

*Uitbeelddidactiek in de biologieles*

*deel C.*

## UITBEELDRACTICA

Caspar Geraedts<sup>1</sup>, Silke Bossers<sup>2</sup>, Gee van Duin<sup>2</sup>,  
Ruthy Fraterman<sup>3</sup>, Romke Koch<sup>4</sup>, Michiel Kroon<sup>5</sup>,  
Ingeborg van der Neut<sup>6</sup>, Tim Nieuwenhuis<sup>7</sup>  
& Eveline Snelder<sup>8</sup>

<sup>1</sup> VU Lerarenacademie, Vrije Universiteit Amsterdam

<sup>2</sup> Cartesius Lyceum, Amsterdam

<sup>3</sup> Vossius Gymnasium, Amsterdam

<sup>4</sup> Het Amsterdams Lyceum, Amsterdam

<sup>5</sup> Montessori Lyceum, Amsterdam

<sup>6</sup> Ludger College, Doetinchem

<sup>7</sup> Gerrit van der Veen College, Amsterdam

<sup>8</sup> IJburg College, Amsterdam

maart 2021 | projectnummer 40.5.18500.015

---





## INHOUD

Voorwoord	5
-----------	---

## UITBEELDRACTICA

### SUBCELLULAIR NIVEAU

<i>moleculaire genetica</i>	1. Polymerisatie-polonaise	7
	2. Replicatie met papier en stempels	9
	3. Eiwitsynthese met papier en stempels	15
<i>eiwitvouwing en -functie</i>	4. Potloodtransferase	21
	5. Eiwitvouwing met chenilledraad	23
	6. Eiwitvouwing met lijven	27
<i>epigenetica, biotechnologie</i>	7. Epigenetica met papier en paperclips	31
	8. CRISPR/Cas met papier en schaar	35
	9. RNA-interferentie met papier en schaar	41
<i>stofwisseling</i>	10. Lichtreactie met lampjes en Duplo®	45
	11. Donkerreactie met Lego®	51
	12. Dissimilatie glucose met Lego®	55
	13. De elektronachtbaan	59
<i>Mendeliaanse genetica</i>	14. Chromosomen in touw	61
	15. Fok je ideale kip	65
	16. Gekoppelde overerving met Lego®	69

### CELLULAIR NIVEAU

<i>celdeling</i>	17. Mitose en meiose met touwtjes	71
<i>membraantransport</i>	18. Diffusie met hoedjes	75
	19. Osmo-gooien	77
	20. Membranen met zeep	81
	21. Exo- en endocytose met lijven	83

### ORGAANNIVEAU

<i>transport</i>	22. Bloedsomloop met wol	85
	23. Loop de bloedsomloop	89
	24. Vorming weefselvloeistof met spons en doek	95
	25. Tegenstroomprincipe met limonade	97
<i>spijsvertering</i>	26. Peristaltiek met panty	101
	27. Spijsvertering met Duplo®	103
<i>gaswisseling</i>	28. Zuurstofverzadiging met ijzeren ringetjes	109

<i>uitscheiding</i>	29. Nefron om te snoepen	115
<i>hormonale regulatie</i>	30. Regeling bloedsuikerspiegel met suiker	119
	31. Het menstruatiekoor	125
<i>neurale regulatie</i>	32. Impulsgeleiding met domino	129
	33. Impulsgeleiding met lijven	131
	34. Impulsoverdracht met lijven	135
	35. Actiepotentiaal met hoedjes en lijven	137
	36. Actiepotentiaal met kralen	141
<i>spierstelsel</i>	37. Spiercontractie met lijven	145
<i>afweer</i>	38. Afweer met bitjes en schroeven	147
	39. Afweer als fotostrip	153
<i>planten</i>	40. Turgor en plasmolyse met ballon in net	157
	41. Cambium-cocooning	159
	42. Endodermisdrama	161
 <b>POPULATIENIVEAU</b>		
<i>natuurlijke selectie</i>	43. Natuurlijke selectie met kralen	165
<i>en populatiegenetica</i>	44. Waar is mijn nootje?	169
	45. Hardy-Weinberg met Lego®	173
	46. Populatiegenetica met Lego®	177
	47. Gene drive met Lego®	179
<i>(macro)evolutie</i>	48. Tijdlijn evolutie met roepen	183
	49. Paleontologie met zand en ijzer	187
 <b>ECOSYSTEEMNIVEAU</b>		
<i>piramides</i>	50. Energiestroom met snoepjes	189
 <b>NO SCRIPT PRACTICA</b>		
<i>divers</i>	51. Spier- en circulatiedrama's	193



# VOORWOORD

Beste lezer,

Voor u ligt deel C van het NRO-rapport *Uitbeelddidactiek in de biologieles*. In dit deel worden geen onderzoeksresultaten besproken, maar worden de opbrengsten gedeeld van het ontwikkeltraject dat wij als docentontwikkelteam (DOT) de afgelopen jaren hebben doorlopen. Met gepaste trots presenteren wij hier een verzameling van 51 uitbeeldpractica, bedoeld voor lessen biologie in het voortgezet onderwijs.

Voor de meeste biologiedocenten en andere betrokkenen in het veld, zullen deze concrete uitbeeldpractica het meest voor de hand liggende startpunt vormen bij het bestuderen van het rapport. Docenten die ervaring hebben met uitbeeldpractica, zullen al bladerend snel een indruk krijgen van hoe specifieke practica er concreet uit zullen zien in een les, en zo hun repertoire stap voor stap kunnen uitbreiden. Beginnende docenten, en docenten voor wie uitbeelddidactiek nog onbekend terrein is, raden we aan om gewoon ergens te beginnen en een practicum naar keuze uit te proberen; gaandeweg zul je meer gevoel krijgen voor de mogelijkheden die het uitbeelden biedt voor het leren van (complexe) biologische processen. Voor alle docenten is het de moeite waard om (op termijn) ook deel B en wellicht deel A van dit rapport te lezen, bijvoorbeeld om een beter beeld te krijgen van de verschillende didactische strategieën die je tijdens het uitvoeren van uitbeeldpractica in kunt zetten, of om handvatten te krijgen voor het zelf ontwerpen van practica.

De uitbeeldpractica in dit rapport zijn in een vast format uitgewerkt, en op zo'n manier opgeschreven dat je er zonder al teveel voorbereiding in de klas mee aan de slag kan. Natuurlijk staan de instructies niet in steen gebeiteld; de practica kunnen naar believen worden aangepast aan de eigen doelgroep, leerdoelen, en didactische voorkeuren. Er wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van huis-, tuin- en keukenmaterialen. Wel zijn bij een flink aantal practica Lego®- of Duplo®-stenen nodig. Omdat deze bouwstenen zich zo goed lenen voor het uitbeelden van allerlei biologische processen raden wij eigenlijk alle biologiesecties aan om sowieso een set basisstenen aan te schaffen (je kunt online zelfs specifieke stenen bestellen, nieuw of tweedehands). Tenslotte zijn er enkele practica waarbij gebruik gemaakt wordt van de stempelset DNA.

Sommige uitbeeldpractica in deze verzameling zullen u misschien bekend voorkomen, of heeft u misschien zelfs al eens uitgevoerd met uw leerlingen. We hebben er namelijk voor gekozen om ook practica op te nemen die al wat langer circuleren in het veld, en eerder bijvoorbeeld op NIBI-conferenties werden gepresenteerd. Daarnaast zijn veel practica tijdens het ontwikkeltraject tot stand gekomen of verder uitgewerkt; deze zullen dus nieuw voor u zijn. Tenslotte moge het duidelijk zijn dat het hier niet gaat om een uitputtende verzameling. Er bestaan nog veel meer werkvormen waarbij biologische processen met behulp van bewegingen en/of materiaal worden uitgebeeld. Het AIDS-bekerspel is natuurlijk een klassieker, en ook de (hilarische) activiteit waarbij het samentrekken van de baarmoederwand bij een

bevalling wordt gedemonstreerd met een pingpongballetje in een ballon is in feite een uitbeeldpracticum. Ook zijn er alweer verschillende uitbeeldpractica in ontwikkeling, onder andere over genexpressie, DNA-microarrays, de verspreiding van epidemieën, en de stikstofkringloop. Bovendien zijn ook biologiedocenten buiten het DOT, en zelfs docenten-in-opleiding, bij het ontwerpen van nieuwe practica betrokken. Het streven is dan ook dat in de toekomst een uitgebreide versie van deze verzameling zal verschijnen.

Tenslotte wil ik, Caspar Geraedts, hier van de gelegenheid gebruik maken om alle docenten in het DOT heel erg te bedanken. Ik prijs me gelukkig dat ik met deze club van jonge honden en oude rotten mocht samenwerken. We hebben vele middagen en avonden met elkaar gespard, over de keuze voor bepaalde analogieën en metaforen, over welke details we wél en welke we beter niet in een practicum mee konden nemen, en over hoe we onze leerlingen het beste aan het denken konden zetten. Het DOT bleek daarvoor over de ideale mix van kwaliteiten te beschikken: creativiteit, speelsheid, out-of-the-box denken, maar zeker ook inhoudelijke expertise en didactisch fingerspitzengefühl, het was er allemaal. Dank! Ik hoop dat andere docenten, en hun leerlingen, net zoveel plezier zullen beleven aan het uitvoeren van deze practica, als wij hebben gehad bij het ontwikkelen ervan.

# 1. POLYMERISATIE-POLONAISE

## *DNA-structuur met lijven*

Leerlingen hebben vaak moeite de oriëntatie van de nucleotiden binnen een DNA-molecuul te begrijpen, en dan met name de asymmetrie van de 3'- en 5'-uiteindes. Door ze zelf met hun lijf een nucleotide te laten uitbeelden, en ze vervolgens als klas een polymeer (een dubbelstrengs DNA-molecuul) te laten vormen, ervaren ze hoe de structuur van DNA tot stand komt. Dit korte uitbeeldpracticum is bedacht door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem).

---

duur	10 minuten, incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• uitleggen dat DNA is opgebouwd uit vier verschillende nucleotiden, die elk een 3'- en een 5'-uiteinde hebben;</li> <li>• uitleggen dat deze nucleotiden vaste paren vormen die door middel van waterstofbruggen aan elkaar zijn gebonden;</li> <li>• aangeven dat de twee strengen van een dubbelstrengs DNA-molecuul tegengesteld georiënteerd zijn.</li> </ul>
nodig	<p>Elke leerling stelt een nucleotide voor. Blokjes Lego® geven aan om welke nucleotide het gaat, en hoeveel waterstofbruggen deze kan vormen. Je hebt voor een klas van 32 nodig:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 rode Lego®-blokjes (2x2) = A</li> <li>• 8 zwarte Lego®-blokjes (2x2) = T</li> <li>• 8 groene Lego®-blokjes (2x3) = C</li> <li>• 8 blauwe Lego®-blokjes (2x3) = G</li> </ul> <p>Andere kleurencombinaties zijn natuurlijk ook mogelijk. Bovendien kun je in plaats van Lego® ook Postlts gebruiken (zie verderop bij aanpassen/uitbreiden).</p>

### voorbereiding

Teken of schrijf op het bord welke delen van het lichaam welke onderdelen van een nucleotide voorstellen:

- de linkerhand, recht vooruit gestoken (in de kijkrichting) is de fosfaatgroep, dus het 5'-uiteinde;
- het lijf zelf is de suikergroep met de linkerschouder als 3'-uiteinde;
- de rechterhand, zijwaarts uitgestoken is de stikstofbase.

Noteer ook op het bord welke kleur Lego® welke base voorstelt.

### uitvoering

1. Geef elke leerling een Lego®-blokje. Zorg, in ieder geval de eerste keer, voor gelijke aantallen A en T, en C en G.
2. Wijs de leerlingen op de instructies op het bord, en doe kort voor hoe ze met hun lichaam en het Lego®-blokje een nucleotide kunnen uitbeelden.
3. Vertel de klas dat er nu polymerisatie plaatsvindt: door op de juiste manier aan elkaar te binden vormen de nucleotiden/leerlingen een dubbelstrengs DNA-molecuul.
4. Laat de leerlingen eerst een beetje aanrommelen, grijp niet te snel in. Meestal ontstaat vanzelf het begrip dat je een stikstofbase niet opeens in je andere hand mag nemen, en komen de leerlingen er zo achter dat de leerlingen in de tegenoverliggende streng de andere kant op moeten kijken.

### (na)denkwerk

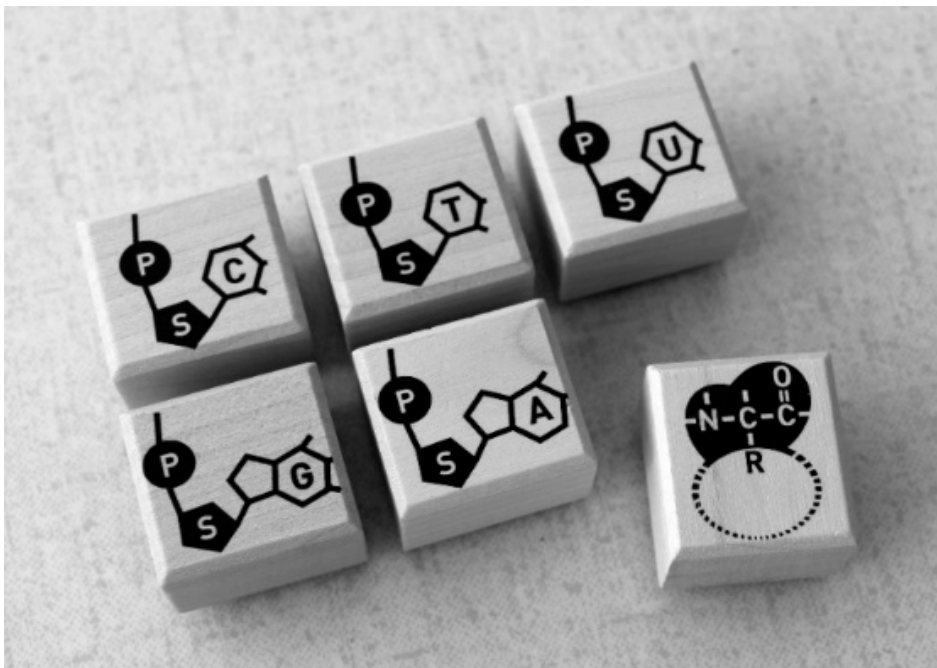
- Wijs de leerlingen op de vaste basenparen (gerelateerd aan het aantal waterstofbruggen), en de gelijke percentages A en T, en C en G in een dubbelstrengs DNA-molecuul.
- Wijs ook op het feit dat de oriëntatie van de tegenoverliggende streng altijd tegengesteld is.
- Bespreek met de leerlingen dat in deze simulatie een nucleotide eigenlijk alleen een (covalente) binding met een andere nucleotide kan vormen door met zijn/haar 5'-uiteinde aan het 3'-uiteinde van de ander te haken (je linkerhand kan wel op de schouder van een ander gelegd worden, maar je schuift je eigen schouder niet onder de hand van een ander): de streng 'groeit' dus van 5' naar 3' net als bij DNA-replicatie en transcriptie!

### aanpassen/uitbreiden

- Je zou uitgaande van hetzelfde model-met-leerlingen ook replicatie en/of translatie kunnen uitbeelden. Met twee klassen tegelijkertijd kun je zelfs aandacht besteden aan de vorming van Okazaki-fragmenten.
- Je kunt eventueel ook PostIts gebruiken (in plaats van Lego®). Schrijf op elke PostIt met een stift de letters A, C, T of G. Deze PostIts mogen na het uitdelen op de borst (of het voorhoofd) geplakt worden. Laat de leerlingen twee (A en T) of drie (C en G) vingers van hun rechterhand uitsteken voor de waterstofbruggen.

## 2. REPLICATIE MET PAPIER EN STEMPELS

In dit practicum beelden leerlingen met stempels en stroken papier DNA-replicatie uit. Over het algemeen vinden leerlingen het principe van complementariteit en basenparing niet zo ingewikkeld, al moet er soms even gestoeid worden met de juiste oriëntatie van de nucleotiden. Lastiger wordt het wanneer details als de syntheserichting (van 5' naar 3'), Okazaki-fragmenten, en de functie van helicase, RNA-polymerase en ligase ook uitgebeeld moeten worden. Dit practicum helpt leerlingen hier grip op te krijgen (al kunnen die details ook prima achterwege gelaten worden), maar is ook geschikt als kennischeck. Bij dit uitbeeldpracticum wordt gebruik gemaakt van de *stempelset DNA*, een set van zes stempels waarmee nucleotiden en aminozuren gestempeld kunnen worden. Deze stempelset en bijbehorende practica werden ontwikkeld door Rogier Arents (Studio Rogier Arents, Rotterdam), Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam) en John Huizinga (Hogeschool Utrecht, Utrecht)<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> Voor meer informatie en bestellingen kijk op <https://www.betapartners.nl/stempelset-dna/> of mail [c.l.geraedts@vu.nl](mailto:c.l.geraedts@vu.nl).

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• benoemen uit welke bouwstenen een nucleotide is opgebouwd, en beschrijven hoe deze nucleotiden samen een DNA-molecuul vormen, en daarbij de volgende begrippen gebruiken: basenparen, waterstofbruggen, 5'- en 3'-uiteinde;</li><li>• beschrijven hoe het proces DNA-replicatie verloopt, en daarbij de volgende begrippen gebruiken: helicase, DNA-polymerase, complementair, vrije nucleotide, en ligase.</li></ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"><li>• een print van de sequentie replicatie (zie bijlage)</li><li>• de stempelset DNA, inclusief inktkussen (zes sets of meer per klas is fijn; dan hoeven leerlingen niet zo lang te wachten)</li><li>• kassarol (4 cm breed is voldoende), of stroken papier (twee per leerling)</li><li>• schaar en plakband (één per tweetal)</li></ul>

### voorbereiding

1. Print en knip de sequentie replicatie (zie bijlage) of stempel zelf een fragment DNA. Om later de twee oorspronkelijke ouderstrengen te kunnen traceren is het slim om hiervoor gekleurd papier te gebruiken.
2. Zorg dat leerlingen Binas of ScienceData bij de hand hebben.

### uitvoering

#### *oriënteren: de bouw van DNA*

Om kennis over de bouw van DNA op te frissen en eventueel aan te vullen, én om leerlingen vertrouwd te maken met de stempelset, laat je ze eerst op een leeg A4-tje (of in hun schrift) een fragment dubbelstrengs DNA stempelen. De instructie voor de leerlingen voor deze oriënterende opdracht is als volgt:

1. Stempel een DNA-molecuul bestaande uit minimaal vijf basenparen.
2. Teken de waterstofbruggen tussen de ketens.
3. Benoem in je 'stempeltekening' de volgende onderdelen: stikstofbase, suiker, fosfaat, nucleotide en waterstofbrug.
4. Geef aan waar de 5'-eindes en de 3'-eindes zich bevinden.

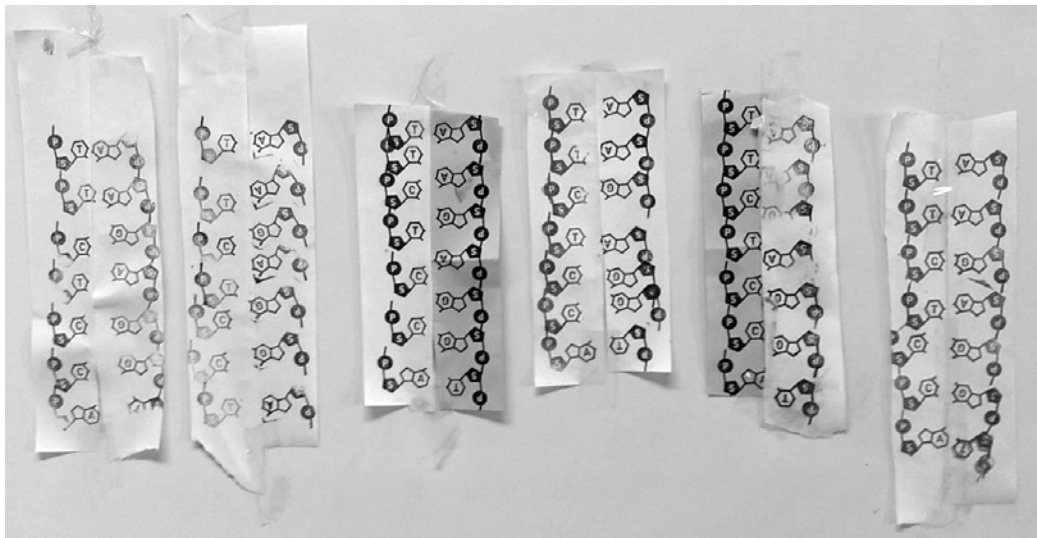
#### *DNA-replicatie uitbeelden*

Als de leerlingen hun eerste 'stempeltekening' (zie oriëntatieopdracht hierboven) hebben afgerond, is het tijd voor het eigenlijke practicum.

5. Vertel dat we met de hele klas het proces DNA-replicatie gaan uitbeelden.
6. Geef het geprinte DNA-fragment aan twee leerlingen in de klas. Die leerlingen zijn nu met zijn tweeën één cel. Die cel gaat zich (mitotisch) delen. Er moet dus DNA-replicatie plaatsvinden. In welke fase van de celcyclus gebeurt dat?
7. Laat één van de leerlingen de twee nucleotidenketens van het DNA-fragment los van elkaar knippen. Welke bindingen worden nu verbroken? Welk enzym doet dat?
8. Laat beide leerlingen nu elk langs één van beide ketens een nieuwe, complementaire keten stempelen op een lege strook papier. Welk enzym doet dat?
9. Laat ze de stroken weer aan elkaar vastplakken met plakband. Als het goed is hebben ze nu allebei een identiek DNA-fragment in handen. Vertel dat ze nu twee (dochter)cellen zijn geworden.
10. Beide cellen gaan zich weer delen: de leerlingen zoeken allebei een nieuwe partner en herhalen stap 7 t/m 9. Dit gaat zo door totdat alle leerlingen in de klas een cel zijn geworden met een eigen DNA-fragment.
11. Hang alle DNA-fragmenten naast elkaar. Zijn ze allemaal identiek? Hoe kan dat? Of hebben er mutaties plaatsgevonden (zie denkwerk)?

### (na)denkwerk

- Sommige leerlingen raken in de war bij de oriëntatieopdracht als ze merken dat de letters op de nucleotiden in de ene streng leesbaar zijn, maar in de andere streng juist ‘op z’n kop’ staan. Dat is een mooi aanknopingspunt om hen de oriëntatie van de nucleotiden in Binas of biologieboek nog eens te laten bekijken. Voor veel leerlingen een eye-opener, en goed om hier in de nabespreking nog eens op te wijzen.
- Vertel dat DNA-replicatie in menselijke cellen met een snelheid van 50 nucleotiden per seconde (!) plaatsvindt.
- Uit onze ervaring blijkt dat er regelmatig (punt)mutaties optreden omdat leerlingen ergens een verkeerde nucleotide stempelen. Het is de moeite waard om dat bij de nabespreking van de activiteit, als alle fragmenten naast elkaar hangen, op te merken (zie hieronder). Bij een volgende les over mutaties kan dan hierop teruggegrepen worden.



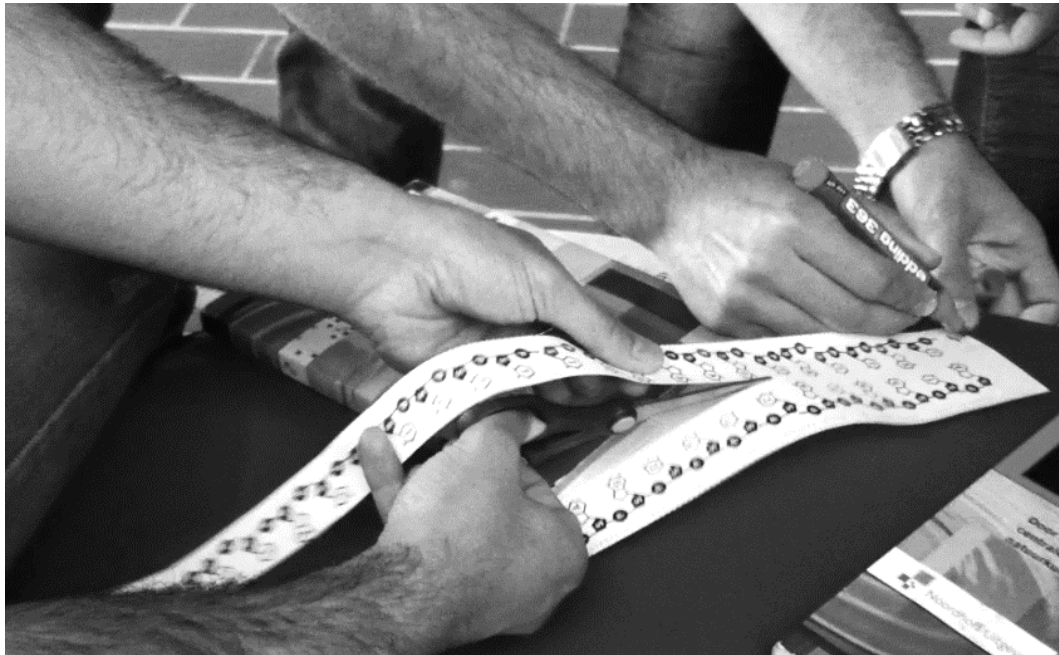


### aanpassen/uitbreiden

- Bij deze activiteit moeten sommige leerlingen wat langer wachten totdat ze aan de beurt zijn om te stempelen (in ieder geval volgens de opzet die hier beschreven wordt). Het ligt voor de hand om alle leerlingen, met uitzondering van het eerste tweetal, te laten beginnen met ander (zelfstandig) werk. Een ander optie is om alle tweetallen in de klas tegelijkertijd te laten repliceren, elk met een eigen geprint fragment DNA. Dan doe je dus maar één cyclus.
- Je kan er ook voor kiezen om leerlingen in groepjes met behulp van de stempelset een filmpje te laten maken van het replicatieproces.
- Leerlingen vinden het soms lastig om het verband te zien tussen DNA-replicatie (op molecuulniveau) en de structuur van een gespiraliseerd chromosoom in de pro- of metafase dat uit twee chromatiden bestaat (op ‘macromoleculair’ niveau). Om dat verband duidelijk te maken, en om een realistischer beeld te schetsen van het replicatieproces, maak je een strook DNA van een aantal meter (bijvoorbeeld een aantal prints achter elkaar, de sequentie maakt niet uit). Dan vraag je een aantal leerlingen om replicatie uit te beelden: nu met verschillende replicatievorken tegelijkertijd en (desgewenst) rekening houdend met de syntheserichting (en dus Okazaki-fragmenten). Als de replicatie is voltooid, en er dus twee dubbelstrengs DNA-moleculen zijn, laat je een leerling de strengen ergens halverwege bij elkaar houden: dat is dan het centromeer. Laat ook aanwijzen wat dan de chromatiden zijn. Benadruk dat de strengen in werkelijkheid nog veel langer zijn, en dat DNA gebonden is aan allerlei eiwitten.

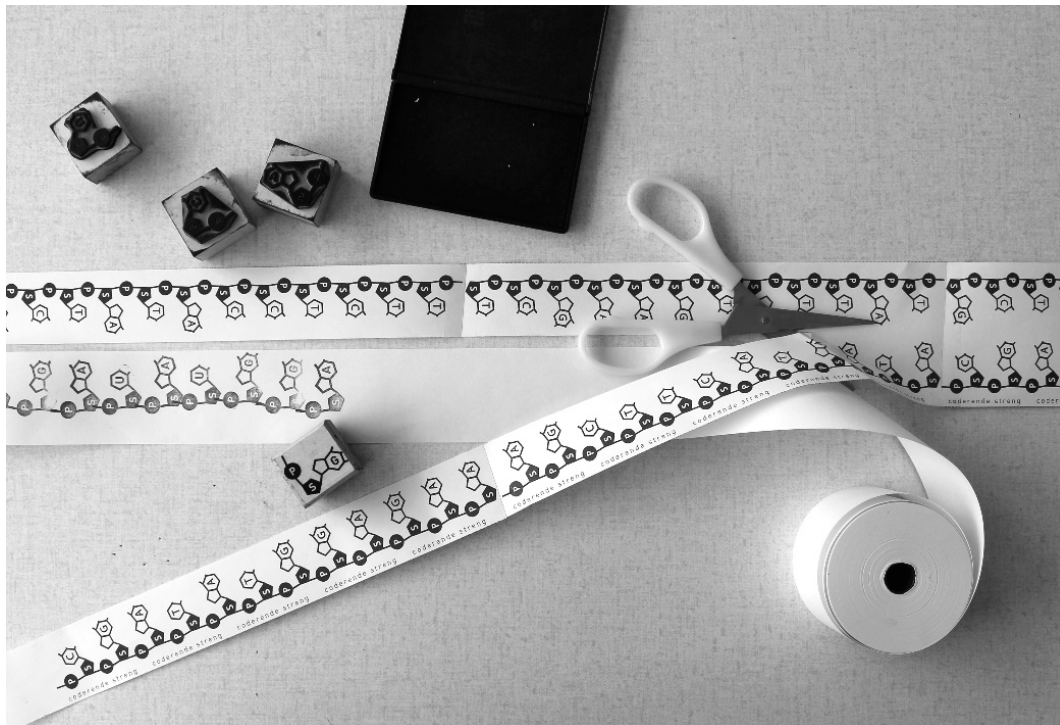
### bijlagen

- sequentie replicatie en methyltransferase



### 3. EIWITSYNTHESE MET PAPIER EN STEMPELS

Eiwitsynthese is voor leerlingen abstract en complex: er zijn allerlei verschillende moleculen bij betrokken, allerlei verschillende interacties tussen die moleculen, en ook nog allerlei verschillende plaatsen in cel. Daarnaast moet onderscheid gemaakt worden tussen de coderende streng en de template- of matrijsstreng, tussen DNA, mRNA en tRNA, en tussen codon en anti-codon. Dit uitbeeldpracticum laat de hele eiwitsynthese voor leerlingen tot leven komen. Vaak wordt dit practicum gedaan ná instructie over de eiwitsynthese, om te toetsen in hoeverre leerlingen het begrepen hebben. Maar je kan het practicum, met meer sturing en uitleg weliswaar, ook eerder doen. Bij dit uitbeeldpracticum wordt gebruik gemaakt van de stempelset DNA, een set van zes stempels waarmee nucleotiden en aminozuren gestempeld kunnen worden. Deze stempelset en bijbehorende practica werden ontwikkeld door Rogier Arents (Studio Rogier Arents, Rotterdam), Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam) en John Huizinga (Hogeschool Utrecht, Utrecht)<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> Voor meer informatie en bestellingen kijk op <https://www.betapartners.nl/stempelset-dna/> of mail [c.l.geraedts@vu.nl](mailto:c.l.geraedts@vu.nl).

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• aangeven waar in de cel de processen transcriptie, translatie en eiwitvouwing plaatsvinden, en daarbij de volgende begrippen gebruiken: celkern, cytoplasma, ribosoom, ER / Golgi-apparaat;</li><li>• beschrijven hoe de processen transcriptie en translatie verlopen, en daarbij de volgende begrippen gebruiken: template streng, coderende streng, transcriptiefactor, RNA-polymerase, mRNA, tRNA, codon, startcodon, stopcodon, anti-codon, aminozuur, de genetische code;</li><li>• uitgaande van een gegeven DNA-fragment de bijbehorende nucleotidenvolgorde van het mRNA-molecuul en de aminozuurvolgorde van het eiwit bepalen;</li><li>• uitleggen dat eiwitten pas in het ER en het Golgi-apparaat hun uiteindelijke driedimensionale vorm krijgen, doordat ze op een bepaalde manier worden gevouwen (onder invloed van enzymen).</li></ul>
nodig	<p>per groepje (van 5 leerlingen)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• een print van de <i>sequentie eiwitsynthese</i> (zie bijlage)</li><li>• een stuk of acht prints van de bijlage tRNA</li><li>• een print van de bijlage <i>aminozuren eigenschappen</i></li><li>• de stempelset DNA, inclusief inktkussen</li><li>• een stuk of 8 (kleine) PostIts</li><li>• de kaartjes met beschrijvingen van de vijf eiwitrollen: transcriptiefactor, RNA-polymerase, tRNA-synthetase, translatie-eiwitten, en vouweiwitten</li><li>• een stuk kassarol voor het mRNA-molecuul (4 cm breed is voldoende)</li><li>• een schaar en plakband</li></ul> <p>voor de hele klas (eventueel):</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• een print van de bijlagen <i>CELKERN</i>, <i>RIBOSOOM</i>, <i>ER</i> en <i>BLAASJE</i> om verschillende plekken in de cel (het lokaal) aan te geven</li></ul>

#### voorbereiding

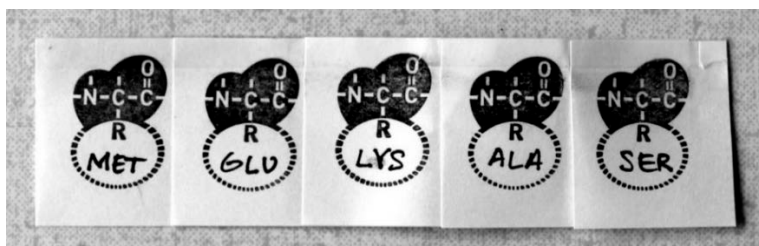
1. Print de bijlagen in de juiste aantallen (zie hierboven), knip de rolkaartjes uit (en selecteer de enzymen die je nodig hebt), en knip en plak de DNA-sequenties.
2. Verzamel alle materialen.
3. Bedenk hoe je het practicum wilt doen: per groepje één of twee vaste tafels waar alles gebeurt (overzichtelijker), of het lokaal ombouwen tot één grote cel, met daarin op verschillende plekken tafels die de celkern, een ribosoom, het ER en een membraanblaasje voorstellen. In het laatste geval kunnen de geprinte bijlagen met de namen van die celonderdelen op de desbetreffende plek opgehangen worden.
4. Zorg dat leerlingen Binas of ScienceData bij de hand hebben voor (o.a.) de genetische code.

### uitvoering

1. Vorm groepjes van vijf, en deel de 'eiwitrollen' en alle andere materialen uit (maar nog niet de DNA-sequentie).
2. Vertel de leerlingen dat ze zo meteen een DNA-fragment krijgen. In dat DNA-fragment zit een gen verborgen. Ze moeten met hun groepje het eiwit synthetiseren waar dit fragment voor codeert.
3. Let op: alle deelprocessen moeten worden uitgebeeld: eerst moet het DNA geknipt worden, en moet het juiste mRNA-molecuul gestempeld worden, net als de juiste tRNA-moleculen (met anti-codons op het papier zelf, en het bijbehorende aminozuur op een PostIt). Er is per set slechts één aminozuurstempel; om aan te geven om welk aminozuur het gaat schrijven de leerlingen de drielettercode in de gestippelde ovaal (zie afbeelding hieronder).
4. Geef de leerlingen eerst de tijd om de rolbeschrijvingen te lezen, het liefst ook die van elkaar: het is een groepsopdracht (ze hebben individuele rollen, maar mogen elkaar natuurlijk helpen). Geef daarna het startsein.
5. Meestal zijn leerlingen wel een minuut of 20 met het uitbeelden van het hele proces bezig. Loop dan rond, en controleer hoe het gaat. Ook als je er voor kiest om er een 'wedstrijdje eiwitsynthese' van te maken is bijsturen en feedback natuurlijk belangrijk. Hou bij transcriptie in de gaten of leerlingen de juiste streng als template/matrijs gebruiken, mRNA in de juiste richt stempelen (van 5' naar 3'), uracil (U) gebruiken in plaats van thymine (T) en de hele sequentie stempelen (want translatie start bij het startcodon, maar transcriptie al daarvoor). Hou bij translatie in de gaten of leerlingen starten bij het startcodon, het mRNA in de juiste richting aflezen (van 5' naar 3'), de juiste anti-codons stempelen.
6. Om leerlingen te laten zien dat eiwitten na translatie nog niet 'af' zijn, is als laatste stap ook een bewerking toegevoegd waarbij de aminozuurketen moet worden gevouwen. Omdat het hier maar om een heel korte keten gaat (vijf aminozuren) is de vouwing zelf niet echt realistisch, al is het principe (hydrofobe, non-polaire restgroepen bij elkaar) bij eiwitvouwing wel van invloed.
7. Controleer of de mRNA-moleculen en de polypeptidenketens juist zijn gestempeld en gevouwen. De nucleotidenvolgorde in het mRNA moet zijn:

C-G-A-U-A-U-G-G-A-G-A-A-G-C-U-U-C-A-U-A-A-U-A

De bijbehorende aminozuurketen is dan: Met – Glu – Lys – Ala – Ser (zie afbeelding).



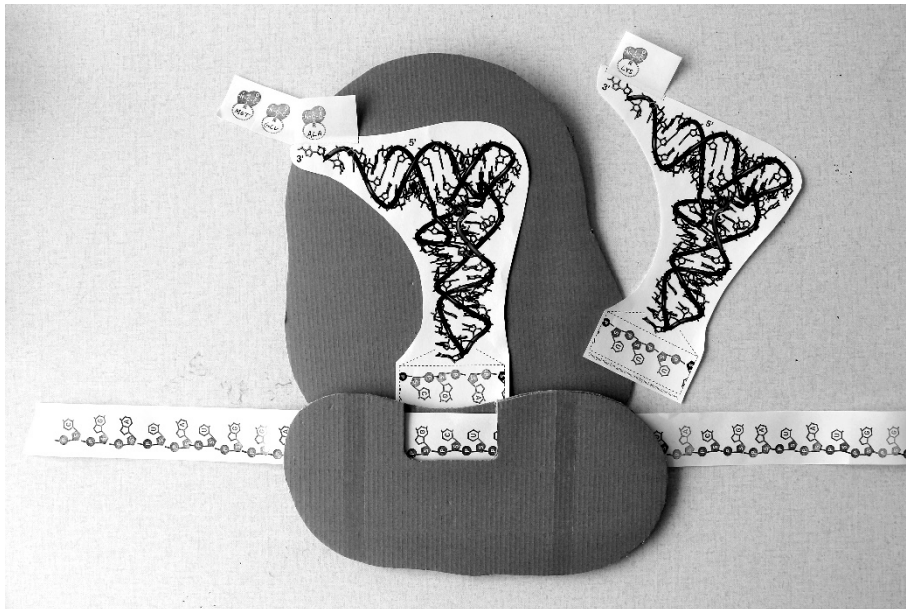


### (na)denkwerk

- Bespreek wat er wel en niet klopt aan het model. Benadruk in ieder geval dat polypeptiden (en dus ook de DNA- en mRNA-sequenties die daarvoor coderen) In werkelijkheid véél langer zijn.
- Een veel voorkomende fout is dat leerlingen als laatste ‘aminozuur’ een PostIt met daarop in plaats van de drielettercode het woord ‘stop’ invoegen. Wees daar alert op en benadruk dat er geen stop-aminozuur is.

### aanpassen/uitbreiden

- Maak eventueel van karton een ribosoom, waar de strook papier die het mRNA voorstelt doorheen getrokken kan worden (zie afbeelding hieronder). Zo kun je de translatie heel mooi en precies uitbeelden door steeds een codon op te schuiven.



### bijlagen

- sequentie eiwitsynthese
- tRNA
- aminozuren eigenschappen
- beschrijvingen van de ‘eiwitrollen’
- blaadjes met daarop CELKERN, RIBOSOOM, ER en BLAASJE





## 4. POTLOODTRANSFERASE

### *vorm-functie van eiwitten met chenilledraad*

Dit (korte) practicum laat leerlingen zelf ervaren dat de driedimensionale structuur van eiwitten samenhangt met de functie(s) die het eiwit vervult. Dit uitbeeldpracticum werd beschreven door Chowning, Kovarik & Griswold (2012)<sup>1</sup>.

---

**duur** 10 minuten, incl. nabespreking

**doelgroep** onder- en bovenbouw

**doelen** Leerlingen kunnen:

- uitleggen dat de *vorm* en structuur van eiwitten samenhangen met de *functie* die deze in de cel of daarbuiten vervullen;
- uitleggen dat bij veel eiwitten *functionele domeinen* zijn aan te wijzen die een specifieke functie vervullen.

**nodig** voor elke leerling:

- een stuk chenilledraad (of installatiedraad) van 30 tot 40 cm, bij voorkeur in verschillende kleuren
- een pen, potlood of stift (maar die zullen ze zelf hebben)



---

<sup>1</sup> Chowning, J.T., Kovarik, D. & Griswold, J. (2012). Modeling protein structure & function: pencil transferase. *The American Biology Teacher*, 74(8), 581-582.

### voorbereiding

-

### uitvoering

1. Geef elke leerling een stuk chenilledraad.
2. Geef leerlingen de volgende opdracht:

Jullie gaan zelf een eiwit 'ontwerpen'. Dat eiwit heet *potloodtransferase*. De functie van het eiwit is het transporteren van een potlood (of een pen) van de ene tafel naar de andere. Buig en vouw de draad zó dat je je potlood (zonder dat aan te raken) kan optillen en naar een andere tafel vervoeren.

3. Geef enkele minuten bouw- en vouwtijd.
4. Bespreek de overeenkomsten en de verschillen tussen de modellen die de leerlingen gemaakt hebben. Waarschijnlijk maken leerlingen eiwitmodellen waar verschillende *functionele domeinen* in te herkennen zijn, bijvoorbeeld een potlood-bind-domein, en een vasthoud-domein. Je kan hier natuurlijk ook prima aandacht aan besteden zonder de term functioneel domein te noemen.
5. Ga eventueel in op het begrip *actieve centrum* (de plek waar het substraat/potlood aan het eiwit bindt).
6. Laat de leerlingen de draad weer recht maken voor de volgende groep.

### (na)denkwerk

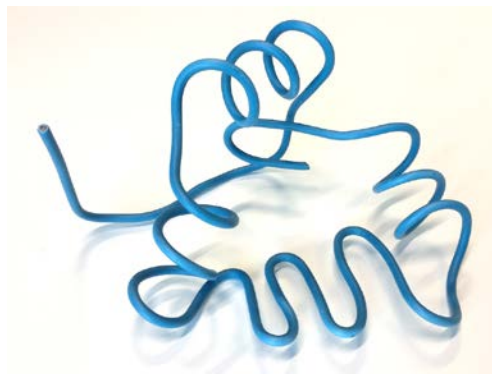
- Bespreek wat wel/niet aan het model klopt. Benoem in elk geval dat (losse) eiwitten in de cel niet gericht een bepaalde richting op kunnen zwemmen, maar bijvoorbeeld wel over een ander (draadvormig) eiwit in het cytoskelet kunnen bewegen.
- Bespreek - als dat aansluit bij het niveau van de groep - de invloed van mutaties op de vorm en de structuur van het eiwit.

## 5. EIWITVOUWING MET CHENILLEDRAAD

Afbeeldingen van eiwitmoleculen zijn altijd tweedimensionaal, terwijl de functie van eiwitten totaal afhangt van hun driedimensionale vormgeving. In dit practicum maken leerlingen snel eigen driedimensionale eiwitmodellen waarmee ze de structuurniveaus letterlijk in de vingers krijgen. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam). Een practicum dat hier sterk op lijkt werd ontwikkeld door Philip Holt (ECL, Haarlem).

---

duur	25-30 minuten (introductie met PowerPoint van 5-10 min., vouwen zelf 20 min.)
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• met behulp van een afbeelding of model uitleggen wat bedoeld wordt met de primaire, de secundaire, de tertiaire en de quaternaire structuur van een eiwit;</li><li>• in een lintmodel-afbeelding van een eiwit de <math>\alpha</math>-helixen en <math>\beta</math>-platen onderscheiden.</li></ul>
nodig	<p>voor elke leerling:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• een stuk chenilledraad (of installatiedraad) van 30 tot 40 cm, bij voorkeur in verschillende kleuren</li><li>• een pen, potlood of stift (maar die zullen ze zelf hebben)</li></ul> <p>voor de hele klas:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• eventueel strijkkralen, letterkraaltjes of stukjes gekleurd papier of plakband (zie aanpassen/uitbreiden)</li></ul>



### voorbereiding

1. Zorg dat leerlingen Binas of ScienceData bij de hand hebben.

### uitvoering

1. Leid de leerlingen via tweedimensionale afbeeldingen in de PowerPoint door de begrippen, waarbij ze ook hun informatieboek gebruiken; benoem dat het nu gaat om de driedimensionale vormen te leren kennen door ze zelf te maken.
2. Laat de stukken draad uitdelen (één per leerling), en zorg dat burens verschillende kleuren hebben.
3. Instrueer ze dan (stapsgewijs) het volgende te doen (laatste PowerPoint-dia):
  - a. Maak vanuit de *primaire* structuur (een recht stukje installatiedraad) de twee mogelijke *secundaire* structuren; de  $\alpha$ -helix kun je makkelijk maken door te rollen om een pen.
  - b. Maak dan een *tertiaire* structuur.
  - c. En ten slotte een *quaternaire* structuur; werk daarvoor samen met een of twee burens die een andere kleur draad hebben.
  - d. Haal ze uiteindelijk weer uit elkaar en maak mooie rechte draden voor een volgende groep.
4. Loop tijdens het practicum rond, observeer en vraag leerlingen uit te leggen wat wat is, om zo misvattingen te kunnen herstellen.
5. Bespreek de overeenkomsten en de verschillen tussen de modellen die de leerlingen gemaakt hebben. Ga desgewenst in op de verschillende typen bindingen tussen de aminozuren, die aan de verschillende eiwitstructuren ten grondslag liggen.
6. Laat de leerlingen de draad weer recht maken (voor de volgende groep).

### (na)denkwerk

- In deze simulatie worden de eiwitten gevouwen door externe krachten (leerlingspielen). Hoe gaat dat in werkelijkheid?
- Er is één primaire structuur, er bestaan twee secundaire structuren, zijn er dan drie tertiaire structuren? Dat is een opstapje naar de enorme variatie in eiwitten.
- Het woord 'helix' hebben ze misschien al eens gehoord in de context van DNA. Dat is een mooie kans om nadrukkelijk erop te wijzen dat 'helix' alleen een vorm is en dat de 'inhoud' kan verschillen: DNA is géén eiwit; DNA *is* een helix, maar eiwitten *bevatten* helixen.
- De termen monomeer en tetrameer kunnen geïntroduceerd worden als de quaternaire structuren gemaakt zijn. En dan myoglobine als voorbeeld van een monomeer noemen.
- Het voorbeeld van een quaternaire structuur in Binas (hemoglobine) kan leiden tot de misvatting dat een quaternaire structuur altijd is opgebouwd uit vier monomeren/vier tertiaire structuren.
- In dat hemoglobinevoorbeeld van Binas staat ook de ' $\alpha$ -keten'; dat is dus *niet* de groen ingetekende helix, maar een van de twee globinetypen die in hemoglobine zitten... lastig.

