

De biofysica van signaalgeleiding: rustpotentiaal

Waar natuurkunde en biologie elkaar ontmoeten, deel 1

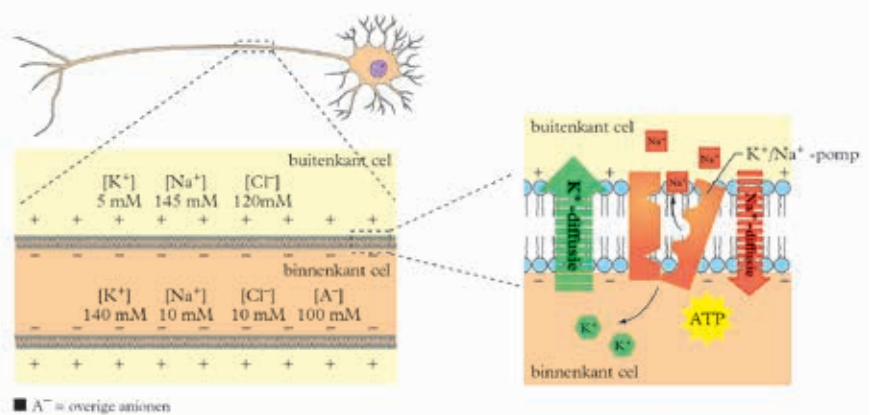
Een pijler van de recente vernieuwing van de bèta-examenprogramma's is afstemming en samenhang. Curriculumanalyse door de SLO laat zien dat deze twee "verder versterkt moeten worden" (Pieters en Folmer, 2018). Biofysica biedt daartoe een mogelijkheid. We hebben ons verdiept in de biofysica van de signaalgeleiding in zenuwen. Daarbij signaleerden we in *Binas* en in natuurkunde- en biologiemethoden probleempunten in de afstemming. Leerlingen (en docenten) die het ook natuurkundig 'echt willen snappen' kunnen bij de probleempunten de draad kwijtraken. Ze vormen het onderwerp van dit artikel over rustpotentiaal, dat gevolgd zal worden door een artikel over actiepotentiaal.

In de biologie is signaalgeleiding een belangrijk onderdeel van de leerstof op vwo-niveau. De leerlingen moeten onder andere het ontstaan van een actiepotentiaal in een axon en de voortgeleiding van een impuls door een axon kunnen uitleggen. In het natuurkundeprogramma vwo is Biofysica een keuzedomein. De inhoud kan op vele manieren ingevuld worden want de bijbehorende eindterm is erg algemeen (Van der Valk 2018). We hebben gekeken hoe signaalgeleiding in twee keuzekaternen *Biofysica*, die van *Newton* en *Systematische Natuurkunde* (SysNat) en in de biologiemethoden *Biologie Voor Jou* (BVJ, 5^e ed., deel 5b vwo) en *Nectar* (3^e ed., 5 vwo) benaderd wordt. Ook hebben we *Binas* tabel 88 erbij genomen.

We doen aanbevelingen aan docenten en auteurs over de afstemming tussen biologie en biofysica. Dit met behoud van de onderwijsbaarheid en, wat biologie betreft, rekeninghoudend met leerlingen die geen natuurkunde in hun pakket hebben.

Neutraliteit van de cel

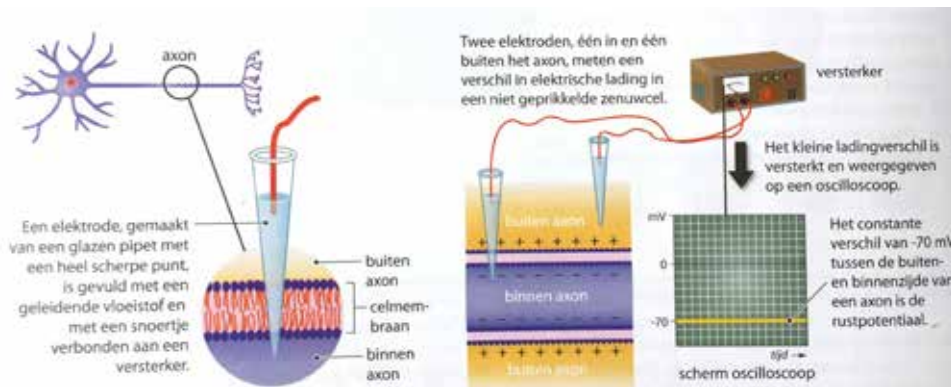
Een belangrijke eis om in leven te blijven is dat een cel in rust elektrisch neutraal is. Als



