

# Tipping points, zo werken ze!

Wat een in ijs gehulde aarde, de Sahara en  
armoede met elkaar gemeen hebben

Sebastian Bathiany, Bregje van der Bolt,  
Ingrid van de Leemput, Usman Mirza, Pablo Rodríguez-Sánchez,  
Arie Staal (Wageningen Universiteit)  
Rob Adriaens, Bjinse Dankert, Anneke van de Boer (NESSC)



© Deze module is eigendom van het Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap (KNAG) en het Nederlands Earth System Science Centre. Gebruik van deze module is toegestaan aan scholen of instellingen onder vermelding van de auteurs en de hieronder weergegeven instellingen. Tekening voorkant gemaakt door Bregje van der Bolt



# Tipping points, zo werken ze!

Wat een in ijs gehulde aarde, de Sahara en  
armoede met elkaar gemeen hebben

Deze module is gecertificeerd door het Koninklijk  
Nederlands Aardrijkskundig Genootschap (KNAG).  
De module maakt onderdeel uit van Geo Future  
School.

Sebastian Bathiany, Bregje van der Bolt, Ingrid  
van de Leemput, Usman Mirza, Pablo Rodríguez-  
Sánchez, Arie Staal (Wageningen Universiteit)  
Rob Adriaens, Bjinse Dankert, Anneke van de Boer  
(NESSC). Contact: [info@nessc.nl](mailto:info@nessc.nl)  
@2018



## Geo Future School

Geo Future School is een onderwijsstroom die toekomstgericht onderwijs biedt op het raakvlak van bèta en gamma. Centraal binnen Geo Future School staan de grote vraagstukken van de 21e eeuw rondom thema's als energie, water, voedsel, veiligheid, verstedelijking, klimaat, gezondheid, duurzaamheid en globalisering. Geo-informatie en geodesign worden gebruikt om oplossingen te formuleren voor deze vraagstukken die de hele aarde aangaan.

Binnen de onderwijsstroom nemen de Geo Future School modules een belangrijke plaats in. Deze modules bestaan uit lessenseries van circa 8 tot 14 lessen rondom een thema. Elke module bevat vijf vaste onderdelen. Het begint met een startopdracht die zich dicht bij de belevingswereld van jongeren afspeelt. Er is een deel theorie dat wordt afgewisseld met go/no go opdrachten en een praktisch onderdeel, zoals een veldwerk, een onderzoek of een ontwerpdracht. Centraal in de module staat de eindopdracht waarin leerlingen hun eigen creativiteit ten volle kunnen inzetten. De module wordt afgesloten met een presentatie van de eindopdracht.

Er is een opbouw in denkvaardigheden. In de startopdracht gaat het vooral om het activeren van voorkennis, in de theorie ligt de nadruk op begrijpen en toepassen, bij het praktische onderdeel op analyseren en evalueren en in de eindopdracht ligt de nadruk op creëren.

De modules worden gemaakt door docenten uit het voortgezet onderwijs in samenwerking met een bedrijf of instelling. Het gaat dus om levensechte en actuele vraagstukken. De leerlingen kunnen een groot deel van de tijd in hun eigen tempo werken en in de eindopdracht kunnen ze hun eigen accenten leggen.

Geo Future School brengt bedrijven, instellingen en onderwijs samen. Het maakt onderwijs relevant, praktijkgericht, uitdagend en vooral toekomstgericht.

## Inhoudsopgave

Inleiding	4
Curriculum	6
Afsluitende opdracht I	7
De opbouw van de module	8
Startopdracht	9
Hoofdstuk 1: Tipping points in je vijver	10
Hoofdstuk 2: Theorie achter tipping points	15
Hoofdstuk 3: Sneeuwbal aarde	21
Hoofdstuk 4: De groene Sahara	25
Hoofdstuk 5: Armoedevallen	30
Afluitende opdracht II	35
Beoordeling	36

## Inleiding

Ons klimaat verandert, maar dat is over het algemeen nauwelijks merkbaar voor ons. Als je jarenlang naar dezelfde plek op vakantie gaat, zal je misschien wel zien dat er wat kleine dingen in de omgeving zijn veranderd, maar het klimaat zelf verandert zó langzaam en geleidelijk dat dat je niet opvalt. In de beleving van veel mensen is onze omgeving dan ook redelijk voorspelbaar en constant. Dat is ook lange tijd het heersende beeld geweest in de klimaatwetenschappen: stijgende CO<sub>2</sub> concentraties zouden een geleidelijk effect hebben op het klimaat. De laatste jaren spreekt men echter steeds vaker over mogelijke kantelpunten of *tipping points* in het klimaat. Wat bedoelt men precies met zo'n tipping point? In hoofdstuk 1 en 2 kun je hierover lezen.

