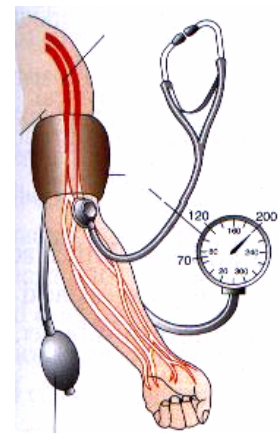


Menselijk Lichaam



**MENSELIJK LICHAAM
(ON)BEGRENSDE MOGELIJKHEDEN**

5 HAVO

MENSELIJK LICHAAM

Het menselijk lichaam is in deze module de centrale context. Hoofdstuk 1 gaat over de warmtehuishouding van het lichaam, hoofdstuk 2 over sportprestaties door het lichaam, en hoofdstuk 3 over paramedische ondersteuning van het lichaam. Met het oog op de beknoptheid hebben we lang niet alle natuurkundig interessante aspecten van het lichaam kunnen behandelen. Zo hebben we bijvoorbeeld zintuigen en gebit achterwege moeten laten. Paragraaf 2.1 is gebaseerd op de voorbeeldmodule NLT “Meten aan sportprestaties”.

Het gaat er in deze module om dat de examenkandidaat de vakinhouden uit domeinen B t/m H kan toepassen en daarbij kan voldoen aan de eindtermen uit domein A.

Colofon

Project	Nieuwe Natuurkunde
Auteurs	Saskia Blom, Cor van Huis, Aartjan van Pelt
M.m.v.	Joop Daemen, Ronald van Elburg, Guus Mulder, Fleur Zeldenrust
Vormgeving	Loran de Vries
NiNa Redactie	Harrie Eijkelhof, Koos Kortland, Guus Mulder, Maarten Pieters, Chris van Weert, Fleur Zeldenrust
Versie	december 2009

Copyright

©Stichting natuurkunde.nl, Enschede 2009

Alle rechten voorbehouden. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins al of niet commercieel hergebruik.

Als uitzondering hierop is openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan

- voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen of studenten,
- als onderdeel van een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertaald en/of bewerkt, voor al of niet commercieel hergebruik, mits hierbij voldaan is aan de volgende condities:
- schriftelijke toestemming is verkregen van de Stichting natuurkunde.nl, voor dit materiaal vertegenwoordigd door de Universiteit van Amsterdam (via info@nieuwenatuurkunde.nl),
- bij hergebruik of verspreiding dient de gebruiker de bron correct te vermelden, en de licentievoorwaarden van dit werk kenbaar te maken.

Paragraaf 2.1 is gebaseerd op materiaal dat is ontwikkeld voor een module in het vak Natuur, Leven en Technologie, en is opgenomen met toestemming van de SLO te Enschede. Hiervoor geldt een Creative Commons licentie zoals omschreven in <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/nl/>

Voor zover wij gebruik maken van extern materiaal proberen wij toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt dan verzoeken wij u contact met ons op te nemen: info@nieuwenatuurkunde.nl

De module is met zorg samengesteld en getest. De Stichting natuurkunde.nl, resp. Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo, Universiteit van Amsterdam en auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module, noch enige aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit het gebruik van deze module.

INHOUDSOPGAVE

<i>1 Warmtehuishouding</i>	6
1.1 De menselijke kachel	7
1.2 Natuurlijke bescherming tegen oververhitting	10
1.3 Technische bescherming tegen oververhitting	12
<i>2 Sportprestaties</i>	14
2.1 Onderzoek naar spronghoogte	15
2.2 Sportvoedsel en prestaties	23
Opgaven	28
<i>3 Diagnose en therapie</i>	31
Onderzoek door de laborant klinische neurofysiologie	32
Opgaven	44

GLOBALE OPBOUW VAN HET LESMATERIAAL

In het lesmateriaal is een aantal stijlen gebruikt. De belangrijkste leerstof is weergegeven in *blauwe* tekstvakken. De betekenis van de andere kleuren en stijlen is hieronder aangegeven.

In de **blauwe** tekstvakken “**Tekst-vragen**” en “**Discussievragen**” staan redelijk eenvoudige vragen die je kunt beantwoorden aan de hand van de tekst. Deze vragen zijn bedoeld om je aan het denken te zetten.

In het **groene** tekstvak “**Extra**” staat informatie die niet tot de leerstof behoort.

2.2 Sportvoeding en prestaties

Paragraafvraag **Hoelang sportbani levert de energie voor een startslag op?**

Bij sporten zijn voedingstoestand en prestaties. Voedingsstoffen worden opgeslagen in de spieren en worden gebruikt om de spieren te laten samentrekken. Hoe lang kan een sporter deze opgeslagen energie gebruiken?

Tekst-vragen

- Wat is de functie van glycogeen?
- Waarom is het belangrijk om te eten na het sporten?
- Waarom is het belangrijk om te drinken na het sporten?

Extra

De voedingstoestand kan worden gemeten met behulp van een bloedtest.

2.1 Voerbeeld

- Wat is het verschil tussen een startslag en een sprint?
- Wat is de functie van glycogeen?
- Wat is de functie van lactaat?

Doelvragen

- Wat is de functie van glycogeen?
- Wat is de functie van lactaat?

De grafiek in de afbeelding toont de verandering in de spierenergie tijdens een startslag.

Figuur 2.1. Verandering in de energiebronnen tijdens een startslag.

In de **paarse** tekstvakken staan **theorieopdrachten** die. Ze dienen direct na het lezen van de tekst te worden gedaan. Deze opdrachten horen dus ook bij de tekst.

Vaardigheden

- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof
- De leerstof

Samenvatting

De leerstof is samenvatting van de leerstof. De leerstof is samenvatting van de leerstof. De leerstof is samenvatting van de leerstof.

Opgaven

1. De leerstof
2. De leerstof
3. De leerstof

4. De leerstof

In het **blauwe** tekstvak “**Vaardigheden**” staan belangrijkste zaken die je moet beheersen.

In het **blauwe** tekstvak “**Samenvatting**” staat de minimale kennis die je paraat moet hebben.

Opgaven staan bij elkaar aan het einde van een hoofdstuk. De opgaven zijn gegroepeerd per paragraaf.

LEVEN EN NATUURKUNDE

Voorkennis

De volgende voorkennis wordt toegepast: warmte, warmtetransport door geleiding, warmtegeleidingscoëfficiënt, smeltwarmte, verdampingswarmte, temperatuur, snelheid, versnelling, kracht, massa, krachtmoment, werklijn, bewegingsenergie, zwaarte-energie, chemische energie, vermogen, rendement, druk, schuifweerstand, elektrische spanning, elektrische stroom, elektrische lading, elektrische geleiding, serieschakeling, en parallelschakeling.

Centrale vraag	Hoe kun je inschattingen maken over de prestaties van het menselijk lichaam?
-----------------------	---

De sporters die al dan niet met een medaille terugkomen van een belangrijke wedstrijd, hebben hun lichaam flink op de proef gesteld. Sommigen van hen kunnen onmiddellijk doorgaan. Anderen moeten hun lichaam wat rust gunnen en een aantal gaat meteen door naar de fysiotherapeut voor herstel. Wat komt er natuurkundig gezien allemaal kijken bij het leveren van sportprestaties?

Ook zonder dat je extreme dingen doet, kun je klachten in je lichaam krijgen. Als de klachten ernstig zijn, word je doorverwezen naar een specialist of een paramedisch therapeut. Waarop zijn de diagnose en de behandeling van de therapeut gebaseerd?

In deze module ga je in op deze problemen en vragen.

1 Warmtehuishouding

Hoofdstukvraag	Hoe ziet de warmtehuishouding van het menselijk lichaam eruit?
----------------	--

Hoofdstukinleiding

Een gezond menselijk lichaam heeft een temperatuur van 37°C. In Nederland is dat eigenlijk altijd hoger dan de omgevingstemperatuur.

Hoe houdt het lichaam warmte vast en hoe produceert het verloren gegane warmte?

Er zijn omstandigheden dat het lichaam juist meer warmte produceert dan het nodig heeft. Om hoeveel warmte gaat dat? Hoe raakt het lichaam die warmte kwijt?

In extreme omstandigheden (hoge omgevingstemperatuur en grote lichamelijke inspanning) kan het lichaam soms niet meer voldoende warmte afvoeren.

Kan de natuurkunde te hulp schieten?

1.1 De menselijke kachel

Paragraafvraag 1	Hoeveel vermogen zet een lichaam om?
-------------------------	---



Ingrediënten:
Suiker, cacaoassa, magere cacao-poeder, dextrose (tarwe), emul-gator: koolzaadlecithine. Cacaobestanddelen ten minste 32%.

voedingswaarde: gemiddeld per 100 g

energie	kJ 1776
	kcal 425

eiwitten	5,0 g
koolhydraten	68,0 g
waarvan: suikers	65,0 g
vetten	14,5 g
waarvan: verzadigd	8,5 g
enkelvoudig onverzadigd	5,2 g
meervoudig onverzadigd	0,8 g
cholesterol	0,0 mg
voedingsvezel	7,0 g
natrium	0,02 g

een portie van 15 gram bevat
64 kcal
Gemiddelde caloriebehoefte voor een volwassen persoon per dag:
man 2500 kcal
vrouw 2000 kcal

Figuur 1.1

Een gezond menselijk lichaam heeft een temperatuur van 37°C. Dat is bijna altijd hoger dan de omgevingstemperatuur, dus meestal verliest het lichaam warmte. Dat betekent dat het lichaam dat warmteverlies zoveel mogelijk moet beperken en wat toch aan de omgeving wordt afgestaan moet aanvullen.

Daarnaast oefent het lichaam nog kracht uit, op voorwerpen in de omgeving, op de bodem bij het lopen, op het bloed dat rondgepompt wordt, etc. Die kracht verricht arbeid, en ook daarvoor is energie nodig.

Hoeveel energie een mens dagelijks nodig heeft, is heel sterk afhankelijk van de omstandigheden: iemand die in het poolgebied de gehele dag buiten zwaar lichamelijk werk moet verrichten, heeft wel viermaal zo veel energie uit voedsel nodig als iemand die in de tropen een kantoorbaan heeft.

De hoeveelheid energie die we uit het voedsel halen, wordt meestal uitgedrukt in kcal (kilocalorie = 1000 calorieën). Dat is een oude eenheid, in de natuurkunde gebruiken we de Joule (J).

Gemiddeld heeft een mens ongeveer 2000 kcal/dag nodig.



Figuur 1.2

1

Op alle voedingsmiddelen vind je een tabelletje met informatie, waaronder die over de “energie-inhoud”. In figuur 1.1 zie je een voorbeeld van een dergelijke tabel. J = Joule, cal = calorie.

- a. Bereken m.b.v. de getalswaarden voor de energie de omrekenfactor om energie in calorie om te rekenen in energie in Joule.

Een beroemd sportcoach heeft eens gezegd: “het menselijk lichaam is een kachelkje van 100 W”.

- b. Ga met een berekening na of die uitspraak klopt.

Het menselijk lichaam verliest dus continu warmte. Om te voorkomen dat het lichaam (te veel) afkoelt, neemt de mens twee maatregelen. Een ervan is het verlies zo veel mogelijk beperken (zie figuur 1.2), de andere is de verloren warmte aanvullen (figuur 1.3).

2

Geef een voorbeeld van de manier van uitvoeren van elk van de twee maatregelen die genoemd worden in figuur 1.2 en 1.3.



Figuur 1.3

Het belangrijkste lichaamsdeel voor de beperking van het warmteverlies, de belangrijkste isolator dus, is de huid. We gaan nu proberen die isolatie te beschrijven en er aan te rekenen. Isolatie is eigenlijk een vorm van weerstand: weerstand tegen warmtegeleiding. De verwantschap tussen elektrische geleiding en warmtegeleiding heb je al eerder leren kennen, in de module *Materialen*.

We zullen nu het warmtetransport op eenzelfde manier modelleren als het transport van elektriciteit.

De wet van Ohm zegt: $U = I \cdot R$ waarbij R de elektrische weerstand is.

Het omgekeerde van weerstand is *geleidingsvermogen*: hoe groter de weerstand, hoe kleiner het geleidingsvermogen en andersom.

Door de Wet van Ohm anders te schrijven, kunnen we het begrip *geleidingsvermogen* invoeren. Een soortgelijk begrip hebben we nodig bij de bestudering van het warmtetransport, maar we kijken eerst even terug naar elektrische geleiding. De wet van Ohm kan omgeschreven worden naar:

$$U/R = U \cdot 1/R = U \cdot G = I$$

daarin staat G voor het geleidingsvermogen.

De elektrische stroom is dus gelijk aan de spanning vermenigvuldigd met het geleidingsvermogen.

De warmtestroom hangt van soortgelijke grootheden af. Als we in plaats van de elektrische stroom I (eenheid: $A = C/s$) een warmtestroom Q (J/s) nemen, de spanning U (V) door een temperatuurverschil ΔT (K) vervangen, dan krijgen we:

$$Q = \Delta T \cdot \text{'warmtegeleiding'}$$

Q in de warmteleer komt overeen met I uit de elektriciteitsleer,

ΔT in de warmteleer komt overeen met U uit de elektriciteitsleer.

Op deze manier kunnen we warmtetransport goed beschrijven. Alleen moeten we die 'warmtegeleiding' nog goed definiëren. We gebruiken daarvoor nog steeds de analogie met elektrische schakelingen.

De kachel in huis, die zorgt voor een bepaalde temperatuur binnen, is te vergelijken met de spanningsbron. De warmtestroom naar buiten is te vergelijken met I en de warmtegeleidingscoëfficiënt k met het elektrisch geleidingsvermogen G .

Er is een belangrijk verschil tussen de manier waarop we naar elektrische schakelingen kijken en de manier waarop we naar warmtestromen kijken. In het geval van elektrische stroom door een weerstand laten we de weerstand van de verbindende draden buiten beschouwing. We kijken bijv. niet naar de invloed van de lengte en de dikte van de draden. In het geval van warmtetransport is dat anders. Daar nemen we de weerstand of geleiding van de verbindende elementen wel mee, dat zijn dan bijv. muren, deuren en ramen i.p.v. draden. Bij het warm houden van een huis doen de dikte en het oppervlak van de geleiders, dus de dikte en het oppervlak van de muren, er wel toe:

- een bepaald temperatuurverschil over een kleine afstand, dus door een dunne muur, leidt tot een groter warmtetransport dan datzelfde temperatuurverschil over een grotere afstand (lees: een dikkere muur),

- door een muur met een groot oppervlak gaat meer warmte per seconde dan door een muur met een klein oppervlak.

De formule voor het warmtetransport wordt dan:

Getransporteerde warmte

$$Q = \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot A \cdot k$$

Symbolen: Δx is de afstand in meters (m) waarover het temperatuurverschil ΔT in Kelvin (K) wordt gemeten; de grootheid Q is dan de hoeveelheid warmte die per seconde wordt getransporteerd; k is de warmtegeleidingscoëfficiënt.

3

Laat zien waarom de eenheid van k moet zijn: $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$

4

In de zomer, als het lekker warm is, kun je heel goed in badkleding buiten lopen. Stel dat de buitentemperatuur $25^\circ C$ is, dat je lichaam een oppervlak heeft van $1,6 \text{ m}^2$, dat je lichaam een vermogen omzet van 100 W en dat de dikte van je huid 5 mm is.

Welke waarde van k heeft je huid dan?

Als je de berekening bij opdracht 4 goed hebt uitgevoerd, dan heb je een waarde voor k gevonden van $0,026 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Als je die waarde vergelijkt met de waarden voor k van een groot aantal andere stoffen (tabel 1), dan kan je concluderen dat de menselijke huid dus geen heel goede warmtegeleider is! Gelukkig maar!

stof	k in $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$
Zilver	417
Koper	390
Aluminium	237
IJzer	79
Glas	0,8 – 0,9
Beton	0,2 – 20
Hout	0,1 – 0,5
Polyetheen	0,26
Wol	0,07
Polystyreen	0,04
Minerale wol (glaswol)	0,04
Lucht	0,024
Water	0,60

Tabel 1

1.2 Natuurlijke bescherming tegen oververhitting

Paragraafvraag

Hoe kan het lichaam zich beschermen tegen oververhitting?



Figuur 1.4

Er zijn omstandigheden waarin iemand zich zodanig moet inspannen, dat de warmteproductie de warmtebehoefte overtreft. Dit is bijvoorbeeld het geval bij het sporten. Ongeveer 75% van de vrijgemaakte energie kan niet worden gebruikt voor de arbeid die bij het bewegen nodig is (rennen, springen, enz.) maar wordt direct omgezet in warmte. Je lichaam zou al gauw een temperatuur boven de 37°C krijgen, zodat de normale processen in je lichaam verstoord worden, en er zelfs weefselschade kan optreden.

