of andere reden de zee-egels van het rif verdwijnen, dan kunnen de algen ongeremd groeien en zo het rif domineren. Wanneer de papegaai- en doktersvissen er nog geweest waren, dan hadden die de consumptie over kunnen nemen. Biodiversiteit maakt een rif dus beter gewapend tegen veranderingen.*

Het voorbeeld van de algen op een koraalrif kan ook gebruikt worden om het concept van zich opvolgende stabiele toestanden uit te leggen.

- Een koraalrif is een stabiele toestand waarin producenten en consumenten elkaar in evenwicht houden. Zolang de toestand stabiel blijft zal de ecologische toestand van het rif gelijk blijven.
- Wanneer de hoeveelheid meststoffen op het rif toeneemt, dan zal ook de algengroei toenemen. In eerste instantie is dit geen probleem, omdat het gevolg zal zijn dat de hoeveelheid herbivoren, die algen eten, zal toenemen.
- Op een bepaald moment gaat de groei van de algen de honger van de grazers te boven, of neemt het aantal grazers af. De consequentie is dat meer algen volwassen worden. Ze nemen plaats op het rif in, wat ten koste van de beschikbare plaats voor koraal gaat.
- Wanneer algen eenmaal meer plaats innemen dan "normaal", zullen ze niet eenvoudigweg verdwijnen wanneer de hoeveelheid beschikbare meststoffen weer afneemt (ook niet wanneer de hoeveelheid meststoffen zo laag wordt als het was voordat de algengroei op gang kwam). Waarschijnlijk moet de hoeveelheid meststoffen tot ver beneden het voorgaande niveau zinken alvorens het reproductieve succes van de algen genoeg zal afnemen om weer plaats vrij te maken voor koralen.



Wanneer de grens voor dominantie van algen eenmaal overschreden is, dan is de weg terug zeer moeilijk. Bij een overgang naar een nieuwe ecologische toestand is er geen lineaire afname in de toestand van het rif. De toestand kan vrijwel normaal blijven totdat een grens overschreden is. Wat dan volgt is een snelle overgang naar een rif van algen. Preventie is dus de enige optie. Dit houdt in dat de hoeveelheid meststoffen laag moet blijven en dat het rif een grote biodiversiteit moet hebben.

Consequenties van grootte

Zoveel te groter een medium is waarin vervuiling terecht komt (of in dit geval meststoffen), zoveel te meer wordt dit verdund. Het gevolg is dat grote hoeveelheden van schadelijke stoffen in een groot volume, zoals de oceaan, terecht kunnen komen voordat het mogelijk is een verandering te meten. Het zal dus ook niet duidelijk zijn of er schadelijke consequenties zijn.

De situatie in de oceaan wordt verder gecompliceerd door de "tragedie van de meent" (tragedy of the commons). De oceaan heeft geen eigenaar. Iedereen kan er naar believen dingen ingooien of dieren eruit halen, zonder dat dit problemen met de internationale wetgeving met zich meebrengt. Protesten van het algemene publiek zijn de enige mogelijkheid om het misbruik van de oceaan te remmen. Het dient wel vermeld te worden dat er internationale afspraken bestaan die bedoeld zijn om de oceaan te beschermen. De OSPAR overeenkomst (genoemd naar OSlo en PARis, waar de besprekingen plaats hadden) kan daarbij als voorbeeld dienen. Hoewel het lang duurt voordat de vervuiling van de oceaan zo groot is dat de vervuilende stoffen in metingen zichtbaar zijn, dien je je te realiseren dat het veel tijd en moeite zou kosten deze er weer uit te krijgen.

Wanneer het publiek geïnformeerd is over problemen, dan zal het protesteren. Voor de oceaan lijkt er echter veel te weinig informatie tot de algemene bevolking door te dringen. Kooldioxide krijgt zeer veel aandacht. Het probleem wordt vermeld in kranten, op televisie en in andere media. Het gaat daarbij echter meestal over klimaatverandering. Slechts weinigen weten dat de oceaan meer van het overschot aan kooldioxide opneemt. Klimaatverandering zou veel verder voortgeschreden zijn wanneer dit niet het geval was. De consequenties voor de oceaan worden echter pas in een later stadium duidelijk. De oceaan verzuurt. Verzuring heeft geen directe relatie met een te grote hoeveelheid meststoffen, maar het is wel een probleem dat de situatie in gebieden met overbemesting verslechterd. In een verzuurde omgeving is de groei van koraal geremd (net als voor andere organismen die een skelet van calciumcarbonaat hebben). Dit maakt de koralen zwakker. Hun mogelijkheden om met algen te concurreren zijn dan gereduceerd.

De oceaan reageert langzamer op vervuiling dan zoet water. Dit is het gevolg van de grootte van de wateren. Alle meren, plassen, rivieren en het grondwater beslaan minder dan 1% van het volume van de oceaan. De dimensies van meren zijn zeer veel kleiner dan die van de oceaan en reageren dus sneller. Ook de atmosfeer reageert sneller dan de oceaan (iets wat we allemaal weten vanwege problemen zoals klimaatverandering, ozonalarm tijdens warme dagen en zure regen). In dit geval kan het verschil door het gewicht verklaard worden. De hydrosfeer is ongeveer 500 keer zwaarder dan de atmosfeer. Water is ongeveer 800 keer dichter dan lucht en de atmosfeer is slechts weinig groter dan de hydrosfeer. De atmosfeer bevat dus beduidend minder moleculen, wat een vervuiling sneller merkbaar maakt.