Als je kijkt naar het klimaat in het verleden, dan zie je dat op sommige momenten het klimaat niet geleidelijk, maar juist abrupt veranderde. Sterker nog, het relatief constante klimaat van de laatste 10.000 jaar is eerder uitzondering dan regel. Het klimaat varieerde vóór die tijd sterk en af en toe ook abrupt. 34 miljoen jaar geleden bijvoorbeeld koelde het klimaat plotseling af en ontstond de ijskap op de Zuidpool, terwijl het daar toen eigenlijk veel te warm voor was. In de periode daarvoor groeiden er zelfs palmbomen op de Zuidpool! In hoofdstuk 3 lees je hoe deze abrupte veranderingen plaats konden vinden.

Het ontstaan van ijskappen is een wereldwijde verandering geweest, maar je ziet ook op kleinere schaal plotselinge veranderingen. Een voorbeeld hiervan is een verandering die 5000 jaar geleden plaatsvond in Noord-Afrika. Een landschap dat gekenmerkt werd door savanne en kleine meertjes waar nijlpaarden leefden, veranderde in de woestijn die wij nu kennen: de Sahara. Deze verandering wordt beschreven in hoofdstuk 4.

Plotselinge veranderingen vinden niet alleen in het klimaat plaats. Ook in andere systemen kunnen plotselinge veranderingen optreden: een bank gaat failliet, een persoon wordt depressief, of een koraalrif verdwijnt. Ook bij armoede kan een punt van plotselinge verandering optreden. Onder een bepaalde grens van bezittingen is het vrijwel onmogelijk om uit de armoede te komen. Zodra je echter iets boven die grens komt, kun je zelf een inkomen genereren en ontsnappen aan de 'armoedeval'. In 2006 kreeg professor Muhammed Yunus uit Bangladesh de Nobelprijs voor de Vrede omdat hij had bedacht arme mensen een klein bedrag, een zogenaamd microkrediet, te geven. Daarmee konden zij hun schulden aflossen of een eigen bedrijfje beginnen en zo uit de armoede ontsnappen. De afgelopen jaren heeft onze Koningin Maxima zich ook voor microkredieten ingezet. Niet alleen voor arme mensen in ontwikkelingslanden, maar ook voor microfinanciering in Nederland. In hoofdstuk 5 leer je waarom zo'n microkrediet kan helpen om aan armoede te ontsnappen.

In al deze voorbeelden verandert een systeem plotseling, zonder duidelijke oorzaak. Dit maakt het lastig te voorspellen hoe zo'n systeem zich zal

ontwikkelen. Je zit bijvoorbeeld in een kano en leunt voorover om beter in het water naar een vis te kunnen kijken. Je leunt verder en verder... totdat je plots beseft dat je de controle verliest en de kano omslaat. Vlak voor het punt waarop je omslaat, is een kleine rimpeling van het water al genoeg om jou en je kano uit balans te brengen en om te laten slaan. Het punt of moment waarop zo'n groot effect optreedt noemt men een '**tipping point**'. Na het overschrijden van dit punt verandert het systeem radicaal en komt het in een nieuwe, alternatieve, toestand.