Je lichaam moet dus worden gekoeld. Dat doet het lichaam zelf, namelijk door te transpireren: water wordt door de huid naar buiten getransporteerd en daar verdampt het. Voor die verdamping is warmte nodig en die warmte wordt aan het lichaam onttrokken. Het water wordt door de zweetklieren in de huid (de witte kronkelende buis in de tekening hiernaast) aan de bloedbaan onttrokken en naar buiten getransporteerd.

5

Met een paar simpele aannames kunnen we uitrekenen hoeveel water je lichaam verliest door zweeten (= verdamping) als je je inspant.

- Een lichaam in rust zet energie om in een tempo van ongeveer 100 W. Tijdens een langdurige inspanning verdubbelt de hartslag ongeveer. Dat betekent dat het vermogen ongeveer verdubbelt. Dat wordt dus:W
- Dat gaat met een efficiency van 25%, dus behalve die 200 W levert het lichaam ook nog warmte. Dat wordt dusW aan warmte.

Het lichaam kan die warmte op drie manieren kwijtraken, waarvan verdamping (zweeten) er één is.

- Welke andere twee manieren zijn er?
 -
 -
- Stel, elke manier draagt voor $\frac{1}{3}$ bij aan de warmteafvoer. Dan zorgt de verdamping voor een warmteafvoer vanW.

Die warmte wordt gebruikt om zweet (water) op je huid te verdampen.

- Zoek de verdampingswarmte op in BINAS: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- Laat hiermee zien dat je in een uur bijna een halve liter water verdampt.

Je raakt (veel) meer vocht kwijt dan alleen door zweeten. In de lucht die je uitademt zit ook veel vocht en dat verlies je dus ook nog. Daarnaast is er nog vocht nodig om afvalstoffen via de urine uit te scheiden.

Bij zware inspanning, zoals tijdens het sporten, kan je vochtverlies oplopen tot een liter per uur. Dat moet je bijtijds aanvullen: als je één liter vocht hebt verloren kun je al niet meer goed functioneren.

Hieronder zie je een marathonloopster (Gabrielle Andersen-Scheiss) tijdens de Olympische Spelen van 1984 in Los Angeles. Zij had een zo grote lichamelijke inspanning verricht en had daarbij zo veel vocht verloren, dat haar coördinatie en haar oriëntatievermogen ernstig waren aangetast. Zij kon niet meer zelf lopen, was geestelijk verward en moest naar het ziekenhuis worden gebracht.



Figuur 1.5



Zie ook het filmpje op <http://www.youtube.com/watch?v=Zs4lbNPiato>.

1.3 Technische bescherming tegen oververhitting

Paragraafvraag	Hoe kan een technisch hulpmiddel het lichaam beschermen tegen oververhitting?
----------------	---

Het lichaam raakt overtollige warmte kwijt door te transpireren, dus door water te verdampen. Die warmte moet worden afgevoerd om oververhitting te voorkomen.

Maar deze medaille heeft een keerzijde: het lichaam blijft op temperatuur maar het functioneren wordt wel aangetast door het vochtverlies.

Zou het niet mogelijk zijn die warmte op een andere manier kwijt te raken? Zou je niet je eigen koelkast mee kunnen nemen?

Die koelkast moet dan wel aan een aantal praktische eisen voldoen:

Bijvoorbeeld

- licht van gewicht
- klein en hanteerbaar.

Het makkelijkst zou een soort vest zijn waarin een stof zit die heel veel warmte op kan nemen, dat licht van gewicht is en op lichaamstemperatuur (37 °C) vast is.

Water is goedkoop en kan veel warmte opnemen

6

Stel dat je een vest zou dragen met twee liter water erin, met een begintemperatuur van 20°C.

Dat water gaat tijdens het leveren van een inspanning opwarmen tot 37°C.

- a. Bereken hoeveel warmte dat water dan opneemt.
- b. Als dat lichaam een warmte kwijt moet met een vermogen van 400 W, hoe lang kan dat vermogen dan worden geleverd terwijl al die warmte door het vest wordt geabsorbeerd?

Je antwoord bij b is waarschijnlijk niet erg bemoedigend: twee kilo water meeslepen en veel effect heeft het niet...

Tegenwoordig zijn er materialen die wel effectief zijn, en die speciaal voor deze toepassing zijn ontwikkeld. Ze maken gebruik van het feit dat de hoeveelheid warmte die nodig is om een stof een faseovergang te laten doorlopen, dus bijv. smelten, heel veel groter is dan de hoeveelheid warmte die nodig is voor alleen temperatuurstijging.

Een voorbeeld is het materiaal *Thermasorb*. In het tabelletje hieronder zie je de eigenschappen van *Thermasorb* vergeleken met die van water.

Eigenschap	Water	Thermasorb 65
Smeltpunt (°C)	0	18
Smeltwarmte (kJ · kg ⁻¹)	334	163
Dichtheid (g · cm ⁻³)	1,0	0,88

Aan de waarden in de tabel zie je dat voor het smelten van water veel meer warmte nodig is dan voor het smelten van Thermasorb 65, maar dat Thermasorb 65 een smeltpunt heeft dat voor het menselijk lichaam een veel aangenamere temperatuur is dan het smeltpunt van ijs.

Een vest gevuld met ijs is niet prettig om te dragen. Een vest met Thermasorb 65 met een temperatuur van 18°C, kan heel prettig zijn om te dragen als je lichaam veel warmte produceert.

Breïnbreker:

Bereken hoe lang je met een vest met 2 kg Thermasorb 65 kan sporten als dat alleen warmte opneemt om te smelten.

2 Sportprestaties

Hoofdstukvraag	Wat is van belang bij het leveren van een sportprestatie?
-----------------------	--

Topsporters gaan ver om hun sportprestaties te verbeteren. Ze laten zich hierbij begeleiden door coaches, fysiotherapeuten, diëtisten en psychologen. Zo werken ze aan hun techniek, spierkracht, uithoudingsvermogen en mentaliteit. In dit hoofdstuk bekijk je hoe jouw natuurkundige kennis kan bijdragen aan het verbeteren van topprestaties.



2.1 Onderzoek naar spronghoogte

Paragraafvraag	Wat is de beste starthouding om zo hoog mogelijk te springen?
----------------	---

Als sporters aan hun techniek werken, proberen ze de adviezen van hun coach zo goed mogelijk op te volgen. Hoe komen de adviezen van de coach eigenlijk tot stand? Zijn ze gebaseerd op de ervaring en intuïtie van de coach, of is er echt onderzoek gedaan naar de optimale techniek?

Met redelijk eenvoudige metingen kun je bepalen met welke lichaamshouding je de beste sportprestatie kunt leveren. Als voorbeeld nemen we een sprong vanuit stilstand. In deze paragraaf ga je hieraan metingen uitvoeren.

Onderzoek naar sportbewegingen gebeurt vaak met video-opnames. Zonder apparatuur is het niet goed mogelijk om op ieder tijdstip de houding van de sporter precies te bepalen. We zien wel dát iemand beweegt en of dit snel of langzaam gaat, maar het is moeilijk om precies aan te geven hoe snel dat gaat en wat er gebeurt.

Je kunt een beweging beschrijven als een opeenvolging van houdingen. Als je de opname van een bewegend persoon “beeld voor beeld” bekijkt, zie je dat de houding telkens een klein beetje verandert. Hieronder ga je een beweging analyseren.

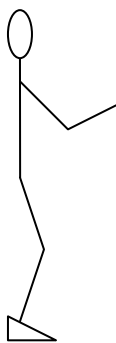
7 Houdingen van het lichaam tijdens een sprong

Het is lastig om precies te tekenen wat er met de ledematen (romp, armen, benen en voeten) gebeurt bij het springen. Vandaar dat we dan meestal een vereenvoudigde vorm tekenen: een stickdiagram. In figuur 2.1 staat een stickdiagram van een staande persoon met de armen vooruit, die iets door de knieën zakt.

- Teken zelf in vijf stappen (5 diagrammetjes) het verloop van een sprong. Geef hierin de kniehoek aan (dit is de hoek van het onderbeen ten opzichte van het bovenbeen) en hoe groot deze hoek is in graden ($^{\circ}$). Benoem elk diagram.
- Vergelijk jouw diagrammen met die van je klasgenoten en bediscussieer de verschillen. Bewaar de vijf zelfgemaakte stickdiagrammen voor in je verslag.

De stickdiagrammen worden beoordeeld aan de hand van de volgende criteria:

- Versillen ze voldoende van elkaar om de beweging goed weer te geven?
- Zijn ze compleet en voldoende herkenbaar?



Figuur 2.1 Stickdiagram

Extra

Als je informatie wilt zoeken over trainingsprogramma's om zo hoog mogelijk te leren springen, gebruik dan bijvoorbeeld de volgende zoektermen:

- 'Exercise vertical jump'
- 'Plyometrics'

Optimaliseren van de spronghoogte

Bij het onderzoek naar de beste starthouding richten we ons op de hoogte van de sprong. Bij veel sporten is de spronghoogte belangrijk. Denk aan een voetballer die een bal in het doel wil koppen, een volleyballer die een bal over het net wil smashen of een basketballer die een bal wil dunken. Er zijn trainingsprogramma's om zo hoog mogelijk te leren springen (zie het opdrachtvak hiernaast).

Wat is een goede strategie om zo hoog mogelijk te springen? Spring maar eens. Welke delen van je lichaam zorgen voor de afzet? In ieder geval moet je de knieën en de enkels snel strekken. Vooral je bovenbeenspieren oefenen dan een grote kracht uit.

8 Wat bepaalt de hoogte van een sprong?

Schrijf voor jezelf op welke factoren volgens jou een rol spelen om zo hoog mogelijk te springen.

- Wat kan er allemaal gevarieerd worden aan de houding die de sporter tijdens de sprong aanneemt als het erom gaat de spronghoogte te beïnvloeden?
- Welke grootheden daarnaast bepalen volgens jou de hoogte van een sprong?
- Bespreek met een klasgenoot de overeenkomsten en verschillen tussen wat jullie hebben opgeschreven. Kunnen jullie gezamenlijk nog meer factoren bedenken? Vallen andere factoren bij nader inzien weg of komen ze op hetzelfde neer?

Inveren voor de sprong voor extra hoogte

Als je gaat springen zak je vóór de sprong eerst even snel door je knieën en enkels. Wat is daarvan de reden? Het blijkt dat je in een snelle beweging naar beneden, je spieren en pezen aanspant als veren. Als je jezelf onmiddellijk daarna naar boven afzet, wordt de *veerenergie* die opgeslagen is in deze spieren en pezen, opnieuw gebruikt. Zo spring je hoger dan vanuit stilstand. Het is wel belangrijk dat dit snel genoeg gebeurt, anders kun je de energie niet meer gebruiken. Als je langzaam naar beneden zakt, even wacht, en daarna pas afzet, kom je niet zo hoog.

Het inveren heeft dus te maken met het hergebruiken van bewegingsenergie, je spieren hoeven hier geen chemische energie voor om te zetten. Het opslaan van energie in spieren en pezen staat bekend onder de Engelse term "counter movement".

9 Het effect van inveren

Vat de betekenis van het begrip "counter movement" in een à twee zinnen samen.

De juiste starthouding levert maximale bewegingsenergie

Bij een sprong moeten je benen natuurlijk veel kracht kunnen uitoefenen op de grond. Deze kracht bepaalt mede met welke snelheid je los komt van de grond. Maar je wilt ook zo lang mogelijk kracht kunnen zetten, en daarvoor moet je de kracht over een zo groot mogelijke afstand uitoefenen. Zo redenerend zou je eerst zo diep mogelijk door de knieën moeten zakken voordat je gaat springen. Maar lang niet iedere hoek is gunstig om een grote kracht uit

te oefenen. Je wilt immers een grote kracht naar boven uitoefenen, kan dat wel als je diep door de knieën gaat? De starthoek van je knieën is dus een belangrijke grootheid.

4 Oriënterende metingen: Voorbereiding voor het echte onderzoek

Je kunt vanuit volledig gebogen knieën springen (billen op je hielen), maar ook met bijna gestrekte knieën. Probeer maar eens! Laat een medeleerling schatten hoe ver je hoofd omhoog komt. Spring ook eens gewoon zoals je gewend bent. Je start hierbij met je knieën in een tussenvorm, tussen gestrekte en maximaal gebogen knieën. Noteer jullie resultaten in een tabel. Denk hierbij aan de significantie, want jullie doen heel ruwe metingen.

Spronghoogte bij ...	gestrekte knieën	tussenvorm	maximaal gebogen
Poging 1			
Poging 2			

Arbeid en energie

Bij maximaal gebogen knieën is de afstand waarover je jezelf af kunt zetten maximaal. En hoe langer de spieren kracht kunnen uitoefenen, hoe meer arbeid ze kunnen verrichten. De arbeid die je spierkracht verricht is immers gegeven door de formule:

<i>Arbeid</i>	
$W = F \cdot s$	
Symbolen:	W is de arbeid in Joule (J), F is de kracht in Newton (N), en s is de afgelegde afstand in meters (m).
Doel:	Deze vergelijking geeft de arbeid die de kracht F verricht als een voorwerp waarop deze kracht werkt een afstand s aflegt.
Geldigheid:	Deze vergelijking is alleen geldig als de kracht F constant is en in de richting van de afgelegde weg s werkt.

Wanneer de spierkracht over een langere afstand werkt, kan hij meer arbeid verrichten. Maar je beenspieren kunnen niet tijdens de gehele afzet een even grote kracht uitoefenen. Bij ver doorgebogen knieën is de spierkracht klein omdat je spieren dan maximaal verlengd zijn, maar ook omdat de verticale component van de kracht (F) in het begin erg klein is. In het begin zal daarom de bijdrage van de spierkracht aan de arbeid niet groot zijn. Aan de andere kant heb je bij gestrekte knieën helemaal geen afstand waarover je af kunt zetten ($s = 0$), zodat de bovenbeenspieren geen bijdrage kunnen leveren aan de spronghoogte.

De vraag is nu of er tussen die twee uitersten een kniehoek zit, waarbij je het hoogste springt: de optimale kniehoek. Je gaat nu zelf meten wat de invloed van de beginhoek is op het bereiken van een zo groot mogelijke spronghoogte. Dit ga je bepalen met behulp van een hoeksensor.

Arbeid speelt bij springen dus een belangrijke rol. Hoe meer arbeid je spierkracht verricht, des te groter is de kinetische energie en dus de snelheid waarmee je van de grond loskomt.

Arbeid en kinetische energie

$$W_{\text{netto}} = \Delta E_{\text{kin}}$$

- Symbolen:** W_{netto} is de netto arbeid in Joule (J), ΔE_{kin} is de toename van de kinetische energie in Joule (J).
- Doel:** Deze vergelijking staat ook wel bekend als de KEA-regel (kinetische energie-arbeidregel). Die zegt dat de netto arbeid op een lichaam verricht gelijk is aan de toename van de kinetische energie van dat lichaam.
- Geldigheid:** Deze vergelijking is alleen geldig als ook echt de netto arbeid, wordt gebruikt, dit wil zeggen de arbeid verricht door alle krachten samen.

Tijdens het afzetten verricht de spierkracht (evenals de zwaartekracht F_z) arbeid. De snelheid neemt daarbij toe van 0 naar de afzetsnelheid v_0 :

$$W_{\text{netto}} = \Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv_0^2 - 0 = \frac{1}{2}mv_0^2$$

Extra uitwerking

Tijdens de eigenlijke sprong omhoog verricht alleen de zwaartekracht arbeid. Deze arbeid is negatief omdat F_z tegengesteld aan de bewegingsrichting staat, de snelheid neemt nu af van de afzetsnelheid v_0 naar 0.

$$W_{\text{netto}} = W_z = F_z \cdot h = -mg \cdot h = 0 - \frac{1}{2}mv_0^2, \text{ zodat } mgh = \frac{1}{2}mv_0^2$$

Omdat mgh ook gelijk is aan de zwaarte-energie $E_{z,h}$ in het hoogste punt h , staat er dus $E_{\text{kin},0} = E_{z,h}$

Oftewel: de kinetische energie bij de afzet $E_{\text{kin},0}$ wordt omgezet in de zwaarte-energie in het hoogste punt $E_{z,h}$, zodat we uiteindelijk krijgen:

$$W_{\text{spier}} + W_z^{\text{afzet}} = E_{\text{kin},0} = E_{z,h} \text{ of}$$

$$F_{\text{spier,vert}}^{\text{gem}} \cdot s - mg \cdot s = mgh, \text{ waarin:}$$

$F_{\text{spier,vert}}^{\text{gem}}$ de gemiddelde verticale component van de spierkracht (We hebben gezien dat deze nogal varieert tijdens de afzet).

