

Blue Energy

Zonne-energie uit water



centre of excellence for sustainable water technology



Gecertificeerde NLT module voor vwo



Colofon



De module Blue Energy: zonne-energie uit water is bestemd voor de lessen Natuur, Leven en Technologie (NLT). De module is op 3 februari 2010 gecertificeerd door de Stuurgroep NLT voor gebruik op het vwo in domein G, (Duurzaam) gebruik van grondstoffen, energie en ruimte. Het certificeringsnummer van de module is 3120-051-VG.

De originele gecertificeerde module is in pdf-formaat downloadbaar via [▶ http://www.betavak-nlt.nl](http://www.betavak-nlt.nl). Op deze website staat uitgelegd welke aanpassingen docenten aan de module mogen maken, voor gebruik in de les, zonder daardoor de certificering teniet te doen.

De module is gemaakt in opdracht van het Landelijk Ontwikkelpunt NLT. Deze module is ontwikkeld door

- Piter Jelles Gymnasium, Leeuwarden, Dhr. H. Zijlstra.
- RSG Trompmeester, Steenwijk, Mw. E.H.M. Eijkholt.
- Wetsus, Leeuwarden, Dhr. J.W. Post, Dhr. J. Veerman, Mw. C. van Oers, Dhr. J.G. van Dalfsen.

Aangepaste versies van deze module mogen alleen verspreid worden, indien in dit colofon vermeld wordt dat het een aangepaste versie betreft, onder vermelding van de naam van de auteur van de wijzigingen.

Materialen die leerlingen nodig hebben bij deze module zijn beschikbaar via het vaklokaal NLT: [▶ http://www.vaklokaal-nlt.nl/](http://www.vaklokaal-nlt.nl/)

© 2009. Versie 1.0

Het auteursrecht op de module berust bij Stichting Leerplan Ontwikkeling (SLO). SLO is derhalve de rechthebbende zoals bedoeld in de hieronder vermelde creative commons licentie.

De auteurs hebben bij de ontwikkeling van de module gebruik gemaakt van materiaal van derden en daarvoor toestemming verkregen. Bij het achterhalen en voldoen van de rechten op teksten, illustraties, enz. is de grootst mogelijke zorgvuldigheid betracht. Mochten er desondanks personen of instanties zijn die rechten menen te kunnen doen gelden op tekstgedeeltes, illustraties, enz. van een module, dan worden zij verzocht zich in verbinding te stellen met SLO.

De module is met zorg samengesteld en getest. Landelijk Ontwikkelpunt NLT, Stuurgroep NLT, SLO en auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de module. Ook aanvaarden Landelijk Ontwikkelpunt NLT, Stuurgroep NLT, SLO en auteurs geen enkele aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit (het gebruik van) deze module. Voor deze module geldt een Creative Commons Naamsvermelding-Niet-commercieel-Gelijk delen 3.0 Nederland Licentie [▶ http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/nl](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/nl)



Opmaak: Cumpinent.nl



Inhoudsopgave

| | |
|--|----|
| Colofon | 3 |
| Inhoudsopgave | 4 |
| 1 Inleiding | 5 |
| 1.1 Wat weet je aan het eind? | 7 |
| 1.2 Hoe werk je deze module door? | 7 |
| 1.3 Hoe word je beoordeeld? | 8 |
| 2 Startopdracht: wat is jouw voetafdruk? | 9 |
| 3 Klimaatproblematiek en duurzame energie | 11 |
| 3.1 Het broeikaseffect | 12 |
| 3.2 Duurzame energie in Nederland | 14 |
| 3.3 De hydrologische kringloop en Blue Energy | 21 |
| 3.4 De locatie van een centrale van Blue Energy | 22 |
| 4 Wat is Blue Energy eigenlijk? | 25 |
| 4.1 Enthalpie | 26 |
| 4.2 Entropie | 30 |
| 4.3 Toepassing van de twee regels | 33 |
| 4.4 Modellen voor Blue Energy | 37 |
| 5 Hoe zetten we Blue Energy om in elektriciteit? | 43 |
| 5.1 Vier productietechnieken | 44 |
| 5.2 Directe elektriciteitsproductie met RED | 47 |
| 6 Hoeveel vermogen kunnen we maken? | 59 |
| 6.1 Elektrisch circuit | 60 |
| 6.2 Inwendige weerstand van RED | 62 |
| 7 Onderzoek, ontwikkeling en ontwerp is teamwerk | 67 |
| 8 Eindopdracht | 77 |
| Bronvermelding | 80 |
| Bijlage 1 URL-lijst | 80 |
| Bijlage 2 Figuurlijst | 82 |



www.1000.com

1000

1

De oplossing voor het milieuvriendelijk opwekken van energie is mogelijk dichterbij dan we denken. De traditionele manieren van duurzame energie opwekken zijn algemeen bekend: getijde-, zonne- en windenergie. Minder bekend is dat bij het mengen van zoet rivierwater en zout zeewater enorm veel energie vrijkomt. De hiervoor noodzakelijke technologie is volop in ontwikkeling, maar waarschijnlijk betrekken huishoudens van Noord-Nederland in de toekomst hun elektriciteit van een centrale op de Afsluitdijk. Deze centrale zou moeten staan bij de spuuisluizen waar IJsselmeerwater in de Waddenzee stroomt. Blue Energy - zoals we deze vorm van energie noemen - op een dergelijke locatie kan een vermogen leveren van 200 MW, 200 miljoen watt!

Als Blue Energy op wereldschaal wordt ingezet, wordt een hoeveelheid energie opgewekt die geschat wordt op 20% van het totale huidige energieverbruik.

Blue Energy is het opwekken van elektriciteit uit het mengen van zoet en zout water. Dit kan met zogenaamde 'omgekeerde elektrolyse'. Het zoute en zoete water worden met elkaar in contact gebracht, gescheiden door membranen. Het concentratieverschil duwt de ionen uit het zoute water door het membraan naar het zoete water. Het ontstane ladingstransport kan worden gebruikt voor de productie van elektriciteit. Duurzame productie, want de zon wordt gebruikt als bron van energie. En hierbij komen geen broeikasgassen vrij (zoals CO₂, NO_x en SO_x). Bovendien zijn de grondstoffen gratis en vrijwel ongelimiteerd.

De vraag die in deze module dan ook centraal staat is: Waar in Nederland liggen mogelijkheden voor zo'n Blue Energy centrale en welke bijdrage levert deze nieuwe vorm van energie aan de huidige energievoorziening? Om deze vraag te kunnen beantwoorden ga je naar de onderliggende principes van Blue Energy kijken. Met behulp van de theorie krijg je inzicht in de techniek en het proces van Blue Energy. Vervolgens ga je zelf onderzoeken welke factoren de energiewinning beïnvloeden, hoe het ontwerp van de installatie eruit komt te zien en wat het effect van opschalen is. Bovendien bepaal je de optimale geografische locatie van een centrale.

1.1 Wat weet je aan het eind?

Voorkennis

Om deze module te kunnen uitvoeren heb je enige basiskennis uit de natuurkunde, scheikunde, wiskunde en aardrijkskunde nodig. Uit de natuurkunde zijn dat de grondbeginselen van kracht, druk, elektriciteit, energie en vermogen met de symbolen van deze grootheden en bijbehorende eenheden zoals kilowattuur, megawatt en joule (respectievelijk kWh, MW en J). Ook is kennis van de algemene gaswet gewenst. Wat de scheikunde betreft, gaat het om de begrippen chemische reactie (vooral redoxreacties), chemisch evenwicht en de eenheid mol. Bekend dient verder te zijn dat zich in een zoutoplossing losse ionen bevinden, dat de meest gebruikte concentratie-eenheid mol L⁻¹ is en dat een mol gas bij bepaalde omstandigheden een constant volume heeft, het molaire gasvolume. Tenslotte moet je met logaritmen kunnen rekenen.

Leerdoelen

Na afloop van deze module kun je:

- klimaatproblemen benoemen en de positie van duurzame energie in Nederland omschrijven
- natuurkundige en scheikundige verklaringen geven voor het verschijnsel dat energie vrijkomt bij het mengen van zoet en zout water
- beschrijven hoe en waar deze energie kan worden omgezet in nuttige elektrische energie
- beschrijven hoe de verschillende partijen bij het ontwikkelen van Blue Energy met elkaar moeten samenwerken en welke partijen dit betreft
- na specialisatie in een keuzeonderwerp je bevindingen aan klasgenoten presenteren.

Verder beheers je de leerdoelen die aansluiten bij het door jou gekozen keuzeonderwerp (zie paragraaf 1.2).

1.2 Hoe werk je deze module door?

Deze module bestaat uit twee delen.

Een Algemeen Deel (hoofdstuk 1 t/m 6), een Verdiepingsdeel met specialisatie (hoofdstuk 7) en een Eindopdracht (hoofdstuk 8).

Je werkt eerst met de hele klas het algemene deel door. Na deze inleiding volgen eerst twee hoofdstukken over het klimaatprobleem en verschillende vormen van duurzame energie. Hier volgt de eerste kennismaking met Blue Energy. Na een inleiding in Blue Energy volgt in hoofdstuk 4 een beschouwing over de achterliggende theorie. In de hoofdstukken 5 en 6 komen de chemische respectievelijk fysische achtergronden van Blue Energy aan bod: hoe kan Blue Energy opgewekt worden en hoeveel vermogen kunnen we met Blue Energy opwekken?

Hoofdstuk 7 vormt het verdiepingsdeel van de module, waarin drie specialisaties aan bod komen. Deze verschillende specialisaties sluiten min of meer aan op één van de vakgebieden natuurkunde, scheikunde en aardrijkskunde. Iedere specialisatie heeft haar eigen leerdoelen.

- planoloog* • Als je je specialiseert als planoloog leer je welke fysisch geografische factoren een rol spelen bij de locatiebepaling van een Blue Energy centrale. Je leert om een gegeven locatie te beoordelen op geschiktheid voor zo een centrale. Verder leer je hoe Blue Energy kan worden ingepast in de omgeving. Deze specialisatie sluit vooral aan bij het vakgebied aardrijkskunde.
- aardrijkskunde onderzoeker* • Als je je specialiseert als onderzoeker leer je hoe je een onderzoek kunt opzetten en uitvoeren, waarbij je verschillende condities onderzoekt van de watersamenstelling (zoutconcentratie bijvoorbeeld). Verder leer je welke consequenties dit heeft voor de toepassingsmogelijkheden van Blue Energy. Deze specialisatie sluit vooral aan bij het vakgebied scheikunde.
- scheikunde technisch ingenieur* • Als je je specialiseert als technisch ingenieur leer je hoe je een rekenmodel kunt opzetten om het vermogen van het systeem te berekenen. Op grond hiervan leer je te zoeken naar belangrijke parameters voor het verbeteren van het vermogen (optimalisatie). Verder leer je hoe je de resultaten kunt gebruiken voor verder onderzoek en het technische ontwerp. Deze specialisatie sluit vooral aan bij het vakgebied natuurkunde.
- natuurkunde*

Je kiest bij dit verdiepingsdeel, in overleg met je docent, voor een van de specialisaties. Deze specialisaties zijn in de hoofdstukken daarvoor dus al globaal aan bod gekomen, waardoor je eenvoudiger kunt kiezen wat bij je past. Leerlingen met dezelfde specialisatie vormen een groep. Iedere groep werkt zijn specialisatie af: samen proeven uitvoeren of opdrachten maken en het verslag van je specialisatie maken. Met PowerPoint presentaties en/of posters houden jullie elkaar op de hoogte van je resultaten. Let op: als je bepaalde gegevens mist, vraag dan nadere uitleg aan je klasgenoten die daar mee bezig zijn. Na afloop van de specialisatie geef je een presentatie aan je klasgenoten over je resultaten en conclusies. Ook beoordeel je je klasgenoten met behulp van een beoordelingsformulier. Het afsluitende hoofdstuk 8 wordt weer door de hele klas uitgevoerd: samen met klasgenoten uit de twee andere specialisatiegroepen schrijf je een adviesrapport over Blue Energy.

1.3 Hoe word je beoordeeld?

Je wordt in deze module op twee manieren beoordeeld. De resultaten van je specialisatie presenteren jullie aan je klasgenoten. Je docent beoordeelt van je presentatie de inhoud, de manier van presentatie en je argumentatie. De docent kan hierbij eventueel ook gebruik maken van de beoordeling door je klasgenoten.

Aan het einde van de module zal er een algemene toets over het algemene deel en je specialisatie worden afgenomen.

De waardes voor de twee toetsmomenten worden bepaald door de docent.



2

Startopdracht: wat is jouw voetafdruk?

Ieder mens heeft recht op een plekje op deze wereld. Daar zijn we het over eens. Het wordt alleen wat moeilijk, als de wereld overbevolkt raakt. Dat is zeker het geval in een land als Nederland met zijn bijna 17.000.000 inwoners. De vraag wat we daar aan kunnen doen speelt dan ook regelmatig, bijvoorbeeld in de Nederlandse politiek.

De vraag hoeveel ruimte Nederlanders op de wereld innemen wordt vaak vermeden. Onterecht, want de productie van grondstoffen, energie, recreatieruimte en voedsel voor ons dagelijks leven vindt voor een groot deel buiten ons land plaats. Daartegenover produceren we in Nederland ook voedsel dat we niet allemaal zelf opeten, maar exporteren. Om uit te drukken hoeveel ruimte we werkelijk per persoon innemen, is het begrip ecologische voetafdruk of footprint geïntroduceerd.

ecologische voetafdruk of footprint

In deze module gaat het vooral om het gevaar voor uitputting van de aarde als gevolg van overbevolking. Anders gezegd: we verbruiken de aarde in plaats dat we haar gebruiken. Gebruik wil zeggen dat we de aarde in een zodanige toestand laten, dat ook volgende generaties er op een vergelijkbare wijze een bestaan kunnen vinden. We noemen dat duurzaam gebruik. Bij verbruik is dat niet het geval.

1. Opdracht: ecologische voetafdruk (► URL1)

- a. Zoek uit wat bedoeld wordt met de ecologische voetafdruk of footprint.
- b. Bereken je eigen footprint.
- c. Hoe groot is je voetafdruk in vergelijking met de gemiddelde Nederlander?
- d. Hoeveel ruimte is er gemiddeld voor een bewoner op de aarde?
- e. Leg uit of je, vergeleken met de gemiddelde ruimte voor aardbewoners, op 'grote voet' leeft.
- f. Een manier om je footprint te verkleinen is het gebruik van groene stroom. Groene stroom is een vorm van duurzame energie, waarmee je het verbruik van fossiele energie beperkt.
 - Gebruiken jullie groene stroom?
 - Hoe wordt groene stroom opgewekt?
 - In welk geval is gas ook een vorm van duurzame energie?



Figuur 1: voetafdruk



3

3

Klimaatproblematiek en duurzame energie

Het gebruik van energie heeft grote invloed op onze voetafdruk. Energie kan op verschillende manieren opgewekt worden en iedere energiesoort heeft een andere invloed op de grootte van onze voetafdruk.

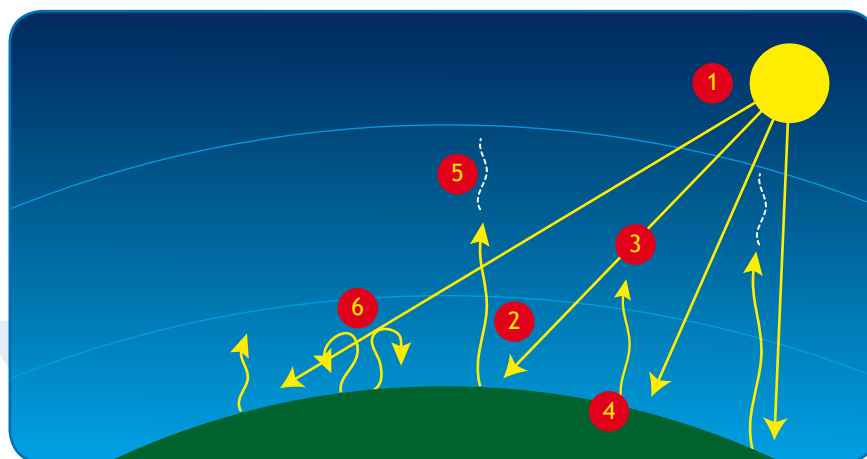
In dit hoofdstuk

- bestudeer je de klimaatproblematiek, de verschillende soorten duurzame energie in Nederland en maak je kennis met Blue Energy;
- onderzoek je aan welke eisen een locatie moet voldoen als je daar Blue Energy wilt opwekken.

3.1 Het broeikaseffect

De temperatuur op aarde schommelt tussen de -70°C en de 50°C , afhankelijk van de plaats op aarde. Gelukkig komen die uitersten maar op enkele plekken voor. Op veruit het grootste deel van de aarde heersen temperaturen waarbij de mens redelijk tot prettig kan leven.

De temperatuur op aarde wordt vooral door de zon bepaald. Een heel klein deel van de warmte komt van de aarde zelf als gevolg van processen in de aarde. De zon heeft periodes met meer en minder straling die daarmee de temperatuur op aarde beïnvloeden. Toch is de temperatuur op aarde redelijk stabiel. De geologische geschiedenis van de aarde kent warme en koude periodes. Deze vallen nog steeds tussen de bovengenoemde uitersten, maar bepalen wel of er een groter of kleiner gebied leefbaar is.



Figuur 2: het broeikaseffect: 1: zonnestraling, 2: broeikasgassen in de atmosfeer, 3: zonnestralen bereiken het aardoppervlak, 4: na absorptie uitgezonden warmte, 5: een deel van de uitgestraalde warmte ontsnapt naar de ruimte, 6: een ander deel van de uitgestraalde warmte wordt tegengehouden door de broeikasgassen.

Dat de aarde leefbaar is, hebben we voor het grootste deel aan de dampkring te danken. Zonder zuurstof zijn we snel uitgepraat, maar ook zonder broeikas effect zou het leven heel vervelend, zo niet onmogelijk worden. Waterdamp (H_2O), koolstofdioxide (CO_2), methaan (CH_4) en andere gassen zorgen ervoor dat er een evenwicht bestaat tussen instraling van de zon, de weerkaatsing van zonlicht en uitstraling van warmte. We hoeven ons dan ook niet zozeer zorgen te maken over het broeikas effect, maar over het versterkte broeikas effect.

het versterkte broeikas effect

Voor meer informatie over het broeikas effect, zie bijvoorbeeld wikipedia (► URL2).



Figuur 3: opwarming van de aarde

terugkoppelingseffecten

*negatief / positief
terugkoppelingseffect*

Dat het broeikas effect een ingewikkeld verschijnsel is, komt vooral door de diverse terugkoppelingseffecten: processen waarbij de uitkomsten van een bewerking van invloed zijn op de oorzaken van diezelfde processen. Zo neemt de verdamping toe als de temperatuur toeneemt. Daardoor ontstaan er meer wolken en neemt de instraling af. Dit noemen we een negatief terugkoppelingseffect. Er zijn ook positieve terugkoppelingseffecten: het smelten van de poolkappen vermindert de weerkaatsing van straling waardoor de temperatuur op aarde nog verder toeneemt.

Inmiddels is het duidelijk dat velen, niet alleen Al Gore en Leonardo di Caprio, zich zorgen maken over het versterkte broeikas effect. Door de toename van de concentratie van broeikasgassen zoals koolstofdioxide en methaan neemt de uitstraling van warmte af, zodat de temperatuur van de dampkring stijgt. De toename van koolstofdioxide is het gevolg van het verbranden van fossiele brandstoffen als steenkool, olie en gas. Deze kun je met wat fantasie beschouwen als oude voorraden opgeslagen zonne-energie.

Tegenstanders van de theorie van het versterkte broeikaseffect (de 'sceptici') wijzen op de gebruikelijke variatie in de hoeveelheid ingestraald zonlicht en gemiddelde temperatuur. In de late Middeleeuwen (tussen 1200 en 1400) was de temperatuur bijvoorbeeld vergelijkbaar met de huidige temperatuur, terwijl daarna (tussen 1500 en 1900) een periode met een lagere gemiddelde temperatuur volgde (men spreekt wel van de kleine ijstijd). De aanhangers van de broeikastheorie wijzen onder andere op de samenloop van de temperatuurstijging met het stijgende gebruik van fossiele brandstoffen. Hun conclusie is dan ook dat het gehalte koolstofdioxide drastisch verminderd moet worden.

Reflectievragen en opdrachten

2. Opdracht

Het gebruik van fossiele brandstoffen staat onder druk.

Geef, naast het versterkte broeikaseffect, nog twee argumenten om over te gaan op alternatieve energiebronnen.

3.2 Duurzame energie in Nederland

Of de temperatuurstijging nu wel of niet het gevolg is van de toename van het gebruik van fossiele brandstoffen, voor iedereen is duidelijk dat de voorraad fossiele brandstoffen eindig is, terwijl de energiebehoefte van de wereld stijgt met opkomende markten als China en India.

Duurzame alternatieven zijn daarom nodig.

Op dit moment zoeken in Nederland overheden, onderzoekers en bedrijven naar duurzame alternatieve energiebronnen. Onder duurzame energie verstaat men dan energie waarover de mensheid in de praktijk voor onbeperkte tijd kan beschikken en die niet ten koste gaat van het leefmilieu en de mogelijkheden voor toekomstige generaties.

Minstens zo belangrijk is het feit dat duurzame energie het milieu een stuk minder belast en dat veel duurzame energie CO₂-neutraal is. Dit geldt bijvoorbeeld voor biobrandstoffen zoals bio-ethanol en biodiesel.

Tijdens zijn vorming heeft de plant in het ideale geval evenveel koolstofdioxide opgenomen als later bij de verbranding van de brandstof vrij komt. Al met al is het gevolg dat er veel geld in deze sector omgaat, er zijn dus ook economische belangen.

Momenteel is de energievoorziening in Nederland nog sterk afhankelijk van fossiele bronnen, slechts een klein deel van de energie wordt duurzaam opgewekt. In 2006 was 2,6 procent van het totale verbruik uit duurzame binnenlandse bronnen afkomstig, tegen 2,4 procent in 2005 (bron: ► URL3). Het is nog niet mogelijk om voor een groot deel over te schakelen op duurzame energie, maar het is onvermijdelijk dat een steeds groter

duurzame energie

percentage duurzame energie ingezet wordt. In het regeerakkoord van 2007 heeft de Nederlandse regering de ambities op dit gebied dan ook aangescherpt. Zo moet in Nederland in 2020 30 procent minder broeikasgassen uitgestoten worden dan in 1990, in 2010 9 procent van het energieverbruik duurzaam zijn opgewekt en in 2020 20 procent.