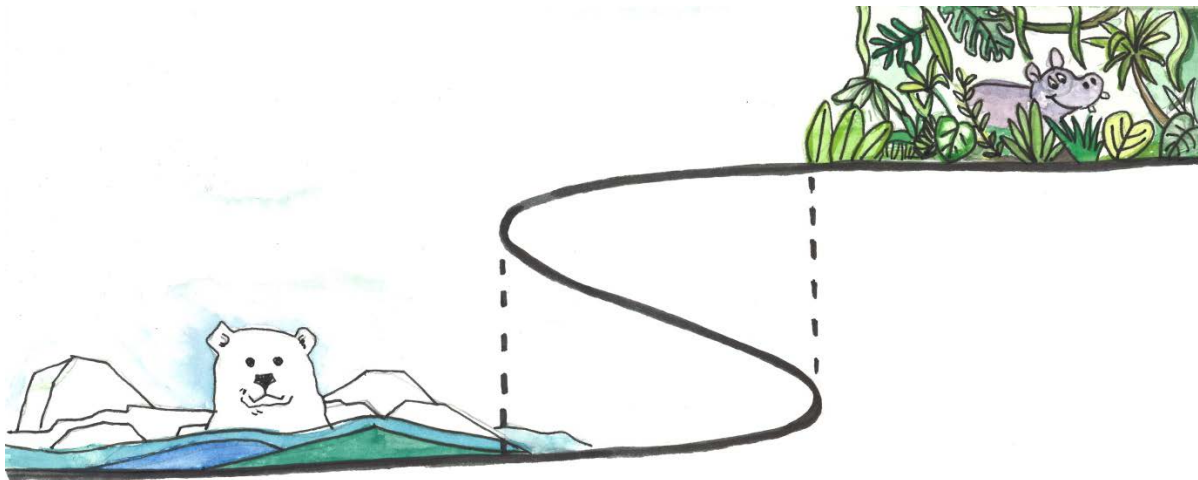
## Curriculum

<p>Aan het einde van deze module kan de leerling</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tipping points in natuurwetenschappelijke en economische contexten noemen, herkennen en uitleggen</li> <li>▪ De kenmerken van een systeem met een of meerdere tipping points grafisch herkennen en zelf grafisch weergeven</li> <li>▪ Een differentiaalvergelijking herkennen en interpreteren</li> <li>▪ Aan de hand van een differentiaalvergelijking en/of een grafiek een verwachting maken voor de ontwikkeling van het systeem vanuit een bepaalde beginsituatie en een gegeven verandering</li> </ul>	
Aandachtspunten	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Als in een systeem een tipping point wordt overschreden, verandert het systeem abrupt.</li> <li>▪ Nadat een tipping point is overschreden, kan een systeem niet meer zo maar naar de situatie van vlak voor het tipping point terugkeren.</li> <li>▪ Tipping points, terugkoppelingen en evenwichtspunten kunnen geïllustreerd worden met behulp van vergelijkingen en grafieken.</li> </ul>
Denkvaardigheid (uit de gereviseerde taxonomie van Bloom)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrippen onthouden</li> <li>▪ Grafieken en vergelijkingen begrijpen</li> <li>▪ Begrippen, grafieken en vergelijkingen toepassen</li> <li>▪ Systeem analyseren op tipping point-kenmerken</li> <li>▪ Systeem evalueren op tipping point-kenmerken</li> <li>▪ Een filmpje creëren met uitleg over tipping points, de relevantie ervan en een zelf bedacht voorbeeld</li> </ul>
Begrippen	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ tipping point</li> <li>▪ (in)stabiel evenwichtspunt</li> <li>▪ hysteresis</li> <li>▪ terugkoppeling</li> <li>▪ differentiaalvergelijking</li> <li>▪ vectorveld</li> <li>▪ energiebalans</li> <li>▪ moesson</li> <li>▪ armoedeval</li> </ul>



## Afsluitende opdracht I

Na het lezen van deze module en het maken van de opdrachten ga je aan de slag met de eindopdracht. Je gaat een filmpje maken waarin je een systeem met tipping points beschrijft, en waarin je uitlegt waarom het begrijpen van systemen met tipping points zo belangrijk is voor onze aarde. Dit filmpje moet geschikt zijn voor onderbouwleerlingen van jouw school. Vraag bij het maken van je eindopdracht aan je docent of het systeem in je filmpje een voorbeeld uit deze module mag zijn, of dat je zelf op zoek moet naar een ander systeem waarin je tipping points verwacht. Presenteer je filmpje voor klasgenoten, je docent, je ouders, en wellicht voor een aantal onderbouwleerlingen van je school.