#### aanpassen/uitbreiden

- Een realistischer variant voor de primaire structuur is dun ijzerdraad te gebruiken waar ze zelf strijkkralen (of nog mooier: letterkraaltjes!) op mogen zetten. Dan is duidelijk dat de primaire structuur uit verschillende aminozuren bestaat. Nadeel is dat dat veel meer tijd en materiaal kost en rommel op de vloer geeft... Je zou daarom eventueel zelf één demonstratievoorbeeld met letterkraaltjes paraat kunnen hebben.
- Een variant voor de tertiaire structuur: zwavelbruggen en dergelijke laten maken door stukjes naar elkaar te vouwen die met dezelfde kleur plakband omwikkeld zijn (of waar bij de primaire-structuur-variant dezelfde kleur kraaltjes zitten)
- Je kunt dit practicum ook mooi als demonstratie doen, om een uitleg over de structuurniveaus van eiwitten te illustreren.

#### bijlage

- (voorbeelden van) PowerPoint-dia's



## 6. EIWITVOUWING MET LIJVEN

Leuk uitbeeldpracticum dat laat zien dat eiwitstructuur afhangt van de eigenschappen van de restgroepen van aminozuren, en dat daarbij verschillende typen bindingen een rol spelen. Ook laat het practicum zien dat eiwitvouwing niet zo gestructureerd en stap voor stap (van primair naar tertiair/quaternair) verloopt als de lesboeken doen voorkomen. Bovendien laat de *hydrofobic collapse* mooi zien dat uit ‘chaos’ soms vanzelf structuur ontstaat. Let op: in dit uitbeeldpracticum komen  $\alpha$ -helices en  $\beta$ -sheets niet nadrukkelijk naar voren (behalve in de uitbreiding); gebruik daarvoor het practicum *Eiwitvouwing met installatiedraad*. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Michiel Kroon (Montessori Lyceum, Amsterdam) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

duur 20 minuten

doelgroep bovenbouw vmbo/havo/vwo

doelen Leerlingen kunnen uitleggen:

- dat bij/na translatie de aminozuurketen zich onmiddellijk zó opvouwt dat aminozuren met hydrofobe restgroepen aan de binnenkant van het eiwit komen te liggen (de zogenaamde *hydrophobic collapse*);
- dat bij eiwitvouwing verschillende typen bindingen tussen aminozuren betrokken zijn: waterstofbruggen, zoutbruggen en zwavelbruggen;
- dat bij de totstandkoming van de definitieve driedimensionale vorm ook (andere) eiwitten betrokken zijn (chaperonne-eiwitten).



### varianten

Bij deze simulatie stellen leerlingen aminozuren voor. Leerlingen leggen hun rechterhand op de schouder van de leerling voor zich (de rechterarm is de peptidebinding); de linkerarm wordt uitgestoken en is de zijketen. Je kan deze simulatie verder op twee manieren doen: mét of zonder materiaal. Hieronder zie je hoe in elke variant de verschillende bindingen worden uitgebeeld. In de beschrijving verderop wordt uitgegaan van de variant met materiaal (deze is volgens ons ook het sterkst/leukst).

met materiaal:

- waterstofbruggen: dun elastiekje tussen twee vingers
- zoutbruggen: magneten (vasthouden)
- zwavelbruggen: handboeien

zonder materiaal:

- waterstofbruggen: één vinger in elkaar haken
- zoutbruggen: ‘gewoon’ hand vasthouden
- zwavelbruggen: elkaars polsen vasthouden

### nodig

- kaartjes met aminozuren en hun eigenschappen (zie bijlage);  
print de hydrofobe en hydrofiele aminozuren eventueel op verschillend gekleurd papier
- een grote ruimte zonder tafels/stoelen
- als je de variant doet mét materiaal:
  - elastiekjes
  - vier (staaf)magnetten (lenen bij collega's van natuurkunde)
  - één of twee paar handboeien  
(online bestellen en bonnetje natuurlijk inleveren bij de schoolleiding)

### voorbereiding

Print en knip de aminozuurkaartjes. Verzamel eventueel de materialen.



## uitvoering (en denkwerk)

### vooraf

1. Deel de aminozuurkaartjes uit. Zorg ervoor dat er twee tot vier Cysteïne-kaartjes zijn (voor de vorming van zwavelbruggen), en van de aminozuren Arginine, Lysine, Asparaginezuur en Glutaminezuur elk één (voor de vorming van zoutbruggen).
2. Laat de leerlingen in willekeurige volgorde in een rij staan.
3. Bespreek met de leerlingen...
  - a. dat in (menselijke) eiwitten 20 verschillende aminozuren voorkomen, elk met een andere zijketen (R-groep) die bepaalde chemische eigenschappen heeft,
  - b. dat de driedimensionale vorm (en dus de functie) van een eiwit wordt bepaald door interacties tussen de aminozuurketen en de omgeving (o.a. op basis van hydrofiele/hydrofobe eigenschappen), en interacties binnen de aminozuurketen (o.a. waterstofbruggen, zoutbruggen en zwavelbruggen).

### ronde 1. de hydrofobe implosie

4. We simuleren nu eiwitvouwing bij een aminozuurketen die 'gewoon' in het cytoplasma wordt gevormd. Laat de leerlingen nog eens naar de eigenschappen van 'hun' aminozuur kijken. Vraag de leerlingen wat er - meteen na translatie - zal gebeuren met een aminozuurketen in een waterige omgeving.
5. Laat de leerlingen dat nu uitbeelden. De bedoeling is dat alle aminozuren met hydrofobe zijketens naar elkaar toe, en van het water af bewegen (die zitten uiteindelijk in het binnenste van het eiwit). Alle andere aminozuren kunnen waterstofbruggen vormen met de omringende watermoleculen, en 'trekken' naar het water toe. Als dit gelukt is benoem je: dit is de *hydrophobic collapse*, of *hydrofobe implosie*. Soms komt het voor dat leerlingen niet makkelijk (mee)bewegen. Benadruk dat moleculen in principe altijd in beweging zijn: in een vloeistof botsen de moleculen voortdurend op en tegen elkaar.

### ronde 2. waterstof-, zout-, en zwavelbruggen

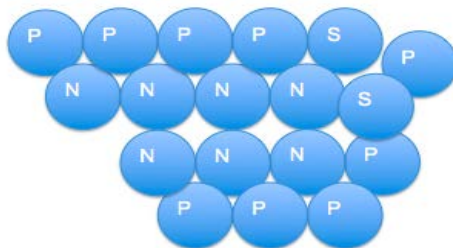
6. Vervolgens gaan we waterstofbruggen, zoutbruggen en zwavelbruggen vormen. Leg de materialen (elastiekjes, magneten en handboeien) in het midden van de kring. Laat de leerlingen nadenken over welk materiaal welk type binding voorstelt. Bespreek ook welke van deze bindingen het zwakst is (de waterstofbrug), en welke het sterkst (de zwavelbrug, dat is een covalente binding).
7. Laat de leerlingen de materialen uitzoeken en pakken die zij nodig hebben (kijk op je kaartje!).
8. Laat de leerlingen nu nog een keer uitbeelden. Eerst de hydrofobe implosie, en daarna de vorming van de verschillende typen bruggen. Hier kun je de leerlingen bij helpen: vertel dat in werkelijkheid ook andere eiwitten (chaperonne-eiwitten) helpen bij eiwitvouwing. Bespreek ook dat bindingen alleen gevormd worden als de aminozuren voldoende dicht bij elkaar zitten.

### ronde 3. een membraaneiwit

9. We simuleren nu de vorming van een membraaneiwit. Wijs een band aan in het midden van het lokaal waar – denkbeeldig – het membraan loopt (markeer eventueel met tafels of stoelen). Herinner de leerlingen eraan dat de binnenkant van het membraan (bij de vetzuurketens van de fosfolipiden) hydrofoob is.
10. Laat de leerlingen nu een keten vormen met in het midden zo'n 6 tot 8 hydrofobe aminozuren naast elkaar. De bedoeling is dat die aminozuren *in* het membraan zitten, en alle andere aan één of beide zijden van het membraan uitsteken. Laat de leerlingen nu uitbeelden wat er gebeurt.

### uitbreiden

- Al is het niet echt een leerdoel van deze simulatie, het is goed om leerlingen erop te wijzen dat de structuur van het eiwit dus afhangt van de precieze aminozuurvolgorde van het eiwit: eventueel kun je ronde 1 nog eens doen met de aminozuren in een andere volgorde, of één ander aminozuur (als gevolg van een *mutatie*).
- Simuleer eventueel ook het *actieve centrum*. Laat een aantal leerlingen die het actieve centrum van het eiwit vormen iets vasthouden (bijvoorbeeld een schaar/sleutel/naald als co-factor), die iets met een substraat (papier/hangslot/ballon) doet.
- Simuleer eventueel wat er gebeurt bij denatureren. Laat leerlingen eerst langzaam, en dan steeds sneller bewegen (temperatuur!), waardoor bindingen verbreken en de eiwitstructuur verdwijnt/verandert.
- Je kunt eventueel ook wat meer in detail de vorming van een bèta-sheet simuleren. Hiervoor moeten de leerlingen in een specifieke volgorde gaan staan, waarbij polaire en non-polaire aminozuren (en twee cysteïnes) elkaar afwisselen: P-N-P-N-P-N-S-P-P-S-N-P-N-P-N-P (zet op het bord). De bedoeling is dat leerlingen, doordat hydrofobe aminozuren naar de binnenkant bewegen, en de zwavelbrug gevormd wordt, een vaste structuur vormen die een bèta-sheet genoemd wordt (zie figuur hieronder). Bespreek dat bèta-sheets (en alfa-helices) onderdeel zijn van de zogenoemde secundaire structuur van het eiwit. Bij de vorming van deze structuren zijn ook allerlei waterstofbruggen betrokken, die gevormd worden tussen de NH-groepen en OH-groepen van tegenoverliggende strengen (dus niet tussen de zijketens).



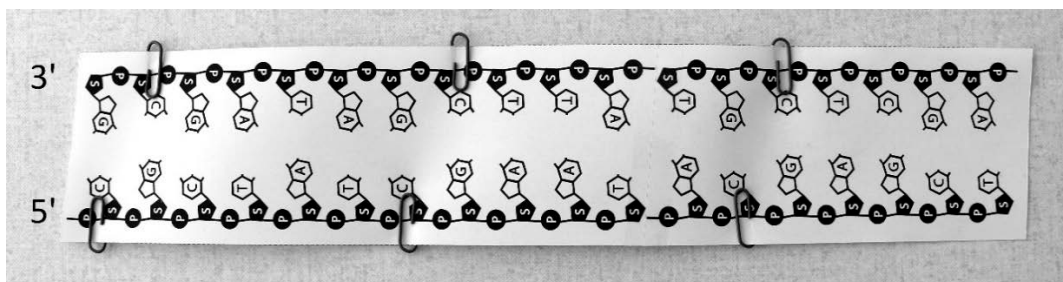
### bijlagen

- aminozuurkaartjes

## 7. EPIGENETICA

### MET PAPIER EN PAPERCLIPS

DNA-methylering en het onderscheid tussen eu- en heterochromatine vormen vooralsnog geen onderdeel van het examenprogramma biologie. Toch is het waardevol om leerlingen niet alleen te leren dát in verschillende typen cellen verschillende genen actief zijn, maar ook hóe welke moleculaire mechanismen daar voor verantwoordelijk zijn. Dit uitbeeldpracticum bouwt voort op het practicum *Replicatie met papier en stempels* (zie practicum 2); in ieder geval is het belangrijk dat leerlingen het proces DNA-replicatie begrijpen. In werkelijkheid zijn er verschillende enzymen die methylgroepen aan DNA kunnen binden; in dit practicum wordt de rol van het enzym DNA-methyltransferase uitgebeeld, dat na replicatie het methyleringspatroon herstelt. De stempelset DNA, een set van zes stempels waarmee nucleotiden en aminozuren gestempeld kunnen worden, werd ontwikkeld door Rogier Arents (Studio Rogier Arents, Rotterdam), Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam) en John Huizinga (Hogeschool Utrecht, Utrecht)<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> Voor meer informatie en bestellingen kijk op <https://www.betapartners.nl/stempelset-dna/> of mail [c.l.geraedts@vu.nl](mailto:c.l.geraedts@vu.nl).

**duur** 25 minuten, incl. voor- en nabespreking  
(voorwaarde is dat leerlingen het proces DNA-replicatie al wel beheersen)

**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen:

- uitleggen dat door methylering van het promotorgebied van een gen, dat gen minder actief of inactief wordt (doordat transcriptie-blokkerende eiwitten gebonden worden);
- uitleggen dat bij DNA-methylering een cytosine die naast guanine zit (5'-CpG-3') wordt gemethyleerd;
- beschrijven hoe bij DNA-replicatie het methyleringspatroon van de ouderstreng wordt gekopieerd naar de dochterstreng (door DNA-methyltransferase);
- uitleggen dat methylgroepen ook aan histonen gebonden kunnen zijn, en (samen met andere histonmodificaties) verantwoordelijk zijn voor het verschil is tussen heterochromatine (compact, weinig genexpressie) en euchromatine (losse structuur, veel genexpressie).

**nodig** per groepje:

- een print van de sequentie replicatie (zie bijlage)
- stempelset DNA (alleen de stempels A, T, C en G), inclusief inktkussen
- 6 paperclips
- twee stukjes kassarol of in stroken geknipt papier
- schaar en plakband

#### voorbereiding

1. Print en knip de sequentie replicatie en methyltransferase (zie bijlage). Gebruik hiervoor eventueel gekleurd papier om het verschil tussen ouder- en dochterstrengen nog duidelijker te maken.
2. Schuif een paperclip over elke plek waar het volgende patroon voorkomt: 5'-CpG-3' (zie afbeelding op de vorige pagina).
3. Maak eventueel een driedimensionaal model van eu- en heterochromatine (zie onder aanpassen/uitbreiden).

### uitvoering

Geef de leerlingen de volgende opdracht:

1. Je krijgt een DNA-fragment waarbij aan sommige stikstofbasen methylgroepen gebonden zijn (de paperclips). Kijk eens goed naar de plaatsen waar de methylgroepen aan het DNA gebonden zijn. Zitten de methylgroepen op willekeurige plekken op het DNA of kun je hier een bepaald patroon in ontdekken? Zo ja, welk?
2. Er vindt DNA-replicatie plaats: knip de strengen los van elkaar (helicase), en vorm aan iedere ouderstreng een nieuwe dochterstreng (DNA-polymerase).
3. Het enzym DNA-methyltransferase 'loopt' nu langs het DNA en methyleert alle cytosines (5'-CpG-3') waar op de tegenoverliggende streng óók een methylgroep zit. Doe dat, en ga na of de DNA-fragmenten nu weer hetzelfde methyleringspatroon hebben als vóór DNA-replicatie.

### (na)denkwerk

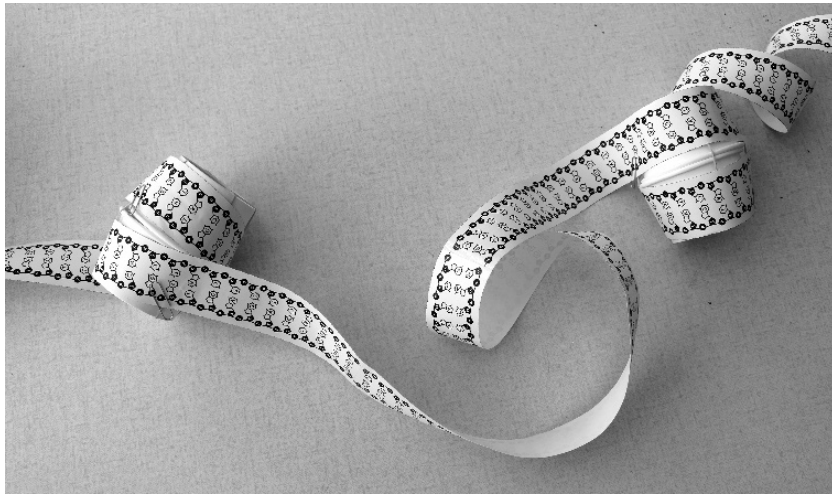
- Dat juist 5'-CpG-3' gemethyleerd wordt en niet bijvoorbeeld 5'-CpA-3' is geen toeval. Vraag de leerlingen waarom een methyleringspatroon gebaseerd op 5'-CpA-3' na replicatie niet zou leiden tot herstel van het methyleringspatroon.

### aanpassen/uitbreiden

- Maak, eventueel samen met je TOA of je leerlingen, een driedimensionaal model van chromatine (zie afbeeldingen op de volgende pagina). Gebruik hiervoor een lange strook geprint DNA (de sequentie maakt niet zoveel uit natuurlijk), en gebruik papieren bekertjes of closetrolletjes, eventueel in groepjes samengebonden met elastiekjes, om de histonen mee uit te beelden. Met paperclips, wasknijpers en/of papierklemmen kan het DNA strakker of minder strak om de histon-octameren worden gewikkeld. Deze 'uitsteeksels' stellen dan in feite de methylgroepen voor. Door een draad door de paperclips of klemmen te rijgen kan het model ook in de klas worden opgehangen. Het gaat er bij deze activiteit niet alleen om dat leerlingen zien hoe een chromosoom is opgebouwd, maar ook dat zij zien dat er een verschil is tussen compacte delen (heterochromatine) en open delen (euchromatine), en dat de mate van compactheid samenhangt met de genexpressie. Geef leerlingen eventueel de opdracht om foto's maken van het model, en daarin de volgende structuren aan te wijzen: DNA, histon, nucleosoom, methylgroep, euchromatine en heterochromatine.

### bijlagen

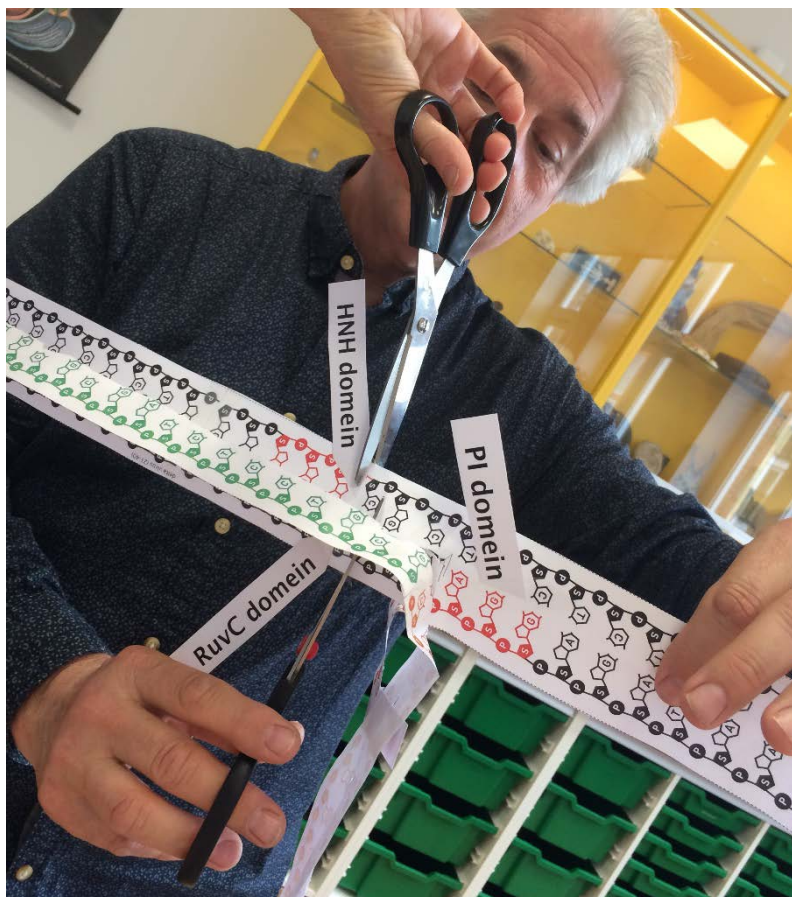
- sequentie replicatie en methyltransferase





## 8. CRISPR/CAS MET PAPIER EN SCHAAAR

Het CRISPR/Cas-systeem vormt feitelijk een verdedigingsmechanisme waarmee bacteriën zoals *E. coli* zich beschermen tegen bacteriofagen. Sinds enige jaren wordt CRISPR/Cas9 ook toegepast binnen de biotechnologie; met Cas9, een nuclease, kan namelijk heel precies in DNA worden geknipt. In dit uitbeeldpracticum staat het CRISPR/Cas-systeem zoals dat in *E. coli* functioneert centraal. Dat is best pittige materie, en het doel van het practicum is dan ook niet dat leerlingen alle details gaan snappen maar dat ze in grote lijnen begrijpen wat er gebeurt. Bovendien vormt CRISPR/Cas wél een mooie context waarbinnen basale leerdoelen zoals de principes van de basenparing en de eiwitsynthese herhaald kunnen worden. In een eventuele vervolgo opdracht kiezen leerlingen zelf spacers (gRNA) om een puntmutatie in het gen dat codeert voor hemoglobine (en dat sikkelcelanemie veroorzaakt) met behulp van Cas9 te repareren. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).



duur	één lesuur (van 50 minuten), incl. uitleg en voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• in grote lijnen beschrijven hoe het CRISPR/Cas systeem bij bacteriën functioneert als afweermechanisme tegen indringing van bacteriofagen;</li><li>• aangeven welke functionele domeinen het Cas9 enzym heeft, en hoe het Cas9-RNA-complex ervoor zorgt dat het virale DNA wordt geknipt;</li><li>• overeenkomsten en verschillen aangeven tussen CRISPR/Cas (dat op moleculair niveau werkt) en ons eigen immuunsysteem (dat op cellulair niveau werkt).</li><li>• uitleggen wat de voordelen zijn van Cas9 ten opzichte van andere eiwitten die in de biotechnologie gebruikt worden om DNA te knippen (zoals restrictie-enzymen).</li></ul> <p>vervolgopdracht over <i>genome editing met Cas9</i>   Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• in grote lijnen beschrijven hoe Cas9 gebruikt kan worden om in te grijpen in het genoom (of de genexpressie) van organismen;</li><li>• uitleggen waarom bij de synthese van het gRNA rekening gehouden moet worden met het voorkomen van een PAM op het target DNA.</li></ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"><li>• 1 rol plakband per groepje leerlingen</li><li>• 2 scharen per groepje leerlingen</li><li>• gekleurd papier</li></ul>



### voorbereiding plasmide (eenmalig)

1. Print het materiaal voor de plasmide. De plasmide dient alleen ter ondersteuning van de uitleg en wordt niet ‘verbruikt’. Je kunt ‘m dus meerdere keren gebruiken. Om het visueel aantrekkelijker en inzichtelijker te maken print je de verschillende delen van de plasmide, en met name de CRISPR-onderdelen, op gekleurd papier (A4). Gebruik de volgende kleuren en aantallen:
  - het Cas9 gen op lichtblauw/paars papier (1 keer)
  - repeat DNA deel A en deel B op geel/oranje papier (elk 2 keer)
  - spacer DNA alfa, bèta en gamma-virus op lichtgroen papier (1 keer)
  - spacer DNA delta, epsilon en omega-virus op lichtgroen papier (1 keer)
  - overig DNA op wit papier (2 keer)
2. Plak van het repeat DNA de delen A en B aan elkaar (het 3'-einde van A gaat aan 5'-einde van B). Knip het repeat DNA en de overige delen vervolgens los langs de stippellijntjes. Maak dan één streng/plasmide door de fragmenten in de onderstaande volgorde aan elkaar te plakken:

vier stukken overig DNA – vier stukken Cas9 gen – repeat A+B – spacer alfa-virus – repeat A+B – spacer bèta-virus – repeat A+B – spacer gamma-virus – repeat A+B – spacer delta-virus – repeat A+B – spacer epsilon-virus – repeat A+B – spacer omega-virus – repeat A+B – vier stukken overig DNA

De spacers voor het delta, epsilon en omega-virus kun je eventueel weglaten, omdat deze virussen bij het uitbeelden verder geen rol spelen. Ook kun je (door extra stroken ‘overig DNA’ in te voegen) de uiteinden van de plasmide met elkaar verbinden zodat echt een cirkelvormig model ontstaat.

### voorbereiding

1. Print dan het materiaal voor de leerlingen, op wit papier maar wél in kleur. Zelf print ik alles op A3, m.u.v. de rolkaartjes (en de plasmide). Voor stap 1 (repeat RNA vouwen) – ga ik uit van één exemplaar per leerling, al kun je leerlingen natuurlijk ook in tweetallen laten werken. Voor stap 2 (spacer RNA binden aan DNA) en stap 3 (Cas9 uitbeelden) ga ik uit van groepjes van vijf (of eventueel vier of zes) leerlingen. Voor een klassenset (30 leerlingen) print je dan:
  - repeat RNA deel A en deel B (elk 5 keer)
  - spacer RNA (elk 2 keer)
  - DNA alfa, bèta en gamma-virus (elk 2 keer)
  - rolkaartjes (A4) (6 keer)
  - werking Cas9 schematisch (6 keer)
  - werking Cas9 schematisch (in DNA font) (6 keer)
  - eventueel de instructies voor de leerlingen (opdrachten staan ook in PowerPoint)

2. Plak van het repeat RNA de delen A en B aan elkaar. Om het helemaal netjes te doen knip je eerst de witranden weg. Knip daarna de individuele strengen repeat RNA los. Knip ook de strengen spacer RNA los (in ieder geval die van het alfa, bèta en gamma-virus; de rest kan in principe weggegooid). Maak tenslotte van elk stuk (viraal) DNA één streng door te knippen langs de stippellijnen en de drie fragmenten aan elkaar te plakken.
3. Hang de plasmide op in de klas, en geef elk groepje het volgende materiaal:
  - een streng virus DNA (alfa, bèta of gamma)
  - een streng van het bijbehorende spacer RNA (alfa, bèta of gamma)
  - rolkaartjes
  - twee scharen
  - een rol plakband
  - (voor elke leerling) een streng repeat RNA

### uitvoering

Wissel in je les af tussen stukjes uitleg en het uitbeelden (in drie stappen) door de leerlingen. Gebruik de PowerPoint eventueel als leidraad.

1. Bij stap 1 (repeat RNA vouwen) gaan de leerlingen op zoek naar de lus (hairpin) in het RNA. Door de strook papier te vouwen en heen en weer te bewegen vinden ze de complementaire basen meestal redelijk snel. Laat de leerlingen de complementaire delen aan elkaar plakken met plakband.
2. Wijs de leerlingen na stap 1 op het feit dat het repeat RNA in werkelijkheid langer is (zie ook de afbeeldingen *werking Cas9 schematisch*). Uit praktische overwegingen is hier gekozen voor een kortere sequentie met één duidelijke lus.
3. Bij stap 2 (spacer RNA binden aan DNA virus) is het goed om aan te geven dat de in het rood aangegeven PAM's gewoon normale nucleotiden zijn. Alle sequenties met patroon 5'-NGG-3' noem je een PAM omdat ze aan het PI-domein van het Cas9-eiwit (kunnen) binden. Net naast het stuk DNA dat aan de spacer bindt bevindt zich per definitie een PAM, maar het is niet zo dat bij alle PAM's in het virale DNA verschillende spacers voorkomen.
4. Bij stap 3 (Cas9 uitbeelden) is het de bedoeling dat de leerlingen met de stroken papier, de scharen en het plakband de werking van het Cas9-enzym uitbeelden (en daar bijvoorbeeld een foto van maken). Laat de leerlingen de spacer en één van de repeat RNA's aan elkaar vastplakken. Laat de leerlingen ook de twee DNA-strengen in het virus-DNA losknippen, zodat de spacer aan de juiste streng geplakt kan worden.
5. De afbeelding *werking Cas9 schematisch* wordt bij stap 3 als voorbeeld gebruikt. Van deze afbeelding bestaan twee versies: één versie afkomstig van Wikipedia, en één versie die daarop gebaseerd is, maar is opgemaakt met de nucleotidenplaatjes van de stempelset. Wijs de leerlingen erop dat de nucleotidenvolgorde in het DNA en spacer RNA op deze afbeeldingen niet overeenkomen met één van de virussen (alfa, bèta of gamma) van de leerlingen.

### (na)denkwerk

1. Ga bij de nabespreking in op de leerdoelen die hierboven zijn geformuleerd. Wijs de leerlingen ook op de enorme diversiteit aan virussen die op de aarde voorkomt, en leg uit dat een groot deel van deze virussen een bacterie als gastheer heeft.
2. Bespreek de verschillen en overeenkomsten tussen het bacteriële afweersysteem en ons eigen immuunsysteem (in hoeverre zijn de spacers in het plasmide bijvoorbeeld analoog aan onze geheugencellen?). Ook kan een vergelijking gemaakt worden met processen als RNA interferentie die van nature in onze cellen plaatsvinden.
3. Vraag de leerlingen of ze kunnen bedenken wat de functie is van de PAM/PI-controle. Of anders geformuleerd: een spacer van zont is al zeer specifiek, dus waarom is het CRISPR/Cas-mechanisme zó geëvolueerd dat de aanwezigheid van nog een sequentie van znt net naast de spacer (de PAM dus) voorwaardelijk is voor de werking van Cas9? De reden hiervoor is natuurlijk dat zonder PAM/PI-controle, Cas9 (in combinatie met het spacer RNA) in het DNA van *E. coli* zelf zou knippen.

### aanpassen/uitbreiden

1. Je kunt bovenstaande opdracht meer gewicht geven door leerlingen (individueel of per groep) te vragen hun foto te voorzien van een bijschrift, en daarbij de verschillende onderdelen (spacer RNA, repeat RNA, DNA, PAM, functionele domeinen) aan te wijzen. De bewerkte foto's kunnen vervolgens worden beoordeeld (door de docent of door medeleerlingen) en besproken in de klas.
2. Voeg eventueel een wedstrijdelement toe door te benadrukken dat de bacterie maar beperkt tijd heeft om het virale DNA onschadelijk te maken voordat het zich innestelt in de plasmide.

### bijlagen

- sequenties DNA en RNA
- rolbeschrijvingen
- afbeeldingen *werking Cas9 schematisch*
- instructies voor leerlingen
- PowerPoint

uitbreiden: vervolgoopdracht over genome editing met Cas9

1. Print voor alle leerlingen (of per tweetal) het werkblad genome editing met Cas9, bij voorkeur in kleur.
2. Print (en knip en plak) eventueel ook een aantal stroken papieren hemoglobine (voor de uitvoering van deze activiteit is dat niet strikt noodzakelijk, maar het geeft wel meer beeld).
3. Laat de leerlingen de instructies op het werkblad stap voor stap volgen. Bij deze vervolgoopdracht gaat het er met name om dat de leerlingen zich realiseren dat je eenvoudig door het kiezen/ontwerpen van spacers, Cas9 heel precies in DNA kunt laten knippen. Er moet een combinatie van twee spacers worden gevonden die zorgt voor een breuk/knip aan weerszijden van de gegeven puntmutatie.
4. In de PowerPoint wordt op een tweetal slides aangegeven waar de PAM's zich bevinden (stap a), en waar Cas9 bij elke PAM zou knippen (stap b). De streepjes staan maar aan één kant (bij de streng waar ook de PAM ligt), maar Cas9 knipt in werkelijkheid natuurlijk beide strengen (zo ontstaan zogenaamde blunt ends). Op de volgende slide (stap c en d) in de PowerPoint staan in groen vier spacers weergegeven, waarvan er twee zorgen voor een knip 'links' van de puntmutatie (de bovenste en de derde van boven), en twee voor een knip 'rechts' van de puntmutatie (de tweede en de vierde van boven). Spacers die gedeeltelijk buiten het getoonde fragment zouden vallen laten we hier buiten beschouwing. De vier spacers op slide 20 leveren in principe vier mogelijke combinaties/paren op. De combinatie van de tweede en derde van boven kan echter niet gebruikt worden omdat Cas9 dan in de PAM van de ander zou knippen.

## 9. RNA-INTERFERENTIE MET PAPIER EN SCHAAR

In dit practicum maken leerlingen op beeldende wijze kennis met het principe van RNA-interferentie, en de manier waarop door RNAi invloed uitoefent op de expressie van bepaalde genen. Het practicum is gebaseerd op een vraag uit het biologie-examen van 2013 (tweede tijdvak): RNA-interferentie in rijst voor nierpatiënt. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Tim Nieuwenhuis (Gerrit van der Veen College, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• uitleggen dat RNA-interferentie invloed heeft op de genexpressie;</li><li>• uitleggen hoe – in grote lijnen – het proces van RNA-interferentie verloopt.</li></ul>
nodig	<p>per tweetal of groepje:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• schaar</li><li>• plakband</li><li>• hairpin RNA en mRNA (geprint op A3)</li></ul>



### voorbereiding

1. Print de bijlage met het hairpin RNA uit op A3-papier. Plak de rechterzijde (het 3'-uiteinde) van deel A aan de linkerzijde (het 5'-uiteinde) van deel B. Knip nu de stroken los: één strook hairpin RNA per tweetal of groepje is genoeg.
2. Print en knip ook de stroken met de mRNA-moleculen uit (één set van zes verschillende mRNA's per tweetal of groepje).

### uitvoering

1. Bespreek allereerst met de klas hoe het proces van RNA-interferentie in grote lijnen verloopt. Gebruik hierbij de vraag uit het biologie-examen van 2013 (tweede tijdvak) eventueel als context.
2. Geef leerlingen nu de volgende opdracht:

#### *de hairpin vormen*

- a. Je krijgt een RNA-transcript dat een hairpin (haarspeldbocht) kan vormen. Je gaat nu stap voor stap uitbeelden hoe op basis van dit stuk RNA een RISC-complex gevormd wordt. Vervolgens zoek je uit welke mRNA-strengen door dit RISC-complex worden geblokkeerd en welke worden afgebroken.
- b. Vouw het RNA-transcript tot een hairpin; er ontstaat dus een lus en een stukje dubbelstrengs RNA (dsRNA). Gebruik het plakband om de complementaire basen aan elkaar te plakken. Hoeveel basenparen zijn nu gevormd in het dsRNA?
- c. De streng van het dsRNA dat het dichtst bij het 5'-uiteinde van het transcript zit is de *sense* streng. Arceer deze.

#### *van dsRNA naar RISC*

- d. Het dicer-eiwit knipt het dsRNA uit de hairpin. Vervolgens knipt het dicer-eiwit het dsRNA in miRNA's (microRNA's) van vier baseparen. Beeld beide stappen uit. Hoeveel miRNA's zijn nu gevormd?
- e. Het RISC (RNA-induced silencing complex) neemt een miRNA op, verwijdert de *sense* streng en bindt de *antisense* streng.

#### *RISC bindt aan mRNA*

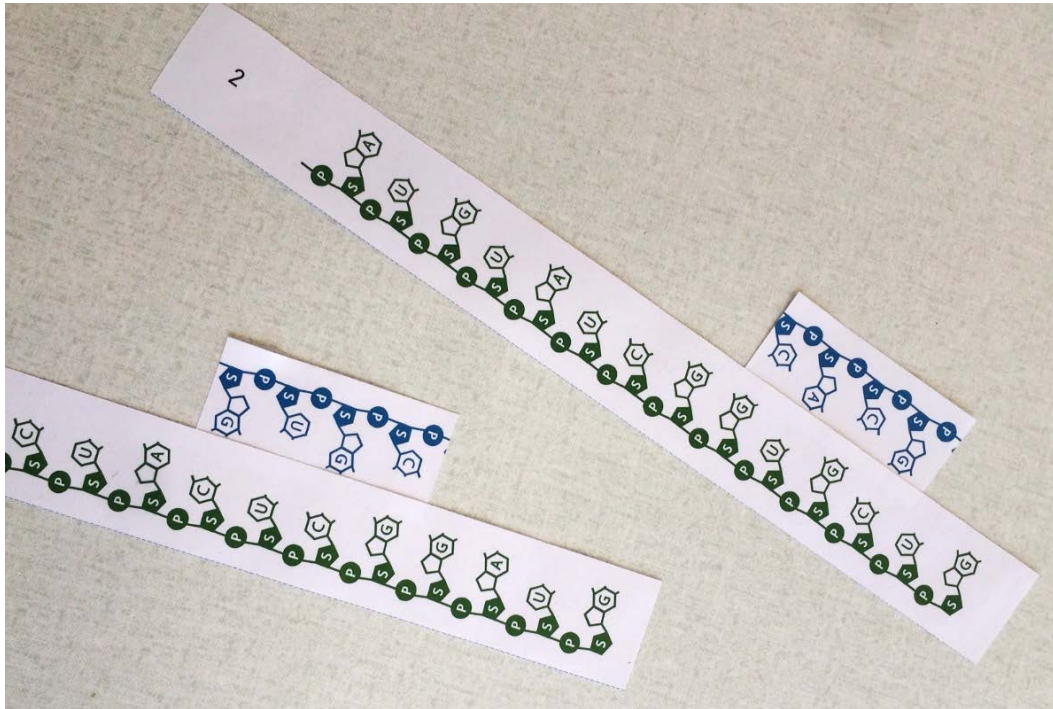
- f. Ga na met welke mRNA-moleculen de antisense streng in het RISC-complex een binding kan vormen. Het effect van de binding tussen RISC en mRNA is afhankelijk van de mate waarin er een match is tussen miRNA en mRNA:
  - is de binding *volledig* - alle vier de basen zijn complementair – dan wordt het mRNA doormidden geknipt en afgebroken;
  - is de binding *niet volledig* – drie van de vier basen zijn complementair – dan wordt het mRNA geblokkeerd en translatie geremd.
- g. Zoek uit welk(e) van de acht verschillende mRNA-moleculen worden afgebroken of geblokkeerd. Plak het antisense miRNA aan het mRNA-molecuul als sprake is van een (volledige of niet volledige) match.

### (na)denkwerk

- Controleer of leerlingen het juiste antwoord gevonden hebben (mRNA 2 wordt afgebroken en mRNA 6 wordt geblokkeerd).
- Laat leerlingen nadenken over de vraag waarom door het RISC-complex juist de antisense-streng wordt gebonden.
- Bespreek (nogmaals) op welke manier(en) RNA-interferentie invloed uitoefent op de expressie van genen (sommige leerlingen realiseren zich bijvoorbeeld niet dat één mRNA-molecuul vele malen kan worden afgelezen).
- Leg uit dat miRNA-fragmenten in werkelijkheid iets langer zijn (zo'n 20 nucleotiden). Ook mRNA-moleculen zijn natuurlijk in werkelijkheid veel langer.
- Leg indien nodig uit dat de vorm van RNA-interferentie die in dit practicum (en de meeste lesboeken) centraal staat enigszins afwijkt van de vorm van RNA-interferentie die in de context van de hierboven genoemde examenvraag wordt beschreven (vandaar ook dat in de examenvraag sprake is van siRNA in plaats van miRNA); het principe is echter nagenoeg hetzelfde.

### bijlagen

- hairpin RNA deel A en B
- mRNA





## 10. LICHTREACTIE

### MET DUPLO<sup>®</sup> EN LAMPJES

#### *thylakoïdtheater in de chloroklas (1)*

Bij de door leerlingen minst begrepen onderwerpen horen de licht- en donkerreactie van de fotosynthese en de lokalisatie daarvan in de chloroplast. Door plaats en proces uit te beelden met een klaslokaal als chloroplast met daarbinnen een thylakoïdtheater van bewegende leerlingen met Duplo<sup>®</sup>-dingen als moleculen en fietslampjes als elektronen, wordt leerlingen duidelijk wat er nu echt gebeurt en ook waarom. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ruthy Fraterman (Vossius Gymnasium, Hogeschool van Amsterdam), Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam) en Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	30 à 45 minuten voor lichtreactie (in vier rondes)
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• uitleggen hoe (en waar) energie uit zonlicht in de chloroplast wordt opgevangen en geabsorbeerd door elektronen;</li><li>• uitleggen wat de functie is van de elektronendrager NADPH (foto hieronder);</li><li>• uitleggen hoe door de opbouw van een protongradiënt en het eiwit ATP-synthase ATP gevormd wordt.</li></ul>



### nodig

Voor één klas heb je de volgende materialen nodig:

- 1 Duplo<sup>®</sup>-wagentje zonder cabine, in bijvoorbeeld rood maar niet geel [ADP-basis]
- 1 Duplo<sup>®</sup>-wagentje met cabine, in een *andere* kleur [NADP-basis]
- 4 witte (of 4 rode maar i.i.g. gelijkgekleurde) fietslampjes met knipper- en continuustand
- 4 gele Duplo<sup>®</sup>-blokken (2x4) [ $P_i$ ]
- 2 witte Duplo<sup>®</sup>-blokken (2x4) [O]
- 6 blauwe Duplo<sup>®</sup>-blokken (2x2) [H]
- 2 mobiele telefoons met zaklampstand
- 2 (groene) veiligheidshesjes of hoedjes [voor de fotosystemen]
- (eventueel) 3 oranje hesjes of hoedjes of naambordjes [voor de andere eiwitcomplexen]
- 10 kopieën van Binas 69 B1+2 of Sciencedata blz 175 óf hun eigen boek [voor toeschouwers]
- tafels, stoelen (waarvan bij voorkeur één draaikruk of draaistoel)

### voorbereiding

Dit uitbeeldpracticum bestaat eigenlijk uit twee delen die na elkaar (in een blokuur of in verschillende lessen) uitgevoerd worden: de lichtreactie (in vier rondes) en de donkerreactie (zie het volgende practicum). De lichtreactie wordt klassikaal gedaan, waarbij steeds een deel van de leerlingen uitbeeldt en de rest toeschouwer is. De donkerreactie wordt daarna in groepjes gedaan.

1. Maak een thylakoïdmembraan door een aantal tafels vooraan in de klas in een boog neer te zetten. Deze tafels vormen het membraan. Plaats aan de rechterkant (gezien vanuit de klas) in een ruime afstand tussen twee tafels een draaistoel of draaikruk; hierop komt later de leerling die ATP-synthase uitbeeldt.
2. In de nabijheid van waar NADP-reductase gaat zitten staat een statief met hoog daarin NADP+ geklemd; rechts van de ATP-synthase-positie staat ook een statief maar dan met ADP en  $P_i$  apart erin geklemd. Die symboliseren de stoffen in het stroma.
3. Zet alles zó neer dat 11 leerlingen hier hun rol kunnen spelen en de overige leerlingen alles goed kunnen zien vanuit de rest van het lokaal; zij hebben de kopieën van de lichtreactie voor zich.
4. Projecteer met de beamer een schematische afbeelding van de lichtreactie in het thylakoïdmembraan (bijvoorbeeld Binas 69 B1+2 of ScienceData blz. 175).

Kies 11 leerlingen die als eerste de lichtreactie in iets versimpelde versie gaan uitbeelden, aan de hand van de afbeelding in Binas/ScienceData. De docent leidt deze leerlingen stap voor stap door het proces. De overige leerlingen, die in ronde 1 t/m 3 toeschouwer zijn, hebben de opdracht om goed op te letten zodat ze in ronde 4 hetzelfde kunnen doen, maar dan zonder hulp van de docent. Aantekeningen maken is daarom gewenst.

## de rolverdeling

De 11 leerlingen die de lichtreactie uitvoeren hebben de volgende rollen:

<b>fotosysteem II</b> (met groen veiligheidshesje)	<b>ATP-synthase</b>
<b>cytochroom bf</b>	<b>waterstof/proton (3x)</b>
<b>fotosysteem I</b> (met groen veiligheidshesje)	<b>zuurstof</b>
<b>NADP-reductase</b>	<b>lichtstraal/fotonen (2x)</b>

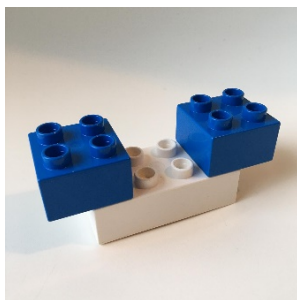
Instrueer de leerlingen wat ze zijn en waar ze moeten gaan zitten/staan (zie verderop). Laat ze dan één voor één opkomen in bovenstaande volgorde waarbij ze telkens aan de rest vertellen wat ze zijn én wat ze doen. Wat ze zijn kan ook geaccentueerd worden door een hoedje of hesje of bord om de nek; alleen de H en de O kunnen simpelweg hun blokje tonen. Wat ze doen kunnen ze zelf aflezen uit de afbeelding – dan wordt meteen duidelijk of ze dat goed zien (NB: cytochroom bf en ATP-synthase ‘doen’ twee dingen).

Fotosysteem II, cytochroom bf, fotosysteem I en NADP-reductase gaan van links naar rechts op de thylakoïd-membraan-tafels zitten, in de volgorde die ook op het scherm staat. ATP-synthase zit op de draaikruk of draistoel naast fotosysteem I. Dit is ook het moment om te laten ontdekken welke eiwitten er niet ‘persoonlijk’ meedoen om het simpel te houden: Q en X zitten in de fotosystemen, Pq, Pc en Fd zijn echt weggelaten.

Links achter de tafelrij staat een leerling (op een verhoging) als een lichtstraal. Een tweede lichtstraal staat rechts (op een verhoging). Ieder gaan ze met hun telefoon één van de fotosystemen beschrijven.

Binnen het thylakoïd (in het lumen, dus tussen publiek en thylakoïd-membraan-tafels) zijn drie leerlingen (twee waterstoffen en de zuurstof) samen  $H_2O$ : ze houden het bijbehorende Duplo®-molecuul vast. Daaraan hangen twee uitgeschakelde fietslampjes. In het stroma staat de derde H-leerling.

De foto's hieronder laten zien hoe de gebruikte moleculen in Duplo® zijn vormgegeven; de gele blokken zijn fosfaatgroepen.