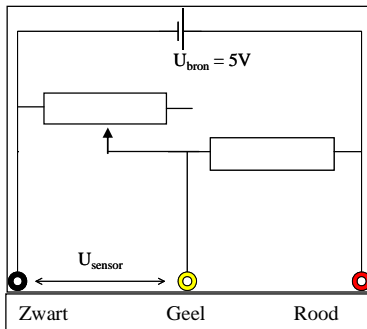
s de stijging van het massamiddelpunt van het lichaam tijdens de afzet

h de springhoogte

Op deze manier is per persoon $F_{\text{spier,vert}}^{\text{gem}}$ te bepalen.



Figuur 2.2 Hoeksensor



Figuur 2.3
Schema Hoeksensor

Meten van de kniehoek met de hoeksensor

Voor het meten van de kniehoek (de hoek tussen onder- en bovenbeen), gebruik je een variabele weerstand die afhangt van de hoek tussen de twee latjes van de sensor. In figuur 2.3 is deze hoeksensor symbolisch getekend als een schuifweerstand in serie met een tweede weerstand. Om de hoeksensor uit te lezen sluit je hem aan op de Coachlab interface. De oude Coachlab interface heeft een zwart, een geel en een rood aansluitpunt. De moderne heeft een BT-plug (British Telecom). Gebruik de schakeling in figuur 2.3 om de hoeksensor aan te sluiten op Coachlab.

Met de hoeksensor kan de verandering van de kniehoek tijdens de sprong geregistreerd worden. In Coach krijg je dan rechtstreeks een diagram van de kniehoek tegen de tijd. Hoe ziet dit diagram eruit als je de tijd rekent vanaf het begin van de afzet tot het eind van de landing?

Uit het diagram is de sprongtijd te bepalen. De daaltijd t (is gelijk de stijgtijd) is dan de halve sprongtijd. Bij het dalen geldt: $h = \frac{1}{2}gt^2$. Je kunt de op deze manier berekende hoogte h vergelijken met de rechtstreeks gemeten hoogte.

Groepsopdracht: De relatie tussen starthouding en spronghoogte

In het volgende experiment ga je aan de hand van de opdrachten hieronder onderzoeken wat de beste starthouding is om zo hoog mogelijk te kunnen springen. Je doet dit in een groep.

Je onderzoekt daarbij de relatie tussen kniehoek en spronghoogte en hoe de kniehoek verandert in de tijd.

10 Hypothese opstellen

Probeer het volgende te voorspellen en in een schets weer te geven.

- De relatie tussen spronghoogte en beginhoek.
- De verandering van de kniehoek vanaf het begin van de afzet tot het weer tot stilstand komen.

11 Werkplan opstellen

Ga allereerst na wat je wilt onderzoeken.

Wat zou je in het kader van dit experiment naast het bepalen van de beste starthoek nog meer uit je resultaten willen halen?

Wat heb je nodig voor het experiment? Allereerst de hoeksensor waarmee je de kniehoek tijdens het springen kunt meten. Dan moet je natuurlijk ook de spronghoogte kunnen meten. Hoe zou je dat kunnen doen? Verderop in deze paragraaf staat hiervoor een suggestie. Verder moet er ook gesprongen worden, dus er zijn proefpersonen nodig.

Het is belangrijk om van tevoren te bedenken hoe het experiment plaats gaat vinden, want de proefpersoon moet bijvoorbeeld weten hoe hij of zij moet springen. De gegevens moeten genoteerd worden.

Maak een werkplan en beschrijf daarin in elk geval:

- Het doel van het onderzoek: wat je wilt onderzoeken.
- De apparatuur, dus in dit geval de hoeksensor, de software en ook kort hoe alles aangesloten gaat worden.

Om het digitale signaal uit Coach om te rekenen naar de gemeten hoek, gebruik je de ijkgrafiek van de sensor.

- c. Beschrijf hoe de hoogte gemeten gaat worden.
- d. De proefpersonen: Hoeveel? Lengte? Gewicht? Hoeveel jongens, hoeveel meiden?
- e. Wat er gemeten wordt, dus wat de proefpersonen moeten doen: Moeten ze één keer springen of vijf keer? Moeten ze eerst helemaal stil staan, of mogen ze bewegen vóór de sprong?
- f. Wie welke taak heeft, dus wie leest af hoe hoog de proefpersonen springen en wie schrijft dat op? Wie bedient Coach en wie plaatst de hoekmeter op de proefpersoon? Spreek ook vast af wie het verslag schrijven, enzovoorts.

Apparatuur en werkwijze

In de volgende vier opdrachten wordt de manier van meten en de werkwijze nader beschreven.

12 Plaatsen van de hoeksensor

Om de hoeksensor de juiste hoek te laten meten is het noodzakelijk dat de as van de hoeksensor gelijk valt met de as van het kniegewricht. Omdat het kniegewricht niet echt een vast draaipunt heeft is dat eigenlijk niet mogelijk, maar het is wel mogelijk om de as van het meetsysteem zo goed mogelijk te plaatsen:

- a. Plaats het ene latje tegen het bovenbeen en het andere tegen het onderbeen van je proefpersoon. Probeer vervolgens de knie te buigen en zoek het punt op waar de latjes niet meer verschuiven (wel draaien) ten opzichte van elkaar. Het punt waar ze bijna niet verschuiven is het gemiddelde draaipunt van de knie.
- b. Probeer uit: Bepaal het gemiddelde draaipunt van een knie en zet dan de hoekmeter met tape vast op boven- en onderbeen.
- c. Beschrijf in je eigen woorden in je werkplan hoe de hoeksensor geplaatst moet worden.

13 IJken van de hoeksensor op de knie

Bepaal de richtingscoëfficiënt van de ijkgrafiek. Hoewel de hoeksensor geijkt is, kan het zijn dat de hoek die de meter aangeeft niet overeenkomt met de hoek van het kniegewricht. Het kan zo zijn dat de hoeksensor 170° aangeeft, terwijl het been volledig gestrekt is (dit komt overeen met 180°). Het is dus nodig om na elke nieuwe plaatsing van de hoeksensor opnieuw te ijken. Hierbij is de richtingscoëfficiënt uit de ijkgrafiek nog wel bruikbaar, maar de constante moet waarschijnlijk met een bepaalde correctiehoek (bijvoorbeeld 10°) worden aangepast. Je kunt de ijking dus corrigeren door bij elke meting de correctiehoek op te tellen die je na plaatsing hebt bepaald.

- a. Probeer uit: Controleer de ijking van de hoeksensor als deze geplaatst is en pas deze zo nodig aan.
- b. Beschrijf in je werkplan met eigen woorden hoe de hoeksensor geijkt wordt

14 Hoogtemeting

Het is lastig om het hoogste punt van een sprong vast te leggen. Een manier om dit te doen is het aantikken van een muur. Om dit punt te markeren, zou je met een markeerpen op een stuk papier op de muur een stip kunnen zetten. Om te voorkomen dat je tegen de muur springt, is het handig om dit stuk papier boven een openstaande deur te hangen. Je hebt dan alle bewegingsvrijheid om te springen. Omdat de meting alleen goed gaat als je echt een stip zet tijdens het hoogste punt van de sprong, moet je de proefpersoon misschien eerst een keer laten oefenen.

Aandachtspunt: het hoogste punt dat je met je hand bereikt bij het springen is niet de echte spronghoogte! De spronghoogte is het verschil in hoogte ten opzichte van de hoogte bij stilstand.

- Probeer uit: doe zelf een hoogtemeting. Bedenk eventueel jullie eigen meetmethode.
- Beschrijf in je werkplan met eigen woorden hoe de hoogtemeting zal plaatsvinden.

15 Proefpersonen

- Voor het experiment is één proefpersoon een beetje weinig. Hoeveel proefpersonen zouden er noodzakelijk zijn om een betrouwbaar experiment te doen?
- Hoeveel sprongen moet iedere proefpersoon uitvoeren?
- Beschrijf hoeveel proefpersonen je nodig hebt in je werkplan.

16 Uitvoeren van het experiment

Voer het experiment uit volgens het werkplan met het aantal proefpersonen dat daarin beschreven staat. Verzamel je resultaten zoveel mogelijk in tabellen en meetdiagrammen en verwerk deze in je verslag.

Per proefpersoon laat je enkele sprongen uitvoeren vanuit startposities met verschillende kniehoeken. Begin met een sprong zonder kniebuiging en eindig met een sprong met maximale kniebuiging. Meet telkens de kniehoek (met de hoekmeter) en de bijbehorende spronghoogte en noteer deze in een tabel. We noemen de starthoek van waaruit de proefpersoon omhoog springt voortaan hoek α . Maak voor enkele sprongen een compleet kniehoek-tijd diagram.

- Probeer uit: Maak een tabel en laat iemand sprongen maken waarin de starthoek α varieert van 180 graden tot zo klein mogelijk, in stappen van 20 graden.
- Noteer de starthoek α en de spronghoogte h in de tabel.
- Schrijf op met welke starthoeken jullie de proefpersonen willen laten springen, en hoeveel sprongen ze per starthoek moeten maken.
- Verwerk je resultaten in een grafiek.
- Meet met Coach voor enkele gevallen een kniehoek-tijd grafiek.

17 Verwerken van de waarnemingen

Na alle sprongen heb je per proefpersoon een tabel met starthoeken en spronghoogtes en een aantal kniehoek-tijd diagrammen.

- a. Maak in Excel een grafiek van de spronghoogte tegen de starthoek. Probeer dan conclusies te trekken. Is er een optimale kniehoek? Zo, ja, waar ligt deze? Dicht bij gestrekte knieën, dicht bij maximaal gebogen knieën of ergens in het midden?
- b. Zoek per persoon de maximale spronghoogte op en de daarbij behorende starthoek (α) van de knie. Het kan natuurlijk zo zijn dat deze optimale starthoek van persoon tot persoon verschilt.
- c. Komen de resultaten overeen met de voorspellingen?
- d. Geef een verklaring voor de vorm van de grafieken.
- e. Probeer uit de kniehoek-tijd grafiek de sprongtijd te bepalen en daaruit de spronghoogte te bepalen. Komt deze binnen de nauwkeurigheidsmarges overeen met de rechtstreeks gemeten hoogte?
- f. Wat is het resultaat van je verdere onderzoeken?

18 Conclusies en discussie

- a. Vat de conclusies van je onderzoek samen.
- b. Geef commentaar over de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van je onderzoek. Komt er één duidelijke starthouding uit?
- c. Verwerk dit samen met je metingen in een verslag.

2.2 Sportvoedsel en prestaties

Paragraafvragen	Hoeveel sportdrank levert de energie voor een <i>warming up</i>? Hoe zet het lichaam chemische energie uit voedsel om in mechanische energie?
-----------------	--

Bij sporters zijn energiedrankjes populair. Veel topsporters volgen specifieke diëten om voldoende te kunnen presteren, en tegelijkertijd toch niet te zwaar te worden. Het ‘calorieën tellen’ dat bij zo’n dieet hoort, heeft te maken met het natuurkundige begrip *energie*. Stel, een bevriende sporter vraagt jou: “Hoeveel sportdrank moet ik drinken om precies de energie voor een *warming up* te leveren?” In deze paragraaf ga je na wat jij vanuit natuurkundig perspectief kunt adviseren.

Hoe pak je het aan om je advies te onderbouwen? Welke natuurkundige begrippen en verbanden zijn relevant voor dit probleem? Welke gegevens kun je verzamelen om tot een advies te komen?

19 Woordweb

- Zet in het midden van een leeg A4-tje: Energiehuishouding.
- Zet rondom dit begrip de natuurkundige begrippen die volgens jou een rol spelen bij de energiehuishouding van het menselijk lichaam.
- Zet bij de begrippen hoe je hierover gegevens kunt verzamelen.

Extra

De docent heeft aanvullende informatie over energie in sportdrankjes

Deelvragen

- Hoeveel energie gebruikt iemand tijdens een *warming up*?
- Hoeveel energie zit er in een sportdrank (per liter of per milliliter)?

Je gaat in de volgende voorbeelden en opdrachten in op deze deelvragen.

Voorbeeld

Deelvraag a. Wat is het energiegebruik bij een *warming up*?

Laten we eens kijken of we een redelijke schatting kunnen maken. We kiezen een *warming up* die natuurkundig makkelijk te beschrijven is: vijf minuten touwtje springen.

Worden er bij het touwtje springen ongeveer twee sprongen per seconde gemaakt, dan zijn dat in vijf minuten $5 \times 60 \times 2 = 600$ sprongen.

Hoeveel arbeid moeten de beenspieren verrichten om 600 keer te springen? Dit hangt natuurlijk af van de spronghoogte: hoe hoger de sporter springt, hoe meer zwaarte-energie het lichaam krijgt. Deze energie haalt de sporter uit de arbeid verricht door de kracht die de beenspieren uitoefenen.

Voorbeeld (vervolg)

Je kunt deze spronghoogte schatten door bijvoorbeeld zelf eens met een (denkbeeldig) touw te springen: het is niet meer dan ongeveer 10 cm. Uitgaand van deze hoogte, kunnen we de zwaarte-energie per sprong berekenen via de formule $E_z = m g h$. Laten we zeggen dat de sporter 65 kg weegt. Een sprong van 10 cm komt dan overeen met een energie van $65 \times 9,8 \times 0,10 = 64 \text{ J}$.

Als je je voor de geest haalt hoe een goed getrainde bokser touwtje springt, dan kun je de beweging een beetje vergelijken met die van een stuiterbal. Om telkens even hoog te komen moet de sporter natuurlijk wel energie in elke volgende sprong steken, maar niet zoveel als bij de eerste sprong. Iemand die tussen elke sprong even stil staat, daarentegen, zet alle zwaarte-energie uit de vorige sprong om in omgevingswarmte. Vergelijk dit ook met het *inveren* bij het hoogspringen uit de vorige paragraaf.

Een tennisbal stuitert tot zo'n 50 tot 60 % van de beginhoogte. Laten we schatten dat een sporter bij het touwtje springen zo'n 40 procent van de zwaarte-energie hergebruikt. De rest van de energie die nodig is om steeds weer even hoog te springen (60 % van de zwaarte-energie) wordt geleverd door de spieren van de sporter.

Per sprong verrichten de spieren dus een arbeid van $64 \text{ J} \times 0,6 = 38 \text{ J}$. In 600 sprongen verbruikt de sporter dan $600 \times 38 \text{ J} = 23 \text{ kJ}$.

We hebben dus beredeneerd dat voor vijf minuten touwtje springen de been-spieren ongeveer 23 kJ aan arbeid verrichten.

De tweede deelvraag kun je zelf beantwoorden in de volgende opdracht. Raadpleeg hier bronnen voor. Het ligt voor de hand om internet te gebruiken. Als dit tijdens de les niet beschikbaar is, kun je deze opdracht later thuis uitvoeren.

20 Hoeveel energie kan je lichaam uit sportdrink halen?

Let er bij het zoeken naar informatie op dat men twee soorten drankjes onderscheidt: (1) sportdrink, en (2) energiedrank. Energiedrankjes bevatten gemiddeld twee keer zoveel chemische energie per ml als sportdrinkjes. Houd er bovendien rekening mee dat het menselijk lichaam arbeid kan verrichten met een rendement van ongeveer 25%. Het zet de rest van de chemische energie om in warmte.

- Zoek uit hoeveel energie er in een sportdrink zit, per liter of per milliliter.
- Maak een keuze uit de informatie die je vindt, en beargumenteer waarom je dit gekozen hebt.
- Geef aan wat er belangrijk, en wat minder belangrijk is aan de informatie die je vindt. Hoe weet je dat deze informatie betrouwbaar is?
- Bereken ten slotte hoeveel sportdrink de sporter moet innemen. Met hoeveel slokken komt dit ongeveer overeen?

Conclusie

Voor een kortdurende inspanning als vijf minuten touwtje springen is maar heel weinig sportdrink nodig.

Tekstvragen

- Welke energieomzettingen vinden plaats bij een sprong?

Wat gebeurt er op celniveau

Laten we nu eens op celniveau bekijken wat er met de energie gebeurt. Hoeveel chemische energie zetten de spiercellen om tijdens vijf minuten inspanning? Komt dit overeen met de hoeveelheid energie die we eerder geschat hebben?

Waar haalt de sporter de bewegingsenergie eigenlijk vandaan? Door te eten en te drinken krijgt de sporter koolhydraten, eiwitten en vetten binnen. In het maag-darmkanaal worden de koolhydraten gesplitst in glucosemoleculen ($C_6H_{12}O_6$), die via de bloedsomloop naar het spierweefsel worden vervoerd. Het bloed brengt tegelijkertijd zuurstof vanuit de longen naar het spierweefsel. Door de glucose in stapjes met zuurstof te laten reageren, kan het lichaam de chemische energie aanwenden. Deze energie gebruikt het spierweefsel voornamelijk om de spiervezels te laten samentrekken. In de spieren wordt dus chemische energie uit glucose via een reactie met zuurstof omgezet in bewegingsenergie.

De netto reactievergelijking voor de oxidatie van glucose is:



Hierbij komt $2,8 \cdot 10^6$ J/mol aan energie vrij.