Ter vergelijking: dat is voor heel Europa 10 procent.

Er zijn een hoop vragen te stellen bij de doelstelling van het kabinet.

Bijvoorbeeld: Hoe gaat Nederland eruit zien wanneer we op grote schaal overschakelen op duurzame energie? Moet op de Noordzee een nieuwe infrastructuur worden aangelegd voor grootschalige windmolenparken? En wat zijn de landschappelijke gevolgen wanneer we overschakelen op biomassa?

Om de duurzame energiebronnen in Nederland wat meer in detail te kunnen bestuderen, staan in figuur 4 en 5 de verschillende energiebronnen en vormen van elektriciteitsproductie in Nederland voor 2006 uitgezet in een tabel. Zie zonodig informatieblok 1 voor een beknopte herhaling van begrippen en eenheden. In figuur 4 worden vijf duurzame energiebronnen genoemd. Het belang van deze bronnen voor Nederland is schematisch weergegeven in figuur 6. In informatieblok 2 wordt van deze vormen van duurzame energie kort toegelicht wat het inhoudt en hoe het staat met het gebruik ervan in Nederland.

Informatieblok 1

energie

Energie

Deze module gaat over energie. Energie is nodig om een voorwerp te verplaatsen wanneer een kracht die verplaatsing tegenwerkt, om iets te verwarmen of om licht (straling) uit te zenden.

vermogen

Vermogen

Wanneer over energie wordt gesproken, is het begrip vermogen vaak belangrijk.

Het vermogen is de hoeveelheid energie die per seconde wordt omgezet.

In formule:

formule 1

$$P = \frac{(\Delta)E}{t} \Rightarrow E = P \cdot t$$

waarin:

- P = vermogen in watt (W)
- E = energie in Joule (J)
- t = tijd in seconde (s).

Bij elektriciteitscentrales wordt vaak verschil gemaakt tussen gemiddeld vermogen en piekvermogen. Als eenheid voor piekvermogen wordt dan W_p gebruikt.

eenheden voor energie

Eenheden voor energie

De SI-eenheid van energie is de joule. De joule wordt ook wel de wattseconde (Ws) genoemd.

- 1 joule is de hoeveelheid energie die nodig is om een voorwerp van 100 gram 1 meter omhoog te tillen.
- 1 joule (of Ws) is de energie die omgezet wordt als een apparaat met een vermogen van 1 watt gedurende 1 seconde aanstaat.

Hieruit blijkt dat een joule erg weinig is. Daarom wordt voor elektrische energie meestal gebruik gemaakt van de eenheid kWh (spreek uit: kilowattuur).

- 1 kWh is de hoeveelheid energie die omgezet wordt als een apparaat met een vermogen van 1000 Watt (een kilowatt) gedurende 1 uur aanstaat.

Er zijn dus twee manieren, waarop je kunt rekenen met het verband tussen energie en vermogen ($E = P \cdot t$):

- E (in J) = P (in W) · t (in s)
- E (in kWh) = P (in kW) · t (in h)

Om uit te rekenen hoeveel joule een kilowattuur is, gebruiken we ook het verband tussen energie en vermogen en het feit dat 1 uur 3600 secondes duurt:

$$E = P \cdot t \Rightarrow 1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3600000 \text{ J.}$$

Voorvoegsels E (in J)

Omdat bij energie-opwekking sprake is van grote hoeveelheden energie of vermogen wordt vaak gebruik gemaakt van grotere voorvoegsels:

Tera (T) = biljoen = 1 000 000 000 000 = 10^{12}

Giga (G) = miljard = 1 000 000 000 = 10^9

Mega (M) = miljoen = 1 000 000 = 10^6

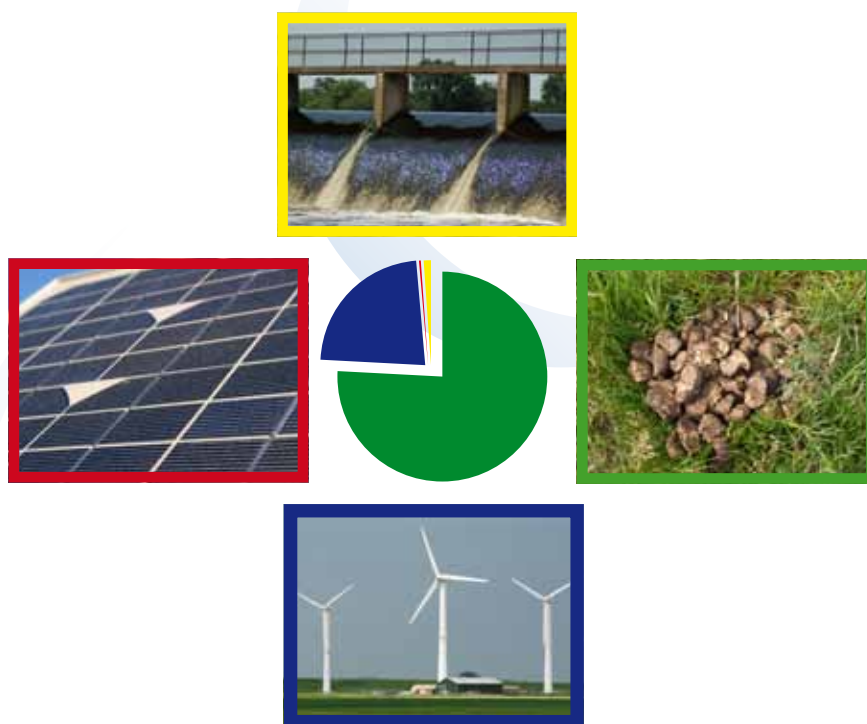
Kilo (k) = duizend = 1 000 = 10^3

| Energieverbruik 2006 | | In TJ | In GWh | % Totale verbruik |
|-----------------------|-------------|---------|--------|-------------------|
| Fossiele brandstoffen | Steenkool | 22000 | 6111 | 1.40 |
| | Olief | 724000 | 201111 | 46.03 |
| | Gas | 784000 | 217778 | 49.85 |
| Kernenergie | | 0 | 0 | 0,00 |
| Duurzame Energie | Biomassa | 32517 | 9033 | 2.07 |
| | Wind | 9839 | 2722 | 0.63 |
| | Zon | 126 | 35 | 0.01 |
| | Waterkracht | 382 | 106 | 0.02 |
| | Aardwarmte | 0 | 0 | 0.00 |
| Totaal | | 1572863 | | |

Figuur 4: tabel energieverbruik 2006

| Electriciteitsproductie | In GWh | In TJ |
|-------------------------|--------|--------|
| Steenkool | 2389 | 8601 |
| Olie | 1298 | 4672 |
| Gas | 63271 | 227777 |
| Kernenergie | 9976 | 35913 |
| Duurzame energie | 7589 | 27320 |

Figuur 5: tabel elektriciteitsproductie



Figuur 6: duurzame energiebronnen voor Nederland

Informatieblok 2

Achtergrondinformatie: vormen van duurzame energie

Aardwarmte

Diep in de aardbol heersen temperaturen van duizenden graden. Dat kan potentieel een flinke voorraad energie betekenen, maar deze is nog te duur om grootschalig te gebruiken. Warmte uit de bodem die daar door zonlicht gekomen is, gebruiken we al wel. Een warmtewisselaar in de bodem maakt de warmte uit de bodem beschikbaar voor verwarming. Zie voor meer informatie ► URL4.

Waterkracht (of Hydro-elektriciteit)

Stromend water (de term waterkracht is strikt genomen wat slordig) levert ook in het zeer vlakke Nederland al lange tijd een bijdrage aan de energievoorziening. Dit varieert van de eeuwenoude watermolens in Limburg en Twente tot de moderne waterkrachtcentrales in de Rijn en in de Maas. Het vermogen dat opgewekt kan worden uit installaties voor



stromend water is in ons land tot nu toe zelfs 3,5 keer zo groot als het vermogen uit directe zonne-energie. Zie voor meer informatie ► URL5. Het is niet de verwachting dat waterkracht in Nederland in de toekomst een zeer grote rol zal spelen. Hoe de hydrologische kringloop toch een belangrijke energiebron kan zijn, wordt in paragraaf 3.3 verder beschreven.

Windenergie

Net als stromend water is ook bewegende lucht een duurzame bron van energie. In 2006 stonden in Nederland ruim 1700 windturbines die voldoende elektriciteit konden opwekken om circa 600.000 huishoudens van stroom te voorzien. Het aandeel duurzame elektriciteit en vooral elektriciteit uit windenergie moet de komende jaren verder omhoog, vindt de overheid. Alleen zo kan Nederland voldoen aan de eerder genoemde energiedoelstellingen.

Het directe ruimtegebruik van windmolens is beperkt, een voetplaat heeft ongeveer de afmetingen 10 m bij 10 m. De molens moeten echter behoorlijk ver uit elkaar staan, zo'n 400 - 600 m, om te voorkomen dat zij wind van elkaar afvangen. Een vuistregel is dat een molen met een piekvermogen van 1 MWp ongeveer 25 ha nodig heeft. Bovendien moet ermee gerekend worden dat het gemiddelde vermogen ongeveer 25% van het piekvermogen is. Het waait niet altijd even hard, soms helemaal niet of soms zelfs te hard.

Biomassa (biobrandstof/biogas)

Biomassa is het drooggewicht van organisch materiaal dat direct afkomstig is uit planten of dieren. Dat kan gas uit rottend materiaal zijn, maar ook alcohol uit suikerriet of suikerbiet en de olie, geperst uit bijvoorbeeld koolzaad of dierlijke vetten. De verkregen biobrandstoffen kunnen letterlijk brandstof zijn, maar ook gebruikt worden in elektrochemische brandstofcellen. Er zijn brandstofcellen ontwikkeld die gevoed worden met afvalwater. Deze methode heeft twee voordelen: energieopwekking zonder extra CO₂-uitstoot en afbraak van afval waardoor milieuvervuiling tegengegaan wordt.

De petrochemische maatschappijen in Nederland moeten binnen 2 jaar 5,75% biobrandstof zoals bio-ethanol of biodiesel in hun brandstof mengen en zijn nu begonnen met het bijmengen om dit doel binnen de gestelde tijd te halen. Door dit percentage verder te verhogen kan in Nederland, met een gelijk blijvende kwaliteit van de brandstof, een veel hoger aandeel gehaald worden met duurzame energie.

De nu in Nederland gebruikte biomassa is een restproduct. Er is alleen extra ruimte nodig voor opslag. Als speciaal voor de energievoorziening hout wordt verbouwd, zou dat erg veel ruimte vragen. Van een andere mogelijke biomassa, koolzaad, kan per hectare ongeveer 4.500 kg per jaar worden geoogst. Dit is goed voor 1.500 liter olie.

Op vuilstortplaatsen ontstaat biogas, het zogenaamde stortgas. Ook dit is een vorm van biobrandstof. In Nederland wordt stortgas op tal van plaatsen opgevangen en gebruikt.





Zonne-energie

In een fotovoltaïsche zonnecel (PV-cel), wordt zonne-energie zonder tussenstappen direct omgezet in elektrische energie. Dit directe gebruik van zonne-energie is op langere termijn ook voor Nederland heel aantrekkelijk. Met de huidige techniek is veel ruimte nodig om zonne-energie te oogsten. Wanneer in Nederland alle gebouwen van zonnecellen of zonnecollectoren (deze zetten zonne-energie om in warmte) worden voorzien, dekken we daarmee 10 % van onze huidige energiebehoefte. In Nederland schijnt de zon gemiddeld 600 uur per jaar. Een vierkante meter grondoppervlak in Nederland ontvangt gemiddeld per jaar 1.050 kWh aan directe zonne-energie. Dit betekent dat het gemiddelde vermogen dat op een zonnecel valt 1750 W m^{-2} is (ga dit zelf na, gebruik zonodig blok 1) Hiervan wordt met de huidige stand van de techniek ongeveer 6% gebruikt. Het vermogen van 1 m^2 PV-zonnecel is daarmee ongeveer 100 W. Zie voor meer informatie ► URL6-7.

Reflectievragen en opdrachten

Opdracht 3.1 Energieverbruik

Gebruik voor deze vraag de tekst van paragraaf 3.2 en de tabellen in figuren 4 en 5.

De doelstelling van het kabinet heeft volgens het regeerakkoord betrekking op het totale energieverbruik, niet het elektriciteitsverbruik. Hierover bestaat echter nogal wat verwarring.

- Leg uit, eventueel met gebruik van het internet, wat het verschil is tussen elektriciteitsverbruik en energiegebruik.
- Bereken hoeveel duurzame energie in 2020 moet worden opgewekt, conform de ambitie van het kabinet (aangenomen dat het energieverbruik gelijk blijft). Geef je antwoord in TJ en in GWh.
- Stel dat in 2020 alle elektriciteit duurzaam geproduceerd wordt (de duurzame bronnen zon, wind en water zijn namelijk vooral geschikt voor directe elektriciteitsopwekking). In hoeverre zou daarmee voldaan zijn aan de 20%-doelstelling? Ga ervan dat energieverbruik en elektriciteitsverbruik gelijk blijven. Het gemiddelde vermogen (in GW) van elektriciteitscentrales ga je berekenen uit het elektriciteitsverbruik (in GWh), zie evt. informatieblok 1. Bedenk zelf hoeveel uur er in een jaar gaan. In totaal kunnen de elektriciteitscentrales 1,5 x zo veel vermogen leveren, omdat het elektriciteitsverbruik overdag groter is dan 's nachts.
- Hoeveel vermogen kunnen de centrales bij elkaar leveren?

Opdracht 3.2 Duurzame energiesoorten

Er zijn allerlei vraagtekens te zetten bij de doelstelling van het kabinet, beschreven in paragraaf 3.2.

Duurzame energiesoorten nemen op dit moment veel ruimte in. Hoeveel verschilt per soort. Bereken met de gegevens uit informatieblok 2 hoeveel energie (in $W\ m^{-2}$) er opgewekt wordt.

Doe dit voor:

- zonnepanelen
- windmolens
- de biobrandstof koolzaad. De verbrandingswaarde van koolzaadolie (denk om de eenheden) staat in Binas. Ga hier uit van 100% rendement, want in tegenstelling tot windenergie en zonne-energie kun je koolzaadolie opslaan.

Zet je antwoorden in de betreffende kolom van figuur 7.

Bereken voor elk van de drie energiesoorten hoeveel hectare land nodig is om de doelstelling van 20% duurzame energie te behalen. Neem aan dat dit overeenkomt met 10 GW vermogen. Geef ook aan welk deel dit van de oppervlakte van Nederland is. Zet je antwoorden in de betreffende kolom van figuur 7. Wat is je conclusie?

De getallen voor Blue Energy vul je pas bij de eindopdracht in.

| | W/m^2 | Ha. landgebruik voor 20% |
|--------------|---------|--------------------------|
| Zon | | |
| Wind | | |
| Biobrandstof | | |
| Blue Energy | | |

Figuur 7: oppervlaktegebruik van duurzame energiebronnen

Bij het zoeken naar duurzame vormen van energie, moeten we ons realiseren dat we enorme hoeveelheden zonne-energie laten 'ontsnappen'. Met de zonne-energie die de aarde per seconde ontvangt (100 biljoen kWh) kunnen we bijna drie uur van het huidige energieverbruik van de hele wereld dekken. Zonne-energie is een duurzame vorm van energie. Geen verbranding van fossiele voorraden, maar direct gebruik van de instraling van de zon zonder productie van broeikasgassen. De vraag is dus: hoe vangen we deze zonne-energie?

Niet alleen directe zonne-energie, maar alle beschreven vormen van duurzame energie zijn - op 'diepe' aardwarmte na - in feite vormen van zonne-energie. De hydrologische kringloop (en dus waterkracht), wordt aangedreven door de zon. Wind ontstaat doordat de zon de aarde ongelijk verwarmt, waardoor de lucht op sommige plaatsen opstijgt en op andere plekken daalt. Biomassa is feitelijk een vastlegging van zonne-energie via het proces van fotosynthese.

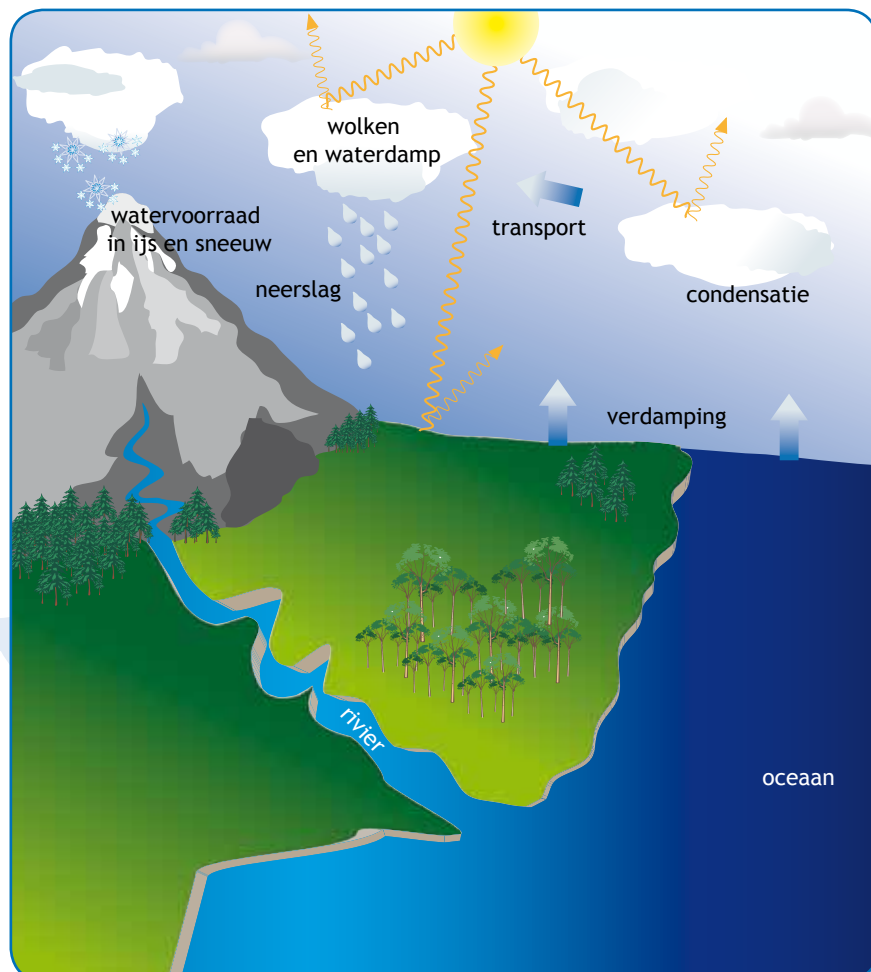
Blue Energy

Deze module behandelt een andere, nog vrij onbekende mogelijkheid om zonne-energie te gebruiken: Blue Energy. Net als waterkracht is ook Blue Energy gebaseerd op de hydrologische kringloop.

3.3 De hydrologische kringloop en Blue Energy

hydrologische kringloop

Zonne-energie vangen kan dus door gebruik te maken van de hydrologische kringloop (zie figuur 8). Door de zonnewarmte verdampt het water aan het oppervlak van zeeën en oceanen. De waterdamp stijgt op en een deel condenseert tot wolken die met de wind meedrijven tot boven continenten. Wanneer de lucht boven land afkoelt (bijvoorbeeld door verder op te stijgen) zal een deel van het water als neerslag (regen of sneeuw) op de aarde vallen. Water komt dus vroeg of laat, afhankelijk van de plaats waar de neerslag is gevallen, weer in de zeeën en oceanen terug.



Figuur 8: de hydrologische kringloop

Twee vormen van duurzame energiewinning zijn op deze hydrologische kringloop gebaseerd:

hydro-electriciteit

Hydro-elektriciteit berust op het hoogteverschil tussen de plaats waar de neerslag terechtkomt en de plaats waar het water weer in zee of oceaan stroomt. De zwaartekracht speelt een cruciale rol bij het winnen van deze energie. Grote turbines worden aangedreven door vallend ('witte steenkool') of stromend water. Het principe is hetzelfde als dat bij de fietsdynamo, maar de hoeveelheid energie is veel groter. Deze hoeveelheid energie is afhankelijk van de hoeveelheid water en het hoogteverschil. We spreken van hoge en lage drukcentrales. Het prettige van hoge drukcentrales (bijvoorbeeld kunstmatige stuwwerken) is dat men het water kan laten stromen als de behoefte aan elektriciteit grootst is. Daarmee ontlast je de piekcentrales die uitsluitend extra elektriciteit produceren als de vraag het hoogst is (overdag als de meeste bedrijven werken). Deze pieklastcentrales zijn bovendien per kilowattuur het duurst.