$H_2O$



ADP +  $P_i$



NADP<sup>+</sup>

### ronde 1 – excitatie van elektronen en vorming van NADPH

1. Benoem of laat door het publiek bedenken dat het lokaal een chloroplast is, en waar stroma, membraan en thylakoïd zich bevinden. De toeschouwers zitten dus IN het thylakoïd. Pas daarna begint het uitbeelden van het proces.
2. Leg nu aan de hand van de afbeelding op het scherm stap voor stap uit wat er in de lichtreactie gebeurt, waarbij je de focus in deze ronde legt op de 'reis' van de elektronen van water naar NADPH. Tijdens je uitleg beelden de leerlingen uit wat er gebeurt:
  - a. Fotosysteem II wordt beschonen door een lichtstraal.
  - b. Fotosysteem II splitst nu het H<sub>2</sub>O Duplo<sup>®</sup>-molecuul en schakelt de lampjes aan (als symbool voor energie-opname). De O- en H-leerlingen blijven staan, met nu elk een eigen Duplo<sup>®</sup>-blok.
  - c. Fotosysteem II geeft de lampjes door aan cytochroom bf.
  - d. Cytochroom bf geeft de lampjes door aan fotosysteem I.
  - e. Fotosysteem I wordt beschonen door een lichtstraal.
  - f. Fotosysteem I schakelt nu de lampjes op knipperstand (als symbool voor extra energie-opname) en geeft ze aan NADP-reductase.
  - g. NADP-reductase doet lampjes in de cabine van het NADP<sup>+</sup>-wagentje, neemt een blauw Duplo<sup>®</sup>-blokje over van de H-leerling in het stroma en zet dat op de cabine (zie foto).



### ronde 2 – de vorming van een protongradiënt en ATP

3. Nu worden de rollen van cytochroom bf en ATP-synthase verder toegelicht. De leerling die in het stroma  $H^+$  uitbeeldt krijgt hiervoor een nieuw blauw H-blokje. Ook wordt er een nieuw  $H_2O$  met lampjes klaargelegd bij fotosysteem II.
4. Tijdens je uitleg beelden de leerlingen weer uit wat er gebeurt:
  - a. Fotosysteem II wordt beschonen en splitst dat molecuul water. De elektronen (brandende lampjes) worden doorgegeven aan cytochroom bf.
  - b. Cytochroom bf laat daarop de  $H^+$ -leerling vanuit het stroma door, die onder de tafel doorkruipt (of over de tafel heen) naar de binnenkant van het thylakoïd.
  - c. Er zijn nu 3  $H^+$ -leerlingen binnen het thylakoïd; ze bewegen (tegen elkaar botsend) naar ATP-synthase.
  - d. Zodra een  $H^+$ -leerling ATP-synthase raakt, draait ATP-synthase die  $H^+$ -leerling door naar het stroma en koppelt op het statief een geel Duplo<sup>®</sup>-blokje aan het ADP-wagentje.

### ronde 3 – de hele lichtreactie, maar nu door de uitbeelders verteld

5. Breng alle materialen (lampjes, Duplo<sup>®</sup>-moleculen) weer in de ‘begintoestand’.
6. Laat nu de leerlingen de complete lichtreactie achter elkaar uitvoeren. Leerlingen vertellen steeds wat ze doen, de docent helpt indien nodig.

### ronde 4 – en nu de toeschouwers

7. Breng alle materialen (lampjes, Duplo<sup>®</sup>-moleculen) weer in de ‘begintoestand’.
8. Laat nu de leerlingen die eerder toekeken de rollen van de uitvoerende leerlingen overnemen. Zij spelen nu de lichtreactie na en vertellen daarbij wat ze doen. De leerlingen uit ronde 1 t/m 3 krijgen de opdracht goed op te letten of de nieuwe acteurs het goed doen; ze mogen ingrijpen als ze een fout zien.

#### opmerkingen

De kans is groot dat leerlingen tijdens het uitbeelden vragen willen stellen. Daar kan je natuurlijk prima op ingaan. Eventueel kunnen ronde 1 of 2 een keer herhaald worden als dat gewenst is. Let goed op of iedereen het kan volgen en dat het niet chaotisch wordt; bouw je uitleg langzaam op. Laat je leerlingen in alle rondes nog echt één voor één handelen en vertellen wat ze op dat moment doen en waarom; dan is het makkelijker voor de toeschouwers om te controleren of iedereen het juist uitvoert en kan er ingegrepen worden om verbeteringen aan te brengen.

### (na)denkwerk

Belangrijke (begrips)vragen die tijdens of na het uitbeelden aan bod kunnen komen:

- Waarom zijn NADP<sup>+</sup>/NADPH en ADP/ATP uitgebeeld als wagentjes?
- Wat gebeurt er met de zuurstof die ontstaat? Laat leerlingen niet alleen bedenken wat er gebeurt maar laat de leerling die zuurstof speelt het ook uitvoeren! Deze leerling zal het lokaal moeten verlaten, maar wanneer gebeurt dat eigenlijk? Hij/zij is aanvankelijk maar in zijn eentje in de vorm van  $\frac{1}{2} \text{O}_2$ .
- Wat gebeurt er als halverwege het proces het licht (de twee lichtstralen) uitgaat? Bespreek de gevolgen voor de concentraties van afzonderlijke moleculen en de licht- en donkerreacties als geheel.
- Wat verandert er als je de cyclische fotofosforylering wilt uitbeelden?
- Liggen de betrokken membraaneiwitten altijd zo in deze volgorde in het membraan? Leg uit dat de ATP-synthases verspreid in het membraan liggen, maar dat de andere membraaneiwitten heel precies moeten samenwerken en dicht bij elkaar in deze vaste volgorde in het membraan voorkomen.

### aanpassen/uitbreiden

De Duplo<sup>®</sup>-wagentjes (ATP en NADPH) kunnen ook goed van pas komen als je dissimilatie behandelt of herhaalt. Verander dan NADPH in NADH door het gele blokje eraf te halen. Leerlingen leren zo meteen dat verschil tussen deze twee moleculen.



## 11. DONKERREACTIE MET LEGO®

### *thylakoïdtheater in de chloroklas (2)*

Bij de door leerlingen minst begrepen onderwerpen horen de licht- en donkerreactie van de fotosynthese en de lokalisatie daarvan in de chloroplast. Door plaats en proces uit te beelden met een klaslokaal als chloroplast met daarin een thylakoïdtheater van bewegende leerlingen met Duplo®-dingen als moleculen en fietslampjes als elektronen, wordt leerlingen duidelijk wat er nu echt gebeurt en ook waarom. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ruthy Fraterman (Vossius Gymnasium, Hogeschool van Amsterdam), Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam) en Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

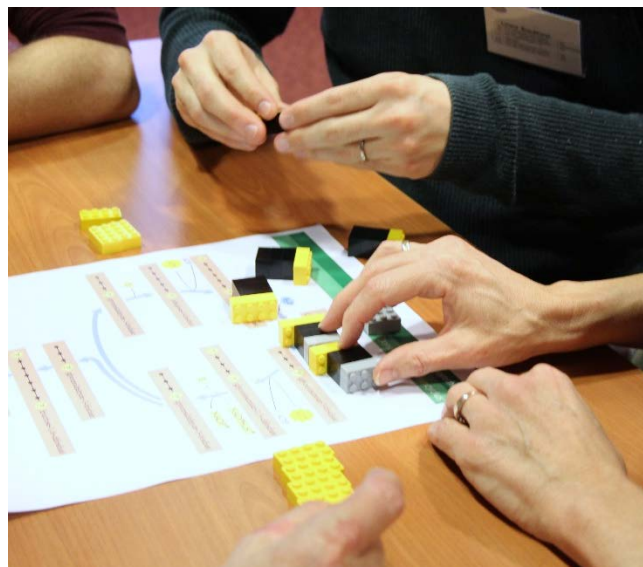
---

**duur** 20 minuten

**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen:

- (in grote lijnen) uitleggen hoe bij de donkerreactie glucose gevormd wordt;
- toelichten hoe de licht- en donkerreactie samenhangen.





### nodig

Per groepje van (ongeveer) vier leerlingen:

- 6 grijze (of lichtgroene) Lego®-steentjes (2x3) [C]
- 15 zwarte (of donkergroene) Lego®-steentjes (2x3) [C]
- 13 gele Lego®-steentjes (2x4) [P<sub>i</sub>]
- 1 kopie van de bewerkte Calvin-cyclus op A3-formaat (zie bijlagen)

### voorbereiding

Dit uitbeeldpracticum bestaat eigenlijk uit twee delen die na elkaar (in een blokuur of in verschillende lessen) uitgevoerd worden: de lichtreactie (zie het vorige practicum) en de donkerreactie. De lichtreactie wordt klassikaal gedaan; de donkerreactie wordt daarna in groepjes gedaan.

1. Zet tafels zó dat elk groepje leerlingen een eigen tafel heeft.
2. Leg op elke tafel een set Lego®-stenen (zie hieronder) en een groot vel met een bewerkt schema van de Calvin-cyclus (zonder details: alleen de pijlen, CO<sub>2</sub> en andere koolstofverbindingen, ATP en NADPH). In de bijlage zijn zulke bewerkte versies uit Binas en ScienceData te vinden.
3. Projecteer met de beamer dat bewerkte schema van de donkerreactie; zorg dat het originele schema ook beschikbaar is voor projectie (voor de nabespreking).



### uitvoering

Dit onderdeel kan ook klassikaal met Duplo<sup>®</sup> uitgevoerd worden. Het voordeel daarvan is dezelfde schaal als de lichtreactie, en dan worden de Duplo<sup>®</sup>-wagentjes (ATP en NADPH) ook echt gebruikt. Maar de Calvin-cyclus is lastiger in theatervorm voor de hele groep in beeld te brengen. We geven er de voorkeur aan (ook voor de afwisseling in de les en de activering van de leerlingen) om in kleinere groepen en met Lego<sup>®</sup>-stenen te werken.

1. Leerlingen krijgen per groepje een kopie van de (bewerkte) Calvin-cyclus en deze Lego<sup>®</sup>-steentjes:
  - 3 x ribulose-1,5-difosfaat (bestaand uit 5 zwarte blokjes met aan elk uiteinde een geel blokje)
  - 6 x losse C uit CO<sub>2</sub> (grijs)
  - 13 x P<sub>i</sub> (geel 2x4 blokje, overeenkomstig met de lichtreactie)
2. De docent legt uit wat de steentjes voorstellen (zie hierboven) en doet eventueel voor hoe de eerste omzetting verloopt - waar CO<sub>2</sub> vastgelegd wordt.
3. Leerlingen moeten door losmaken, vastklikken, schuiven én discussiëren de cyclus doorlopen en zo antwoord vinden op de volgende drie vragen:
  - a. Waarom kun je niet één glucosemolecuul maken door de Calvin-cyclus één keer te doorlopen – en hoe kan het dan wel?
  - b. Glucose is een energierijk molecuul; hoe en waar in de donkerreactie wordt die energie toegevoerd, en waar in het glucosemolecuul blijft die?
  - c. Hoeveel fietslampjes heb je ‘nodig’ voor één glucosemolecuul?
4. Bespreek de opdracht na. Hiervoor is de afbeelding uit 10voorBiologie (zie bijlage) nuttig, omdat daarin dezelfde aantallen C staan als de leerlingen in deze opdracht hebben gekregen.

### (na)denkwerk

- Tijdens het uitbeelden van de donkerreactie en het beantwoorden van de vragen kan je goed controleren of leerlingen het belang van de lichtreacties begrepen hebben. Benadruk de rol van ATP en NADPH en pak zo nodig de Duplo<sup>®</sup>-wagentjes er nog even bij.
- Benadruk dat er (net als bij de citroenzuurcyclus) niet werkelijk sprake is van een fysieke cyclus of cirkel. Alle betrokken stoffen bevinden zich door elkaar in het stroma. Als de citroenzuurcyclus al behandeld is, loont het de moeite de verschillen met de Calvin-cyclus te benoemen wat betreft de input en output van C, wat ook het antwoord op vraag a verklaart.
- Benadruk ook dat alle reacties door enzymen worden gekatalyseerd.

#### aanpassen/uitbreiden

- Er is een (qua tijd en aantal steentjes) snellere versie mogelijk. Daarbij wordt de cyclus maar één keer doorlopen, waarna door denken en discussiëren duidelijk moet worden wat het antwoord is op de vragen hierboven. Bij deze versie volstaan 6 zwarte steentjes voor C en 4 gele voor P. De stap van glyceraldehyde-3-fosfaat naar ribulose-5-fosfaat blijft dan een (uitdagend) mysterie.
- De Duplo<sup>®</sup>-wagentjes (ATP en NADPH) kunnen ook goed van pas komen als je dissimilatie behandelt of herhaalt. Verander dan NADPH in NADH door het gele blokje eraf te halen. Leerlingen leren zo meteen dat verschil tussen deze twee moleculen.

#### bijlage

- bewerkte schema's uit Binas, ScienceData en 10voorbiologie

## 12. DISSIMILATIE GLUCOSE MET LEGO®

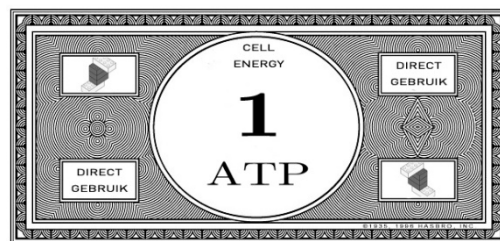
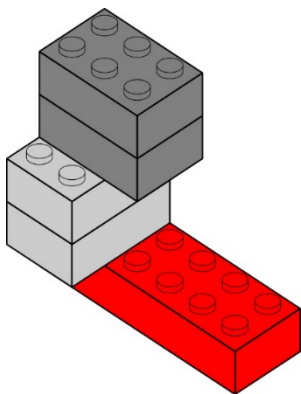
De dissimilatie van glucose is een complex proces, dat een groot aantal deelprocessen omvat die zich ook nog eens op verschillende plaatsen in de cel afspelen. Veel leerlingen voelen zich overweldigd door de bekende procesdiagrammen in Binas, en weten niet goed wat ze nou wel en niet van de dissimilatie moeten snappen en onthouden. Dit practicum is bedoeld om leerlingen te helpen een beeld te vormen van de hoofdlijnen van de dissimilatie van glucose. Ook het verband en onderscheid tussen enerzijds de afbraak van glucose zelf (uitgebeeld met Lego®-blokjes) en anderzijds het benutten van de energie die daaruit wordt vrijgemaakt komt duidelijk naar voren (uitgebeeld door het verzamelen en inwisselen van briefjes die energie vertegenwoordigen). Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

**duur** één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking

**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen:

- uitleggen dat de dissimilatie van glucose als doel heeft de chemische energie in glucose vrij te maken en te benutten voor de vorming van ATP;
- (in grote lijnen) beschrijven hoe glucose bij de glycolyse en de citroenzuurcyclus stap voor stap wordt afgebroken;
- aangeven waar in de cel deze processen zich afspelen;
- uitleggen dat voor elke omzetting een ander enzym nodig is;
- uitleggen dat bij sommige omzettingen direct ATP wordt gevormd, en dat bij andere omzettingen energierijke elektronen worden overgedragen op elektronendragers (NADH en FADH<sub>2</sub>);
- kunnen uitleggen waarom de citroenzuurcyclus geen echte cirkel is.



### nodig

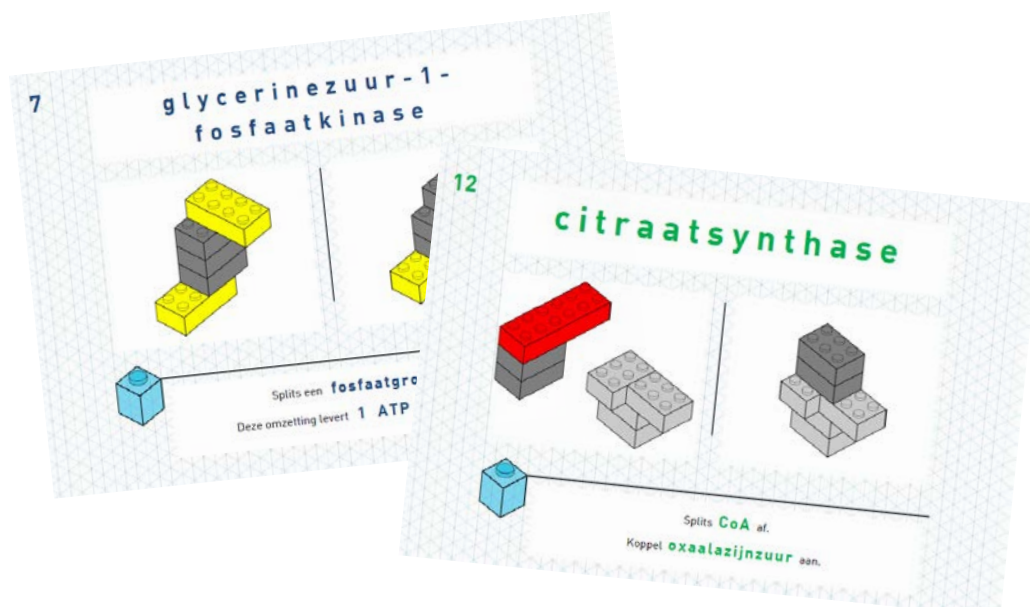
Per tweetal de volgende Lego®-blokjes:

- 6 zwarte Lego®-blokjes (2x3) [C]
- 2 gele Lego®-blokjes (2x4) [P<sub>i</sub>]
- 2 rode Lego®-blokjes (2x6) [CoA]
- 8 grijze Lego®-blokjes (2x3) [C]

Van de grijze en rode blokjes kun je in praktijk ook prima met kleinere aantallen uit de voeten, aanzien de leerlingen ná elkaar de verschillende stappen doorlopen, en CoA (de rode blokjes) en oxaalazijnzuur (opgebouwd uit grijze blokjes) kunnen worden hergebruikt.

### voorbereiding (eenmalig)

1. Print de enzymposters (elk één keer, in kleur).
2. Print ook de energiebriefjes (ATP, 10 ATP, GTP, NADH en FADH<sub>2</sub>). Dat kan gewoon in zwartwit, maar wel bij voorkeur op verschillende kleuren papier zodat de verschillende soorten briefjes makkelijk uit elkaar te houden zijn (geel papier voor ATP is fijn omdat de fosfaatgroepen ook voorgesteld worden door gele blokjes). Zorg voor (ruim) voldoende aantallen; per tweetal in elk geval één vel ATP (dat worden dus 10 briefjes) en één vel NADH (idem). Van de andere soorten briefjes mogen de aantallen wat kleiner zijn.
3. Knip of snij alle energiebriefjes los.
4. Print eventueel voor elk tweetal een instructieblad (zie bijlage).



### voorbereiding (per keer)

1. Vraag voor de uitvoering van het practicum een TOA, collega, of eventueel een leerling (een zittenblijver?) om bij de elektronentransportketen-bank te zitten, en de briefjes NADH en  $\text{FADH}_2$  van de leerlingen die klaar zijn in te wisselen voor ATP.
2. Bouw voor elk tweetal een glucosemolecuul (zes zwarte Lego®-blokjes van 2x3). Bouw ook zo veel mogelijk oxaalazijnzuurmoleculen (vier grijze Lego®-blokjes van 2x3 aan elkaar, zie enzymposter 12 voor een voorbeeld).
3. Verdeel de klas (of een andere ruimte) in twee delen, van elkaar gescheiden door een rij tafels of stoelen: dit zijn de membranen van het mitochondrium. Het ene deel van de ruimte is dan het cytoplasma, waar de reacties die horen bij de glycolyse plaatsvinden (enzym posters 1 t/m 10); het andere deel is (de matrix van) het mitochondrium, waar de reacties die horen bij de citroenzuurcyclus plaatsvinden (enzym posters 11 t/m 19) en de elektronentransportketen-bank zich bevindt (ook aan één of twee tafels). Als de situatie op school het toelaat kan ook het hele klaslokaal aangewezen worden als het mitochondrium, en de ruimte daarbuiten (de gang) als het cytoplasma.
4. Hang de enzym posters op, of leg ze neer op een rij tafels of op de grond. Leg waar nodig briefjes voor ATP, NADH en/of  $\text{FADH}_2$  neer, en Lego®-blokjes voor de fosfaatgroepen en CoA. Leg de oxaalazijnzuurmoleculen (in een bak) bij poster 11 in het mitochondrium.
5. Hang de poster bij de overgang van cytoplasma naar mitochondrium, en leg op de tafel bij de elektronentransportketen-bank de poster met de 'wisselkoersen'.

### uitvoering

1. Geef elk tweetal een glucosemolecuul en twee ATP (om te 'lenen'). Aan de hand van de instructies op de posters en het werkblad kunnen de leerlingen zelf de simulatie uitvoeren en het glucosemolecuul stap voor stap afbreken.
2. Om na de omzettingen in het cytoplasma in het mitochondrium te komen moeten leerlingen langs een 'controlepost'. Dat is een fijne plek om als docent te staan, om te kijken of alles goed is gegaan, en evt. instructie te geven of vragen te stellen. Leerlingen moeten hier de geleende ATP teruggeven, én twee ATP betalen voor het mee naar binnen nemen van twee NADH.
3. Als de citroenzuurcyclus twee keer is doorlopen is het glucosemolecuul als het goed is volledig afgebroken. De verzamelde energiebriefjes worden dan naar 'de bank' gebracht (de elektronentransportketen). Hier kunnen kaartjes NADH en  $\text{FADH}_2$  ingewisseld worden voor ATP.

### (na)denkwerk

1. Ga bij de nabespreking in ieder geval in op de leerdoelen die hierboven zijn geformuleerd.
2. Bespreek wat er wel en niet aan het model klopt (alleen de koolstofatomen zijn zichtbaar in het Lego®-model; afsplitsing van  $H_2O$  is dus niet te zien). Benadruk ook dat enzymen natuurlijk niet netjes op volgorde (of in een cirkel) in het cytoplasma of in de matrix van het mitochondrium liggen, maar zich kriskras door de vloeistof bewegen.
3. Laat de leerlingen nagaan welke koolstofatomen in de citroenzuurcyclus precies worden afgesplitst (dat zijn namelijk niet de koolstofatomen die het laatst aangekoppeld zijn door acetyl-CoA). Dat kun je mooi zien aan de oxaalazijnzuurmoleculen die na één cyclus overblijven: die bestaan dan uit twee grijze en twee zwarte blokjes.
4. Eventueel kan ingegaan worden op de relatieve grootte van de betrokken moleculen. Hoe groot is een fosfaatgroep ten opzichte van een koolstofatoom in werkelijkheid? En een molecuul NADH? En de enzymen?

### aanpassen/uitbreiden

- Je zou de glycolyse (of de citroenzuurcyclus) eventueel nog een keer kunnen laten uitbeelden, maar nu door individuele leerlingen één specifiek enzym te laten zijn en de glucosemoleculen (en de afgeleide koolwaterstofverbindingen) te verspreiden over de ruimte. Leerlingen lopen dan rond als enzym, en bij een binding met het juiste substraat vindt de omzetting plaats.

### bijlagen

- instructie voor leerlingen
- enzymposters
- energiebriefjes
- ander printbaar materiaal

## 13. DE ELEKTRONACHTBAAN

### *fotosynthese en dissimilatie in samenhang*

Zowel bij fotosynthese als bij de dissimilatie van glucose spelen redoxreacties een centrale rol. Leerlingen hoeven niet perse de chemische details van elke stap te snappen, maar het is wel belangrijk dat zij een grof beeld hebben van de verschillende energie-omzettingen die bij deze processen een rol spelen. Door de weg van één elektron te volgen – beginnend in een watermolecuul, van excitatie in fotosysteem II, via membraaneiwitten in de chloroplast, als onderdeel van organische verbindingen, tot aan de membraaneiwitten van de elektronentransportketen terug naar water – krijgen de leerlingen een beeld van de samenhang tussen fotosynthese en dissimilatie. De fysieke component is in dit practicum niet zo sterk aanwezig, maar de hoogte van de kraal is natuurlijk analoog aan de energierijkheid van het elektron. De opdracht die bij het practicum hoort is cognitief wél behoorlijk uitdagend; daarmee is dit practicum zeer geschikt voor formatieve toetsing ná een lessenserie over fotosynthese en dissimilatie. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

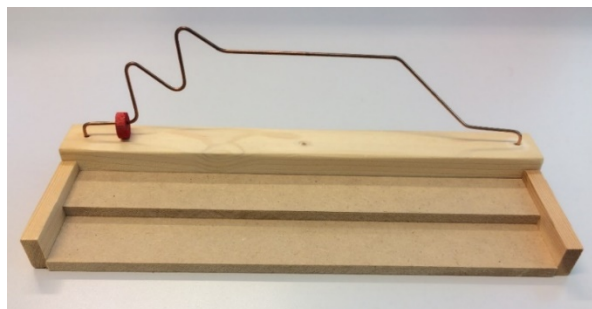
**duur** 20 minuten

**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen ervaren de samenhang tussen de fotosynthese en de dissimilatie van glucose, zowel wat betreft de materie (de opbouw en afbraak van koolwaterstofverbindingen) als wat betreft de energie (de energierijke elektronen).

**nodig** per tweetal:

- een kralenrek (zie bijlage voor de bouwstructuur)
- de bijbehorende kaartjes (zie bijlage)



### voorbereiding

1. Volg het bouwschema in de bijlage om een aantal kralenrekken zelf te maken (of vraag hier een collega voor die daar handig in is). In principe kunnen twee leerlingen met één kralenrek werken; met vijf sets kunnen dus steeds 10 leerlingen tegelijkertijd aan de slag zijn (en dan rouleren).
2. Print de kaartjes (op dik papier, dan zijn ze ook makkelijker herbruikbaar).
3. Knip de kaartjes uit.

### uitvoering

1. Laat leerlingen in tweetallen aan deze opdracht werken.
2. De instructie voor de leerlingen is als volgt (zie ook bijlage):
  - We volgen de weg van één elektron, beginnend bij de fotosynthese in de bladgroenkorrel, via een glucosemolecuul, en eindigend bij de oxidatieve fosforylering in het mitochondrium. De kraal is het elektron, de koperdraad (de achtbaan) is de weg van bladgroenkorrel (links) tot mitochondrium (rechts).
  - Beweeg de kraal met je vinger langs de achtbaan. De hoogte van de kraal staat voor het energieniveau van het elektron. Aan het begin en aan het eind van de achtbaan bevindt het elektron zich dichtbij de kern, in de grondtoestand. Tijdens zijn reis wordt het elektron aangeslagen (geëxciteerd) en staat het ook weer energie af. Voel je waar dat gebeurt?
  - Het elektron is achtereenvolgens gekoppeld aan verschillende moleculen of molecuulcomplexen. Leg de kaartjes met de moleculen en de eiwitcomplexen van links naar rechts op de goede volgorde onder de achtbaan (op de bovenste rij). Gebruik eventueel je Binas.
  - Tijdens de reis van het elektron treden verschillende processen op. Leg de kaartjes met de processen van links naar rechts op de juiste plek onder de achtbaan (op de onderste rij). Gebruik eventueel je Binas.
3. Leerlingen kunnen in eerste instantie behoorlijk vastlopen bij dit practicum opdracht. Een eerste tip zou kunnen zijn om te beginnen de stoffen (moleculen en eiwitcomplexen) te scheiden van de processen (deze zijn schuingedrukt).

### bijlagen

- bouw instructies
- kaartjes
- instructies voor de leerlingen



## 14. CHROMOMEN IN TOUW

### *erfelijkheid met kralen en touwtjes*

Het chromosoommodel dat hier wordt beschreven kost enige tijd om te maken, maar kan vervolgens jarenlang in verschillende lessen en leerjaren gebruikt worden. De eerste keer dat je leerlingen met het model laat werken kun je gebruik maken van de practicuminstructies hieronder. In vervollessen, over verschillende typen kruisingen, kan het model naar behoefte ter ondersteuning gebruikt worden. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking, voor de introductie van het model; in vervollessen over verschillende typen kruisingen kan het model ter ondersteuning gebruikt worden
doelgroep	derde klas havo/vwo, bovenbouw vmbo/havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• uitleggen wat bedoeld wordt met de begrippen gen, allel, dominant, recessief, homozygoot, heterozygoot, chromosoom, chromosomenpaar, autosoom, en geslachtschromosoom;</li> <li>• kruisingsvraagstukken oplossen, waaronder monohybride kruisingen, dihybride kruisingen (bij onafhankelijke en gekoppelde overerving), X-chromosomale overerving, en multiële allelen.</li> </ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• chromosoommodel, gemaakt van touwtjes en kralen (zie verderop)</li> </ul>



### voorbereiding (eenmalig)

1. Maak van vijf verschillende kleuren koord (meubel- of jassenkoord<sup>1</sup>) en grote houten kralen een chromosoommodel. De kralen zelf hoeven niet perse gekleurd te zijn. Per set heb je 10 koordjes en 12 kralen nodig. Het is prettig om in totaal zo'n 10 tot 15 sets te hebben om leerlingen in tweetallen (of kleine groepjes) te kunnen laten werken.
2. Knip de koordjes in verschillende lengtes (per kleur moet de lengte natuurlijk wel steeds hetzelfde zijn). Schuif om elk koordje één kraal (en bij één kleur koord nog een tweede kraal, voor gekoppelde overerving). Leg in beide uiteinden van het koordje een knoop.
3. Schrijf de letters van de allelen op de kralen. Gebruik de legenda (zie bijlage) als voorbeeld; maar naar eigen inzicht kleuren, genen en eigenschappen kiezen is natuurlijk ook een optie.
4. Verzamel de sets (10 touwtjes die de chromosomen van één diploïde cel voorstellen) in gripzakjes (zip-lock bags) of plastic potjes.

### voorbereiding (per keer)

1. Print voor elke leerling de legenda, het blad 'nakomelingen produceren' en het overzicht met verschillende soorten kruisingen.
2. Maak daarnaast een aantal afdrukken van het kruisingsschema met cellen (op A3-papier).

### uitvoering

#### *het model verkennen*

1. Geef leerlingen per tweetal een set touwtjes. Deel ook de legenda en het blad 'nakomelingen produceren' uit.
2. Laat leerlingen de eerste keer dat ze met het model werken het model bestuderen. Wat stellen de touwtjes voor? En wat de kralen? Wat valt verder op (van elke kleur touwtjes zijn er twee, van één kleur hebben de chromosomen niet zelfde lengte)? Herhaal eventueel de begrippen diploïd, haploïd, autosoom en geslachtschromosoom.
3. Bespreek hier eventueel ook wat er niet aan het model klopt (zie (na)denkwerk).
4. Vraag de leerlingen of ze aan de hand van het model kunnen uitleggen wat het verschil is tussen een gen en een allel.
5. Laat de leerlingen – met behulp van de legenda – op basis van hun eigen genotype uitzoeken welk fenotype ze hebben. Dat noteren ze op het blad 'nakomelingen produceren'.

---





<sup>1</sup> Zie bijvoorbeeld: [www.furnituren4fun.eu](http://www.furnituren4fun.eu).

*geslachtscellen maken en nakomelingen produceren*

6. Laat de leerlingen nu een partner kiezen (dus een tweetal met een genotype van het andere geslacht), en het fenotype en eventueel het genotype van deze partner opschrijven.
7. Leerlingen gaan nu samen met deze partner een aantal nakomelingen produceren. Ze vormen eerst geslachtscellen door (willekeurig!) van elke kleur één touwtje te kiezen.
8. De mannelijke geslachtscel wordt dan aan de vrouwelijke toegevoegd, dat is de bevruchting.
9. Vervolgens worden het fenotype en het genotype van de nakomeling genoteerd.
10. Voor de volgende nakomelingen worden stap 7, 8 en 9 herhaald.

*Kansen bij monohybride kruisingen (kan natuurlijk ook een volgende les)*

11. Bespreek vervolgens met de leerlingen of een nakomeling alle eigenschappen kan hebben (nee, dat is natuurlijk afhankelijk van de genotypen van de ouders), én of de kans op verschillende mogelijke eigenschappen even groot is (nee, de kans op homozygoot recessieve individuen is vaak kleiner).
12. Vraag of iemand een voorbeeld kan geven (uit de simulatie) van een kruising waarbij beide ouders heterozygoot zijn. Vraag de leerlingen wat in zo'n geval de kans is op een homozygoot dominant, een heterozygoot en een homozygoot recessief individu.
13. Gebruik nu het chromosoommodel om de koppeling te maken tussen enerzijds de meiose (en de vorming van de geslachtscellen) en anderzijds het berekenen van kansen bij het oplossen van kruisingsvraagstukken. Deel de kruisingsschema's uit (één per groepje). Laat leerlingen nu één genenpaar kiezen, en met hun touwtjes de bovenste rij en de linker kolom van het schema 'invullen'. Het schema kan nu (op een los blaadje of in een schrift) overgenomen worden, en de kans op de verschillende genotypen en fenotypen bij de nakomelingen worden berekend.
14. Laat de leerlingen hetzelfde nog eens doen voor een of twee andere genenparen.

		Welke chromosomen (en de daarop liggende genen) van de vader kunnen bij de meiose in een spermacel terecht komen?	
			
Welke chromosomen (en de daarop liggende genen) van de moeder kunnen bij de meiose in een eicel terecht komen?			
			

### (na)denkwerk

- Bespreek wat wel en niet aan het model klopt. In dit model lijken de genen/allelen op (of om) het chromosoom te liggen, en gemaakt te zijn van een ander materiaal; in werkelijkheid zijn genen/allelen natuurlijk delen van het DNA-molecuul waar het chromosoom zelf uit bestaat. Ook hebben chromosomen in werkelijkheid geen verschillende kleuren (wel verschillende lengtes).

### aanpassen/uitbreiden

- Bij het vormen van geslachtscellen en het uitbeelden van de bevruchting kun je leerlingen eventueel ook echt papieren geslachtscellen laten maken<sup>2</sup>. Tweetallen die (volgens het chromosoommodel) een jongen zijn, maken een spermacel door een papieren puntzak te vouwen, en een hier een strook papier (de staart) aan vast te nieten. Tweetallen die een meisje zijn krijgen een grote envelop die de eicel voorstelt. De vijf touwtjes die in de geslachtscel terechtkomen worden vervolgens in de puntzak of envelop gedaan. Tenslotte gooien de jongens hun spermacel naar de meisjes en vindt bevruchting plaats.
- In vervolglussen over verschillende typen kruisingen kan het chromosoommodel ter ondersteuning gebruikt worden, bijvoorbeeld bij ‘gewone’ monohybride kruisingen, dihybride kruisingen (bij onafhankelijke en gekoppelde overerving), X-chromosomale overerving, en multiële allelen.
- Hetzelfde model kan gebruikt worden voor uitbeeldpractica over mitose en meiose (zie practicum 17).

### bijlagen

- chromosomen in touw – legenda
- chromosomen in touw – nakomelingen produceren
- chromosomen in touw – overzicht kruisingen
- chromosomen in touw – kruisingsschema met cellen

---

<sup>2</sup> Naar een idee van Tomás de Schutter (voorheen Spinoza Lyceum, Amsterdam).

## 15. FOK JE IDEALE KIP

### *polyhybride kruisingen met kaartjes*

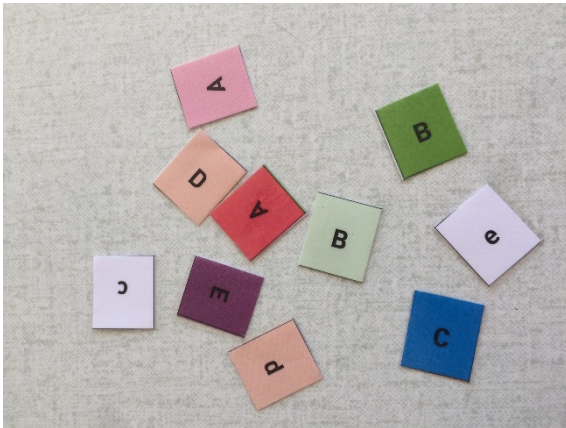
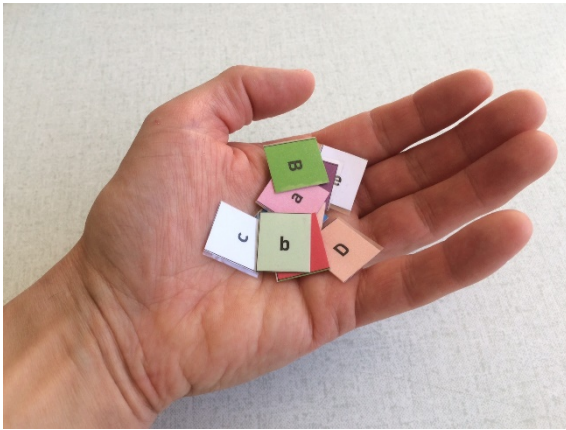
Leerlingen krijgen de opdracht om een kip te fokken met bepaalde eigenschappen. Hiervoor moeten zij eerst kiezen welk genotype deze ‘ideale kip’ moet hebben, en vervolgens gericht selecteren met welke haan en kip wordt verder gekruist. Dit practicum vormt een leuke startopdracht bij het thema genetica. De termen dominant en recessief, en homo- en heterozygoot moeten bekend zijn, maar verder hoeven leerlingen (nog) niks te weten over het berekenen van kansen bij kruisingen. Dit uitbeeldpracticum is onderdeel van de lessenreeks *Variatie in Vee*, in 2010 ontwikkeld door Caspar Geraedts en Gilles de Hollander, destijds beiden werkzaam bij De Praktijk, natuurwetenschappelijk onderwijs.

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	derde klas havo/vwo, bovenbouw vmbo/havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• uitleggen hoe door kunstmatige selectie (fokken) eigenschappen van dieren kunnen veranderen, en welke rol genen hier bij spelen;</li> <li>• uitleggen dat bij een kruising tussen twee heterozygote individuen de kans op homozygoot recessieve nakomelingen kleiner is dan de kans op nakomelingen met het dominante fenotype;</li> <li>• uitleggen dat door fokken de genetische diversiteit in de populatie afneemt.</li> </ul>
nodig	<p>per groep van ongeveer vijf leerlingen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• een set allelkaartjes</li> <li>• een stamboek</li> <li>• één of enkele exemplaren van de opdracht (pagina 4 t/m 6 uit de bijlage <i>Variatie in Vee</i>)</li> </ul>

### voorbereiding

1. Print het document 'fok je ideale kip - allelkaartjes' in kleur uit (let op: één print per groep van vijf leerlingen). Knip of snij de stroken met de letters uit.
2. Vouw iedere strook in de lengterichting dubbel, zodat aan beide zijden letters te zien zijn. Voor het beste resultaat kunt u de (dubbelgevouwen) stroken nu lamineren. Als u niet beschikt over een lamineerapparaat kunt de stroken natuurlijk ook dichtlijmen (in de vouw).
3. Knip tenslotte ieder afzonderlijk kaartje los. Als het goed is heeft u nu (per groepje) 30 kaartjes waarop aan beide kanten één allel (letter) te zien is. Het is handig om iedere set kaartjes in een envelop of een doosje bij elkaar te houden.
4. Print per groepje ook één set van het leerlingmateriaal: de opdracht op pagina 4 t/m 6 uit *Variatie in Vee*, en het stamboek (zie bijlagen).



### uitvoering

1. Verdeel de klas in groepjes van vijf. Deel de allelkaartjes, en stamboek en de opdracht uit.
2. Geef ieder groepje een fokopdracht (zie vraag 2). Eventueel kunt u de informatie over de vijf genen klassikaal doornemen, en bespreken welke genen en genotypen voor welke fokopdracht van belang zijn (vraag 3).
3. Leerlingen gaan nu proberen met behulp van de allelkaartjes hun ‘ideale kip’ te fokken. Voordat de leerlingen beginnen met kruisen is het slim om even voor te doen hoe ze met behulp van de kaartjes de genotypen van de nakomelingen moeten bepalen:
  - a. de kaartjes die overeenkomen met de genotypen van de ouderkippen uitzoeken (vijf kaartjes van elke ouder);
  - b. de tien kaartjes in de hand nemen, schudden en op tafel laten vallen;
  - c. noteren welke allelen worden doorgegeven aan de nakomeling (namelijk de allelen die bovenliggen).
4. Bespreek (nu of achteraf) ook wat dat in de lucht gooien nou eigenlijk betekent? Benadruk de relatie met de meiose, waarbij één van beide allelen van een genenpaar (één van beide chromosomen van een chromosomenpaar) wordt doorgegeven.
5. Laat leerlingen vervolgens zelf aan de slag gaan.
6. Na een paar generaties zullen de meeste groepjes een eind op weg zijn in het bereiken van hun ideale kip. Om wél het gewenste genotype te bereiken zal het meestal voldoende zijn om nog een aantal generaties door te fokken. Mocht een groepje per ongeluk een allel dat ze juist graag willen hebben zijn kwijtgeraakt is kruisen met een kip uit een ander groepje een optie.

### (na)denkwerk

- Zijn leerlingen erin geslaagd hun ideale kip te fokken? Wat moet er gebeuren om de eigenschappen van dit kippenras verschillende generaties vast te houden?
- Bespreek wat wel en niet aan model klopt. In deze simulatie gingen we uit van een één op één relatie tussen een gen en een eigenschap. In werkelijkheid worden de meeste eigenschappen van een organisme door meerdere genen (en omgevingsfactoren) bepaald. Verder gingen we in deze simulatie uit van een relatief beperkt aantal nakomelingen (6).
- Ga ook in op de gevolgen van intensieve kunstmatige selectie (zowel bij het fokken van dieren als het veredelen van planten) op de variatie in de genenpoel.
- Als leerlingen met stamboomvraagstukken aan de slag gaan hebben ze soms het idee dat het genotype van bestaande nakomelingen invloed hebben op de kans op een bepaald genotype van nieuwe nakomelingen ('Er zijn al drie kinderen met een dominant fenotype, dan moet de volgende wel recessief zijn.'). Om dat misconception te voorkomen kun je bij deze simulatie de vraag stellen of de verschillende 'werpen' invloed op elkaar hebben. Wordt de kans op een homozygoot recessief individu bijvoorbeeld groter nadat er al twee keer een heterozygoot individu is gegooid?

### aanpassen/uitbreiden

- Het practicum *Fok je ideale kip* is onderdeel van de lessenserie *Variatie in Vee*, en valt dus goed te combineren met andere delen uit deze lessenserie (zie bijlagen). Op pagina 12 en 13 wordt bijvoorbeeld een uitbeeldpracticum over inteelt beschreven.
- Dit practicum is verder uitgewerkt tot een lessenserie over evolutie door In 't Veld, Blok, Geraedts & de Visser (2021)<sup>1</sup>. Hierin gaan leerlingen met behulp van Excel aan de slag met het genereren en verwerken van data uit het 'fokprogramma'.

### bijlagen

- alle kaartjes
- stamboek
- *Variatie in Vee* (leerlingmateriaal), met op pagina 4 t/m 6 de opdracht *Fok je ideale kip*
- *Variatie in Vee* (docentenhandleiding)

---

<sup>1</sup> In 't Veld, S., Blok, S., Geraedts, C. & de Visser, A. (2021). Kippenevolutie digitaal. Onderzoekend leren ter bevordering van motivatie en interactie. NVOX, 2021(3), p. 6-8.



## 16. GEKOPPELDE OVERERVING MET LEGO®

### *de mooiste vis van de zee*

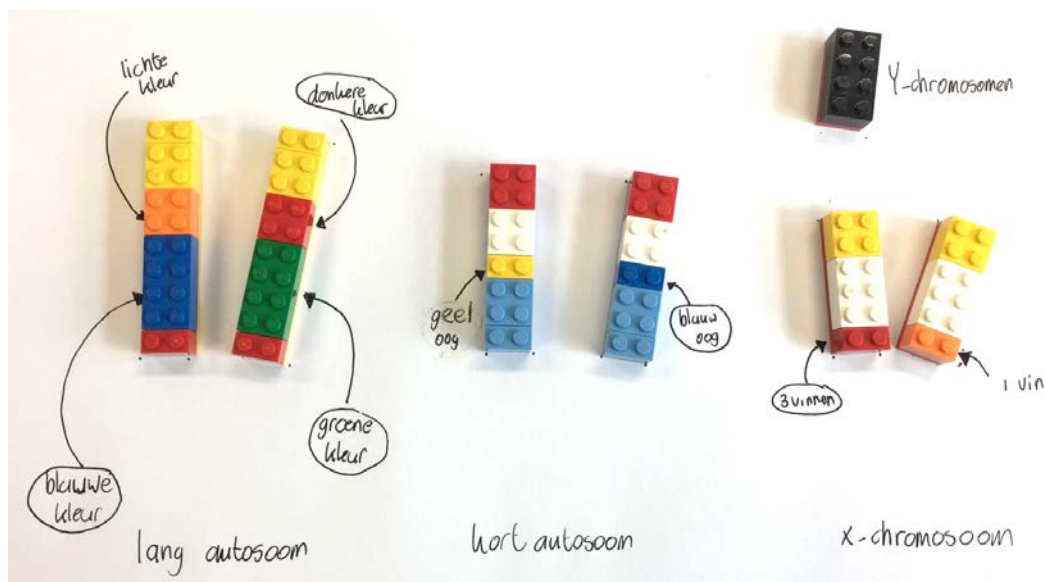
Leerlingen vinden het onderscheid tussen gekoppelde en onafhankelijke overerving vaak lastig. In deze simulatie voeren ze een kruising uit met heel veel nakomelingen, en zien ze meteen dat bepaalde allelencombinaties niet voorkomen. En passant wordt ook X-chromosomale overerving meegenomen. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem), in samenwerking met Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

**duur** één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking

**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen:

- uitleggen dat bij gekoppelde overerving bepaalde allelencombinaties niet voor kunnen komen;
- aangeven wat het onderscheid is tussen X-chromosomale en autosomale overerving.



### nodig

Voor dit uitbeeldpracticum heb je per leerling drie chromosomenparen nodig. De samenstelling daarvan kan je natuurlijk af laten hangen van je eigen Lego®-voorraad. Wij hebben gekozen voor de kleuren en groottes die op de vorige pagina staan afgebeeld. Let op: de Lego®-blokjes zijn vastgeklit op Lego®-plaatjes waardoor ze aan elkaar vast blijven zitten (gekoppeld zijn). Je kan natuurlijk ook verschillend gekleurde blokjes als een torentje op elkaar zetten als dat beter uitkomt.

### voorbereiding

1. Stel de chromosomen samen.
2. Print het leerlingenblad uit.
3. Print bovenstaande foto ook uit als geheugensteuntje voor de leerlingen (of projecteer met behulp van de beamer).

### uitvoering

1. Deel het leerlingenblad uit en geef de leerlingen tijd om te lezen.
2. Doe het voorplanten één keer voor. Zeg even kort dat ze wel even op moeten letten dat een man met een vrouw moet voortplanten en dat beide ouders 2 van de 4 nakomelingen noteren.
3. Laat de leerlingen twee sets autosomen pakken en deel zelf de geslachtschromosomen uit, dan kan je ervoor zorgen dat er net zoveel mannetjes als vrouwtjes komen (en dat de grootste macho natuurlijk een vrouwtje wordt).
4. Laat ze lekker voorplanten.
5. Zodra een leerling zich zes keer heeft voortgeplant, laat je de uitkomsten in het verzamelschema op het bord noteren.
6. Geef de leerlingen tijd om de vragen op de achterkant te maken.