Deze energie die als chemische energie in de glucosemoleculen opgeslagen zat, wordt gebruikt voor de vorming van ATP-moleculen. De ATP-moleculen verzorgen het energietransport op celniveau.

Het lukt de cellen niet om alle chemische energie uit de glucose op te slaan in ATP-moleculen, het rendement hierbij is 40%. De spiercellen gebruiken vervolgens de energie van het ATP om arbeid te verrichten. Hierbij wordt nog eens ongeveer 47% van de energie in warmte omgezet.

In de volgende opdrachten bereken je hoeveel zuurstof iemand verbruikt tijdens vijf minuten touwtje springen, en verifieer je de uitkomst met een experiment. Je kunt de opdrachten het beste met z'n tweeën uitvoeren.

21 Hoeveel zuurstof verbruikt je tijdens 5 minuten inspanning?

Met de bovenstaande reactievergelijking kun je berekenen hoeveel zuurstof je verbruikt na vijf minuten touwtje springen. Ga uit van de 23 kJ aan arbeid die volgens onze schatting hiervoor nodig is.

- Bereken hoeveel arbeid er uiteindelijk verricht kan worden bij de verbranding van 1 mol glucose.
- Bereken hoeveel mol zuurstof er nodig is om de hoeveelheid energie voor vijf minuten touwtje springen te leveren.

Bij elke ademhaling blaas je minder zuurstof uit dan je hebt ingeademd. Bij een normale luchtdruk en een temperatuur van 20 °C heeft één mol gas een volume van 24 liter.

- Bereken hoeveel liter zuurstof er nodig is om vijf minuten touwtje te springen.
- Zoek op (bijvoorbeeld in Binas) hoeveel procent zuurstof de in- en uitgeademde lucht gemiddeld bevat. Bereken vervolgens hoeveel procent van de ingeademde zuurstof verbruikt wordt.
- Hoeveel liter lucht moet je extra inademen om de energie te kunnen leveren die nodig is voor vijf minuten touwtje springen?

22 Hoe bepaal je het zuurstofverbruik?

De uitkomst van de vorige opdracht kun je experimenteel controleren. Hoeveel extra lucht verbruikt je werkelijk tijdens vijf minuten touwtje springen (of een vergelijkbare inspanning)?

- a. Maak een plan voor het experimentele gedeelte. Hoe meet je de ingeademde lucht? Hoe meet je het verschil tussen het volume ingeademde lucht bij inspanning, vergeleken bij rust?
- b. Vergelijk samen de uitkomst van je meting met de uitkomst van vraag e uit de vorige opgave, en vergelijk je meetplan uit vraag a met dat van medeleerlingen.

23 Onderzoek: Ademhalingsvolume bij inspanning.

In deze opdracht ga je zelf een experimenteel onderzoek opzetten en uitvoeren. Het bestaat uit drie onderdelen:

- Bepalen van het ademhalingsvolume bij touwtje springen
- Bepalen van de ademfrequentie bij touwtje springen.
- Corrigeren voor het ademhalingsvolume in rust. Tijdens het touwtje springen wordt immers niet alle energie omgezet in de beenspieren. Ook in rust verbruikt je lichaam voortdurend energie.

Conclusies van het experiment.

Controleer na afronding van bovenstaand experimenteel onderzoek of het experimenteel bepaalde ademhalingsvolume in overeenstemming is met het volume dat je hebt uitgerekend in opdracht 21e.

Vaardigheden

Je kunt...

- een onderzoeksplan opstellen
- onderzoek doen
- kennis toepassen op nieuwe situaties
- problemen vereenvoudigen
- informatie zoeken en beoordelen
- meetinstrumenten ijken
- meetinstrumenten gebruiken
- meetgegevens verzamelen en verwerken
- een natuurkundige redenering opzetten
- een redelijke schatting maken

Samenvatting

Je hebt onderzocht wat de meest efficiënte manier is om te springen. Als je een andere natuurkundige meting wilt uitvoeren, kun je vergelijkbare stappen volgen:

- Formuleer een onderzoeksvraag, en bedenk wat je verwacht dat er uit zal komen (bijvoorbeeld: de optimale starthoek voor je knieën is 40° á 50°).
- Maak een schematische schets van het probleem.
- Breng in kaart welke factoren een rol spelen. Wat weet je over de onderlinge verbanden?
- Ga na welke grootheden je constant kunt houden.
- Doe een simpele, oriënterende meting.
- Maak een meetplan (hoe meet je, hoe sluit je apparatuur aan, hoe ijk je, hoe zorg je voor een betrouwbare meting, hoe noteer je de gegevens, wat is de taakverdeling).
- Doe een testmeting.
- Voer het experiment uit.
- Verwerk de gegevens in tabellen en grafieken.
- Trek conclusies en onderbouw deze met je meetresultaten.

Je hebt beredeneerd hoeveel energie een *warming up* kost, en hoeveel sportdrank en zuurstof je daarbij verbruikt. Als je natuurkundige kennis wilt toepassen op een ander probleem, kun je vergelijkbare stappen volgen:

- Bedenk wat je precies wilt weten.
- Maak een schematische schets van het probleem.
- Breng in kaart welke variabelen een rol spelen en wat je weet over de onderlinge verbanden.
- Vereenvoudig het probleem zo veel mogelijk. Je kunt bijvoorbeeld een simpele beweging voor de *warming up* kiezen. Ook kun je bepaalde grootheden constant houden (ga dan wel na of het probleem zo nog wel goed genoeg beschreven wordt).
- Zoek informatie over grootheden waar je niet van weet welke waarde ze hebben.
- Maak schattingen voor grootheden die je niet makkelijk kunt opzoeken.

Opgaven

§2.1

24 Spronghoogte en arbeid

In paragraaf 2.1 heb je de spronghoogte gemeten. Wie sprong het hoogst?

- Schat de massa van degene die de hoogste sprong maakte. Bereken hoeveel bewegingsenergie er in zwaarte-energie moet zijn omgezet voor een sprong van deze hoogte.
- Met welke snelheid kwam deze persoon van de grond dus los?
- Hoe groot was dan de gemiddelde versnelling tijdens de afzet?
- Je weet dat de netto verrichte arbeid per definitie gelijk is aan het verschil in bewegingsenergie. Hoeveel arbeid hebben de spieren geleverd?
- De kracht die de spieren tijdens de afzet leveren is niet constant. Bereken de gemiddelde kracht van de spieren.
- Bereken hoeveel arbeid de spieren hebben verricht. Klopt dit met je antwoord op vraag d?

§2.2

25 Tour de France

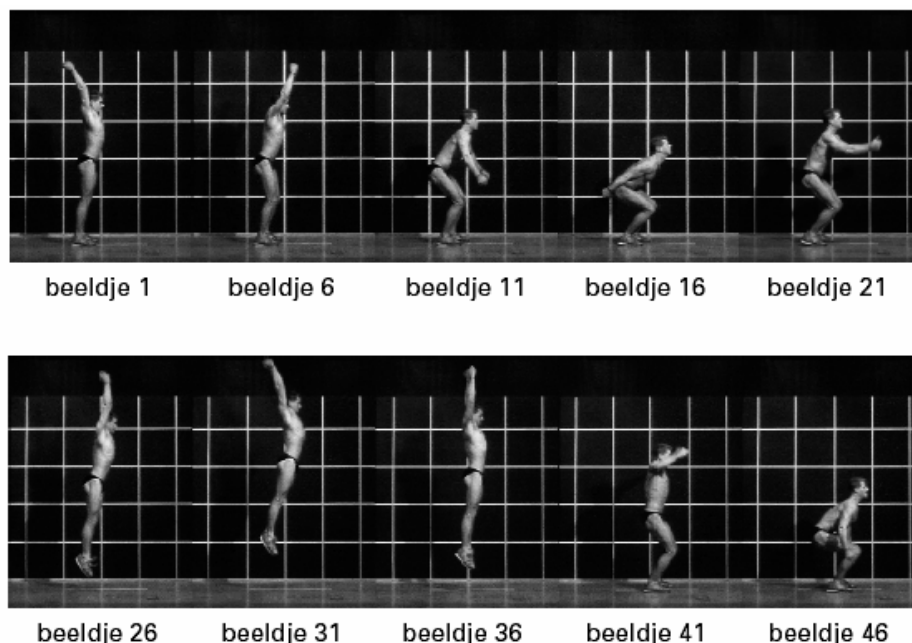
Kijk nog eens naar het redeneervoorbeeld over het energieverbruik bij touwtje springen. Beredeneer nu zelf hoe je het antwoord vindt op de vraag 'hoeveel glucose moet je innemen om tijdens de Tour de France precies de energie te leveren voor de beklimming van de Mont Ventoux'. De top van de Mont Ventoux ligt op 1912 meter hoogte. Het hoogteverschil met de voet van de berg bedraagt 1614 m. De lengte van de klim is 21 km.

- Bedenk welke natuurkundige begrippen met dit probleem te maken hebben.
- Welke schattingen zijn nodig om de benodigde energie te berekenen?
- Bereken de benodigde energie.

26 Eindexamentraining

Maak de onderstaande eindexamenopgave uit het Havo-eindexamen van 2004, eerste tijdvak. "Springen vanuit stand"

Bij basketbaltraining wordt geoefend om vanuit stand zo hoog mogelijk te springen. Van zo'n oefensprong is een opname gemaakt. De filmcamera maakte 25 beeldjes per seconde. In figuur 2.4 is een aantal beeldjes weergegeven.



Figuur 2.4

- a. Bereken de tijd tussen beeldje 1 en beeldje 6. Verwaarloos daarbij de belichtingstijd van elk beeldje.

Met behulp van de film is de hoogte van het zwaartepunt van de springer als functie van de tijd vastgelegd. Zie figuur 2.5.

Op beeldje 1 ($t = 0$ s) staat de springer rechtop, terwijl hij op beeldje 16 zo ver mogelijk door zijn knieën gezakt is. Zijn zwaartepunt bevindt zich dan in het laagste punt.

- b. Bepaal met behulp van figuur 2.5 hoever het zwaartepunt van de springer hierbij is gedaald.

Op het tijdstip $t = 0,90$ s komt de springer los van de grond.

- c. Bepaal met behulp van figuur 2.5 zo nauwkeurig mogelijk de snelheid op dat tijdstip.

Tijdens het afzetten voor de sprong verricht de springer arbeid. Deze arbeid is gelijk aan de toename van zijn zwaarte-energie tussen het laagste punt en het hoogste punt.

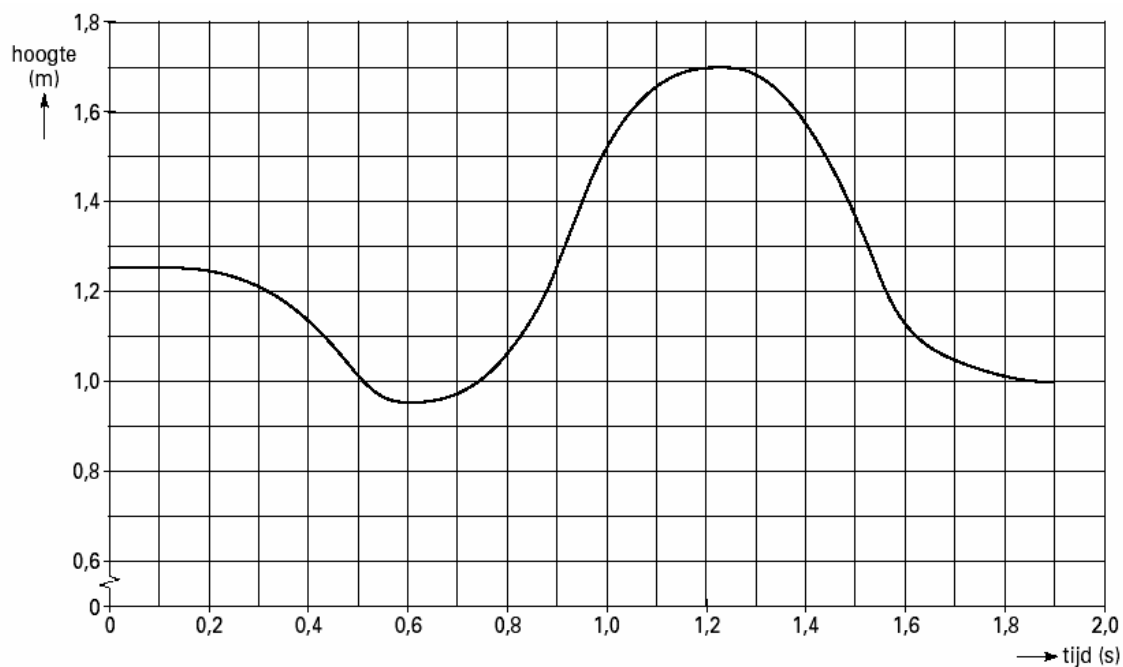
De springer heeft een massa van 76 kg.

Neem aan dat de afzet duurt van het tijdstip $t = 0,60$ s totdat hij loskomt van de grond.

- d. Bepaal met behulp van figuur 2.5 het gemiddelde vermogen van de springer tijdens de afzet. Geef de uitkomst in twee significante cijfers.

Om blessures te voorkomen, zakt een springer bij het neerkomen ver door zijn knieën.

- e. Leg uit waarom het verstandig is dat hij dan door zijn knieën zakt. Baseer je uitleg op de relatie $\Delta E_k = F \cdot s$
- f. Schets het v - t -diagram voor het zwaartepunt van de springer. Ga uit van figuur 2.5. (extra opgave; staat niet in de oorspronkelijke eindexamenopgave).



Figuur 2.5

3 Diagnose en therapie

Klachten behandelen en patiënten vooruit helpen

Hoofdstukvraag	Wat is het belang van natuurkunde voor medische beroepen?
----------------	---

Extra

Enkele (para)medische beroepen:

logopedist, gezondheidszorgtechnoloog, verpleegkundige, fysiotherapeut, mondhygiënist, longfunctieassistent, biometrist, hartfunctielaborant, diëtist, bewegingstechnoloog, audioloog, tandtechnicus, verloskundige, orthopedisch technoloog, ergotherapeut, vaatlaborant, farmakundige, oefentherapeut, anesthesiemedewerker, biochemisch analist, orthoptist, huidtherapeut, optometrist, laborant klinische neurofysiologie, MBRT'er (medisch beeldvormende en radiotherapeutisch technoloog), podotherapeut, ...

Medische beroepen gaan nadrukkelijk over het menselijk lichaam. Hetzelfde geldt voor paramedische beroepen. Paramedici verlenen zorg aan patiënten vanuit hun eigen deskundigheid, maar ze werken altijd samen met artsen. Hiernaast staat een lijst met voorbeelden van (para)medische beroepen.

Waarom moet je eigenlijk het vak natuurkunde in je pakket hebben voor bijvoorbeeld de opleiding fysiotherapie? We hebben in Hoofdstuk 1 en 2 van deze module al gezien dat begrippen als **versnelling**, **kracht** en **krachtmoment** een belangrijke rol spelen bij bijvoorbeeld hardlopen, springen, vallen, en dus ook bij blessures. Bij warmtebehandelingen met infraroodstraling gebruikt een fysiotherapeut onder andere de natuurkundige begrippen **frequentie**, **golflengte** en **temperatuur**.

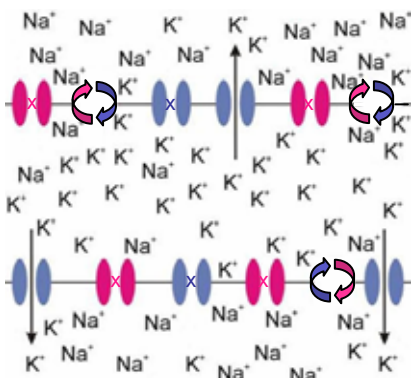
Ten slotte kun je ook denken aan voorbeelden als spierstimulatie met elektrodes, het meten van de huidweerstand en het meten van spiersamentrekkingen. Hierbij maakt een fysiotherapeut gebruik van begrippen als **elektrische stroomkring**, **voedingsapparaat**, en **spanningsmeter**.

Een fysiotherapeut die een diagnose stelt en vervolgens een behandeling uitvoert, maakt dus voortdurend gebruik van natuurkundige kennis. In de dagelijkse praktijk houdt de fysiotherapeut zich waarschijnlijk niet zo bewust met natuurkunde bezig, en dat is vaak ook niet nodig. Maar om goed te worden in het beroep moet je een basis aan natuurkundekennis hebben. Hetzelfde geldt voor de meeste medische en paramedische beroepen. Bij alle beroepen uit de lijst hiernaast wordt veel natuurkundekennis toegepast.

In dit hoofdstuk gaan we op een voorbeeld in. Je komt er achter hoe laboranten klinische neurofysiologie bij het uitoefenen van hun beroep gebruik maken van natuurkunde. In overleg met je leraar kun je ook op zo'n manier naar een ander beroep kijken.