Blue Energy

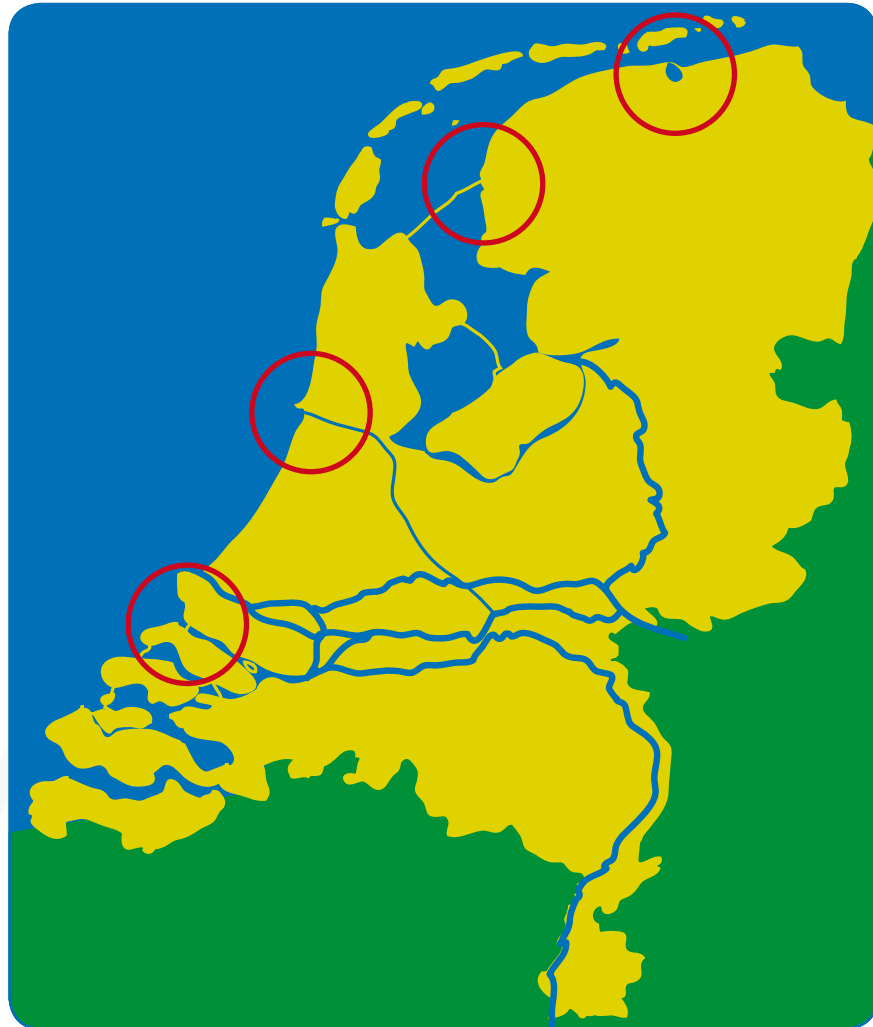
De tweede, zeer verrassende, manier om met behulp van de hydrologische kringloop zonne-energie terug te winnen is Blue Energy. Hierbij maakt men gebruik van de menging van zoet en zout water op de plek waar het uitgeregende water via rivieren weer terugstroomt in de zee of oceaan. Hoe we deze energie kunnen opwekken, waar dat zou kunnen en welke technische problemen daarbij opgelost moeten worden komt in het vervolg van deze module aan bod.

3.4 De locatie van een centrale van Blue Energy

Het opwekken van Blue Energy moet gebeuren op een plek waar zoet en zout water bij elkaar komen. Die plekken zijn er genoeg op deze wereld en zeker in Nederland (figuur 9): bij iedere riviermonding vinden we er een. Toch is de oplossing ook weer niet zo simpel, want bij open riviermondingen wordt het zoete rivierwater geleidelijk steeds zouter. Zonder speciale maatregelen is de hoeveelheid winbare energie zeer beperkt. De 'inlaat' van zout en zoet water moet gescheiden van elkaar gebeuren en ook de afvoer van brak water moet gescheiden van de instroom gehouden worden.

Er zijn in Nederland verschillende plaatsen waar zoet en zout water scherp van elkaar gescheiden zijn. We hoeven daar alleen een afvoer van brak water te maken, zodat dit brakke water zich niet met het zoete of zoute water mengt.

De eerste plek die we bekijken zijn de spuisluizen in de Afsluitdijk. Regelmatig wordt hier bij eb zoet water in de Waddenzee geloosd. Naast de spuisluizen ligt er bovendien een pier om de scheepvaart tegen ongewenste stroming te beschermen. Dit is heel prettig, want als het brakke water aan de andere kant van de pier geloosd wordt, mengt het niet met de instroom van zout water. Gunstig is ook dat de vloed twee keer per dag het brakke water zout maakt.



Figuur 9: mogelijke locaties voor Blue Energy in Nederland

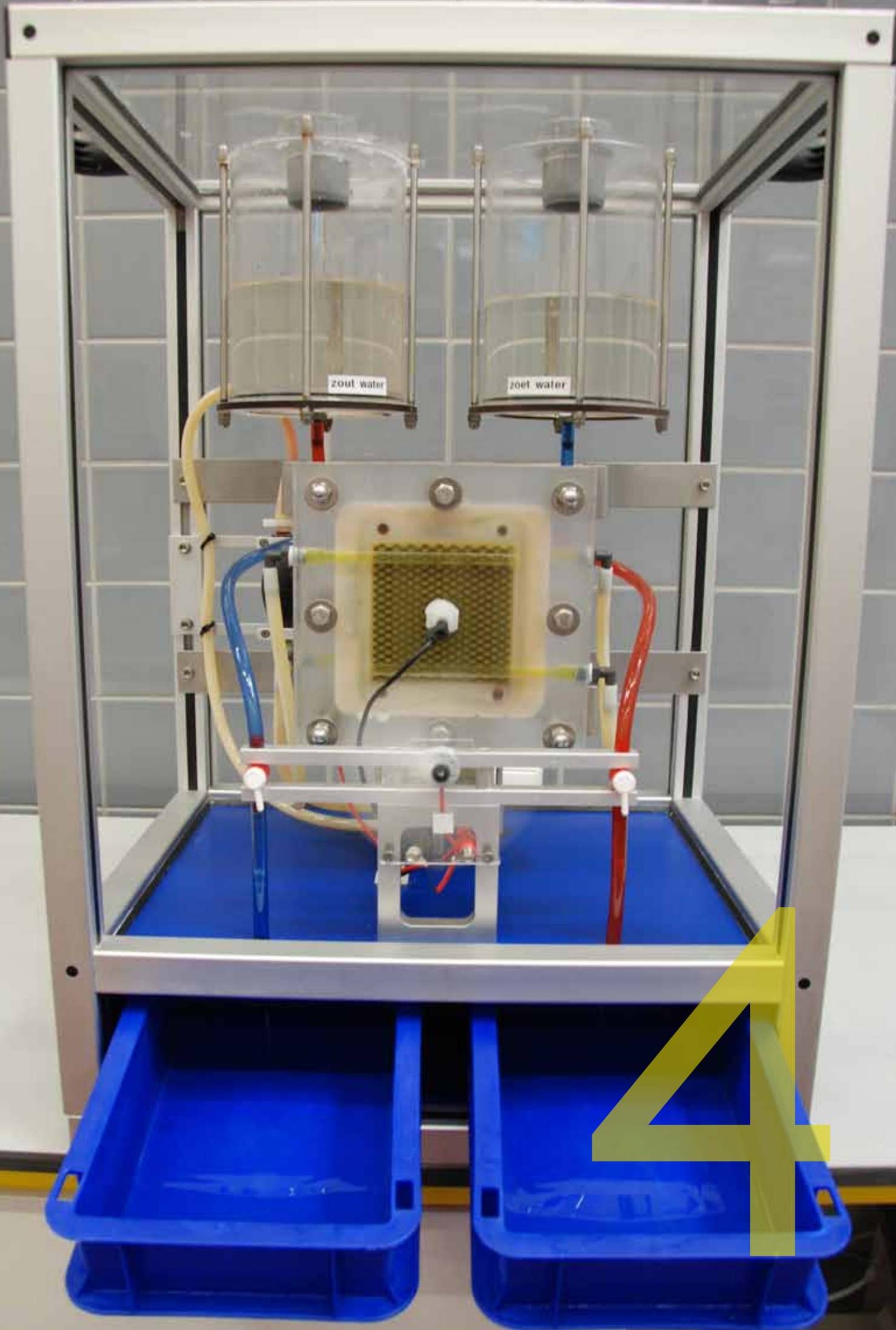
Reflectievragen en opdrachten

4. Opdracht

- Zoek met behulp van een atlas (kaart: verdeling water over de rivieren en afvoer zoet water) en figuur 9 geschikte plekken in Nederland voor een Blue Energy centrale.
- Leg uit welk negatief effect de Westerschelde en de half open Oosterscheldedam op een Blue Energy centrale in Zeeland kan hebben.
- De Nieuwe Waterweg is niet makkelijk geschikt te maken voor Blue Energy: het zoute water dringt als een wig onder het zoete rivierwater naar binnen. Waarom is er geen loodrechte afscheiding tussen zoet en zout water?
- Waarom is het Haringvliet in natte periodes heel geschikt voor Blue Energy?

Spreken deze opdrachten jou aan? Dan is de specialisatie als planoloog wat voor jou.





4

Het lijkt wellicht te mooi om waar te zijn: energie winnen uit het mengen van zoet en zout water. Om te begrijpen hoe dat kan, is het noodzakelijk dat je in de theorie van de zogenaamde thermodynamica duikt.

enthalpie en entropie

Een centrale vraag is daarbij waardoor sommige processen wel optreden en andere niet. Hierbij zijn de begrippen enthalpie en entropie onmisbaar.

Je leert in dit hoofdstuk

- de begrippen (reactie)enthalpie en entropie
- hoe deze gerelateerd zijn aan Blue Energy
- en wat de mogelijkheden van energie-opwekking door Blue Energy zijn.

4.1 Enthalpie

*exotherme
endotherme*

Stel dat je een eitje bakt en je bekijkt wat er met het aardgas en wat er met het eitje gebeurt. Een belangrijk verschil is dat bij het verbranden van aardgas energie (vooral warmte) vrijkomt, maar dat voor het bakken van een ei juist energie nodig is. Stop je met de warmtetoevoer, dan houdt het bakken ook op. Dit voorbeeld laat zien dat we chemische reacties kunnen verdelen in exotherme reacties (reacties waarbij energie vrijkomt) en endotherme reacties (reacties waarbij energie nodig is om de reactie te laten verlopen).

Deze tweedeling is ook bij niet-chemische processen te hanteren, bijvoorbeeld faseovergangen. Smelten is endotherm, stollen (bij water: bevriezen) is exotherm.

Een reactie kan plaatsvinden bij constante druk of bij constant volume. Dit maakt verschil als er bij de reactie gassen ontstaan. Bij constante druk, in de praktijk de luchtdruk, hebben de reactieproduct(en) een groter volume dan de uitgangsstoffen. Om dit grotere volume in te nemen moeten de reactieproduct(en) arbeid verrichten, namelijk een hoeveelheid lucht wegdrukken. Voor deze arbeid ('volumearbeid') geldt:

formule 2 $W = p \Delta V$

waarin:

- W = arbeid in joule (J)
- p = druk in pascal (Pa)
- ΔV = volumeverandering (m^3).

De afleiding van deze formule volgt uit twee definities:

- de definitie van druk ($p = F / A$); hierin is F = de kracht (N) en A de oppervlakte (m^2) en
- de definitie van arbeid ($W = F \cdot s$) (zie eventueel informatieblok 3).

Natuurkunde: energie en arbeid

Om een voorwerp in beweging te brengen of te houden (op aarde) is altijd energie nodig. Krachten op een bewegend voorwerp zorgen dan ook altijd voor een energie-omzetting (tenminste, zolang de kracht niet loodrecht op de bewegingsrichting staat). We zeggen natuurkundig: een kracht op een bewegend voorwerp levert arbeid. De geleverde arbeid is een maat voor de hoeveelheid energie die wordt omgezet tijdens de beweging.

De hoeveelheid arbeid die wordt verricht, hangt af van de grootte van de kracht en de afgelegde weg (mits de richting van F en s evenwijdig zijn):

formule 3 $W = F \cdot s$

waarin:

- W = arbeid in joule (J)
- F = kracht in newton (N)
- s = afgelegde weg in meter (m).

Voor een vallend voorwerp geldt bijvoorbeeld dat de energie die omgezet wordt (ΔE) tijdens de val over een afstand (Δh) gelijk is aan:

$$\Delta E = W = F_z \cdot s = m \cdot g \cdot \Delta h$$

Combinatie van de definitie van druk en de definitie van arbeid geeft:

$$p = F / A \Rightarrow F = p \cdot A$$

$$W = F \cdot s \Rightarrow W = p \cdot A \cdot s$$

Bedenk dat $A \cdot s$ (oppervlakte x afgelegde weg) een volumeverandering voorstelt, dus:

$$\Delta V = A \cdot s \Rightarrow W = p \Delta V$$

De energie die nodig is om deze arbeid te leveren, komt uit de chemische reactie. Hierdoor komt er bij een exotherme reactie minder warmte vrij dan door de reactie aan energie wordt geleverd. Een deel van de energie gaat namelijk in de arbeid zitten, waardoor het volume groter wordt. Omgekeerd is er voor een endotherme reactie meer energie nodig dan je zou verwachten. De benodigde energie wordt namelijk weer voor een deel gebruikt voor de volumevergroting.

In de thermodynamica verstaan we onder een systeem een duidelijk afgebakend object, bijvoorbeeld een hoeveelheid gas in een cilinder. Dat systeem heeft een zekere inwendige energie. Die inwendige energie omvat onder andere de bewegingsenergie van de moleculen, maar ook de energie die zit in alle chemische bindingen. Bij een reactie, endotherm dan wel exotherm, verandert die inwendige energie: de moleculen gaan sneller of langzamer bewegen, bindingen worden verbroken of juist gevormd. Zo wordt in een cilinder van een verbrandingsmotor een gas verbrand en gaan de moleculen sneller bewegen. Er vindt dus een energieverandering

(ΔE) plaats van het systeem. Daarnaast wordt in de cilinder een zuiger weggedrukt: het volume van het gas wordt groter. Er wordt dus arbeid verricht ($p\Delta V$). Energieverandering en verrichte arbeid noemen we enthalpieverandering (ΔH). De druk is hierbij constant. H is van het Engelse 'heat content' = warmte-inhoud. Deze enthalpieverandering komt overeen met de reactiewarmte.

energieverandering De energieverandering van het systeem (ΔE) is dus niet gelijk aan de reactiewarmte of reactie-enthalpieverandering bij constante druk (ΔH). Een deel van de reactiewarmte 'gaat in de volumearbeid zitten'. In formulevorm:

formule 4 $\Delta H = \Delta E + p \Delta V$

De eenheid van ΔH is joule. De $p\Delta V$ term in formule 4 is klein en meestal te verwaarlozen ten opzichte van de ΔE term. Dan is $\Delta H = \Delta E$ en is het niet erg als reactie-enthalpie en energie door elkaar gebruikt worden.

Voor de overzichtelijkheid gebruiken we in dit hoofdstuk (reactie)enthalpie. In de volgende hoofdstukken hanteren we vooral energie, de term die in de betreffende situaties het meest gebruikt wordt.

Reflectievragen en opdrachten

5. Opdracht

Een mol stearinezuur ($C_{18}H_{36}O_2$) wordt volledig verbrand. Het volume van een mol gas ('molair gasvolume') is bij de omstandigheden van de proef 25 dm^3 .

Verder is gegeven: $\Delta H = -11\,362 \text{ kJ mol}^{-1}$. Stel $p = 1 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$.

Zie zo nodig informatieblok 4 voor een herhaling van de scheikundige maat mol.

- Bereken de volumeverandering bij de verbranding.
- Bereken de hiermee gepaard gaande volumearbeid.
- Bereken het procentuele verschil tussen ΔE en ΔH bij deze verbranding.

Scheikunde: de mol, de eenheid van chemische hoeveelheid

Er zijn verschillende mogelijkheden om hoeveelheden stof aan te geven, zoals massa-eenheden (ton, kg, g, mg) en volume- of inhoudseenheden (m^3 , dm^3 , cm^3 , L, mL). Chemici hanteren vaak de eenheid mol. Om deze mol te begrijpen, is kennis van atoommassa's (vroeger: atoomgewichten) en molecuulmassa's noodzakelijk. De tabel in figuur 10 geeft belangrijke atoommassa's en molecuulmassa's, uitgedrukt in de atomaire massa-eenheid μ . Dit is de massa van het lichtste atoom, het waterstofatoom:

| Atoom | Atoommassa (in μ) |
|-------|------------------------|
| H | 1 |
| C | 12 |
| O | 16 |

| Molecuul | Molecuulmassa (in μ) |
|------------------|---------------------------|
| H ₂ | 2 |
| O ₂ | 32 |
| H ₂ O | 18 |
| CH ₄ | 16 |
| CO ₂ | 44 |

Figuur 10: atoommassa's en molecuulmassa's

Per definitie is een mol het aantal atomen in 12,000 g¹²C, dat is dus de atoommassa van koolstof, maar nu uitgedrukt in gram.

Dit is uiteraard een ontzettend groot aantal, zeer ruw afgerond: 600 000 000 000 000 000 000. Deze 6 met 23 nullen, handiger geschreven als 6×10^{23} , noemt men de constante (het getal) van Avogadro.

Volgens de definitie heb je dus een mol stof als je achter de molecuulmassa van die stof de eenheid 'gram' zet. Uit de atoommassa's H = 1 en O = 16 volgen de molecuulmassa's en dus de molmassa's (ook wel: molaire massa's) van waterstof (H₂), zuurstof (O₂) en water (H₂O). Deze zijn respectievelijk 2 g, 32 g en 18 g.

Het grote voordeel van de mol is dat een brug geslagen wordt tussen de atomaire schaal en de meetbare schaal. Een molecuul water is niet meetbaar, een mol water wel: 18 g.

Bij gassen is er iets speciaals aan de hand. Het volume van een mol gas, het molaire gasvolume V_{molaire} is voor alle gassen bij een bepaalde temperatuur en druk constant. Bij 20 °C en standaarddruk is deze constante 24 dm³ mol⁻¹.

De mol wordt ook gebruikt om een concentratie (= gehalte) van deeltjes in een oplossing aan te geven. Bij vaste stoffen in vloeistoffen

ligt een combinatie van massa en volume voor de hand. Zo kun je de keukenzoutconcentratie in zeewater opgeven als 23 g L^{-1} . De meest gebruikte chemische concentratie-eenheid in oplossingen is de mol per liter of molair (mol L^{-1} , afgekort M). Pas op: deze molair is niet dezelfde als de molair in molaire massa!

Men geeft in de chemie de concentratie vaak aan met de formule van de opgeloste deeltjes tussen vierkante haken. Voor een ammoniakoplossing wordt dit bijvoorbeeld: $[\text{NH}_3] = 0,20 \text{ mol L}^{-1} = 0,20 \text{ M}$. Die vierkante haakjes geven reëel aanwezige deeltjes. Dit betekent bijvoorbeeld bij keukenzout, als je $0,15 \text{ mol NaCl}$ per liter hebt opgelost: $[\text{Na}^+\text{Cl}^-] = 0 \text{ M}$ (het zout is immers bij oplossen in ionen gesplitst), $[\text{Na}^+] = [\text{Cl}^-] = 0,15 \text{ M}$.

Reflectievragen en opdrachten

6. Opdracht

Eén van de functies van voedsel is het leveren van energie.

Gegeven zijn de zogenaamde calorische waarden voor koolhydraten ($4,1 \text{ kcal g}^{-1}$), vetten ($9,2 \text{ kcal g}^{-1}$), en eiwitten ($5,3 \text{ kcal g}^{-1}$).

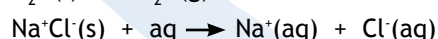
- Reken deze waarden met behulp van ► Binas tabel 5 om in kJ g^{-1} .
- De verbrandingswarmte van ethanol (alcohol) is 1367 kJ per mol . Reken deze waarde om in kJ per gram . Kun je alcohol energierijk noemen?

4.2 Entropie

Om te bepalen of processen wel of niet kunnen optreden, kijken we om te beginnen naar de enthalpieverandering van het systeem. Exotherme reacties verlopen spontaan, mits de temperatuur hoog genoeg is om de reactie te starten. Dan is namelijk de enige hindernis overwonnen, de activeringsenergie. Dit is de reden dat aardgas aangestoken moet worden. Een eerste regel voor het verlopen van een reactie is dan ook:

regel 1 ►► Elk systeem streeft naar verlaging van de enthalpie: $\Delta H < 0$

Bekijk de volgende processen:



Deze spontane processen, het verdampen van water en het oplossen van keukenzout, zijn endotherm. Hierbij wordt warmte uit de omgeving opgenomen, de enthalpie van het systeem neemt toe: $\Delta H > 0$!

Toch verlopen deze processen. De enthalpie is dus niet de enige bepalende factor.

Moleculen zijn net brugklassers: altijd aan het bewegen. Zelfs als ze netjes op hun stoelen zitten, bewegen ze nog. Als de leraar geen orde weet te houden, dan staan ze op van hun stoelen en beginnen zelfs door de klas te rennen. Ze vullen dan het hele lokaal en niemand zit meer op zijn plek. De leerlingen hebben een grote mate van vrijheid. Het is een chaos. Eigenlijk gedragen ze zich als een gas.

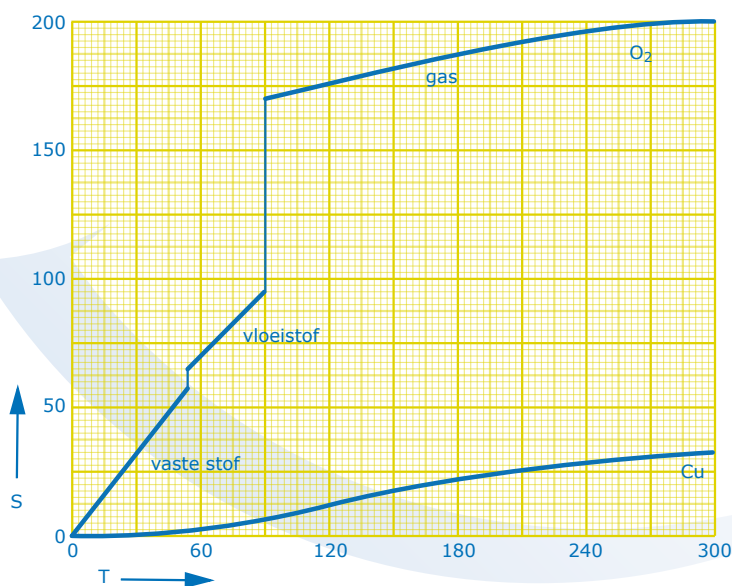
Uit de molecuultheorie weten we dat moleculen bewegen. Als er geen sterke krachten tussen de moleculen onderling zijn, leidt dit tot een maximale chaos. Dit zien we het duidelijkste bij gassen (het woord 'gas' is afgeleid van chaos). Een gas verspreidt zich over het hele beschikbare volume. We zeggen: de moleculen hebben dan een maximaal aantal realiseringmogelijkheden. Je kunt je het begrip 'realiseringmogelijkheid' goed voorstellen bij het gooien met dobbelstenen. Als je met twee dobbelstenen gooit, is er maar één realiseringmogelijkheid om het totaal 2 te gooien, maar er zijn zes realiseringmogelijkheden om totaal zeven te gooien.