### (na)denkwerk

- Afgezien van het bespreken van de vragen die op het leerlingenblad staan, is het ook altijd goed om te kijken waar het model (de simulatie) overeenkomt met de werkelijkheid en waar niet. Daar kun je onderstaande vragen voor gebruiken.
  - Hoeveel chromosomen of chromosomenparen waren dit?
  - Hoeveel zou dit bij de mens zijn geweest?
  - Hoeveel genen lagen er op de chromosomen. Is dat een reëel aantal?
  - Als je kijkt naar de genen die we niet bestudeert hebben, waren de vissen homo- of heterozygoot voor deze eigenschappen? Is dat in werkelijkheid waarschijnlijk?
  - Hier zitten de genen vast op een strookje Lego. Hoe zit dat bij echte chromosomen?

### bijlagen

- leerlingenblad

## 17. MITOSE EN MEIOSE MET TOUWTJES

In dit practicum beelden de leerlingen de fasen van de mitose en/of de meiose uit met behulp van gekleurde koordjes die chromosomen voorstellen. Dit practicum kan de leerlingen helpen grip te krijgen op wat er in de opeenvolgende fasen gebeurt. Om leerlingen duidelijk te maken dat chromosomen alleen tijdens de mitose en meiose gespiraliseerd zijn, wordt gekleurd garen gebruikt als model voor ongespiraliseerde chromosomen. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	derde klas havo/vwo, bovenbouw vmbo/havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• uitleggen wat de begrippen chromosoom, chromosomenpaar en chromatide betekenen;</li><li>• beschrijven wat er in de verschillende fasen van de mitose en de meiose gebeurt;</li><li>• uitleggen dat chromosomen tijdens de mitose en de meiose gespiraliseerd zijn (en dat het voor een delende cel veel lastiger zou zijn om ongespiraliseerde chromosomen te verdelen over de dochtercellen).</li></ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"><li>• chromosoommodel, gemaakt van drie kleuren koord (zie verderop); voor dit practicum kan hetzelfde chromosoommodel gebruikt worden dat beschreven wordt in practicum 14</li><li>• drie kleuren garen (corresponderend met de kleuren van de koordjes)</li><li>• gripzakjes (zip-lock bags)</li><li>• A3-papier (en eventueel stift)</li></ul>

#### voorbereiding (eenmalig)

1. Maak een chromosoommodel van drie verschillende kleuren koord (bijvoorbeeld meubel- of jassenkoord<sup>1</sup>). Voor dit practicum kan hetzelfde chromosoommodel gebruikt worden dat beschreven wordt in practicum 14 (in dat geval moet eigenlijk wel rekening gehouden worden met de allelen: twee zusterchromatiden hebben natuurlijk in principe dezelfde allelen).
2. Het is prettig om in totaal zo'n 10 tot 15 sets chromosomen te hebben om leerlingen in tweetallen (of kleine groepjes) te kunnen laten werken. Let op: een set bestaat in dit geval uit vier touwtjes van elke kleur.
3. De koordjes stellen in dit practicum specifiek *gespiraliseerde* chromosomen voor. Het plastic gripzakje stelt dan het kernmembraan voor. Gebruik drie kleuren garen (die corresponderen met de kleuren van de koordjes) om een model te maken van een celkern met *ongespiraliseerde* chromosomen. Vul twee zakjes met garen; met in het ene zakje twee keer zoveel garen als in het andere. Het eerste zakje stelt dan een celkern voor in de G<sub>0</sub>- of G<sub>1</sub>-fase; het tweede zakje een cel in de G<sub>2</sub>-fase (na DNA-replicatie).



---

<sup>1</sup> Zie bijvoorbeeld: [www.furnituren4fun.eu](http://www.furnituren4fun.eu).

### voorbereiding mitose

1. Print voor elke leerling of tweetal het werkblad mitose (zie bijlage).
2. Het model is het krachtigst als de zusterchromatiden ook echt aan elkaar vast zitten. Bind daarom bij voorkeur van elke set de zusterchromatiden aan elkaar vast met garen; dat wordt het centromeer. Elke set bestaat nu uit twee keer twee aan elkaar gebonden touwtjes, in drie kleuren.
3. Hang eventueel twee lange draden garen van één kleur (4 tot 5 meter) ergens op ooghoogte in het klaslokaal, parallel naast elkaar. Plak de draden op één plek met een plakbandje aan elkaar (dat is het centromeer). Leerlingen krijgen hierdoor een indruk van de lengte die DNA-moleculen / chromosomen zouden hebben als ze niet opgevouwen zouden liggen in de celkern.
4. Zorg ervoor dat leerlingen hun Binas bij de hand hebben.

### uitvoering mitose

1. Laat de twee zakjes met garen zien, en vertel dat deze celkernen voorstellen. Laat een paar leerlingen echt goed kijken en eventueel voelen aan de zakjes om te constateren dat in het ene zakje veel meer garen (DNA) zit dan in het andere.
2. Vraag de leerlingen in welke fase van de celcyclus deze celkernen zich bevinden (zie Binas 76A).
3. Vraag kort na wat leerlingen (nog of al) weten over DNA-replicatie. Vertel dat na DNA-replicatie de eigenlijke kerndeling (mitose) kan plaatsvinden.
4. Wijs leerlingen op de twee lange draden garen (met ergens in het midden de centromeer) die in de klas gespannen zijn: deze draden stellen dubbelstrengs DNA-moleculen voor (opgerold om eiwitten zouden we ze chromosomen noemen). Er heeft al DNA-replicatie plaatsgevonden, dus er liggen twee identieke moleculen naast elkaar, maar ze zitten nog wel aan elkaar vast. Van deze draden moet er dus één naar elke dochtercel.
5. Laat nogmaals het zakje met garen zien dat de G<sub>2</sub>-fase voorstelt. Vraag de leerlingen wie zin zou hebben om deze draden (DNA-moleculen) netjes te verdelen over twee zakjes. Laat nu een zak met touwtjes (gespiraliseerde chromosomen) zien. Wat is hier gebeurd? Waarom is het verdelen van chromosomen op deze manier een stuk eenvoudiger?
6. De leerlingen gaan vervolgens zelf uitbeelden hoe het proces mitose precies in z'n werk gaat. Ze mogen hierbij ook Binas gebruiken (tabel 76B). Deel de werkbladen uit, en geef ieder tweetal (of drietal) een set touwtjes in een gripzakje, een tweede gripzakje, een vel A3-papier (met daarop de omtrek van de oudercel getekend) en een stift.
7. Het is de bedoeling dat leerlingen uiteindelijk van elke fase van de mitose een foto maken. Deze foto's sturen ze op naar jou als docent (per email).
8. Soms aarzelen leerlingen om de touwtjes echt uit elkaar te trekken (het centromeer te verbreken). Dat is natuurlijk wel de bedoeling.
9. Je kan tijdens de nabespreking eventueel gebruik maken van het volgende filmpje: [https://youtu.be/Z8MNVX\\_Rask](https://youtu.be/Z8MNVX_Rask).

### (na)denkwerk

- Ga tijdens de nabespreking in op de betekenis van de termen chromosoom, chromatide en chromosomenpaar.
- Ga ook in op de vraag hoe de chromosomen tijdens de mitose worden voortbewogen. Je zou kunnen stellen dat tijdens de simulatie de leerlingen zelf de rol van de trekdraden vervullen.
- Benadruk dat chromosomen in werkelijkheid niet verschillende kleuren hebben, maar wel een kenmerkende lengte en plek van het centromeer.

### aanpassen/uitbreiden

- In plaats van leerlingen foto's te laten maken van elke fase, zijn er ook alternatieve manieren om de simulatie vast te leggen:
  - Laat leerlingen een filmpje maken van de mitose, waarin een voice-over beschrijft wat er gebeurt. Eventueel kun je de leerlingen elkaars filmpjes nog laten becommentariëren in een volgende les.
  - Laat leerlingen, nadat ze het hele proces een keer hebben uitgebeeld, één fase van de mitose neerleggen, en de touwtjes vastplakken op het vel A3-papier (met plakband). Hang de vellen daarna in de goede volgorde naast elkaar in de klas.
- Laat leerlingen (in een volgende les) nu ook de meiose uitbeelden.

### bijlagen

- werkblad mitose

## 18. DIFFUSIE MET HOEDJES

Diffusie is een belangrijk proces dat in veel biologische contexten een rol speelt. Leerlingen hebben vaak de misvatting dat diffusie het resultaat is van doelgerichte bewegingen van moleculen. Middels dit uitbeeldpracticum ervaren leerlingen dat diffusie het gevolg is van willekeurige bewegingen van moleculen, maar dat het resultaat van diffusie ogenschijnlijk een richting heeft (een mooi voorbeeld van emergentie). Tot slot laat het practicum zien dat wanneer het evenwicht bereikt is, de beweging van ionen/moleculen niet stopt. Dit uitbeeldpracticum is beschreven in Krajšek en Vilhar (2010)<sup>1</sup>, en werd verder ontwikkeld door Tim Nieuwenhuis (Gerrit van der Veen College, Amsterdam).

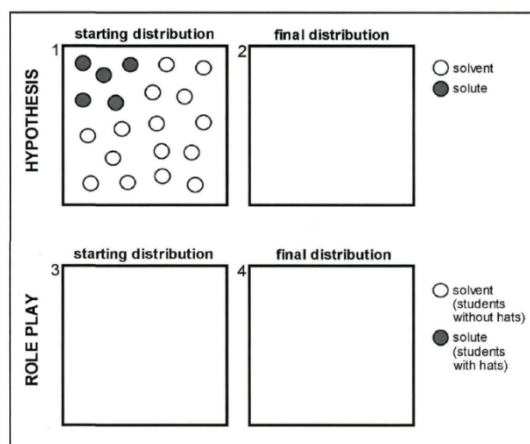
**duur** 10 minuten

**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen uitleggen wat diffusie is, en hoe dat (op moleculair niveau) verloopt.

**nodig**

- 10 tot 12 feesthoedjes
- een grote ruimte zonder tafels en stoelen
- een (online) metronoom die luid door de ruimte klinkt



<sup>1</sup> Krajšek, S.S. & Vilhar, B. (2010). Active teaching of diffusion through history of science, computer animation and role playing. *Journal of Biological Education*, 44(3), 116-122.



### voorbereiding

1. Zorg dat je iets hebt om een aantal leerlingen te laten opvallen of te markeren. Hier is gekozen voor feesthoedjes, maar dat kunnen natuurlijk net zo goed linten zijn die bij de gymles gebruikt worden. Tot slot zorg dat je genoeg ruimte hebt om de leerlingen rond te laten lopen.

### uitvoering

1. Bespreek met de leerlingen dat zij allen zelf een molecuul voorstellen, en straks gaan bewegen door de ruimte. Maak duidelijk dat moleculen kris kras door elkaar bewegen, en dat ieder molecuul in een rechte lijn beweegt totdat twee (of meer) moleculen op elkaar botsen en van richting veranderen (het botsen zelf laten we tijdens het uitbeelden achterwege, of alleen zachtjes).
2. Geef een deel van de leerlingen (ongeveer een derde) een hoedje.
3. Verzamel de groep met hoedjes in één hoek van de ruimte en laat de andere leerlingen zich verspreiden over de rest de ruimte.
4. Laat de leerlingen draaien om hun as (op hun plek) en laat ze op jouw teken stoppen. Zodoende zijn alle bewegingsrichtingen random.
5. Zet eventueel een metronoom aan ter indicatie van het looptempo. Tel af en laat de leerlingen lopen volgens de regels zoals bij punt 1 beschreven.
6. Op een gegeven moment zullen alle leerlingen met een hoedje min of meer verspreid zijn door de ruimte. Laat de leerlingen om zich heen kijken en het resultaat bekijken.

### (na)denkwerk

- Sta nog eens stil bij de beginsituatie: een hoge concentratie van leerlingen met hoedje in één hoek. Vergelijk de beginsituatie met de eindsituatie: hoe is nu de verdeling? Hoe is deze verdeling tot stand gekomen? Was deze verdeling een *doel* van het proces of *het resultaat* van het proces? Stopt de beweging van moleculen als er een evenwicht is bereikt? Benoem eventueel de termen statisch en dynamisch evenwicht.

### uitbreiden

- Je kan de simulatie ook zonder hoedjes doen. Start in een grote ruimte (de aula?). Verzamel alle leerlingen bij elkaar in één hoek en laat ze dan lopen. Je zal dan uiteindelijk een min of meer gelijke verdeling krijgen over de hele ruimte.
- Je kan het practicum uitbreiden door ook het effect van temperatuur op de beweging van de moleculen uit te beelden (metronoom gaat sneller tikken!).
- Tot slot kan je ook de verschillende factoren uit de wet van Fick betrekken door de simulatie in een andere (bijvoorbeeld langgerekte) ruimte uit te voeren, een (gedeeltelijke) tussenwand in de ruimte te plaatsen, of het concentratieverschil te variëren.



## 19. OSMO-GOOIEN

### *osmose en diffusie met proppen papier*

Osmose en diffusie zijn niet zulke geliefde begrippen in het biologie-onderwijs. Ze komen vaak op de proppen bij een eerste bovenbouwhoofdstuk over cellen en microscopie. Leerlingen vinden ze snel te abstract en weinig relevant. In dit uitbeeldpracticum maken we diffusie en osmose concreet door leerlingen te laten doen wat normaal in de klas verboden is: met proppen gooien. Dat geeft veel hilariteit, en de aard van de uitbeelding leidt ook tot kritisch nadenken over deze fysische processen en dus ook tot diagnose van misconcepten. Door de actieve, vrolijke vorm is dit een heel geschikt practicum voor een late (vrijdag)middagles. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	20 minuten, incl. nabespreking en opruimen
doelgroep	leerjaar 4 havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• concentratieverschil als basis van diffusie benoemen;</li> <li>• de rol van een semipermeabel membraan bij osmose beschrijven;</li> <li>• diffusie als random proces beschrijven aan de hand van wat er niet klopt aan het uitbeeldmodel;</li> <li>• verschillen tussen model en realiteit analyseren en benoemen.</li> </ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• witte A4-vellen, drie keer zoveel vellen als er leerlingen zijn; liefst hergebruik uit een prullenbak bij de kopieermachine (of ze bedrukt zijn is niet relevant, maar geen toetsen)</li> <li>• gekleurde A4-vellen, 0,5 x zoveel vellen als er leerlingen zijn</li> <li>• gang of andere open ruimte (zie instructie)</li> </ul>



### voorbereiding

1. Het is belangrijk te bedenken of dit uitbeeldpracticum als illustratie van een voorafgaande uitleg wordt gebruikt, of als introductie vóór uitleg. Voor de uitvoering maakt dat amper uit.
2. Bedenk welke ruimte het best geschikt is: een gang is ideaal, want dan hoeft er niet met stoelen en bankjes geschoven te worden. Een practicumlokaal is geen goed idee als er breekbare spullen langs de wand staan.
3. Omdat er veel gejoel kan zijn, is het verstandig collega's in nabije lokalen daarover in te lichten.

### uitvoering

1. Verdeel de klas (via genummerde hoofden) in twee willekeurige groepen die even groot zijn.
2. Positioneer de twee groepen zo ver mogelijk van elkaar tegenover elkaar.
3. In de ene groep krijgt elke leerling twee witte vellen papier, in de andere krijgt elke leerling één wit vel en één gekleurd vel.
4. Zet in het midden van de ruimte parallel aan de twee groepen een rij stoelen of krukken; die rij wordt benoemd als semipermeabel membraan. Als ze die term nog niet kennen moet je even uitleggen dat daar wel watermoleculen door kunnen maar geen grotere moleculen.
5. Met enig theater ("Luister goed naar deze ingewikkelde instructie!") moeten de witte vellen tot prop worden geknepen. De gekleurde moeten één keer langs de korte middellijn worden gevouwen.
6. Nu is het moment om uit te leggen dat de witte proppen kleine watermoleculen voorstellen en de gevouwen gekleurde vellen grote glucose- of suikermoleculen.
7. Als de begrippen diffusie en osmose nog niet bekend zijn moeten die nu even kort en simpel worden gedefinieerd; als ze wel bekend zijn moeten ze even worden teruggevraagd. Je kunt nu ook vragen of leerlingen al weten wat er nu gaat gebeuren en wat dat moet uitbeelden.
8. Na aftellen 3-2-1 mogen ze de proppen en vellen naar de 'overkant' gooien. Gewoon weer oprapen van de grond (aan de eigen kant van het membraan!!) en door blijven gooien, nog steeds van de grootste afstand. Aanmoediging is meestal niet meer nodig. De gekleurde vellen landen meestal vóór het 'membraan' (– en dat is het symbool dat ze daar niet doorheen kunnen).
9. Na een minuut gooien de boel stil leggen. Per groep moet nu één persoon alle proppen (en vellen) aan die kant toegestopt krijgen, bij elkaar leggen en het tellen.
10. Inventariseer de aantallen proppen en vellen aan elke kant en vraag wat het verschil is met de uitgangssituatie. Als het goed is zijn er nu aan de 'waterkant' minder proppen dan eerst en aan de 'glucosekant' meer, en is alle glucose aan die kant gebleven.
11. Vraag naar de conclusie. Er is dus water gediffundeerd van een plek met hoge 'waterconcentratie' naar de plek met lage 'waterconcentratie'. De conclusie dat glucose water aantrekt is te weerleggen met de waarneming dat water ook de andere kant op gaat.

### (na)denkwerk

- In de praktijk gooien leerlingen doelgericht op medeleerlingen. Diffusie is niet doelgericht maar random. Hoe zou je dat in dit osmo-gooien model kunnen vormgeven? (Suggestie: met ogen dicht gooien en telkens door iemand worden rondgedraaid voordat je recht voor je uit gooit)
- Het is de waarneming met de ogen en de besturing van hun armspieren die een prop ergens brengt. Welke ‘kracht’ zorgt dat moleculen in een medium diffunderen?
- Hoe zou je het semipermeabel membraan in dit model realistischer kunnen modelleren? Suggestie: volleybalnet waar proppen van A4 wel doorheen kunnen maar proppen van A3 niet.
- Het is belangrijk dat leerlingen leren dat opgeloste stoffen niet deelnemen aan de osmose, maar alleen water.
- Het model voldoet aan één belangrijk principe: er is een NETTO waterverplaatsing.

### aanpassen/uitbreiden

- Diffusie van water gaat door aquaporines en niet zomaar door het membraan. Laat leerlingen nadenken hoe je dat kunt vormgeven.
- Effecten van temperatuur en diffusie-oppervlak op de diffusiesnelheid kun je ook ter sprake brengen, maar laat die de kernprincipes niet overschaduwen.

### bijlagen

- Misconcepten over dit onderwerp met allerlei aanpakken vind je op [http://www.ntwpracticumnet.ou.nl/content-e/Kennisbank\\_biologie\\_misconcepten/](http://www.ntwpracticumnet.ou.nl/content-e/Kennisbank_biologie_misconcepten/) Zoek op 'Diffusie en osmose' en op 'Selectief celmembraan'.
- Ook leraren vinden dit leuk om te doen (foto Tycho Malmberg, NIBI-conferentie 2011). Je ziet dat hier geen mooie semipermeabel membraan is, dat moet beter.



## 20. MEMBRANEN MET ZEEP

Een (cel)membraan is te klein om met het blote oog te zien. Membranen worden steevast afgebeeld als een nogal ordelijke verzameling van fosfolipiden (vaste bolletjes met lijntjes eraan). Die plaatjes doen dus geen recht aan essentiële membraankenmerken als beweeglijkheid, flexibiliteit, en zelfherstellend vermogen. Dit practicum laat leerlingen spelen met zeep, en zo het 'gedrag' van membranen zelf ervaren. Resultaat: natte handen, verwondering én iets geleerd. Dit uitbeeldpracticum is gebaseerd op een idee van JConn | ClearBiology.com (2014) en andere online beschrijvingen, en werd verder ontwikkeld door Romke Koch (Het Amsterdams Lyceum).

---

**duur** één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking

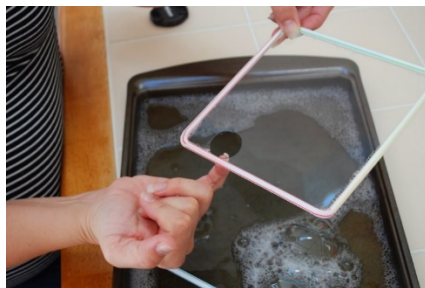
**doelgroep** onderbouw/bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen uitleggen:

- dat een membraan flexibel, zelfherstellend en dynamisch is;
- dat membranen kunnen versmelten (denk aan exo- en endocytose);
- dat transport over membranen soms via poorteiwitten loopt (transporteiwitten passen in de fosfolipide dubbellaag, waardoor een doorgang voor grote moleculen door het membraan ontstaat).

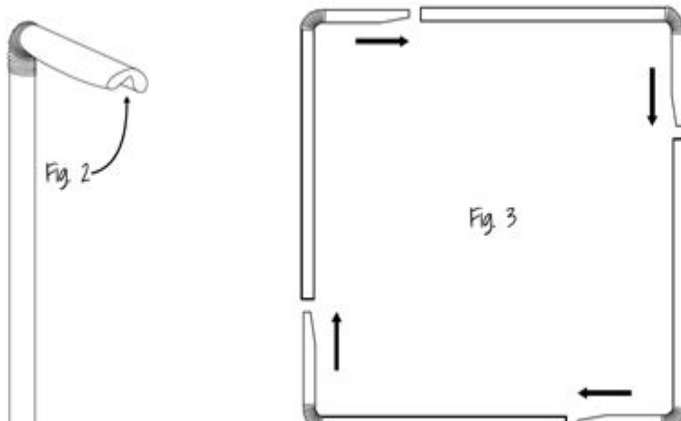
**nodig** per groepje van drie tot vijf leerlingen:

- een platte bak
- 4 drinkrietjes
- 30 cm naaigaren
- zeepoplossing:
  - 900 ml water
  - 100 ml Dubro groen afwasmiddel
  - 25 ml glycerol



### voorbereiding

1. Print het leerlingenmateriaal.
2. Maak de zeepoplossing.
3. Zet de rietjes in elkaar (zie afbeelding).



### uitvoering

1. Leg uit dat zeepmoleculen lijken op fosfolipiden, en dat zeep dus gebruikt kan worden om het de eigenschappen en het 'gedrag' van membranen te exploreren.
2. Laat leerlingen het practicum stap voor stap uitvoeren, en de vragen beantwoorden. Maar laat ook enigszins ruimte voor vrij experimenteren en verwondering. Nadat de opdrachten afgerond zijn (of eerder), zijn er bijvoorbeeld altijd leerlingen die grote bellen proberen te maken. Bekijk samen hoe die zich in de lucht bewegen en samensmelten met andere bellen.
3. Loop rond. Help. Stel vragen. Zorg dat leerlingen natte handen hebben als ze een bel niet uit elkaar willen laten spatten. Help leerlingen om het geknoopte naaigaren in de zeepbel te leggen en deze door te prikken.
4. Demonstreer eventueel tijdens het practicum klassikaal hoe bepaalde stappen uitgevoerd moeten worden (en/of leg uit wat daarmee uitgebeeld wordt).
5. Wat in ieder geval magisch is om te laten zien zijn gesimuleerde 'klievingsdelingen': zorg voor een (grote) zeepbel die in de bak drijft, span in het water onder de bel een stukje naaigaren tussen je handen, en beweeg de draad snel omhoog: je 'klieft' zo de zeepbel in tweeën. Kijk hoe vaak je dit kan herhalen.
6. Laat leerlingen uiteindelijk ook het Venn-diagram invullen (waarin overeenkomsten en verschillen tussen model en werkelijkheid worden geïnventariseerd), en bespreek dit.

### bijlagen

- leerlingenmateriaal

## 21. EXO- EN ENDOCYTOSE MET LIJVEN

Tijdens het leren over de bouw van het membraan en de vormen van transport die er zijn over het membraan heen, wordt de kracht van het endomembraansysteem vaak onderschat. Uitleg hierover kan met een aantal hulpmiddelen en een groepsuitbeelding inzichtelijk gemaakt worden. Nadat uitleg is gegeven over de bouw van het membraan en exo- en endocytose kan moeiteloos een mooi opstapje gemaakt worden naar de verschillende endomembraansystemen (bijvoorbeeld het endoplasmatisch reticulum, het Golgi-apparaat, transportblaasjes). Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Romke Koch (Het Amsterdams Lyceum).

---

**duur** 15 minuten

**doelgroep** onderbouw, bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen:

- beschrijven wat endo/exocytose is;
- beschrijven hoe endo/exocytose stoffen in de cel kan verplaatsen, naar buiten kan brengen of kan opnemen;
- uitleggen dat membraandelen (fosfolipiden en daarin voorkomende moleculen) verplaatsbaar zijn/worden uitgewisseld.

**nodig**

- een groep leerlingen
- eventueel een telefoon om een video-opname te maken

### voorbereiding

1. Geef eerst een korte uitleg over endo/exocytose.
2. Gebruik ter ondersteuning eventueel een beweegbaar model van een celmembraan: <https://origamiorganelles.com/collections/organelles-cells/products/cell-membranes>. Als je dit model op het bord vastmaakt met magnetisch tape, kan je de insnoeringen met je vinger nabootsen.

### uitvoering

1. Vraag de leerlingen om in een grote cirkel te komen staan. Laat ze elkaars schouder vasthouden. Zij stellen nu de fosfolipide dubbellaag voor.
2. Kies een object, bijvoorbeeld bureaustoel of een leerling, die ge-endocyteerd moet worden. Laat de leerling of de stoel van buiten de cirkel naar binnen komen en laat de cirkel het object omringen totdat het ingesnoerd is. Zodra dat kan breekt een stukje van het membraan open: op één plaats, bij de insnoering, laten twee tweetallen elkaar los en dan pakken de leerlingen in de grote kring elkaar weer vast, en ook de leerlingen die rondom het object staan vormen nu een cirkel. Je ziet nu dat er een klein cirkeltje rondom de stoel staat en een grotere cirkel (het celmembraan) daar weer rondom heen.
3. Vertel dat het kleine rondje gezien kan worden als een lysosoom of een gefagocyteerde bacterie die verplaatst kan worden door de cel heen. Merk op dat er dus een membraan om het object heen zit.
4. Laat het kleine groepje naar een andere plek gaan bij het buitenmembraan. Laat het buitenmembraan en het lysosoom op één plaats openen, en laat de membranen weer versmelten.
5. Je ziet nu dat er weer een volledige cirkel is gevormd en de bureaustoel weer buiten de cel is afgeleverd.
6. Zorg dat de leerlingen helder voor ogen blijven houden wat ze naspelen. Eventueel leg je tussentijds de simulatie even stil om dat toe te lichten.
7. Probeer nu eens wat uit. Twee stoelen apart opnemen (betekent twee ronde blaasjes in het midden), en die bijvoorbeeld laten fuseren (is één groter blaasje met twee stoelen erin). Daarna kan je deze bijvoorbeeld weer naar buiten laten gaan via exocytose.

### (na)denkwerk

- Wijs erop dat de leerlingen/fosfolipiden steeds een andere plek krijgen in het buitenmembraan.
- Bespreek ook onderdelen die niet geheel kloppen aan het model, bijvoorbeeld dat leerlingen een voor- en achterkant hebben die de fosfolipide dubbellaag niet heeft, en dat we nu naar een 2D simulatie kijken in plaats van 3D. Bespreek ook dat leerlingen in de simulatie kiezen om elkaar los te laten. In het echt zijn natuurlijk eiwitten verantwoordelijk voor het insnoeren, en los/vast maken van de handen. Eventueel zou je dat ook in de simulatie kunnen opnemen.

### aanpassen/uitbreiden

- In een iets andere context kan met dit practicum ook endosymbiose uitgebeeld worden. Er wordt door grote cirkel leerlingen dan niet één andere leerling (of stoel) ge-endocyteerd, maar een kleine cirkel van leerlingen die dus samen een membraan vormen om een (primitieve) bacterie. De endosymbiose-theorie stelt dat deze bacterie in de 'gastheer' is blijven leven en nu herkenbaar is als organel met *dubbelmembraan* (bijv. een mitochondrium).



## 22. BLOEDSOMLOOP MET WOL

Leuk en leerzaam uitbeeldpracticum, dat voor de meeste leerlingen best uitdagend is. Het practicum is zeer geschikt om voorkennis op te frissen of (formatief) te toetsen in hoeverre lesstof door de leerlingen is begrepen en onthouden. Ook komen door het uitbeelden ook misconcepten aan het licht. Tenslotte is het magisch om op de vloer langzaam de (schematische) bloedsomloop te zien ontstaan. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

**duur** 30 minuten

**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen:

- benoemen welke organen betrokken zijn bij de opname en afgifte van (voedings)stoffen;
- beschrijven hoe verschillende organen in ons lichaam verbonden zijn door bloed- en lymfevaten.

**nodig**

- wol in acht verschillende kleuren (8 meter per draad, één draad per tweetal)
- plakband (één rolletje per tweetal)
- PostIts



### voorbereiding

1. Print het materiaal (de bordjes met de namen van de organen en de werkbladen voor de leerlingen).
2. Plak (kort) voor de les de bordjes op de grond (in het lokaal, op de gang of in de aula), waarbij je natuurlijk rekening houdt met de ligging van, en de relatieve afstand tussen, de organen. Het is natuurlijk ook mogelijk om dit door de leerlingen te laten doen.

### uitvoering

1. Vertel de leerlingen dat ze gaan uitbeelden hoe verschillende voedingsstoffen door het lichaam (de bloedsomloop) bewegen. In het klaslokaal vind je een 'plattegrond' van het menselijk lichaam. De namen van enkele belangrijke organen staan op de kaarten. De weg die de (voedings)stoffen afleggen (meestal nadat ze vanuit het darmstelsel opgenomen worden in het lichaam) wordt zichtbaar gemaakt door verschillende kleuren woldraad.
2. Geef leerlingen per tweetal een opdrachtkaart (werkblad) en een bolletje wol. Laat de leerlingen eventueel eerst nadenken over de af te leggen route, en laat ze bij onderdeel C op het werkblad alvast de organen invullen.
3. Vervolgens lopen de leerlingen door het lokaal, waarbij ze de route van 'hun' (voedings)stof markeren met de woldraad (onderdeel A).
4. Daarna lopen ze de route nogmaals langs om met de PostIts de bloedvaten te benoemen (onderdeel B).
5. Als leerlingen klaar zijn met hun eigen draad moeten ze uitzoeken welke (voedings)stoffen horen bij de andere kleuren draad (onderdeel D).



### (na)denkwerk

- Ga als iedereen klaar is na of alle routes kloppen. Wat vaak verkeerd gaat is dat het vetzuur via de poortader naar lever wordt getransporteerd.
- Wijs de leerlingen op het drukke knooppunt bij het hart en de kleine bloedsomloop.
- In deze simulatie gaan we uit van de kortst mogelijk route van moment van opname in de bloedsomloop, tot moment van afgifte. Benadruk dat in werkelijkheid natuurlijk geen sprake is van doelgerichte beweging van een (voedings)stof naar het orgaan waar het gebruikt wordt.

### aanpassen/uitbreiden

- Als je leerlingen in tweetallen laat werken kunnen in totaal 16 leerlingen tegelijkertijd met het practicum bezig zijn. Je kunt ervoor kiezen om de overige leerlingen niet te laten plakken, maar wel te laten meedenken (met hun eigen werkblad). Een andere optie is om de overige leerlingen tijdelijk iets anders te laten doen, en het practicum later te laten uitvoeren.
- Maak er desgewenst een wedstrijd van. Leerlingen moeten dan proberen zo snel mogelijk de vier opdrachten (A t/m D) te maken. Het groepje dat als eerste klaar is, én de opdrachten goed heeft uitgevoerd heeft gewonnen.
- Je kan natuurlijk prima (voedings)stoffen weglaten of toevoegen, als dat beter aansluit bij je leerdoelen en de doelgroep.
- Je kunt het practicum eventueel ook (laten) vastleggen, bijvoorbeeld door (zoveel mogelijk van bovenaf) een foto (of stop-motion filmpje?) te maken.

### bijlagen

- bordjes voor de organen (lamineren en hergebruiken?)
- werkbladen (één per tweetal)

## 23. LOOP DE BLOEDSOMLOOP

In de onderbouw is de bloedsomloop een ingewikkeld systeem, dat als statisch plaatje in de boeken staat. Met dit uitbeeldpracticum doen álle leerlingen mee aan de dynamische bloedsomloop, waarin meteen de functies van verschillende onderdelen zichtbaar wordt gemaakt, en waarmee bloedsomloop in verband wordt gebracht met ademhaling en uitscheiding. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. tafels laten verzetten en weer terugzetten, en nabespreking
doelgroep	onderbouw
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• de functie van rode en witte bloedcellen beschrijven, gekoppeld aan plaats in het lichaam;</li><li>• de werking van het hart beschrijven;</li><li>• de verschillende routes beschrijven die bloedplasma of cellen kunnen nemen in opeenvolgende omlopen;</li><li>• verschillen tussen model en realiteit analyseren en benoemen.</li></ul>
voorkennis	rode en witte bloedcellen, namen van bloedvaten naar en van diverse organen, hartcompartimenten, uitwisseling van stoffen (glucose, zuurstof, koolstofdioxide) in verschillende organen, en liefst ook lymfevaten

### nodig

- uitgeknipte rolkaartjes (zie bijlage)
- naambordjes met de namen van de organen en hartcompartimenten (zie bijlage)
- tape of stoepkrijt om op de vloer de mogelijke routes te markeren (bloed én lymfe)
- een paar kleine doorzichtige afvalzakjes voor de witte bloedcellen
- 10 à 20 plastic bakjes (o.i.d.) voor transport van stoffen door cellen en plasma
- 20 rode Duplo®-blokken van 2x4 (of andere rode voorwerpen) als ‘zuurstof’
- 20 witte of gele (géén blauwe!) Duplo®-blokken van 2x4 als ‘koolstofdioxide’
- een doos suikerklontjes
- een zakje tumtummetjes als afvalstoffen die de nier uit het bloed kan verwijderen
- een wijdhalzige erlenmeyer (250 ml) als ‘plasemmer’ voor de nier
- een stuk of zes Duplo®-poppetjes als bacteriën en virussen (of *mini-giant microbes*<sup>1</sup>)
- een geel of oranje veiligheidshesje en drie verzamelbakjes op een dienblad voor het verbrandingsenzym

### voorbereiding

1. Druk de rolkaartjes (zie bijlage) af in kleur. Bij meer dan 20 leerlingen de vellen met bloedcellen en bloedplasma twee keer afdrukken. Knip of snij de rolkaartjes vervolgens uit.
2. Druk ook de orgaannaambordjes af. Vouw elk blad aan de achterkant over de lengte doormidden. Leg het weer open en vouw de lange zijden dan naar de midden-vouwlijn, zodat je drie evenwijdige vouwlijnen hebt, en vier stroken. De twee onbedrukte stroken kun je nu op elkaar nieten/plakken, zodat je stabiele driehoekige kokers krijgt.
3. Zorg dat de les plaatsvindt in een lokaal waar de tafels verplaatst kunnen worden (of doe het buiten op een plein waar de route en organen met stoepkrijt kunnen worden aangegeven). Het is verstandig collega's in nabije lokalen voor te bereiden op een dynamische les.
4. Als er vóór de les tijd is om het lokaal al in de opstelling te zetten kan dat, maar het is pedagogisch handiger dat iedere leerling een eigen tafel verplaatst en weer terugzet.

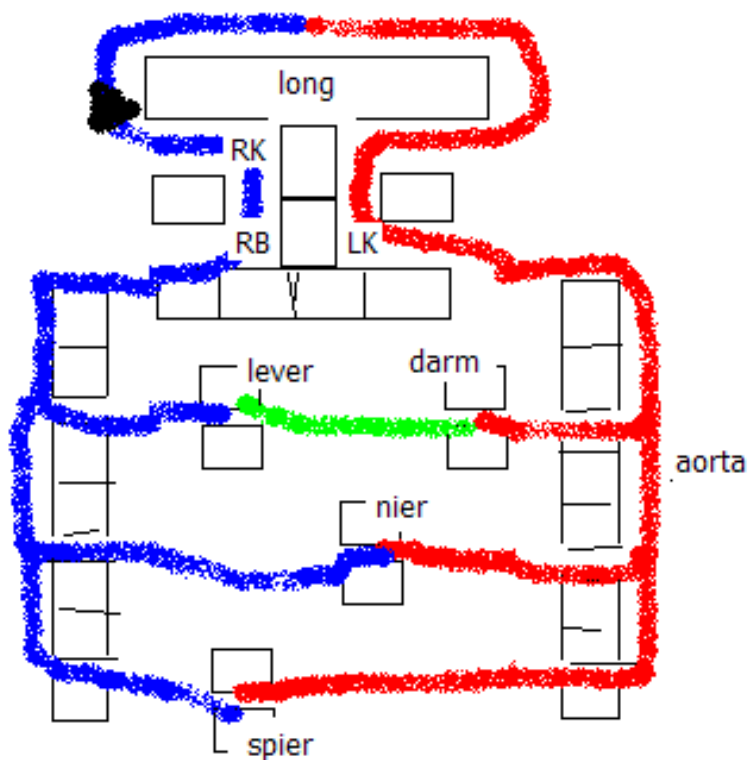
---

<sup>1</sup> <https://www.giant-microbes.nl/nl/thema-boxen/g-19>

## uitvoering

### introductie van het model

1. Leg het doel en de uitvoering van het practicum in grote lijnen uit, met behulp van het een schema zoals hieronder op het scherm (zie ook de bijlage; een eigen, aangepast schema maken kan natuurlijk ook).
2. Laat dan eerst het lokaal zó ombouwen dat de bloedsomloop en de organen zichtbaar zijn. De organen nier, darm, lever en spier bestaan uit twee tafeltjes die zó dicht bij elkaar staan dat een bloedbestanddeel zich daar alleen zijdelings doorheen kan wurmen. Dat staat symbool voor de haarvaten (en dan er is meer tijd voor het uitwisselen van stoffen).
3. Laat de leerlingen de orgaannaambordjes op de juiste plek neerzetten.
4. Er is straks voor de witte bloedcellen en het plasma de mogelijkheid om via de lymfe een orgaan te verlaten (niet aangegeven in het schema hieronder). Dan moet duidelijk zijn dat ze bij de rechterboezem weer de bloedbaan in moeten. Doe de twee alternatieven even voor.



*introductie van de rollen*

5. Vertel dat leerlingen zelf zo meteen een orgaan of bloedbestanddeel spelen. Lees een paar voorbeelden van rolkaartjes voor.

<b>ORGANEN (10 personen)</b>	<b>BLOEDBESTANDDELEN (minimaal 10, maximaal 20)</b>
hart (4 personen, want 4 delen) long nier darm lever spier + een verbrandingsenzym (of 'reactiehulp')	4 (à 8) rode bloedcellen met zuurstof 4 (à 8) bloedplasma met koolstofdioxide 2 (à 4) witte bloedcellen met opruimzakjes

6. Verdeel de klas in één groep van 10 (organen + enzym) en de rest<sup>2</sup>. Geef elke leerling een rolkaartje.
7. Laat de organen op de juiste plek in de klas staan. Laat ieder bloedbestanddeel een positie in de bloedsomloop innemen, waarbij rode bloedcellen niet achter elkaar mogen staan maar altijd met een plasmapersoon ertussen (en eventueel een witte bloedcel). In de longen mogen maar één rode bloedcel en één plasmapersoon staan.
8. Laat nu ook de verschillende attributen zien: zuurstof, koolstofdioxide, andere afvalstoffen, en de bacteriën en virussen. Verdeel nu de attributen over de leerlingen (en vraag naar de reden van 4 of 3!):
- rode bloedcellen in aorta/slagaders krijgen 4 zuurstof (rode Duplo®), de overige 3
  - bloedplasma's in de poortader krijgen 4 glucose (suikerklontjes), de overige 3
  - de organen (behalve het hart!) krijgen 3 koolstofdioxide en een klein handje andere afvalstoffen (tumtum); de longen krijgen daarnaast 4 zuurstof en de darmen 3 glucose
9. Oefen hardop pratend met de leerlingen wat er in elk orgaan moet gebeuren. Zorg dat het enzym precies weet wat zij/hij moet doen, anders stopt het geheel bij gebrek aan stoffen. Desnoods kun je meer personen die rol geven. Laat eventueel nog twee dingen voordoen: bloed beweegt door de rechterharthelft, en bloed gaat door de darm.

<sup>2</sup> Als er minder dan 20 leerlingen zijn kan er bezuinigd worden op het hart - twee helften in plaats van vier compartimenten -, en de docent is dan het enzym.



*de bloedsomloop lopen*

10. Laat nu de bloedsomloop 'lopen'. Zelf loop je overal begeleidend-regisserend tussendoor (en leg je af en toe ergens terloops onopvallend een ziekteverwekker neer).
11. Leg de simulatie na een tijdje stil. Bespreek hoe het is gegaan. Laat leerlingen vragen stellen als ze iets nog onduidelijk vinden.
12. Laat de bloedsomloop nog een tijdje lopen.
13. Doe eventueel nog een ronde, waarbij de leerlingen wisselen van rol: de bloedbestanddelen worden organen en omgekeerd.

*(na)denkwerk*

- Als het goed is komt op een gegeven moment de vraag op waarom het hart (de hartspier) in deze simulatie geen zuurstof en glucose uit het bloed krijgt. Misschien weet iemand in de groep hoe het zit en anders moet je even het krans(slag)adersysteem uitleggen. Bedenk wel dat er ook leerlingen kunnen zijn die in de familie iemand hebben die een coronaire aandoening heeft of daaraan is overleden. Eventueel kunnen de kransslagaders in een volgende ronde nog ingevoegd worden in deze bloedsomloop.
- Een verwante vraag gaat erover dat het bloed in deze simulatie geen zuurstof afgeeft aan de longen en geen glucose aan de darm.
- In dit uitbeeldpracticum heeft een rode bloedcel altijd drie of twee van de vier mogelijke zuurstoffen bij zich. Dit symboliseert dat het bloed meestal mét nog heel wat zuurstof uit de organen komt en niet zuurstofloos. Je kunt leerlingen de vraag stellen wanneer/in welke situatie die hoeveelheid zuurstof minder wordt, en of het dan bij elk orgaan minder wordt. Zie ook aanpassen/uitbreiden hieronder.
- Laat leerlingen zoeken naar verschillen tussen dit schema (de plattegrond) en het schema in het boek. De positie van rechterboezem en rechterkamer is bijvoorbeeld omgekeerd - dat is hier puur praktisch voor de doorloop. Ook is de route van de leverslagader niet ingetekend.
- Als dat nog niet ter sprake is geweest is het van belang de poortader nog even onder de aandacht te brengen.

#### [aanpassen/uitbreiden](#)

- Als iemand zich inspant krijgen de betrokken spieren méér bloed; de hartslag gaat omhoog, en de hoeveelheden aan de spier afgegeven zuurstof en uit de spier geproduceerde koolstofdioxide nemen toe. Die situatie kun je als oefening laten naspelen als de ‘rustsituatie’ soepel uitgebeeld is.
- Je kunt een groepje geïnteresseerde leerlingen eventueel van tevoren al laten nadenken hoe ze zoiets zouden kunnen opzetten, als je het schema als uitgangspunt geeft. Eventuele misconcepten worden dan bij díe leerlingen al ontdekt, en dat betekent dat zij bij de uitvoering extra hulp kunnen bieden aan medeleerlingen.

#### [bijlagen](#)

- rolkaartjes
- organen
- plattegrond lokaal

## 24. VORMING WEEFSELVLOEISTOF MET SPONS EN DOEK

Kort demonstratiepracticum over de vorming van weefselvloeistof en lymfe rondom de haarvaten. Voor leerlingen is het soms lastig te begrijpen wat de functie is van het lymfevatenstelsel (want we hebben toch ook al een bloedvatenstelsel?). Dit practicum maakt de rol van het lymfevatenstelsel duidelijk met behulp van een eenvoudige analogie. Dit uitbeeldpracticum is bedacht door Ruthy Fraterman (Vossius Gymnasium, Amsterdam).

---

duur	10 minuten
doelgroep	onderbouw vmbo/havo/vwo; maar in de bovenbouw kan hier op teruggegrepen worden
doelen	<p>Leerlingen kunnen uitleggen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• dat door de hoge(re) bloeddruk aan het begin van een haarvat bloedplasma het haarvat verlaat (en dan weefselvloeistof genoemd wordt);</li><li>• dat een groot deel van de weefselvloeistof weer in het haarvat wordt opgenomen (resorptie);</li><li>• dat een deel (overtollige) weefselvloeistof door de lymfehaarvaten wordt opgenomen (en dan lymfe genoemd wordt).</li></ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"><li>• een spons</li><li>• een droge theedoek</li><li>• water</li></ul>



### uitvoering

1. Laat leerlingen van tevoren een schematische afbeelding bekijken van een haarvat en een lymfhaarvat, omgeven door cellen (uit hun biologieboek of op de beamer). Vertel de leerlingen dat we gaan uitbeelden wat er gebeurt als het bloedplasma via een slagader aankomt in de haarvaten.
2. Pak de spons en vul deze onder de kraan met water. Vertel dat de spons een netwerk van haarvaten voorstelt, die dus in tegenstelling tot slagaders en aders (een stukje tuinslang?) vloeistof kan afgeven en opnemen.
3. Ga nu naast een lege tafel staan en beweeg de spons over/boven de tafel, waarbij je in de spons knijpt en er dus water op de tafel terecht komt. Vraag de leerlingen waardoor het bloedplasma uit de haarvaten geperst wordt (bloeddruk; hier voorgesteld door het knijpen). De vloeistof die we eerst nog bloedplasma noemden, noemen we nu weefselvloeistof.
4. Ga nu aan de andere kant naast de tafel staan - de kant van de afvoerende adertjes - en neem zoveel mogelijk van het water op de tafel weer op in de spons. (Bij bovenbouwleerlingen kun je hier ingaan op de colloïd-osmotische druk die voor resorptie verantwoordelijk is).
5. Wijs erop dat een deel van de vloeistof op de tafel is achtergebleven. Vraag wat zou er gebeuren als er (steeds) een deel van de weefselvloeistof in de weefsels achter zou blijven. Benadruk dat doordat er meer weefselvloeistof door de haarvaten wordt afgegeven dan dat er (verderop in het haarvat) weer wordt opgenomen, de overtollige weefselvloeistof op een andere manier moet worden afgevoerd: dat doet het lymfevatenstelsel.
6. Pak nu de theedoek en dep daarmee het op de tafel overgebleven water op; de vloeistof daarin noemen we nu lymfe. Vertel dat er bij het lymfevatenstelsel geen sprake is van een specifiek orgaan (zoals het hart) dat voor transport verantwoordelijk is, maar dat lymfetransport wordt veroorzaakt door (spier)bewegingen en kleppen in de lymfevaten. Ga eventueel ook in op de rol die het lymfevatenstelsel speelt bij de afweer.
7. Hou tenslotte de spons en de (nu licht vochtige) theedoek in de lucht, en herhaal dat de vloeistof in de spons bloedplasma genoemd wordt, en die in de theedoek lymfe (en de vloeistof op de tafel weefselvloeistof), maar dat het in feite steeds om vloeistof met nagenoeg dezelfde samenstelling gaat.

