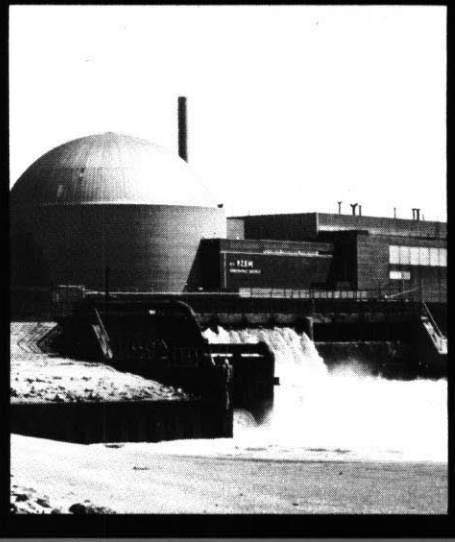
NATUURKUNDE
IN DE
SAMENLEVING

Energie in de toekomst



Kiezen voor energie uit kolen, uranium of wind?

PLON

Uitgeverij nib

Overzicht van PLON-thema's voor mavo en onderbouw havo-vwo

VOOR DE 2e KLAS

- Een eerste verkenning in de natuurkunde
- Mensen en metalen – themaboek
  – keuzeonderzoeken
- Werken met water – themaboek
- Leven in lucht
- IJs, water en stoom (I en II)

Tevens zijn beschikbaar:
- Terugblik 2e klas, avol/app. gidsen, rommelpakket Leven in lucht, waterbladen en demonstratiebladen Werken met water.

VOOR DE 3e KLAS

- Bruggen
- Zien bewegen
- Elektrische schakelingen – instructieboekje
- Geluid weergeven
- Natuurkunde in de samenleving: Water voor Tanzania
- Energie thuis
- Natuurkunde in de samenleving: Energie in de toekomst

Tevens zijn beschikbaar:
- Kleur en licht
- Avol/app. gidsen

VOOR DE 4e KLAS MAVO EN DE 3e KLAS HAVO-VWO

- Verkeer en veiligheid
- Krachten – instructieboekje
- Natuurkunde in de samenleving: Stoppen of doorrijden?
- Verwarmen en isoleren
- Schakelen en regelen
- Machines en energie
- Natuurkunde in de samenleving: Kernwapens
  en/of Veiligheid

Tevens zijn beschikbaar:
- Repeteerthema voor het eindexamen mavo
- Examenboekje voor mavo
- Avol/app. gidsen

Energie in de toekomst

Samengesteld door de projectgroep van het PLON
voor de 3e klas

Experimentele uitgave

(2e oplage)

PLON

Uitgeverij nib

PLON / UITGEVERIJ nib ZEIST

PROJECT LEERPAKKETONTWIKKELING NATUURKUNDE

* Het Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde (PLON) is in 1972 begonnen onder auspiciën van de Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde (CMLN). De opdracht was: het ontwikkelen en door middel van onderzoek evalueren van leerpakketten voor natuurkundeonderwijs op mavo, havo en vwo, en het ontwerpen van een plan voor goede begeleide introductie daarvan in de scholen.
* Het PLON werkt onder toezicht van een stuurgroep waarin vertegenwoordigers uit het onderwijs, de vervolgopleiding, didactische instellingen, onderwijsondersteuningsinstituten, lerarenopleidingen en het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen vertegenwoordigd zijn.
* Het PLON is ondergebracht bij de Vakgroep Natuurkunde Didaktiek van de Rijksuniversiteit Utrecht. Deze vakgroep participeert tevens in de activiteiten ten behoeve van havo-bovenbouw. Ten behoeve van vwo-bovenbouw bestaat een samenwerkingsverband met de universiteiten van Amsterdam (GU) en Groningen, en groepen leraren die werken aan de ontwikkeling van lesmateriaal.
* Het adres van het PLON is:
  PLON, lab. Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA, de Uithof, Utrecht
  Tel. 030-532717

© 1983 Rijksuniversiteit Utrecht Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde/BV Uitgeverij N I B Zeist

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.
No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without the prior permission of the publisher.