Voor deze module is het verdunnen van een zoutoplossing uiterst belangrijk. Daarbij wordt het aantal realiseringmogelijkheden voor de opgeloste deeltjes (ionen) groter, want ze kunnen zich in een groter volume bewegen.

Het aantal realiseringmogelijkheden geven we aan met de term entropie (symbool S).

Waterdamp heeft dus een grotere entropie dan een even grote massa vloeibaar water. Lossen we evenveel zout op in 1 liter water als in 10 liter, dan heeft de verdunde zoutoplossing de grootste entropie.

Uit het voorgaande volgt dat de entropie van 1 mol van een bepaalde vaste stof kleiner is dan die van 1 mol vloeistof, die weer kleiner is dan die van 1 mol gas. Zie ook figuur 11, waarin de entropie van zuurstof en die van koper staan weergegeven als functie van de temperatuur.



Figuur 11: de entropie (S , in $J K^{-1}$) van één mol zuurstof en van één mol koper als functie van de temperatuur (T , in K) ($p = p_0$)

realiseringsmogelijkheden

entropie

Drie factoren zijn bepalend voor de bewegingsmogelijkheden, dus ook voor de entropie:

volume Het volume

- een mol gas heeft een veel grotere entropie dan een mol vloeistof die een grotere entropie heeft dan een mol vaste stof
- lossen we een even grote hoeveelheid vaste stof op in een oplosmiddel, dan is de entropie groter bij een grotere hoeveelheid oplosmiddel

hoeveelheid stof De hoeveelheid stof

- 2 mol gas heeft bij dezelfde temperatuur en druk een tweemaal zo groot volume als 1 mol gas en daardoor ook een twee maal zo grote entropie
- de oplossing van 2 gram zout opgelost in 1 liter water heeft een grotere entropie dan die van 1 gram zout in 1 liter water

temperatuur De temperatuur

- bij hogere temperatuur neemt de entropie toe

Bij het vergelijken van twee systemen is meestal het aantal mol gas bepalend, aangezien de entropie van vaste stoffen en vloeistoffen relatief klein is. ► In Binas staan absolute entropieën in tabel 63.

De tweede regel voor het verlopen van processen is:

regel 2 ►► Elk systeem streeft naar verhoging van de entropie: $\Delta S > 0$

Deze regel verklaart het uit zichzelf mengen van gassen en van oplossingen, diffusie. Op den duur worden de concentraties overal gelijk, er is dan een homogeen gasmengsel of homogene oplossing ontstaan.

Reflectievragen en opdrachten

7. Opdracht

- a. Hoe groot is de entropietoename (ΔS) als we bij standaarddruk 12 g zuurstof verwarmen van 80 K tot 180 K? Gebruik hiervoor figuur 11.
- b. We verwarmen bij standaarddruk 1 mol zuurstof en 1 mol water van 220 K tot 400 K. De entropietoename van water blijkt veel groter te zijn dan die van O_2 . Geef hiervoor een verklaring.

8. Opdracht

Beredeneer of de entropie kleiner of groter wordt bij de volgende processen:

- a. $CaCO_3(s) \rightarrow CaO(s) + CO_2(g)$
- b. $Ba^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow BaSO_4(s)$
- c. $H_2O(l) \rightarrow H_2O(g)$
- d. $N_2(g) + 3 H_2(g) \rightarrow 2 NH_3(g)$

4.3 Toepassing van de twee regels

In de vorige paragrafen bespraken we de grootheden enthalpie en entropie. We zagen twee regels voor het verlopen van een proces, zoals een chemische reactie.

Regel 1: elk systeem streeft naar verlaging van de enthalpie: $\Delta H < 0$

Regel 2: elk systeem streeft naar verhoging van de entropie: $\Delta S > 0$

Wanneer we willen beoordelen of een proces kan verlopen, zijn er dus drie mogelijkheden:

1. Het optreden van het proces zou betekenen dat de enthalpie van het systeem verlaagd wordt en de entropie verhoogd.
2. Het optreden van het proces zou betekenen dat de enthalpie van het systeem verhoogd wordt en de entropie verlaagd.
3. Het optreden van het proces zou betekenen dat de enthalpie van het systeem verlaagd wordt óf de entropie verhoogd.

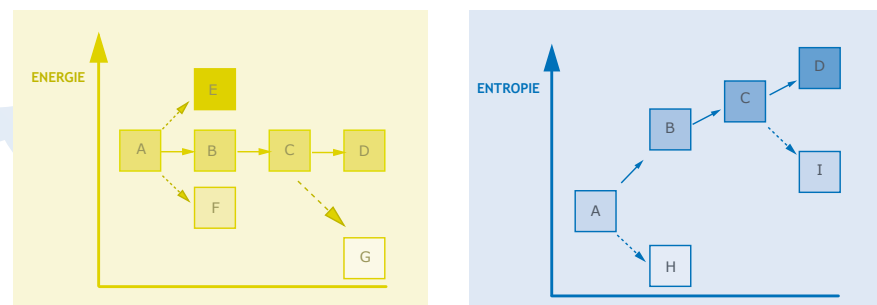
De eerste categorie processen zal spontaan verlopen. De tweede categorie zal niet spontaan kunnen verlopen. Om te beoordelen of de processen in de derde categorie kunnen verlopen, hebben we meer informatie nodig: we moeten een manier vinden om kwantitatief te beoordelen hoe groot de invloed van beide factoren is. Hiervoor kijken we niet alleen naar het systeem, maar ook naar de omgeving. Dan blijkt hoe fundamenteel de entropie is, want er is afgeleid:

totale entropie

een proces verloopt spontaan als de totale entropie groter wordt:

$$\Delta S_{\text{systeem}} + \Delta S_{\text{omgeving}} > 0$$

Hiermee wordt een fundamenteel verschil tussen energie en entropie duidelijk: wanneer gekeken wordt naar het systeem én de omgeving van het systeem, zal bij een proces de totale hoeveelheid energie constant blijven (wet van behoud van energie), maar de totale entropie zal bij ieder proces toenemen (zie ook figuur 12).



Figuur 12: het principiële verschil tussen energie en entropie. In drie achtereenvolgende processen (aangegeven met doorgetrokken pijlen) is de totale energie constant, terwijl de totale entropie toeneemt. Andere processen (aangegeven met gestippelde pijlen) kunnen niet optreden.

Als bij constante temperatuur (T) een bepaalde hoeveelheid warmte (ΔH) wordt toegevoegd, geldt voor de entropieverandering: $\Delta S = \Delta H / T$. Dit betekent dat we de entropieverandering van de omgeving kunnen uitdrukken in de hoeveelheid warmte die door het proces aan de omgeving wordt afgestaan of opgenomen:

$$\Delta H_{\text{omgeving}} = -\Delta H_{\text{systeem}}$$

Dit geeft ingevuld:

$$\Delta S_{\text{systeem}} = \Delta S_{\text{omgeving}} > 0 \Leftrightarrow$$

$$\Delta S_{\text{systeem}} - \frac{(\Delta)H_{\text{systeem}}}{T} > 0 \Rightarrow$$

$$\frac{(\Delta)H_{\text{systeem}}}{T} - \Delta S_{\text{systeem}} < 0 \Rightarrow (\Delta)H - T\Delta S < 0$$

Om te beoordelen of een proces wel of niet kan verlopen, hoeven we dus niets van de omgeving te meten! Het is voldoende om te beoordelen of geldt: $\Delta H - T\Delta S < 0$. Het is niet altijd noodzakelijk om hieraan te rekenen, in sommige gevallen volstaat het kijken naar de tekens. We beschrijven drie situaties, die aansluiten bij de processen die we aan het begin van de paragraaf beschreven.

Situatie 1: $\Delta H < 0$ en $\Delta S > 0 \Rightarrow \Delta H - T\Delta S < 0$

Als ΔH negatief en ΔS positief is, is aan beide regels voor spontane processen voldaan. Niets, behalve de te overwinnen activeringsenergie, staat het vanzelf verlopen van het proces in de weg. Voorbeelden van hiervan zijn verbrandingen, waaronder explosies.

Situatie 2: $\Delta H > 0$ en $\Delta S < 0 \Rightarrow \Delta H - T\Delta S > 0$

Het tegenovergestelde zien we als ΔH positief en ΔS negatief is: beide ongunstige factoren voor het verlopen van het proces. Voorbeelden van dergelijke reacties zijn omgekeerde verbrandingen. Het optreden daarvan is zeer onwaarschijnlijk: koolstofdioxide en water zullen dan ook niet tot benzine en zuurstof reageren. Toch is enige reserve geboden. In de fotosynthese wordt uit koolstofdioxide en water wel koolhydraat (glucose) gevormd; $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}$

Dit endotherme proces met entropieafname (!), onmisbaar voor ons leven, kan dan ook uitsluitend plaats vinden onder instraling van licht (toevoer van energie) en met een serie enzymen (biologische katalysatoren) in de plant.

Situatie 3: $\Delta H > 0$ en $\Delta S > 0$ of $\Delta H < 0$ en $\Delta S < 0 \Rightarrow \Delta H - T\Delta S < 0 \Leftrightarrow 0$

De derde mogelijkheid is zeer interessant: ΔH en ΔS hebben hetzelfde teken. Het is dan mogelijk dat geldt: $\Delta H - T\Delta S = 0$.

Een voorbeeld is de bereiding van ammoniakgas uit de elementen, een exotherme reactie. Terzijde: de activeringsenergie is hoog en daarom is een katalysator onmisbaar.

$\text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{NH}_3(\text{g})$ in dit geval zijn ΔH en ΔS negatief (het aantal mol gas neemt af).

Voor de ontleding van ammoniak in de elementen geldt het omgekeerde:
 $2 \text{NH}_3(\text{g}) \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g})$ (ΔH is positief, ΔS is positief).

Het gevolg is dat beide reacties gelijktijdig plaatsvinden (de reacties zijn 'omkeerbaar'): $\text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 2 \text{NH}_3(\text{g})$

De drijfveer achter de reactie naar rechts is de energieverlaging.
De drijfveer achter de reactie naar links is de entropievergroting.
Hierdoor kan een evenwichtstoestand (zie informatieblok 5) ontstaan, een compromis tussen deze twee drijfveren. Na instelling van het 'dynamisch' evenwicht gaan beide reacties even snel, zodat de concentraties constant blijven. Doordat $\Delta H - T\Delta S = 0$, ofwel $\Delta H = T\Delta S$, geeft de evenwichtstoestand de mogelijkheid om entropieveranderingen te bepalen.

Informatieblok 5

Scheikunde: chemische evenwichten

Batterijen leveren stroom, maar veel batterijen kun je ook opladen. Er zijn zonnebrillen waarvan de glazen in het licht donker worden, in het donker licht. Je kunt water ontleden in waterstof en zuurstof, maar ook water maken uit waterstof en zuurstof. De overeenkomst bij deze zeer verschillende situaties is dat de optredende reacties in beide richtingen kunnen verlopen, ze zijn omkeerbaar ('reversibel'). We bekijken de situatie bij water nader.

Ontleding: $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$

Vorming: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Bij bepaalde temperaturen (in dit geval boven 1500 °C) verlopen de twee reacties tegelijk:

$2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$

Men spreekt hier van chemisch evenwicht, de dubbele pijl wordt uitgesproken als "in evenwicht met". Het is ook een dynamisch evenwicht, want de twee reacties blijven na evenwichtinstelling doorgaan.

Wel veranderen de concentraties van de reagerende stoffen niet meer, er wordt in een bepaalde tijd evenveel water ontleed als gevormd.

De voorwaarden voor evenwicht sluiten aan bij het hiervoor gaande verhaal over energie en entropie. Exotherme reacties kunnen omkeerbaar zijn als de entropie afneemt, endotherme als de entropie toeneemt.

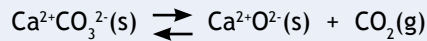
Er zijn homogene en heterogene evenwichten. Bij homogene evenwichten bevinden alle reagerende stoffen zich in oplossing of in de gasfase, bij heterogene evenwichten niet. Dan reageert bijvoorbeeld een vaste stof met een opgeloste stof.

Bijna alle reacties zijn omkeerbaar. Dat een reactie toch als aflopend (= niet-omkeerbaar) wordt beschouwd, kan verschillende oorzaken hebben. Dat zijn de temperatuur (zoals bij het voorbeeld van water), een zeer eenzijdige evenwichtsligging en een stof die zich aan het evenwicht onttrekt. Bij een zeer eenzijdige evenwichtsligging is de hoeveelheid

homogene evenwichten

heterogene evenwichten

van de stoffen aan één kant van het evenwichtsteken te verwaarlozen. Het onttrekken van een stof aan het evenwichtsmengsel wordt goed geïllustreerd bij de ontleding van kalksteen (calciumcarbonaat), een heterogeen evenwicht:



In een gesloten ruimte stelt dit evenwicht zich bij verhitting in. In een open ruimte ontsnapt het koolstofdioxidegas, het evenwicht loopt dan naar rechts af. Zo werd vroeger in kalkovens ongebluste kalk (calciumoxide) uit schelpen (hoofdbestanddeel kalksteen) bereid.

Ook de in deze module behandelde redoxreacties zijn in principe omkeerbaar.

Reflectievragen en opdrachten

9. Opdracht

Als we een oplossing van zilvernitraat mengen met een oplossing van ijzer(II)sulfaat, stelt zich het volgende evenwicht in:



Beredeneer met gebruik van het begrip entropie of het enthalpie-effect voor de reactie naar rechts positief of negatief is..

10. Opdracht

dissociatie

Als de temperatuur hoog genoeg is, vallen alle moleculen uiteen in atomen. Dit proces heet dissociatie. Bij de dissociatie van chloormoleculen in de gasfase is de enthalpieverandering 243 kJ mol^{-1} . De entropieverandering bij dit proces bedraagt $109 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.

- Leg met een berekening uit of dissociatie van chloor bij $25 \text{ }^\circ\text{C}$ een spontaan proces is.
- Bereken de minimale temperatuur waarbij de dissociatie van chloor verloopt.

11. Opdracht

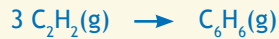
In groene planten wordt onder invloed van zonlicht glucose gemaakt uit koolstofdioxide en water (fotosynthese).



- Bereken de reactie-enthalpie van dit proces. Hint: kijk naar het omgekeerde proces.
- Bereken de entropieverandering tijdens dit proces. De absolute entropie van glucose is $212 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$. Overige gegevens staan in ► tabel 63 van Binas.
- Bereken $\Delta H - T\Delta S$ voor de vorming van één mol glucose bij $25 \text{ }^\circ\text{C}$ en 1 bar.
- Verklaar dat het proces toch verloopt, terwijl dit op basis van de berekening in vraag c onmogelijk is.

12. Opdracht

De omzetting van ethyn in benzeen wordt weergegeven met de reactievergelijking:



Ga door berekening na of dit proces bij 25 °C en 1 bar kan verlopen.

4.4 Modellen voor Blue Energy

Zoals besproken in hoofdstuk 3 zijn er twee manieren om uit stromend water energie op te wekken. De eerste manier maakt gebruik van hoogteverschillen, de tweede (Blue Energy) van (zout)concentratieverschillen. We vergelijken beide vormen van energie-opwekking.

Ook in Nederland is er hoogteverloop, al is er tussen Lobith en Hoek van Holland over een lengte van ongeveer 200 kilometer een verval van amper tien meter. Deze situatie verschilt aanmerkelijk met die in alpenlanden, waar op grote schaal dankbaar gebruik wordt gemaakt van stromend water. Bij stromend water komt tien meter verval overeen met een waterdruk van 1 bar (= $1 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \times 10^5 \text{ N m}^{-2}$).

osmotisch drukverschil

Bij het mengen van zoet en zout water spreekt men ook over een drukverschil: het osmotisch drukverschil, een begrip dat ook veel in de biologie wordt gebruikt. Als een zoutoplossing via een semi-permeabele (= halfdoorlaatbare) membraan in contact staat met water, verplaatsen watermoleculen zich uit het water door de membraan naar de zoutoplossing. Als de zoutoplossing zich in een verticale buis bevindt, komt er dus een hoogteverschil tussen de vloeistofspiegels: de osmotische druk. Dit is de druk die de waterkolom levert in de evenwichtsituatie. Die evenwichtsituatie ontstaat zodra de druk van toegevoegde waterkolom even groot is als de kracht waarmee het water naar de kant met de sterkste concentratie wordt gedreven.

De formule van de osmotische druk p van een keukenzoutoplossing luidt:

formule 5 $p = 2cRT$

waarin:

c = concentratie zout in mol per liter (mol L^{-1})

R = algemene gasconstante ($8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

T = temperatuur in kelvin (K).

Die factor 2 komt doordat keukenzout zich in twee ionen splitst (Na^+ en Cl^-).

Het is misschien wat vreemd dat in bovengenoemde formule de gasconstante R staat. Zoals je wellicht gezien hebt vertoont de formule overeenkomsten met de algemene gaswet: $pV = nRT$. Hierin is p de druk en V het volume, n staat voor de hoeveelheid gas. De Nederlander

van 't Hoff heeft bewezen dat deze formule ook toegepast kan worden op oplossingen. Voor een concentratie van een zout geldt $c = n/V$. Substitutie in de gasformule geeft dan $p = 2cRT$. Je ziet in deze formule dat de osmotische druk recht evenredig is met de concentratie opgeloste deeltjes. Van't Hoff heeft voor zijn werk op het gebied van osmose de Nobelprijs gekregen. Wil je meer weten over osmose kijk dan in een leerboek biologie.

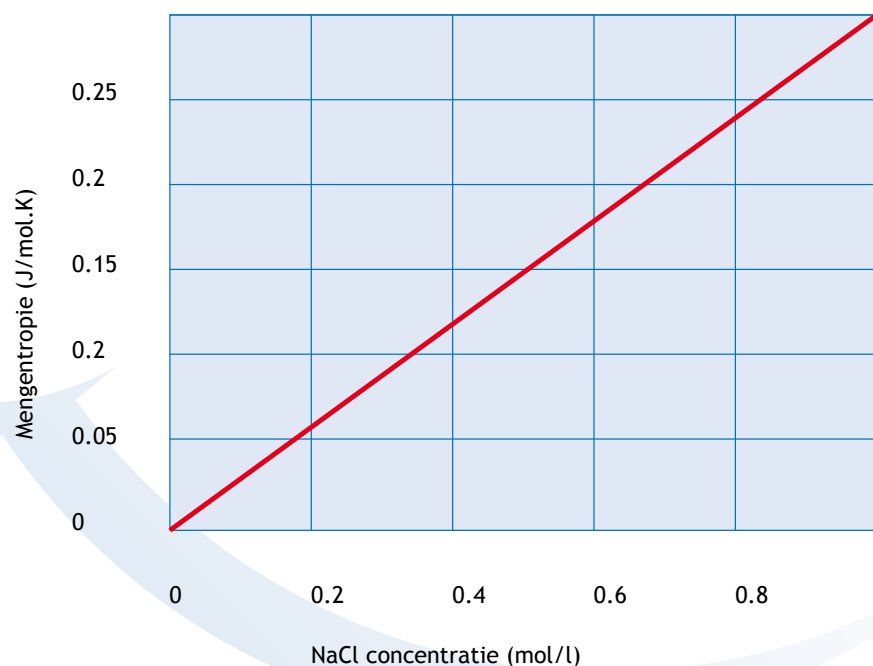
We kunnen de energie-opwekking uit Blue Energy ook verklaren door gebruik te maken van de regels voor het verloop van reacties en het begrip entropie. Hiervoor gebruiken we twee verschillende modellen.

Model 1

We volgen 1 liter rivierwater bij het uitstromen in de zee en nemen in dit model aan dat deze met oneindig veel liters zeewater gemengd wordt, zodat de zoutconcentratie van het gemengde water gelijk is aan die van de zee. We nemen verder aan dat het rivierwater geen zout bevat en dat in zee uitsluitend keukenzout is opgelost. Tenslotte verwaarlozen we temperatuurverschillen en dichtheidsverschillen tussen rivierwater, zeewater en het verkregen brakke water.

De te winnen energie komt dan uitsluitend uit de entropietoename. Met deze aannames is deze energie gelijk aan $T\Delta S$. Als de entropietoename ('mengentropie') bekend is, is de vrijgekomen energie vrij eenvoudig te berekenen.

Dit model wordt gebruikt in opdracht 14.1.



Figuur 13: Entropieverandering van een NaCl oplossing bij menging met een oneindige hoeveelheid geconcentreerde NaCl oplossing

Model 2

In Model 1 werd verondersteld dat 1 liter rivierwater mengt met oneindig veel liters zeewater. Het is reëler om een formule te ontwikkelen waarin nog oningevulde volumes voorkomen. De energie ΔE (in joule) die bij menging vrij komt is dan te berekenen met:

formule 6
$$\Delta E = 2RT \left[c_z \cdot V_z \cdot 2,3 \cdot \log \left(\frac{c_z}{c_m} \right) + c_r \cdot V_r \cdot 2,3 \cdot \log \left(\frac{c_r}{c_m} \right) \right]$$

waarin:

R = gasconstante (8,31 J mol⁻¹ K⁻¹)

T = temperatuur in kelvin (K)

V_z, V_r = volumes in liters (L) van het te mengen zeewater en rivierwater

c_z, c_r, c_m = concentraties zout in mol per liter (mol L⁻¹) in respectievelijk zeewater, rivierwater en het gemengde water.

De factor 2 komt weer doordat keukenzout in de oplossing in twee ionsoorten gesplitst is. Bekijk eventueel informatieblok 6 voor meer informatie over de logaritme.

Dit model wordt gebruikt in opdracht 14.3.

Informatieblok 6

Wiskunde: logaritme

De logaritme is een wiskundige functie, gewoonlijk afgekort tot log. De logaritme van een getal wordt berekend op basis van een grondtal. Er zijn oneindig veel logaritmen mogelijk. Praktisch worden er twee systemen gebruikt. Deze zijn ook te vinden op de meeste rekenmachines.