### (na)denkwerk

- De analogie die in dit practicum gebruikt wordt is krachtig qua eenvoud. Het is wel belangrijk om te bespreken wat er niet aan het model klopt. Benadruk in ieder geval:
  - dat haarvaten niet zelf samenknijpen,
  - dat weefsels in werkelijkheid natuurlijk nooit droog achterblijven (zoals hier de tafel), maar altijd een bepaalde hoeveelheid weefselvloeistof rondom de cellen aanwezig is.

### aanpassen/uitbreiden

- Ga eventueel in op het ontstaan van (honger)oedeem: voer het practicum nog eens uit waarbij je meer water op de tafel achterlaat.

## 25. TEGENSTROOMPRINCIPE MET LIMONADE

Het tegenstroomprincipe kom je in de biologie in verschillende organen en in verschillende organismen tegen, bijvoorbeeld in de bloedsomloop in de poten van vogels, en in de nefronen in de nieren van zoogdieren. Maar voor leerlingen blijft het tegenstroomprincipe iets tegenintuïtiefs: uitwisseling tussen twee stromen houdt toch op wanneer er evenwicht bereikt is? In dit kort, maar krachtige, uitbeeldpracticum ervaren leerlingen zelf de werking van het tegenstroomprincipe, en zien zij door uitwisseling de vloeistof in hun bekertje (= een bloeddruppel) van blauw in rood veranderen, of andersom. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	25 minuten, incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	Leerlingen ervaren de werking van het tegenstroomprincipe bij de uitwisseling van warmte (thermoregulatie) of stoffen, en bij het in stand houden van een gradiënt.
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• blauwe en rode vloeibare voedingskleurstof (bijvoorbeeld van Dr. Oetker, te koop in de supermarkt)</li> <li>• twee grote bekgelazen, en een lepel om te roeren</li> </ul> <p>voor elke leerling:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• een wit (of doorzichtig) plastic bekertje</li> <li>• een plastic 3 ml wegwerppipet</li> </ul>



### voorbereiding

1. Maak rode en blauwe vloeistof door aan twee bekgelazen lauwwarm water elk een paar scheuten kleurstof toe te voegen. Voor één simulatie voor een hele klas is zo'n 300 ml per kleur voldoende.
2. Let op: controleer van tevoren in een bekertje of gelijke hoeveelheden blauwe en rode vloeistof een paarse vloeistof opleveren. Dat is erg belangrijk. Bij de voedingskleurstof van Dr. Oetker heb je (veel) minder blauwe kleurstof nodig ten opzichte van de rode: een kleine hoeveelheid blauw zorgt al voor een grote kleuromslag.
3. Pipetteer (of giet) in de helft van de bekertjes 15 tot 20 ml blauwe vloeistof. Doe hetzelfde met de rode vloeistof in de andere bekertjes.

### uitvoering

1. Laat de leerlingen in twee rijen tegenover elkaar staan, elk aan één kant van het lokaal; de ene helft krijgt een bekertje met rode vloeistof en de andere helft een bekertje met blauwe vloeistof. Deze rijen stellen de stromen voor, zij zullen zo in tegengestelde richting langs elkaar heen bewegen.
2. Plaats de simulatie bij voorkeur meteen al in een biologische context, bijvoorbeeld de opname van zuurstof uit zeewater in de kieuwen van een vis. De rode rij stelt dan (zuurstofrijk) zeewater voor, en de blauwe rij (zuurstofarm) bloed van de vis.
3. Vraag de leerlingen wat er gebeurt als het bloed gaat stromen en uitwisseling plaatsvindt. Waarschijnlijk zullen de leerlingen voorspellen dat het eindresultaat een paarse vloeistof is. Vraag of het uitmaakt of de stromen in dezelfde richting bewegen of niet.
4. Laat de leerlingen in tegengestelde richting langs elkaar heen lopen. Bij elke leerling die gepasseerd wordt vindt uitwisseling plaats tussen de twee bekertjes: de leerlingen pipetteren twee keer een volle pipet vloeistof (zo'n 2 ml per keer) uit hun eigen bekertje in het bekertje van de ander.
5. Als de rijen precies tegenover elkaar staan kunnen de bekertjes in twee rijen op een tafel geplaatst worden, en van bovenaf bekeken (zie voorbeeld hieronder): het werkt!



#### aanpassen/uitbreiden

- Je kunt de eerste keer de twee stromen ook echt dezelfde richting op laten gaan (je hebt dan als het ware het meestroomprincipe). Leerlingen zien dan dat de kleur van vloeistof paars blijft.
- Als de rijen precies tegenover elkaar staan zou een volgende stap kunnen zijn dat je gaat circuleren (de leerlingen sluiten dan aan het eind van de ene rij aan bij de andere rij). Een mogelijke context hierbij is de uitwisseling van warmte in de bloedvaten in de poten van warmbloedige dieren.
- Plaats de simulatie eventueel ook in een andere context, bijvoorbeeld door leerlingen te laten nadenken of het bij een nierdialyseapparaat verschil maakt of de spoelvloeistof dezelfde richting op stroomt als het bloed, of juist de andere kant op.





## 26. PERISTALTIEK MET PANTY

Kort uitbeeldpracticum om de peristaltische bewegingen te laten zien die de voedselbrij door het maagdarmkanaal heen bewegen. Dit uitbeeldpracticum is bedacht door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam); de metafoor van de installatiebuis is bedacht door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	5 minuten
doelgroep	onderbouw (maar kan natuurlijk ook in de bovenbouw)
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• uitleggen dat in het hele maagdarmkanaal sprake kan zijn van peristaltiek (gecoördineerde bewegingen van spieren in de wand van het kanaal);</li><li>• beschrijven hoe peristaltiek de voedselbrij in het maagdarmkanaal voortstuwt en kneedt.</li></ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"><li>• een panty</li><li>• een mandarijntje (of iets dergelijks)</li><li>• eventueel een stuk flexibele installatiebuis van 10 m (om een indruk te geven van de lengte van het maagdarmkanaal)</li></ul>



#### voorbereiding

1. Knip één pijp van de panty af, en knip daarvan ook het laatste stukje bij de tenen eraf, zodat één lang kanaal ontstaat.

#### uitvoering

1. Vertel de leerlingen dat we de peristaltische bewegingen in het maagdarmkanaal gaan nabootsen.
2. Laat twee leerlingen elk één kant van de panty vasthouden. Vertel dat over de hele lengte van het maagdarmkanaal (de panty) spieren voorkomen.
3. Stop een mandarijntje (of iets vergelijkbaars) aan één kant in de panty en simuleer nu de peristaltische bewegingen die het mandarijntje voortbewegen (of laat een leerling dat doen). Vooral de samentrekkingen van de kringsspieren zijn makkelijk te demonstreren.
4. Vertel dat peristaltische bewegingen de voedselbrij niet alleen voortbewegen, maar ook kneden (waarbij aan weerskanten van de 'bolus' spieren samentrekken) of mengen met de spijsverteringssappen die worden afgegeven.
5. Ga eventueel in op de aansturing van de peristaltische bewegingen door het *enterisch zenuwstelsel* (het eigen, autonome zenuwstelsel van het maagdarmkanaal).

#### (na)denkwerk

- Vraag de leerlingen of peristaltische bewegingen de voedselbrij maar één kant op kunnen bewegen (meestal wel, maar bij overgeven gaat het de andere kant op).

#### aanpassen/uitbreiden

- Om leerlingen een indruk te geven van de enorme lengte van het maagdarmkanaal (ongeveer 9 meter in een volwassene) kun je een lang stuk flexibele installatiebuis laten zien. Daarop kun je nog met stift de afzonderlijke lengtes van de slokdarm, maag, dunne darm, etc. markeren. (En die ribbels zijn natuurlijk een mooie metafoor voor de darmplooiën in de dunne darm).

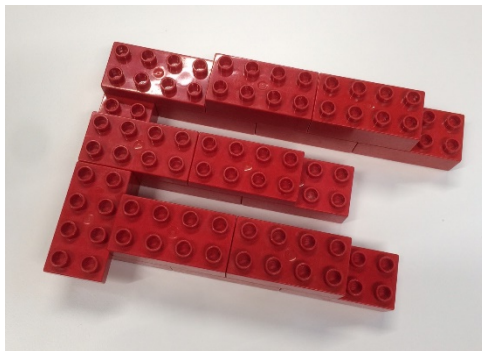
## 27. SPIJSVERTERING MET DUPLO®

### *Duplo®-brokken door de klassendarm*

Dit uitbeeldpracticum is leuk én leerzaam omdat de leerlingen met z'n allen een spijsverteringskanaal vormen waarin ook echt sappen worden toegevoegd, moleculen worden afgebroken, en water wordt geresorbeerd. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), met klaarzet-voorbereiding van 30 minuten
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>leerlingen weten:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• functie en ligging van organen in het spijsverteringssysteem;</li><li>• productieplaats en functionele samenstelling van betrokken sappen;</li><li>• effect van enzymen op biochemische afbraak van de voedingsstoffen koolhydraat, eiwit en vet.</li></ul> <p>leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• samenwerken in een expertsysteem;</li><li>• de spijsvertering als één doorlopend proces zien door de dynamiek en driedimensionaliteit.</li></ul>



### nodig

- Duplo®-blokken (zie bij voorbereiding)
- 2 doorzichtige plastic zakken (grote pedaalemmerzak)
- 5 bekertjes/bekerglazen, met groot opschrift: SPUUG, MAAGSAP, GAL, ALVLEESSAP en DARMSAP
- 2 plastic bakken of emmers (liefst transparant)
- 9 als naambordjes gevouwen A4-vellen (120 grams) met aan twee kanten de volgende teksten: MOND, SLOKDARM, MAAG, PORTIER, TWAALFVINGERIGE DARM, DUNNE DARM, BLINDE DARM, DIKKE DARM, ANUS. Dat zijn de orgaanplaatsen.
- een rol toiletpapier of keukenpapier
- het schoolboek over spijsvertering of kopieën van onderdelen, Binas, of andere bronnen
- eventueel gele huishoudhandschoenen (zie aanpassen/uitbreiden)

### voorbereiding

1. Bouw vóór de les de voedingsstoffen van Duplo®. Gebruik per categorie een andere kleur!
  - eiwit van één kleur blokjes (liefst groen vanwege die kleur voor N bij scheikunde) met veel verschillende vormen blokjes. Maak er één groot 'molecuul' van dat bestaat uit verschillende aminozuren. (= elk los blokje in andere vorm);
  - koolhydraat van één kleur blokjes, maar dan alleen 2x4 (kruislings bevestigd) of 2x2 (op elkaar): dat is zetmeel, bestaand uit allemaal glucosemoleculen;
  - vet van één staaf van 2 x 8 (of 2 van 2 x 4 achter elkaar) (= glycerol) met daar dwars op drie blokjes van verschillende lengte en in een andere kleur (=vetzuren); eventueel kun je nog experimenteren met cis- en trans-vetten, of verzadigde en onverzadigde;
  - het is leuk om nog weer andere kleuren en vormen blokjes toe te voegen als symbool voor bacteriën, onverteerbare vezels, mineralen etc.
2. Leg plastic bakken en zakken klaar. Doe de pedaalemmerzakken in elkaar (tegen lekkage).
3. Vul de bekertjes met water.

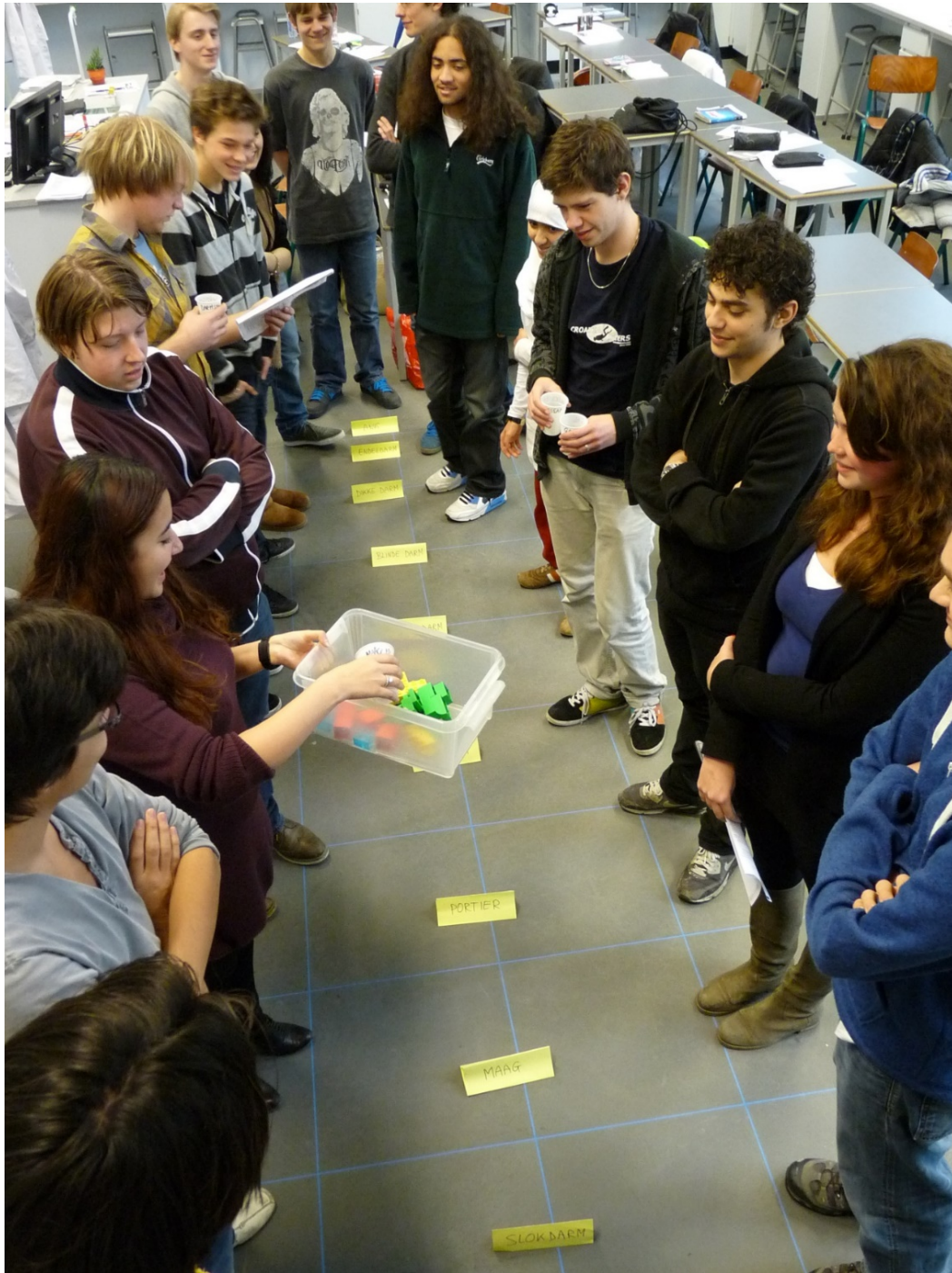
### uitvoering

1. Leg in grote lijnen uit wat er gaat gebeuren: lezen van selectie, vertellen / uitbeelden in 'darm'. Hou ongeveer het volgende tijdschema aan:
  - introductie en uitdelen teksten - 5 minuten
  - leerlingen lezen en bereiden presenteren - 15 minuten
  - uitvoeren - 20 minuten
  - nabespreken 10 minuten
2. Verdeel de klas in 8 (of 7 of 9) groepjes via de genummerde-hoofden-methode: 1-2-3-4-5-6-7-8 | 1-2-3-4-5-6-7-8 | 1-2-3-4-5-6-7-8.
3. Schrijf op het bord de nummers en daarachter de namen van de organen/onderdelen (mond, slokdarm enz.). Let op: groep 2 die de slokdarm heeft, moet in het geval van 8 groepen als dubbelrol ook de anus zijn, dus na het getal 8 komt weer een 2. Variaties in groepsgrootte zijn denkbaar afhankelijk van klassengrootte.
4. Leerlingen gaan in expertgroepjes bij elkaar zitten. Elk groepje bestudeert dát deel van het lesboek (of een andere bron) dat over het orgaan gaat dat bij het nummer hoort (dus de maaggroep leest alléén het stuk over de maag, en niet over de portier etc., tenzij ze heel snel klaar zijn). Opdracht voor de leerlingen: elk groepslid moet (zonder boek of blaadje) kunnen vertellen hoe het orgaan er uit ziet, en wat er in dat orgaan gebeurt (richtvragen: Wordt er spijsverteringssap afgegeven? Zo ja, welke enzymen bevat het spijsverteringssap? Welke voedingsstoffen worden door deze enzymen afgebroken? Welke andere stoffen dan enzymen worden afgegeven? Worden er stoffen opgenomen? Zo ja, welke? Zijn er andere processen die in dit orgaan plaatsvinden? Zo ja, welke?).
5. Terwijl de leerlingen lezen zet je in de gang, of in het midden van het lokaal, de orgaankaartjes in een rij, met 0,5 à 1 meter tussenruimte. Aan weerszijden moeten de leerlingen tegenover elkaar kunnen staan, met een meter tussenruimte.
6. Peil of ze klaar zijn met lezen, jut op waar nodig, en roep ze dan naar de rij met orgaankaartjes.
7. Leerlingen gaan aan weerszijden van de kaartjes staan en vormen zo met hun lichamen een levend 'spijsverteringskanaal', met de namen van de onderdelen op de vloer ertussen.
8. Vraag nu welke organen sappen afgeven. Die krijgen een bekertje water: mond, maag, twaalfvingerige darm (2x!), dunne darm.
9. Toon de verschillende voedingsstoffen, leg uit hoe ze zijn opgebouwd en doe ze in de plastic zak. Dat is het voedingsmiddel. Voeg naar eigen inzicht eventueel ook wat zwarte blokjes toe (onverteerbare resten, voedingsvezel), witte (mineralen), en/of Duplo®-poppetjes of -diertjes (bacteriën).
10. Geef de zak aan het eerste orgaan (de 'mondige' leerlingen) en wijs telkens één leerling van een orgaangroepje aan die het woord voert. Als er sappen in het spel zijn moet een andere leerling dat erbij doen.
11. Telkens leggen leerlingen uit wat er in hun 'orgaan' gebeurt. Bijvoorbeeld: in mond kauwen (mechanische vertering is lastig; evt. zak wat schudden), door amylase in spug (beker

water in de zak!) van zetmeel telkens setjes van twee blokjes afhalen: maltose (maar hou wat over voor in de twaalfvingerige darm).

12. Bij de gal is het van belang dat de emulgerende werking wordt getoond door *niet* het vet af te breken.
13. Vraag in de twaalfvingerige darm ook waarom er (in verschillende organen) twee eiwit-afbrekende enzymen zijn, pepsine en trypsine, die min of meer hetzelfde doen (dat heeft te maken met het pH-optimum).
14. In de dunne darm moeten alle stoffen in hun basale bestanddelen zijn gesplitst. Die worden nu buiten de rij in een plastic bak gelegd; dat is opname in het bloed.
15. In de dikke darm wordt het water zoveel mogelijk uit de zak gegoten in de andere plastic bak achter de rij leerlingen (dat is resorptie), en dan blijven er nog wat restjes achter die de anus uitgaan (plastic zak leeggieten in wasbakje bijvoorbeeld).
16. Je kunt als afsluiting nog even de peristaltische beweging nadoen met de klassendarm (of zie het vorige practicum).





Hierboven zie je een versie waarin geen pedaalemmerzakken worden gebruikt maar een bak.

### (na)denkwerk

- Bij de uitvoering is het van belang dat het verhaal per orgaan helder en juist is. Vraag de anderen fouten te corrigeren en check of iedereen het kan horen en zien. Laat dingen herhalen door leerlingen van een ander orgaan.
- In de nabespreking kun je vragen naar waar de simulatie te simpel is, en wat er beter zou kunnen. Nucleïnezuren (DNA, RNA) komen bijvoorbeeld niet in het model voor, maar die zitten natuurlijk wél gewoon in je voeding (dus niet alleen GMO's bevatten DNA).
- Als afsluiting en verwerking kan je nog de bladzijden uit Binas of ScienceData (met name Binas 82E, 82F en 82G) projecteren en het gedane werk daarmee vergelijken.

### aanpassen/uitbreiden

- Het idee van de vertering kan op deze manier ook in onderbouw worden uitgevoerd zonder dat je de moleculaire bouw van de voedingsstoffen zo modelleert. Het kunnen gewoon (door leerlingen zelfgebouwde?) Duplo<sup>®</sup>-blokkenbrokken zijn.
- Voor 6 vwo kun je iets dieper ingaan op de rol van specifieke enzymen. Enzymen beeld je uit met plastic huishoudhandschoenen (dat is het actieve centrum van de leerling-enzymen!). Schrijf de namen van de enzymen op de handschoenen (één handschoen per enzym), en laat leerlingen deze handschoenen tijdens het uitbeelden dragen. Beperk je hierbij tot de volgende enzymen: aminopeptidase, amylase, carboxypeptidase, lipase, maltase, nuclease, pepsine en trypsine (zie ook Binas 82E, 82F en 82G).
- Het practicum kan eventueel worden uitgebreid met een herhaling van de simulatie per tafel met kleine Lego<sup>®</sup>. Het spijsverteringskanaal staat dan op een vel A3-papier getekend.





## 28. ZUURSTOFVERZADIGING MET IJZEREN RINGETJES

De zuurstofverzadigingscurve van hemoglobine en myoglobine is lastig te begrijpen omdat de vorm uitnodigt tot lezen van links naar rechts, terwijl de uitleg meestal rechtsboven start bij zuurstofopname in de longen. De percentages zuurstof verhullen de biochemische werkelijkheid van de betrokken tetra- en monomere globines. In dit practicum manipuleren leerlingen in kleine groepjes de moleculen zuurstof, hemoglobine en myoglobine met transport tussen longen en spieren en longen. Ze schakelen heen en weer tussen de grafiek en het zuurstoftransport dat ze zelf uitvoeren. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	<p>één lesuur (50 minuten), de les erna nog een korte nabespreking m.b.v. PowerPoint</p>
doelgroep	<p>bovenbouw vwo</p>
doel	<p>Leerlingen kunnen met het zuurstofverzadigingsdiagram uitleggen hoeveel zuurstof wordt opgenomen of afgegeven in organen en dat koppelen aan de zuurstofbelading van moleculen.</p>
nodig	<p>per groepje van drie à vier leerlingen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (minimaal) 30 ijzeren ringetjes van de ijzerhandel, diameter 1 à 1,5 cm (een ringetje is een O, en dat symboliseert O<sub>2</sub>)</li> <li>• rood papier, gesneden in 5 velletjes van 6 x 6 cm (hemoglobine) en 5 van 3 x 3 cm (myoglobine); zie knip- en vouwpatroon in de bijlage (andere maten mogen ook, als het hemoglobine maar grofweg een vier keer zo groot oppervlak heeft als het myoglobine, als symbool voor het aantal te binden zuurstofmoleculen)</li> <li>• een longafbeelding en een beenspieraafbeelding (zie bijlage)</li> <li>• twee exemplaren van de leerlinginstructie (zie bijlage)</li> <li>• twee exemplaren van de invultabel (zie bijlage)</li> </ul>

### voorkennis

Zorg ervoor dat de leerlingen bekend zijn met de volgende begrippen en fenomenen:

- functie en lokalisatie van hemoglobine en myoglobine
- tetrameer en monomeer eiwit
- partiële zuurstofdruk
- bloedsomloop
- aflezen van de zuurstofverzadigingscurve

### voorbereiding

1. Print het knip- en vouwpatroon voor hemoglobine en myoglobineblaadjes op **ROOD** papier. Knip de velletjes uit langs de stippellijnen. De grotere velletjes (hemoglobine) moeten even over beide middelloodlijnen gevouwen worden (zoals een weegpapiertje) als symbool voor de tetrameer; de kleine velletjes hoeven niet gevouwen te worden.
2. Print ook voldoende exemplaren van de leerlinginstructie, invultabel (in kleur), longafbeelding en beenspieraafbeelding.
3. Zet de tafels in de klas zo dat vier leerlingen er ruim omheen kunnen zitten.
4. Leg op de tafels – een eindje uit elkaar – de longafbeelding en beenspieraafbeelding (type 2, rode vezels).
5. Leg de 5 kleine rode velletjes op de beenspieraafbeelding: dat zijn de myoglobinemoleculen (Mb).
6. Leg de 5 grote rode velletjes tussen long en beenspier: dat zijn de hemoglobinemoleculen (Hb).
7. Leg alle ringetjes op de longafbeelding: dat is de zuurstofvoorraad.



### uitvoering

Leg eerst het doel van het practicum uit. Introduceer de opstelling op de tafels, en leg uit wat de aparte dingen voorstellen. Deel daarna pas de bladen met de instructie en de invultabel uit.

#### *RONDE 1: myoglobine opladen met zuurstof*

[dit kan evt. meteen klassikaal besproken worden, met invullen van de eerste rij van de tabel]

- Deze ronde is om duidelijk te maken dat myoglobine zijn zuurstof krijgt van het hemoglobine, én om het principe van de bloedsomloop met zuurstofrijk en zuurstofarm bloed te laten herkennen.
- De Binas-grafiek is hier nodig. Als het goed is constateren de leerlingen daarmee dat myoglobine volgens de grafiek niet voor 100% wordt opgeladen, maar wel ongeveer 90, dus dat betekent afgerond 5 ringetjes op het totale myoglobine.
- In deze ronde blijft het verbruik 0. Er wordt natuurlijk in werkelijkheid wel zuurstof verbruikt, maar nu laden we alleen de myoglobine vol.

#### *RONDE 2: lichte inspanning; partiële zuurstofdruk is 5 kPa.*

- Leerlingen moeten nu aflezen dat de Hb-zuurstofverzadiging ongeveer 67 % is, en dat betekent dat er per rood velletje van 6x6 één ringetje afgaat naar het weefsel, en bij een aantal zelfs twee ( $20 \text{ ringetjes} \times 0,67 = 13,4$  dus afgerond 13 ringetjes blijven over op 5 Hb's).
- Ook het myoglobine is niet helemaal verzadigd! Bij 5 kPa is het 85%, wat betekent dat er één van de 5 ringetjes weg moet (naar het weefsel...).
- Het verbruik is dan 7 van Hb en 1 van Mb. Dit leidt tot discussie. Het besef moet komen dat het Hb voortdurend langskomt met nieuwe zuurstof, en het Mb blijft (dynamisch) in een iets minder zuurstofrijke toestand dan voorheen. Anders gezegd: alleen in het begin wordt die ene ring van het Mb weggehaald, daarna wordt het voortdurend aangevuld uit het bloed en net zo snel weer afgestaan wegens de heersende weefseldruk.

#### *RONDE 3: zware inspanning, partiële zuurstofdruk in weefsels is 1 kPa.*

- Hb moet nu voor ongeveer 92% leeg raken. Dat betekent dat het bloed dat verzadigd uit de longen komt (we rekenen daar maar even 100%) nu 92% verliest, dus van de 20 ringetjes gaan er 19 het weefsel in, en 1 gaat retour longen.
- Maar myoglobine houdt nu nog meer dan de helft van de zuurstof vast (54%) dus raakt twee ringetjes kwijt. Al die ringetjes komen in het dissimilatie rondje bij de beenspier – en ze kunnen dan weer gerecycled worden naar de longvoorraad!

*Ronde 4: bergbeklimmen; even pauze op 5000 meter hoogte; weefseldruk is 5 kPa.*

- Op 5000 m is de lucht ijler (lagere dichtheid) maar het percentage zuurstofmoleculen is vrijwel hetzelfde (Binas 34).
- De luchtdruk op 5000 m is volgens het tabelletje 54 kPa.
- Je weet alleen iets over de longblaasjes (5,6 kPa). In de longader en aorta zal het dan in ieder geval minder zijn. We nemen voor het gemak 5.
- De O<sub>2</sub>-verzadiging in % van het Hb dat de longen verlaat is ongeveer 67%. Bij de weefseldruk van 4 kPa wordt er dus maar heel weinig zuurstof afgegeven. Daarom word je als laaglander in de bergen zo snel moe: te weinig zuurstoftoevoer. Het Mb kan in het begin nog wel wat leveren, maar dat is snel op.

In het ingevulde schema op de volgende pagina staan de getallen. Door afleesvariatie kunnen leerlingen iets afwijkende waarden krijgen; dat is geen probleem maar juist een kans om buurgroepen te wijzen op de afleesverschillen.

<b>ronde</b> ↓	pO <sub>2</sub> in aorta (kPa)	totaal aantal ringetjes op weg naar spier	pO <sub>2</sub> in spierweef sel (kPa)	O <sub>2</sub> -ver- zadiging Hb in spierader (%)	totaal aantal ringetjes terug naar long	O <sub>2</sub> -ver- zadiging myo- globine (%)	totaal aantal ringetjes op myo- globine	O <sub>2</sub> - verbruik door spier- cellen
<b>1</b>	<b>12,6</b>	<b>20</b>	<b>n.v.t.</b>	<b>75</b>	<b>15</b>	<b>100</b>	<b>5</b>	<b>0</b>
<b>2</b>	<b>12,6</b>	<b>20</b>	<b>5</b>	<b>67</b>	<b>13</b>	<b>85</b>	<b>4</b>	<b>7 (+1)</b>
<b>3</b>	<b>12,6</b>	<b>20</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>58</b>	<b>3</b>	<b>19 (+2)</b>
<b>4</b>	<b>~5</b>	<b>13</b>	<b>4</b>	<b>54</b>	<b>11</b>	<b>84</b>	<b>4</b>	<b>2 (+1)</b>

### (na)denkwerk

- De ervaring leert dat een lesuur maar net genoeg is voor de uitvoering; kort nabespreken kan een volgende les aan de hand van de PowerPoint waarvan de afbeeldingen ook in Word in de bijlage zitten.
- In de nabespreking is het van belang te controleren of leerlingen begrijpen dat op de route van longen naar organen er géén zuurstof wordt afgegeven (zoals ze zich vast herinneren aan het schuiven met de Hb-papiertjes), terwijl de grafiek van rechts naar links gelezen dat haast suggereert.
- In deze simulatie spelen alleen moleculen en organen een rol. Als je het celniveau erin brengt, hoe en waar zou je dat dan moeten doen?
- In deze simulatie zorgen de armspieren van de deelnemers voor de verplaatsing. Hoe gebeurt dat in de realiteit?

### aanpassen/uitbreiden

- In deze instructie is ervan uitgegaan dat er enige voorkennis is. Het is natuurlijk ook mogelijk om de simulatie zonder die voorkennis te doen, en dan meer tijd uit te trekken voor discussie tijdens en na elke ronde.
- In een groep kunnen snelle en minder snelle leerlingen zitten. Laat in eerste instantie de snelle (als die tenminste ook de slimme is) aan de anderen dingen uitleggen die ze niet snappen.
- Laat leerlingen samen in overleg Hb schuiven en ringetjes verplaatsen, dán individueel het schema invullen en daarna vergelijken en bespreken.

### bijlagen

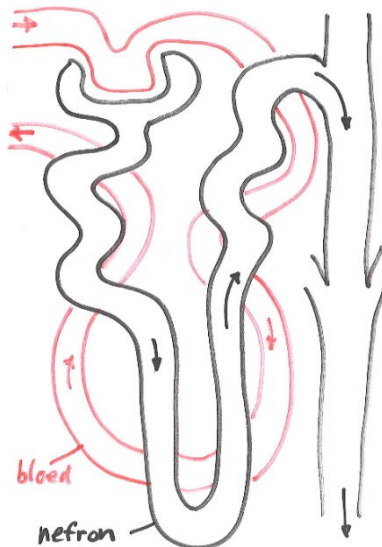
- leerlinginstructie
- invultabel (en Binas 83D)
- longafbeelding
- beenspieraafbeelding
- knip- en vouwpatroon
- afbeeldingen van PowerPointdia's voor nabespreking (de echte PowerPoint bevat animaties)

## 29. NEFRON OM TE SNOEPEN

In een nefron gebeurt heel veel – met veel stoffen, op veel plekken, met veel mechanismen. Dat maakt het een complex geheel, dat in kleine hapklare stukjes wordt verdeeld in deze activiteit. Moleculen worden verbeeld door snoepjes, en leerlingen manipuleren die om zo het hele proces van de ultrafiltratie, reabsorptie en zuurstofverbruik in de vingers te krijgen – en dus ook in het brein. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	45 minuten (5 minuten introductie, 30 minuten uitvoeren, 10 minuten nabespreken)
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	Leerlingen kunnen door schuiven met snoepjes en toelichting met vaktermen daarbij laten zien wat er gebeurt met de concentraties stoffen in de verschillende onderdelen (en bloedvaatjes) van een nefron.
voorkennis	<ul style="list-style-type: none"><li>• actief en passief transport</li><li>• osmose (en diffusie)</li><li>• ultrafiltratie</li><li>• reabsorptie</li><li>• tegenstroomprincipe</li></ul>



### nodig

per groepje leerlingen:

- een paar kleine suikerklontjes of suikerhartjes; deze stellen glucose voor
- twee kleine doosjes met mini-M&M's of mini-Smarties; deze stellen  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  en ureum voor (je kunt eventueel ook andere snoepjes in verschillende kleuren gebruiken, zolang deze maar echt klein zijn, want anders is er te weinig plek op het A3-speelvel)
- een paar verschillende soorten spekkies, eventueel dwars doorgeknijpt; deze stellen eiwitten voor (want er zit gelatine in, en dat is eiwit!)
- een paar stophoest-snoepjes met aan de ene kant een tekst (zuurstofrijk) en de andere kant niet (zuurstofarm); deze stellen erythrocyten voor (zuurstof wordt dus niet als apart molecuul verbeeld!)
- A3-vel met schema nefron en bloedvat (zie bijlage)

### voorbereiding

1. Bedenk hoeveel groepjes er komen en hoe groot ze zijn (min. 2 / max. 4 leerlingen).
2. Maak per groep een bakje klaar met de benodigde snoepjes. Een legenda daarbij is handig omdat dan iedereen dezelfde (kleuren) snoepjes gebruikt voor dezelfde moleculen. Met 6 à 10 snoepjes per kleur is er genoeg materiaal. Omdat er meer dan vier kleuren mini's zijn, blijft er ook wat over voor eventuele andere doelen.
3. Print voor elk groepje het schema nefron en bloedvat, op A3-papier én in kleur.
4. Zorg dat leerlingen de beschikking hebben over Binas (85C), hun lesboek of een vergelijkbare bron.



### uitvoering

1. Zorg voor een introductie over bouw en werking van de nieren/een nefron.
2. Formeer groepjes en laat de leerlingen bij elkaar zitten.
3. Geef elk groepje het A3-vel met nefron en bloedvat. Laat ze even vergelijken met het plaatje in Binas (85C), en zorg dat ze de baan van het bloed zien.
4. Leg centraal uit en demonstreer welke moleculen ze krijgen, en/of maak daarvan een schema op het scherm/bord, zoals hieronder; noem eventueel de legenda die bij de spullen zit:
  - glucose = suikerklontje/suikerhartje
  - $H_2O$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ , ureum (en evt.  $K^+$ ) = verschillende kleuren mini-M&M's/Smarties
  - eiwitten = spekkies (bevat eiwit, en is er in veel vormen net als eiwit)
  - rode bloedcel = stophoest (zuurstofrijk: tekst zichtbaar, zuurstofarm: tekst omlaag)
5. Lees de opdracht voor en laat die op het scherm staan (of geef ze die op papier vóór het uitdelen van de snoepjes):

*Laat door schuiven van snoepjes mét toelichting zien WAT er WAAR in een nefron gebeurt met de concentraties eiwit, glucose,  $H_2O$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ , ureum en zuurstof.*

*Leg uit HOE dat gebeurt met de volgende begrippen: actief en passief transport, osmose (en diffusie), ultrafiltratie, reabsorptie en tegenstroomprincipe.*

6. Het is essentieel dat de leerlingen begrijpen dat het niet een kwestie is van alleen maar neerleggen; er moet echt bewogen/geschoven worden.
7. Deel per groep een bakje met snoepjes uit en benadruk nog eens het raadplegen van Binas en/of andere bronnen.
8. Als een groepje denkt het hele proces te kunnen uitbeelden, mag die een seintje geven zodat de docent of de TOA kan komen controleren. Als hun uitbeelding dan klopt mogen ze als beloning de snoepjes opeten (of eerst uitleggen aan medeleerlingen).

### (na)denkwerk

Ga tijdens de uitvoering of bij de nabespreking in op de volgende vragen:

- Hoe verandert de eiwitconcentratie in het bloed bij passage door het nefron (eerst verhoging door ultrafiltratie in de glomerulus, later daling door reabsorptie van water)?
- Welk deel van het nefron is ondoorlaatbaar voor water?
- Wat is de oorzaak van het zuurstofverbruik op sommige plaatsen?
- Waar werken hormonen zoals ADH?

### aanpassen/uitbreiden

- Deze activiteit leent zich ook goed voor het maken van (stop-motion) filmpjes. Voordeel is dat die weer vertoond kunnen worden, waarmee je eventuele misvattingen klassikaal kan laten zien of laten signaleren door leerlingen. En als je een geweldig filmpje hebt, kun je dat ook volgende jaren gebruiken.

### bijlage

- schema nefron en bloedvat (zie bijlage)



Hierboven zie je een 'ingevuld' schema met legenda (op basis van een andere tekening van een nefron, zonder bloedvat).

## 30. REGELING BLOEDSUIKERSPIEGEL MET SUIKER

De regeling van de bloedsuikerspiegel wordt meestal aangeleerd door middel van een pijlschema met plaatjes en tekst. Deze simulatie laat leerlingen zelf ervaren hoe door het functioneren van verschillende organen de bloedsuikerspiegel onder verschillende omstandigheden min of meer constant blijft. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam), in samenwerking met Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem) en Onne van Buuren (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen uitleggen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• welke rol de volgende organen spelen bij de regulatie van de bloedsuikerspiegel: de eilandjes van Langerhans, de lever, spieren en de darmen;</li><li>• dat bij homeostase sprake is van een normwaarde, en dat afwijkingen van die waarde een reeks processen in gang zetten die ervoor zorgt dat de normwaarde weer bereikt wordt;</li><li>• dat insuline en glucagon antagogen van elkaar zijn;</li><li>• dat hormonen niet gericht naar hun doelwitorganen toe bewegen (maar zich overal in het bloed bevinden);</li><li>• dat hormonen een beperkte levensduur hebben (en waarom dat nodig is), en dat hormonen worden afgebroken in de lever;</li><li>• op welke manier de regulatie van de bloedsuikerspiegel is verstoord bij diabetes mellitus (type 1 en 2), en hoe de bloedsuikerspiegel met insuline-injecties kan worden gereguleerd.</li></ul>



### rollen

De precieze aantallen materialen die je nodig hebt hangen af van het aantal leerlingen in de klas. Belangrijk om te weten is dat leerlingen in dit practicum óf een bloeddruppeltje voorstellen óf (onderdeel van) een orgaan. Het bloed opereert in groepjes van vijf: vier leerlingen transporteren suiker en hormonen door de bloedsomloop, en één leerling noteert de metingen. Daarnaast heb je acht tot tien leerlingen nodig die verantwoordelijk zijn voor het functioneren van een specifiek orgaan:

- drie of vier leerlingen zijn de eilandjes van Langerhans in de ALVLEESKLIER
- drie of vier leerlingen zijn de LEVER
- één leerling is de DARM
- één leerling is de SPIER

Het hart zit wel in het model, maar wordt niet vertegenwoordigd door een leerling.

### nodig

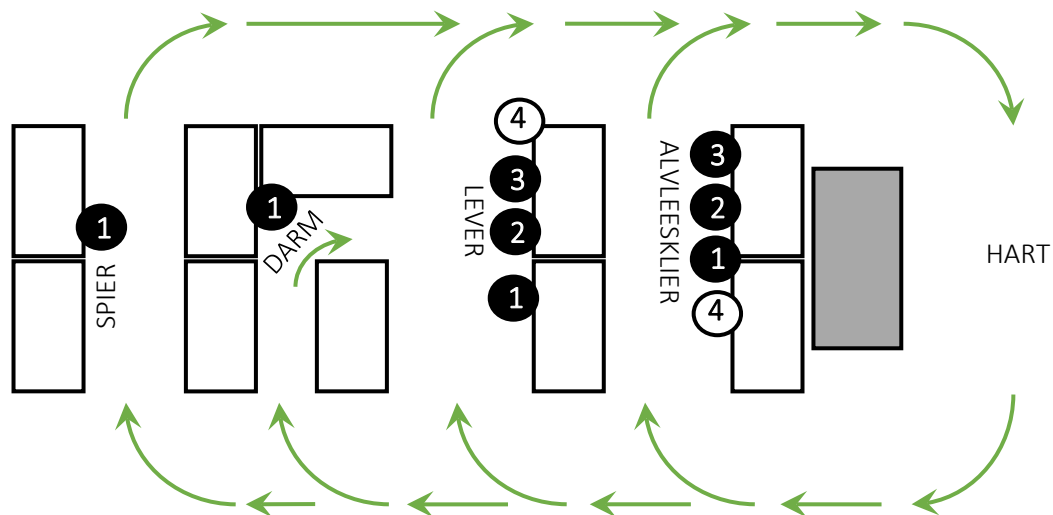
- 4 kg suiker (naderhand niet weggooien maar hergebruiken!)
- transparante bekertjes (4 per groepje - zie hierboven – en een paar extra voor de DARM)
- 5 bekeerglazen (o.i.d.), waarvan één groot (1L)
- 4 dessert- of theelepeltjes (moeten wel ongeveer even groot zijn)
- een weegschaal (voor de ALVLEESKLIER)
- bordjes voor de organen (ALVLEESKLIER, LEVER, DARM, SPIER en HART)
- hormoonbriefjes: insuline en glucagon (op verschillende kleuren papier geprint is handig)
- afplaktape/crêpetape (om de stroomrichting van het bloed op de vloer aan te geven)

### voorbereiding

1. Verzamel de materialen. Print de instructies voor de organen en de bloed-groepjes. Print (en knip/snij) ook de hormoonbriefjes. Gebruik voor insuline en glucagon elk een andere kleur.
2. Zet de tafels in het lokaal zó neer dat een (sterk vereenvoudigde) bloedsomloop ontstaat (zie afbeelding op de volgende pagina). Leg de bordjes voor de organen op de desbetreffende tafels. Leg bij elk bordje (m.u.v. het HART) een groot bekeerglas, en één of twee lepeltjes. Leg de weegschaal en een stapel hormoonbriefjes op de tafel van de ALVLEESKLIER. Markeer de stroomrichting van het bloed met tape.
3. Zet bij elk orgaan een bekeerglas om de suiker die opgenomen wordt voor verbranding in weg te gooien.
4. Zet bij de LEVER een tweede bekeerglas (groot!) voor de glycogeenopslag. Vul dat bekeerglas met (minimaal) 500 g suiker.
5. Voorzie de bekertjes van een letter, om de groepjes aan te duiden (dus 4 bekertjes met een A, vier bekertjes met een B, etc.). Vul elk bekertje met 85 g suiker (dat staat symbool voor 85 mg/dL). Leg bij elk groepje van vier bekertjes 8 insulinebriefjes, en 24 glucagonbriefjes.

6. voor de simulatie **na een maaltijd**:

Zet bij de DARM een aantal bekertjes, elk gevuld met 100 g suiker (dat staat symbool voor glucose die uit voeding wordt opgenomen).



*Inrichting van de klas voor het uitbeelden van de regulatie van de bloedsuikerspiegel met suiker (bovenaanzicht). Plaats de tafels zó dat de bloed-groepjes door de bloedsomloop (gemarkeerd door de pijlen) kunnen lopen. De getallen geven de plaatsen aan van de leerlingen die de rol van een orgaan spelen (de leerlingen 4 bij de lever en de alvleesklier kunnen evt. weggelaten worden). De grijze rechthoek stelt het bureau van de docent voor (maar er kunnen natuurlijk ook andere tafels gebruikt worden). Stoelen zijn in principe niet nodig.*

#### uitvoering: het model verkennen

1. Vergelijk de anatomie van de bloedsomloop met het model in de klas. Waar zitten de aorta, de poortader en de leverslagader? Waar zit (eigenlijk) de kleine bloedsomloop?
2. Vertel dat de bloedsuikerspiegel in je lichaam schommelt rondom de 85 mg/dL; dat wordt in deze simulatie voorgesteld door de suiker (85 g per bekertje). Let op: de concentraties hormoon zijn veel lager (nano- of zelfs picogrammen per mL).
3. Deel de rollen met de taakbeschrijvingen, en de bijbehorende materialen uit. Laat de organen plaatsnemen op de goede plek in de bloedsomloop. De bloeddruppeltjes starten in het HART. Binnen de groepjes moeten de hormoonbriefjes zo eerlijk mogelijk verdeeld worden binnen het groepje van vier: elke leerling heeft steeds 8 hormoonbriefjes (dat blijft zo tijdens de hele simulatie).
4. Doe een klassikaal proefronde met het eerste groepje. Laat het groepje één cyclus doorlopen, en laat elk orgaan kort hardop vertellen wat daar gebeurt. De leerlingen lopen terug richting hart. Benadruk dat de samenstelling van het bloed (concentratie hormonen en glucose) nu verschilt per bloedvat. Het bloed wordt bij het hart weer gemengd: binnen het viertal moeten zowel het suiker als de hormonen zo *eerlijk mogelijk* verdeeld worden. Laat de leerling die de metingen bijhoudt de eerste metingen op het leerlingenblad noteren.