Onderzoek door de laborant klinische neurofysiologie

Paragraafvraag	Hoe onderscheid je een spierziekte van een zenuwstoornis?
-----------------------	--



Figuur 3.1. Ionpomp en ionkanalen in de celwand.

Bij elke stap die je zet, sturen je hersenen je spieren aan, zonder dat je dat verder merkt. Je hersenen krijgen voortdurend informatie over de stand van je lichaam en bijvoorbeeld over de ondergrond waar je je voet op gaat zetten. Deze informatie komt vanuit de gevoelszenuwen in je voeten, knieën, beenspieren, vanuit je oogzenuwen, en vanuit je evenwichtsorgaan. In je hersenen komt al deze informatie samen. Vervolgens laten ze sommige spieren wat meer ontspannen, en andere juist wat meer aantrekken. Zo kan je bijvoorbeeld precies op tijd je ene voet afwikkelen terwijl je jezelf met je andere voet afzet.

Zoals je weet gaat de communicatie tussen je hersenen en andere delen van je lichaam via je zenuwen. Hoe komt zo'n signaal eigenlijk zo snel van je hoofd naar je voeten? Als dat bijvoorbeeld via transport van stoffen als hormonen zou gebeuren, moet je veel te lang wachten voordat er bijgestuurd wordt: dan zou je voortdurend vallen! Omdat je zenuwcellen de signalen *elektrisch* transporteren, kunnen je hersenen supersnel bijsturen. Zo zet je steeds trefzeker je voeten neer, terwijl je er niet eens bewust over hoeft na te denken.

Tekstvragen

In figuur 3.1 zijn de ionkanalen aangegeven met twee gekleurde ovals. In sommige ionkanalen staat een kruisje, in andere niet.

- Waarom is dat zo?

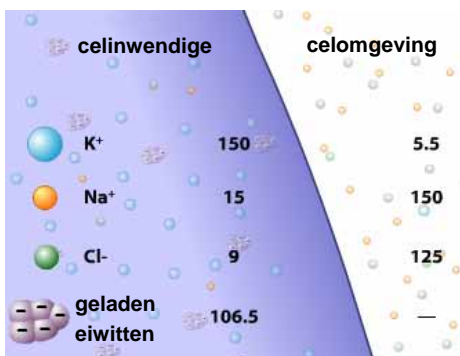
De gekleurde pijlen in figuur 3.1 stellen ionpompen voor. De kleur geeft telkens aan welk ion het betreft.

- Welke kleur staat voor natrium-, en welke voor kaliumionen?

Spanning

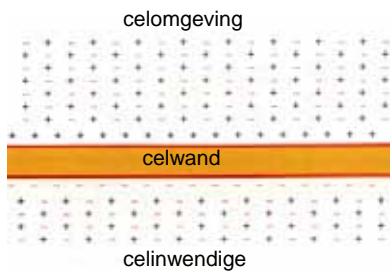
Levende cellen zorgen voortdurend dat er een elektrische spanning over hun celwand staat. Zenuwcellen gebruiken deze spanning om signalen door te geven. We gaan daarom kort in op de oorzaak van de elektrische spanning.

In de celwand van levende cellen zitten speciale ionkanalen en ionpompen, waarmee de concentratie van ionen als de positieve kalium- en natriumionen geregeld kan worden. Als de zenuwcel in rust is, zijn de ionkanalen gesloten. Maar de K^+ -kanaaltjes lekken, terwijl de Na^+ -kanaaltjes zo goed als niets doorlaten. Nu blijken ionpompen in de celwand voortdurend natriumionen de cel uit te pompen, en kaliumionen de cel in. Hierdoor is er in de cel een hogere kaliumconcentratie en een lagere natriumconcentratie dan in de celomgeving (zie figuur 3.1). Zodoende is de kans groter dat er kaliumionen door de K^+ -kanaaltjes naar buiten stromen, dan dat ze naar binnen stromen. Omdat de Na^+ -kanaaltjes nauwelijks doorlatend zijn, is er daarentegen geen noemenswaardig verschil in de hoeveelheid natriumionen die de cel in- of uitstromen. Figuur 3.2 geeft een overzicht van het verschil in concentratie binnen en buiten de cel.

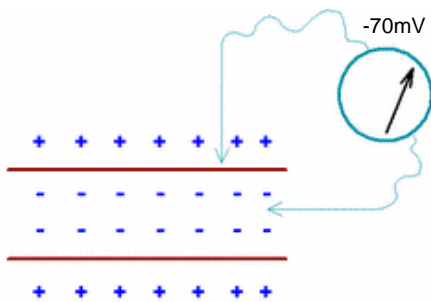


Figuur 3.2. Verschil in concentraties binnen en buiten de cel.

Er stromen netto dus steeds positief geladen ionen de cel uit. Dit leidt tot een tekort aan positieve lading vlak aan de binnenkant van de celwand, terwijl er aan de buitenkant van de celwand juist een overschot aan positieve lading ontstaat. Let op: het gaat hier om heel kleine, plaatselijke verschillen in lading vlakbij de celwand (zie figuur 3.3), de cel in z'n geheel blijft altijd neu-



Figuur 3.3. Verschil in ladingsverdeling vlakbij de celwand.



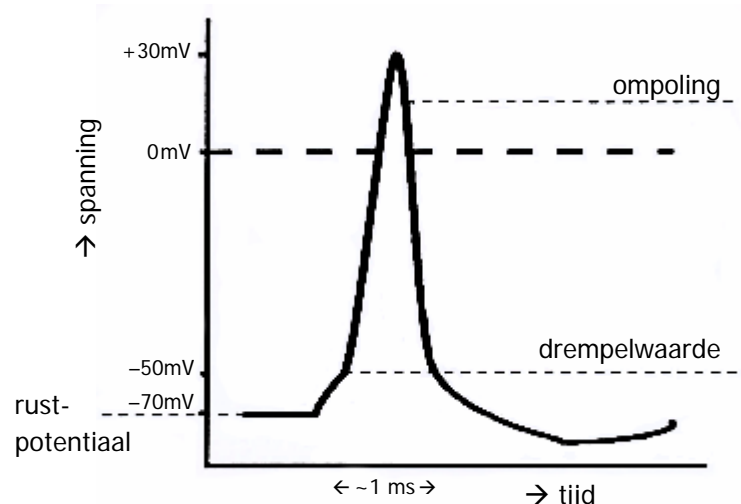
Figuur 3.4. De rustpotentiaal: een constante elektrische spanning over de celwand.

traal! Maar omdat de afstand tussen binnenkant en buitenkant van de celwand ontzettend klein is (zo'n 10 nm), valt de ongelijke ladingsverdeling te meten als een elektrische spanning. Als je tussen de binnenkant en buitenkant van de celwand een voltmeter zet, meet je een spanning van ongeveer -70 mV (zie figuur 3.4). Op zo'n manier kun je meten of een zenuwcel in rust is. Men noemt deze spanning dan ook de *rustpotentiaal*.

Prikkels

Alle levende cellen hebben een rustpotentiaal, maar bij zenuwcellen wordt de spanning over de celwand gebruikt voor het doorgeven van signalen (*prikkels*). Als een zenuw geprikkeld wordt, raakt de spanning over de zenuwcelwand plaatselijk verstoord (de spanning wordt bijvoorbeeld -60 mV in plaats van -70 mV). Nu blijkt de doorlaatbaarheid van de Na^+ -kanaaltjes sterk toe te nemen als de spanning minder negatief wordt. Er stromen dus plaatselijk meer natriumionen door de kanaaltjes de cel in, zodat de ladingsverdeling daar minder ongelijk wordt.

Als het nu gaat om een kleine prikkel, en dus om een kleine verstoring van de spanning, dan lukt het de cel om de spanning weer even groot te maken: de rustpotentiaal wordt hersteld.



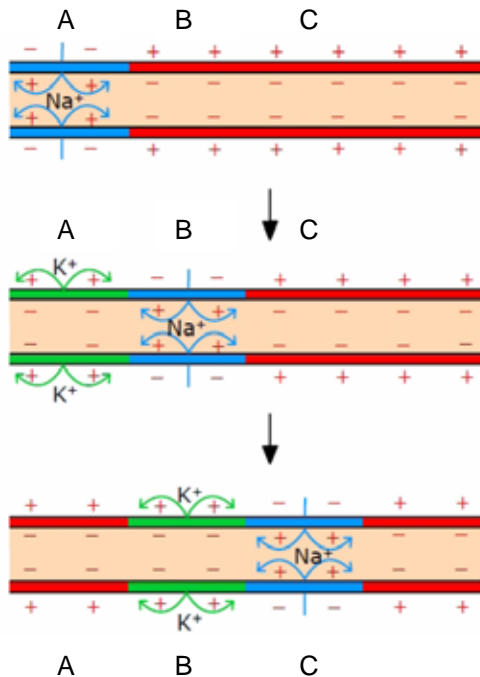
Figuur 3.5. Bij een prikkel verandert de spanning over de zenuwcelwand als functie van de tijd.

Maar als de prikkel zo sterk is, dat de spanning de drempelwaarde van ongeveer -50 mV bereikt, dan komt er een sneeuwbaaleffect op gang (een *alles-of-niets-reactie*). Er stromen plotseling zoveel natriumionen de cel in, dat de binnenkant van de celwand plaatselijk zelfs een overschot aan positieve lading krijgt ten opzichte van de buitenkant. Dit betekent dat de spanning positief wordt ($+30\text{ mV}$): de spanning is 'omgepoold'.

Ook de K^+ -kanalen gaan open als de spanning minder negatief wordt, maar dit gebeurt veel trager. Wanneer de kaliumionen eindelijk in groten getale de cel uit kunnen stromen, wordt de spanning weer negatief, om vervolgens zelfs even onder de rustpotentiaal te komen. De celwand bouwt nu weer de normale rustpotentiaal op, en is dan klaar om een volgende prikkel door te geven.

Kort samengevat, gebeurt er dus het volgende als een zenuwcel een sterke prikkel krijgt: de spanning over de celwand wordt kortstondig *omgepoold*

(van negatief naar positief). De grafiek in figuur 3.5 laat zien hoe de spanning over de celwand verandert op een plaats waar de zenuwcel geprikkeld wordt.



Figuur 3.6

Tekstvragen

- In het bovenste deel van figuur 3.6 gaan ionen langs de buitenkant van de celwand stromen (tussen A en B). Hoe moet je de voltmeter plaatsen om de spanning te meten? Maak een schets als in figuur 3.4.
- Loopt er door elektriciteitsdraden ook een ionenstroom? En in de accu van een auto?

De verdovende stof die tandartsen gebruiken, zorgt er voor dat de ionkanalen niet meer open kunnen. Hoewel de pijnzenuwen in de mond sterk worden geprikkeld, wordt de spanning over hun celwand niet omgepoold. De zenuwen blijven in rust, en geven de prikkels zodoende ook niet aan de hersenen door. Je wordt je dus niet bewust van de pijn.

Prikkeltransport

We hebben nu gezien hoe de spanning over de celwand plaatselijk wordt omgepoold als een zenuwcel geprikkeld wordt. Hoe wordt dit signaal nu doorgegeven naar het uiteinde van de zenuwcel?

Op het moment dat de celwand maximaal omgepoold is (top van de piek in figuur 3.5) zijn er een heleboel positieve natriumionen de cel ingestroomd. Aan de buitenkant van dit stuk celwand is er daardoor een tekort aan positieve lading ontstaan (zie figuur 3.6), en aan de binnenkant een overschot. De aangrenzende stukken celwand (B en C in figuur 3.6) zijn gewoon in rust. De lekkende K^+ -kanaaltjes veroorzaken hier dus voortdurend een kleine uitstroom van kaliumionen, zodat er hier aan de buitenkant een overschot aan positieve lading is, en aan de binnenkant een tekort. Dit betekent dat er een spanning is ontstaan tussen het omgepoelde stuk celwand (A) en de aangrenzende stukken (B en C).

Vanwege de spanning tussen de plaats van ompoling en het naburige stuk celwand, gaat er langs de celwand een ionenstroom lopen. Langs de buitenkant van de celwand stromen positieve ionen in de richting van het omgepoelde stuk A, omdat ze worden aangetrokken door het plaatselijke ladingsstekort. Langs de binnenkant van de celwand stromen positieve ionen juist weg van stuk A, omdat ze worden afgestoten door het plaatselijke ladingsoverschot. Ook bij de buitenkant van het naburige stuk celwand (B in figuur 3.6) stromen er dus positieve ionen weg, terwijl er aan de binnenkant een overschot aan positieve lading ontstaat. Omdat bij stuk B de ladingsverdeling tussen binnen- en buitenkant minder ongelijk wordt, zal de spanning minder negatief worden: de rustpotentiaal wordt verstoord.

Na een tijdje zullen er aan de buitenkant van stuk B zóveel positieve ionen zijn weggestroomd —en tegelijkertijd aan de binnenkant zóveel ionen zijn toegestroomd—, dat de spanning de drempelwaarde van -50mV bereikt. Dit betekent dat het sneeuwbaaleffect in gang wordt gezet. Dus vlak nadat het eerste stuk celwand (A) omgepoold werd, raakt ook het naburige stuk celwand (B) omgepoold. En dit leidt natuurlijk weer tot ompoling van het daaropvolgende stuk celwand (C).

Zo verplaatst het signaal zich als een omvallende rij dominostenen langs de celwand van de zenuwcel, tot het eind van de zenuwcel is bereikt. Gaat het bijvoorbeeld om een spierzenuw van je been, dan zorgt een prikkel aan het begin van de zenuw (in je ruggenmerg) ervoor dat één meter verderop de betreffende beenspieren gaan samentrekken.

Verschil met de dominostenen is, dat die blijven liggen, terwijl de celwand zich herstelt in zijn rustpotentiaal.

Tussentijdse samenvatting

Een prikkel is niets anders dan een plaatselijke verstoring van de spanning over de celwand van een zenuwcel. Als de spanning de drempelwaarde bereikt, zorgt een zichzelf versterkend proces (een sneeuwbaaleffect) voor ompoling van de spanning. Door deze ompoling gaat er een ionenstroom lopen, zodat ook de spanning over het naburige stukje celwand verstoord wordt. Zodra hier de drempelwaarde wordt bereikt, raakt ook dit naburige stuk celwand omgepoold.

Snel prikkeltransport

De snelheid waarmee signalen op de hierboven beschreven manier worden doorgegeven, ligt zo tussen de 1 m/s en 2 m/s. Hoe dikker een zenuwcel is, hoe sneller de signalen doorgegeven kunnen worden. Één van de oorzaken van de hogere transportsnelheid in dikkere zenuwcellen, is dat een dikkere zenuwcel relatief minder celwand heeft. Een dikkere zenuwcel heeft in verhouding dus ook minder lekkende ionkanalen, zodat er relatief minder ionen door de celwand wegstromen. Hieronder lees je hoe dit leidt tot een hogere transportsnelheid.

Als er stroom weglekt *door* de celwand, zal de ionenstroom *langs* de celwand kleiner worden. En het is de ionenstroom *langs* de celwand die bepaalt hoe snel de prikkel wordt doorgegeven naar het volgende stuk celwand. Want als er relatief veel van die stroom weglekt door de kanaaltjes in de celwand, duurt het langer voordat er aan de buitenkant van het naburige stuk celwand genoeg positieve ionen zijn weggestroomd, en aan de binnenkant genoeg positieve ionen zijn toegestroomd. Bij een zenuwcel met relatief veel ionkanalen duurt het dus langer voordat bij het naburige stuk celwand de drempelwaarde bereikt wordt. Bij een zenuwcel met relatief weinig ionkanalen duurt het dan juist korter voordat het naburige stuk celwand omgepoold wordt. Een dikke zenuwcel geeft signalen dus sneller door dan een dunne zenuwcel.

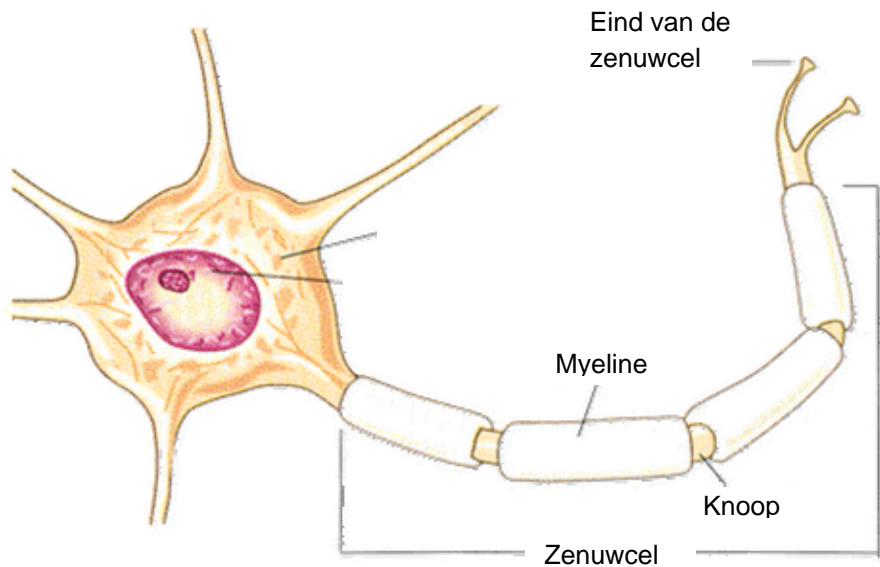
De verhoging van de transportsnelheid die wordt veroorzaakt doordat een dikke zenuw in verhouding minder celwand heeft, wordt nog versterkt door het effect dat de condensatorwerking van de celwand heeft. In deze module gaan we niet op deze tweede oorzaak van de hogere transportsnelheid in dikkere zenuwcellen. Maar het effect van de condensatorwerking is, dat er bij het naburige stuk veel minder lading hoeft weg te stromen om de drempelwaarde te bereiken. De drempelwaarde wordt zo dus eerder bereikt, zodat de prikkel sneller wordt doorgegeven.