- Logaritmen met grondtal 10. Men spreekt van de Briggse logaritme en noteert deze als log.
- Logaritmen met grondtal e. Men spreekt van natuurlijke logaritme, of Neperiaanse of Neperse logaritme, naar de uitvinder John Napier. De natuurlijke logaritme wordt vaak genoteerd als ln.

De logaritme voor het grondtal a van een getal x is de macht waartoe men het grondtal moet verheffen om x als uitkomst te krijgen, dus:

$$q = \log_a(x) \Leftrightarrow a^q = x.$$

Of anders geschreven:

$$a^{\log_a(x)} = x.$$

Rekenregels

Al eeuwen geleden was de logaritme belangrijk voor mensen die veel moesten rekenen.

Een eigenschap van logaritmen is namelijk dat een vermenigvuldiging omgezet kan worden naar een optelling:

$$\log(a) + \log(b) = \log(ab)$$

Delen: door logaritmen af te trekken kunnen ook delingen uitgevoerd worden.

$$\log(a) - \log(b) = \log\left(\frac{a}{b}\right)$$

Machtsverheffen: neemt men twee maal achter elkaar de logaritme dan kan men door op te tellen een getal verheffen tot een willekeurige macht.

$$\log [\log(a)] + \log(b) = \log [\log (a^b)]$$

Wortels: neemt men twee maal achter elkaar de logaritme dan kan men door af te trekken een willekeurige wortel trekken.

$$\log [\log(a)] - \log(b) = \log \left[\log \left(a^{\frac{1}{b}} \right) \right] = \log [\log({}^b\sqrt{a})]$$

(Bron: ► <http://nl.wikipedia.org/wiki/Logaritme>)

Reflectievragen en opdrachten over Blue Energy

13. Vraag

Zout en zoet water mengen spontaan tot 'brak' water. Bij de menging van een liter zoet water met een liter zout water is de temperatuursverandering te verwaarlozen.

- Wat betekent dit voor de mengenthalpie ΔH ?
- Waardoor (volgens welke regel(s)) mengen zoet en zout water?

14.1 Model 1

In deze opdracht ga je uit van Model 1. In dit model mengt 1 liter rivierwater met oneindig veel liters zeewater.

- Hoeveel mol water bevat de liter rivierwater?
- Hoe groot is in model 1 de beginconcentratie keukenzout van rivierwater en hoe groot is de eindconcentratie van het verkregen mengsel (beide in mol L⁻¹)? Neem hiervoor een goede aanname van de molariteit van het zout in het zeewater.
- Bepaal de entropieverandering (in J mol⁻¹K⁻¹) uit figuur 13.
- Bereken $T\Delta S$ in die liter rivierwater ($T = 15^\circ\text{C}$).
- Hoeveel energie (in kJ) gaat er volgens dit model verloren bij het uitstromen van 1 liter rivierwater in zee? Vul dit in de tabel van figuur 14 in.
- In Nederland stroomt gemiddeld 3.3 miljoen liter zoet water per seconde uit in zee. Hoeveel vermogen (in MW) gaat er daarmee (volgens model 1) verloren? Vul dit in de tabel van figuur 14 in.

14.2 Blue Energy versus stromend water

In deze opdracht vergelijk je de energie uit Blue Energy die je in opdracht 14.1 hebt berekend, met de energie die opgewekt kan worden uit stromend water.

- Wanneer water omlaag valt (bijvoorbeeld in een waterval) gaat ook energie verloren. Bereken over welke afstand een liter water naar beneden zou moeten vallen om dezelfde hoeveelheid energie te 'verliezen' als bij het uitstromen van rivierwater in zee (antwoord vraag 14.1d). Zie eventueel informatieblok 3.

- b. Bereken voor Nederland hoeveel energie verloren gaat als een liter rivierwater van Lobith naar Hoek van Holland stroomt en bereken het totale energieverlies van stromend rivierwater in Nederland. Vul je antwoorden in de tabel van figuur 14 in.
- c. Bereken met behulp van het antwoord uit vraag 14.2a het osmotische drukverschil tussen rivierwater en zeewater.

| Energie-leverancier | kJ L^{-1} | Mogelijk geleverd vermogen voor Nederland (MW) |
|---------------------|--------------------|--|
| a. Blue Energy | (opdracht 14.1c) | (opdracht 14.1d) |
| b. Waterkracht | (opdracht 14.2b) | (opdracht 14.2b) |

Figuur 14: vergelijking waterkracht en Blue Energy

14.3 Model 2

Je gaat de berekening van opdracht 14.1 met Model 2 preciezer uitvoeren. Het grootste verschil is dus dat je met reële volumeverhoudingen tussen rivier- en zeewater werkt.

- a. Stel we mengen in de centrale 1 liter zeewater en 1 liter rivierwater. Hoe groot wordt de concentratie in het gemengde water, c_m ?
- b. Hoe groot is ΔE ? Vergelijk je antwoord met opdracht 14.1c.
- c. Vul de tabel van figuur 15 in. Bereken steeds eerst c_m en bepaal welke verhouding het beste is voor een Blue Energy centrale.

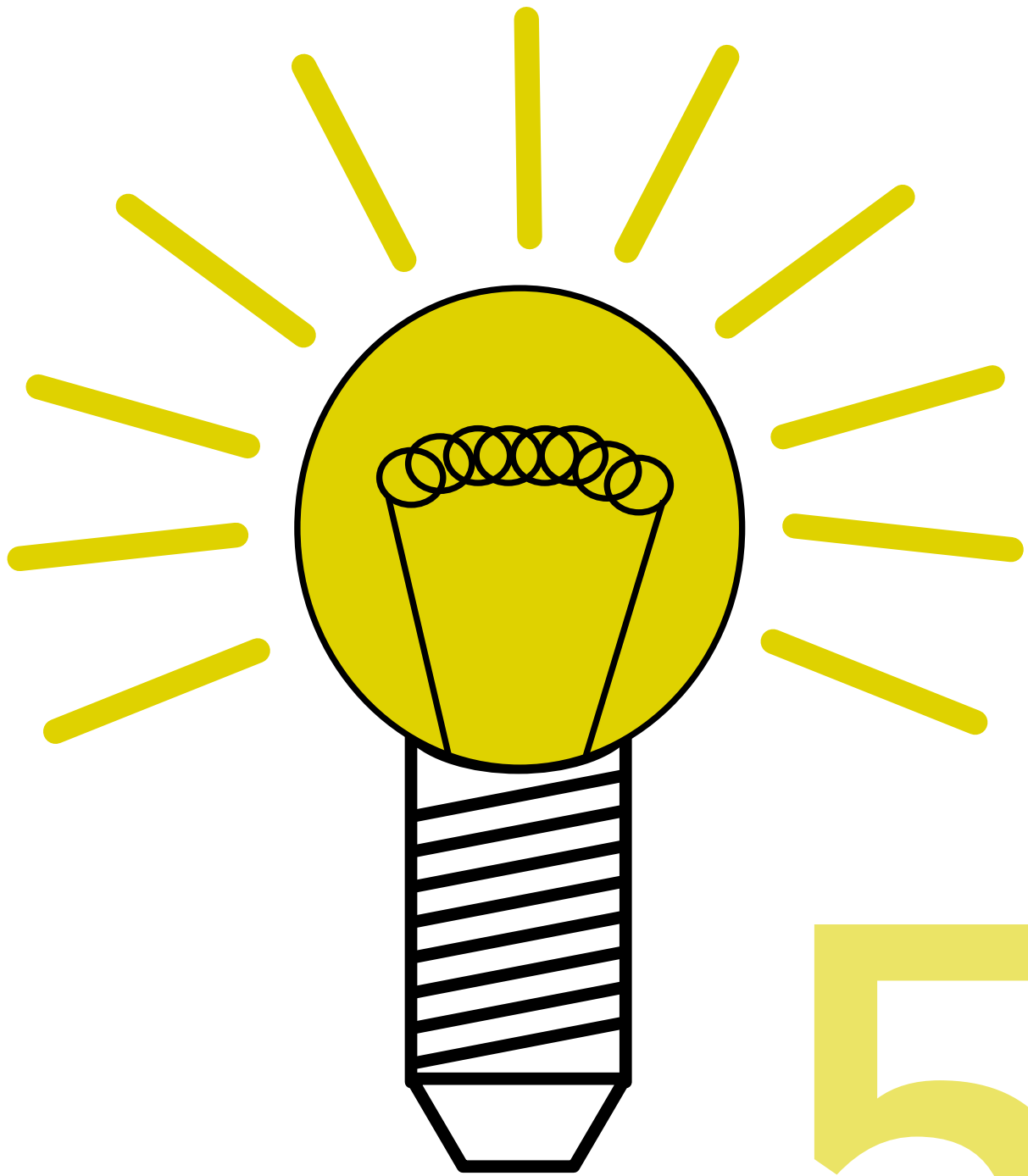
| V_r (m^3) | V_z (m^3) | W (MJ m^{-3} rivierwater) | W (MJ m^{-3} mengwater) | Opmerking |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | ∞ | | | zie ook 14.1c |
| 1 | 2 | | | |
| 1 | 1 | | | zie ook 14.3b |
| 2 | 1 | | | |
| ∞ | 1 | | | Neem voor ∞ een groot getal |

∞ = oneindig

Figuur 15: mengenergie bij verschillende mengverhoudingen

Spreken deze opdrachten jou aan? Dan is de specialisatie als onderzoeker wat voor jou.





5

5

Hoe zetten we Blue Energy om in elektriciteit?

In de vorige hoofdstukken heb je geleerd dat met de Blue Energy techniek energie gewonnen kan worden uit zoutconcentratieverschillen in rivier- en zeewater.

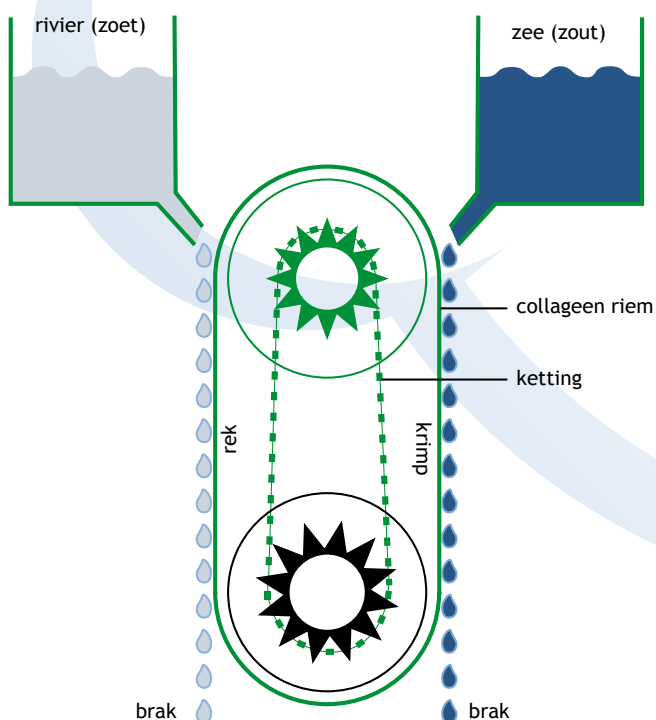
- Dit hoofdstuk laat je zien met welke technieken je zoutgradiënten kunt gebruiken om energie te winnen.
- Daarnaast leer je wat dat voor Blue Energy betekent en hoe energie wordt opgewekt uit het mengen van zoet en zout water.
- Je leert hier ook over redoxreacties, redoxpotentialen en membraanpotentialen.

5.1 Vier productietechnieken

De voordelen van Blue Energy zijn groot. Deze energie is duurzaam, want uiteindelijk is de zon de energiebron. Er komen geen broeikasgassen vrij zoals koolstofdioxide en geen vervuilende gassen als zwavel- en stikstofoxiden. Bovendien zijn de benodigde watersoorten gratis en vrijwel ongelimiteerd voorhanden.

Het principe van de energiewinning uit stromend water verschilt niet van dat van de oudervetse fietsdynamo of de turbine in een elektriciteitscentrale. De uitdaging bij Blue Energy is het vinden van een productietechniek met een goed rendement, zodat weinig energie verloren gaat.

We bespreken vier manieren om de zoutgradiënt te gebruiken voor energiewinning.



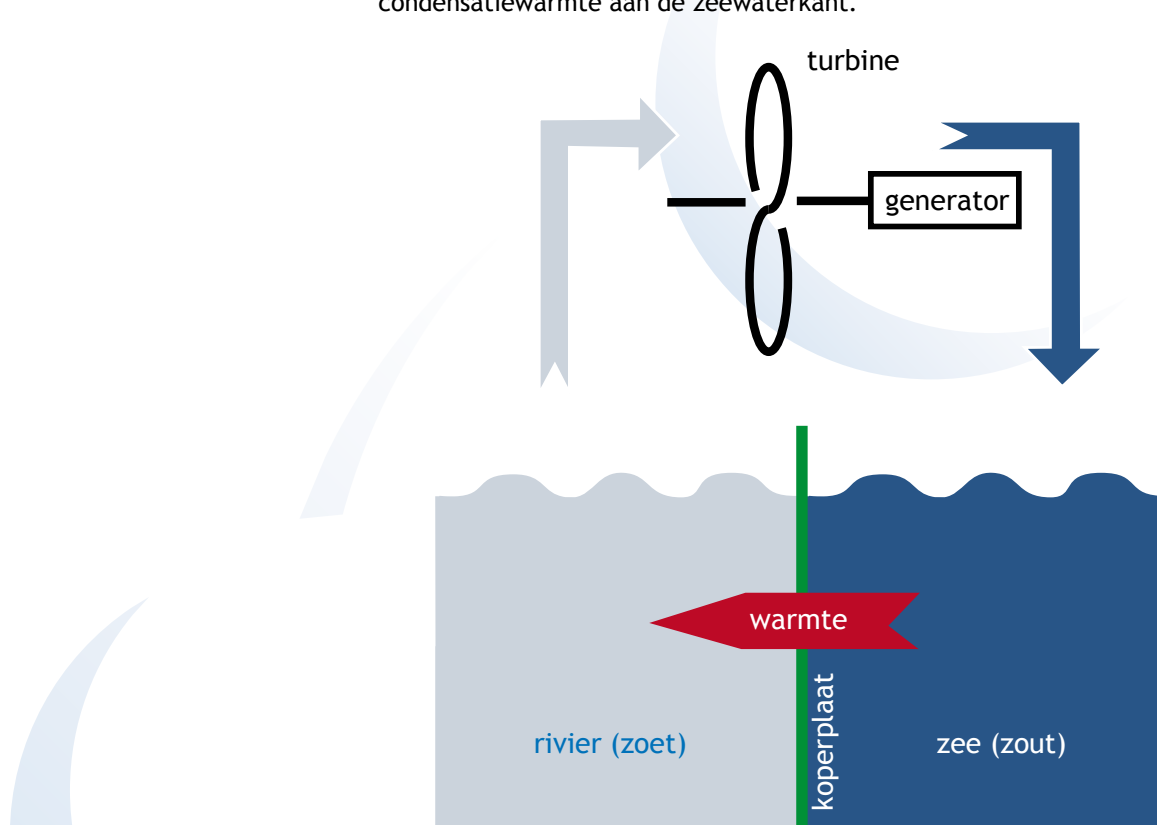
Katchalsky-machine

Een techniek die is bedacht door de Israëlische biofysicus Katchalsky (1914-1972). Hij constateerde dat sommige vezels in zout water krimpen en in zoet water weer rekken. In principe is dat voldoende om een machine aan te drijven en er zijn werkende modellen gemaakt. Een riem van collageen (een lijmvormend eiwit, hoofdbestanddeel van bindweefsel) draait over twee schijven (pulley's). De schijven zijn met een ketting verbonden via tandwielen met verschillende diameter. Het collageen wordt beurtelings bevochtigd door zout water waardoor het materiaal krimpt en door zoet water waardoor het weer oprekt.

Figuur 16: energiewinning uit zoutgradiënt. Katchalsky-machine

Vapor Pressure Difference Utilization (VPDU)

Deze methode maakt gebruik van verschillen in dampdruk boven het zoute water en het zoete water. In de opstelling staat een vat met twee compartimenten, gescheiden door een koperen plaat. Door drukverschillen tussen de damp boven het zoete water en die boven het zoute water ontstaat een waterdampstroom in de richting van het zoute water. In deze dampstroom zet een turbine de kinetische energie van de watermoleculen om in elektrische energie. Het verdampende water koelt af en wordt via de warmtewisselaar weer op temperatuur gebracht door de condensatiewarmte aan de zeewaterkant.



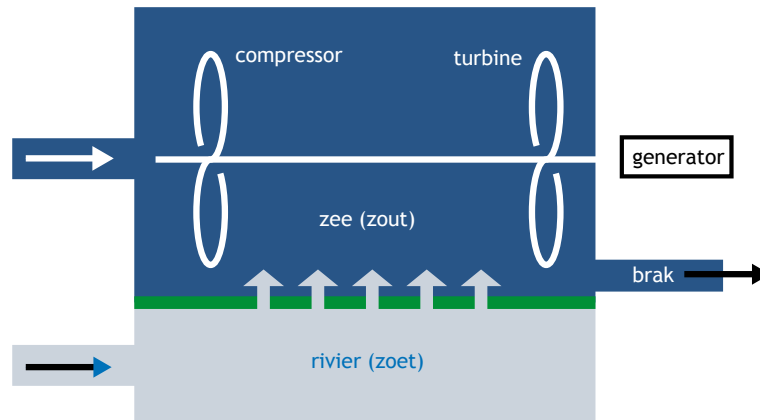
Figuur 17: energiewinning uit zoutgradiënt. Vapor Pressure Difference Utilization

Pressure Retarded Osmosis (PRO)

Deze methode berust op osmose. Zout en zoet water worden in een drukkamer gepompt, van elkaar gescheiden door een halfdoorlatend membraan. Door het osmotisch drukverschil zal het zoete water door het membraan heen naar het zoutwatercompartiment stromen. Daardoor neemt in het zoutwatercompartiment de waterdruk toe, waardoor het water het compartiment uitstroomt en daarbij een turbine aandrijft.

Deze methode wordt 'pressure retarded' (druk gelimiteerde) osmose genoemd, omdat het rivierwater tegen de waterdruk in door het membraan getransporteerd wordt. Het vermogen is maximaal bij een waterdruk die gelijk is aan de helft van het osmotisch drukverschil tussen rivier- en zeewater. Het geleverde vermogen is het product van de waterdruk en het debiet (de hoeveelheid water die per seconde door de drukkamer stroomt).

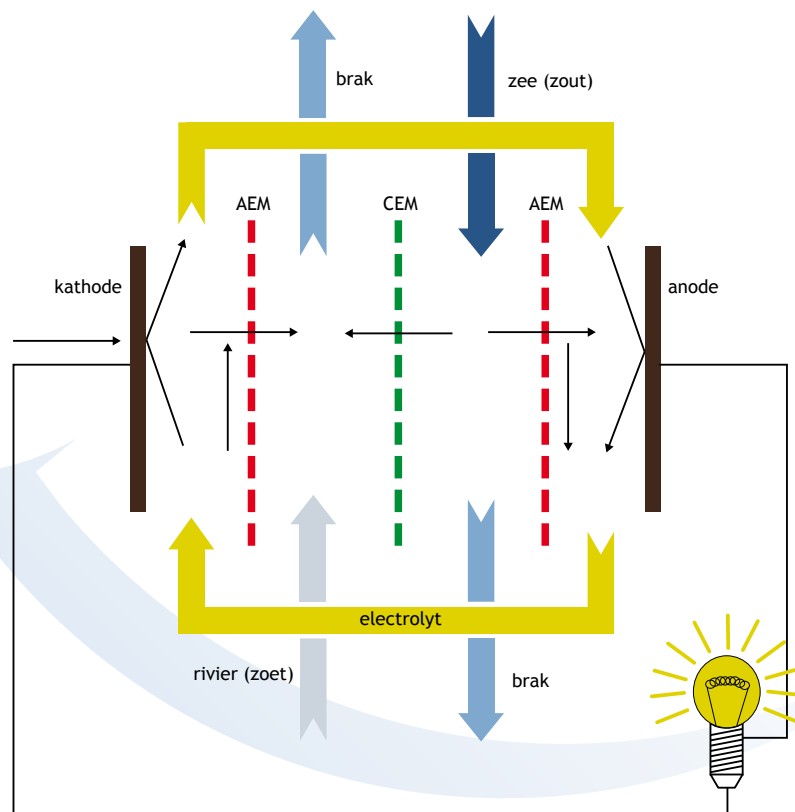
Met name in Noorwegen is een kleine groep van het energiebedrijf Statkraft bezig deze techniek te onderzoeken.



Figuur 18: energiewinning uit zoutgradiënt. Pressure Retarded Osmosis.

Reverse Electrodialysis (RED)

De hiervoor genoemde technieken gebruiken mechanische methoden om elektrische energie op te wekken. Het voordeel van Reverse Electrodialysis (RED) is dat de installatie geen bewegende onderdelen bevat voor de directe productie, hoewel er wel pompen nodig zijn voor de aanvoer van zoet en zout water en voor de elektrodespoeling. Op deze techniek zullen we verder ingaan.