## De opbouw van de module

Les	Activiteit	Uitwerking
1,2	Introductie van de eindopdracht	Inleiding zelfstandig lezen, startopdracht in tweetallen maken, lezen en maken Hoofdstuk 1.
2,3	Verwerking theoretische basis	Lezen en maken Hoofdstuk 2. Eventueel met behulp van uitleg 'differentiaalvergelijkingen en vectorvelden' door de docent ► vectorveld met behulp van een applet tekenen
Go / no go (opdracht 6 moet goed gekeurd worden door de docent)		
4,5	Verwerking theoretische basis	Lezen en maken Hoofdstuk 3 (vraag je docent of je opdracht 13 ook moet maken). Eventueel met behulp van uitleg 'inkomende zonnestraling op aarde' door de docent ► veranderingen aanbrengen in een systeem met tipping points, met behulp van een applet
Go - no go (Praktische opdracht 10 moet goed gekeurd worden door de docent)		
5,6	Verwerking theoretische basis	Lezen en maken Hoofdstuk 4. Eventueel met behulp van uitleg 'moesson' door de docent ► veranderingen aanbrengen in een systeem met tipping points, met behulp van een applet
Go - no go (opdracht 17 moet goed gekeurd worden door de docent)		
7,8	Verwerking theoretische basis	Lezen en maken Hoofdstuk 5. Eventueel met behulp van uitleg 'armoedeval' door de docent ► veranderingen aanbrengen in een systeem met tipping points, met behulp van een applet
8,9,10	Eindopdracht	Inhoud verzamelen voor een kort filmpje, script/scenario schrijven en het filmpje opnemen ► filmpje opnemen over tipping points; uitleg, het belang van deze kennis, en een eigen voorbeeld van een systeem met een tipping point
Presentatie van de eindopdracht		

## Startopdracht

Een paar jaar geleden waren de blauwe Adidas slippers met de bekende strepen de grootste gruwel op het modegebied. Wilde je het echt goed doen dan deed je er ook nog witte sportsokken bij aan; dan wist je zeker dat niemand met je gezien wilde worden. De enige plekken waar je op deze slippers kon komen waren de camping of de kleedkamer na het sporten. Tot een paar jaar geleden. Het startte met een klein groepje mensen dat de badslippers omarmde. Nadat een bepaald aantal mensen met de slippers gezien werd, verspreidde de trend zich als een lopend vuurtje. Tegenwoordig kun je prima gezien worden in de badslippers, met sokken en al. Andere modetrends die een soortgelijk pad volgden waren onder andere de Birckenstock en de tuinbroek.



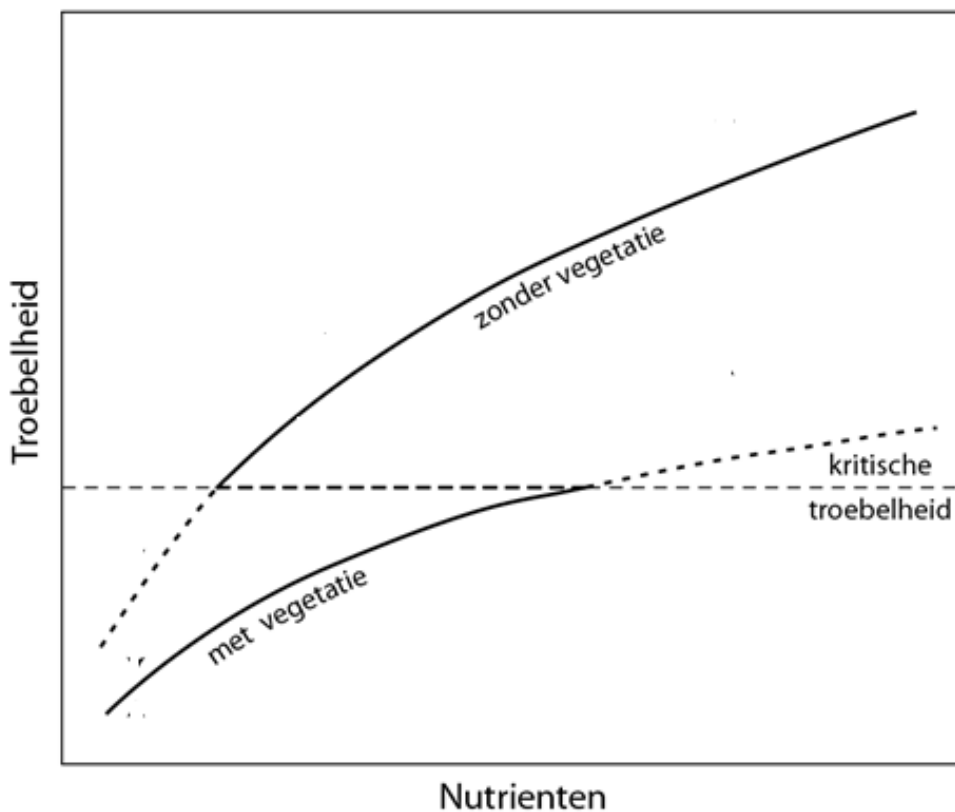
Een ander voorbeeld van een systeem dat omslaat is te zien in een bekend filmpje van een eenzame danser (zoek op 'leadership from a dancing guy').