Experimentele uitgave

inhoud

inhoud

blz.

Inleiding
– Natuurkunde in de samenleving 5
– Energie in de toekomst 6
– Wat ga je tijdens dit thema doen? 7

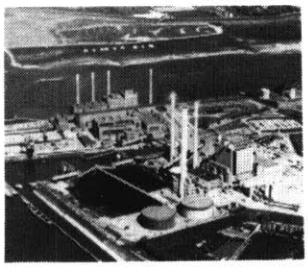
Deel 1 Oriëntatie 11

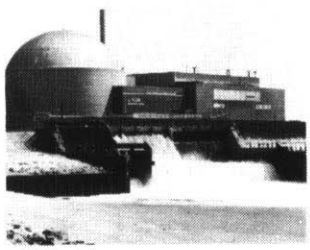
Deel 2 Elektriciteit opwekken en transporteren 25

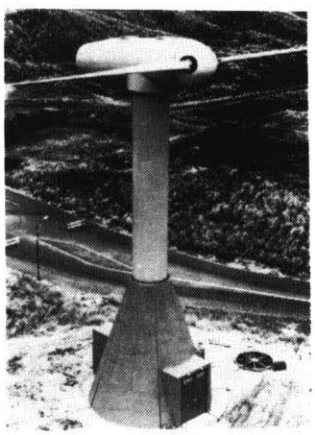
Deel 3 Vergelijkingsdeel 55

Deel 4 Leesteksten 113

Onderwerpenlijst 126





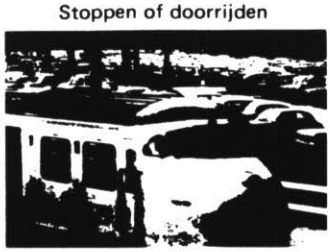


NATUURKUNDE IN DE SAMENLEVING

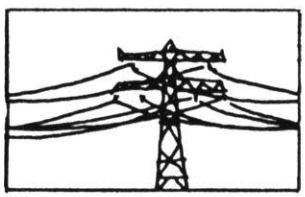
Op het omslag van dit boek zie je staan: 'Natuurkunde in de samenleving'. Onze samenleving, daar bedoelen we mee: alle mensen op de hele wereld, hoe ze met elkaar samen-leven. Die samenleving schiet op veel punten tekort. De toenemende werkloosheid in Nederland en in andere landen, milieuvervuiling, bewapening en – verder van huis – honger en grote armoede in Derdewereldlanden.
Wat heeft dat met natuurkunde te maken? Eigenlijk nogal veel. Het gebruik van natuurkundige kennis kan je helpen bij het verlichten of oplossen van noden, maar het kan ook leiden tot nieuwe problemen.
Een voorbeeld: de natuurkunde heeft de mogelijkheid geopend voor de ontwikkeling van de *chip* en de micro-elektronika.
Dat merk jijzelf omdat je nu vrij ingewikkelde berekeningen op je zakrekenmachientje kunt uitrekenen. Dat is prettig, maar diezelfde ontwikkeling maakt het ook mogelijk dat er mensen ontslagen worden omdat hun werk door de computer wordt overgenomen. En dat kan minder prettig zijn. Dus de natuurkunde heeft van alles met de samenleving te maken.
Dat is ook de reden waarom jij natuurkunde mag/moet doen op school en waarom er zoveel geld aan de natuurkunde besteed wordt. Natuurlijk niet vanwege de problemen die de natuurkunde erbij maakt (hoewel: kernwapens...?), maar vanwege de oplossingen waaraan de natuurkunde kan bijdragen. Daarbij moet je bedenken dat wat voor de één een oplossing is (bijvoorbeeld bij energietekort een kerncentrale bouwen), door een ander als een groot probleem wordt gezien (de kans op radioactieve vervuiling).
In de thema's over natuurkunde en samenleving willen we enkele voorbeelden daarvan verder uitwerken en je inzicht in die maatschappelijk omstreden onderwerpen vergroten. Natuurkundige kennis zal daarbij van belang zijn. Er zijn vier deelthema's van het PLON die over Natuurkunde in de samenleving gaan:

- In *Water voor Tanzania* gaan jullie naar de verbetering van de drinkwatervoorziening in de ontwikkelingslanden kijken.
- *Stoppen of doorrijden* gaat over de keuze tussen auto, trein of fiets, als je je wilt verplaatsen.
- *Energie in de toekomst* gaat over de keuze van een energievoorziening: energiebronnen zijn duur, ze kunnen het milieu vervuilen en zijn vaak inzet van de (internationale) machtstrijd.
  Voor welke energiebronnen moet je dan kiezen?
- *Kernwapens en/of veiligheid* gaat over de kernwapenwedloop.
  Bedreigen kernwapens de veiligheid of garanderen ze juist de veiligheid?

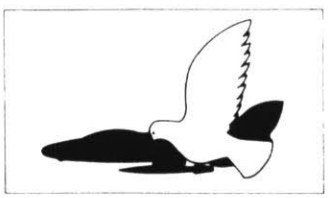
Stoppen of doorrijden



Energie in de toekomst

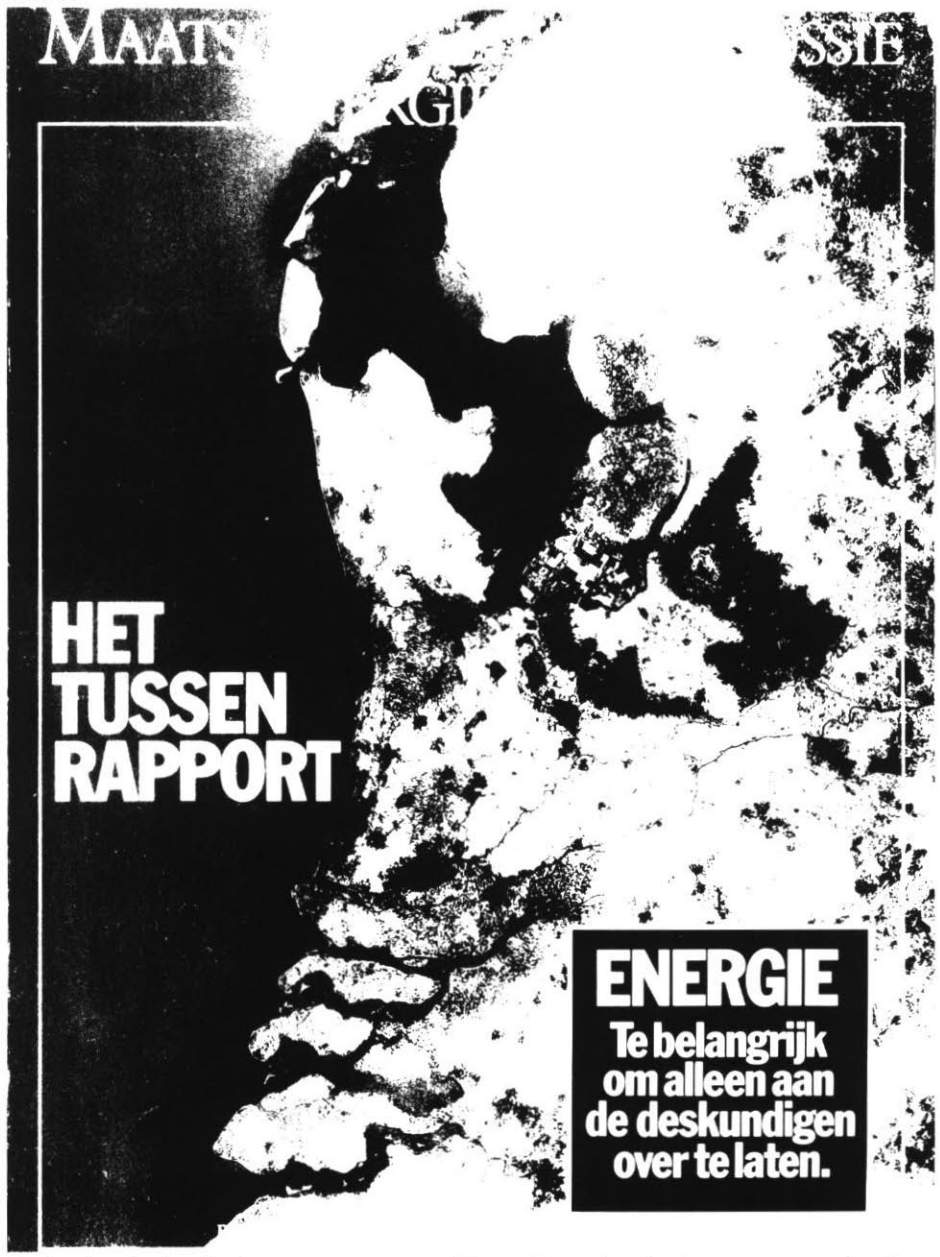


Kernwapens en/of veiligheid



ENERGIE IN DE TOEKOMST

Nederland discussieert over de toekomst: moeten er wel of geen kerncentrales in Nederland bij komen? Moeten de centrales van Borssele en Dodewaard zelfs dicht?



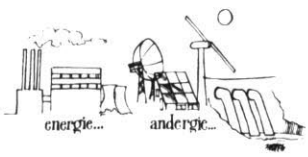
Het tussenrapport van de Stuurgroep Maatschappelijke Discussie Energiebeleid

Ook als de beslissingen genomen zijn zullen de deelnemers aan de discussie hun mening blijven uitdragen: voor de één is kernenergie absoluut onaanvaardbaar; voor de ander is kernenergie de schoonste vorm van energie die er is.