Sommige zenuwcellen van pijlstaartinktvis hebben een diameter tot wel 1 mm. De transportsnelheid is in deze zenuwen ongeveer 20m/s in plaats van 2m/s. Maar om, in geval van gevaar bijvoorbeeld, snel genoeg te kunnen reageren, is een snelheid van 70 tot 120m/s nodig. Dit kan niet bereikt worden met al maar dikkere zenuwen. Als bijvoorbeeld onze oogzenuwen hun transportsnelheid uit de diameter hadden moeten halen, dan zou de oogzenuw 15 cm dik moeten zijn! In de grotere zenuwcellen van de oogzenuwen, de hersenen en het ruggenmerg is de transportsnelheid op een andere manier opgevoerd: het transport verloopt *sprongsgewijs*.

Sprongsgewijs prikkeltransport

Bij zenuwen die de signalen sprongsgewijs doorgeven, hoeft de spanning over de celwand alleen op bepaalde plaatsen worden omgepoold: bij de *knoepen*. Tussen de knopen is de celwand stevig omwikkeld met *myeline* (zie figuur 3.7). Op de stukken van de celwand die met myeline omwikkeld zijn, kunnen geen ionen de cel in of uit stromen. De celwand kan daardoor alleen maar omgepoold worden op plaatsen waar myeline ontbreekt: deze plaatsen noemt men de *knoepen*.



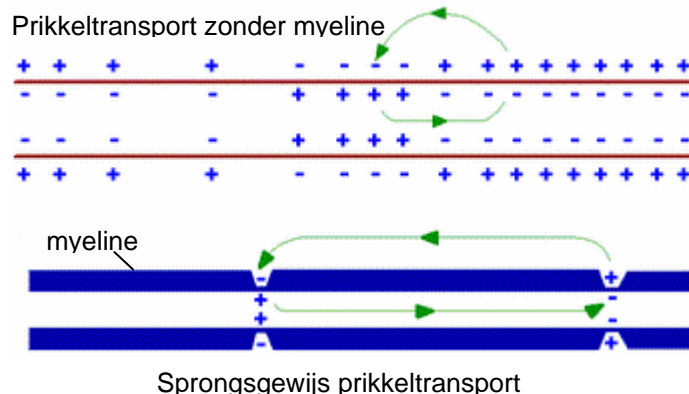
Figuur 3.7. Een zenuwcel die gedeeltelijk omwikkeld is met myeline.

Tekstvragen

Als een knoop omgepoold raakt, komen er ionenstromen langs de binnen- en buitenkant van de celwand op gang, die de rustpotentiaal van de naburige knoop verstoren.

- Moeten de positieve ionen aan de buitenkant van de celwand helemaal naar de naburige knoop toe stromen voordat de drempelwaarde bereikt wordt? Of is het genoeg als alle ionen een stuk opschuiven (vergelijkbaar met een lange buis gevuld met knikkers).
- Stromen elektronen vanaf de minpool van een batterij helemaal door de elektriciteitsdraden en de componenten naar de pluspool?

Door de laag myeline rond de zenuwcellen kan een prikkel snel van knoop tot knoop doorgegeven worden. Het doorgeven van een prikkel gaat op dezelfde manier als bij twee opeenvolgende stukken celwand van een zenuw zonder myeline (vergelijkbaar met figuur 3.6). Wanneer de eerste knoop omgepoold wordt, ontstaat er dus weer een tekort aan positieve ionen aan de buitenkant van de celwand. In de wijde omgeving van de knoop worden er nu positieve ionen aangetrokken richting de knoop (positieve lading wordt immers aangetrokken door een ladingstekort). Het omgekeerde geldt voor de binnenkant van de celwand: het ladingsoverschot bij de omgepoelde knoop laat ionen juist wegstromen. Het resultaat van beide ionenstromen is, dat de rustpotentiaal van de naburige knoop verstoord wordt. Zodra er daar zóveel ionen zijn toegestroomd en weggestroomd, dat de drempelwaarde van -50mV wordt bereikt, raakt ook deze knoop omgepoold. Zo springt de prikkel dus van knoop tot knoop.



Figuur 3.8. Vergelijking van de twee vormen van prikkeltransport.

Waarom kan de prikkel niet meteen vanaf het begin naar het eind van de zenuwcel springen? Het probleem is, dat de elektrische aantrekkingskracht snel zwakker wordt naarmate de afstand groter wordt. Hoe verder de tweede knoop van de eerste knoop vandaan zit, hoe minder sterk de positieve ionen bij de tweede knoop worden weggetrokken. Het duurt dan langer voordat er genoeg positieve ionen zijn weggestroomd om de drempelwaarde te bereiken. Als de knopen verder uit elkaar liggen, gaat het prikkeltransport dus langzamer. Zouden er nu alleen aan het begin en het eind van de zenuwcel knopen zitten, dan is de aantrekkingskracht zo zwak dat de drempelwaarde helemaal niet meer bereikt wordt. Er zouden dan geen prikkels worden doorgegeven, zelfs niet na lang wachten.

Als er te weinig knopen zijn, wordt het prikkeltransport langzamer, maar als er te veel knopen zijn, gaat het prikkeltransport meer lijken op hoe het in een zenuwcel zonder myeline gaat. Er bestaat dus een optimale afstand tussen de knopen waarbij prikkels het snelst worden doorgegeven. Deze afstand hangt af van de diameter van de zenuwcel. Onderzoekers hebben voor heel veel verschillende gemyelineerde zenuwcellen opgemeten wat de afstand tussen de knopen is. Deze bleek in de meeste gevallen dicht bij de optimale afstand te liggen.

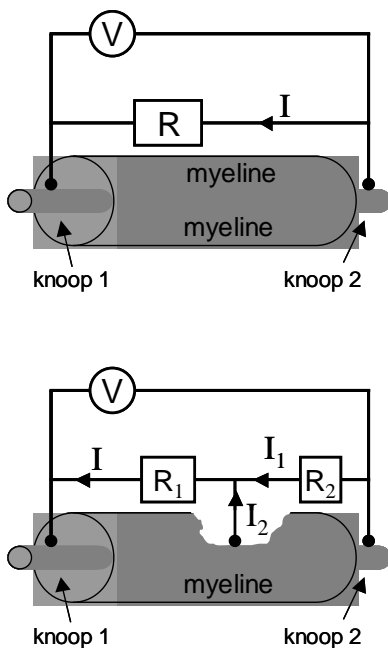
Beschadiging van de myelinelaag

Bij sommige ziektes raakt het myeline rond bepaalde zenuwcellen beschadigd. Op de beschadigde plaatsen worden de ionkanalen niet meer afgesloten, zodat er daar wel ionen door de celwand naar buiten stromen. Tussen de knopen in ontstaan er kleine kortsluitingen: er komen ionenstromen op gang door de celwand in plaats van langs de celwand. In figuur 3.9 staat een elektronisch model waarmee we de ionenstromen aan de buitenkant van de celwand kunnen beschrijven. Aan de binnenkant lopen vergelijkbare stromen, maar deze zijn voor de overzichtelijkheid even buiten beschouwing gelaten.

In figuur 3.9 vertegenwoordigen de weerstanden R , R_1 en R_2 het weefselvocht buiten de cel. Dit vocht is immers geen goede geleider, in tegenstelling tot bijvoorbeeld een koperdraadje. De stroom langs de celwand (I , I_1 en I_2) ondervindt dus weerstand. Maar hoe zit het met de stroom door de celwand? Op het moment van ompoling staan de ionkanalen wijd open. De weerstand die de stroom door de celwand ondervindt, kan dan worden verwaarloosd. Op andere tijdstippen, als de ionkanalen dicht zijn, is de weerstand juist heel groot. Omdat de doorlaatbaarheid van de ionkanalen verandert als de spanning verandert, gedragen ze zich elektronisch als een variabele weerstand. Maar in ons geval kunnen de ionkanalen simpelweg beschreven worden als schakelaars: ze staan open op het moment van ompoling, en dicht als de spanning van de celwand gelijk is aan de rustpotentialiaal.

Het onderste elektrische stroomschema van figuur 3.9 geeft een situatie weer waarbij een deel van de myeline beschadigd is. Door het myelineverlies lekt er stroom weg door de celwand. Er zijn daarom in het stroomschema drie stromen aangegeven: I , I_1 en I_2 . De stroom die ervoor moet zorgen dat de verstoring van de rustpotentialiaal bij de tweede knoop boven de drempelwaarde komt, is I_1 . Uit het stroomschema kun je afleiden dat: $I_1 = I - I_2$. Kortom: hoe groter lekstroom I_2 is, hoe kleiner I_1 wordt.

Als de myeline intact is, is de stroom die moet zorgen voor voldoende verstoring van de rustpotentialiaal bij de tweede knoop gewoon gelijk aan I (zie bovenste elektrisch stroomschema van figuur 3.9). Dus bij myelineverlies is de stroom bij de naburige knoop (I_1) kleiner, dan als de myeline intact is (I). Door het verlies van myeline, duurt het zodoende veel langer om de drempelwaarde te bereiken (kijk ook nog eens naar de redenering onder het kopje



Figuur 3.9. De ionenstroom tussen twee knopen in het geval van een intacte myelinelaag (boven) en bij myelineverlies (onder).

‘Snel prikkeltransport’). We concluderen dus, dat een beschadiging in de myelinelaag zal leiden tot een *lagere* transportsnelheid van de prikkels.

Myelineverlies kan er ook voor zorgen dat de coördinatie van de signalen verloren gaat. De myelinelaag rond de zenuwcellen is meestal niet overal even sterk aangetast. Prikkel die door verschillende spierzenuwcellen worden doorgegeven, komen dan niet tegelijkertijd bij de spiercellen aan, en dit leidt tot minder spierkracht.

Dat zit zo: wil je, bijvoorbeeld, je wijsvinger bewegen, dan moeten er heel veel spiercellen tegelijk samentrekken. Zoals je misschien weet, stuurt één zenuwcel maar een paar spiercellen aan, dus voor het aanspannen van de hele spier moet een heel stel zenuwcellen tegelijkertijd prikkels doorgeven. Is nu alleen in sommige zenuwcellen het myeline beschadigd, dan komen de prikkels in de beschadigde zenuwen later aan dan in de zenuwen waarbij het myeline intact is. In figuur 3.10 zie je, hoe gelijktijdige prikkels uit de pas gaan lopen als de prikkels niet even snel worden doorgegeven. Het gevolg is dat de spiercellen om de beurt samentrekken, in plaats van allemaal tegelijk. De kracht die je met je wijsvinger kunt uitoefenen, is zo een stuk kleiner.

De isolerende werking van de myelinelaag kan tenslotte zó slecht worden, dat de drempelwaarde helemaal niet meer bereikt wordt. De betreffende zenuwcel kan dan geen signalen meer doorgeven.

Stoornissen opsporen.

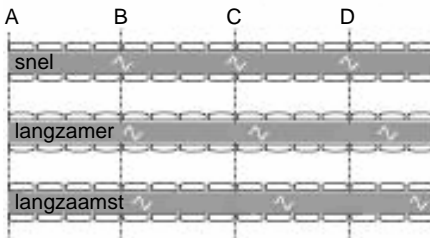
Als er iets mis is met het signaaltransport in een spierzenuw, dan merk je dat vooral doordat je spieren niet op de manier samentrekken of ontspannen zoals jij het bedoelt. Je spieren ‘willen niet meer’, en misschien verwijst je huisarts je daarom wel door naar een fysiotherapeut...

Als blijkt dat de oefeningen die je in opdracht van de fysiotherapeut doet, niet helpen, zal je uiteindelijk bij de ziekenhuisafdeling Klinische Neurofysiologie terecht komen. De laborant klinische neurofysiologie gaat je dan elektrisch doormeten, om te achterhalen of er nu iets mis is met de spiercellen, met de spierzenuw, of met zenuwen verderop in je lichaam (bijvoorbeeld met de zenuw tussen je ruggenmerg en je hersenen, of zelfs met zenuwen in je hersenen).

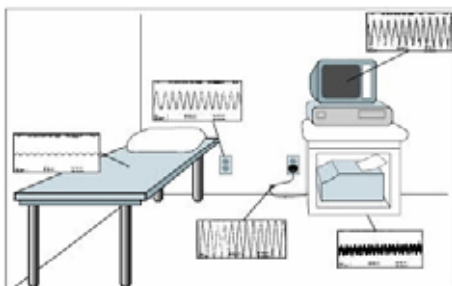
De twee belangrijkste onderzoeksmethoden die de laborant klinische neurofysiologie kan gebruiken om de stoornis te onderzoeken, zijn: (1) *elektromyografie* (EMG), waarbij de elektrische spanning in je spieren wordt gemeten, en (2) een *zenuwgeleidingsonderzoek*, waarbij wordt gemeten hoe snel een zenuwcel de prikkels doorgeeft. In plaats van de medische term ‘geleidingssnelheid’ hebben we tot nog toe de term ‘transportsnelheid’ gebruikt, om verwarring met het begrip ‘elektrische geleiding’ te voorkomen.

Elektromyografie (EMG)

De laborant klinische neurofysiologie kan de elektrische activiteit van spieren en zenuwen onderzoeken, door met een elektrode de spanning te meten. Op een oscilloscoop wordt het verloop van de spanning in de tijd weergegeven, en soms wordt dit ook met een microfoon hoorbaar gemaakt. Bij elektromyografie worden de spieren onderzocht (‘myo’ komt van het Griekse woord voor ‘spier’). Net als bij zenuwcellen, kan bij spiercellen de elektrische spanning over de celwand veranderen. Een piek in de spanning over een spiercelwand zorgt er namelijk voor dat de spiercel gaat samentrekken.



Figuur 3.10. Verschillen in transportsnelheid laten gelijktijdige prikkels uit de pas lopen.

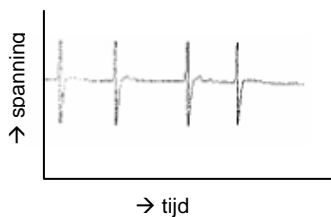


Figuur 3.11. Mogelijke stoorbronnen



Figuur 3.12. Concentrische naaldelektrode.

De binnenste naald meet de spanning van de spiercellen; de buitenkant van de holle naald meet de spanning van de omgeving.



Figuur 3.13. Pieken in de elektrische spieractiviteit (EMG).

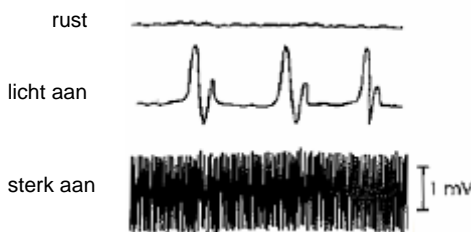
Het is niet altijd mogelijk om de elektrische activiteit van de spieren en die van de zenuwcellen uit elkaar te houden. Ook kost het overigens vaak veel moeite om ervoor te zorgen dat er geen storingen van andere elektrische apparaten in de metingen komen (zie figuur 3.11).

Soms meet de laborant de elektrische activiteit met elektrodes die op de huid worden geplakt. Maar om nauwkeuriger te kunnen meten, wordt vaak een elektrode in de vorm van een dunne naald in de spier geprikt. Meestal is dit een heel dun naaldje dat is verbonden met een elektriciteitsdraad. De buitenkant van het naaldje is elektrisch geïsoleerd, alleen het puntje van de naald is geleidend. Nu wordt de elektrische spanning van de spier altijd gemeten ten opzichte van een referentiepunt. Daarom plakt de laborant een tweede elektrode op de huid, zo dicht mogelijk bij de betreffende spier.

Om zo nauwkeurig mogelijk te meten, kan de laborant een concentrische naald gebruiken (zie figuur 3.12). Zo'n concentrische naald bestaat uit een holle naald, met daarin een tweede naaldje dat elektrisch geïsoleerd is. Dit binnenste naaldje meet de elektrische spanning van de spiercellen, terwijl de buitenkant van de holle naald in contact staat met de spieromgeving. Zo wordt alleen de elektrische activiteit van de spiercellen vlakbij de elektrode gemeten, en dus zo min mogelijk die van andere spieren of zenuwen.