#### uitvoering: de simulaties

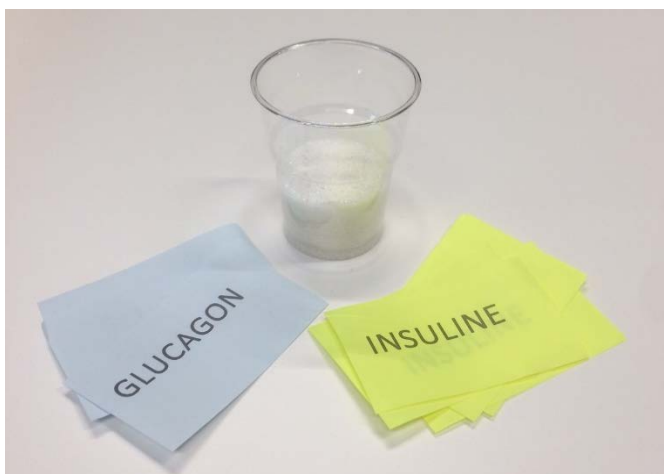
5. Start met een simulatie waarbij het lichaam **in rust** is (dus weinig inspanning, niet net na een maaltijd). Laat elk groepje zo'n 3 tot 4 cycli lopen. Wat gebeurt er met de bloedsuikerspiegel? En de hormoonconcentraties? Wordt er (netto) glycogeen geproduceerd of afgebroken?
6. Doe nu een simulatie **na een maaltijd**. De darm gaat nu gedurende 2 cycli suiker afgeven aan het bloed (100 g per cyclus) Laat elk groepje nog 2 tot 3 extra cycli lopen. Wat verandert er nu?
7. Doe tenslotte een simulatie **bij inspanning**. De spier gaat nu (veel) meer glucose opnemen (12 schepjes per cyclus). Wat verandert er nu?

### (na)denkwerk

- Wanneer verwacht je dat de insulineconcentratie in je lichaam het hoogst is? Klopt dat met het practicum (bekijk de grafieken)? En wanneer de glucagonconcentratie? Waarom worden insuline en glucagon ook wel antagogen genoemd?
- Waar en wanneer verdwijnt er suiker/glucose uit het lichaam (overal, bij verbranding)?
- Wat zijn de doelwitorganen van insuline (allemaal!)? En van glucagon (de lever)? Waar in het lichaam vinden we beide hormonen (overal)? Waar vinden we receptoren voor deze hormonen (op de doelwitorganen).
- Wat zou er gebeuren als hormonen niet door de lever zouden worden afgebroken, maar voor altijd in het bloed zouden blijven (opeenhoping, hormonale regeling lukt niet meer)?
- Vergelijk de simulatie met het pijlschema uit lesmethode. Waar in het model zien we de normwaarde terug (in de afstemming tussen de hormoonafgifte van het eilandje van Langerhans, en het effect van die hormonen op de doelwitorganen)?
- Bespreek wat wel/niet aan het model klopt, o.a.: de afwezigheid van de kleine bloedsomloop, geen vertraging tussen meting en hormoonproductie, geen glycogeenopslag in de spier, etc.

### aanpassen/uitbreiden

- Je kunt aan de hand van dit model ook uitbeelden, of in ieder geval bespreken, op welke manier de regulatie van de bloedsuikerspiegel is verstoord bij diabetes mellitus (type 1 en 2), en hoe de bloedsuikerspiegel dan met insuline-injecties kan worden gereguleerd. Je kunt dan ook de rol van de nieren bespreken, die suiker gaan uitscheiden (in urine) als de bloedsuikerspiegel te hoog wordt.
- Je kunt ook de rol van de hersenen bespreken, die zoveel glucose mogen opnemen als nodig, onafhankelijk van de aanwezigheid/concentratie van insuline.
- Dit uitbeeldpracticum biedt allerlei mogelijkheden om verder te modelleren met behulp van de Coach (een grafisch model is momenteel in ontwikkeling).



### bijlagen

- instructies voor de leerlingen (let op: print de instructies voor de BLOED-groepjes, de LEVER en de ALVLEESKLIER op A3)
- hormoonbriefjes
- bordjes voor de organen (en evt. de bekeerglazen)



## 31. HET MENSTRUATIEKOOR

### *regeling van de menstruatiecyclus met spreekkoor en attributen*

In dit leuke, leerzame en – eerlijk is eerlijk – ook wat luidruchtige uitbeeldpracticum beelden leerlingen uit *wát* er tijdens de menstruatiecyclus allemaal gebeurt, en op *wélke* plekken in het lichaam die processen zich afspelen. Daarnaast ervaren de leerlingen de hormonale terugkoppelingsmechanismen die verantwoordelijk zijn voor de regeling van de menstruatiecyclus. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam) en Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen ervaren aan den lijve de complexiteit van een hormonaal regulatiesysteem (maar tegelijkertijd ook de eenvoud per schakel).</p> <p>Leerlingen kunnen in grote lijnen beschrijven hoe de menstruatiecyclus gereguleerd wordt en welke hormonen en hormoonklieren daar bij betrokken zijn.</p>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kopieën van de instructies voor alle rollen (zie bijlage)</li> <li>• A4-tjes met de namen van de organen/hormonen om op te hangen bij de groepen</li> <li>• witte of roze ballonnen (voor de follikel)</li> <li>• erwten of witte bonen (als eikel in de witte of roze ballonnen)</li> <li>• een prepareernaald o.i.d. (voor de ovulatie)</li> <li>• gele ballonnen (voor het gele lichaam)</li> <li>• rode kleurstof (eosine o.i.d.), flarden tissue en suiker (als baarmoederslijmvlies)</li> <li>• een groot bekglas o.i.d. (als ‘baarmoeder’ waarin het slijmvlies groeit)</li> <li>• een zeef voor in de gootsteen</li> </ul>

### voorbereiding

1. Verzamel alle benodigdheden.
2. Print de rolbeschrijvingen.
3. Maak eventueel naambordjes voor de organen.
4. Zorg ervoor dat je een schematische afbeelding van (de regeling van) de menstruatiecyclus (bijvoorbeeld Binas 86C) op de beamer kan projecteren.

### uitvoering: oefenen met LH en testosteron

1. Voordat je begint met het uitbeelden van de menstruatiecyclus kun je een oefensimulatie uitvoeren rondom de regulatie van de testosteronconcentratie (bij jongens/mannen). Leerlingen ervaren zo het principe van negatieve terugkoppeling, en maken alvast kennis met het spreekkoor als symbool voor hormoonconcentratie.
2. Er zijn twee organen nodig: de hypofyse en de testes. Speel zelf de hypofyse. Deze produceert LH. Doe voor hoe je één helft van de klas aanzet tot het scanderen van 'LH! LH!' en hoe je met armgebaren harder en zachter kan laten roepen. Leg uit dat het volume aangeeft hoe hoog de hormoonconcentratie is. Bij een lage concentratie LH horen we dus een fluisterend 'LH... LH... LH...' en bij een hoge concentratie klinkt uit volle borst 'LH! LH! LH!' (ongeveer zoals de spreekkoren van voetbalsupporters).
3. Kies één of twee leerlingen die de rol van de testes op zich nemen. Deze leerlingen laten de andere helft van de klas 'testosteron! testosteron!' scanderen.
4. Tenslotte vertel je dat de volgende regels gelden (noteer ook als pijlschema op het bord):
  - de testes luistert naar de LH-concentratie:  
hoe meer LH, hoe *hoger* de productie van testosteron (+)
  - de hypofyse luistert naar de testosteron-concentratie:  
hoe meer testosteron, hoe *lager* de productie van LH (-)
5. Laat nu de simulatie volgens deze regels 'lopen'. Waarschijnlijk zullen de concentraties (volumes) rondom een 'normwaarde' schommelen. Bespreek dat dat een gevolg is van negatieve terugkoppeling.

### uitvoering: de menstruatiecyclus

1. Leg in grote lijnen uit hoe de simulatie van de menstruatiecyclus zal gaan, en welke rollen daar bij horen.
2. Verdeel eerst de rollen voor de organen: de hypofyse, de eierstok en de baarmoeder. Maak hiervoor drie groepen tafels in de klas. Laat de leerlingen die organen spelen op of bij de tafels staan: twee leerlingen als hypofyse, vier leerlingen als eierstok en drie leerlingen als baarmoeder. Iedere leerling vervult één bepaalde functie van het orgaan (bijvoorbeeld het reageren op, of aansturen van, een hormoon, of het laten rijpen van de follikel).
3. Leg ook de bijbehorende materialen op de tafels.
4. Verdeel de rest van de leerlingen over de vier spreekkoren (FSH, LH, oestrogeen en progesteron). Zet de spreekkoren eventueel in de hoeken van het lokaal. Als er nog niet is geoefend met LH en testosteron (zie hierboven), dan hier even oefenen met scanderen (door de hormoonleerlingen) en dirigeren (door hypofyse en follikel/gele lichaam).
5. Laat leerlingen eerst hun rolbeschrijving goed lezen. Loop dan klassikaal alles stap voor stap door. Doe belangrijke handelingen eventueel voor (eicel/erwt in ballon, follikel opblazen, gele lichaam leeg laten lopen, slijmvlies laten groeien).
6. Dan is het tijd om de simulatie voor de eerste keer uit te voeren: de hypofyse begint met het aansporen van het FSH-spreekkor (gewoon door middel van handgebaren aangeven dat ze langzaam steeds luider moeten scanderen).
7. Als iedere leerling zijn eigen specifieke taak goed uitvoert, loopt de simulatie in principe vanzelf. De geprojecteerde schematische afbeelding van (de regeling van) de menstruatiecyclus (bijvoorbeeld Binas 86C) kan als 'spiekbrieftje' dienen. Zorg er als docent voor dat je de timing van de verschillende processen in de gaten houdt en – indien nodig – bijstuurt. Met name in de eierstok is het ingewikkeld, omdat daar vier processen spelen: follikelrijping door FSH, productie van oestrogeen, en (later) progesteronproductie en ovulatie door LH.
8. De simulatie eindigt met een luide kreet van de hele klas ('menstruatie!') waarbij het rode mengsel in de gootsteen wordt gedeponeerd.

### (na)denkwerk

- Het is heel normaal wanneer de simulatie de eerste keer niet helemaal lekker loopt. Dat is juist een mooi reflectiemoment. Bespreek wat er wel/niet goed ging. Doe de simulatie daarna nog een keer.
- Benadruk dat aan de ene kant het systeem als geheel heel complex is, maar dat tegelijkertijd de taak per element/onderdeel tamelijk simpel is: je hoeft maar op één signaal te letten en verder doe je 'je ding' als dat signaal komt.

#### aanpassen/uitbreiden

- Als uitbreiding op de ‘normale’ situatie kan de simulatie herhaald worden, maar met toevoeging van de pil of een zwangerschap.
- Eventueel kunnen ook de hypothalamus en de bijbehorende gonadotrope releasing hormonen in de simulatie verwerkt worden.

#### bijlagen

- rolbeschrijvingen

## 32. IMPULSGELEIDING MET DOMINO

In dit korte (demo)practicum wordt zichtbaar gemaakt dat (en waarom) sprongsgewijze impulsgeleiding sneller gaat dan impulsgeleiding in een ongemyleerde zenuwcel. Ook zijn de dominosteentjes een goede metafoor voor het gegeven dat het signaal (de impuls) zich verplaatst, zonder dat er fysiek een molecuul (of iets anders) langs de uitloper beweegt. Dit uitbeeldpracticum wordt beschreven in Niebert en Gropengiesser (2015)<sup>1</sup>.

---

**duur** 5 minuten

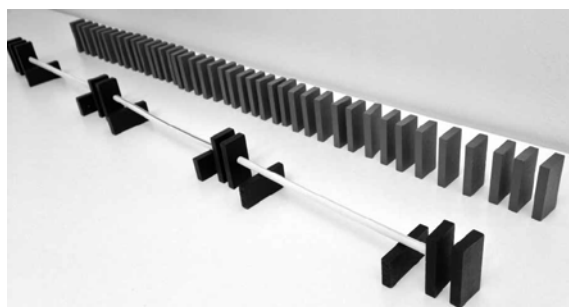
**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen:

- uitleggen wat het verschil is tussen sprongsgewijze en niet-sprongsgewijze impulsgeleiding;
- uitleggen dat (en waarom) sprongsgewijze impulsgeleiding sneller verloopt;
- uitleggen dat bij impulsgeleiding het signaal (de impuls) van het ene uiteinde van de uitloper naar het andere beweegt, maar dat de betrokken moleculen (de ionen) zich in- en uit het celmembraan bewegen.

**nodig**

- dominostenen
- rietjes of eetstokjes



---

<sup>1</sup> Niebert, K. & Gropengiesser, H. (2015). Understanding starts in the mesocosm: conceptual metaphor as a framework for external representations in science teaching, *International Journal of Science Education*, 37(5-6), 903-933.

### voorbereiding

1. Maak met de dominosteentjes en een paar rietjes of eetstokjes twee rijen, zoals op de afbeelding op het voorblad.

### uitvoering

1. Vertel de leerlingen dat we kijken naar twee (modellen van) zenuwuitlopers. Als leerlingen al enige voorkennis hebben kunnen ze zelf bedenken welk model welk type impulsgeleiding representeert. Maar dit (demo)practicum is ook prima geschikt om uit te voeren *voordat* de leerlingen iets van de theorie gehad hebben.
2. Laat leerlingen voorspellen wat er zal gebeuren als de buitenste dominosteentjes (aan één kant) tegelijkertijd een zetje krijgen. Welk dominosteentje aan de andere kant valt als eerste om?
3. Voer nu de simulatie uit. Klopt de voorspelling van de leerlingen? Hoe kunnen we de waarnemingen verklaren?

### (na)denkwerk

- Benadruk dat in de simulatie (en in werkelijkheid) een signaal wordt doorgegeven zónder dat er iets fysieks/tastbaars (zoals een molecuul) van de ene kant van de uitloper naar de andere beweegt.
- Laat ook zien dat er weer energie nodig is (het overeind zetten van de steentjes) om de geleiding van nieuwe impulsen mogelijk te maken. Dat is in werkelijkheid ook zo (alleen niet na één impuls): de Na/K-pomp moet het potentiaalverschil herstellen/in stand houden.
- Bespreek ook wat niet aan de simulatie klopt. De snelheid van geleiding is bijvoorbeeld in werkelijkheid natuurlijk nog veel sneller.

### 33. IMPULSGELEIDING MET LIJVEN

#### *de impulswave*

Simpel maar doeltreffend uitbeeldpracticum, waarbij het verloop van de actiepotentiaal centraal staat. Leerlingen staan in een rij naast elkaar, en vormen zo een uitloper van een zenuwcel. Ze geven met hun handen en armen het potentiaalverschil en de veranderingen die daarin optreden aan. Resultaat is een actieve en activerende les, en een (fysiek) geheugensteuntje voor de fasen van de actiepotentiaal. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Vrije Universiteit Amsterdam).

---

duur	20 minuten
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	Leerlingen kunnen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschrijven wat de begrippen rustpotentiaal, drempelwaarde, actiepotentiaal, en de-, re- en hyperpolarisatie betekenen;</li> <li>• uitleggen dat hyperpolarisatie tot eenrichtingsverkeer leidt;</li> <li>• uitleggen dat de cellen van Schwann (de myelineschede) voor een snellere impulsgeleiding zorgen;</li> <li>• uitleggen dat de grafiek van een actiepotentiaal een weergave is van een meting op één punt van een uitloper.</li> </ul>
nodig	geen

### voorbereiding

1. Zorg ervoor dat je een schematische afbeelding van het verloop de actiepotentiaal (bijvoorbeeld Binas 88F) op de beamer kan projecteren.

### uitvoering

1. Laat alle leerlingen op een rij staan, in een flauwe bocht, en met hun gezicht naar je toe. In een grote klas (of kleine ruimte) kun je eventueel een deel van de leerlingen laten observeren.
2. Vertel dat de rij leerlingen een uitloper van een zenuwcel voorstelt, en iedere leerling dus een stukje van die uitloper. Vertel dat we gaan uitbeelden hoe een actiepotentiaal/impuls zich langs de uitloper verplaatst.
3. Leg uit dat tijdens de simulatie de (vooruitgestoken) handen van de leerlingen het potentiaalverschil tussen de buiten- en de binnenkant van het celmembraan aanduiden.
4. Begin met het voordoen van de rustpotentiaal: handen gestrekt langs het lichaam, dus ongeveer op heuphoogte, met de vingers vooruitgestoken, staat symbool voor -70mV (de rustpotentiaal). Die positie nemen alle leerlingen aan.
5. Leg uit dat door verschillende factoren (o.a. door neurotransmitters) het potentiaalverschil lokaal kan veranderen, dus groter of kleiner kan worden. Als het potentiaalverschil de *drempelwaarde* overschrijdt – in werkelijkheid ongeveer -50 mV, in de simulatie gemarkeerd door de navel – dan vinden kort achter elkaar de volgende gebeurtenissen plaats:
  - o depolarisatie: het potentiaalverschil verandert van -50 mV (navelhoogte) naar +30 mV (handen boven het hoofd uitgestrekt).
  - o repolarisatie: het potentiaalverschil verandert van +30 mV (boven het hoofd) terug naar -70 mV (handen langs het lichaam naar beneden).
  - o hyperpolarisatie: het potentiaalverschil wordt even *nóg* groter (-80 mV = even door de knieën zakken, handen op kniehoogte), om dan weer terug te keren naar de rustpotentiaal.
6. Doe alle bewegingen een keer voor, en laat dan de leerlingen allemaal tegelijk de bewegingen nadoen, terwijl ondertussen de fasen benoemd worden.
7. Tenslotte is het zo dat wanneer depolarisatie plaatsvindt bij je buurman/vrouw, ook bij jou een depolarisatie begint (spreek af: zodra je buurman/vrouw de handen bij de navel heeft, begin jij met bewegen).
8. Nu is het tijd om de simulatie daadwerkelijk uit te voeren. Zorg aan één van beide uiteinden van de rij voor een prikkel die voor depolarisatie zorgt (tik bijvoorbeeld de leerling aan het eind van de rij op de schouder). Als het goed is ontstaat zo een soort 'wave' die zich langs de rij voortbeweegt. Herhaal een paar keer totdat het lekker loopt.



### (na)denkwerk

Gebruik de simulatie om in de vorm van een onderwijsleergesprek een aantal belangrijke kenmerken van de impulsgeleiding te bespreken:

- Als de actiepotentiaal halverwege de groep is, roep je ‘freeze!’ en wordt de situatie geanalyseerd. Het is goed om te bespreken dat de figuur van de actiepotentiaal nu zichtbaar is in de rij leerlingen, maar spiegelbeeldig aan de richting van de geleiding.
- Leg uit dat alleen een actiepotentiaal ontstaat wanneer de drempelwaarde wordt overschreden. Beeld dat uit door de leerling aan het eind van de rij (in rusttoestand) verschillende signalen te geven, bijv. schouder heel zacht aanraken met één vinger (weinig depolarisatie), hard(er) aantikken met hele hand (veel depolarisatie), en zachtjes aan schouder trekken (hyperpolarisatie).
- Bespreek dat een actiepotentiaal altijd even sterk is (alles of niets), maar dat sterke prikkels zorgen voor een hogere *impulsfrequentie*. Beeld dat eventueel uit.
- Leg uit dat bij impulsgeleiding het signaal zich langs de uitloper verplaatst, maar dat de ionen die hiervoor verantwoordelijk zijn de cel/uitloper in en uit bewegen. Vergelijk eventueel ook met het domino-model uit het vorige practicum).
- Bespreek dat actiepotentials in principe in twee richtingen langs een uitloper kunnen bewegen, maar dat in natuurlijke omstandigheden sprake is van eenrichtingsverkeer. Bespreek eventueel ook het concept refractaire periode.

### aanpassen/uitbreiden

- Beeld nu ook *sprongsgewijze impulsgeleiding* uit. Laat elke tweede en derde leerling in de rij de armen over elkaar te doen: zij stellen een gemyeliniseerd gedeelte van de uitloper voor. De actiepotentiaal springt nu rechtstreeks van de eerste leerling naar de vierde in de rij, vervolgens naar de zevende, et cetera. Gaat de wave nu sneller?
- Betrek eventueel ook impulsoverdracht in de simulatie. Laat de leerling aan het eind van de rij één of enkele balletjes, knikkers of iets andere vasthouden: dat zijn de neurotransmitters. Als de actiepotentiaal deze leerling bereikt worden de neurotransmitters losgelaten. Zie ook het volgende practicum.
- Laat een (slow-motion) filmpje van de simulatie maken.



## 34. IMPULSOVERDRACHT MET LIJVEN

In dit uitbeeldpracticum ligt de regie in handen van de leerlingen. Voortbouwend op het vorige practicum, waarbij het ging over impulsgeleiding, bedenken zij nu zelf een manier om de impulsoverdracht uit te beelden. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Vrije Universiteit Amsterdam).

---

duur	25 minuten (15 minuten bedenken, en 10 minuten aan elkaar laten zien)
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• de belangrijkste processen die in een synaps plaatsvinden beschrijven (begrippen die hierbij aan bod komen zijn bijvoorbeeld calciuminstroom, blaasjes met neurotransmitter, binding neurotransmitter, pre- en postsynaptisch membraan en acetylcholinesterase);</li><li>• samen met anderen een model/simulatie van een biologisch proces ontwikkelen.</li></ul>
nodig	(eventueel) allerlei huis-, tuin- en klaslokaalmaterialen

### voorbereiding

1. Zorg ervoor dat je een schematische afbeelding van de impulsoverdracht (bijvoorbeeld Binas 88G en 88H) op de beamer kan projecteren, en/of dat leerlingen zelf hun Binas bij de hand hebben.
2. Dit practicum bouwt nadrukkelijk voort op het practicum impulsgeleiding met lijven (zie hiervoor); het is dus raadzaam eerst dat practicum te doen, en dit practicum in een volgende les te plannen.
3. Zorg voor een ruimte (of verschillende ruimtes) waar leerlingen in hun groepje aan hun simulatie kunnen werken, en eventueel voor een open ruimte/spelvlak/podium voor het uitbeelden zelf.
4. Zorg eventueel ook voor verschillende materialen/voorwerpen die gebruikt kunnen worden (maar let er tijdens het bedenken op dat leerlingen zich niet verliezen in geknutsel).

### uitvoering

1. Verdeel de klas in een aantal groepen. De bedoeling is dat leerlingen de impulsoverdracht uitbeelden in een simulatie waarin zij zelf een molecuul, (deel van) een cel, of iets anders voorstellen. Omdat er best wat rollen te verdelen zijn is een grootte van ongeveer 10 tot 12 leerlingen per groep aan te raden.
2. Leerlingen krijgen de opdracht om de processen die bij de impulsoverdracht plaatsvinden in de synaps uit te beelden met gebaren, bewegingen en handelingen. Ze moeten zelf bedenken hoe ze dat doen. De enige 'beperking' die je als docent stelt is dat de simulatie eindigt wanneer in de postsynaptische cel een impuls ontstaat, en deze daardoor *een liedje naar keuze begint te zingen*.
3. Laat leerlingen Binas 88G (of een vergelijkbare afbeelding) als bron gebruiken.
4. Na ongeveer 10 tot 15 minuten laten de groepjes hun simulatie aan de rest van de klas zien.
5. Laat na het uitbeelden de toeschouwers interpreteren wat ze gezien hebben. Vervolgens mogen de uitbeelders zelf toelichting geven. Bespreek wat er wel en niet aan de simulatie klopte.

### (na)denkwerk

- Ga bij de nabespreking in op de volgende vragen: Wat maakt nou dat de neurotransmitter vrijkomt? Welke membraankanalen zijn hierbij betrokken? Wat voor soort receptor betreft dit? Wanneer stopt de cel weer met zingen?

### aanpassen/uitbreiden

- Doe de simulatie eventueel nog een keer met de hele klas (onder jouw regie). Er kunnen dan nog meer details uitgebeeld worden.
- Bespreek, of beter nog, laat uitbeelden wat er gebeurt wanneer er een inhiberende neurotransmitter wordt afgegeven.
- Bespreek, of beter nog, laat uitbeelden wat de effecten van drugs of neurotoxines kunnen zijn (bijvoorbeeld: voorkomen afbraak acetylcholinesterase, blokkade van receptoren).

## 35. ACTIEPOTENTIAAL MET HOEDJES EN LIJVEN

Leerlingen vinden het lastig om, aan de hand van een grafiek van de actiepotentiaal, te begrijpen wat er op membraanniveau precies gebeurt. Daarbij begrijpen ze vaak niet de *onderliggende mechanismen* die verantwoordelijk zijn voor de veranderingen in het potentiaalverschil die optreden. Door uit te beelden wat er op membraanniveau precies gebeurt bij een actiepotentiaal (en waarom) zullen leerlingen dit proces waarschijnlijk beter gaan begrijpen en onthouden. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Tim Nieuwenhuis (Gerrit van der Veen College, Amsterdam) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	30 minuten, incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw (havo en) vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• beschrijven hoe impulsgeleiding verloopt, en daarbij gebruikmaken van de termen depolarisatie, repolarisatie, hyperpolarisatie, actiepotentiaal en refractaire periode;</li><li>• uitleggen hoe de natriumpoort, de kalumpoort en de Na/K-pomp werken;</li><li>• een grafiek van de actiepotentiaal interpreteren, en deze koppelen aan de ionenverdeling van natrium en kalium.</li></ul>

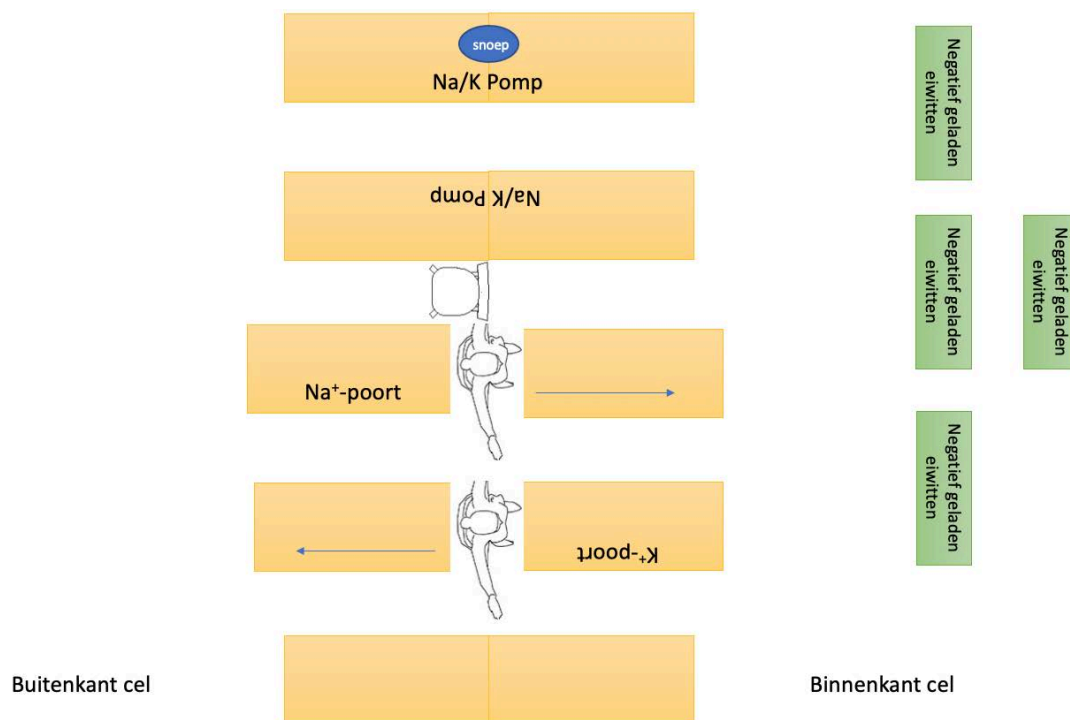


### nodig

- 15 rode en 15 blauwe hoedjes
- een grote ruimte met een aantal tafels en stoelen
- een zakje of rolletje snoepjes (ATP!)
- de bordjes in de bijlage (geprint op A3)
- de grafiek van de actiepotentiaal (geprojecteerd met de beamer)
- eventueel een smartphone (of ander apparaat) om een filmpje te maken

### voorbereiding

1. Zet in het midden van de ruimte een aantal tafels neer (zie afbeelding). Deze vormen het membraan van een uitloper. Zorg ervoor dat aan beide zijden van het membraan voldoende ruimte is om te lopen.
2. Geef met de bordjes aan wat de binnenkant en wat de buitenkant van de cel is.
3. Hang de bordjes met de eiwitten ergens aan de binnenkant (plak ze bijvoorbeeld op een tafel, de wand, of het skelet); omdat deze geen actieve rol spelen in de simulatie hoeven we geen leerlingen 'op te offeren' voor deze rollen.
4. Leg de bordjes met de ionpoorten en de Na/K-pomp tussen de tafels.



### uitvoering

1. Kies twee leerlingen uit die de ionpoorten gaan uitbeelden. Geef de volgende instructie:  
  
voor de *natriumpoort* - Wanneer de leerling haar/zijn arm zijwaarts uitgestoken heeft is de poort dicht (er kan niks passeren). Op een teken van de docent doet de leerling haar/zijn arm omhoog. De poort is dan open: (alleen) natriumionen kunnen nu door de poort het membraan passeren. De poort gaat weer dicht als de kalumpoort open gaat.  
  
voor de *kalumpoort* - Wanneer de leerling haar/zijn arm zijwaarts uitgestoken heeft is de poort dicht (er kan niks passeren). Wanneer zes natriumionen door de natriumpoort zijn gegaan, moet de leerling haar/zijn arm omhoog doen. De poort is dan open: (alleen) kaliumionen kunnen nu door de poort. De poort gaat weer dicht als zeven kaliumionen zijn gepasseerd.
2. Verdeel de overige leerlingen in twee groepen: dat zijn de natriumionen en kaliumionen. Geef elk type ion een eigen kleur hoedje.
3. Laat de leerlingen positie nemen in een rustpotentiaal: de poorten zijn dicht, binnen de cel staan (bijna) alle kaliumionen, en buiten de cel staan de natriumionen. Bespreek waarom de rustpotentiaal negatief is (door de negatief geladen eiwitten).
4. Geef de natriumpoort een seintje dat zij/hij moet open gaan (de drempelwaarde is bereikt). Bespreek met de leerlingen wat er nu gebeurt; herinner ze aan het proces diffusie. Laat de natriumionen diffunderen (zolang de poort open is en zolang er nog geen evenwicht is bereikt). Dit is *depolarisatie*.
5. Na het passeren van zes natriumionen zal de kalumpoort open gaan (en de natriumpoort dicht). Laat nu de kaliumionen diffunderen.
6. Als het goed is diffundeert er één kaliumion meer dan er natriumionen waren gediffundeerd. Dit is *repolarisatie*, en dan *hyperpolarisatie*.
7. Er is nu een nieuwe verdeling van ionen over het membraan. Bespreek met de leerlingen wat er is veranderd. Kostte het diffunderen van de ionen energie? Kunnen op deze manier eindeloos veel impulsen doorgegeven worden (nee, want de concentratiegradiënten verdwijnen)?
8. Bespreek nu de functie van de Na/K-pomp. Laat de leerlingen bedenken waarom de Na/K-pomp energie verbruikt (actief transport). Kies één leerling (die eerst ion was) uit en laat deze leerling nu de Na/K-pomp uitbeelden. Geef de volgende instructie:  
  
voor de *Na/K-pomp* - Deze leerling 'pompt' (voorzichtig trekken) natriumionen en kaliumionen tegen het concentratieverval in over het membraan, totdat de rustpotentiaal weer bereikt is. Laat de Na/K-pomp per twee getransporteerde leerlingen een snoepje opeten.
9. Als het hele proces stap voor stap is uitgelegd en uitgebeeld (onder regie van de docent), laat je de leerlingen nog een aantal actiepotentialen uitbeelden waarbij de Na/K-pomp natuurlijk steeds actief is. Leg indien nodig het proces tussendoor stil voor extra uitleg of instructie. Als docent hou je de regie op het aantal impulsen dat gegeven wordt: zo kan je de frequentie verhogen of verlagen.

### (na)denkwerk

- Projecteer met de beamer de grafiek van de actiepotentiaal op het bord, en koppel tijdens de simulatie en de uitleg dat wat er in de klas gebeurt aan de grafiek.
- Bespreek de overeenkomsten en verschillen tussen deze simulatie en de werkelijkheid. Ga bijvoorbeeld in op de aantallen natrium- en kaliumionen die door de Na/K-pomp worden verplaatst.
- Je kan nu ook bespreken dat er ook een maximale impulsfrequentie is en wat daarvoor de beperkende factoren zijn.

### uitbreiden

- Je zou met de natriumpoort-leerling kunnen afspreken dat je twee signalen (prikkel) hebt: een kleine en een grote. Een kleine prikkel leidt dan niet tot een (volledige) opening van de poort; de drempelwaarde wordt niet bereikt. Een grote prikkel (of veel kleine prikkels snel achter elkaar) zorgen wel voor het opengaan van de poort.
- Je kan de refractaire periode uitbeelden door een prikkel te geven terwijl aan beide kanten van het membraan (nog) evenveel natriumionen zijn. Dit werkt dus niet.
- Je kan de leerlingen eventueel ook de Binas-tabellen laten bestuderen, en de overeenkomsten en verschillen met de simulatie laten benoemen.

### bijlagen

- bordjes (printen op A3)



## 36. ACTIEPOTENTIAAL MET KRALEN

Tijdens een actiepotentiaal gebeurt er van alles met de concentraties ionen aan weerszijden van het neuronmembraan. In dit practicum beelden leerlingen in groepjes uit wát er precies gebeurt en in welke volgorde, en wordt natuurlijk ook nagedacht over de processen en mechanismen die verantwoordelijk zijn voor deze veranderingen. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• beschrijven hoe de natrium- en kaliumkanaaltjes en de natriumkalium-pomp zich gedragen in de verschillende fasen van een actiepotentiaal;</li><li>• uitleggen welke gevolgen dit heeft voor het potentiaalverschil en de ionenconcentraties binnen en buiten het celmembraan.</li></ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"><li>• een grote afbeelding van een membraan met daarin een natriumkanaltje, een kaliumkanaaltje en een natriumkaliumpomp</li><li>• gekleurde kralen (of knopen of gekleurde snoepjes zoals M&amp;M's of Skittles) om de ionen uit te beelden</li></ul>



### voorbereiding

1. Print de bijlage ‘membraan’ (één exemplaar per groepje van drie of vier leerlingen), in kleur en op A3-papier.
2. Print de bijlage ‘kanaaltjes’ (één exemplaar per vier groepjes), in kleur en liefst op wat dikker papier. Knip de kanaal-onderdelen uit, en doe ze eventueel per setje in een envelop.
3. Verzamel kralen (of andere kleine dingetjes die je makkelijk kan vastpakken) in twee verschillende kleuren.
4. Zorg dat leerlingen de beschikking hebben over Binas (88D, E en F), of een vergelijkbare bron.

### uitvoering

1. Verdeel de klas in groepjes van drie of vier leerlingen. Geef elk groepje een afdruk op A3 van de bijlage ‘membraan’, een setje kanaal-onderdelen, en stuk of 16 kralen (o.i.d.) in twee verschillende kleuren.
2. Vertel de leerlingen dat ze gaan uitbeelden wat er gebeurt op één plek op het celmembraan van een neuron vóór, tijdens en na een actiepotentiaal: hiertoe verschuiven ze de kralen en kanaal-onderdelen op het papier. Het einddoel is dat de leerlingen (als groep) alle gebeurtenissen stap voor stap kunnen uitbeelden.
3. De opdracht voor de leerlingen is als volgt:
  - Bedenk welke kleur kralen welke ionen voorstellen. Leg/teken/schrijf op het vel een legenda.
  - Leg de ionen nu zó op het vel neer dat sprake is van een rustpotentiaal.
  - Bespreek per fase – rustpotentiaal, depolarisatie, repolarisatie, hyperpolarisatie en weer rustpotentiaal – wat er gebeurt met de ionenconcentraties aan beide zijden van het membraan, de natrium- en kaliumkanaaltjes, en de natriumkaliumpomp.
4. Loop tijdens dat de leerlingen aan het werk zijn rond door de klas om vragen te beantwoorden en eventuele misconcepten te bespreken. Laat groepjes leerlingen die (naar eigen zeggen) al klaar zijn, het uitbeelden een keer voordoen (voor jou of voor elkaar).

### (na)denkwerk

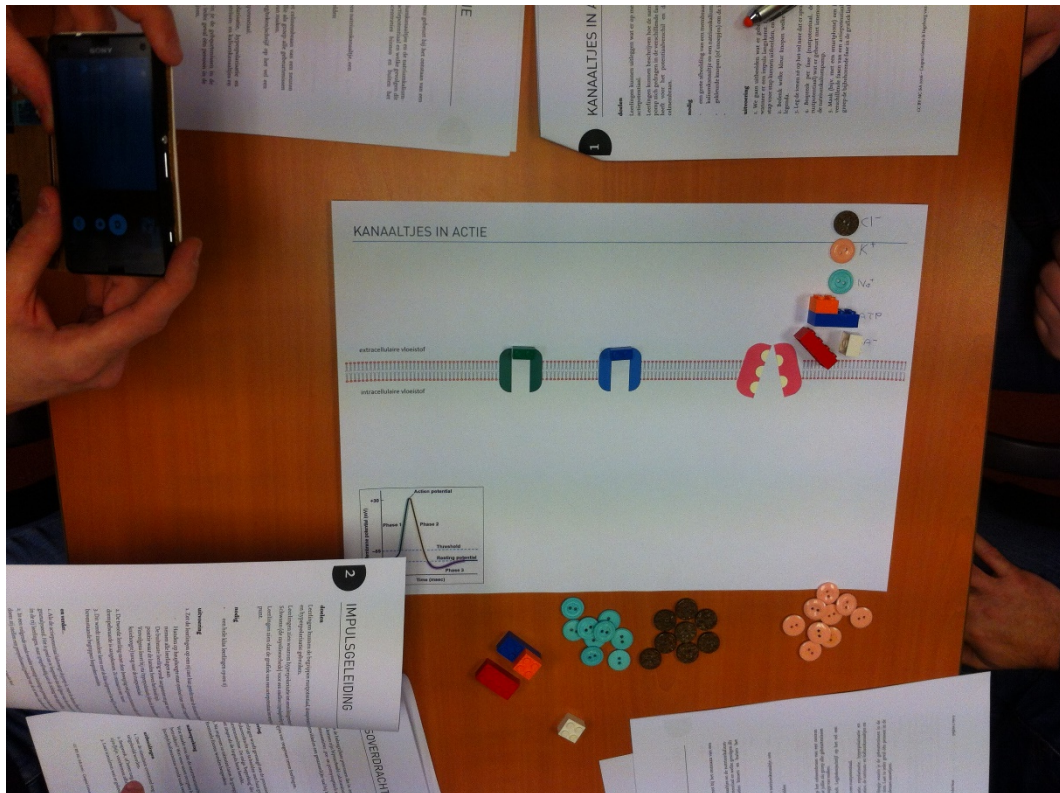
- Let erop dat ionen niet tegen het concentratieverval in bewegen. Het is dus niet de bedoeling dat tijdens de depolarisatiefase *alle* natriumionen de cel in stromen. Wanneer de concentraties aan beide zijden van het membraan gelijk zijn is er geen (netto) verplaatsing meer.
- Het lijkt er tijdens het uitbeelden vaak op dat de betrokken ionen heel gericht een bepaalde kant op bewegen. Benadruk dat in werkelijkheid natuurlijk sprake is van moleculen die *random* door elkaar bewegen.

### aanpassen/uitbreiden

- Geef de leerlingen de opdracht om met hun smartphone een kort filmpje te maken, waarin ze de gebeurtenissen in de verschillende fasen van een actiepotentiaal laten zien. Dat kan een stop motion filmpje zijn, maar een filmpje in één take (waarin de kralen dus gewoon met de hand verschoven worden) is een stuk sneller klaar. Tijdens het filmpje moet steeds de juiste fase in de grafiek links onderaan aangewezen worden, en is er een voice-over die beschrijft wat er te zien is. De filmpjes vormen mooi materiaal om in een latere les na te bespreken of te beoordelen (door de docent of door medeleerlingen).

### bijlagen

- membraan (printen op A3)
- kanaaltjes (printen op wat dikker papier)



## 37. SPIERCONTRACTIE MET LIJVEN

### *achter de ellebogen*

Veel leerlingen vinden het lastig om te begrijpen welk mechanisme verantwoordelijk is voor het samentrekken van een spier. Ook denken leerlingen nogal eens dat een (individuele) spier zich ook actief kan uitrekken (zich langer kan maken). Met behulp van deze eenvoudige activiteit laat je snel zien hoe het korter worden van een spier het gevolg is van het in elkaar schuiven van eiwitten. Dit uitbeeldpracticum is geïnspireerd op een filmpje van een Amerikaanse school waarin spiercontractie op ongeveer dezelfde wijze werd uitgebeeld, en werd verder uitgewerkt door Romke Koch (Het Amsterdams Lyceum).

---

duur	10 minuten
doelgroep	onderbouw, bovenbouw vmbo/havo/vwo
doelen	Leerlingen kunnen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschrijven hoe het korter worden van een spier (op orgaanniveau) het gevolg is van het in elkaar schuiven van eiwitten (op subcellulair niveau);</li> <li>• bij hun uitleg de termen actine en myosine gebruiken (bovenbouw).</li> </ul>
nodig	n.v.t.

#### uitvoering

1. Regel een gang, een lokaal of andere (grotendeels lege) ruimte.
2. Zorg er in een bovenbouwklas ook voor dat je een schematische afbeelding van de spiercontractie (bijvoorbeeld Binas 90C) op de beamer kan projecteren, en/of dat leerlingen zelf hun Binas bij de hand hebben.

#### uitvoering

1. Laat de leerlingen op een lange rij naast elkaar staan (bijvoorbeeld in een gang). Als je minder ruimte tot je beschikking hebt kan een hoefijzer natuurlijk ook, of je laat een deel van de leerlingen observeren en wisselt halverwege om.
2. Laat de leerlingen de ellebogen in elkaar haken, en vervolgens bij zichzelf de handpalmen op elkaar leggen. Er is nu een soort ketting ontstaan.

3. Vertel nu dat we het samentrekken van een spier gaan uitbeelden, en dat dat samentrekken het gevolg is van een aaneenschakeling van eiwitdraden die in elkaar schuiven.
4. Vraag de leerlingen om met hun vingers kleine ‘stapjes’ over de eigen onderarmen te maken: de ellebogen komen daardoor naar elkaar toe. Leerlingen merken dan dat ze door andere leerlingen worden meegetrokken. Geef aan dat ze mogen lopen en dus dichterbij elkaar komen te staan: de spier is nu aan het aanspannen en dus korter aan het worden.
5. Herhaal dit een paar keer totdat het soepel loopt.
6. Vertel dat voor elk stapje van de vingers energie nodig is (die wordt geleverd door ATP).
7. De vraag is nu hoe een spier vervolgens weer langer wordt. Waarschijnlijk (be)denken leerlingen zelf dat die vingers ‘dan wel de andere kant op zullen lopen’. Vertel dat dat niet het geval is (bij spierontspanning laten de vingers de onderarmen gewoon los), en dat (ontspannen) spieren weer lang worden door de werking van antagonisten. Laat leerlingen dat ook bij zichzelf voelen, door afwisselend de buig- en strekspier van de arm te gebruiken.

#### (na)denkwerk

- Afhankelijk van het leerjaar en niveau van de groep kun je meer of minder in detail treden. In de onderbouw kun je volstaan met aangeven dat spiereiwitten langs elkaar bewegen (het met de vingers lopen over de onderarm) en op deze manier korter worden, al is het natuurlijk ook leuk om te vertellen dat spiereiwitten ook in werkelijkheid een soort vingertjes hebben. In de bovenbouw kun je expliciet aandacht besteden aan de rol van actine, myosine en de herkomst van het bandenpatroon (zie hieronder).

#### aanpassen/uitbreiden

Je kunt dit uitbeeldpracticum in een bovenbouwklas ook goed in meer detail uitvoeren (liefst na eerst de simpelere versie hierboven gedaan te hebben):

- De leerlingen stellen nu om en om actine of myosine voor. Ze haken de ellebogen nu niet meer in elkaar, maar houden de armen gestrekt: de actine-leerlingen met gebalde vuisten, en de myosine-leerlingen met vingers die als ‘myosinekopjes’ (zie Binas 90C) over de actinefilamenten van hun beide burens kunnen lopen. Let op: bij het in elkaar schuiven van de filamenten moeten leerlingen nu iets meer zelf meebewegen. Met een rij(tje) leerlingen die op deze manier staan kun je nu wel heel mooi het karakteristieke bandenpatroon van dwarsgestreept spierweefsel laten zien: de armen zijn natuurlijk de eiwitfilamenten zelf, de romp van een actine-leerling vormt de Z-lijn, de romp van een myosine-leerling vormt de M-lijn, de spanwijdte (van de linkerhand tot de rechterhand) van de myosine-leerling vormt de A-band, et cetera.