Hoe het ook lopen zal in de toekomst, iedereen krijgt met de maatschappelijke kanten van energie te maken: door een hoge energierekening, door de keuze tussen (duurdere) energiezuinige apparaten en (goedkopere) energievreters, wellicht door de keuze tussen meer milieuvervuiling of minder werk.

Misschien heb je nu al een uitgesproken mening: vóór of tegen kernenergie, vóór of tegen windmolens, vóór of tegen het gebruik van kolen in grote hoeveelheden. Misschien weet je het gewoon nog niet.
Dit thema is bedoeld om je meer inzicht te geven in de voordelen en nadelen van verschillende soorten energie. En ook wat de gevolgen zijn als je voor een bepaalde centrale kiest. Gewapend met kennis over de werking van de centrales en over de voordelen en nadelen van verschillende energiebronnen kan je de discussie tussen voor- en tegenstanders beter begrijpen. Misschien maakt dit thema het je gemakkelijker een eigen standpunt te vormen. Of als je al een standpunt hebt, kan je dat beter verdedigen. We hopen bovendien dat je de argumenten van mensen die er anders over denken beter gaat begrijpen.

WAT GA JE TIJDENS DIT THEMA DOEN?

In deel 1, *Oriëntatie*, ga je rondkijken wat de energievoorziening in het verleden in Nederland aan sporen heeft achtergelaten. Daarna ga je kijken hoe de energievoorziening nu is en hoe je leven daardoor beïnvloed wordt. De vraag is dan hoe je het in de toekomst zou willen hebben. De regering maakt daar al plannen voor.
Ben je het daarmee eens? Kan het ook anders? Moet het ook anders? Welke mogelijkheden heb je om dat te beïnvloeden?