Een met algen bedekt wateroppervlak is daarom veel waarschijnlijker in een klein en ondiep meer, dan in een groot en diep meer. Zoveel te kleiner het water is, zoveel te sneller kunnen variaties in de hoeveelheid meststoffen optreden. Zulke variaties zijn ook in grotere wateren mogelijk wanneer de uitwisseling beperkt is. Dat is het geval wanneer een deel van een meer of de zee via een smalle passage met het grotere volume verbonden is. Denk daarbij bijvoorbeeld aan de Oostzee en de Middellandse Zee. De hoeveelheid meststoffen in dergelijke wateren kan beduidend hoger zijn dan in het grotere volume van het water dat daarmee verbonden is. Zulke beperkingen voor de uitwisseling komen ook voor bij de verticale distributie.

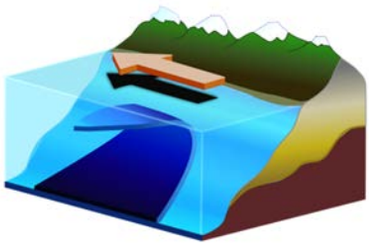
De hoeveelheid meststoffen in de oceaan is niet op iedere diepte gelijk. Zelfs wanneer dat het geval zou zijn, dan zou een dergelijke situatie niet lang kunnen bestaan. Fotosynthese heeft alleen plaats op dieptes waar licht kan doordringen. Dit wordt de fotische zone genoemd, ofwel de zone die voldoende licht ontvangt om fotosynthese mogelijk te maken. In deze zone worden de meststoffen voor primaire productie verbruikt. Doordat de meststoffen sneller verbruikt worden dan deze aangevuld kunnen worden, blijft de hoeveelheid meststoffen in de fotische zone laag (behalve in de winter. In die tijd hopen de meststoffen zich op voor gebruik in het voorjaar).

Water op grote diepte is rijk aan meststoffen, omdat ze op die diepte niet gebruikt worden en slechts zeer langzaam naar geringere diepte doordringen. Dit is echter niet de enige reden waarom meststoffen zich op grote diepte ophopen. Organismen die dicht bij de oppervlakte sterven kunnen, voordat ze gegeten worden, zinken. Daardoor is er een ononderbroken “sneeuw” van meststoffen richting het diepere water (de meststoffen die in het lichaam van het organisme zijn vastgelegd en die nog niet verrot zijn).

De thermohaliene circulatie begint met water dat tussen Noorwegen en Groenland naar grote diepte zinkt. Het diepe water stroomt dan langs de bodem door de Atlantische Oceaan, voordat het richting de Indische Oceaan en de Grote Oceaan gaat. De reis duurt honderden tot duidende jaren. Al die tijd verblijft het water “in de diepte”, waar het aangereikt wordt met meststoffen (van gestorven organismen). Het water van de thermohaliene circulatie begint de reis dus arm aan meststoffen, maar wordt

toenemend met meststoffen aangevuld. Het diepe water in de Atlantische Oceaan bevat daarom minder meststoffen dan het diepe water in de Indische Oceaan. Het water in de Indische Oceaan bevat wederom minder meststoffen dan het water in de Grote Oceaan. Verwissel de thermohaline circulatie niet met de hoofdstromingen van het oppervlaktewater van de oceaan. Die stroming gaat op het noordelijk halfrond met de klok mee en in het zuidelijke halfrond tegen de wijzers van de klok in. Er bestaan relaties tussen deze stromingen, maar hun oorzaak verschilt.

Er zijn plaatsen waar het diepe water naar de oppervlakte terugkeert. Die plaatsen zijn bekend vanwege hun zeer grote biologische activiteit. De plaatsen heten opwelling zones. De westkust van Afrika en Amerika zijn bekend voor zulke opwellinggebieden. Op die plaatsen komt water dat rijk is aan meststoffen aan de oppervlakte. Dat brengt een zeer hoge primaire productie met zich mee. Omdat zulke zones altijd rijk aan meststoffen zijn, is het plaatselijke ecosysteem aan de overvloed aangepast. Opwelling kan daarom gezien worden als “natuurlijke (over)bemesting”.



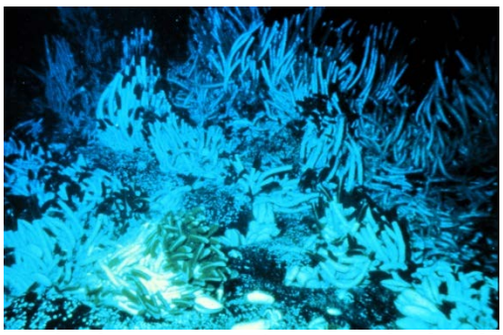
Onderzoek

Onderzoek is bedoeld om antwoorden te vinden op vragen over de wereld om ons heen. Onderzoek kan verbonden zijn met een wetenschappelijk vakgebied (natuurkunde, fysiologie, biologie, archeologie, geschiedenis, geologie en anderen). Vanwege de enorme variatie in onderwerpen verschillen ook de onderzoekmethoden sterk. Onderzoek is niet voorbehouden aan wetenschappers. Iedereen die zich iets afvraagt en dan actie onderneemt om een antwoord te vinden, doet onderzoek.

De rol van niet-wetenschappers bij onderzoek kan verschillen. Duikers kunnen wetenschappers assisteren bij het verzamelen van gegevens, maar kunnen ook hun eigen onderzoeksproject ontwerpen en zelf de verantwoordelijkheid nemen voor alle stappen die gedaan moeten worden. Zulke projecten kunnen bijvoorbeeld gerelateerd zijn aan de toestand van een meer, de relaties tussen verschillende soorten op een rif, de interactie tussen duikers en het onderwaterleven, of ieder ander onderwerp dat jou (of de groep duikers waarvan je deel uitmaakt) interesseert.