## 38. AFWEER MET BITJES EN SCHROEVEN

In dit uitbeeldpracticum gaan leerlingen aan de slag met een fysiek (en herbruikbaar) model van het immuunsysteem, en beelden daarmee de verschillende stappen van een afweerreactie uit. Door gebruik te maken van verschillende soorten bitjes en bijbehorende schroeven komt de specificiteit van het immuunsysteem duidelijk naar voren, en kan het principe van klonale selectie zichtbaar gemaakt worden. Doordat leerlingen het echt zelf naspelen, krijgen ze meer zicht op het verloop van het proces. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

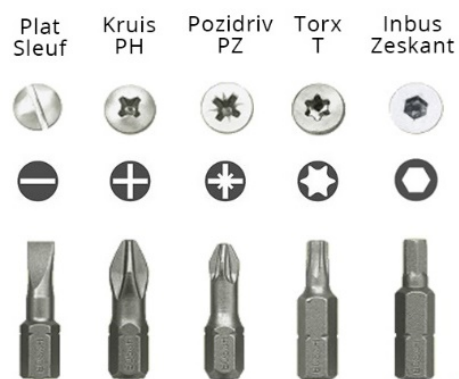
---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• in grote lijnen beschrijven hoe een cellulaire immuunreactie verloopt, en uitleggen welke rol macrofagen, T-helpercellen en cytotoxische T-cellen hierin spelen;</li><li>• in grote lijnen beschrijven hoe een humorale immuunreactie verloopt, en uitleggen welke rol macrofagen, T-helpercellen, (inactieve) B-cellen en plasmacellen hierin spelen;</li><li>• uitleggen wat met de term klonale selectie bedoeld wordt;</li><li>• uitleggen wat de functie is van geheugencellen en dit in verband brengen met vaccinaties.</li></ul>

nodig

verschillende materialen die je nodig hebt om het model van het immuunsysteem te maken:

- verschillende soorten bitjes en bijpassende schroeven (deze stellen de antigenen en antistoffen voor)
- kleine balletjes, bijvoorbeeld van piepschuim of hout (deze stellen de virussen voor)
- verschillende soorten wegwerpbekers, bijvoorbeeld van papier of plastic, bij voorkeur met deksel (deze stellen verschillende soorten cellen voor; zorg daarom ook voor etiketten om de cellen te labelen)
- twee verschillende kleuren plakband, bolletjes klei, o.i.d. (deze stellen de MHC-eiwitten voor)
- een aantal grote bakken om de materialen in te verzamelen





### voorbereiden

1. Voordat je met dit practicum aan de slag gaat is het nodig om (eenmalig) wat tijd te investeren in het maken van het model. Doe dat eventueel samen een TOA en/of collega's.
2. De basis van het model wordt gevormd door minimaal drie verschillende soorten bitjes en bijpassende schroeven. Varieer in eerste instantie in verschillende soorten (bijvoorbeeld kruiskop, sleufkop en Torx, zie de afbeelding op de vorige pagina) en in tweede instantie eventueel nog in verschillende *maten*.
3. De bitjes en schroeven stellen de antigenen en antistoffen voor. U kunt zelf bepalen of de bitjes de antistoffen voorstellen (zie foto voorbeeld 1) of juist de antigenen (zie foto's voorbeeld 2). Hou er rekening mee dat van het type antistof dat past op het antigen dat voorkomt op de ziekteverwekker meer exemplaren nodig zijn (voor de antistoffen die door de plasmacellen gemaakt worden).
4. De uiteindelijke vormgeving van het model is afhankelijk van de beschikbaarheid van verschillende soorten bekertjes en andere materialen (en natuurlijk ook afhankelijk van de hoeveelheid tijd die u wilt/kunt besteden). In de foto's hieronder staan ter inspiratie twee verschillende versies van het model.
5. Ga uit van één volledige set materiaal per groepje van vijf leerlingen. Zorg ook voor extra materiaal voor in de klas voor de B-cellen, T-cellen en antistoffen die gevormd gaan worden.

voorbeeld 1



Een volledige set bestaat hier uit:

- 4 virussen; dit zijn de tafeltennisballetjes met Torx-schroef als antigen
- 2 macrofagen; dit zijn de doorzichtige bekers, mét een extra bakje erin zodat je kan zien dat de ziekteverwekker er afgeschermd van de celinhoud in zit; op het etiket staat macrofaag
- 2 T-Helpercellen; dit zijn de grote rode bekers; op het etiket staat Th-cel
- 8 Tc-cellen; dit zijn de gesloten koffiebekers met aan elk bekertje een ander bitje (als antistof), vastgelijmd met een lijmpistool; op het etiket staat Tc-cel
- 8 B-cellen; dit zijn de gesloten koffiebekers met aan elk bekertje een ander bitje (als antistof), vastgelijmd met een lijmpistool; op het etiket staat B-cel
- 10 lichaamscellen; dit zijn de doorzichtige rode bekers; op het etiket staat lichaamscel
- (niet op de foto te zien) blauw en groen plakband voor de MHC-I en MHC-II eiwitten

voorbeeld 2



Op de afbeelding is op de voorgrond een virus te zien (met Torx-bitjes als antigenen), en op de achtergrond staan van links naar rechts drie witte bloedcellen: een antigeen-presenterende cel (met een MHC-II eiwit van stukje tak), een T-helpercel (met een receptor, van een stukje hout met daarin een schroef), en een B-cel (met twee gebogen schroeven als membraangebonden antistof). Rechts op de voorgrond liggen nog twee losse antistofmoleculen.

### uitvoering

1. Geef elk groepje leerlingen een bak met materiaal (of zorg dat de bakken op tafel staan als de leerlingen binnenkomen).
2. Bespreek eerst met de leerlingen wat in het model wat voorstelt. Welke typen cellen zien we in het model? Waar in het lichaam vinden we die? Wat stellen de bitjes en de schroeven voor?
3. Vertel de leerlingen dat ze met behulp van de bekertjes en de andere materialen gaan uitbeelden wat er gebeurt wanneer een virus het lichaam binnendringt, en het immuunsysteem in actie komt. Ze gebruiken hierbij Binas 84L (of een vergelijkbare bron).
4. Deel eventueel ook de instructie voor de leerlingen op papier uit (zie bijlage).
5. Tijdens dat de leerlingen aan de slag zijn kan het nodig zijn ze aan te moedigen de antigenen ook echt van de ziekteverwekker af te halen, zodat ze op het celmembraan gepresenteerd kunnen worden.
6. Als een groepje denkt het hele proces te kunnen uitbeelden, mag die een seintje geven zodat de docent of de TOA kan komen controleren. Uitleggen aan medeleerlingen is ook een optie.

### (na)denkwerk

Ga tijdens de nabespreking in op de volgende vragen:

- Wat is er anders aan het einde van de immuunreactie? Zijn er cellen of andere biologische structuren bijgekomen (of verdwenen)? Zijn er geheugencellen ontstaan?
- Is de persoon waarin de uitgebeelde immuunreactie heeft plaatsgevonden nu ook immuun? Waarom wel/niet?
- We hebben nu een virale infectie uitgebeeld. Wat zou anders zijn bij een bacteriële infectie?

### aanpassen/uitbreiden

- Laat de leerlingen eventueel foto's maken van verschillende fasen van de immuunreactie (zie bijvoorbeeld het schema in de beschrijving van het volgende practicum). Dit practicum leent zich ook goed voor het maken van een (stop-motion) filmpje. Voordeel is dat die weer vertoond kunnen worden, waarmee je eventuele misvattingen klassikaal kan laten zien of laten signaleren door leerlingen. En als je een geweldig filmpje hebt, kun je dat ook volgende jaren gebruiken.
- Voor havo-klassen zou je ervoor kunnen kiezen om MHC-I en MHC-II uit het model weg te laten.

### bijlagen

- instructie voor leerlingen (behorende bij voorbeeld 1)

## 39. AFWEER ALS FOTOSTRIP

Bij het adaptieve (of specifieke) immuunsysteem zijn allerlei verschillende cellen en moleculen betrokken. Bovendien zijn er verschillende deelprocessen, die zich deels na elkaar, maar deels ook tegelijkertijd voltrekken. Voor veel leerlingen is het daardoor lastig om op basis van (bijvoorbeeld) het welbekende Binas-diagram zicht te krijgen op wat er nou precies gebeurt. In dit uitbeeldpracticum kruipen leerlingen zelf in de rol van cel of ziekteverwekker, en beelden (eventueel met attributen) de immuunreactie uit in een beeldverhaal of fotostrip. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Silke Bossers en Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam), met bijdragen van Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	<p>één lesuur (50 minuten) voor instructie en uitvoering;          één lesuur of huiswerk voor het maken van het verslag;          één les(deel) voor nabespreking en (evt.) peer-review</p>
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• in grote lijnen beschrijven hoe een cellulaire immuunreactie verloopt, en uitleggen welke rol macrofagen, T-helpercellen en cytotoxische T-cellen hierin spelen;</li> <li>• in grote lijnen beschrijven hoe een humorale immuunreactie verloopt, en uitleggen welke rol macrofagen, T-helpercellen, (inactieve) B-cellen en plasmacellen hierin spelen;</li> <li>• uitleggen wat met de term klonale selectie bedoeld wordt;</li> <li>• uitleggen wat de functie is van geheugencellen en dit in verband brengen met vaccinaties.</li> </ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• materialen naar keuze: bijvoorbeeld Duplo®, papier of karton, (witte) laboratoriumjassen, hoedjes, plantenspuitje, snoepjes, et cetera</li> </ul>

### voorbereiding

1. Verzamel eventueel van tevoren al verschillende materialen die leerlingen kunnen en mogen gebruiken (zie hierboven bij nodig).
2. Print de schema's met de verschillende fasen van de cellulaire en humorale afweer uit (één schema per groepje van vier of vijf leerlingen).
3. Zorg ervoor dat je Binas 84L (of een vergelijkbaar schema) kan projecteren.

## uitvoering

### oriënteren

1. Verdeel de leerlingen in groepjes van vier of vijf leerlingen.
2. Vertel de leerlingen in grote lijnen wat er gaat gebeuren: ze gaan met hun groepje een beeldverhaal of fotostrip maken van de verschillende fasen van de cellulaire óf de humorale afweer.
3. Geef elk groepje een overzicht van de verschillende fasen van de cellulaire óf de humorale afweer.
4. Geef de leerlingen eerst de opdracht om de verschillende fasen in het schema terug te vinden in Binas 84L (of een vergelijkbare bron).

### uitbeelden

5. Geef leerlingen nu de volgende opdracht:
  - Beeld met je groepje de tien verschillende fasen van de cellulaire of humorale afweer uit. Maak van elke fase een foto.
  - Je mag attributen gebruiken, maar het is de bedoeling dat je zelf ook op de foto's te zien bent (en iets voorstelt, bijvoorbeeld een cel).
  - Je gaat de foto's later verwerken in een verslag, waarin je bij elke foto een bijschrift en/of tekstballonnetjes toevoegt.
  - Denk van tevoren wel goed na over hoe je op de foto kunt laten zien welke verschillende cellen (en ziekteverwekkers) bij de immuunreactie betrokken zijn. Denk ook na hoe je het verschil tussen inactieve en actieve B- of T-cellen kunt uitbeelden. Bedenk ook een manier om het verschil tussen antigenen en antistoffen uit te beelden.
6. Laat (eventueel) de beschikbare materialen aan de leerlingen zien (en doe daarbij indien nodig enkele suggesties), bijvoorbeeld de laboratoriumjassen (voor de witte bloedcellen), de snoepjes (als cytokinen met 'activerend' effect), en de plantenspuit (om de productie van perforine door Tc-cellen mee uit te beelden). Het verschil tussen lichaamscellen die zich niet voortbewegen, en witte bloedcellen die dat wel doen, kan op een foto bijvoorbeeld uitgebeeld worden door de lichaamscellen te laten zitten op een stoel, terwijl de andere cellen kunnen staan.

### verslag leggen

7. Verdeel de leerlingen nu in twee- of drietallen, bestaande uit (minimaal) één leerling die de cellulaire afweer heeft uitgebeeld en één leerling die de humorale afweer heeft uitgebeeld.
8. Laat elk twee- of drietal een verslag maken in de vorm van een beeldverhaal of fotostrip. Hierin worden de foto's van de verschillende fasen achter elkaar gezet, en voorzien van een legenda, een bijschrift, of tekstballonnetjes, ter ondersteuning van het beeld.
9. Na inleveren kan het verslag eventueel beoordeeld worden door de docent en/of door medeleerlingen (mogelijke criteria: juistheid, compleetheid en creativiteit).



#### [aanpassen/uitbreiden](#)

- Ga tijdens de nabespreking eventueel in op de vraag wat er gebeurt bij een HIV-infectie? En wat gebeurt er bij een allergie?

#### [aanpassen/uitbreiden](#)

- Je kunt de immuunreactie ook in één keer met hele klas uitbeelden, onder regie van jou als docent. Maak een kring met tafels die de huid voorstelt, en die voor ziekteverwekkers nagenoeg ondoordringbaar is (de eerste verdedigingslinie). Maak in de kring een aantal makkelijk(er) te passeren openingen (stoelen?), die de neus, de mond en evt. een wond voorstellen. Geef leerlingen elk een eigen rol; gebruik hoedjes, badges o.i.d. voor alle lichaamseigen cellen (lichaamscellen en witte bloedcellen). Laat de leerlingen nu stap voor stap de opeenvolgende fasen van de cellulaire en/of humorale immuunreactie uitbeelden (met attributen), waarbij ze zoveel mogelijk zelf bedenken wat er moet gebeuren (Binaschema op de beamer?).

## CELLULAIRE AFWEER

- |  |    |  |
|--|----|--|
| 1. macrofaag fagocyteert ziekteverwekker | én | 4. ziekteverwekker dringt lichaamscel binnen     |
| 2. macrofaag presenteert antigen         |    | 5. lichaamscel presenteert antigen               |
| 3. macrofaag bindt en activeert Th-cel   |    | 6. (specifieke) pre-Tc-cel bindt aan dat antigen |
- 
- 
7. Th-cel bindt en activeert pre-Tc-cel
  8. Tc-cel deelt: vorming actieve Tc-cellen en Tc-geheugencellen
  9. Tc-cellen binden aan antigenen op geïnfecteerde cellen
  10. Tc-cellen produceren eiwitten waardoor geïnfecteerde lichaamscellen kapot gaan
- 

## HUMORALE AFWEER

- |  |    |   |
|--|----|---|
| 1. macrofaag fagocyteert ziekteverwekker | én | 4. (specifieke) B-cel bindt aan antigen |
| 2. macrofaag presenteert antigen         |    | 5. B-cel presenteert antigen            |
| 3. macrofaag bindt en activeert Th-cel   |    |   |
- 
- 
6. Th-cel bindt en activeert B-cel
  7. B-cel deelt: vorming plasmacellen en B-geheugencellen
  8. plasmacellen vormen antistoffen
  9. antistoffen binden aan antigenen op ziekteverwekker
  10. macrofagen ruimen antigen-antistof-complex op



## 40. TURGOR EN PLASMOLYSE MET BALLON IN NET

Onder de microscoop is plasmolyse (bij rode uien) goed te zien, maar dan is vooral de volumeverandering van de celinhoud te zien en niet wat er met de celwand gebeurt. Turgor is niet zichtbaar te maken onder de microscoop... maar wel zichtbaar én voelbaar met deze eenvoudige activiteit. Nota bene: in deze beschrijving is het een demo door de docent; bij genoeg materiaal kunnen leerlingen het natuurlijk ook allemaal zelf ervaren. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	10 minuten (als demopracticum)
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• aangeven wat de belangrijkste verschillen zijn tussen celwand en celmembraan;</li> <li>• aan de hand van dit voorbeeld (en de ervaring) uitleggen hoe turgor en plasmolyse ontstaan door samenspel van celwand en celinhoud.</li> </ul>
voorkennis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• osmose en diffusie</li> <li>• hypertoon, hypotoon en isotoon</li> </ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ballonnen (het liefst rood als de rode-ui-microscopie al aan bod is geweest of nog aan bod komt)</li> <li>• een niet rekbaar maar wel met koord afsluitbaar netje met een volume van minstens een liter (zoals bij sommige kampeerspullen wordt geleverd; of anders een netje waarin sinaasappels of aardappels zitten; daar moet dan een koordje door worden geregen als het niet goed afsluitbaar is)</li> </ul>



### voorbereiding

1. Blaas van tevoren eventueel de ballonnen vast een keer los op, zodat het bij de echte uitvoering makkelijker gaat.

### uitvoering

1. Toon de ballon en zeg dat dit een cel is: het rubber is de celmembraan, de lucht erin is cytoplasma.
2. Blaas de ballon een stukje op en vraag wat er gebeurt als je deze cel in water zou leggen; laat leerlingen antwoorden met gebruikmaking van de termen die genoemd zijn bij voorkennis. Blaas de cel verder op. Nu zijn er twee mogelijkheden: doorgaan met blazen tot hij knapt (zoals met een rode bloedcel zou gebeuren) óf dat alleen noemen en vragen wat het verschil is met een plantencel.
3. Toon dan de redelijk opgeblazen ballon in het dichtgeknoopte net (dichtgeknoopt wil zeggen dat het ballontuitje nog uit de opening van het net steekt). Laat de leerlingen bedenken wat het net nu voorstelt als het een plantencel is. Dit is een goed moment om de eigenschap van totale doorlaatbaarheid te benoemen: alles kan door die celwand heen, in tegenstelling tot de situatie bij de celmembraan.
4. Laat leerlingen eerst individueel nadenken en met vaktermen formuleren wat er gebeurt als deze (planten)cel in water wordt gelegd.
5. Vervolgens kun je demonstreren dat je de cel langzaam opblaast tot de ballon het netje overal raakt (dat moment even benoemen) en verder tot het netje helemaal strak gespannen staat – verder lukt gewoon niet. Nu is de wand strak gespannen en is er turgor (wanddruk = osmotische druk).
6. Laat leerlingen dan individueel nadenken en met vaktermen formuleren wat er gebeurt als deze (planten)cel in een sterke zoutoplossing wordt gelegd.
7. Laat langzaam lucht ontsnappen uit de ballon, waarbij de ballon nog wel overal in contact blijft met het netje, en vraag ‘ondertiteling’ van de leerlingen. Is de turgor nu groter, hetzelfde of kleiner?
8. Benoem dat er plasmolyse is op het moment dat de ballon loskomt van het netje.
9. Laat nog meer lucht ontsnappen en wijs erop dat de celinhoud afneemt, maar de wandomvang niet meer: de wand is slap, er is geen turgor, en als alle plantencellen er zo aan toe zijn hangt de hele plant slap. Verwelkt.
10. Maar als je de plant dan weer water geeft.... enz.

### (na)denkwerk

- Is in de maximaal opgeblazen toestand (turgor maximaal) de celinhoud isotoon met de oplossing eromheen (dus ook in de celwand)? In het voorbeeld van water is het duidelijk dat dat niet zo is – dat is een ‘voorbeeldige’ extreme situatie om hierover te redeneren.
- Met dit proefje in gedachten is het ook makkelijker de resultaten van de bekende proef met de aardappelstaafjes te verklaren bij heel hoge en heel lage concentraties (waar er geen verandering in de gemeten lengte meer optreedt).

## 41. CAMBIUM-COCOONING

### *cambium, hout en bast met lijven*

Het is voor leerlingen lastig te bepalen hoe de leeftijdsopbouw van jaarringen in hout en bast is; het is wel te beredeneren, maar daarbij worden vaak fouten gemaakt. In dit eenvoudige uitbeeldpracticum ervaren leerlingen aan den lijve de logische volgorde van hout- en bastcelvorming. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	15 minuten
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• uitleggen waardoor de jongste houtcellen aan de buitenkant van het hout zitten en de jongste bastcellen aan de binnenkant van de bast;</li> <li>• uitleggen welke rol cambiumcellen en differentiatie daarbij spelen.</li> </ul>
voorkennis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cambium als meristeem/delingsweefsel</li> <li>• differentiatie</li> </ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• één vrijwilliger – die kiest vervolgens andere deelnemers</li> <li>• (eventueel) houtschijven</li> <li>• (eventueel) een afbeelding zoals onderaan deze instructie</li> <li>• (eventueel) een hoedje voor de cambiumcel</li> </ul>

### voorbereiding

1. Bedenk wat een goede plek is in (of buiten) het lokaal om dit uit te beelden.

### uitvoering

1. Vraag een vrijwilliger die een cambiumcel wil zijn. Laten we aannemen dat Nanda zich meldt. Zij wordt geposteerd met de rug tegen een muur of de docententafel, zó dat er vóór haar genoeg ruimte is. Ze moet dwars op de kijkrichting van de rest van de leerlingen staan. Benadruk dat Nanda een cambiumcel is en dat haar rug het midden van het prille boomstammetje is.
2. Laat Nanda vervolgens bepalen welk type cel bij de eerstvolgende deling na differentiatie ontstaat, een houtcel of een bastcel. Ze mag dan een leerling kiezen die zo'n cel uitbeeldt. Maar voordat die erbij gaat staan moeten de andere leerlingen bedenken of de nieuwe cel voor of achter Nanda moet gaan staan. Bij een bastcel gebeurt er niets anders dan dat die leerling vóór Nanda gaat staan. Een houtcel moet achter haar - dus ze moet een stapje naar voren, en dan kan meteen genoemd worden dat het cambium dus dan kennelijk naar buiten opschuift.
3. Laat Nanda zo nog een stuk of zes cellen afsplitsen. De essentie is dat elke nieuwe cel direct voor of achter Nanda moet gaan staan. Het noemen van de leerlingnamen is in de praktijk een geheugenanker gebleken.

Nota bene: wees bedacht op gevoelens van ongemak doordat leerlingen heel dicht / te dicht achter een ander gaan staan. Dat is op te lossen door '30 centimeter celwand' te hanteren.

### (na)denkwerk en uitbreiding

- Als er veel groei is moet de boom ook in omvang toenemen. Hoe kan dat hier uitgebeeld worden? Dat kan bijvoorbeeld door Nanda een cambiumcel naar opzij te laten afsplitsen die vervolgens ook hout- en bastcellen gaat maken (eventueel zou je het practicum nog eens kunnen herhalen maar dan in een hoek tussen twee muren, waarbij groei in twee richtingen plaatsvindt, en er een kwart stam ontstaat).
- Is elke cel die nu is afgesplitst een voorbeeld van een jaarring? Een jaarring bevat wijde en smalle cellen. Hier past mooi uitleg of een onderwijsleergesprek over voorjaarshout, nazomerhout, en de 'winterstop'. Hoe kun je dan met twee leerlingen één jaarring uitbeelden? Bijvoorbeeld een leerling die de armen voor zich gestrekt houdt, en de ander houdt ze langs het lichaam (wie wordt dan als eerste afgesplitst door Nanda?). Hiermee wordt de opbouw van jaarringen uitgebeeld. In de misconceptenbank biologie is meer te vinden over problemen met jaarringen: [www.ntwpracticumnet.ou.nl/content-e/Kennisbank\\_biologie\\_misconcepen/documents/mi\\_25798\\_do\\_16074.htm](http://www.ntwpracticumnet.ou.nl/content-e/Kennisbank_biologie_misconcepen/documents/mi_25798_do_16074.htm)
- Waar en hoe zie je dit uitbeeldpracticum terug in Binas/ScienceData?
- Waar en hoe zie je dit uitbeeldpracticum terug bij echte houtschijven?

### bijlage

- schematische afbeelding van diktegroei in de loop van de tijd

## 42. ENDODERMISDRAMA

### *worteldruk met lijven*

In bovenbouw vwo komt bij transport in planten (het ontstaan van) worteldruk aan de orde, maar de routes van water en mineralen in de wortel daarbij zijn ingewikkeld. Om die duidelijker te maken kan dit korte endodermisdrama nuttig zijn – in een practicum waar iedereen aan deelneemt. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	15-20 minuten, inclusief nabespreking
doelgroep	bovenbouw vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen uitleggen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• hoe de water- en mineralenstroom in een plantenwortel loopt;</li> <li>• wat de rol van de endodermis daarbij is;</li> <li>• hoe worteldruk ontstaat.</li> </ul>
voorkennis	<p>Begrippen zoals nutriënt/zout/mineraal, passief en actief transport, symplasmatisch en apoplasmatisch transport, plasmodesma, centrale cilinder, houtvaten, bastvaten, endodermis, bandjes van Caspary – maar die kunnen ook al doende of naderhand worden geïntroduceerd.</p>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• een flinke open ruimte in de klas of daarbuiten</li> <li>• stevig en stabiel huishoudtrapje (of stoel of vierpotige kruk)</li> <li>• labjassen voor de helft van de klas</li> <li>• eventueel winterwortels of bospeentjes</li> <li>• eventueel blauwe A4-vellen</li> </ul>

### voorbereiding

1. Dit uitbeeldpracticum kan gebruikt worden als levendige en dynamische illustratie van een inhoudelijke les; in dat geval moeten de begrippen genoemd bij 'voorkennis' behandeld zijn. Zo niet, dan is het alleen spullen en ruimte organiseren, en misschien de begrippen als lijst projecteren.
2. Zet de trap in het midden van de open ruimte neer en leg de labjassen klaar.
3. Voor het juiste begrip van het concept 'centrale cilinder' is het handig een paar winterwortels of bospeentjes bij de hand te hebben, deels dwars doorgesneden en deels in de lengte doorgesneden.
4. Houd de blauwe vellen bij de hand.

### uitvoering

1. Introduceer de situatie (waarbij de vakbegrippen worden teruggevraagd als ze al behandeld zijn; of genoemd als het practicum als introductie wordt gebruikt): de open ruimte is een stukje plantenwortel, waarin leerlingenkomen te staan die cellen uitbeelden, en de tussenruimtes zijn de celwanden. In die celwanden bewegen nutriënten/zouten/mineralen (vanaf nu kortweg 'zouten'), opgelost in water. De trap is (een houtvat in) het midden van de wortel, in de centrale cilinder.
2. Verdeel de klas in twee groepen: de cellen en de zouten. Er zijn minimaal drie leerlingen nodig als endodermiscellen, minimaal zes als schorscellen, en minimaal vier als zout. Voor groepen vanaf 15 leerlingen voldoet de simpele regel: de helft cellen, de helft zout. Om gedoe bij de endodermis te voorkomen is het handig die in ieder geval uit meisjes te laten bestaan.
3. Laat de cellen de labjassen aandoen, met de mouwen opgestroopt. Licht toe dat de labjas voor de cellen de celmembraan voorstelt, en het lichaam het cytoplasma – of vraag het.
4. De drie à vier endodermisdames gaan in een kring rond de trap staan, met hun rug er naar toe, en vormen een gesloten kring door elkaars hand te pakken. Licht toe dat zij de endodermis voorstellen, de 'binnenhuid' rond de centrale cilinder waarin verticale transportvaten zitten – of vraag het.
5. De endodermisdames kunnen nu óf een geheime instructie krijgen, óf die vertel je later openlijk: als er een zout binnen endodermisbereik komt, mogen twee endodermiscellen dat zout actief naar binnen de kring trekken en de kring weer sluiten.
6. De rest van de 'wortelcellen' gaat verspreid in de ruimte om de endodermis staan, met minimaal 1 meter onderlinge afstand. Licht toe dat die open ruimte tussen de cellen de celwanden voorstelt – of vraag het. Dat is ook het moment om terug te komen op de in elkaar gegrepen armen van de endodermisdames: die blokkeren dus de celwand ter plaatse (kurkbandjes van Caspary).
7. Eventueel kun je dan als symbool voor het water waarmee de celwanden verzadigd zijn, her en der blauwe vellen op de grond leggen – dus ook in de centrale cilinder.
8. De zouten gaan in een kring rond de wortel staan.

9. De zouten gaan nu tussen de wortelcellen door diffunderen (willekeurig bewegen) – dat is dus passief transport.
10. Zodra een zout-leerling in het bereik van de endodermis komt, wordt die volgens de geheime of openbare instructie beetgepakt en binnen de kring gesleurd. Dat gaat zo door (desnoods met wat regie) en zo komen er steeds meer leerlingen binnen die kring. Al snel is er geen plek meer en er moeten leerlingen op de trap gaan staan (soms moeten ze erop gewezen worden dat die mogelijkheid er is...). Die stijging kun je al benoemen als worteldruk, maar er ontbreekt een stap.
11. Dat is het moment voor een bevestiging van het drama en de start van de verklarende tussenbespreking waar de volgende aspecten aan bod moeten komen:
  - Er was passief transport (diffusie) in de celwanden.
  - Er was actief (selectief) transport toen de zouten door de endodermiscellen werden binnengehaald.
  - De concentratie mineralen binnen de centrale cilinder is nu hoger dan in de schors (bij gebruik van blauwe vellen vergelijk je het aantal mineralen met het aantal blauwe vellen op de grond).
12. Dan komt de vraag: wat gebeurt er nu?
  - Door de hogere concentratie binnen de centrale cilinder gaat daar passief water naartoe vanuit de schors. Dat kan gesymboliseerd worden doordat leerlingen rond en op de trap met hun armen omhoog wijzen. Als er met blauwe vellen is gewerkt, kun je ze die aanreiken.
13. Om leerlingen de kans te geven te demonstreren dat ze het snappen kun je ze het endodermisdrama nog eens helemaal zelfstandig laten uitvoeren, zonder regieaanwijzingen en intermezzo's.

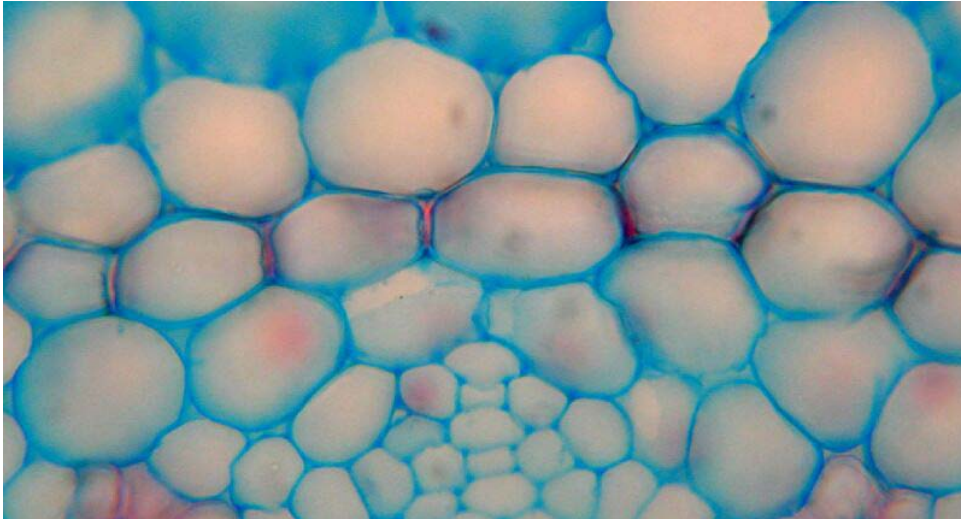
#### (na)denkwerk

Het is heel belangrijk te laten nadenken over waar dit model niet klopt:

- Het klopt écht niet waar de mineralen door de armen = bandjes van Caspary werden binnengehaald terwijl dat de plek is waar ze juist *niet* door kunnen. Hoe kan dat in het drama beter? (Leerlingen tussen de benen door onder de jas langs laten kruipen?)
- Een ander aspect is dat het nu net lijkt of er buiten de endodermis alleen *apoplasmatisch* transport is, terwijl er ook wel degelijk *symplasmatisch* transport is. Hoe kun je dat symplasma verbeelden? Bijvoorbeeld door cellen/leerlingen elkaar handen met *niet* opgestroopte mouwen te laten geven (plasmodesmata). Maar dan heb je weer een schaalprobleem erbij qua mineralen in dit model.
- De schaal klopt natuurlijk sowieso niet. Bespreek met de leerlingen wat in werkelijkheid naar verhouding groter/kleiner is.
- Er is geen onderscheid tussen hout- en bastvaten in de centrale cilinder.

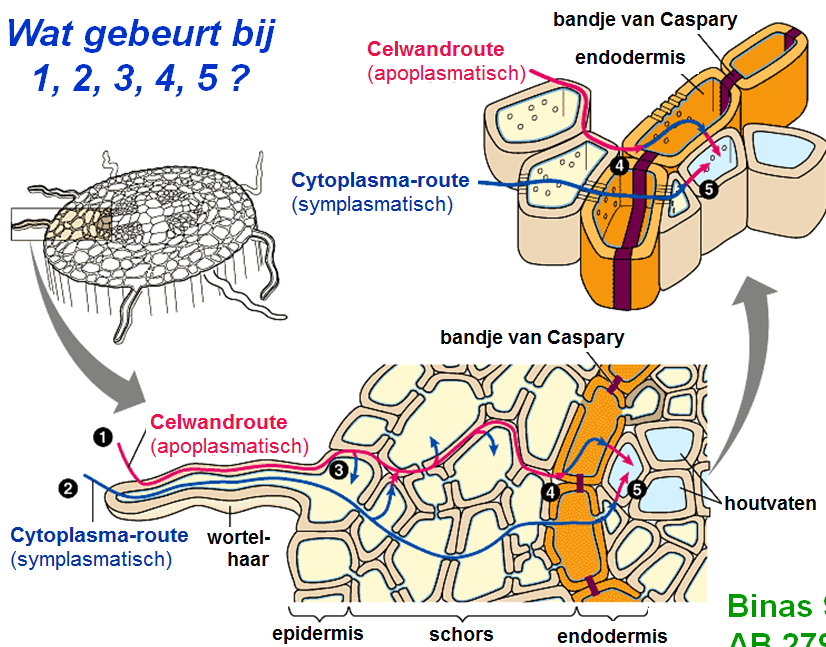
### aanpassen/uitbreiden

Om alles te laten landen kun je leerlingen ook nog in een plaatje de mogelijke routes laten tekenen en tegelijk laten navertellen, bijvoorbeeld met een van de volgende twee afbeeldingen (zie ook de bijlage):



bron: <http://www.boku.ac.at/botanik/Dokumente/persoenlich/Kartusch/AP5130013.jpg>

### Wat gebeurt bij 1, 2, 3, 4, 5 ?



Binas 91.B  
AB 279

Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.



## 43. NATUURLIJKE SELECTIE MET KRALEN

Natuurlijke selectie gaat uit van het idee dat organismen die beter aangepast zijn aan hun omgeving (dan hun soortgenoten in dezelfde populatie), een hogere kans hebben om te overleven en nakomelingen te produceren. In deze opdracht wordt het mechanisme van natuurlijke selectie gesimuleerd met kralen. Dit uitbeeldpracticum is gebaseerd op werk van Stebbins en Allen (1975)<sup>1</sup>, en werd verder uitgewerkt door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo (al kan een goede tweede of derde klas ook best met de basis van dit practicum uit de voeten)
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• uitleggen dat wanneer bepaalde varianten (fenotypen) in een populatie een hogere kans hebben om te overleven en nakomelingen te produceren de frequentie van die varianten binnen de populatie toeneemt (mits deze variatie in ieder geval deels erfelijk is);</li> <li>• uitleggen dat het veranderen van gen- en fenotypefrequenties in de populatie verantwoordelijk is voor het veranderen van soorten;</li> <li>• uitleggen dat door natuurlijke selectie de variatie binnen de populatie afneemt, maar dat door mutatie (en recombinitie) nieuwe variatie kan ontstaan;</li> <li>• (eventueel) uitleggen wat bedoeld wordt met de termen gene flow, seksuele selectie, het founder effect, en co-evolutie.</li> </ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• een aantal bontgekleurde lappen, doeken of stukken tapijt</li> <li>• kleine strijkkralen in verschillende kleuren</li> <li>• (eventueel) zonnebrillen om het voor ‘de predatoren’ moeilijker te maken ‘de prooidieren’ te vinden; als je zonnebrillen met verschillend gekleurde glazen kunt vinden kun je nog een extra factor inbouwen (zie ook hieronder bij voorbereiding)</li> </ul>

---

<sup>1</sup> Stebbins, R.C. & Allen, B. (1975). Simulating evolution, *The American Biology Teacher*. 37, 206-211.

#### voorbereiding

1. Voor dit practicum heb je een aantal bontgekleurde lappen, doeken of stukken tapijt nodig, ongeveer ter grootte van een tafel: deze stellen een eiland of een bepaalde leefomgeving voor.
2. Verder heb je verschillende kleuren (kleine) strijkkralen nodig: deze stellen een populatie organismen (van één soort) voor. Zorg voor minimaal vier verschillende kleuren, maar meer kan prima, zeker als je ook nieuwe varianten (als gevolg van mutaties of recombinitie) wilt laten ontstaan.
3. De precieze aantallen lappen en kralen zijn afhankelijk van hoe je dit practicum uitvoert. Je kunt dit practicum in tweetallen laten doen (zoals hier verder beschreven), maar ook in groepjes van drie tot vijf leerlingen. In dat geval vergroot je de omvang van de populatie (en zorg je indien nodig voor wat grotere lappen).
4. Ga (met collega's of een aantal leerlingen) na of de kralen niet té veel opvallen tegen de achtergrond van de lap. Het gaat er natuurlijk om dat sommige kleuren kralen veel minder goed zichtbaar zijn dan andere. Experimenteer eventueel met (verschillend gekleurde?) zonnebrillen om het nog wat lastiger te maken.
5. Verzamel voor elk tweetal (of groepje) de benodigde materialen: een lap en kralen in (minimaal) vier verschillende kleuren.

### uitvoering

1. Vertel de leerlingen dat ze zo meteen tijdens het practicum de rol krijgen van predatoren die binnen hun leefgebied op jacht gaan naar kleine prooidieren (de kralen). Van deze prooidieren bestaan verschillende erfelijke varianten, maar ze behoren dus wel allemaal tot één en dezelfde soort. Het is niet perse noodzakelijk om de leerlingen van tevoren te vertellen dat het practicum gaat over natuurlijke selectie en evolutie. Dat kan ook prima nadat ze zelf hebben ervaren wat de resultaten van de simulatie zijn.
2. Eventueel kun je de context nog wat concreter maken, door te vertellen dat de verschillende lappen op de tafels een eilandengroep voorstellen, en dat op elk eiland een populatie organismen terecht komt (afkomstig van het vasteland).
3. Geef de leerlingen nu de volgende opdracht:
  - a. Per tweetal pak je één van de aanwezige lapjes, en een potje met kralen. Controleer of het potje met kralen 80 kralen bevat (20 van elke kleur).
  - b. Persoon A kijkt nu weg, terwijl persoon B van elke kleur 5 kralen neemt en de 20 kralen willekeurig verspreidt over de lap stof. Denk hier niet te veel bij na, maar verdeel de kralen snel over de hele lap.
  - c. Op een teken van persoon B draait persoon A zich om, en pakt zo snel mogelijk 10 kralen. Persoon A doet de gepakte kralen terug in het potje (zonder ze goed te bekijken) en draait zich weer om.
  - d. Persoon B vult de kralen op de lap aan *door voor elk van de 10 overgebleven kralen een kraal van dezelfde kleur toe te voegen*. Er liggen nu als het goed is weer 20 kralen op de lap. Persoon B vult in de tabel hieronder het aantal kralen per kleur in. Persoon B verdeelt de kralen ook weer over de lap.
  - e. Stap c en d worden herhaald totdat persoon A zeven keer 10 kralen heeft gepakt, en de tabel volledig is ingevuld.

aantal kralen	ROOD	BLAUW	PAARS	GROEN	totaal
begin	5	5	5	5	20
na ronde 1					20
na ronde 2					20
na ronde 3					20
na ronde 4					20
na ronde 5					20
na ronde 6					20
na ronde 7					20

### (na)denkwerk

- Verzamel als de leerlingen zo'n beetje klaar zijn alle resultaten op het bord of smartboard. Bespreek de resultaten. Wat valt er op? Hoe kunnen we de uitkomsten verklaren? Zijn er onverwachte resultaten? Wat zou er gebeuren als er nog eens 7 rondes gedaan zouden worden?
- Laat de leerlingen heen en weer denken tussen de simulatie (het model) en het werkelijke biologische proces (natuurlijke selectie). Vraag of ze de volgende biologische begrippen terug kunnen zien in de simulatie: variatie, selectie, predatie, generatie, overlevingskans, voortplanting, omgeving, allereffrequentie en survival of the fittest.
- Vertel dat de leerlingen nu hebben uitgebeeld hoe natuurlijke selectie werkt, en dat dat proces de drijvende kracht is achter evolutie en het veranderen van soorten. Benadruk dat evolutie dus niet het gevolg is van aanpassingen die tijdens het leven van individuen optreden en aan hun nakomelingen worden doorgegeven, maar dat de samenstelling van de populatie verandert (evolutie vindt plaats op populatieniveau).
- Bespreek ook in welk(e) opzicht(en) de simulatie verschilt van het werkelijke biologische proces. Er is bijvoorbeeld geen recombinatie, of zelfs niet echt geslachtelijke voortplanting (elke overblijvende ouder krijgt gewoon een identiek kind).

### aanpassen/uitbreiden

- Een voor de hand liggende uitbreiding op deze simulatie is het laten ontstaan van mutaties. Per generatie worden dan één of enkele nakomelingen geboren die *niet* automatisch hetzelfde fenotype hebben als hun ouder(s) hebben, maar als het ware mutanten zijn. Hiertoe worden één of enkele kralen blind uit een bekertje met allerlei kleuren kralen gepakt. Een mutant kan dus een gunstiger maar ook een minder gunstig fenotype hebben in vergelijking met de ouder (het fenotype kan zelfs hetzelfde blijven, net als bij echte mutaties).
- Je kunt hetzelfde model (kralen op een lap) prima gebruiken om andere evolutionaire verschijnselen mee te simuleren. Laat de leerlingen één van de onderstaande begrippen kiezen, en zelf een manier bedenken om dat begrip met de kralen en de lap uit te beelden: mutatie, gene flow, seksuele selectie, het founder effect, en co-evolutie.

## 44. WAAR IS MIJN NOOTJE?

### *selectie op gedrag met nootjes*

Eekhoorns verzamelen in de zomer en de herfst een voedselvoorraad om de winter door te komen. Deze voorraad wordt verstopt op allerlei plekken in de omgeving. Uit onderzoek blijkt dat eekhoorns hierbij verschillende verstopstrategieën hanteren, en dat deze strategieën (in ieder geval gedeeltelijk) erfelijk zijn. Dat betekent dat dus ook selectie op dit gedrag kan plaatsvinden, want de verstopstrategie heeft invloed op het terugvinden van de nootjes door eekhoorn zelf, én de kans dat de nootjes tussentijds door andere dieren worden gestolen. In dit uitbeeldpracticum ervaren leerlingen zelf dat ook selectie (erfelijk bepaald) gedrag kan plaatsvinden. Dit uitbeeldpracticum werd eerder beschreven door Riechert, Leander en Lenhart (2011)<sup>1</sup>, en verder uitgewerkt door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

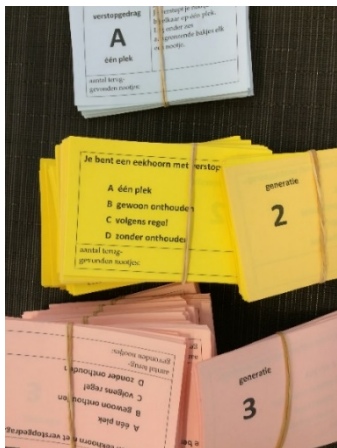
duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• aangeven dat diergedrag in ieder geval deels erfelijk bepaald is;</li><li>• uitleggen dat verschillen in gedrag ook verschillen in overlevingskans en voortplantingssucces kunnen veroorzaken;</li><li>• uitleggen dat wanneer bepaalde individuen gedrag vertonen waardoor zij meer nakomelingen produceren dan anderen, de frequentie van dat gedrag binnen de populatie toeneemt in volgende generaties (mist dat gedrag erfelijk is).</li></ul>
nodig	<p>per groepje van vijf leerlingen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• een stuk of dertig papieren bakjes (bijv. ijskuipjes of cupcake-bakjes)</li><li>• zes nootjes (liefst ongepelde hazelnoten of pinda's)</li><li>• een stuk of vier 'boomstammetjes' (stukjes tak met een diameter van 4 of 5 cm, ongeveer zo hoog als, of iets hoger dan, de bakjes)</li><li>• kaartjes met verstopstrategieën (zie bijlage)</li></ul>

---

<sup>1</sup> Riechert, S.E., Leander, R.N. & Lenhart, S.M. (2011). A role-playing exercise that demonstrates the process of evolution by natural selection: Caching squirrels in a world of pilferers. *The American Biology Teacher*, 73(4), 208-212.

### voorbereiding

1. Print de briefjes die de verstopstrategieën van de eekhoorns aangeven; print dubbelzijdig, en liefst per generatie op papier van een andere kleur. Knip of snij de briefjes uit, en sorteer ze per strategie en generatie.
2. Verzamel de materialen voor het spel in een bak (sorteer per groep van vijf leerlingen).
3. Print ook de instructie voor de leerlingen (zie de volgende pagina); twee of drie exemplaren per groepje is voldoende.



### uitvoering

1. Verdeel de klas in groepjes van ongeveer vijf leerlingen elk. Laat één of twee leerlingen (of een TOA) assisteren: zij verstoppen de nootjes voor de eekhoorns met verstopstrategie D, dat zijn de eekhoorns die niet (kunnen) onthouden waar ze hun nootjes hebben verstoppt.
2. Deel de materialen en spelinstructies uit. Laat elk groepje de bakjes tegen elkaar aan geschoven, en omgekeerd op tafel zetten, met de boomstammetjes er her en der in verspreid.
3. Vertel in grote lijnen hoe het spel verloopt: leerlingen zijn om de beurt een eekhoorn die volgens een bepaalde strategie nootjes verstoppt en probeert terug te vinden. Hoe meer nootjes je terugvindt, hoe meer nakomelingen je krijgt. Als je niet aan de beurt bent, dan ben je een nootjesdief (bijv. een woelmuis, een hamster of gewoon een luie eekhoorn).
4. Geef nu elke leerling een verstopstrategie; begin met een populatie waarin elke verstopstrategie even vaak voorkomt (tenminste in de klas als geheel).
5. Loop nadat dat de leerlingen begonnen zijn eerst even rond om te kijken of alles goed gaat.
6. Vervolgens is het de taak van de docent (of de assistenten) om de briefjes van de eekhoorns die al geweest zijn, en waarop het aantal nakomelingen genoteerd staat, te verzamelen. Met behulp van het Excel-bestand (zie bijlage) kan dan vlot uitgerekend worden hoeveel eekhoorns van elke verstopstrategie in de volgende generatie aanwezig zijn (als door afronden het aantal strategieën lager is dan het aantal leerlingen krijgt de meest voorkomende strategie er een briefje bij). Verdeel de verstopstrategieën weer over de leerlingen.

## WAAR IS MIJN NOOTJE? | spelinstructies

We spelen een spel waarbij je om de beurt een *eekhoorn* bent die volgens een bepaalde strategie nootjes verstoppt en probeert terug te vinden. Als je niet de eekhoorn bent, dan ben je een *nootjesdief* (bijv. een woelmuis, een hamster of gewoon een luie eekhoorn).

Er zijn vier verstopstrategieën:

- A. Je verstoppt je nootjes dicht bij elkaar op één plek. Leg onder zes aangrenzende bakjes elk een nootje.
- B. Je verstoppt je nootjes op verschillende plekken. Kies zes willekeurige bakjes, en leg onder elk bakje een nootje. Onthoud goed waar je de nootjes verstoppt hebt.
- C. Je verstoppt je nootjes op verschillende plekken. Bedenk hierbij voor jezelf een regel, waarbij je bijv. rekening houdt met de plek van de boompjes.
- D. Je verstoppt je nootjes wel, maar je onthoudt niet waar. (Om ervoor te zorgen dat je het écht niet weet laat je je nootjes door je docent of een assistent verstoppen.)