Bedenk nu zelf nog drie systemen waarvan jij denkt dat een kleine verandering een groot gevolg kan hebben. Schrijf niet alleen dit systeem op, maar ook wat die verandering is en hoe het systeem dan verandert.

## Hoofdstuk 1: Tipping points in je vijver

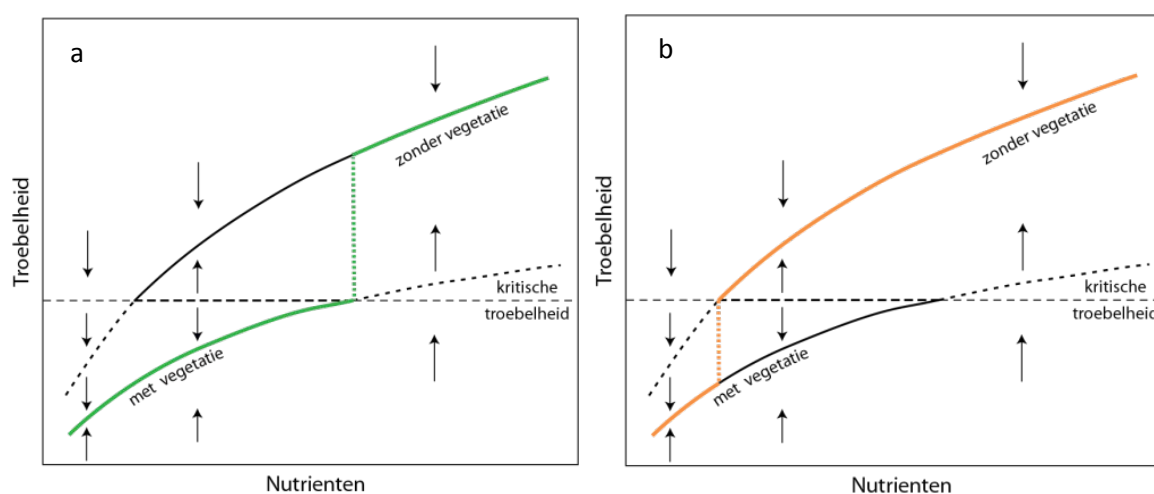
Om beter te begrijpen hoe tipping points en alternatieve evenwichten werken, nemen we een vijver als voorbeeld. Misschien heb je thuis wel een vijver. Is deze helder? Of juist troebel en groen door de algen? De troebelheid van het water heeft te maken met de hoeveelheid in het water opgeloste nutriënten (voedingsstoffen), zoals stikstof en fosfor. In een heldere vijver zijn weinig voedingsstoffen opgelost en groeien veel soorten waterplanten. De aanwezigheid van waterplanten helpt om het water helderder te maken, onder andere doordat planten slib vasthouden.

In Figuur 1.1 geeft de onderste kromme lijn aan, hoe de troebelheid van water afhangt van de hoeveelheid voedingsstoffen als er waterplanten zijn. De bovenste kromme geeft weer hoe deze relatie is als waterplanten ontbreken, oftewel de situatie zonder vegetatie. Zoals je kunt zien in de grafiek heb je bij dezelfde hoeveelheid voedingsstoffen een grotere troebelheid wanneer er geen waterplanten aanwezig zijn. Wat je ook kunt zien is dat wanneer het water troebeler wordt dan de kritische troebelheid (aangegeven met de horizontale stippellijn), de waterplanten afsterven. Dit komt doordat de waterplanten dan niet voldoende licht krijgen om energie te produceren. De belangrijkste oorzaak van het troebel worden van het water is de groei van algen. Als de hoeveelheid voedingsstoffen toeneemt, zal de algengroei toenemen met als gevolg dat het water troebeler wordt.