Figuur 1: *Binas* tabel 88D

we naar de gegevens over ion-concentraties kijken (figuur 1), dan lijkt van neutraliteit in het axon geen sprake te zijn. De concentratie positieve ionen in het axon komt uit op $140 (K^+) + 10 (Na^+) = 150 \text{ mM}$ en van negatieve ionen op $10 (Cl^-) + 100 (A^-) = 110 \text{ mM}$. Een overschot van 40 mM positieve lading. Vreemd, kan een leerling denken, want aan de binnenkant staan minnen getekend. Buiten het axon, waar de plussen getekend staan, is er ook een overschot aan positieve lading, maar kleiner: $+30 \text{ mM}$.

Wat is hier aan de hand? In de afbeelding ontbreken de gegevens van deeltjes die niet deelnemen aan het ladingstransport door het membraan, zoals negatief geladen eiwitten. Die zorgen ervoor dat de concentraties van positief en negatief geladen deeltjes in het axon gelijk aan elkaar zijn. Ondanks zijn grote invloed op de elektrische toestand in het axon is het overschot aan negatieve geladen deeltjes langs het membraan zo klein dat het de concentraties in het axon als geheel niet beïnvloedt.



Figuur 2: Het meten van de rustpotentiaal. Uit Nectar 5vwo, p. 182.

De negatieve lading trekt aan de andere kant van het membraan een even grote positieve lading aan. De twee dunne geladen laagjes zijn te beschouwen als de platen van een condensator, met het membraan als isolerende tussenlaag. De totale lading van die condensator is nul. Daarmee is voldaan aan de neutraliteit van de cel-in-rust.

Ladingscheiding over het membraan

De geladen lagen langs het membraan zijn het gevolg van 'lekkers' in het membraan: ionkanalen waarlangs K^+ - of Na^+ -ionen kunnen diffunderen. Omdat de concentratie K^+ -ionen in het axon veel groter is dan erbuiten, is er een lekstroom van K^+ -ionen naar buiten. Dat geeft aan de directe buitenkant van het membraan een overschot en aan de directe binnenkant een tekort aan K^+ -ionen. Zo ontstaat een naar binnen gericht (van + naar -) elektrisch veld in het membraan. De weglekkende K^+ -ionen ondervinden daardoor een tegenwerkende kracht die de lekstroom vermindert. Er is ook een groot, maar omgekeerd, concentratieverschil voor Na^+ -ionen. Dus die diffunderen naar binnen. Ze krijgen daartoe weliswaar veel minder kans dan de K^+ -ionen, maar ze worden flink geholpen door het elektrische veld. De natrium-kaliumpompen in het membraan werken beide lekstromen voortdurend tegen. Voor elke 2 K^+ -ionen die zij naar binnen halen, werken ze 3 Na^+ -ionen naar buiten.

Binas tabel 88D wil de diffusie en de Na/K-pomp in beeld brengen (figuur 1, rechter plaatje). De brede groene pijl geeft aan dat de doorlaatbaarheid van het membraan voor K^+ -ionen aanzienlijk groter is dan voor Na^+ -ionen (de smalle rode pijl). Mede door de aanduiding 'K⁺-diffusie' in de groene pijl kan het plaatje makkelijk verkeerd gelezen worden. De breedte van de pijl (= de doorlaatbaarheid) moet *niet* opgevat worden als

een maat voor de grootte van de lekstroom, alsof er méér K^+ -ionen uitstromen dan er Na^+ -ionen instromen. In de rusttoestand houden de diffusie en de pompwerking elkaar in evenwicht, dus dan lekken er ook op elke 2 uitgaande K^+ -ionen 3 Na^+ -ionen naar binnen. Het effect van het verschil in doorlaatbaarheid voor K^+ - en Na^+ -ionen is dus *niet* dat de K^+ -diffusiestroom groter is dan de Na^+ -diffusie, maar dat de rustpotentiaal negatief is. Als de doorlaatbaarheid voor natrium de grootste zou zijn, zou de rustpotentiaal positief zijn.