Dit hoofdstuk geeft inzicht in de methoden die door wetenschappers gebruikt worden. Zulke methoden zijn nodig om de geldigheid van de bevindingen uit onderzoek te verbeteren. Je hoeft je niet te houden aan de regels die gelden voor “officiële wetenschap”. Het is echter in je eigen interesse dat je projecten gegevens opleveren die zo nauwkeurig mogelijk zijn. In een ander deel van dit hoofdstuk wordt uitgelegd wat de technieken zijn om verschillende aspecten van de onderwaterwereld te meten. Het doel van dat deel is om je van een “gereedschapskist” te voorzien om een begin te maken met onderzoek.

Onderzoeksprojecten



Er zijn te weinig gegevens over de onderwaterwereld. De veel gehoorde uitspraak "dat we meer weten over het oppervlak van de maan dan van de bodem van de oceaan" is wellicht overdreven, maar niet ver van de waarheid. Zo heeft het bijvoorbeeld tot 1977 geduurd voordat voor het eerst de tot dan toe volledig onbekende ecosystemen rondom de "smokers" op de mid-oceanische rug (zie foto) ontdekt werden. Duikers bezoeken regelmatig meren in het binnenland en de kustwateren. Je zou je kunnen voorstellen dat de observaties van duikers de wetenschap van gegevens zouden kunnen voorzien om ontbrekende informatie aan te vullen.

Projecten waarin wetenschappers van het algemene publiek gebruik maken om monsters of gegevens te verzamelen worden gezien als een kostenefficiënte manier om onderzoeken te doen die normaal vrijwel niet mogelijk zouden zijn. Vaak betreft het hier bedrijven of personen die naar plaatsen reizen waar het normaal zeer duur zou zijn om regelmatig monsters of gegevens te verzamelen. Het omgekeerde bestaat echter ook. In plaats van bedrijven of personen die diensten verlenen aan de wetenschap, wordt in de Nederlandse "wetenschapswinkels" de wetenschap in de dienst van het algemene publiek gesteld. In dit model kan een ieder zich melden met een onderwerp waarvoor naar eigen mening onderzoek gedaan zou moeten worden. Wanneer het onderwerp geaccepteerd wordt, wordt het project aan een wetenschapper of groep van wetenschappers toegewezen. In beide bovenstaande voorbeelden zijn de niet-wetenschappers bij slechts een deel van het proces betrokken.

Dit hoofdstuk is niet bedoeld als voorbereiding voor een (kleine) rol in "officiële" onderzoeken. Natuurlijk zal de verstrekte informatie erbij helpen om een betere assistent voor wetenschappelijke projecten te worden. Het doel van dit hoofdstuk is echter de voorbereiding op "community-science" (ook bekend onder de naam "participatory research"). In community-science doen niet-wetenschappers (in dit geval duikers) hun eigen onderzoeksprojecten. Ze formuleren de vragen die beantwoord dienen te worden, zoeken uit wat al over het onderwerp bekend is, kiezen de onderzoeksmethode, verzamelen gegevens en interpreteren de resultaten van het project. Zulke projecten kunnen met, of zonder, de hulp van wetenschappers gedaan worden. In "echte wetenschap" zijn alleen de verzamelde gegevens en de daarop gebaseerde conclusies van belang. De rest is slechts "werk". Bij community-science hebben alle stappen in het project evenveel belang, omdat iedere stap een gelegenheid biedt om te leren. Leren tijdens het doen is de essentie van community-science.

Onderzoek wordt gedaan om antwoorden op vragen te vinden. De consequentie is dat alle onderzoeksprojecten beginnen met het formuleren van een vraag. Die vraag moet specifiek zijn. Een vraag zoals "waarom is het zicht in zoet water zo variabel" kan niet op basis van onderzoek beantwoord worden. Je hebt dan te maken met veel teveel variabelen. Je moet een vraag stellen die veel specifieker is, zoals "welke invloed heeft regenval op het zicht in het xyz meer?" Onderzoek wordt stap voor stap gedaan en richt zich op een enkel aspect per keer. Wanneer je je meerdere dingen afvraagt, dan moet je meerdere vragen formuleren. Een tweede en derde vraag die aansluiten bij het voorgaande voorbeeld zouden als volgt kunnen zijn: "heeft de intensiteit en duur van het daglicht invloed op het zicht in het

xyz meer?" en "hebben verschillen in watertemperatuur op 2, 5, 10 en 20 meter invloed op het zicht in het xyz meer?"

De kans is groot dat je niet de eerste persoon (of groep) bent die zich afvraagt welke factoren invloed hebben op het zicht onder water. Het is zeer goed mogelijk dat al onderzoek gedaan is. Waarschijnlijk niet in het xyz meer, maar informatie over factoren die het zicht beïnvloeden zou beschikbaar kunnen zijn. De tweede stap in het onderzoek is daarom het zoeken naar bestaande informatie. Voor dat doel ga je op zoek in het internet. Zoek naar bronnen van informatie over je onderwerp. Zoveel de dichter de relatie met jouw project, zoveel te beter het is. Het kan echter de moeite waard zijn om je zoektocht op een breder gebied te richten (bijvoorbeeld factoren die het zicht in zee beïnvloeden).

Alvorens met het project verder te gaan is het nu tijd om nogmaals naar de vraag te kijken en te beslissen in welke (van drie) categorie deze thuishoort. Wil je iets beschrijven, voorspellen of verklaren? Beschrijven betekent dat je via observatie eenvoudigweg juiste en betrouwbare informatie over je onderwerp verzamelt. Juiste en betrouwbare informatie is een voorwaarde om tot begrip te komen. Met betrekking tot het zicht onder water betekent dit dat het zicht in het meer op dagelijkse basis en telkens op dezelfde plaats gemeten wordt, om zo **correcte gegevens** vast te leggen over variaties in het zicht.