*Figuur 1.1 Het verband tussen troebelheid en voedingsstoffen mét (onder) en zonder (boven) planten. De horizontale stippellijn geeft de kritische troebelheid weer: de waarde waarbij de waterplanten afsterven omdat er niet voldoende licht door het water komt.*

Op het moment dat de kritische waarde wordt bereikt gaan alle planten dood. Het systeem verspringt dan naar de toestand met extreme algengroei, zonder planten, zoals te zien is in Figuur 1.2a. Op het moment dat je het aantal voedingsstoffen dat in het water terecht komt vermindert, springt de vijver niet direct terug naar de toestand met planten. Zoals je in Figuur 1.2b kunt zien, moet je de hoeveelheid voedingsstoffen heel erg verlagen, wil je weer bij de kritische troebelheid terecht komen. Uit onderzoek is namelijk gebleken dat waterplanten een belangrijke rol vervullen bij het helder maken van de vijver. Als die niet aanwezig zijn, zal het water dus troebeler zijn. Dit is te zien in de grafiek omdat de lijn zonder planten hoger ligt dan de lijn die de situatie met planten aangeeft. Dit betekent ook dat wanneer je begint met een troebele vijver zonder waterplanten, de hoeveelheid voedingsstoffen heel ver af moet nemen om weer onder de kritische troebelheid te komen (zie de gele lijn in Figuur 1.2).



*Figuur 1.2 De overgang van een vijver met planten naar een vijver zonder planten (a) en weer terug (b). De groene lijn geeft aan hoe het verloop is als je begint in een vijver met planten en langzaam het aantal voedingsstoffen in het water toe laat nemen. De gele lijn laat zien wat er gebeurt als je begint met een troebele vijver en de concentratie voedingsstoffen langzaam af laat nemen. De pijltjes in de plaatjes geven aan naar welk evenwicht het systeem toe beweegt, afhankelijk van met welke troebelheid en hoeveelheid voedingsstoffen je begint.*

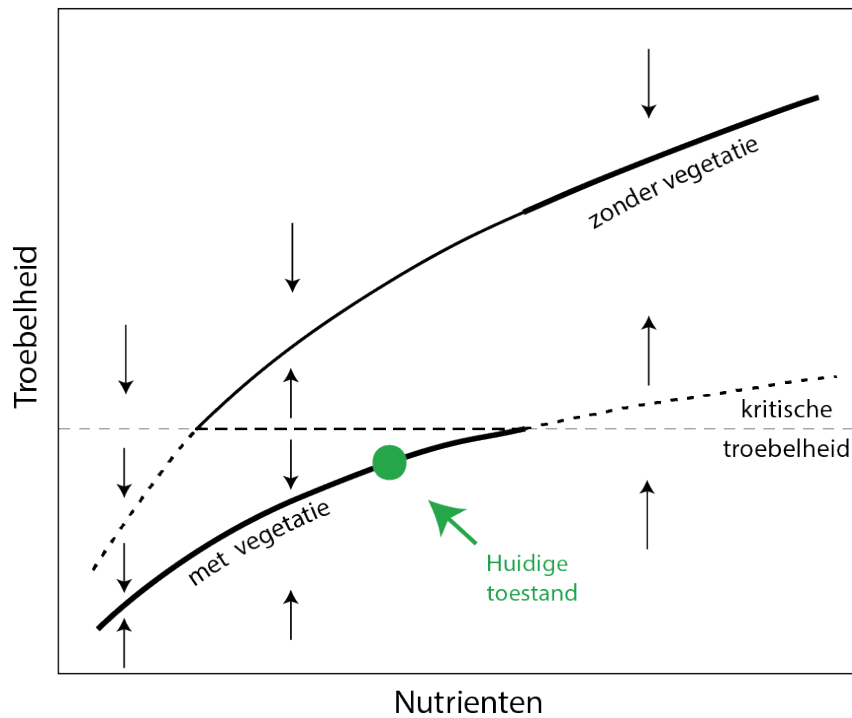
### **Opdracht 1.**

*Stel, je hebt een mooie heldere vijver met waterplanten en hier en daar een kikker. Je zou graag ook wat vissen in je vijver willen. Je twijfelt tussen goudvissen en een karper, maar uiteindelijk kies je voor de karper. Een karper eet voornamelijk kleine insecten en larven die zich verstoppen in het slib op de bodem.*