De meetresultaten die de laborant op het beeld van de oscilloscoop krijgt, zien er typisch uit als figuur 3.13. Een grafiek als deze wordt ook wel een elektromyogram (EMG) genoemd. Op de y-as van het EMG staat altijd de spanning, en op de x-as staat de tijd (meestal staan de namen van de assen er niet bij). De pieken in het EMG geven aan dat de elektrische spanning van de spier verandert, wat betekent dat er spiercellen samentrekken.

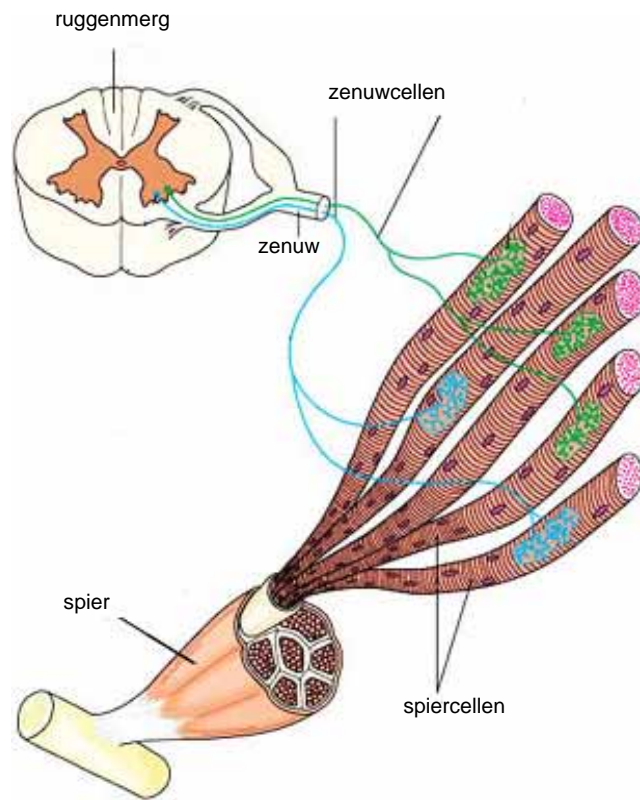
Bij het EMG-onderzoek wordt de elektrische spanning in de spieren gemeten voor drie verschillende situaties: (1) als de spier geheel ontspannen is, (2) met lichtjes aangespannen spieren, en (3) in sterk samengetrokken toestand. In Figuur 3.14 zie je de elektrische spanning die de laborant bij een gezond persoon zou meten.



Figuur 3.14. EMG bij een gezond persoon.

In ontspannen toestand (rust) zijn er geen pieken in de elektrische spanning van de spier te zien (bovenste EMG van figuur 3.14). Wanneer de persoon daarentegen de spier lichtjes aanspant, meet de laborant wel elektrische activiteit. Omdat bij lichte aanspanning de meeste spiercellen ontspannen blijven, komen de gemeten pieken van slechts enkele spiercellen.

Om te begrijpen waarom de laborant meer dan één piek in de spanning meet, moet je twee dingen weten. Ten eerste stuurt één zenuwcel meestal een heel stel spiercellen tegelijk aan: de zenuwcel eindigt vertakt (zie figuur 3.15). En ten tweede horen spiercellen die naast elkaar liggen meestal niet bij dezelfde zenuwcel.

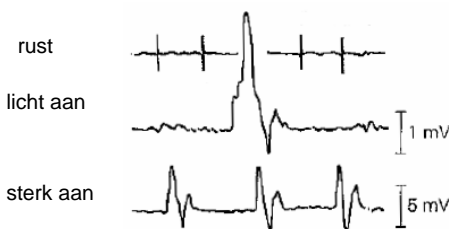


Figuur 3.15. Een zenuwcel stuurt meerdere spiercellen aan. Deze liggen meestal niet naast elkaar.

De spiercellen in de buurt van de elektrode worden dus door verschillende zenuwcellen aangestuurd. De signalen van die verschillende zenuwcellen komen natuurlijk niet exact tegelijkertijd aan. De bijbehorende groepjes spiercellen zijn dus om beurten elektrisch actief.

Je moet verder weten dat elke piek in het middelste EMG van figuur 3.14 het resultaat is van een paar spiercellen die door dezelfde zenuwcel worden aangestuurd. Zodra deze zenuwcel een signaal doorgeeft, vertonen alle bijbehorende spiercellen gelijktijdig een piek in de spanning. Elke piek in het middelste EMG van figuur 3.14 is dus de optelsom van de activiteit in een groepje spiercellen dat exact tegelijkertijd samentrekt.

Tenslotte gaan we in op het onderste EMG van figuur 3.14. Als een gezond persoon de spier sterk aanspant, gaan alle spiercellen samentrekken. De laborant meet dan een optelsom van zóveel pieken, dat ze niet langer afzonderlijk zichtbaar zijn. Het EMG ziet er zodoende uit als een verzameling verticale krassen.



Zenuwstoornis

Als door ziekte of beschadiging een bepaalde zenuwcel uitvalt, zullen de bijbehorende spiercellen niet langer samentrekken wanneer je hersenen daar opdracht toe geven. In zo'n geval kan het EMG er uit komen te zien als Figuur 3.16.

Figuur 3.16. EMG bij een zenuwstoornis.

We bekijken eerst de bovenste EMG, gemeten bij rust. Hoewel de hersenen in ontspannen toestand geen prikkels naar de spierzenuw sturen, vertoont

het EMG toch kleine pieken. Zodra het contact met de zenuw verloren raakt, ontstaat in de spiercel namelijk spontane activiteit. De medische term hiervoor is *fibrillatie*. Deze term doet je misschien denken aan de term 'hartfibrillatie'. Dit is een ritmestoornis van het hart, waarbij het heel snel klopt, maar toch geen bloed rondpompt. Deze stoornis wordt verder *niet* veroorzaakt door spontane activiteit van de hartspier, nadat het contact met de zenuwcellen is verloren.

Vervolgens bekijken we het middelste EMG bij een zenuwstoornis (figuur 3.16), waarbij de spier licht is aangespannen. De piek is duidelijk veel groter dan bij een gezonde persoon (middelste EMG in figuur 3.14). Om te begrijpen waarom het middelste EMG bij een zenuwstoornis zo hevig piekt, moet je weten hoe het lichaam reageert op het uitvallen van een zenuw.

Wanneer één of meer spierzenuwcellen ziek of beschadigd zijn, krijgen sommige spiercellen geen prikkels meer van de bijbehorende zenuwcel. In figuur 3.15 heb je al gezien dat deze werkloze spiercellen verspreid over de spierbundel liggen. Spiercellen die naast elkaar liggen horen immers meestal niet bij dezelfde zenuwcel. Nu de betreffende zenuwcel is uitgevallen, groeien er uit de nog gezonde zenuwcellen nieuwe uitlopers. Deze uitlopers groeien naar de uitgeschakelde spiercellen toe. Zo kunnen de meeste spiercellen op den duur toch weer meedoen, omdat de nog gezonde zenuwcellen meer spiercellen zijn gaan aansturen. Kort gezegd: in reactie op het uitvallen van zenuwcellen, gaan de overblijvende zenuwcellen meer spiercellen aansturen. Met deze kennis kunnen we het middelste en het onderste EMG uit figuur 3.16 verklaren.

Je wist al, dat bij een gezond persoon één zenuwcel meestal meer spiercellen tegelijkertijd aanstuurt. Maar bij een zenuwstoornis, stuurt de overgebleven zenuwcel dus *nóg* meer spiercellen aan. Omdat er een grotere groep spiercellen precies tegelijk samentrekt (ze worden immers precies op hetzelfde moment geprikkeld), tellen de afzonderlijke pieken op tot een veel hogere piek.

Tekstvragen

Bij sterk aanspannen van de spier, staat het EMG van een gezond persoon vol verticale krassen (zie figuur 3.14). Maar bij een zenuwstoornis meet de laborant slechts met tussenpozen een piek. Let op: vanwege de andere schaal van de grafiek zijn deze pieken ongeveer even hoog als de piek van het middelste EMG in figuur 3.16.

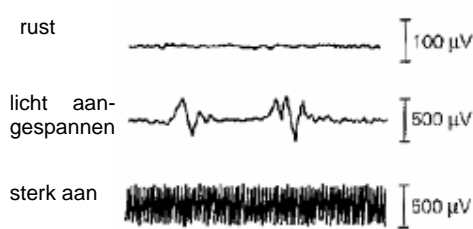
- Verklaar het verschil tussen de onderste EMGs in de figuren 3.14 en 3.16.
- Leg uit hoe het komt dat de pieken in het onderste EMG ongeveer even groot zijn als de piek in het middelste EMG.

Aangezien de meeste spiercellen ondanks de zenuwstoornis toch weer mee kunnen doen, zullen er evenveel spiercellen samentrekken als bij een gezond persoon. Dit betekent dat de totale oppervlakte onder de grafiek in het EMG ruwweg even groot moet zijn als bij een gezond persoon. Omdat de pieken bij een zenuwstoornis hoger zijn, valt er te verwachten dat het EMG minder pieken vertoont. Dit komt natuurlijk omdat er minder zenuwcellen zijn overgebleven. Als er minder zenuwcellen zijn die prikkels doorgeven, zal er ook minder spreiding in de aankomsttijd van de prikkels zitten. Het EMG bij een zenuwstoornis vertoont dus minder pieken, maar de pieken zijn hoger dan bij een gezond persoon.

Als de spier lichtjes wordt aangespannen zien we op het EMG bij een zenuwstoornis maar één piek (zie het middelste EMG in figuur 3.16). Bij deze mate van aanspanning worden de spiercellen die samentrekken kennelijk door maar één zenuwcel aangestuurd. Dit, terwijl bij lichte inspanning de spiercellen van een gezond persoon door drie verschillende zenuwcellen werden aangestuurd (zie het middelste EMG van figuur 3.14). Deze pieken zijn inderdaad lager dan de piek in het middelste EMG in figuur 3.16.

Spierstoornis

Als je merkt dat je spieren niet op de manier samentrekken zoals jij het bedoelt, hoeft het niet aan je zenuwen te liggen, het kan ook een spierstoornis zijn. Bij een spierstoornis krimpt een deel van de spiercellen, en ze kunnen niet meer samentrekken. Ze laten dan ook geen elektrische activiteit meer



Figuur 3.17.
EMG bij een spierstoornis.

Tekstvraag

Bij sterk aanspannen van de spier, staat het EMG van een gezond persoon vol verticale krassen (zie figuur 3.14). Bij een spierstoornis meet de laborant een vergelijkbaar patroon.

- Is er een verschil tussen de onderste EMGs in de figuren 3.14 en 3.17? Verklaar hoe dit komt.

zien. Hieronder gaan we bekijken welk effect dit heeft op het EMG dat de laborant bij een spierstoornis zal meten.

Figuur 3.17 is een EMG van een persoon met een spierstoornis. In rust is er, net als bij een gezond persoon, geen activiteit van de spiercellen. Maar als de spier wordt aangespannen is er wel verschil met het EMG van een gezond persoon. Kijk nog eens naar figuur 3.14 (EMG bij een gezond persoon). Wanneer een gezond persoon de spier licht aanspant, meet de laborant de activiteit van enkele groepjes spiercellen, die allemaal samentrekken. Elke piek is de som van gelijktijdige piekjes in spiercellen die door één en dezelfde zenuwcel worden aangestuurd. Bij een spierstoornis zal het EMG nog steeds het resultaat zijn van enkele groepjes spiercellen. Het *aantal* pieken zal dus niet afnemen.

Maar, als een zenuwcel een prikkel doorgeeft, zullen alleen de nog werkende spiercellen reageren met een piek in de spanning. De optelsom is dus een veel minder hoge piek, simpelweg omdat een groot deel van de spiercellen niets meer doet. Vandaar dat het EMG er bij een spierstoornis uit komt te zien als in figuur 3.17 (Let op: vanwege de andere schaal van de grafiek zijn deze pieken veel lager dan de pieken van het middelste EMG in figuur 3.14).

Je weet nu hoe een EMG duidelijk kan maken of je spier het niet meer goed doet vanwege een aandoening van de spiercellen, of vanwege een aandoening van de zenuwcellen.

Zenuwgeleidingsonderzoek

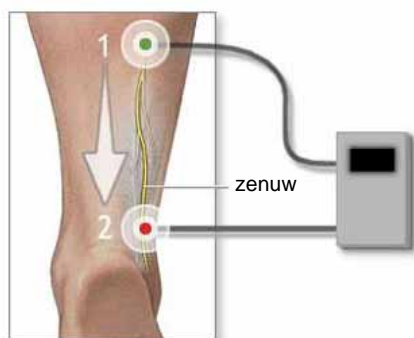
Stel: de diagnose luidt dat het om een zenuwstoornis gaat. Met een *zenuwgeleidingsonderzoek* kan de laborant nog uitzoeken wát er precies mis is met de zenuw. Heeft de stoornis te maken met een aandoening van de zenuwcel zelf, of komt het door myelineverlies? Zoals je weet, zal myelineverlies leiden tot een lagere transportsnelheid van de prikkels, en dit valt te meten.

Voor een zenuwgeleidingsonderzoek gebruikt de laborant klinische neurofysiologie meestal elektrodes die op de huid worden geplakt (zie figuur 3.18). Om een prikkel in de zenuwcellen op te wekken, laat de laborant plaatselijk een elektrische stroom lopen (bij de bovenste stip in figuur 3.18). De stroom verstoort de spanning over de celwand van zenuwcellen in de buurt van de elektrodes, zodat deze zenuwcellen een prikkel gaan doorgeven. De laborant meet vervolgens op welk tijdstip de prikkel een stuk verderop aan komt (bij de onderste stip in figuur 3.18).

Bij een zenuwgeleidingsonderzoek is het meetresultaat dus het aantal seconden tussen het moment waarop de zenuwcellen gestimuleerd worden, en het moment waarop de prikkel verderop gemeten wordt. Aangezien de laborant ook de afstand tussen de elektrodes nauwkeurig opmeet, kan uit deze afstand en het gemeten tijdsverschil de transportsnelheid berekend worden.

Om te bepalen of er sprake is van myelineverlies, wordt de gemeten transportsnelheid vergeleken met de gemiddelde waarde voor gezonde mensen die ongeveer even oud en ongeveer even lang zijn. Als de gemeten transportsnelheid nog maar half zo groot is als bij gezonde personen, zal er hoogstwaarschijnlijk sprake zijn van myelineverlies.

Door op verschillende plaatsen langs de zenuwbaan prikkels op te wekken, valt te achterhalen of de hele zenuw is aangetast, of slechts een deel ervan. Zo kan dus een behoorlijk precieze diagnose gesteld worden.



Figuur 3.18. Het meten van de transportsnelheid.

Vaardigheden

Je kunt:

- kennis in nieuwe situaties toepassen
- problemen vereenvoudigen
- modelleren en modellen evalueren
- elektronische berekeningen aan zenuwcellen uitvoeren

Samenvatting

Bij het deel over het onderzoek door de laborant klinische neurofysiologie heb je je kennis over de begrippen *elektrische stroom*, *weerstand* en *spanning* toegepast op de werking van zenuwcellen. Daarnaast heb je deze begrippen toegepast op metingen aan de elektrische activiteit van zenuwen en spieren (EMG en zenuwgeleidingsonderzoek).

De werking van zenuwcellen berust op veranderingen in de spanning over de celwand. In rust zorgt de cel voor een elektrische spanning door een combinatie van ionpompen en ionkanaaltjes met een verschillende doorlaatbaarheid: de 'rustpotentiaal'. Een prikkel is niets anders dan de verstoring van deze rustpotentiaal. Als de prikkel boven de drempelwaarde uitkomt, raakt de celwand omgepoold. De prikkel wordt vervolgens doorgegeven naar het naburige stuk celwand, doordat er zowel langs de binnenkant als langs de buitenkant van de celwand ionenstromen op gang komen.

De prikkels kunnen veel sneller worden doorgegeven in zenuwcellen die gedeeltelijk omwikkeld zijn met myeline. Alleen op de plaatsen waar geen myeline zit, de zogenaamde 'knopen', kan de spanning over de celwand omgepoold worden. Als een knoop omgepoold raakt, komen er ionenstromen langs de celwand op gang. Zodoende wordt ook de rustpotentiaal van de naburige knoop verstoord. Deze snellere vorm van prikkeltransport verloopt dus 'sprongsgewijs'.