Als duiker zou je natuurlijk liever het zicht willen **voorspellen**. Om dat mogelijk te maken moet je op zoek naar een "oorzaak en gevolg" relatie. Je gaat op zoek naar correlatie. Positieve correlatie betekent dat twee dingen tegelijkertijd gebeuren. Bijvoorbeeld "nadat het een uur lang 2mm/uur geregend heeft wordt het zicht slechter." Negatieve correlatie betekent het tegenovergestelde. Bijvoorbeeld: "naarmate de dagen korter worden, wordt het zicht beter." De ene variabele neemt af terwijl de andere toeneemt. Bij het voorbeeld voor regen en zicht, is het snel duidelijk welke van de twee de oorzaak is, en welke het gevolg. Het is niet waarschijnlijk dat slecht zicht regen veroorzaakt. Dit is echter niet altijd zo duidelijk. Soms is het wel mogelijk correlatie vast te stellen, maar lukt het niet om met zekerheid vast te stellen welke van de twee de oorzaak is en welke het gevolg. Je dient je er ook van bewust te zijn dat correlatie helemaal niet hoeft te betekenen dat er überhaupt sprake is van een oorzaak en gevolg relatie. Het is goed mogelijk dat er nog een derde factor is die de twee gemeten factoren tegelijk beïnvloed.

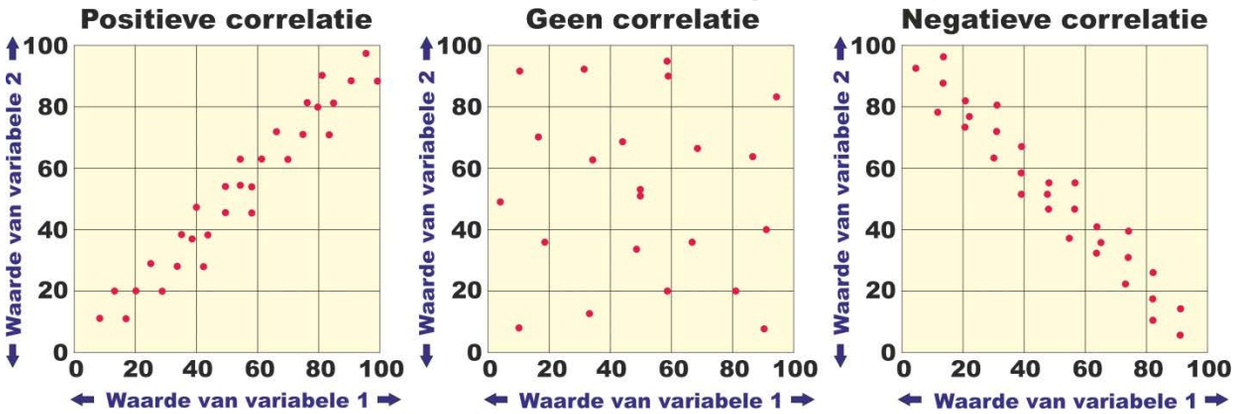
De eerste categorie van vragen gaat dus over "wat gebeurt er". De tweede categorie gaat over "wanneer gebeurt het". Bij het laatste soort vragen gaat het om "waarom of hoe gebeurt het". In dit geval kan het zijn dat je over meer gedetailleerde gegevens dient te beschikken. Het beantwoorden van een dergelijke vraag begint met een aanname. Gebaseerd op je vraag formuleer je een uitspraak die hypothese genoemd wordt. Bijvoorbeeld "wanneer het aantal uren daglicht daalt tot onder de acht, dan verbetert het zicht in het xyz meer, **omdat** de groei van plankton dan beduidend minder is". In deze uitspraak is het aantal uren daglicht de onafhankelijke variabele en is de groei van plankton (en daarmee het zicht) de afhankelijke variabele. Als onderzoeker moet je nu de onafhankelijke variabele beïnvloeden (kunstmatig het aantal uren daglicht veranderen) en observeren wat met de afhankelijke variabele gebeurt. Terwijl je dit doet is een controlemeeting nodig. De controlemeeting wordt op een monster (of situatie) gedaan waarmee vergeleken kan worden. In de controlemeeting moet alles gelijk zijn aan de meeting voor de afhankelijke variabele, met uitzondering van het aantal uren daglicht. Het probleem bij

dit soort onderzoek is dat het heel moeilijk is om zeker te stallen dat alle factoren (met uitzondering van de onafhankelijke variabele) voor beide metingen volledig gelijk zijn. Wanneer niet alleen het aantal uren daglicht verandert, maar ook de temperatuur, dan is het niet meer mogelijk om te beweren dat het aantal uren daglicht de verandering in het zicht veroorzaakt heeft.

De keuze voor een van de drie categorieën van vragen is bepalend voor alle verdere aspecten van het onderzoeksproject. We zullen beginnen met uitleg over de meest eenvoudige vorm, wat het beschrijven is. Het verzamelen van gegevens kan op verschillende manieren gedaan worden. Eén techniek is het naturalistische observeren. Een vraag kan bijvoorbeeld zijn of zee-egels zich verplaatsen en, wanneer dat het geval is, met welke gemiddelde snelheid. Voor dat doel dien je een aantal zee-egels te markeren door (bijvoorbeeld) een stukje isolatie van een elektrische kabel over een stekel te schuiven. Op dat moment noteer je hun locatie en de tijd. In een volgende duik meet je de afstand die door de zee-egels is afgelegd en noteer je wederom de tijd. Naturalistische observatie kan echter foute gegevens met zich meebrengen. Het gedrag van een organisme kan beïnvloed worden door degene die observeert, of er zelfs door veroorzaakt worden. Zulk "reactief gedrag" is meestal niet het soort informatie waarnaar je op zoek bent (behalve wanneer je onderzoekt hoe het organisme op een duiker reageert).