- Wat zal er gebeuren met je vijver nu er een karper in zit?*
- Geef in Figuur 1.3 aan wat er gebeurt met de toestand van je vijver.*

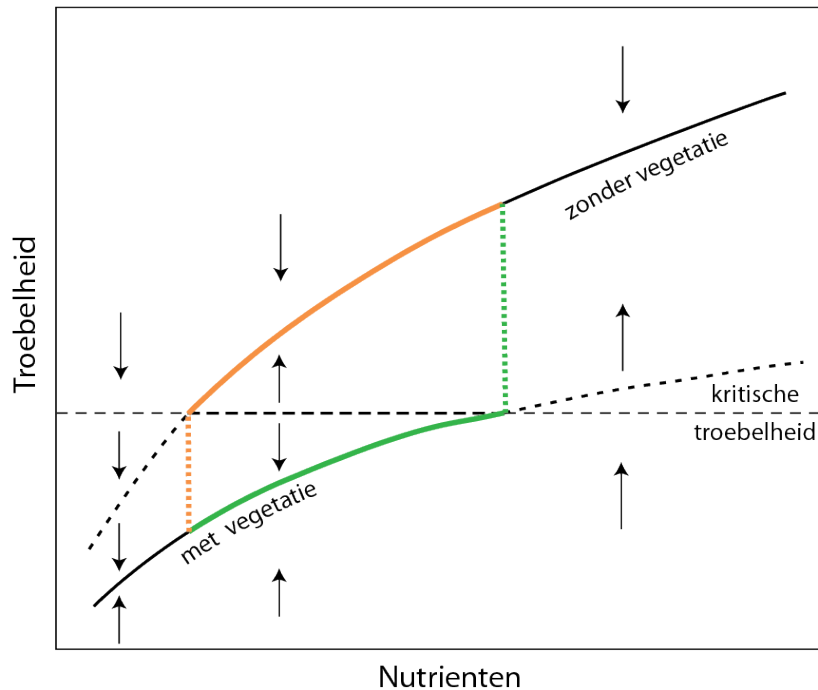
*Na een paar dagen besluit je om de karper er weer uit te halen.*

- Wat voor invloed heeft dat op je vijver? Beschrijf de twee mogelijke veranderingen aan de hand van Figuur 1.3.*



*Figuur 1.3 Het verband tussen troebelheid en voedingsstoffen in je vijver, met daarin de huidige toestand, zonder karper, aangegeven.*

Zoals je in Figuur 1.2b kunt zien blijft het troebele, vegetatieloze systeem lang in die toestand, ook al neemt de hoeveelheid nutriënten af. Langer dan je zou verwachten, omdat het water pas weer helder wordt bij héle lage concentraties nutriënten. In Figuur 1.4 zijn de plaatjes 1.2a en 1.2b over elkaar heen gelegd. Daardoor kun je goed zien dat er een gebied in de grafiek is waar bij een bepaalde hoeveelheid voedingsstoffen twee mogelijke evenwichten zijn: met planten en zonder planten. Of je een vijver hebt met of zonder planten hangt in dit gebied niet alleen af van de hoeveelheid voedingsstoffen, maar ook van de beginsituatie waarin de hoeveelheid voedingsstoffen verandert. Dat wil zeggen, als je beginsituatie een troebele vijver is, dan heb je bij dezelfde hoeveelheid voedingsstoffen een ander evenwicht dan wanneer je beginsituatie een heldere vijver is. Het verschijnsel dat er meerdere evenwichtstoestanden mogelijk zijn bij dezelfde omstandigheden wordt ook wel **hysterese** genoemd. In welk evenwicht het systeem zich bevindt hangt af van de beginsituatie.