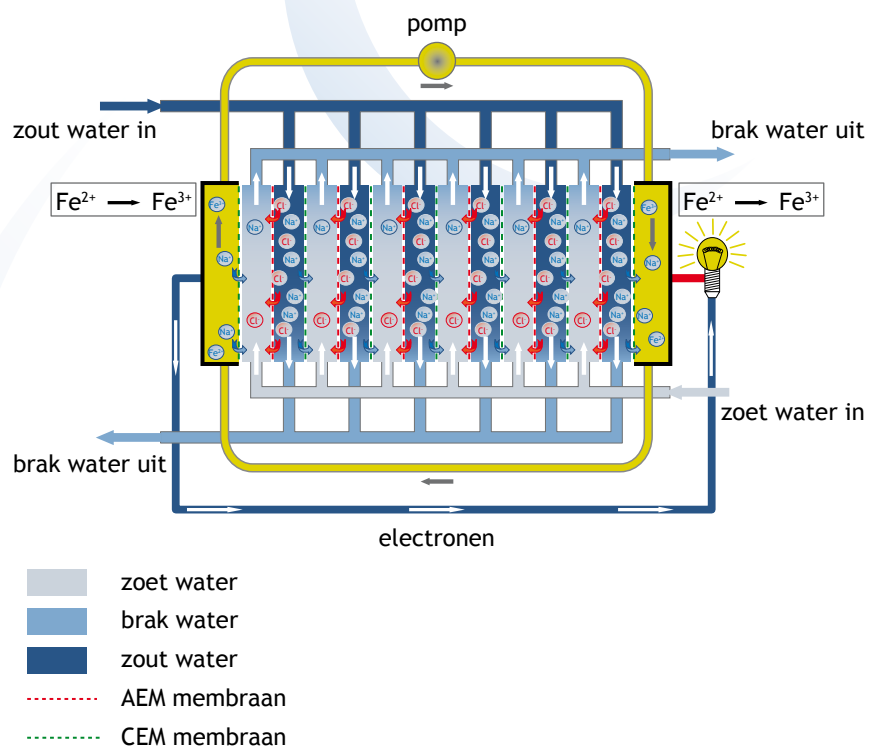


Figuur 19: energiewinning uit zoutgradiënt. Reverse Electrolyses.

5.2 Directe elektriciteitsproductie met RED

Doe nu klassikaal het intro-experiment. Vraag je docent om verdere informatie.

In figuur 20 staat een schematische tekening van de opstelling voor elektriciteitsopwekking met RED. De opstelling bestaat uit twee delen: de door membranen gescheiden compartimenten, waar het water doorheen stroomt (blauw in figuur 20) en de elektroden waar de elektriciteit wordt opgewekt (zwart).



Figuur 20: Reverse Electro Dialysis (RED) ofwel omgekeerde electroodialyse

Door de compartimenten stroomt zeewater en rivierwater, van elkaar gescheiden door membranen. Het zeewater en rivierwater kunnen nu niet mengen, want de membranen laten geen water door. De in het zeewater opgeloste ionen kunnen wel door de membranen diffunderen. De membranen hebben speciale eigenschappen, waardoor de natriumionen en de chlorideionen in het zeewater allebei een andere kant op diffunderen. In de tekening gaan de negatieve chloride-ionen naar links en de natriumionen naar rechts. Beide ionenstromen veroorzaken dus een (positieve) stroom naar rechts. Deze ionenstroom moet nog omgezet worden in een elektronenstroom, ofwel elektriciteit. Dit gebeurt aan de elektroden, door middel van redoxreacties, waarbij aan de ene elektrode (de anode, in de figuur links) een elektron vrijkomt ($\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$), dat

vervolgens door een stroomdraad de andere elektrode (de kathode, in de figuur rechts) stroomt, waar het weer wordt gebruikt ($\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$).

We bekijken nu de twee onderdelen van de RED (de membraan-gescheiden compartimenten en de elektrodes) in meer detail.

Compartimenten en membranen

ionenwisselende membranen

anionwisselend membraan kationwisselend membraan

Het hart van de RED bestaat uit zoetwater- en zoutwatercompartimenten, die gescheiden worden door ionenwisselende membranen. De RED-installatie heeft twee typen membranen, die beide geen water doorlaten: een anionwisselend membraan (anion exchange membrane, AEM) en een kationwisselend membraan (cation exchange membrane, CEM).

De anionwisselende membranen kunnen alleen anionen - negatieve ionen, bijvoorbeeld chloride uit het zeewater - transporteren. De kationwisselende membranen kunnen alleen kationen - positieve ionen, bijvoorbeeld natrium uit het zeewater - transporteren. De installatie bevat afwisselend CEM's en AEM's, zie figuur 20.

skelet

Als we meer in detail kijken hoe die membranen zijn opgebouwd, blijken alle hier gebruikte ionenwisselende membranen te bestaan uit twee delen: een skelet en een ionenwisselende groep. Het skelet bestaat uit organische polymeren (macromoleculen) zoals polyetheen, polystyreen of PVC. Polyetheen is het goedkoopste plastic, er worden ook vuilniszakken van gemaakt. Het verschil tussen CEM en AEM membranen heeft te maken met de ionenwisselende groep. Bij CEM is de ionenwisselende groep

CEM

ionenwisselende groep

doorgaans het natriumzout $-\text{SO}_3^-\text{Na}^+$. Het teken $-$ geeft de binding van de sulfonzuurrest met het vaste skelet aan. Het membraan bevat dus grote (negatieve) sulfanaationen en kleine (positieve) natriumionen. Daardoor is dit membraan uitsluitend doorlaatbaar voor positieve deeltjes: een aan één kant ingebracht natriumion neemt de plaats in van een ander natriumion. Dat andere ion gaat naar een volgende plaats, enz. enz. enz.

Helemaal aan de andere kant verlaat een Na^+ ion het membraan.

Het membraan laat uitsluitend Na^+ ionen door en geen Cl^- ionen. De laatste kunnen het membraan niet binnendringen als gevolg van de afstoting tussen twee minladingen.

AEM

Bij AEM is de actieve groep ook een zout, gebonden aan het skelet.

Een eenvoudig zout is $-\text{NH}_3^+\text{Cl}^-$. Het AEM-membraan laat uitsluitend Cl^- ionen door. Na^+ ionen kunnen het membraan niet binnendringen als gevolg van de afstoting tussen twee positieve ladingen. Er zijn ook AEM-membranen waarin de waterstofatomen vervangen zijn door methylgroepen. De formule van deze ionenwisselende groep is $-\text{N}(\text{CH}_3)_3^+\text{Cl}^-$.

De ruimtes tussen de membranen, de compartimenten, worden afwisselend doorspoeld met zeewater en met rivierwater, die van elkaar gescheiden blijven door de membranen die geen water doorlaten. De opgeloste zoutionen van het zeewater kunnen wel mengen met de zoutionen van het rivierwater. Natriumionen in het zeewater kunnen alleen diffunderen door

het CEM en bewegen in de tekening naar rechts en veroorzaken zo een positieve ionenstroom naar rechts. De chlorideionen passeren de AEM en vormen zo een negatieve ionenstroom naar links, die opgevat kan worden als een positieve stroom naar rechts.

Redoxreacties

redoxreacties

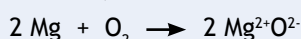
De ionenstroom moet nu nog omgezet worden in een elektronenstroom, ofwel elektriciteit. Dit gebeurt aan de elektroden, door middel van redoxreacties, dat zijn chemische reacties waarbij elektronenoverdracht plaatsvindt. In informatieblok 7 wordt iets meer over redoxreacties uitgelegd.

Informatieblok 7

zuur-basereacties
redoxreacties en restgroep

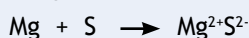
Scheikunde: redoxreacties

Een veelgebruikte indeling in reactietypes geeft de driedeling zuur-basereacties (overdracht van protonen, H^+), de voor deze module belangrijke redoxreacties (overdracht van elektronen, e^-) en een restgroep. Oorspronkelijk sprak men uitsluitend over oxidatie in een reactie met zuurstof, zoals de verbranding van magnesium:

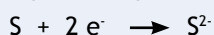
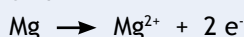


Een magnesiumatoom staat twee elektronen af aan een zuurstofatoom.

Dit gebeurt ook in de reactie van magnesium met bijvoorbeeld zwavel:



Je kunt het begrip oxidatie dus verbreden door dit niet uitsluitend te koppelen aan zuurstof, maar aan elektronenoverdracht. We spreken dan van redoxreacties (redox is de afkorting van reductie-oxidatie), die vaak gesplitst worden in twee halfreacties:



Het deeltje dat bij een redoxreactie elektronen afstaat heet de reductor, het deeltje dat elektronen opneemt de oxidator. Het proces geef je als volgt weer:



De twee deeltjes die betrokken zijn bij een halfreactie noem je een redoxkoppel (hier zijn dat de koppels Mg/Mg^{2+} en S/S^{2-}). In ► Binas tabel 48 staan redoxkoppels met hun oxidatorsterkte. De deeltjes zijn gerangschikt naar afnemende oxidatorsterkte, linksboven staan de sterkste oxidatoren en naar beneden toe neemt de oxidatorsterkte af. Rechtsonder staan de sterkste reductoren en naar boven toe neemt de reductorsterkte af. Een redoxreactie verloopt spontaan als de oxidator boven de reductor staat. Als oxidator en reductor bij elkaar in de buurt staan, treedt een evenwichtsreactie op. Staat de oxidator ruim onder de reductor, dan treedt er geen reactie op.

Bij de hierboven beschreven reacties en ook bijvoorbeeld bij roesten

17. Opdracht

Stel via halfreacties de reactievergelijkingen op voor de volgende reacties:

- koper met zuurstof
- aluminium met jood
- chloor met aluminiumjodide-oplossing
- nikkel met kobalt(II)chloride-oplossing
- calcium met water

18. Opdracht

Ga na of volgens ► tabel 48 van Binas de volgende reacties kunnen verlopen. Als een reactie verloopt, geef je via halfreacties de reactievergelijking:

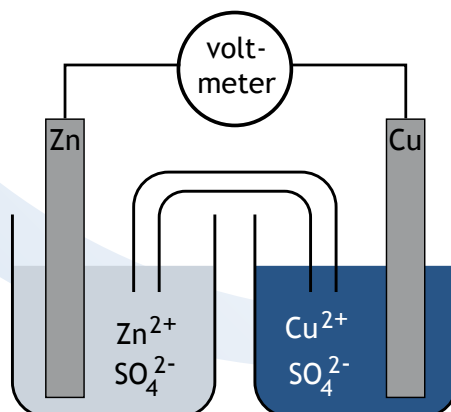
- ijzer(III)chloride-oplossing met een kaliumjodide-oplossing
- een natriumthiosulfaat($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$)-oplossing met een broomoplossing
- een ijzer(III)nitraat-oplossing met zoutzuur

De RED werkt als een elektrochemische cel. Een voorbeeld van zo'n cel is de Daniell-cel, waarover de volgende demonstratieproef gaat.

Demonstratieproef: de elektrochemische cel

Als voorbeeld van een elektrochemische cel (een batterij) wordt de Daniell-cel genomen. Dit is één van de oudst bekende cellen, genoemd naar de Engelse natuurkundige J.F. Daniëll (1790-1845). Deze cel wordt als volgt gebouwd (figuur 21):

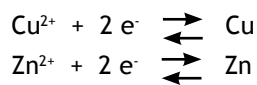
- Halfcel I bestaat uit een bekglaasje met daarin een 1,0 M CuSO_4 -oplossing. Hierin staat een koperstaaf.
- Halfcel II wordt op dezelfde manier opgebouwd als halfcel I, maar nu met een zinkstaaf in een 1,0 M ZnSO_4 -oplossing.
- De koperstaaf en de zinkstaaf worden, via snoertjes en een lampje met elkaar verbonden. Er wordt ook een voltmeter aangesloten.
- Beide halfcellen worden verbonden met een zoutbrug.



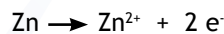
Figuur 21: Daniell cel

- Bepaal met behulp van de voltmeter de (+) en de (-) pool.
- Wat is nu de richting van de elektronenstroom door de snoertjes?
- Bedenk de reactievergelijking voor het proces dat optreedt aan de koperelektrode.
- Bedenk ook de reactievergelijking voor het proces dat optreedt aan de zinkelektrode.
- Na verloop van enige dagen zal er een einde komen aan de stroomlevering door de Daniell-cel. Bedenk hiervoor twee mogelijke oorzaken.

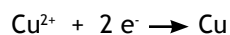
We meten een spanning, er loopt een stroom. Hoe kan dit? Beide halfcellen bevatten deeltjes, namelijk metaalatomen en ionen van dat metaal die in elkaar kunnen overgaan:



Zink is onedeler dan koper, waardoor zink makkelijker elektronen afstaat dan koper. In dit geval zal zink in oplossing gaan en maakt dus elektronen vrij. In halfcel II treedt de volgende halfreactie op:



Deze elektronen gaan door de draad naar halfcel I en worden daar opgenomen door koperionen. De volgende halfreactie treedt op in halfcel I:



Hierdoor wordt de koperstaaf steeds dikker en gaat de zinkstaaf in oplossing. De reactie stopt als de koperionen op zijn óf, wat onwaarschijnlijker is, de zinkstaaf op is.

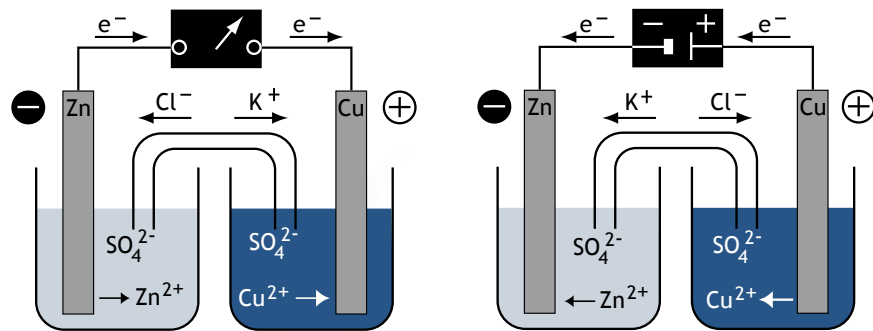
Uit de uitslag van de voltmeter blijkt dat de koperstaaf een hogere potentiaal heeft dan de zinkstaaf. De koperstaaf is dus de + pool en de zinkstaaf de - pool. Dit volgt ook uit de optredende reacties:

- De elektronen worden vrijgemaakt uit Zn en reageren met Cu^{2+} . De zinkstaaf wordt negatief geladen (door de vrijkomende elektronen) en is dus de negatieve elektrode.
- Doordat Cu^{2+} -ionen elektronen opnemen, heerst er aan de koperstaaf continu een elektronentekort. Dit is dus de positieve elektrode. Dit elektronentekort wordt aangevuld door de vrijgekomen elektronen bij de zinkelektrode. Elektronen stromen van - naar +, dus van de zinkstaaf door het snoetje naar de koperstaaf.

De zoutbrug zorgt voor een gesloten stroomkring. Zonder zoutbrug slaat de voltmeter niet uit. De zoutbrug bestaat uit een gel gemaakt met een verzadigde zoutoplossing. De zoutbrug bevat dus veel beweeglijke ionen die de ladingtekorten in de halfcellen aanvullen:

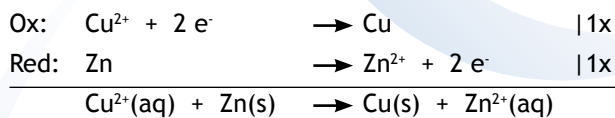
- In halfcel I wordt Cu^{2+} omgezet in Cu. De oplossing in halfcel I wordt steeds negatiever. De zoutbrug compenseert dit door positieve ionen in de oplossing van halfcel I te zenden.
- Dezelfde redenering geldt voor halfcel II. In deze halfcel komen steeds meer Zn^{2+} ionen (de zinkstaaf reageert tot Zn^{2+}), de oplossing wordt dus steeds positiever. Ook dit wordt tegengegaan door de zoutbrug die negatieve ionen in halfcell II brengt.

In figuur 22 zie je hoe het ladingstransport in de Daniell-cel en de vergelijkbare elektrolysecel er schematisch uitziet.



Figuur 22: elektronen- en ionenstroom in een Daniell-cel (links) en een elektrolysecel (rechts)

Dit proces is een voorbeeld van een redoxproces:



Hoeveel spanning kan een dergelijke cel (batterij) leveren? De formule om dit te bepalen is als volgt:

formule 7 $V_{\text{bron}} = V_{\text{ox}} - V_{\text{red}}$

De potentialen voor de halfreacties staat in ► Binas tabel 48 weergegeven. Deze gelden voor standaardomstandigheden (alle concentraties 1,00 M en 298 K en $p = p_0$).

Dit is bij de hier beschreven Daniell-cel het geval. Deze batterij kan dus 1,10 V leveren:

$$V_{\text{bron}} = V_{\text{Cu}^{2+}} - V_{\text{Zn}} = 0,34 \text{ V} - (-0,76 \text{ V}) = 1,10 \text{ V}$$

Reflectievragen en opdrachten

19. Opdracht

Bereken V_{bron} van de volgende cellen en geef aan wat de negatieve elektrode is.

- a. zink-tinzel
- b. aluminium-zilvercel
- c. koper-zilvercel

20. Opdracht

Van een standaard mangaan-loodcel bedraagt de bronspanning 0,90 Volt. Bij stroomlevering door deze cel gaat de mangaanstaaf in oplossing.

- Geef de vergelijkingen van beide halfreacties die optreden tijdens de stroomlevering.
- Beredeneer welke elektrode positief en welke negatief is.
- Bereken V_0 van het redoxkoppel Mn^{2+}/Mn .

Als de concentraties afwijken van 1,00 M, wijken ook de bijbehorende potentialen af van de Binaswaarden. De potentialen zijn dan te berekenen met de vergelijking van Nernst (► Binas tabel 37D):

formule 8
$$V = V_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]} = V_0 + \frac{0,059}{n} \log \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]}$$

waarin:

- V = spanning in volt (V)
- V_0 = elektrodepotentiaal bij standaardomstandigheden (► Binas tabel 48) in volt (V)
- R = gasconstante ($8,314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$, ► Binas tabel 7)
- T = temperatuur in kelvin (K)
- n = aantal mol elektronen dat per mol oxidator wordt overgedragen
- F = constante van Faraday ($9,6485 \cdot 10^4 \text{ Cmol}^{-1}$, ► Binas tabel 7)
- $[\text{ox}]$, $[\text{red}]$ = concentraties van de deeltjes in de halfreactie die in beschouwing genomen wordt. NB: de concentratie van een vaste stof stelt men 1 M, net als in de evenwichtsconstante.

Dit geeft voor een Daniell-cel, waarin de concentratie van de CuSO_4 -oplossing 0,10 M is en die van de ZnSO_4 -oplossing 0,50 M:

Halfcel I:

$$V = 0,34 + \frac{0,059}{2} \log \frac{0,10}{1} = 0,31 \text{ V}$$

Halfcel II:

$$V = -0,76 + \frac{0,059}{2} \log \frac{0,50}{1} = -0,77 \text{ V}$$

$$V_{\text{bron}} = V_{\text{ox}} - V_{\text{red}} = 0,31 - (-0,77) = 1,08 \text{ V}$$

In de vergelijking van Nernst wordt gebruik gemaakt van logaritmes.

Zie zonedig informatieblok 6 voor een herhaling van logaritmes

Reflectievragen en opdrachten

21. Opdracht

- Bereken de bronspanning van een elektrische cel bestaande uit twee koperelektroden, waarbij $[\text{Cu}^{2+}(\text{aq})]$ in de ene halfcel 1.0 M is en in de andere halfcel 10^{-4} M is.
- Welke elektrode is (+) en welke is (-)?
- Hoe gaat de elektronenstroom als de cel gesloten wordt?

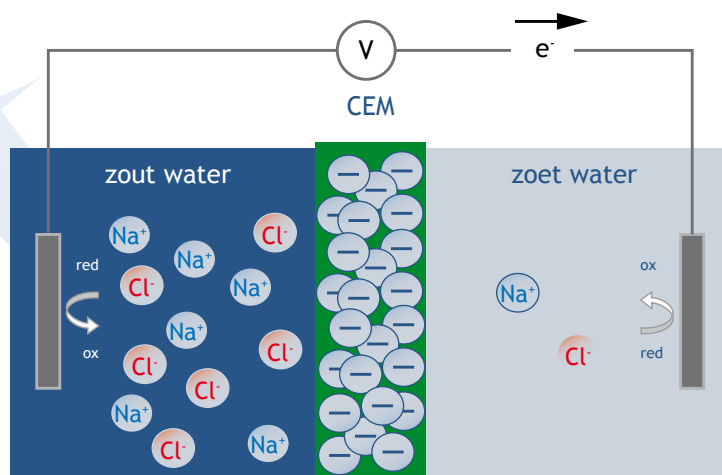
22. Opdracht

- Bereken hoe groot de bronspanning is van een elektrochemische cel bestaande uit een standaard koperhalfcel en een magnesiumhalfcel, waarbij $[\text{Mg}^{2+}(\text{aq})] = 0,10$ M.
- Leg uit dat je niet kunt zeggen dat bij een kleinere concentratie dan 1,0 molair van een metaaloplossing de bronspanning altijd toeneemt.

In de RED (zie figuur 20) wordt een ijzerkoppel gebruikt, waarbij aan de anode (in de figuur links) Fe^{2+} wordt geoxideerd tot Fe^{3+} en aan de kathode (rechts) Fe^{3+} wordt gereduceerd tot Fe^{2+} . Bij de anode komt dus een elektron vrij, die via een stroomdraad naar de kathode stroomt: er wordt een elektrische stroom opgewekt.

Hoewel de werking van de elektrodes bij een RED vergelijkbaar zijn met de werking van een Daniell-cel, is er ook een belangrijk verschil: de RED-elektrodes maken beide gebruik van hetzelfde redoxkoppel $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$. Het spanningsverschil dat ontstaat is dan ook niet het gevolg van de redoxreacties, maar van het iontransport door de membranen. In figuur 23 is dat uitgebeeld voor een CEM. Voor de potentiaal over een membraan geldt een iets aangepaste versie van de Nernst-vergelijking:

formule 9
$$V_{\text{bron}} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{[\text{Na}^+]_z}{[\text{Na}^+]_r} = 0,059 \log \frac{[\text{Na}^+]_z}{[\text{Na}^+]_r}$$



Figuur 23: iontransport door een kationwisselend membraan (CEM)

stack voltage

Door het stapelen van ionenwisselende membranen in een RED ontstaat een opeenstapeling van spanningsbronnen met dezelfde bronspanning. Deze kun je dus bij elkaar optellen. Aan de elektrode van een RED meten we dan de som van alle bronspanningen, het zogenaamde stack voltage.