Je onderzoek kan ook over duikers of over het algemene publiek gaan. Wanneer mensen het onderwerp van je onderzoek zijn, dan heb je aanvullende opties beschikbaar. Je zou een vragenlijst kunnen opstellen om gedrag of mening te meten: "controleer je de wasmiddelen die je koopt op de afwezigheid van fosfaat?" of "denk je dat het duiken in dit meer verboden zou moeten worden?" Je kunt ook verschillen meten in het begrip of de kennis van twee verschillende groepen. Zo zou je bijvoorbeeld een test kunnen opstellen om milieubewustzijn te meten en dit door mensen uit twee verschillende groepen laten beantwoorden. De bedoeling van dit soort onderzoek is niet om vast te stellen waarom er een verschil is. Het gaat er gewoonweg om vast te stellen (te meten) of zo'n verschil bestaat. Vaak is dit soort onderzoek daarom een eerste stap in een langere studie. Nadat eerst is vastgesteld dat er een verschil bestaat, kan in toekomstig onderzoek de vraag gesteld worden hoe of waarom dat verschil ontstaan is.

Wanneer je op zoek bent naar correlatie, dan moet je meerdere variabelen tegelijk meten. Zee-egels eten hoofdzakelijk algen, maar ook zeekomkommers en verschillende ongewervelde, zoals mossels en sponzen. Wanneer je aanneemt dat zee-egels zich verplaatsen wanneer op de huidige locatie niet voldoende voedsel gevonden wordt, dan zou je gegevens over de plaats waar de zee-egel zich bevindt kunnen toevoegen aan de gegevens over de afstand die ze afleggen. Wanneer je vaststelt dat zee-egels minder afstand afleggen wanneer ze zich op een met algen bedekte rots bevinden, dan de afstand die zee-egels op een kale zandvlakte afleggen, dan heb je een (negatieve) correlatie gevonden tussen de beschikbaarheid van voedsel en de afgelegde afstand. Het vinden van een dergelijke correlatie staat je echter niet toe een oorzaak en gevolg relatie te bepalen. De rots zal niet alleen meer voedsel hebben, maar ook een andere structuur dan de zandbodem. Het zou goed kunnen zijn dat die structuur, of de



aanwezigheid van sponzen en algen, de zee-egel hindert bij het bewegen. Om vast te stellen waarom een zee-egel op zand een grotere afstand aflegt dan op rots, zou je een experiment moeten opzetten

waarin slechts een enkele variabele veranderd wordt, terwijl alle andere factoren gelijk blijven. Onderzoek naar correlatie is echter belangrijk. In veel gevallen zou het niet acceptabel zijn om zo in te grijpen in de onderwaterwereld dat een geldig experiment mogelijk wordt.

Wanneer je een experiment wilt doen, dan moet daar goed over nagedacht worden. In een experiment moet één factor (de onafhankelijke variabele) gemanipuleerd worden, terwijl alle andere factoren gelijk blijven. Tegelijkertijd moet je alle factoren die een invloed zouden kunnen hebben op je afhankelijke variabele onder controle houden. Wanneer dat niet mogelijk is, dan dien je te voorzien in een "controlemeeting". In de controlemeeting is alles gelijk aan het experiment, met uitzondering van de onafhankelijke variabele die in dit geval niet gemanipuleerd wordt. Zo kunnen de resultaten van het experiment vergeleken worden met wat "normaal" gebeurd zou zijn onder de huidige omstandigheden.

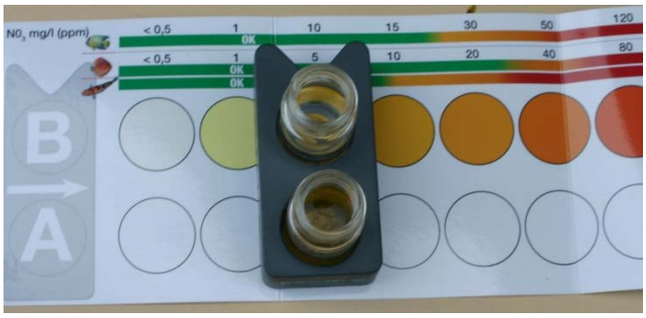
Dit is onder water niet altijd mogelijk. Stel je voor dat je een experiment zou willen doen om de negatieve gevolgen van overbemesting op een koraalrif te meten. Zoals in het voorgaande hoofdstuk is aangegeven kunnen aan land meststofrijke en meststofarme omgevingen op korte afstanden van elkaar bestaan. Onder water worden meststoffen echter veel sneller gelijkmatig verdeeld. Hoe zou je dus een deel van het rif met meststoffen kunnen belasten (zonder dat ook op de rest van het rif te doen)? Hoe kun je zekerstellen dat alle andere factoren, zoals stroming, zonlicht de aanwezigheid van soorten (vooral herbivoren) niet veranderen en daarbij nog gelijk zijn aan het "controle-rif"? De benodigde ingrepen gaan ver uit boven wat redelijkerwijs mogelijk is.

Wanneer je een experiment doet, dan moet dit (een deel van) de vraag beantwoorden die aan de basis van je project stond. Jouw antwoord op die vraag wordt je hypothese. In een hypothese formuleer je wat je weet (of denkt) wat zal gebeuren. Voorspellen wat zal gebeuren is veel moeilijker dan achteraf verklaren wat gebeurd is. Het maakt een diepgaand begrip van de situatie noodzakelijk. Het formuleren van een hypothese en het ontwerpen van een experiment dat deze uitspraak kan ondersteunen, behoren tot de grootste uitdagingen van deze onderzoeksmethode. Om een hypothese te testen moet je de variabelen operationaliseren. Dat betekent dat je een manier moet vinden om de waarschijnlijkheid van je hypothese te meten.