*Figuur 1.4 Voor een bepaalde hoeveelheid voedingsstoffen zijn er twee evenwichten mogelijk: een vijver met planten (groene lijn) en een vijver zonder planten (oranje lijn). In welk evenwicht je terecht komt is afhankelijk van je beginsituatie. Dit verschijnsel wordt hysteresis genoemd.*

### **Opdracht 2.**

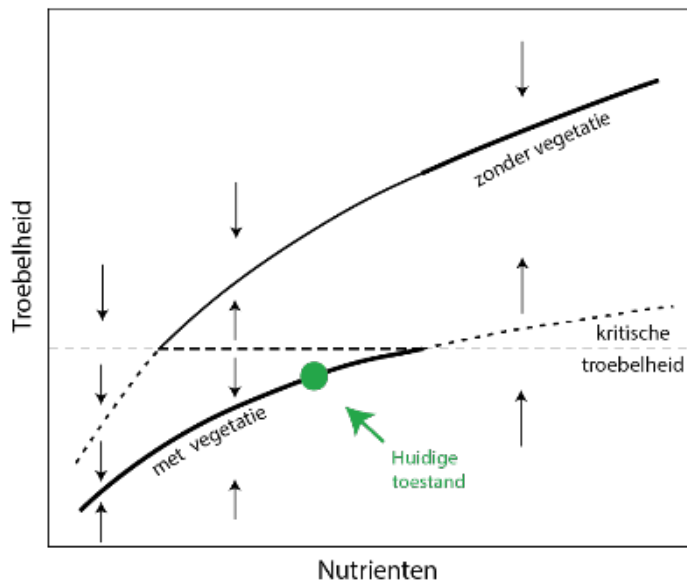
*Een vriend vertelde je bij het zien van je troebele vijver dat goudvissen een stuk geschikter zijn voor een vijver dan karpers. Je hebt toen meteen goudvissen gekocht, maar niet te veel, want ook goudvissen wroeten graag in de bodem. Je vijver is intussen eindelijk weer helder en er groeien ook mooie waterplanten in.*

*Het is lekker weer, en omdat je het leuk vindt om naar je vissen te kijken, besluit je om ze iedere dag na het ontbijt even te bezoeken en te voeren. Je wilt natuurlijk niet dat je mooie vissen verhongeren.*

- Teken in Figuur 1.5 wat dit voeren doet met je vijver.*
- Wat voor gevolgen heeft dit voor je vijver?*

*Je vissen verhongeren niet, maar je planten gaan na een tijdje wél allemaal dood.*

- Wat moet je doen om de vijver weer te krijgen zoals die was voordat je ging voeren?*



*Figuur 1.5 Het verband tussen troebelheid en voedingsstoffen in je vijver, met daarin de huidige toestand, met goudvissen en waterplanten, aangegeven.*

Waterplanten hebben een positief effect op de helderheid (het tegenovergestelde van troebelheid) van het water, bijvoorbeeld doordat de plantenwortels de bodemdeeltjes vasthouden. Helder water heeft vervolgens weer een positief effect op de planten doordat er genoeg licht op de bladeren kan vallen. Zo kan het vijverwater in korte tijd een stuk helderder worden, en verschuift het evenwicht van troebel naar een heldere vijver. Het effect van waterplanten op de helderheid is een voorbeeld van een **positieve terugkoppeling**.

Op het moment dat je voedingsstoffen toevoegt aan een heldere vijver zal er iets anders gebeuren. Door algengroei krijgen op een gegeven moment de waterplanten niet voldoende licht meer en zullen afsterven. De positieve invloed van de planten op de helderheid van het water valt hierdoor weg. Als één plant wegvalt, of één soort, zal het water dus troebeler worden, waardoor het ook voor de andere planten lastiger wordt om voldoende licht te krijgen. Het gevolg is dat de waterplanten in een neerwaartse spiraal komen. Zo'n situatie, waarbij een verandering zichzelf versterkt, is de onderliggende oorzaak van het verschuiven van je systeem naar een alternatief evenwicht. Het punt waarop een positieve terugkoppeling het systeem 'overneemt', is het **tipping point**.

### **Opdracht 3.**

*Geef in Figuur 1.5 de tipping points duidelijk aan.*

We zullen in de komende hoofdstukken werken met andere voorbeelden van systemen met een positieve terugkoppeling. Zo krijgen we een beter beeld van alternatieve evenwichten en tipping points. We beginnen in hoofdstuk 2 met de wiskunde die nodig is om deze theorie te begrijpen. Veel van deze wiskunde ken je al. We plaatsen het hier in een praktisch voorbeeld.