De 'lekkage' van K^+ - en Na^+ -ionen wordt in sommige biologieboeken beschreven als een *probleem*: 'dat wordt opgelost door de natrium-kaliumpomp' (Nectar 5V, p. 182). De lekstromen zijn echter essentieel voor het handhaven en herstellen van de rustpotentiaal. Zonder de 'lekkage' zouden onze zenuwen niet klaar staan om te reageren.

Ladingsverschil en (rust)potentiaal

Het effect van de ladingscheiding kan worden gemeten met een voltmeter en zichtbaar gemaakt worden met een oscilloscoop. Met een voltmeter meet je het potentiaalverschil tussen twee punten (de twee elektroden in figuur 2), één in het extracellulaire vocht (potentiaal 0) en één in het cytoplasma (rustpotentiaal -70 mV). Je meet *niet* het ladingsverschil. Ladingsverschil (met als eenheid coulomb) is veel moeilijker te meten dan potentiaal. Bijvoorbeeld doordat de lading geconcentreerd is in dunne laagjes, terwijl de potentiaal binnen een axon (in rust) overal hetzelfde is. Potentiaal heeft te maken met de (potentiële) energie die een elektrisch veld aan geladen deeltjes geeft.

De rustpotentiaal in axonen is -70 mV. De potentiaal in het extracellulaire vocht wordt per definitie op nul gesteld. Je kunt dus ook spreken van een potentiaalverschil van -70

mV over het membraan. Potentiaalverschil wordt ook wel elektrische spanning (symbool U) genoemd. Newton en SysNat geven de voorkeur aan de term 'spanning'.

In figuur 2, afkomstig uit Nectar, wordt gezegd dat de twee elektroden een 'verschil in elektrische lading' meten, in plaats van potentiaalverschil. BVJ (blz. 98) zegt zelfs expliciet: "Dit verschil in elektrische lading [...] noemen we de rustpotentiaal". Dat biologieboeken geen aandacht besteden aan het verschil tussen de grootheden lading (verschil) en (rust)potentiaal is begrijpelijk. Maar fysisch incorrecte definities kunnen een natuurkundig onderlegde leerling in verwarring brengen. Ons inziens kan dit vermeden worden door formuleringen te gebruiken als: "het verschil in elektrische lading leidt tot een (meetbaar) potentiaalverschil". Accepteer dat deze nuance de niet-fysisch onderlegde leerlingen ontgaat.

.....
Aanbevelingen: verbeter de afstemming tussen biologie en (bio)fysica bij signaalgeleiding door aandacht te besteden aan:

- De neutraliteit van de cel bij het bespreken van ionenconcentraties in en rond het axon.
 - De rol van het elektrische veld in het membraan bij de diffusie van K^+ - en Na^+ -ionen.
 - Evenwicht tussen de lekstromen en de stromen veroorzaakt door de Na/K-pompen.
 - Het onderscheid tussen de lading (in een dunne laag langs het membraan) en (rust)potentiaal (overal in het axon-in-rust).
-

Met dank aan uitgeverij Noordhoff voor de toestemming voor het gebruik van de afbeelding van tabel 88. En met dank aan uitgeverij Malmberg en uitgeverij ThiemeMeulenhoff voor het gebruik van de afbeeldingen uit hun methodes. ●

BRONNEN

- Pieters, M. en E. Folmer (2018). De nieuwe examenprogramma's, de stand van zaken na vier jaar. *NVOX* 43 (6), 322 - 323.
- Valk, T. van der (2018). Biofysica. Worden de doelen van NiNa gerealiseerd? *NVOX* 43(3), p. 120-121.
- Valk, T. van der, & A.J. van Pelt (2018). Biofysica/ Menselijk lichaam. [https://natuurkunedidactiek.nl/4-leerstofdomeinen/4-2-10-biofysica/](https://natuurkundedidactiek.nl/4-leerstofdomeinen/4-2-10-biofysica/) Aanvulling op K. Kortland, A. Mooldijk & H. Poorthuis. *Handboek Natuurkunde Didactiek*. Amsterdam: Epsilon uitgaven.