Laten we aannemen dat je onderzoeksvraag erover gaat of een octopus kan leren. Je hypothese zou dan zijn dat de octopus die op je huisrif leeft in staat is om te leren. Je probleem is nu het vinden van een methode om "leren" te meten. "Leren" kan niet gemeten worden totdat je een specifieke handeling bedacht hebt die meetbaar is en aantoont dat er sprake is van een leerproces. Je zou kunnen overwegen om een garnaal in een schroefglas te plaatsen. Om bij het eten te komen moet de octopus uitzoeken hoe het schroefdeksel van het glas gedraaid wordt. Omdat een octopus niet aan schroefglazen gewend is, zal het waarschijnlijk een poosje duren voordat die heeft uitgevonden hoe het deksel verwijderd wordt. In het kader van het experiment meet je de tijd die de octopus nodig heeft. Wanneer er sprake is van leren, dan mag je aannemen dat de octopus de volgende dag het glas veel sneller open krijgt. De variabelen die daarbij gelijk moeten blijven zijn de tijd van de dag (wanneer je aanneemt dat dit een relatie heeft met de eetlust van de octopus), het soort garnaal dat in het glas geplaats is (moet steeds hetzelfde zijn), hoe vast het deksel op het glas geschroefd is, enzovoort.

Methoden voor onderzoek

Wanneer voor je project alleen afstand of tijd gemeten moet worden, dan kan dit gemakkelijk met een meetband of horloge gedaan worden. Het tellen van het aantal organismen (of iets anders) per oppervlakte-eenheid is mogelijk met een raster. Je kunt ook overwegen om met lijnen een baan op een glooiende bodem af te zetten om variaties van je onderzoeksonderwerp met toenemende diepte te bepalen. Wanneer je onderzoek over kleine organismen gaat, dan kan het nodig zijn om watermonsters achteraf onder een microscoop te bekijken. Soms moet je improviseren. Wanneer je de lichtintensiteit op verschillende diepten wilt vergelijken (bijvoorbeeld wanneer je project over fotosynthese gaat), dan zou je een eenvoudige camera kunnen gebruiken door daarop de aanbevolen sluitersnelheid af te lezen (nadat je manueel het diafragma en de ISO-waarde hebt vastgelegd). Dit staat je toe de lichtintensiteit op de verschillende diepten met elkaar te vergelijken. Wanneer je project over chemicaliën in het water gaat, dan worden de metingen moeilijker.



Er zijn verschillende methoden om chemicaliën in het water te meten. De goedkoopste en gemakkelijkst te verkrijgen methode is een set chemicaliën die met een kleurkaart vergeleken wordt. Zulke sets zijn beschikbaar voor diverse metingen. Vaak zijn zulke sets bedoeld om de waterkwaliteit in een aquarium, of van het drinkwater te meten. De nauwkeurigheid van de sets is aan dat doel aangepast. Dit maakt ze soms ongeschikt voor een duiker die milieuwaarden wil meten. Voor drinkwater en aquaria wil je alleen weten of de waterkwaliteit goed genoeg is. Het gaat er niet om de exacte waarde van een meststof of andere chemische stof te bepalen.

Een consequentie is dat de detectielimiet hoger kan zijn dan de concentratie van de meststoffen of chemicaliën in het water en dat de meetschaal een te lage resolutie heeft. Vaak zijn er maar 4 tot 10 stappen in de te meten waarden. Zelfs wanneer je tussenwaarden zou schatten, is de resolutie vaak niet bevredigend.

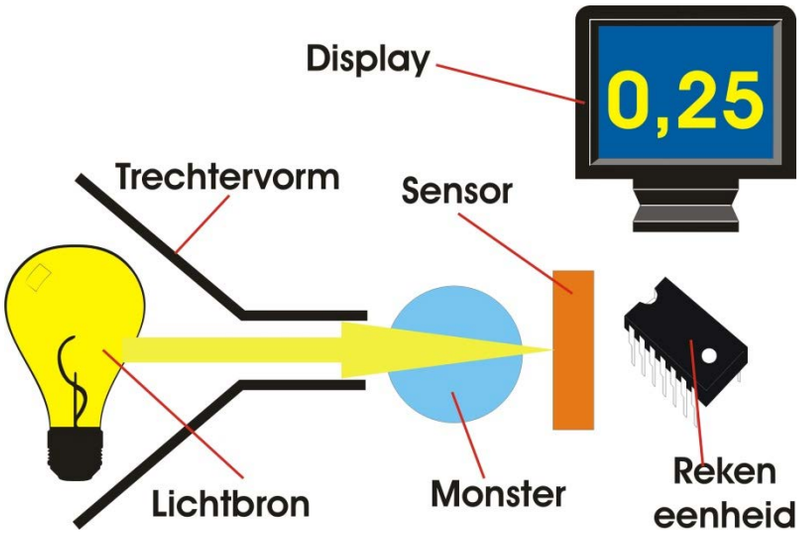
De procedure is als volgt. Je vult twee buisjes met het water dat getest dient te worden. De chemicaliën worden aan slechts één van de buisjes toegevoegd. Na het toevoegen van de chemicaliën moet je de instructies volgen die in de gebruiksaanwijzing staan. Het kan zijn dat je moet schudden, of een bepaalde tijd moet wachten. Eventueel moet het water een minimum temperatuur hebben. Na het wachten wordt het buisje met de chemicaliën op het witte veld geplaatst en het buisje zonder chemicaliën op het gekleurde veld. Om te voorkomen dat omgevingslicht een te grote invloed heeft wordt het onderste deel van het buisje vaak in een houder geplaatst. Je schuift het buisje nu over de gekleurde velden terwijl je er van bovenaf inkijkt. Wanneer het water in de twee buisjes dezelfde kleur lijkt te hebben (de ene is verkleurd door de chemicaliën en de andere door het gekleurde veld eronder) dan heb je de juiste concentratie gevonden en kun je de waarde bovenaan de kleurkaart aflezen. Let op dat er sets voor zout en voor zoet water, of voor beiden, kunnen zijn.