1. Pak uit het bakje een strategiekaartje voor de eerste generatie (en laat deze niet zien aan de anderen).

2. De speler met de *meest rode haren* is als eerste de eekhoorn, en krijgt de eekhoornsteen. Een *beurt* bestaat uit drie stappen:

- I. De eekhoorn verstoppt zijn zes nootjes volgens de strategie op het kaartje. De nootjesdieven houden hun ogen dicht.
- II. De nootjesdieven mogen om de beurt twee bakjes omdraaien. Als ze een nootje vinden dan nemen ze deze weg, en mogen ze nog een extra bakje omdraaien. Hierbij mag iedereen weer meekijken.
- III. Als alle nootjesdieven geweest zijn is de eekhoorn zelf aan de beurt. Hij probeert zoveel mogelijk nootjes terug te vinden. Maar... als hij een bakje optilt waar geen nootje (meer) onder zit is zijn beurt meteen voorbij. Het aantal teruggevonden nootjes wordt op het strategiekaartje genoteerd.

3. Nu is de volgende speler aan de beurt om eekhoorn te zijn.

4. Als alle spelers aan de beurt geweest zijn is deze ronde (generatie) afgelopen. Nu worden er nakomelingen geproduceerd. Elk teruggevonden nootje staat voor één nakomeling. Elke speler levert dus net zoveel strategiekaartjes voor de volgende generatie als hij nootjes had gevonden. Nakomelingen hebben dezelfde verstopstrategie als hun ouders (omcirkel de bijbehorende letter op het kaartje).

5. Tenslotte loopt één van de spelers naar de spelleider, en...

- levert de (ingevulde) strategiekaartjes van de afgelopen ronde in,
- doet de strategiekaartjes voor de volgende ronde in de doos (de genenpool), en
- pakt voor elk groepslid een strategiekaartje uit de genenpool.

6. Voor elke volgende ronde/generatie herhaal je stap 3 t/m 6.

#### (na)denkwerk

- Verzamel als de leerlingen zo'n beetje klaar zijn alle resultaten op het bord of smartboard. Bespreek de resultaten. Zijn de uitkomsten zoals je had verwacht? Van welke factoren is het succes van de verschillende verstopstrategieën afhankelijk? Zijn er ook veranderingen opgetreden (in zoekstrategie) bij de nootjesdieven? En ging het daarbij dan (ook) om evolutie en erfelijk bepaald gedrag, of om iets anders?
- Bespreek ook wat er aan het model niet klopt. Benadruk dat gedrag natuurlijk in werkelijkheid heel complex is, en bepaald wordt door meerdere genen (en omgevingsfactoren). Ook is het natuurlijk een beetje vreemd dat er geen recombinatie optreedt: elke ouder krijgt identieke nakomelingen.

#### bijlagen

- verstopstrategieën (dubbelzijdig printen, liefst per generatie op papier van een andere kleur)
- Excel-bestand om de gegevens bij te houden (eekhoorn datasheet)



## 45. HARDY-WEINBERG MET LEGO®

Werken met de regel/wet van Hardy-Weinberg is lastig vanwege de abstractie, en het steeds schakelen tussen de organisatieniveaus van allel, organisme en populatie. In deze simpele seks-simulatie blijkt de regel écht te kloppen! En als die niet klopt zijn er plausible verklaringen. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	50 minuten
doelgroep	bovenbouw vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• het verband tussen gene-pool (allelen) en populatie (individueen) toelichten;</li><li>• de formules (<math>p + q = 1</math> en <math>p^2 + 2pq + q^2 = 1</math>) kunnen koppelen aan situaties (respectievelijk allelen en individuen);</li><li>• allelfrequenties berekenen uit genotypenfrequenties en omgekeerd;</li><li>• vijf omstandigheden noemen waarin de wet van Hardy-Weinberg niet geldt.</li></ul>
voorkennis	gen, allel, homozygoot, heterozygoot, dominant, recessief
nodig	<ul style="list-style-type: none"><li>• twee kleuren identieke, kleine Lego®-steentjes (formaat 2x1 of 2x2), twee keer zoveel als er leerlingen zijn en het liefst flink ongelijke aantallen van elke kleur (bijvoorbeeld in een verhouding 3 : 1)</li><li>• eventueel PowerPoint (zie bijlage)</li></ul>



#### voorbereiding

1. Elk steentje stelt een exemplaar voor van hetzelfde gen; de kleuren geven de allelen weer, een dominante en een recessieve. Samen vormen de steentjes de *gene-pool* van een populatie.
2. Klik de steentjes in tweetallen op elkaar, waarbij de dominante *bovenop* zit bij de heterozygoten. Let op: het is slim om eerst even uit te rekenen wat met deze allelfrequenties het Hardy-Weinberg-evenwicht zou worden, en daar in de setjes van twee steentjes flink van af te wijken.
3. Zet de steentjes in een geordende serie op tafel, zodat de leerlingen er makkelijk omheen kunnen komen staan.

### uitvoering

1. Na een introductie vraag je de leerlingen rond de tafel met de klaargezette sets. Licht toe dat elke set van twee steentjes op elkaar een genenpaar is van een individu, soms met twee dezelfde allelen, soms met twee verschillende.
2. Dan zijn er twee vragen aan de groep: (a.) welke allelen zijn er en hoeveel? (bijvoorbeeld geel en blauw), en (b.) welke genotypen en welke fenotypes zijn er? (hier moet duidelijk worden dat bij twee verschillende kleuren de bovenste dominant is; deze vraag is de aanleiding om de begrippen homozygoot dominant, homozygoot recessief en heterozygoot te herhalen).
3. Laat nu een leerling de aantallen allelen per genotype op het bord schrijven (voor een groep van 20 leerlingen zijn dat bijvoorbeeld 13 geel-geel, 4 geel-blauw en 3 blauw-blauw).
4. Haal nu alle setjes los en rommel de steentjes door elkaar. Je ziet nu met de bril van de populatiebioloog die in dit geval alleen maar kijkt naar de aantallen allelen in de populatie: de gene-pool. In dit voorbeeldgeval zijn er 40 allelen: 30 daarvan geel en 10 blauw. De frequentie is dus 75% geel en 25% blauw of 0,75 geel en 0,25 blauw.
5. Nu moet, voor start van de simulatie, de oorspronkelijke verdeling van genotypen weer worden hersteld – nu kijk je dus naar individuen. Ook daarvan nu de frequentie (laten) berekenen en op het bord zetten.
6. Leg uit dat iedere leerling zo'n setje van twee Lego®-genen krijgt en benadruk dat je even mag kijken en onthouden wat je hebt, maar dat anderen jouw allelen niet mogen zien (“In het echt zie je ook niet iemands allelen!”).
7. Als ieder een setje heeft, moeten ze volop met elkaar gaan paren. Paren betekent (zonder dat je het zelf ziet) één steentje ruilen met de partner van dat moment. Dat is dus de uitwisseling van genen.
8. Als er genoeg gepaard is moeten alle setjes van dat moment op tafel komen en weer geordend worden. Aantallen genotypen en frequenties komen weer op het bord/scherm in een nieuwe regel. Is daar iets in veranderd (meestal wel...)?
9. Verbreek tenslotte alle setjes en tel hoeveel steentjes er zijn van elke kleur. Dat is natuurlijk onveranderd, want er zijn geen steentjes uit het spel gegaan.
10. Nu moeten leerlingen met de formule  $p^2 + 2pq + q^2$  uitrekenen wat je op basis van de allelfrequenties voor individufrequenties zou verwachten. In principe zou je een verschuiving in de richting van de theoretische verdeling moeten krijgen. Bij flink lang paren gaat dat meestal wel goed. Als het niet goed gaat is er altijd nog de ontsnapping via: “Zie je wel, de populatie is kennelijk te klein...”. Rekenvoorbeeld: bij 20 leerlingen en 30 gele en 10 blauwe blokjes is  $p = 0,75$  en  $q = 0,25$ . Theoretisch wordt het dan:
  - $p^2 = 0,5625 \rightarrow 11,25$  individuen (was 13)
  - $2pq = 0,375 \rightarrow 7,5$  individuen (was 4)
  - $q^2 = 0,0625 \rightarrow 1,25$  individuen (was 3)
 Door de decimalen heb je speelruimte: de 11,25 wordt goed gevonden als het 11 of 12 is enzovoorts.
11. Ten slotte moet je nog de toepassingsbeperkingen van de wet van Hardy-Weinberg bespreken – zie ook het (na)denkwerk hieronder.

### (na)denkwerk

- Wat als iemand te laat zou zijn gekomen: mag hij/zij nog meedoen? (Nee, geen *immigratie*)
- Wat als iemand eruit wordt gestuurd? (Nee, geen *emigratie*)
- Hoe kun je hiermee bottleneck-effect simuleren? (Bijvoorbeeld: alleen de alfabetisch eerste drie blijven over door een ramp – wat is dan de allelfrequentie?)
- Hoe kun je mutaties simuleren? (Gele vervangen door blauwe - of groene, witte, rode!)
- Hoe kun je selectieve partnerkeuze bevorderen? (Door de dominante kleuren te laten zien)
- Wat zijn de biologische onjuistheden? (Bijvoorbeeld: het paren is wat merkwaardig omdat je je eigen nakomeling bent)

### uitbreiding

- Je kunt dit practicum ook toepassen met drie allelen zoals bij de ABo-bloedgroepen. Met drie allelen wordt de formule:  $p^2 + 2pq + q^2 + 2pr + 2qr + r^2 = 1.0$ .
- Een realistischer (oefen)context is het werkblad over tongrollen dat als bijlage is toegevoegd (met de antwoorden daar weer achteraan).

### bijlage

- werkblad met oefencontext
- PowerPoint

## 46. POPULATIEGENETICA MET LEGO®

Voor leerlingen is de wet van Hardy-Weinberg niet altijd even makkelijk te doorgronden;  $p$  en  $p^2$  hebben niet echt betekenis voor ze. In dit uitbeeldpracticum komt deze theorie wat meer tot leven. Ook een aantal evolutionaire begrippen, zoals *genetic drift* en seksuele selectie, ondervinden ze aan den lijve, waardoor deze begrippen beter beklijven. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem).

---

**duur** één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking

**doelgroep** bovenbouw havo/vwo

**doelen** Leerlingen kunnen:

- uitleggen onder welke voorwaarden de wet van Hardy-Weinberg van toepassing is;
- uitleggen wat er in andere omstandigheden, bijvoorbeeld bij *genetic drift* of seksuele selectie, met de frequenties van allelen en genotypen in de populatie gebeurt.

### nodig

Voor dit uitbeeldpracticum heb je per leerling twee chromosomenparen nodig. De samenstelling daarvan kan je natuurlijk af laten hangen van je eigen Lego®-voorraad. Hier is gekozen voor de kleuren en groottes die hieronder staan afgebeeld. Let op: de Lego®-blokjes zijn vastgeklikt op Lego®-plaatjes waardoor ze ook echt aan elkaar vast blijven zitten (gekoppeld zijn).



### voorbereiding

1. Stel de chromosomen samen met weglating van de genen waar we naar gaan kijken
2. Vul een zak met evenveel gele (b) als witte (B) 'allelen'.
3. Vul een zak met 10% groene (a) en 90% blauwe (A) 'allelen'.

### uitvoering

1. Deel het leerlingenblad uit en geef de leerlingen tijd om te lezen.
2. Doe het voorplanten één keer voor waarbij je nadruk legt op de generatiewissel (na voortplanten gaan de ouders verder als hun eigen nakomelingen), dat wil nog al eens fout gaan.
3. Laat de leerlingen twee sets chromosomen pakken en daarbij de missende genen uit de zak pakken. Let erop dat er in ieder geval wel een paar groene inzitten, anders loopt het hopeloos fout. (Het is wel zoals het gaat in de natuur, maar het zou toch jammer van je practicum zijn.)
4. Laat ze lekker voorplanten.
5. Noteer voor de grap de hilarische dingen die je hoort, gewoon omdat het leuk is.
6. Als er gemiddeld 10 keer is voortgeplant, laat je iedereen weer op zijn stoel zitten en ga je het bespreken.

### nabespreking

- Na afloop ga je wat data verzamelen op het bord van de P<sub>1</sub> en van de laatste generatie die ze zijn geweest, dat kan de F<sub>7</sub> maar ook de F<sub>13</sub> zijn bijvoorbeeld, per leerling kan dat verschillen.
- Dus je vraagt, in de P<sub>1</sub>, hoeveel witte allelen (B) waren er? Twee vingers voor homozygoot, één voor heterozygoot. Zelfde voor geel (b) om te controleren of het klopt.
- Dit doe je ook voor de laatste generatie.
- En dit doe je ook voor groen (a) en blauw (A).
- Bepaal de frequenties. Wat valt er op?
- Hoe komt het dat groen veel meer is geworden en hoe heet dat?
- Hebben jullie ook op geel (b) en wit (B) gelet? Wat is daar met de frequentie gebeurd? Hier kan toeval een grote rol spelen in verband met de kleine populatie.
- In de genenpool met geel (b) en wit (B) zat de helft wit en de helft geel, was dat ook precies zo in de P<sub>1</sub>? Hoe heet dat? En welke vorm van genetic drift zou zijn?
- Bij Hardy-Weinberg ga je meestal uit van de homozygoot recessieven. Hoeveel zijn dat er op het einde voor groen (vingers opsteken)? Bereken hieruit p en q. Kloppen die met de frequenties die je eerder bepaald hebt? Hoeveel heterozygoten zou je op basis hiervan verwachten? Klopt dat?
- Wat zijn de voorwaarden voor Hardy-Weinberg? Voldoen we daar aan?

### bijlagen

- leerlingenblad

## 47. GENE DRIVE MET LEGO®

Dit uitbeeldpracticum gaat over het gebruik van CRISPR/Cas voor *gene drive*, een biotechnologische toepassing waarbij gedurende een aantal generaties het genoom van een hele populatie (diploïde) organismen wordt gemodificeerd. Dit practicum past natuurlijk prima in een korte lessenserie over CRISPR/Cas, maar het is niet perse noodzakelijk dat leerlingen begrijpen hoe gene editing met Cas9 op moleculair niveau precies in zijn werkt gaat (zie hiervoor een eerder beschreven practicum). Net als bij de twee voorgaande practica over populatiegenetica worden Lego®-steentjes gebruikt om verschillende genen te verbeelden, zijn de leerlingen zelf (letterlijk en figuurlijk) dragers van deze genen, en wordt er onderling voortgeplant. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	30 minuten
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	Leerlingen ervaren hoe met behulp van Cas9 binnen relatief korte tijd het genoom van een hele populatie kan veranderen, doordat de Mendeliaanse genetica als het ware wordt omzeild.
nodig	<p>Voor één klas (van 30 leerlingen) heb je de volgende aantallen en kleuren Lego®-blokjes nodig (2x2 of anders)¹:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 120 wit</li> <li>• 60 rood</li> <li>• 60 blauw</li> <li>• 60 groen</li> </ul> <p>Voor het tweede scenario (dochterloze muizen) kun je roze en lichtblauwe (of andere kleuren) blokjes of plaatjes gebruiken om respectievelijk het X- en Y-chromosoom aan te duiden. Je hebt dan 45 roze en 15 lichtblauwe blokjes nodig (voor 15 mannetjes en 15 vrouwtjes in populatie).</p>

---

¹ Losse steentjes bestellen kan bijvoorbeeld via [www.bouwsteenwinkel.nl](http://www.bouwsteenwinkel.nl).

#### voorbereiding

1. Verzamel de juiste aantallen Lego®-blokjes.
2. Klik de witte blokjes alvast per tweetal op elkaar (elk tweetal stelt een stukje van een 'normaal' chromosoom voor). Klik ook de blauwe, groene en rode blokjes op elkaar (deze stellen het Cas9-gen, het gen dat codeert voor gRNA, en het doelgen voor).
3. Het is niet perse noodzakelijk dat leerlingen begrijpen hoe gene editing met Cas9 op moleculair niveau precies in zijn werkt gaat, maar het is wel van belang dat leerlingen begrijpen dat met Cas9 heel precies in DNA geknipt kan worden (met behulp van een stukje RNA), waarna op de knipplek een andere DNA-sequentie wordt ingebouwd.
4. Zet de PowerPoint klaar (zie bijlage).





### uitvoering

1. Leg uit dat CRISPR/Cas (ook) ingezet kan worden om het genoom van een hele populatie (diploïde) organismen te veranderen. Dat gaat in een aantal stappen (zie ook de PowerPoint):
  - a. Een nieuw/aangepast gen wordt ingebracht in een klein aantal organismen, *gekoppeld* aan de genen die coderen voor Cas9 en het bijbehorende gRNA.
  - b. De transgene individuen worden uitgezet in het natuurlijke verspreidingsgebied.
  - c. In zygoten die ontstaan uit kruisingen tussen een transgeen en een wild type individu komt Cas9 tot expressie, waardoor het nieuwe gen én de genen voor Cas9 en gRNA ook in het homologe chromosoom worden ingebouwd.
  - d. Binnen een aantal generaties dragen alle individuen het nieuwe gen, en de genen voor Cas9 en gRNA.
2. Vertel dat we met de hele groep gaan uitbeelden hoe we met behulp van CRISPR/Cas het genoom van een hele populatie kunnen veranderen.

oefenen (zie het practicum *Hardy-Weinberg met Lego®*)

3. Per persoon krijg je twee Lego®-blokjes: die stellen twee homologe stukjes DNA voor, bijvoorbeeld een genenpaar. Voortplanting beeld je uit door zonder te kijken met een partner één blokje uit te wisselen. Jullie veranderen dan als het ware in je eigen nakomelingen (generatiewisseling). Dat voortplanten doe je een aantal keer achter elkaar (met wisselende partners, om inteelt te voorkomen).

scenario 1. *antistoffen tegen malaria in muggen*

4. We zijn een populatie muggen. Per mug krijg je twee keer twee witte, aan elkaar gekoppelde Lego®-blokjes: elk koppel stelt een stukje DNA voor. Drie muggen in de populatie zijn transgeen: tussen hun witte blokjes zitten een blauw, een groen en een rood blokje (respectievelijk het gen voor Cas9, het gRNA én een gen dat codeert voor een antistof tegen *Plasmodium falciparum*, de veroorzaker van malaria). Als je na het voortplanten één normaal en één transgeen stukje DNA hebt, dan treedt het Cas9-HDR-mechanisme in werking en bouw je ook in het normale DNA het blauwe, groene en rode blokje in. We planten een aantal generaties lang voort.

scenario 2. *dochterloze muizen in Nieuw Zeeland*

5. We zijn een populatie muizen in Nieuw Zeeland. We zijn daar exoot en zorgen voor veel schade. Per muis krijg je weer twee keer twee witte, aan elkaar gekoppelde Lego-blokjes. Het geslacht wordt aangegeven door de X-en en Y-en op de Lego®-blokjes. Drie (mannelijke) muizen zijn transgeen: zij dragen in hun DNA de genen voor Cas9, het gRNA én een gen dat ervoor zorgt dat alle vrouwelijke embryo's sterven. Let op: je kunt in deze ronde alleen voortplanten met iemand van het andere geslacht. Als je je na het

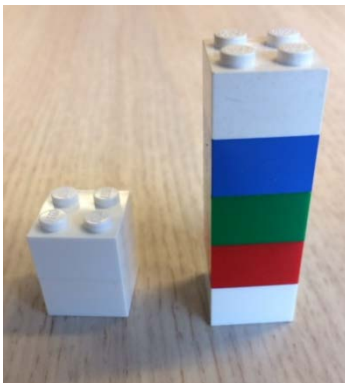
voortplanten één normaal en één transgeen stukje DNA hebt, én je bent een dochter (je hebt twee X-chromosomen), dan stap je uit de simulatie.

#### (na)denkwerk

1. Bespreek met de leerlingen hoe snel een bepaald gen zich door *gene drive* over de populatie kan verspreiden. Benadruk dat de snelheid natuurlijk afhankelijk is van de duur van een generatie. Ook een (gedeeltelijke) geografische isolatie, inteelt of een verminderde fitness kan de verspreiding van Cas9 (en het gen dat je wilt inbrengen) belemmeren.
2. Het ligt voor de hand om ook aandacht te besteden aan de vele ethische aspecten die bij gene drive een rol spelen.

#### bijlagen

- PowerPoint



## 48. TIJDLIJN EVOLUTIE MET ROEPEN

In dit kort maar krachtige practicum wordt de evolutie van het leven op aarde in 4,5 minuut uitgebeeld, of eigenlijk: in geluid vertaald. Leerlingen krijgen zo een gevoel voor de leeftijd van de aarde, en een indruk van de opeenvolging en timing van enkele belangrijke gebeurtenissen in de evolutie van het leven, bijvoorbeeld het ontstaan van meercellige levensvormen en de Cambrische explosie. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld door Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam) en Ingeborg van der Neut (Ludger College, Doetinchem).

---

duur	20 minuten, incl. voor- en nabespreking
doelgroep	onderbouw/bovenbouw
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• uitleggen dat de eerste levensvormen op aarde al miljarden jaren geleden ontstaan zijn, maar dat meercellige organismen daar pas relatief kort geleden uit geëvolueerd zijn;</li><li>• enkele belangrijke gebeurtenissen in de evolutie aanwijzen (bijvoorbeeld het ontstaan van leven, ontstaan van een zuurstofrijke atmosfeer, endosymbiose, de kolonisatie van het land, et cetera);</li><li>• voorbeelden van co-evolutie noemen (zoals bloemplanten en bestuivers, en grassen en grazers).</li></ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"><li>• rolkaartjes (zie bijlage)</li><li>• een beamer (om de filmpjes te projecteren)</li></ul>



### voorbereiding

1. Print de rolkaartjes (enkelzijdig), en knip of snij ze van elkaar. Gebruik voor elk pdf-bestand een andere kleur papier, om de organismen die vóór de Cambrische explosie ontstaan makkelijk te onderscheiden van de andere organismen, en de '10 extra rollen' nog even apart te kunnen houden voor de tweede ronde.
2. Bekijk van tevoren de filmpjes een keer, en neem het scenario door.

### uitvoering

#### instructie

1. Zet eventueel het eerste filmpje op de achtergrond aan (in een loop), voor de juiste sfeer.
2. Verdeel de rollen (met uitzondering van de '10 extra rollen'). Het is verstandig om in ieder geval de eerste organismen (die vóór de Cambrische explosie ontstaan) uit te delen aan leerlingen van wie je verwacht dat ze makkelijk mee zullen doen (en zo de toon zetten voor degenen die daarna komen). Als je minder dan 30 leerlingen in de klas hebt kun je óf naar eigen inzicht enkele minder cruciale organismen weglaten, óf enkele leerlingen een dubbelrol geven.
3. Vertel de leerlingen dat ze een reis door de tijd gaan maken. Ze beginnen zo meteen op het moment waarop de planeet aarde ontstaat (zo'n 4,6 miljard jaar geleden) en volgen dan het ontstaan en de evolutie van het leven op aarde tot nu. Tijdens de simulatie duurt 1 minuut in werkelijkheid 1 miljard jaar (en 1 seconde dus zo'n 17 miljoen jaar).
4. Wijs de leerlingen op het papiertje dat ze gekregen hebben: daarop staan de naam van een organisme en een tijdstip. Als dat tijdstip is aangebroken (volgens de teller in het filmpje), dan gaan ze staan en roepen ze de naam van hun organisme door de klas (en blijven daarna staan). Zo wordt zichtbaar (en hoorbaar) op welk moment in de tijd de verschillende groepen organismen ontstaan.
5. Eventueel kun je ervoor kiezen organismen die op het land leven op hun stoel te laten staan.

#### 4,6 miljard jaar in 4,6 minuten

6. Zet het tweede filmpje aan. De simulatie loopt nu in principe vanzelf (eventueel moeten sommige leerlingen nog een beetje worden aangespoord).
7. Tot aan de Cambrische explosie (zo'n 550 miljoen jaar geleden) gebeurt er nog heel weinig. Je kunt ervoor kiezen om de stilte dan ook echt te bewaren, waardoor het verschil met de Cambrische explosie goed hoorbaar wordt. Een andere mogelijkheid is om die stilte te gebruiken door (op fluisterton?) enige uitleg en toelichting te geven. Gebruik het scenario in het Excel-bestand hiervoor als leidraad.

*vanaf de Cambrische explosie, en dan iets langzamer*

8. Merk op dat de afgelopen halve minuut (550 miljoen jaar) misschien wat onoverzichtelijk waren. Daarom doen we die nog eens over, maar dan wat langzamer (1 minuut is nu in werkelijkheid 400 miljoen jaar).
9. De organismen die vóór de Cambrische explosie ontstaan doen nu niet meer mee; deze worden vervangen door '10 extra rollen' (geef de desbetreffende leerlingen een nieuw rolkaartje). Hier zitten ook groepen organismen bij die op een gegeven moment weer uitsterven (de trilobieten, de ammonieten, de dinosauriërs en de mammoeten); deze leerlingen moeten dus op een gegeven moment weer gaan zitten. Ook zitten hier twee groepen organismen bij die op precies hetzelfde moment ontstaan als een andere groep (namelijk de bloemplanten, waarvan het ontstaan – in deze simulatie – samenvalt met het ontstaan van de bijen, en de grassen, waarvan het ontstaan samenvalt met de evolutie van de paarden).
10. Zet nu het derde filmpje aan. De simulatie loopt nu in principe weer vanzelf.

#### (na)denkwerk

- Benadruk dat er sinds het ontstaan van het leven altijd sprake is geweest van evolutie, soortvorming en extinctie.
- Wel kunnen we periodes aanwijzen waarin meer evolutie en soortvorming plaats lijkt te vinden (bijvoorbeeld omdat een bepaalde evolutionaire doorbraak heeft plaatsgevonden, zoals meercelligheid of geslachtelijke voortplanting). Ook zijn in de evolutionaire geschiedenis duidelijk voorbeelden aan te wijzen van een relatief korte periode waarin veel groepen organismen uitsterven, zoals de massa-extinctie aan het eind van het Perm (250 miljoen jaar geleden, wanneer ook de laatste trilobieten verdwijnen) en die aan het eind van het Krijt (65 miljoen jaar geleden).
- Vertel dat het ogenschijnlijke gebrek aan evolutie vóór de Cambrische explosie deels maar schijn is: ook in die periode was er natuurlijk volop evolutie, al ging het daarbij misschien niet zozeer om morfologische veranderingen, maar om veranderingen en aanpassingen op het gebied van de stofwisseling en de fysiologie.
- Wijs leerlingen op de twee voorbeelden van co-evolutie die in de simulatie voorkomen: de bloemplanten en hun bestuivers, en de grassen en de grazers.

#### aanpassen/uitbreiden

- Dit practicum werd oorspronkelijk ontwikkeld voor de opening van de NIBI-conferentie Evolutie in actie (in 2019). Deze versie, voor meer dan 600 deelnemers, bevat 50 verschillende organismen/rollen. Deze versie kan natuurlijk ook gebruikt worden door leerlingen dubbelrollen te geven.

#### bijlagen

- rollen (verdeeld over drie verschillende pdf-bestanden)
- drie filmpjes
- een Excel-bestand met daarin suggesties voor de toelichting

## 49. PALEONTOLOGIE

### MET ZAND EN IJZERWAREN

#### *een stamboom van Ferriden*

Dit uitbeeldpracticum is een variant op het (bekende) practicum waarbij leerlingen een stamboom moeten maken van verschillende soorten ijzerwaren. Leerlingen kruipen nu écht in de huid van een paleontoloog en beginnen met het bepalen van de opeenvolging en ouderdom van verschillende lagen sediment. Vervolgens moeten de fossielen die daarin verstopt zijn worden uitgegraven. Hiermee wordt vervolgens een stamboom geconstrueerd. Dit uitbeeldpracticum is gebaseerd op een idee van Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam) en werd verder uitgewerkt door Ingeborg van der Neut en Marcel van de Ven (Ludger College, Doetinchem).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• uitleggen hoe de volgorde van opeenvolgende lagen sediment samenhangt met de ouderdom van die lagen;</li><li>• uitleggen hoe kenmerken van fossielen, in combinatie met informatie over de vindplaats van die fossielen, gebruikt kan worden om een evolutionaire stamboom te maken.</li></ul>
nodig	<p>[zie de bijlage voor de precieze benodigdheden]</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• verschillende soorten ijzerwaren</li><li>• verschillende soorten zand en leempoeder</li><li>• enkele grote vellen papier (om de vondsten te verzamelen)</li></ul>



### voorbereiding

1. Volg de instructies in de bijlage voor het maken van de bekers, met daarin de lagen sediment.
2. Richt het lokaal zo in dat leerlingen in groepjes van ongeveer vijf leerlingen ruimte genoeg hebben om samen te werken (meestal werkt het het prettigst om twee tot vier tafels tegen elkaar aan te schuiven).

### uitvoering

1. Verdeel de klas in groepjes van ongeveer vijf leerlingen.
2. Geef elk groepje een set van vier bekers, een groot vel papier (om de vondsten te verzamelen), en enkele exemplaren van het leerlingmateriaal.
3. In principe kunnen leerlingen met behulp van het leerlingmateriaal het practicum grotendeels zelfstandig uitvoeren. Loop tijdens dat de leerlingen aan het werk zijn rond om te peilen hoe het gaat en om eventuele vragen te beantwoorden.

### (na)denkwerk

- Vergelijk de verschillende stambomen (eventueel aan de hand van foto's die leerlingen daarvan gemaakt hebben). Laat enkele leerlingen uitleggen welke overwegingen een rol hebben gespeeld bij het maken van de stamboom.
- Benadruk dat er verschillende goede uitkomsten zijn. Dat komt enerzijds doordat niet iedereen de beschikking had over dezelfde monsters (benadruk dat de *fossil record* per definitie incompleet is, ook al combineer je vondsten van verschillende vindplaatsen). Daarnaast is een evolutionaire stamboom per definitie een hypothese (al kan de mate waarin die hypothese wordt ondersteund door bewijsmateriaal aanzienlijk verschillen).

### bijlagen

- een stamboom van ferriden - voorbereiding
- een stamboom van ferriden - leerlingmateriaal





## 50. ENERGIESTROOM MET SNOEPJES

In dit uitbeeldpracticum (of eigenlijk reeks van uitbeeldactiviteiten) gaan leerlingen allereerst aan de slag met een voedselketen, en vervolgens met de piramide van energie. Deze energiestroomschema's zijn voor leerlingen vaak erg abstract. In dit practicum wordt dat schema concreet gemaakt met snoepjes. In een vervolgactiviteit maken leerlingen een *tableau vivant* van het energiestroomschema. Ook kan het begrip bioaccumulatie zichtbaar gemaakt worden. Dit uitbeeldpracticum is gebaseerd op eerder werk van Joost Kunst (Pieter Nieuwland College, Amsterdam), en verder uitgewerkt door Eveline Snelder (IJburg College, Amsterdam) en Caspar Geraedts (VU Lerarenacademie, Amsterdam).

---

duur	één lesuur (50 minuten), incl. voor- en nabespreking
doelgroep	bovenbouw havo/vwo
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• in een voedselketen aangeven welke organismen behoren tot de producenten, consumenten (van de 1<sup>e</sup> orde, 2<sup>e</sup> orde, enzovoorts) en reducenten;</li> <li>• het abstracte energiestroom-schema vertalen naar concrete(re) processen op organismaal niveau;</li> <li>• aangeven dat op alle trofische niveaus dissimilatie plaatsvindt (dus óók bij producenten);</li> <li>• uitleggen dat de energie van de zon bij fotosynthese wordt opgeslagen in de vorm van energierijke organische stoffen, dat alle organismen voor hun energie afhankelijk zijn van deze stoffen, en dat uiteindelijk alle energie vrijkomt in de vorm van warmte (die aan de omgeving wordt afgegeven).</li> </ul>
nodig	<ul style="list-style-type: none"> <li>• kleine snoepjes, M&amp;M's, pepernoten o.i.d. (in totaal zo'n 200 is voldoende)</li> <li>• papieren bakjes o.i.d. (voor elke leerling één)</li> <li>• een (zak)lamp, of smartphone met zaklampfunctie</li> </ul>

### voorbereiding

1. Verzamel alle benodigdheden.
2. Print de rolkaartjes, en snij of knip ze uit.
3. Zorg ervoor dat leerlingen hun Binas bij de hand hebben, of projecteer de relevante diagrammen (93A en 93E) met behulp van de beamer.
4. Dit practicum kan in principe zonder al te veel uitleg vooraf uitgevoerd worden. Het is dus niet nodig om van tevoren de theorie rondom voedselpiramides te behandelen.

### uitvoering

#### *voedselketen zichtbaar maken (voorbereiding)*

1. Vertel dat de leerlingen tijdens het practicum de rol aannemen van verschillende soorten organismen (producent, consument of reducent).
2. Deel de rolkaartjes uit (met uitzondering nog van de reducenten).
3. Allereerst wordt besproken hoe de voedselketen eruit ziet. Laat de leerlingen rondlopen, elkaars kaartjes bekijken, en tenslotte bij medeleerlingen gaan staan die hetzelfde organisme hebben.
4. Geef leerlingen nu de opdracht om met hun linkerhand naar het organisme te wijzen *door wie ze worden opgegeten*.
5. Maak nu de vergelijking met de pijlen in een voedselweb (zie Binas 93E diagram 1, of een vergelijkbare afbeelding). Wijs er op dat er in werkelijkheid op elk trofisch niveau verschillende soorten organismen voorkomen. Wijs er ook nog eens nadrukkelijk op dat een pijl in een voedselweb of voedselketen niet ‘eet’ betekent, maar ‘wordt opgegeten door’.
6. Op dit moment kun je ook de rol van de reducenten introduceren. Wat gebeurt er als de vos sterft? In feite wordt *op elk trofisch niveau* al het overgebleven, dode materiaal ‘opgegeten’ (afgebroken) door reducenten.
7. Laat de leerlingen die nog geen rol hadden nu reducent zijn. Laat alle organismen nu ook met hun rechterhand naar de reducenten wijzen (eventueel met hun rechterarm wat lager dan de linker voor het onderscheid).

#### *activiteit energiestroom met rondlopen*

8. Vertel dat we nu de energiestroom door deze voedselketen gaan volgen. Geef alle leerlingen nu een leeg bakje of bekertje. De snoepjes die daar in terecht komen stellen energie of energierijke organische stoffen (biomassa) voor.
9. De leerlingen staan (als ze producent zijn) of lopen rond (als ze consument of reducent zijn) in het ecosysteem (de klas). Vertel dat leerlingen elkaar dus ook kunnen vangen: snoepjes uit het bakje van je ‘prooi’ pakken stelt opeten voor. Maar alle organismen verbruiken/verbranden natuurlijk ook energie: snoepjes uit het eigen bakje wegnemen (en echt opeten) stelt dissimilatie voor.

10. Laat nu achtereenvolgens de verschillende organismen (trofische niveaus) in actie komen. Laat eventueel één leerling op het bord de aantallen snoepjes bijhouden (dat kan ook achteraf, tijdens de nabespreking).
11. Als de koolplanten door de (zak)lamp worden beschenen (fotosynthese!) mogen deze elk 10 snoepjes in hun bakje doen. Daarvan worden er 5 gedissimileerd door de planten zelf (en dus opgegeten door de leerlingen zelf)
12. Dan komen de rupsen in actie: deze eten (van verschillende planten) in totaal 5 snoepjes. Daarvan worden er 2 gedissimileerd.
13. De merels eten elk 3 rupsen (à 2 snoepjes per rups); van de 6 geconsumeerde snoepjes worden er 3 gebruikt voor dissimilatie.
14. De vos eet de 2 merels (à 2 snoepjes per merel); van de 4 geconsumeerde snoepjes worden er 2 gebruikt voor dissimilatie.
15. De reducenten verzamelen tenslotte alle niet opgegeten of gedissimileerde snoepjes.
16. Inventariseer de groottes van de ‘energiestromen’ in een tabel, zowel per individu als per trofisch niveau (zie als voorbeeld de tabel hieronder).

		per individu				per trofisch niveau			
		produceren/consumeren	dissimilatie	naar volg. trofisch niveau	naar reducenten (dood)	produceren/consumeren	dissimilatie	naar volg. trofisch niveau	naar reducenten (dood)
<b>koolplant</b>	10	10	5	3	2	100	50	30	20
<b>rups</b>	6	5	2	2	1	30	12	12	6
<b>merel</b>	2	6	3	2	1	12	6	4	2
<b>vos</b>	1	4	2	0	2	4	2	0	2

#### (na)denkwerk

- Bespreek de resultaten van de simulatie in de tabel. Waar in de tabel zien we de piramide van energie terug? En de piramide van aantallen (die in dit geval ook daadwerkelijk een piramide is, maar niet altijd: vervang de 10 koolplanten maar eens door één boom)?
- Benadruk dat op alle trofische niveaus dissimilatie plaatsvindt (leerlingen denken vaak dat bij planten alleen koolstofassimilatie/fotosynthese plaatsvindt).

- Wijs de leerlingen er ook op hoeveel ‘plantproductie’ nodig is voor een klein beetje ‘merelvoedsel’ voor de vos. Hetzelfde geldt voor voedselketens waarbij de mens het eindpunt is: voor een vegetarisch/veganistisch voedingspatroon is minder productie nodig dan voor een dieet met veel dierlijke producten (ook in termen van landbouwgrond, water, et cetera).
- Laat de leerlingen Binas 93A, diagram 1 goed bekijken. Welke overeenkomsten (en verschillen) zijn er met de resultaten van de simulatie? Bespreek aan de hand van het schema in Binas, en de resultaten uit de tabel, dat steeds maar een deel van de energie doorstroomt naar een volgend trofisch niveau. Vraag de leerlingen waar de rest van de energie naar toe gaat. Werk toe naar de volgende stromen: (a) een deel van de energierijke stoffen wordt niet opgegeten, (b) een deel wordt wel opgegeten maar niet opgenomen in bloed, en (c) een deel wordt gedissimileerd. De wet van behoud van energie stelt dat energie niet kan verdwijnen, wat gebeurt er met de energierijke stoffen die gebruikt worden voor dissimilatie (deel c)? Merk op dat in diagram 1 (van Binas 93A) geen onderscheid gemaakt wordt tussen deel a en deel b; dat gebeurt wel in diagram 2.
- Bespreek ook wat er niet (helemaal) aan de simulatie klopt. In werkelijkheid komen de verschillende organismen natuurlijk niet ná elkaar in actie, maar gebeurt alles tegelijkertijd. Meestal eet een organisme ook verschillende soorten organismen van het vorige trofische niveau (en is er dus een voedselweb in plaats van een voedselketen).

#### [aanpassen/uitbreiden](#)

- Laat leerlingen Binas 93A, diagram 2 (*Energiestroom op trofisch niveau n*) goed bekijken. Geef de leerlingen de opdracht dit abstracte diagram te vertalen naar een concreet beeld (een *tableau vivant*), geïnspireerd op de simulatie met de snoepjes. Laat ze een foto van hun tableau vivant maken en deze – voorzien van bijschrift – inleveren.
- Met het snoepjesmodel kan ook het fenomeen bioaccumulatie worden uitgebeeld. De koolplanten krijgen dan behalve de snoepjes ook iets onverteerbaars in hun bakje (bijvoorbeeld knopen of papiertjes met de structuurformule van DDT erop). Deze onverteerbare delen gaan dan steeds door naar een hoger trofisch niveau (ze worden niet gedissimileerd of uitgescheiden), waardoor er opeenhoping (accumulatie) in de topconsument ontstaat.
- Laat de leerlingen Binas 93E, diagram 2 en 3 bekijken. Diagram 2 (de piramide van productiviteit) heeft duidelijk een piramidevorm. Maar als je de getallen in diagram 3 gebruikt om een piramide van biomassa te maken, dan krijg je géén piramidevorm: er is bijvoorbeeld méér biomassa aanwezig in vis (consumenten van de 2<sup>e</sup> orde) dan in fytoplankton (producenten). Een piramide van productiviteit is altijd piramidevormig, maar een piramide van biomassa hoeft dat kennelijk niet te zijn. Hoe kan dat? (Tip: kijk naar eenheden die bij de getallen horen).

#### [bijlagen](#)

- rolkaartjes

## 51. SPIER- EN CIRCULATIEDRAMA'S

### *Creatief verwerkend samenwerken op niveau*

In dit laatste practicum ligt de regie nadrukkelijk in handen van de leerlingen: zij bedenken nu, in groepjes van vier of vijf, helemaal zelf een manier om een specifiek proces uit te beelden, en kiezen zelf de materialen, gebaren en handelingen die ze daarbij nodig hebben. Na een periode met veel complexe onderwerpen, die ook nog samenhangen, is dit een creatieve manier om die onderwerpen nog eens te verwerken. Na de ontwerpfase laten de groepjes om de beurt hun 'uitbeelding' zien, waarbij de rest moet raden wat er wordt uitgebeeld. De creativiteit die loskomt is meestal groot, en het leereffect ook, omdat leerlingen zich bij de uitbeeldingen van anderen continu moeten afvragen wat het kan zijn, dus ze zijn totaal *minds-on*. In het voorbeeld hieronder hebben alle onderwerpen betrekking op transport, spierwerking en de energiehuishouding; de didactiek is echter prima op andere onderwerpen toe te passen. Dit uitbeeldpracticum is ontwikkeld en uitgewerkt door Gee van Duin (Cartesius Lyceum, Amsterdam).

---

duur	60 minuten, waarvan 5 minuten introductie, 20 (of 25) minuten bedenktijd, (25 of) 30 minuten uitbeelden en interpreteren, en 5 minuten afronding
doelgroep	6 vwo (of andere goede bovenbouwklassen)
doelen	<p>Leerlingen kunnen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• benoemen welke onderdelen uit de modellen/simulaties (de uitbeeldingen) overeenkomen met aspecten uit de theorie;</li> <li>• heen-en-weer denken tussen model en werkelijkheid;</li> <li>• heen-en-weer denken tussen verschillende modellen;</li> <li>• feedback geven op de uitvoering;</li> <li>• hun leerwinst benoemen.</li> </ul>
voorkennis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• oxidatieve fosforylering</li> <li>• spierfysiologie</li> <li>• bloedsomloop</li> <li>• hartwerking</li> <li>• vorming weefselvloeistof en lymfe</li> </ul>

### nodig

- opdrachtvellen, in kleur afgedrukt (twee per groepje én een voor jezelf)
- aparte ruimtes waar groepjes kunnen overleggen (gang, studie-nissen, e.d.)
- (eventueel) allerlei materialen en attributen (bijvoorbeeld Duplo®)

### voorbereiding

1. Deze activiteit is een goede afsluiting van een periode; geef de voorafgaande les alleen een hint dat ze onderdelen van de afgelopen periode gaan uitbeelden (c.q. raden en interpreteren).
2. Bedenk hoeveel groepen van vier en van vijf je moet vormen (er zijn hier 6 opdrachten).
3. Leg de materialen en attributen klaar. Leg ook de gekopieerde opdrachtvellen klaar (dubbelgevouwen zodat niet te zien is wat er in staat).
4. Zorg dat je zelf een overzicht hebt van welke groep wat gaat doen.

### uitvoering

1. Leg de procedure en het tijdschema uit: je wordt verdeeld in groepjes – je krijgt een opdracht om iets uit te beelden – zoek een bespreekplek en bedenk een vorm – na 25 minuten ben je terug in de klas – dan om de beurt uitbeelden; de rest kijkt in stilte toe en als je denkt dat je weet wat het is mag je je hand opsteken – nabespreking per onderdeel.
2. Verdeel de klas (bijvoorbeeld via genummerde hoofden) in groepen van vier, eventueel van drie of vijf.
3. Als de groepen bij elkaar staan geef je elke groep de twee dubbelgevouwen kopietjes van hun opdracht. Vraag eventueel ook waar ze gaan overleggen (om ze een paar minuten voor het uitbeeldmoment te kunnen attenderen).
4. Van elke groep mag één persoon terugkomen naar het lokaal om attributen te halen of vragen te stellen.
5. Loop een coachingsrondje langs alle groepen waarbij je ook de hoeveelheid resterende tijd aangeeft.
6. Haal als het uitbeeldmoment is aangebroken iedereen weer terug in het lokaal (als je lokaal te krap is voor het uitbeelden zelf is er misschien een andere ruimte te regelen).
7. Noem nog één keer de spelregels (die in lichtgrijs ook op de opdrachtbladen staan):
  - Bedenk tijdens elke uitbeelding zoveel mogelijk begrippen en processen die je herkent.
  - Zodra je weet welk proces wordt uitgebeeld steek je je hand op, maar je mag het NIET roepen of zeggen of fluisteren.
  - [Dit gebeurt op aangeven van de docent:] Aan het eind benoem je welk begrip of deelproces je héél goed of origineel vond uitgebeeld en waarom.
8. Vraag welke groep wil beginnen (soms willen ze er gauw vanaf zijn), of wijs zelf een groep aan.
9. Soms is de uitbeelding té mysterieus of moeilijk; als je dat zelf vindt of je merkt het bij het publiek, laat het dan nog een keer opvoeren, misschien zelfs in slow-motion. Dat kan ook als het té leuk is!

10. Laat toeschouwers dan aangeven wat ze denken dat het was; je kunt nog doorvragen over details. Een mooie manier is om het nog een keer te laten uitbeelden en dan een toeschouwer toelichting te laten geven.
11. Lees eventueel de opdracht voor zoals die in het kader op het opdrachtblad staat; daar kunnen nog vragen uit voortkomen van toeschouwers.
12. Het leereffect is nog groter als de uitbeeldende groep het nog een keer in slow-motion doet, mét gesproken toelichting.
13. Ten slotte kun je nog één of twee personen vragen wat ze écht sterk vonden aan deze uitbeelding.

Opmerking: de praktijk leert dat de uitbeelding op zichzelf maar heel kort duurt (ongeveer een halve minuut); er is dus relatief veel tijd voor bespreken en verwerken.

#### (na)denkwerk

- Laat leerlingen na afloop benoemen of opschrijven wat ze hiervan geleerd hebben: welke dingen snapten ze eerst niet en nu wel, welke fouten zijn gecorrigeerd, welke inspiratie hebben ze gekregen, et cetera.

#### aanpassen/uitbreiden

- Het principe en de didactiek zijn prima bruikbaar voor andere onderwerpen - maar het moeten niet te makkelijke dingen zijn.

#### bijlagen

- opdrachtvellen (enkelzijdig en in kleur afdrukken)