Reflectievragen en opdrachten

23. Opdracht

Aan het begin van dit hoofdstuk staan vier manieren om concentratieverschillen om te zetten in nuttige vormen van energie:

- Leg uit in welke richting het systeem van Katchalsky draait: rechtsom of linksom?
- Leg uit waar bij VPDU de dampdruk hoger is: boven het zoete of boven het zoute water?
- Leg uit hoe hoog bij PRO de tegendruk is die op het zoute water wordt gezet. Maak gebruik van het antwoord van opdracht 14.2c.
- Schrijf de redoxreactie bij RED op en leg daarmee uit dat de som van de elektrodepotentiaalen (bij gelijke concentraties van Fe^{2+} en Fe^{3+}) nul is.

24.1 Opdracht RED

Uit antwoord 23d blijkt dat de werking van RED verschilt van die van een Daniell-cel. Toch is er ook bij RED een spanningsverschil aan de elektroden. Je gaat bekijken waar dat verschil vandaan komt en hoe groot dat is.

- Neem figuur 23 over. Geef met pijlen aan hoe de menging plaatsvindt en geef een korte uitleg. Wat is de 'drijvende kracht' achter de menging?
- Bereken de membraanpotentiaal bij zeewater met 30 g NaCl L^{-1} en rivierwater met 1 g NaCl L^{-1} .
- Maak een soortgelijk plaatje voor een anionwisselend membraan. Geef met pijlen aan hoe menging plaatsvindt, let hierbij op de redoxreacties en op de richting van de elektronenstroom.
- Bereken de Nernst-potentiaal voor het anion wisselende membraan.
- Leg uit hoe de potentiaal van het anion wisselende membraan verandert als zeewater en rivierwater worden omgewisseld.

24.2 Opdracht RED

In een RED worden anion wisselende membranen en kation wisselende membranen om en om gestapeld tussen wisselende laagjes van zeewater en rivierwater. Bekijk de RED-opstelling in figuur 20.

- De binnenste membranen (11 stuks) zijn geplaatst tussen zeewater en rivierwater. Hoe groot is het voltage van deze membranen bij elkaar opgeteld?

De twee buitenste membranen zijn bijzonder. Ze zijn aan de ene kant geplaatst tussen de elektrodespoelvoelestof en rivierwater, aan de andere kant tussen zeewater en de elektrodespoelvoelestof.

Deze buitenste membranen tellen samen als een enkele:

$$V = V_{links} + V_{rechts} = 0,059 \log \frac{[Na^+]_e}{[Na^+]_r} + 0,059 \log \frac{[Na^+]_z}{[Na^+]_e} = 0,059 \log \frac{[Na^+]_z}{[Na^+]_r}$$

In deze afleiding staat het subscript e voor de elektrodespoelvoelestof.

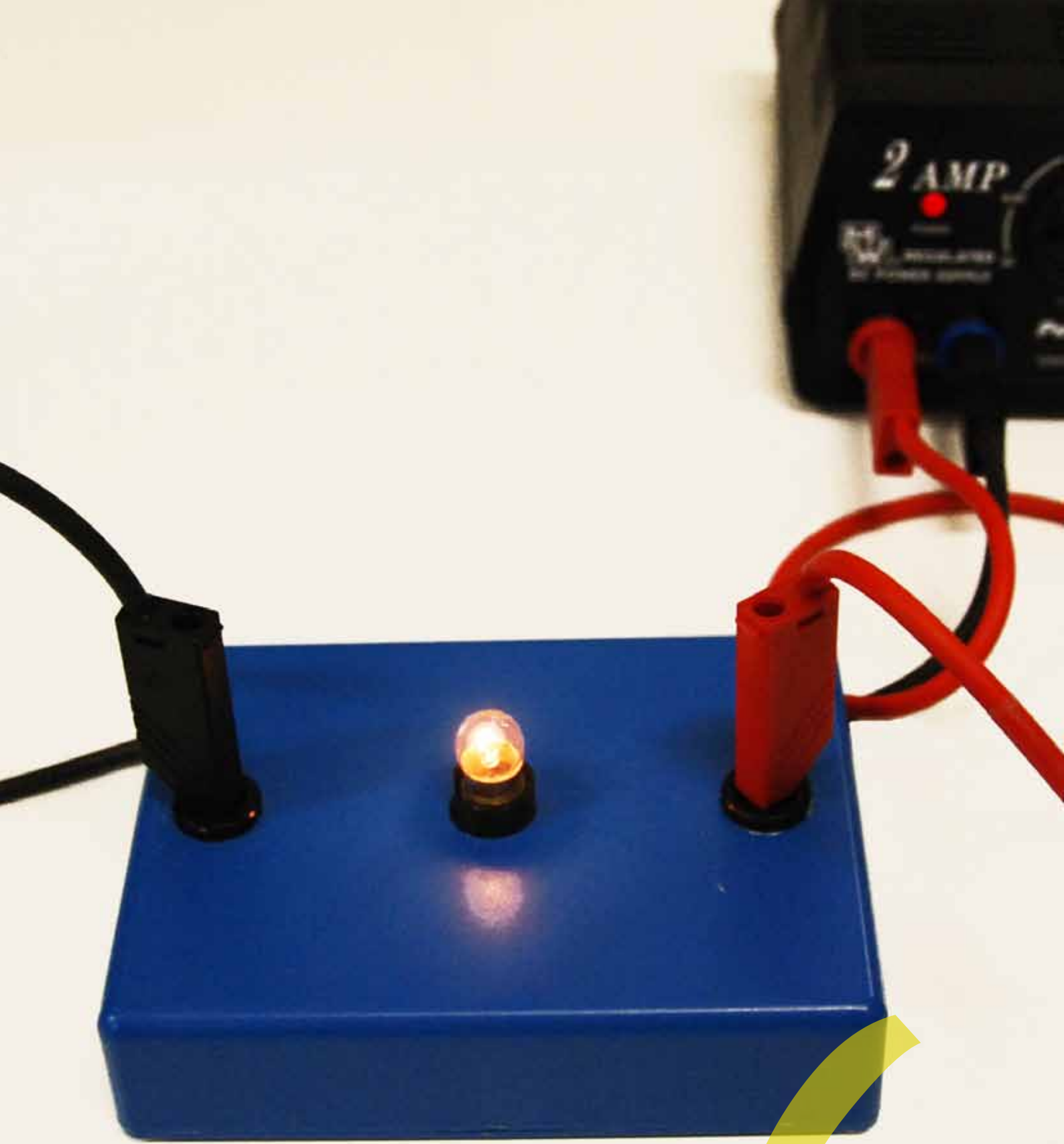
- b. Hoe groot is het stack voltage van de RED in figuur 20?
- c. Hoe groot is het stack voltage van een RED-installatie met N gestapelde membranen?

In figuur 20 zie je ook hoe de elektrodevloeistof wordt rondgepompt.

- d. Leg uit of V_{bron} nul blijft als het rondpompen niet zou plaatsvinden.
- e. Waarom stapelt men altijd een oneven aantal membranen? Hint: bedenk wat er anders zou gebeuren met de elektrodevloeistof.

Spreken deze opdrachten jou aan? Dan is de specialisatie als onderzoeker of als ingenieur wat voor jou





6

In hoofdstuk 4 bleek dat bij menging van rivierwater en zeewater energie vrijkomt. In hoofdstuk 5 is uitgelegd hoe deze mengenergie in een RED installatie wordt omgezet in een elektrische potentiaal.

In dit hoofdstuk leer je hoe je kunt uitrekenen hoeveel vermogen je uit een RED kunt halen.

6.1 6.1 Elektrisch circuit



open circuit voltage, OCV

In de RED van figuur 20 is een lampje aangesloten op de RED. Wanneer dit lampje vervangen wordt door een voltmeter, kan er geen stroom lopen, de weerstand van zo'n voltmeter is immers zeer groot. Een stack waarop geen apparaat is aangesloten noemen we een onbelaste stack. Door veel membranen achter elkaar in een stack te schakelen, kunnen de gewenste voltages gemaakt worden (opdracht 24.2). Met een stapel van bijvoorbeeld 13 membranen is het stack voltage ongeveer 1 volt, zolang de stack onbelast is. Met N membranen geldt voor de spanning van de onbelaste stack (het open circuit voltage, OCV):

formule 10
$$OCV = (N - 1) \cdot V_{bron}$$

waarin:

OCV = open circuit voltage in volt (V)

N = aantal membranen

V_{bron} = bronspanning in volt (V).

Als we een apparaat, bijvoorbeeld een lampje, aansluiten op de RED stack gaat er een stroom lopen. Hierdoor is het stack voltage niet langer gelijk aan de OCV. In feite gaan er gelijktijdig twee stromen lopen:

inwendig ionentransport

- een inwendig ionentransport van zout naar zoet water: negatief geladen chloridenionen stromen richting de anode en positief geladen natriumionen stromen richting de kathode. Er stroomt dus een positieve lading van anode naar kathode. Deze ladingsstroom is even groot als ('equivalent aan') de elektrische stroom. Tijdens het ladingstransport verliezen de ionen door wrijving een deel van hun energie.

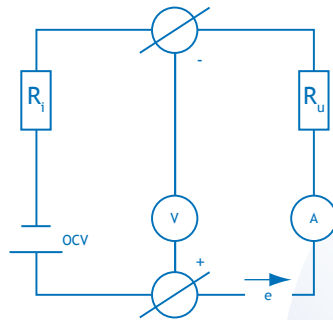
Deze wrijving kunnen we beschouwen als inwendige weerstand.

uitwendig ionentransport

- een uitwendige elektrische stroom van elektronen van -pool naar +pool. De elektronen stromen door het aangesloten apparaat dat een bepaalde uitwendige weerstand heeft en staan daarbij elektrische energie af aan het apparaat. Een lampje bijvoorbeeld gaat branden, waarbij elektrische energie wordt omgezet in licht en warmte.

We kunnen het bovenstaande weergeven in de stroomkring van figuur 24. Hierin is de linkerkzijde de stack met daarin een spanningsbron en een interne stackweerstand R_i (i van inwendig). Het apparaat is aangesloten op de polen van de stack en heeft een weerstand R_u (u van uitwendig).

De voltmeter (V) meet het stack voltage, de ampèremeter (A) meet de stroomsterkte.



Figuur 24: schema van stack en aangesloten apparaat

De weerstanden R_i en R_u staan in serie. Uit het bekende verband tussen spanning, stroomsterkte en weerstand ($U = I \cdot R$) volgt dus dat het stack voltage U niet gelijk is aan de OCV:

$$U = I \cdot R_u = OCV - (I \cdot R_i)$$

Voor de stroomsterkte I (in ampère) geldt:

$$I = \frac{OCV}{R_i + R_u}$$

Het door de stack geleverde vermogen P (in watt) is dus:

$$P = U \cdot I = I^2 \cdot R_u = \left(\frac{OCV}{R_i + R_u} \right)^2 \cdot R_u$$

Om kleine en grote RED-installaties met elkaar te vergelijken, is het specifieke vermogen p belangrijk. Dit is het vermogen dat wordt opgewekt per m^2 van de membraanoppervlakte A . De eenheid van p is dus $W m^{-2}$:

formule 11
$$p = \frac{P}{N \cdot A}$$

Reflectievragen en opdrachten

25. Opdracht

In hoofdstuk 5 gingen we uit van een RED waarop een voltmeter was aangesloten, geen elektrisch apparaat. We noemen deze situatie 'open circuit' (open stroomkring). Dezelfde situatie ontstaat als een 'apparaat' is aangesloten met een oneindig grote weerstand R_u .

- Hoe groot is de stroomsterkte die de ampèremeter aanwijst?
- Hoe groot is het stackvoltage U dat de voltmeter aanwijst?
- Hoe groot is het vermogen P ?

26. Opdracht

Stel dat we de elektroden verbinden met een stroomdraad, maar we vergeten een apparaat aan te sluiten. We noemen deze situatie: kortsluiting (kortgesloten stroomkring). Dit komt overeen met een aangesloten apparaat waarvan de weerstand R_u nul is.

- Hoe groot is de stroomsterkte die de ampèremeter aanwijst?
- Hoe groot is het stackvoltage U dat de voltmeter aanwijst?
- Hoe groot is het vermogen P ?

27. Opdracht

In de twee extreme situaties, open circuit (vraag 35) en kortsluiting (vraag 36), wordt geen vermogen gemaakt. bij kortsluiting gaat zelfs alle elektrische energie verloren. We bekijken nu een situatie waarbij een reëel apparaat wordt aangesloten.

- Hoe groot is de stroomsterkte die de ampèremeter aangeeft?
- Hoe groot is het stackvoltage U dat de voltmeter aangeeft?
- Leid af hoe groot het vermogen P is als functie van R_i en laat zien dat het maximale vermogen wordt geleverd als R_u van het apparaat gelijk is aan de inwendige weerstand R_i .

Het geleverde vermogen is dus afhankelijk van drie variabelen:

- het open circuit voltage OCV ,
- de uitwendige weerstand R_u ,
- de inwendige weerstand R_i .

Als we het elektrisch vermogen zo groot mogelijk willen krijgen, zullen we deze drie termen moeten bekijken. De eerste term heb je al onderzocht in hoofdstuk 5. De tweede term heb je bekeken in vragen 25 t/m 27. Rest nog de inwendige weerstand.

6.2 Inwendige weerstand van RED

electrische weerstand

Voordat we de invloed van de inwendige weerstand op het vermogen van de RED kunnen bespreken, bekijken we eerst wat bedoeld wordt met elektrische weerstand. De elektrische weerstand is de eigenschap van materialen die de doorgang van elektrische stroom bemoeilijkt, er is energie voor nodig. Het eenvoudigste 'apparaat' om die weerstand te bestuderen, is een metalen draad. De elektrische weerstand van een metalen draad wordt gegeven door:

formule 12
$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

waarin:

R = weerstand in ohm (Ω)

ρ = soortelijke weerstand in ohm-meter ($\Omega\text{m}^2 \text{m}^{-1} = \Omega\text{m}$)

l = lengte in meter (m)

A = oppervlakte in vierkante meter (m^2).

wet van Pouillet

soortelijke geleidbaarheid
conductiviteit

formule 13

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

De soortelijke geleidbaarheid wordt uitgedrukt in siemens per meter ($S\ m^{-1}$). De eenheid siemens (S) is het omgekeerde van de eenheid van weerstand ohm. Siemens wordt door elektrotechnici daarom ook wel mho genoemd.

Informatieblok 8

lengte

doorsnee

soortelijke weerstand

Natuurkunde: draadweerstand

Hoe groot de weerstand van een draad is, hangt af van drie parameters:

- De lengte (l , in m): hoe groter de afstand die de elektronen door het materiaal afleggen, hoe groter de weerstand die zij ondervinden. Dus hoe langer een materiaal is, hoe groter de weerstand. De weerstand is evenredig met de lengte: $R \sim l$.
- De doorsnee (A , in m^2): hoe groter de oppervlakte van de (loodrechte) doorsnede, hoe kleiner de weerstand is die de elektronen ondervinden. De weerstand is omgekeerd evenredig met de oppervlakte: $R \sim 1/A$.
- De soortelijke weerstand (ρ in $\Omega m^2\ m^{-1} = \Omega m$): een ijzerdraad en een koperdraad met gelijke lengte en doorsnede verschillen in weerstand. Ieder materiaal heeft zijn soortelijke weerstand. De soortelijke weerstand van een materiaal is de weerstand van een 'draad' van dat materiaal van 1 m lengte en een doorsnede van 1 m^2 : $R \sim \rho$. De soortelijke weerstanden van metalen en alliages zijn afhankelijk van de temperatuur en staan in Binas.

De drie factoren worden gecombineerd in de wet van Pouillet:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Rekenvoorbeeld

Een koperen leiding heeft een doorsnede van 4 mm^2 en is 200 m lang. Hoe groot is de weerstand van die leiding bij 20 °C?

Antwoord: gegeven is $l = 200\ m$, $A = 4\ mm^2 = 4 \cdot 10^{-6}\ m^2$. De soortelijke weerstand van koper bij 293 K staat in Binas: $\rho = 17 \cdot 10^{-9}\ \Omega m$. Als we deze waarden invullen in de wet van Pouillet, dan volgt de weerstand uit:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = 17 \cdot 10^{-9} \times \frac{200}{4 \cdot 10^{-6}} = \frac{3,4 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-6}} = 0,9\ \Omega$$

Reflectievragen en opdrachten

28. Opdracht

In deze opgave is steeds $T = 293 \text{ K}$.

- Een koperdraad met een doorsnede van $2,5 \text{ mm}^2$ heeft een weerstand van 14Ω . Bereken de draadlengte.
- Een ijzerdraad met een lengte van 200 m heeft een weerstand van 7 ohm . Bereken de doorsnede (mm^2).
- Een draad met een doorsnede van $2,5 \text{ mm}^2$ en lengte 20 m heeft een weerstand van $3,5 \Omega$. Uit welk materiaal is die draad mogelijk vervaardigd?
- Wat is de geleidbaarheid (S m^{-1}) van platina?

Net als bij de het transport van elektronen door een draad of apparaat is voor het ladingstransport in de stack ook energie nodig: de ionenstroom ondervindt ook weerstand, er is energie voor nodig. Deze inwendige weerstand (R_i) is net als de 'gewone' elektrische weerstand afhankelijk van de lengte, de doorsnee (de oppervlakte) en de soortelijke weerstand of geleidbaarheid van de stoffen.

De interne weerstand van een RED stack volgt uit de volgende formule ($N = 1, 3, 5, \dots$):

$$R_i = \frac{(N - 1)}{2} \cdot (R_{CEM} + R_r + R_{AEM} + R_z) + R_{CEM} + R_{electr}$$

Voor een stack met veel membranen (bijvoorbeeld $N > 11$) kan dit vereenvoudigd worden tot:

$$R_i \approx \frac{(N - 1)}{2} \cdot (R_{CEM} + R_r + R_{AEM} + R_z)$$

De inwendige weerstand bestaat dan uit de volgende deelweerstand:

- van de kationwisselende membranen R_{CEM}
- van het laagje rivierwater tussen de membranen R_r
- van de kationwisselende membranen R_{AEM}
- van het laagje zeewater tussen de membranen R_z .

$$R_i = \frac{(N - 1)}{2} \cdot (R_{CEM} + R_r + R_{AEM} + R_z) + R_{CEM} + R_{electr} \approx \frac{(N - 1)}{2} \cdot (R_{CEM} + R_r + R_{AEM} + R_z)$$

De weerstand van de membranen is bekend bij de fabrikant, die spreekt van de zogenaamde oppervlakteweerstand. Een typische waarde is $3 \Omega \text{cm}^2$ ofwel $3 \cdot 10^{-4} \Omega \text{m}^2$. Uit de wet van Pouillet volgt dat dit de soortelijke weerstand is maal de lengte, dus $\rho \cdot l$. De lengte is in dit geval de dikte van het membraan, want de ionen gaan door het membraan van de ene kant van het membraan naar de andere kant. De weerstand van een membraan met een oppervlakte van 1 m^2 is dus $3 \cdot 10^{-4} \Omega$

Ook de weerstand van rivierwater en zeewater volgt uit de wet van Pouillet. De geleidbaarheid van zoutoplossingen zoals rivierwater en zeewater wordt gemeten met een geleidbaarheidsmeter of salinometer. Hoe meer zout er in het water is opgelost, hoe beter de geleiding is. Voor zeewater van 30 g NaCl L^{-1} is bij een temperatuur $T = 298 \text{ K}$ de geleidbaarheid ongeveer $50 \text{ mS cm}^{-1} = 5 \text{ S m}^{-1}$, voor rivierwater van 1 g NaCl L^{-1} is deze $2 \text{ mS cm}^{-1} = 0,2 \text{ S m}^{-1}$. Als de afstand tussen de membranen bekend is, is de weerstand van ieder laagje zeewater en rivierwater te berekenen.

Reflectievragen en opdrachten

29.1 Opdracht interne weerstand stack

Om het vermogen van de stack in figuur 20 te berekenen, bereken je eerst de interne weerstand R_i . Neem voor de oppervlakte van ieder membraan 1 m^2 en voor de afstand tussen de membranen $0,5 \text{ mm}$. De overige gegevens van de membranen staan in de tekst.

- Hoe groot is de weerstand van een kationwisselend membraan (R_{CEM})?
- Hoe groot is de weerstand van een anionwisselend membraan (R_{AEM})?
- Hoe groot is de weerstand van een laagje zeewater (R_z)?
- Hoe groot is de weerstand van een laagje rivierwater (R_r)?
- Welke van bovenstaande deelweerstand levert dus de grootste bijdrage aan de totale weerstand?
- Wat is de totale weerstand van de stack (R_i)?

29.2 Opdracht maximaal vermogen stack

Het maximale vermogen van de stack in figuur 20 is te berekenen met behulp van de OCV (opdracht 24.2c) en de interne weerstand (opdracht 29.1f). Gebruik de vergelijking die je hebt afgeleid in vraag 27c.

- Hoe groot is het maximaal opgewekte vermogen P ?
- Hoe groot is het specifieke vermogen p ?
- Hoeveel vierkante kilometer membraanoppervlakte heb je tenminste nodig voor een 200 MW centrale (zoals die bijvoorbeeld op de Afsluitdijk gebouwd zou kunnen worden)?
- In de praktijk worden maximaal 6.000 membranen gestapeld. Hoeveel vierkante meter grondoppervlak is dan nodig voor 200 MW ?
- Vul de tabel van figuur 7 (in hoofdstuk 3) nu verder aan. Wat is je conclusie over het ruimtegebruik van een Blue Energy centrale?

Spreken deze opdrachten jou aan? Dan is de specialisatie als ingenieur wat voor jou





Onderzoek, ontwikkeling en ontwerp is teamwerk

Je weet nu wat Blue Energy inhoudt en welke techniek hierachter zit. Om Blue Energy daadwerkelijk te kunnen toepassen moeten er nog een paar stappen gezet worden. Bovendien zijn er nog enkele onduidelijkheden die opgelost moeten worden. Kortom: er moet dus verder onderzoek gedaan worden.

Je gaat je nu verdiepen in een vakgebied welke jouw interesse heeft. Er zijn drie vakgebieden waarin je aan de slag kunt gaan samen met enkele klasgenoten.

De vakgebieden waar je uit kan kiezen zijn:

planoloog

- Planoloog: een planoloog is werkzaam op het gebied van de ruimtelijke ordening, ofwel de wetenschap die zich bezighoudt met het optimaal benutten van de (openbare) ruimte, zodat alle gewenste en noodzakelijke functies daarin hun plaats krijgen. Planologen werken vaak bij overheden (het rijk, provincies of gemeenten) of bij adviesbureaus.