De volgende optie is een fotometer voor een enkele parameter. Dit zijn instrumenten waarmee slechts één bepaalde stof gemeten kan worden. Universele fotometers worden later besproken. Natuurlijk is het een voordeel wanneer een enkel instrument verschillende chemische stoffen kan meten, maar fotometers voor een enkele parameter

hebben een groot voordeel. De rekeneenheid die in het instrument ingebouwd is staat toe dat het display direct de concentratie van de gemeten stof geeft. Daarmee is de kans dat je rekenfouten maakt uitgesloten.

Fotometers voor een enkele parameter kunnen alleen gebruikt worden met de chemicaliën waarvoor het bedoeld is. Het werkt door het monster tussen een lichtbron en een sensor te plaatsen. De sensor houdt rekening met de verkleuring van de chemicaliën die bij het apparaat horen. Andere chemicaliën (met een andere verkleuring) zouden een verkeerde meting veroorzaken (een meting die door de elektronica verkeerd geïnterpreteerd zou worden).

De hoeveelheid licht die op de sensor terechtkomt, wordt minder naarmate het monster sterker verkleurd is. Zoveel te meer van de te meten stof in het water zit, zoveel te minder licht valt op de sensor. De intensiteit van het licht wordt doorgegeven aan de rekeneenheid. De rekeneenheid bepaald dan de waarde die op het display afgelezen kan worden. Die waarde geeft de concentratie van de stof in het water in ppm (of mg/l). Het is deze omrekening, die het gemak van een fotometer voor een enkele parameter bepaalt. Bij universele fotometers moet je die berekening vaak zelf doen. Het instrument heeft geen rekeneenheid. Op die instrumenten lees je af hoeveel licht op de sensor gevallen is (in volt of als weerstand in ohm). Die waarde moet dan nog omgerekend worden naar mg/l.

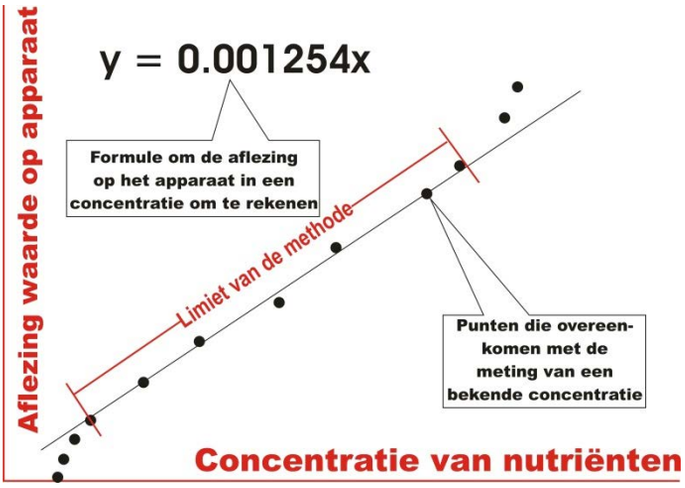


Ook voor een fotometer moet rekening gehouden worden met de "natuurlijke kleur" van het water. Dit wordt gedaan door het apparaat "op nul te stellen". Om dit te doen wordt een buisje met het te meten water, maar zonder chemicaliën, in het apparaat geplaatst. Je drukt dan de knop voor "zero". Het instrument zal nu gekalibreerd worden voor de kleur van het water. Daardoor zal bij de eigenlijke meting alleen rekening gehouden worden met de verkleuring door de chemicaliën om de concentratie van de stof in het water te bepalen.

Net als bij iedere procedure met chemicaliën, moet je je houden aan de informatie in de gebruiksaanwijzing met betrekking tot het aantal druppels of de hoeveelheid poeder, wachttijden, schudden of andere instructies. De metingen met een fotometer hebben een hoge resolutie, omdat het instrument verschillen kan herkennen die voor het menselijke oog niet zichtbaar zijn.

Universele fotometers kunnen gebruikt worden om diverse stoffen te meten. Wanneer er chemicaliën beschikbaar zijn die een verkleuring bewerken, wanneer een bepaalde stof in het water is, dan is een meting mogelijk. De fotometer kan niet weten wat je aan het meten bent en met welke chemicaliën. Omdat de fotometer niet weet wat je aan het meten bent, kan het apparaat je niet helpen bij het omrekenen van de meting naar een concentratie van de gemeten stof. De flexibiliteit om met een enkel apparaat meerdere stoffen te meten komt dus met het ongemak dat je zelf de berekening moet doen. Als eerste moet je bepalen hoe de berekening gedaan moet worden. Daarvoor moet je beschikken over monsters met een reeds bekende concentratie. Wanneer je niet over zulke monsters beschikt, dan heeft een universele fotometer geen nut.

De werking van een universele fotometer is dus gelijk aan de werking van een fotometer voor een enkele parameter. Dat echter zonder de luxe om de concentratie van een stof in het water direct af te kunnen lezen. De voordelen zijn dat het instrument voor verschillende stoffen gebruikt kan worden en dat ook onder de meetgrens een waarde gegeven wordt. Waarden onder de meetgrens zijn onnauwkeurig, maar geven wel een indicatie over de situatie. Fotometers voor een enkele parameter "weigeren" een waarde te geven wanneer de concentratie buiten het meetbereik valt, omdat de aflezing dan niet zou voldoen aan de in de gebruiksaanwijzing beloofde nauwkeurigheid.



Om metingen in volt of ohm om te rekenen dienen watermonsters met een bekende concentratie gemeten te worden. Vaak zijn zulke monsters beschikbaar bij fabrikanten van semipermeabele membraanuitrusting (komt later aan de orde). Dat soort uitrusting moet gekalibreerd worden met een mengsel met bekende concentratie.