Als de myeline beschadigd raakt, ontstaan er lekstromen die het prikkeltransport langzamer maken. Dit kan de laborant klinische neurofysiologie meten in een zenuwgeleidingsonderzoek. Een tweede onderzoek dat de laborant standaard uitvoert, is elektromyografie (EMG). Tijdens een EMG wordt de elektrische spanning in een spier gemeten voor drie situaties: rust, licht aanspannen van de spier, en sterk aanspannen van de spier. Via een EMG kan achterhaald worden of er sprake is van een spierstoornis, of van een zenuwstoornis.

Om een probleem natuurkundig te beschrijven, moet je bijna altijd vereenvoudigingen aanbrengen. Je maakt dan een model van de werkelijkheid. Bij het beschrijven van zenuwcellen heb je twee verschillende modellen gebruikt. Het eerste model was een elektronisch model, dat verklaart waarom myelineverlies tot langzamer prikkeltransport leidt (zie figuur 3.9). De vloeistof langs de zenuwcelwand werd beschreven als een elektriciteitsdraad met een weerstand. De ionkanalen in de stukken celwand zonder myeline daarentegen, werden beschreven als een schakelaar (preciezer: als een variabele weerstand, waarbij de weerstand op het betreffende tijdstip verwaarloosbaar klein is).

Het tweede model is een wiskundig model waarmee je de oppervlakte en de inhoud van een zenuwcel kunt berekenen. Met dit model kan je aantonen dat dikkere zenuwcellen in verhouding meer celwand hebben ten opzichte van hun inhoud (zie opgave 31). In het model is de cel een lange cilinder met een constante diameter, terwijl echte zenuwcellen kronkels hebben, en niet overal even dik zijn. Ook in de figuren 3.3, 3.4, en 3.6 is de zenuwcel voorgesteld als een cilinder met een constante diameter.

Samenvatting (vervolg)

Deze twee modellen van de zenuwcel verschillen sterk van elkaar omdat ze heel andere eigenschappen van de cel beschrijven. In de twee modellen zijn daarom ook heel andere eigenschappen van de zenuwcel vereenvoudigd. Zo heb je in het elektronische model de weerstand van de ionkanalen verwaarloosd, en de condensatorwerking van de celwand buiten beschouwing gelaten. En in het wiskundige model heb je de grillige vorm van een zenuwcel verwaarloosd. Door de cel als een cilinder te beschrijven, heb je immers alleen meegenomen dat de lengte van een zenuwcel veel groter is dan de diameter.

Welke vereenvoudigingen je het beste kunt maken, hangt dus af van wat je precies wilt beschrijven. Als je veel vereenvoudigt, wordt je uitkomst minder betrouwbaar. Je kunt je model vervolgens verbeteren door rekening te houden met factoren die toch belangrijk blijken.

Opgaven

27 Spanning rond het celmembraan

Vul de onderstaande tabel in. Hiermee test je je kennis van de verandering in de spanning over de celwand bij een prikkel (de eerste drie bladzijden van deze paragraaf).



	Na/K-pomp (pompt Na ⁺ de cel uit, en K ⁺ de cel in)	Na ⁺ kanalen open/ dicht	K ⁺ kanalen open/ dicht	Ionen- beweging	Spanning over de celwand	Vergelijking met een rij domino- stenen:
rust	actief	...(a)...	lekken een beetje	...(b)...	-70 mV	Steen staat overeind.
Kleine prikkel	actief	beetje open	...(c)...	...(d)...	...(e)...	Steen wankelt, maar blijft overeind
Sterke prikkel	actief	...(f)...	dicht	...(g)...	> -50 mV	Steen valt om...
Kort na sterke prikkel	actief	dicht	...(h)...	K ⁺ naar binnen	...(i)...	...en stuitert even.
Opbouwen rustpotentiaal	actief	...(j)...	lekken een beetje	...(k)...	-70 mV	Steen wordt weer overeind gezet.



28 Prikkeltransport in stappen

De tabel van de vorige opgave gaat over de verschillende fasen die bij het ompolen van een stuk celwand optreden. In de vergelijking met een rij dominostenen, is het stuk celwand maar één dominosteentje. Als we de vergelijking doortrekken, gaat deze opgave erover hoe dit dominosteentje tegen het volgende steentje valt.

- Welke waarde heeft de spanning over een geprikkeld stuk zenuwcelwand als deze prikkel wordt doorgegeven naar een naburig stuk celwand?
- Leg uit waarom er een ionenstroom op gang komt *langs* de celwand.
- Leg uit hoe de prikkel naar het naburige stuk celwand wordt doorgegeven.
- Is het nodig dat de spanning over de celwand positief wordt, om de ionenstroom langs de celwand op gang te brengen?
- Bekijk nog eens de figuren 3.6 en 3.9. Maak nu ook de tweede tabel af.

	Een stuk celwand dat wordt omgepoold	Het naburig stuk celwand
Stap 1	Spanning bereikt drempelwaarde	Rustpotentiaal
Stap 2	Er stromen ..(a).. + ionen de cel in; spanning schiet omhoog van -50 mV tot +30 mV.	Aan de ...(b)... kant van de celwand worden positieve ionen aangetrokken door het omgepoelde stuk celwand. Aan de binnenkant van de celwand worden positieve ionen(c)..... door het omgepoelde stuk celwand.
Stap 3	Er stromen K ⁺ ionen de cel ..(d).. ; de spanning daalt weer.	Vlak aan de buitenkant van de celwand is een ladings ...(e)... ontstaan, vlak aan de binnenkant is er juist een ladings ...(f)... Dus de spanning over de celwand(g).....
Stap 4	Herstel van de spanning tot een waarde van ..(h).. mV.	Er stromen Na ⁺ ionen de cel ..(i).. ; de spanning(j).....
Stap 5	Rustpotentiaal	Er stromen ..(k).. ionen de cel ..(l).. ; de spanning(m).....

29 Sprongsgewijs doorgeven van prikkels

Het doorgeven van een prikkel aan een ander stuk celwand duurt enkele milliseconden. Dit komt omdat er een aantal stappen moet worden doorlopen (zie vorige opgave). In deze opgave bekijken we waarom de prikkel niet in één sprong (van het begin van de zenuwcel naar het einde) kan worden doorgegeven. Waarom is de zenuwcel niet overal omwikkeld met myeline, met alleen een knoop aan het begin en een knoop aan einde?

- Leg uit wat het verschil is tussen een stuk celwand in een knoop, en een stuk celwand in een deel waar de zenuwcel is omwikkeld met myeline. Vertel hoe de spanning over beide stukken celwand verloopt, als er een prikkel wordt doorgegeven.
- Welke deelstap van het prikkeltransport verloopt trager wanneer er geen myeline om de zenuwcel zit?
- Welke deelstap van het prikkeltransport verloopt trager, wanneer heel lange stukken celwand zijn omwikkeld met myeline?
- Waarom is de zenuwcel niet overal omwikkeld met myeline, met alleen een knoop aan het begin en een knoop aan einde?

30 Hoe loopt de elektrische stroomkring?

Als er ionen uit een zenuwcel lekken, loopt er een elektrische stroom. In deze opgave maak je een stroomschema van een zenuwcel zonder myeline, in het geval dat de cel in rust is. Je mag alle elektronische componenten die je kent gebruiken in het stroomschema (denk hierbij aan componenten als een batterij, voltmeter, variabele weerstand, elektrische stroomdraad, enzovoorts).

- Leg uit waarom je het concentratieverschil tussen de binnen- en buitenkant van de cel kunt voorstellen als een batterij. Zit de pluspool van deze 'batterij' aan de buienkant van de celwand, of aan de binnenkant? Verklaar je antwoord.
- Met welke elektronische component kan je de lekkende K^+ -kanaaltjes beschrijven?
- Maak nu een stroomschema voor een stuk celwand met een ionpomp, en drie K^+ -kanaaltjes.

Stel dat de geleidbaarheid van elk kanaaltje 1 nS is (dus $G = 1 \cdot 10^{-9} \text{ S}$).

- Kan je de drie K^+ -kanaaltjes beschrijven met een vervangingsweerstand? Zo ja, hoe groot is de weerstand? Verklaar je antwoord.
- Bereken de grootte van de ionenstroom.

31 Waarom heeft een dikke cel relatief weinig celwand?

Lees nog eens de alinea onder het kopje 'Snel prikkeltransport'. Een dikke zenuwcel geeft prikkels sneller door omdat dikke cellen in verhouding minder celwand hebben dan dunne cellen. Er kunnen daardoor in verhouding minder ionen door de celwand weglekken.

In deze opgave ga je na dat de verhouding tussen de oppervlakte en de inhoud van een cilinder kleiner is, als de diameter groter is. Let op: het is niet zo dat de hele celinhoud geladen wordt! We laten hier alleen zien dat een dikke cel relatief weinig celwand heeft. We bekijken eerst een zenuwcel met een diameter van $2 \mu\text{m}$, en een lengte van 10 cm . Omdat een zenuwcel grillig van vorm kan zijn, kun je het best een vereenvoudiging aanbrenge.

- Leg uit dat een cilinder een geschikt model voor een zenuwcel is.
- Bereken de oppervlakte van een cilinder met een diameter van $2 \mu\text{m}$, en een lengte van 10 cm .
- Bereken de inhoud van een cilinder met een diameter van $2 \mu\text{m}$, en een lengte van 10 cm .
- Bereken de verhouding tussen de oppervlakte en de inhoud van een zenuwcel met een diameter van $2 \mu\text{m}$, en een lengte van 10 cm .
- Bereken nu de verhouding tussen de oppervlakte en de inhoud van een even lange, maar honderd keer zo dikke zenuwcel.
- Vergelijk de waarden bij (d) en (e) van deze opgave. Is voor een dikkere zenuwcel de verhouding tussen de oppervlakte en de inhoud groter of kleiner?

Je hebt gezien dat de oppervlakte evenredig is met de diameter in het kwadraat, terwijl de inhoud evenredig is met de diameter tot de derde.

- Bereken de verhouding tussen de oppervlakte en de inhoud van een zenuwcel met een diameter van $d \text{ m}$, en een lengte van $l \text{ m}$.

32 Spanning meten

Als laborant klinische neurofysiologie kan je de elektrische activiteit van spieren en zenuwen onderzoeken, door met een elektrode de spanning te meten. Je wilt het liefst de spanning van één spier of zenuw meten, en daarbij zo min mogelijk storingen oppikken van omringende zenuwen of spieren.

Hint bij b)

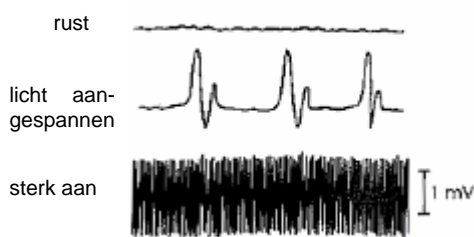
Voor het berekenen van de oppervlakte van een cilinder: knip (in gedachten) een papieren cilinder in de lengte open, en vouw hem plat. Je krijgt nu een rechthoek die even lang is als de cilinder: 10 cm .

- Wat is de breedte van deze rechthoek, die vóór het openknippen dus een cilinder met een diameter van 2 mm , en een lengte van 10 cm was?

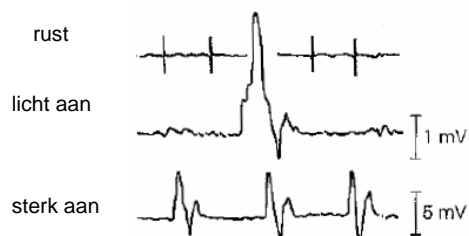
- a. Hoe ziet een elektrode eruit die zonder verstoringen de spanning van een zenuw of spier kan meten?

Als je met zo'n elektrode een EMG maakt, kunnen daar verschillende pieken op staan. Omdat er geen storingen van omringende zenuwen of spieren in het EMG zitten, weet je dat deze pieken van cellen uit één en dezelfde spierbundel afkomstig zijn.

- b. Kies uit: op welke manier zijn zenuwcellen van gezonde mensen verbonden met spiercellen?
- Iedere spiercel is verbonden met één zenuwcel.
 - Eén zenuwcel is verbonden met een stel spiercellen die allemaal tegen elkaar aan liggen.
 - Eén zenuwcel is verbonden met een stel spiercellen die verspreid over de spier liggen.
 - Iedere spiercel is verbonden met een stel zenuwcellen die allemaal tegen elkaar aan liggen.
- c. Kan één piek op het EMG ook het gevolg zijn van meer dan één spiercel?
- d. Hoe zou jij een patiënt uitleggen wat het verschil is tussen de spierspanning en de spanning die de elektrode meet?



EMG bij een gezond persoon



EMG bij een zenuwstoornis

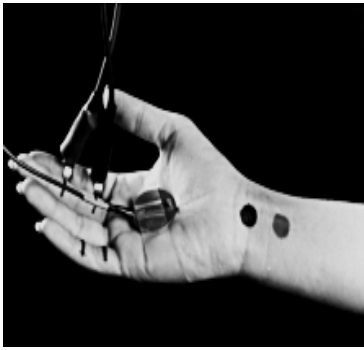
33 Verschillen in het EMG.

Bekijk het EMG van een gezonde persoon (zie de figuur bij deze opgave).

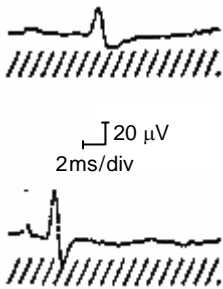
- a. In het middelste EMG staan afzonderlijke pieken, terwijl in het onderste EMG geen afzonderlijke pieken te onderscheiden zijn. Hieronder staan twee mogelijke verklaringen voor dit verschil. Kies de juiste verklaring, en geef een uitleg bij je antwoord.
- Bij sterk aanspannen van de spier doen zoveel spiercellen in de omgeving van de elektrode mee, dat de afzonderlijke pieken niet meer zichtbaar zijn.
 - Bij sterk aanspannen van de spier geven zoveel zenuwcellen in de omgeving van de elektrode prikkels door, dat de afzonderlijke pieken niet meer zichtbaar zijn.

Het EMG bij een zenuwstoornis is duidelijk anders (zie de tweede figuur bij deze opgave). Maar het oppervlak onder de grafiek is ongeveer even groot als bij een gezonde persoon. Dit geldt zowel bij een licht aangespannen spier als bij een sterk aangespannen spier.

- b. Leg uit hoe de verbinding tussen spiercellen en zenuwcellen deze verschillen en overeenkomsten kan verklaren (kijk ook even naar je antwoord bij opgave 32.b).



Zenuwgeleidingsonderzoek



Verloop van de gemeten spanning in de tijd.

Onder: op de plaats van stimulatie.

Boven: 13 cm van de plaats van stimulatie.

34 Transportsnelheid bepalen uit de meetgegevens

Als laborant klinische neurofysiologie voer je een zenuwgeleidingsonderzoek uit, als je wilt meten hoe snel een bepaalde zenuw prikkels doorgeeft. Hiernaast zie je een foto van een hand, met elektrodes op de huid. Met deze elektrodes wordt het zenuwonderzoek uitgevoerd. De eerste set elektrodes prikkelde de te onderzoeken zenuw met een elektrische stroom. De tweede set elektrodes meet de activiteit van deze zenuw 13 cm verderop.

Bovendien staan er hiernaast twee grafieken met de spanning die de elektrodes als functie van de tijd hebben geregistreerd. Onder staat de spanning op de plaats van stimulatie, en boven de spanning 13 cm verderop. De grafieken staan precies zó onder elkaar, dat een verticale lijn (door beide curven) altijd overeenkomt met één en hetzelfde tijdstip. De tijd-as is verdeeld in stukjes van 2 ms (de aanduiding 'div' staat voor *division*). Doordat deze verdeling met schuine streepjes is aangegeven, kun je elk willekeurig punt als nulpunt voor de tijd-as kiezen (je kunt op elk punt beginnen met aflezen). Dit doe je door eerst een verticale lijn te trekken op het punt dat je als nulpunt wilt nemen (bijvoorbeeld op de eerste piek). Vervolgens kijk je waar deze verticale lijn een schuin streepje snijdt. Door dit snijpunt trek je nu een horizontale lijn. Elk snijpunt van deze horizontale lijn met een volgend schuin streepje, betekent dat er 2 ms bij komt (of dat er 2 ms af gaat, als je tijdstippen links van de verticale lijn afleest).

- Wat betekent de aanduiding '20 μV '?
- En wat is volgens jou de betekenis van dit symbool: \lrcorner ?
- Bepaal het aantal milliseconden tussen het moment waarop de zenuwcellen gestimuleerd worden, en het moment dat de prikkel aankomt bij de tweede set elektrodes, 13 cm verderop.
- Bereken de transportsnelheid waarmee de prikkel wordt doorgegeven.

De waarde die je zojuist berekend hebt, is meestal niet de werkelijke transportsnelheid. Zenuwcellen lopen namelijk meestal in kronkels door je ledematen. De afstand die de prikkel aflegt is dus groter dan de afstand tussen de elektrodes.

- Is de werkelijke transportsnelheid groter of kleiner dan de berekende waarde? Verklaar je antwoord.