Werkveld: bekijk ► URL8-13.

Opdracht: je gaat zoeken naar een optimale locatie voor een Blue Energy centrale. Je houdt hierbij rekening met invloeden vanuit de omgeving, zoals infrastructuur, natuur & milieu en natuurlijk de beschikbaarheid van voldoende zee- en rivierwater.

onderzoeker

- Onderzoeker: een onderzoeker is een nieuwsgierige persoon die onbekende zaken onderzoekt. Het onderwerp van het onderzoek kan variëren van medisch tot technisch. Jij als onderzoeker zal meestal te vinden zijn in een laboratorium. De onderzoeker is echter niet alleen in het laboratorium bezig. In het bijhouden van het labjournaal kan ook veel tijd zitten, net als het opzetten van nieuwe onderzoeken. De resultaten van je onderzoek dienen gerapporteerd te worden, zodat anderen hier kennis van kunnen nemen.

Werkveld: bekijk ► URL6 en ► URL14-16.

Opdracht: je gaat onderzoek doen naar een aantal aspecten die invloed kunnen hebben op het winnen van energie. Hierbij moet je denken aan verschillende zoutconcentraties en membraanvervuiling. Voor de experimenten die je in dit onderzoek gaat uitvoeren kun je gebruik maken van de Blue Energy Demo.

ingenieur

- Ingenieur: een ingenieur is iemand met technische interesse. Hoe werkt iets, hoe kan een proces verbeterd worden? Een ingenieur is eigenwijs en denkt dat het altijd beter kan. Noeste arbeid in een werkplaats of nachtelijke rekenpartijen met eigengemaakte computermodellen leiden tot resultaat. Zonder goede ingenieurs geen innovatie. Zij vormen daarom vaak een onmisbare schakel voor vele bedrijven.

Werkveld: bekijk ► URL9 en ► URL17-19.

Opdracht: je gaat uitzoeken hoe je RED verder kunt optimaliseren. Hierbij moet je denken aan het verbeteren van het ontwerp of de bedrijfsvoering. Je doet dit vooral door gebruik te maken van computermodellen (dit kan Excel zijn of een ander rekenprogramma) en eventueel te experimenteren met de Blue Energy Demo.

Specialisatie 1: de planoloog



Elke specialisatie bestaat uit twee delen. Deel I is het onderzoek dat je uitvoert. De resultaten die hieruit komen ga je in Deel II presenteren aan de andere groepen.

Deel I

Een planoloog houdt zich bezig met het zoeken van een optimale locatie voor een Blue Energy centrale. Je houdt hierbij rekening met invloeden vanuit de omgeving, zoals infrastructuur, natuur & milieu en natuurlijk de beschikbaarheid van voldoende zee- en rivierwater.

Houd gedurende je onderzoek een logboek bij met daarin de antwoorden op de onderstaande vragen en de verkregen informatie: ► werkblad logboek in de NLT Toolbox.

Hoofdvraag

Welke locatie in Nederland is het meeste geschikt voor het opwekken van energie door middel van een Blue Energy centrale?

Om de hoofdvraag te beantwoorden werk je opdracht a t/m g uit.

Werk met 2 tot maximaal 7 leerlingen samen. Je kunt daarbij gebruik maken van Internet, bibliotheek, atlas en literatuur.

- a. Zoek met behulp van de atlas uit waar in Nederland mogelijkheden zijn voor Blue Energy. Gebruik daarvoor de Bosatlas: kaarten over de *waterhuishouding*. Op de kaart *waterbeheersing* vind je de plaatsen waar je zoetwater met zeewater kunt combineren. Er zijn tenminste 7 mogelijkheden. Daarnaast kun je bronnen raadplegen die je via de Unie van Waterschappen kunt vinden.
- b. In de voorgaande vraag heb je een aantal locaties opgezocht, welke geschikt zijn voor een Blue Energy centrale. Om een eerste schatting te

maken van de mogelijke stroomproductie per locatie, is het belangrijk om te weten hoeveel water je tot je beschikking hebt.

Bepaal met ► URL20-21 wat het gemiddelde debiet/afvoer in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ van een Blue Energy centrale per locatie is. Gebruik hiervoor de gemiddelde waarden per locatie.

Het debiet per locatie is:

| | | Afvoer in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. | | |
|----|----------|--|---------|---------|
| | Locatie: | Gemiddeld | Hoogste | Laagste |
| 1. | | | | |
| 2. | | | | |
| 3. | | | | |
| 4. | | | | |
| 5. | | | | |
| 6. | | | | |
| 7. | | | | |

Ga ervan uit dat we onder ideale omstandigheden energie kunnen opwekken.

Je mag dus uitgaan van een zoutgehalte van 30 g L^{-1} voor zeewater en 1 g L^{-1} voor rivierwater.

Bereken nu wat de gemiddelde stroomproductie kan zijn per locatie ($\text{J per m}^3 \text{s}^{-1}$). Neem voor je berekeningen de gemiddelde afvoer per seconde van iedere locatie.

Wat is de maximale stroomproductie die we kunnen opwekken als we al deze locaties bij elkaar optellen?

- In hoeverre kan er een goede scheiding van zoetwater en zout water enerzijds en brak water anderzijds plaatsvinden bij ieder locatie?
- De elektriciteitsbehoefte vertoont pieken en dalen. Kun je door middel van het realiseren van een berging van zoetwater en/of zout water, de centrale op het gewenste moment elektriciteit laten produceren?
- Ga voor iedere plaats na in hoeverre de getijden van invloed zijn op de productie van stroom. Denk ook aan een combinatie van getijcentrales en Blue Energy bij de berging. (► URL22 kan hierbij helpen)
- Hoe kun je het beste de mogelijkheden per locatie vergelijken?
- Probeer na vergelijking van de mogelijkheden samen te besluiten welke locatie de beste kansen biedt. Geef aan welke onzekere factoren er nog over blijven.

Deel II

Je gaat je resultaten presenteren aan je klasgenoten, de andere specialisten. Doe dit op een overtuigende manier en beargumenteer waarom jullie denken dat er een Blue Energy centrale juist op die locatie zou moeten komen te staan.

Gebruik hiervoor de ► werkinstructie presenteren in de NLT Toolbox.

Specialisatie 2: de onderzoeker



Elke specialisatie bestaat uit twee delen. Deel I is het onderzoek dat je uitvoert. De resultaten ga je in Deel II presenteren aan de andere groepen.

Deel I

Een onderzoeker probeert zo veel mogelijk factoren die van invloed zijn op de energiewinning door middel van Blue Energy te achterhalen en vervolgens te onderzoeken wat de invloed van elk van deze factoren is op het proces.

Hiervoor is het van belang eerst te achterhalen welke de factoren zijn die de energiewinning beïnvloeden.

Houd gedurende je onderzoek een logboek bij met daarin de antwoorden op de onderstaande vragen en de verkregen informatie: ► werkblad logboek in de NLT Toolbox.

Hoofdvraag

Wat zijn de belangrijkste factoren die direct invloed uitoefenen op de energieopbrengst van een Blue Energy centrale?

Om de hoofdvraag te beantwoorden voer je experimenten a t/m e uit. Werk met twee à drie leerlingen samen. Je kunt daarbij gebruik maken van de onderzoeksopstelling van het regionale steunpunt (vraag je docent).

- a. Om deze factoren te kunnen achterhalen is het van belang eerst het introductie-experiment te herhalen. Je docent heeft de beschrijving.
- b. Na de uitvoering van dit experiment kunnen jullie gaan brainstormen welke factoren van invloed zullen zijn op de energiewinning. Denk daarbij als eerste aan de variabelen van deze opstelling. Welke componenten zijn te variëren en welke ga je onderzoeken en

waarom?

- c. Ontwerp (een) experiment(en) om deze variabelen te meten.
Een handig voorbeeld voor het opstellen van een werkplan vind je in de NLT Toolbox bij ► voorbeeld werkplan experiment.
Elke variabele dient in een apart experiment gemeten te worden, om het mogelijk te maken hieruit conclusies te trekken. Beschrijf zorgvuldig je experiment en maak alvast een lege tabel met waarnemingen.
Bespreek met je docent de gekozen proefopzet(ten). Na goedkeuring kan je het experiment/de experimenten uitvoeren.

Je docent heeft eventueel voorbeelden van proefopzetten ter beschikking.

- d. Vervolgens: bedenk welke factoren in de praktijk invloed op de energiewinning zullen hebben, zoals temperatuur en samenstelling van zeewater en rivierwater (denk hierbij aan de hardheid van het water).
Ontwerp ook hiervoor een aantal experimenten om de invloed van deze factoren op het proces te onderzoeken. Ook hier geldt weer dat elke variabele in een apart experiment onderzocht moet worden en dat je het experiment goed moet overdenken. Maak alvast een tabel voor je waarnemingen vóór je het aan je docent voorlegt.
- e. Welke conclusies kunnen jullie nu trekken na het uitvoeren van de experimenten? Zijn er factoren die een duidelijke invloed op de energiewinning zullen hebben? Wat zijn de optimale omstandigheden voor de energiewinning? En welke factoren zijn niet van belang gebleken?

Deel II

Je gaat je resultaten presenteren aan je klasgenoten, de andere specialisten. Leg uit welke factoren en omstandigheden van belang zijn voor de energiewinning. Bij wijze van conclusie kun je op basis van de verkregen inzichten aangeven waar je op moet letten bij het beoordelen van locaties of toepassingen van Blue Energy.

Gebruik hiervoor de ► werkinstructie presenteren in de NLT Toolbox.

Specialisatie 3: de ingenieur



Elke specialisatie bestaat uit twee delen. Deel I is het onderzoek dat je uitvoert. De resultaten ga je in Deel II presenteren aan de andere groepen.

Deel I

De ingenieur probeert het ontwerp zo veel mogelijk te optimaliseren door de cruciale operationele en ontwerpvariabelen van Blue Energy te achterhalen. Dit kan met behulp van proeven, zoals de onderzoeker doet, maar het ontwerp aanpassen gaat natuurlijk niet zo gemakkelijk. Een computersimulatie biedt dan uitkomst.

Houd gedurende je onderzoek een logboek bij, met daarin de antwoorden op de onderstaande vragen en de verkregen informatie: ► werkblad logboek in de NLT Toolbox.

Hoofdvraag

Wat zijn de belangrijkste (interne) factoren binnen het ontwerp van een Blue Energy centrale en hoe beïnvloeden zij elkaar?

- Om de hoofdvraag te beantwoorden voer je simulaties a t/m e uit. Werk met twee à drie leerlingen samen. Je kunt daarbij gebruik maken de onderzoekopstelling van het regionale steunpunt (vraag je docent).
- Om deze factoren te kunnen achterhalen is het van belang om een computermodel te maken op basis van de vergelijkingen uit hoofdstuk 5 en 6, bijvoorbeeld in Excel. Probeer het simpel te houden!
 - Invoer variabelen: concentraties, temperatuur, aantal membranen, membraanoppervlakte, afstand tussen de membranen, membraanweerstand, uitwendige weerstand. (Tip: geef de variabelen een standaardwaarde, zoals deze te vinden zijn in hoofdstuk 5 en 6)

- Invoer constanten: gasconstante, Faraday-constante.
- Uitvoer: (open) stackvoltage, stroomsterkte, vermogen, vermogen per m², interne weerstand (veronderstel de geleidbaarheid lineair met zoutconcentraties).

Let op de eenheden!

- b. Nadat je het model gemaakt en getest hebt, kunnen jullie gaan ‘spelen’ met de variabelen. Verander maar één variabele per keer en houd alle andere variabelen op de standaardwaarde. Onderzoek zo welke factoren van invloed zijn op de vermogensopwekking. Maak hiervan grafieken, met op de x-as de beschouwde variabele en op de y-as (open) stackvoltage, stroomsterkte, vermogen per m².
- Onderzoek eerst de invloed van de uitwendige weerstand op stackvoltage, stroomsterkte en dus op het vermogen per m². Klopt het dat het optimale vermogen behaald wordt bij $R_u = R_i$? Zorg ervoor dat voor het vervolg altijd geldt $R_u = R_i$.
 - Onderzoek vervolgens de operationele variabelen, dus de variabelen die te maken hebben met het rivierwater en het zeewater en de uitwendige weerstand of verbruiker. Maak ook nu grafieken. Wat is bijvoorbeeld de invloed van de zoutconcentratie van het rivierwater op stackvoltage, stroomsterkte en dus op het vermogen per m²? Wat gebeurt er bij extreem lage zoutconcentraties? Kun je dit uitleggen?
 - Onderzoek de ontwerpvariabelen, dus de variabelen die te maken hebben met het procesontwerp (maatvoering etc.). Maak ook nu grafieken. Wat is bijvoorbeeld de invloed van de afstand tussen de membranen op stackvoltage, stroomsterkte en dus op het vermogen per m²? Wat gebeurt er bijvoorbeeld als je de afstand terugbrengt van 0,5 mm naar 0,1 mm? Kun je dit uitleggen?
- c. Er is één belangrijke factor nog niet gemodelleerd. Dat is de efficiëntie. De efficiëntie is het opgewekte elektrische vermogen ($= I^2 \cdot R_u$) ten opzichte van het beschikbare vermogen ($= I^2 \cdot R_u + I^2 \cdot R_i$). De efficiëntie zou 100% zijn, als er inwendig geen vermogen verloren zou gaan. Wat wordt de efficiëntie bij $R_u = R_i$? Wat betekent dat voor de hoeveelheid vermogen die in Nederland daadwerkelijk kan worden omgezet in elektriciteit?
- d. In onderdeel c heb je de elektrische efficiëntie berekend. Een klein deel van de elektriciteit zal nodig zijn voor de Blue Energy centrale zelf. Bedenk met elkaar waar in het proces energie nodig is.
- e. Welke conclusies kunnen jullie nu trekken na het uitvoeren van de bovenstaande simulaties? Zijn er factoren die een duidelijke invloed op de energiewinning zullen hebben? Wat zijn de optimale omstandigheden voor de energiewinning? En welke factoren zijn niet van belang gebleken?

Deel II

Je gaat je resultaten presenteren aan je klasgenoten, de andere specialisten. Leg uit welke omstandigheden van belang zijn voor de

energiewinning en wat de belangrijkste factoren zijn voor het ontwerp van een Blue Energy centrale.

Bij wijze van conclusie kun je op basis van de verkregen inzichten wat kencijfers geven voor een 200 MW Blue Energy centrale, zoals ruimtegebruik (m^2 grondoppervlak), vermogensopbrengst (W m^{-2}) en efficiency.

Gebruik hiervoor de ► werkinstructie presenteren in de NLT Toolbox



In de eindopdracht ga je samenwerken met klasgenoten uit de andere disciplines. Je vormt nu dus samen een nieuw team. Zorg dat je team op zijn minst bestaat uit een planoloog, een onderzoeker en een ingenieur. Met hen ga je een adviesrapport schrijven in opdracht van Rijkswaterstaat.

Opdracht

Rijkswaterstaat ziet toekomst in de nieuwe vorm van energie-opwekking 'Blue Energy'.

Om uiteindelijk een beslissing te nemen over het plaatsen van een dergelijke centrale, schakelen zij een onafhankelijk adviesbureau in om een inventarisatie te maken over de kansen en mogelijkheden van Blue Energy in Nederland.

Dit adviesbureau wordt gevormd door jou en je teamgenoten. Vanuit jullie eigen specialisaties bediscussiëren jullie in hoeverre de door de planoloog berekende maximale productie haalbaar is in planologisch en technisch opzicht.

Neem in je advies de volgende overwegingen op

- In figuur 4 is het energieverbruik opgesplitst tussen verschillende energiedragers. Daaruit blijkt, dat in 2006 nog geen 3 % van de totale hoeveelheid in Nederland verbruikte energie voor rekening kwam van duurzame energie.
- In het regeerakkoord van 2007 staat dat Nederland in 2020 30 % minder broeikasgassen wil uitstoten en dat 20 % van de geproduceerde energie duurzaam moet zijn opgewekt (zie hoofdstuk 3).
- Blue Energy kan een belangrijke bijdrage leveren aan het halen van bovengenoemde doelstellingen. Het is dus van belang te weten wat de productie van elektriciteit van Blue Energy zou kunnen opleveren in $W m^{-2}$.
- Daarvoor heb je een aantal gegevens gebruikt. Allereerst de zoutconcentraties: in hoofdstuk 5 zijn we uitgegaan van zeewater waarin $30g L^{-1}$ zout zat. In rivierwater zat slechts $1g L^{-1}$. Verder vermeld je de beschikbare hoeveelheden zoetwater. De planologen in jouw team hebben dit uitgezocht en met deze gegevens uitgerekend hoeveel energie Blue Energy kan opleveren.
- Hoe verhoudt Blue Energy zich tot andere vormen van duurzame energie? In de tabel van figuur 7 in hoofdstuk 3 heb je de opbrengst in $W m^{-2}$ van verschillende vormen van duurzame energie ingevuld en het oppervlaktegebruik dat ermee gepaard gaat. Door nu ook de gegevens van Blue energy in te vullen kun je een vergelijking trekken.
- Voor het bepalen van de meest geschikte locatie zijn niet alleen de hoeveelheden zoetwater van belang, maar ook de omgeving waarin de centrale komt te staan.

Schrijf op basis van bovenstaande overwegingen gezamenlijk een adviesrapport aan Rijkswaterstaat. Gebruik hiervoor de ► werkinstructie adviesrapport in de NLT Toolbox

Geef hierbij jullie visie over welke mogelijkheden elke locatie heeft en welke problemen. Deel je advies in in hoofdstukken op basis van deelvragen, die je van tevoren hebt opgesteld.

Als conclusie kom je met een onderbouwd advies, wat volgens jullie de meeste geschikte locatie is voor een Blue Energy centrale in Nederland.

Bronvermelding

Literatuur

| | |
|-------------|--|
| Hoofdstuk 3 | Geo Geordend bovenbouw Nederland |
| Hoofdstuk 4 | Chemie Overal 5V Chemie 5/6 VWO CMLS drs. H.I.M. van Dieten e.a. Wolters-Noordhoff, 5e druk, 1982 Binas |
| Hoofdstuk 5 | Chemie Overal 5V Chemie 5/6 VWO CMLS drs. H.I.M. van Dieten e.a. Wolters-Noordhoff, 5e druk, 1982 Binas |

Bijlage 1 URL-lijst

| | |
|-------|---|
| URL1 | http://www.voetafdruk.nl Test de grootte van je voetafdruk. |
| URL2 | Wikipedia http://www.wikipedia.nl >zoek naar 'broeikaseffect' |
| URL3 | Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, VROM http://www.vrom.nl/ |
| URL4 | Milieucentraal http://www.milieucentraal.nl/pagina.aspx?onderwerp=Duurzame%20energiebronnen |
| URL5 | Microhydropower http://www.microhydropower.net |
| URL6 | Energy research Centre of the Netherlands, ECN http://www.ecn.nl |
| URL7 | Olino, duurzame energie http://www.olino.org |
| URL8 | DHV, Advies- en ingenieursbureau http://www.dhv.nl |
| URL9 | Royal Haskoning http://www.royalhaskoning.nl |
| URL10 | Arcadis, infrastructuur, milieu en gebouwen http://www.arcadis.nl |
| URL11 | Oranjewoud http://www.oranjewoud.nl |
| URL12 | Movares http://www.movares.nl |
| URL13 | Grontmij http://www.grontmij.nl |

- URL14 Senternovem/Agentschap NL
<http://www.senternovem.nl>
- URL15 Nederlandse Organisatie voor toegepast-
natuurwetenschappelijk onderzoek, TNO
<http://www.tno.nl>
- URL16 Wetsus, centre of excellence for sustainable water
technology
<http://www.wetsus.nl>
- URL17 Philips
<http://www.philips.nl>
- URL18 Nuon
<http://www.nuon.nl>
- URL19 Redstack
<http://www.redstack.nl>
- URL20 Rijkswaterstaat, waternormalen
<http://www.waternormalen.nl>
- URL21 Rijkswaterstaat, waterstat
<http://www.waterstat.nl>
- URL22 Ministerie van Verkeer en Waterstaat
<http://www.getij.nl>

Bijlage 2 Figuurlijst

| | |
|---------------------|---|
| Voorpagina: | Artist Impresion Blue Energy Centrale - Wetsus |
| Hoofdstuk 2: | |
| Figuur 1. | Voetafdruk - Wetsus |
| Hoofdstuk 3: | |
| Figuur 2. | Het broeikaseffect - Wetsus |
| Figuur 3. | Opwarming van de aarde - Wetsus |
| Figuur 4. | Tabel Energieverbruik 2006 - Centraal Bureau voor Statistiek |
| Figuur 5. | Tabel elektriciteitsproductie - Centraal Bureau voor Statistiek |
| Figuur 6. | Duurzame energiebronnen voor Nederland - Wetsus |
| Figuur 7. | Tabel oppervlaktegebruik van duurzame energiebronnen |
| Figuur 8. | Hydrologische kringloop - Wetsus |
| Figuur 9. | Mogelijke locaties voor Blue Energy in Nederland |
| Hoofdstuk 4: | |
| Figuur 10. | Atoommassa`s en molecuulmassa`s |
| Figuur 11. | De entropie - Wetsus |
| Figuur 12. | Verschil energie en entropie - Wetsus |
| Figuur 13. | Entropieverandering - Wetsus |
| Figuur 14. | Vergelijking waterkracht en Blue Energy |
| Figuur 15. | Mengenergie bij verschillende mengverhoudingen |
| Hoofdstuk 5: | |
| Figuur 16. | Katchalsky machine - Wetsus |
| Figuur 17. | VPDU - Wetsus |
| Figuur 18. | PRO - Wetsus |
| Figuur 19. | RED - Wetsus |
| Figuur 20. | Detail weergave RED - Wetsus |
| Figuur 21. | Daniël Cel - Wetsus |
| Figuur 22. | Elektronen- en ionenstroom - Wetsus |
| Figuur 23. | Iontransport door een kationwisselend membraan(CEM) - Wetsus |
| Hoofdstuk 6: | |
| Figuur 24. | Schema van stack en aangesloten apparaat - Wetsus |