De monsters met bekende concentratie worden gebruikt om een regressielijn te tekenen. Wanneer de regressielijn getekend is, dan kunnen ook concentraties die tussen de bekende metingen vallen bepaald worden. De regressielijn kan doorgetrokken worden tot voorbij de bekende metingen, maar voor die waarden mag niet aangenomen worden dat ze nauwkeurig zijn. Binnen het gemeten bereik zijn metingen alleen nauwkeurig wanneer de bekende oplossingen op (of dichtbij) de regressielijn vallen. De plaats waar metingen van bekende oplossingen van de lijn weg lopen geeft aan wat het meetbereik van de methode is.

Stel je voor dat je beschikt over drie bekende oplossingen (1, 10 en 100 mg/l nitraat). Daarvan kun je gemakkelijk 5 verschillende concentraties maken – de drie standaard oplossingen, een 50/50 mengsel van 1 en 10 mg/l (dat wordt een 5.5 mg/l concentratie) en een 50/50 mengsel van 10 en 100 mg/l (dat wordt een 55 mg/l concentratie. Iedere oplossing wordt eerst zonder chemicaliën in het instrument geplaatst om deze op nul te stellen. Daarna worden de chemicaliën toegevoegd en wordt in overeenstemming met de gebruiksaanwijzing gewacht of geschud. Daarna wordt de oplossing gemeten. De procedure wordt herhaald voor alle bekende oplossingen. Een regressielijn (en daarmee de formule om de concentratie te berekenen) kan het beste op een computer gemaakt worden.

Sommige fabrikanten van universele fotometers leveren diverse regressielijnen voor verschillende chemicaliën bij het apparaat. Wanneer je een fotometrische meting doet, dan moet je voorkomen dat omgevingslicht in het instrument kan vallen. Dit zou de meting beïnvloeden. Wanneer een fotometer geen cap heeft om zonlicht te blokkeren, dan mag het apparaat alleen in de schaduw gebruikt worden. Eventueel kun je ook de delen afdekken, waar je verwacht dat licht in het te meten monster kan vallen.

Voor alle methoden die tot nu toe behandeld zijn wordt van chemicaliën gebruik gemaakt. Dit is niet het geval voor selectieve membranen. Ion-selectieve membraanuitrusting heeft een sonde die in het water gehouden wordt. De membraan laat alleen de te meten stof in de meetkamer. In de kamer wordt de activiteit van ionen gemeten, wat resulteert in een waarde voor de concentratie van de te meten stof.

Net als het geval was bij de fotometers, zijn ook hier twee opties. De sonde kan aangesloten zijn aan een apparaat dat direct de concentratie van de stof aangeeft. De sonde kan ook aangesloten zijn op een apparaat dat een waarde in volt of ohm geeft (afhankelijk hoe het apparaat geschakeld is). In het eerste geval is het nodig de sonde te kalibreren en in het tweede geval moet een regressielijn voor de te meten stof gemaakt worden.

Index

-A-

Abyssopelagische zone 4
Afotische zone 4
Algen 19
Arthropoda 22
Atmosferische vensters 11
ATP 8

-B-

Bacteriën 14
Bathypelagische zone 4
Beenvisachtigen 23
Benthos 4
Beschrijven 39
Bio-accumulatie 28
Biodiversiteit 28
Bufferende werking 12

-C-

Calciumcarbonaat 9, 13
Calvincyclus 8
Chemicaliën 42
Chordata 23
Community-science 38
Correlatie 40

-D-

Demersale vissen 4
Detectielimiet 42
Dode zones 29
Donkerreactie 8

-E-

Eencellige dieren 19
Elektronenparen 13
Energie cyclus 7
Epelagische zone 4
Eutroof 28
Experiment 41

-F-

Fosfaat 31
Fossiele brandstoffen 9
Fotische zone 3
Fotometer 42

-G-

Gassen in de atmosfeer 11
Geologische cyclus 9, 32
Gewervelden 23
Grondwater 3

-H-

Hadopelagische zone 4
Hydrofiel 5
Hydrofoob 5
Hydrosfeer 3
Hypothese 41

-I-

IJzer 32
Inert 30
Ion-selectieve membraan 44

-K-

Kaakloze vissen 23
Kieuwen 17
Klimaatverandering 10
Koolstofcyclus 9
Koralen 20
Kraakbeen 23
Kwallen 20

-L-

Lichtreactie 8
Lithosfeer 3

SCUBA Courses & Publications

-M-

Mesopelagische zone 4
Mesotroof 28
Meststoffen 28
Mollusk 21

-N-

NADPH 8

-O-

Oceaan 3
Oligotroof 28
Onderzoeksprojecten 38
Oppervlaktespanning 5
Opwelling 36

-P-

Pedosfeer 3
Pelagische vissen 4
Planten 19
Polaire eigenschappen 5
Primaire productie 6
Protozoa 19

-R-

Reactieve stikstofverbindingen 13
Redfield ratio 31
Regressielijn 44
Ringwormen 21

-S-

Scuba-Eco 3
Sponzen 19
Stabiele toestand 33
Stikstofcyclus 13
Stroomlijn 16
Symbiose 24

-T-

Taxonomische systeem 18
Thermohaliene circulatie 11
Troposfeer 3

-V-

Verklaren 39
Verzuring van de oceaan 12
Voedselpiramide 25
Voedselweb 25
Voorspellen 39

-W-

Warmtecapaciteit 5
Water 4
Watercyclus 5
Waterplanten 19
Wetenschap 38
Wetenschappelijke naam 18

-Z-

Zeeanemonen 20
Zee-egels 22
Zeekomkommers 22
Zeesterren 22
Zoogdieren 24
Zure regen 13
Zwaartekracht 16