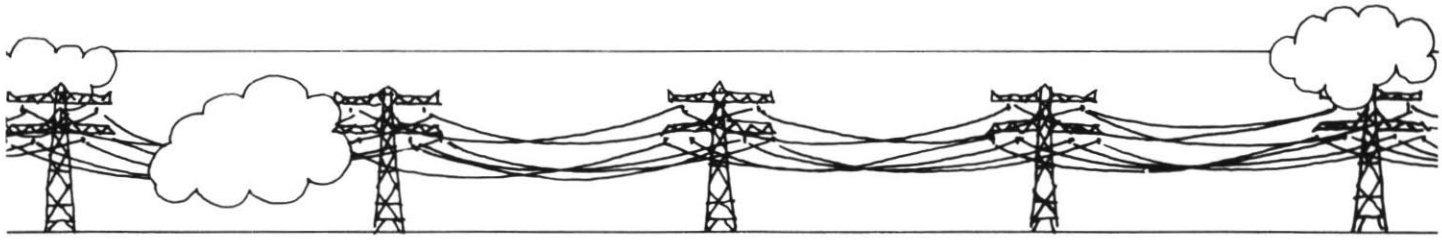


In deel 2, *Energie opwekken en transporteren* krijg je veel te lezen en proeven te doen rond kenmerken die alle elektrische centrales gezamenlijk hebben: het apparaat waarmee uiteindelijk elektriciteit wordt opgewekt, is in allerlei centrales vrijwel hetzelfde. De natuurkundige wetten over energie en massa zijn

natuurlijk ook voor alle centrales hetzelfde. Maar ze kunnen wel voor verschillende centrales heel andere gevolgen hebben.
Je leert dat slechts een deel van de toegevoerde energie uiteindelijk als elektriciteit beschikbaar komt. Je leert over de veranderingen die een grondstof ondergaat als daar in een centrale de energie uitgehaald wordt. Voor de wind is dat een weinig ingrijpende verandering. Uranium in kerncentrales daarentegen wordt totaal veranderd door kernsplijting.

Je leert er tenslotte over hoogspanningsmasten en transformatoren waarmee de elektriciteit naar de verbruikers wordt getransporteerd en geschikt gemaakt wordt voor gebruik in huis.
De leerstof in dit deel stelt je in staat om de overeenkomsten tussen verschillende soorten centrales te zien. Dat maakt het makkelijker om de verschillen tussen de centrales in het volgende deel goed te begrijpen.

In deel 3, Het *Vergelijkingsdeel* staan de werking van de kolencentrale, de kerncentrale en de windturbine zo veel mogelijk aan de hand van feiten beschreven. Zo veel mogelijk ... want het is wellicht onmogelijk dat de mening van de schrijvers er niet in doorklinkt.
Let daar maar eens op!
Het is de bedoeling dat je je – in een groep – verdiept in één van die cen-



trales. Daarna krijg je de taak de belangrijkste dingen daarvan aan je klasgenoten te vertellen, op grote vellen papier uit te leggen of te tekenen. De centrales zijn zo veel mogelijk op dezelfde manier beschreven, zodat het makkelijk is punten te vinden waarop de centrales met elkaar vergeleken kunnen worden.
Het vergelijken moeten jullie zelf doen in de klas. Om scherp te laten zien waar belangrijke verschillen van mening liggen, hebben we na de beschrijving van de centrales stukjes met de mening van allerlei mensen opgenomen. Als je goed in de kranten leest of naar de televisie kijkt, kan je natuurlijk veel actuele meningen tegenkomen. Bekijk de meningen goed en praat er met elkaar over of je ze begrijpt en waarom je het er wel of niet mee eens bent.
Om eens in het klein te kijken wat voor een gevolgen het heeft als je je standpunt in *daden* omzet, heeft het PLON het kolen-kern-wind-spel gemaakt. Maak maar eens mee hoe je een 'energiebeleid' voert en maak de gevolgen daarvan mee.
Je kunt als afsluiting van het thema met klasgenoten brieven schrijven aan energie-actiegroepen, aan energiebedrijven en aan fabrikanten van windturbines, kerncentrales of kolencentrales om hun standpunt te vragen en je eigen standpunt te geven.

Tot slot kunnen leerlingen die meer details van verschillende centrales willen weten, veel informatie vinden in deel 4, de *leesteksten.*

Achterin het boek is een onderwerpenlijst opgenomen. Die kun je gebruiken als je in dit thema, of in een kranteartikel over een onderwerp leest dat onvoldoende wordt uitgelegd of dat je weer even in de herinnering wilt terugroepen. De onderwerpenlijst geeft je de bladzijden waar het betreffende onderwerp wordt uitgelegd.

1 oriëntatie

oriëntatie

inhoud

		blz.
1-1	Energie vroeger	13
1-2	Energie nu	16
1-3	Energie in de toekomst	18

1-1 ENERGIE VROEGER

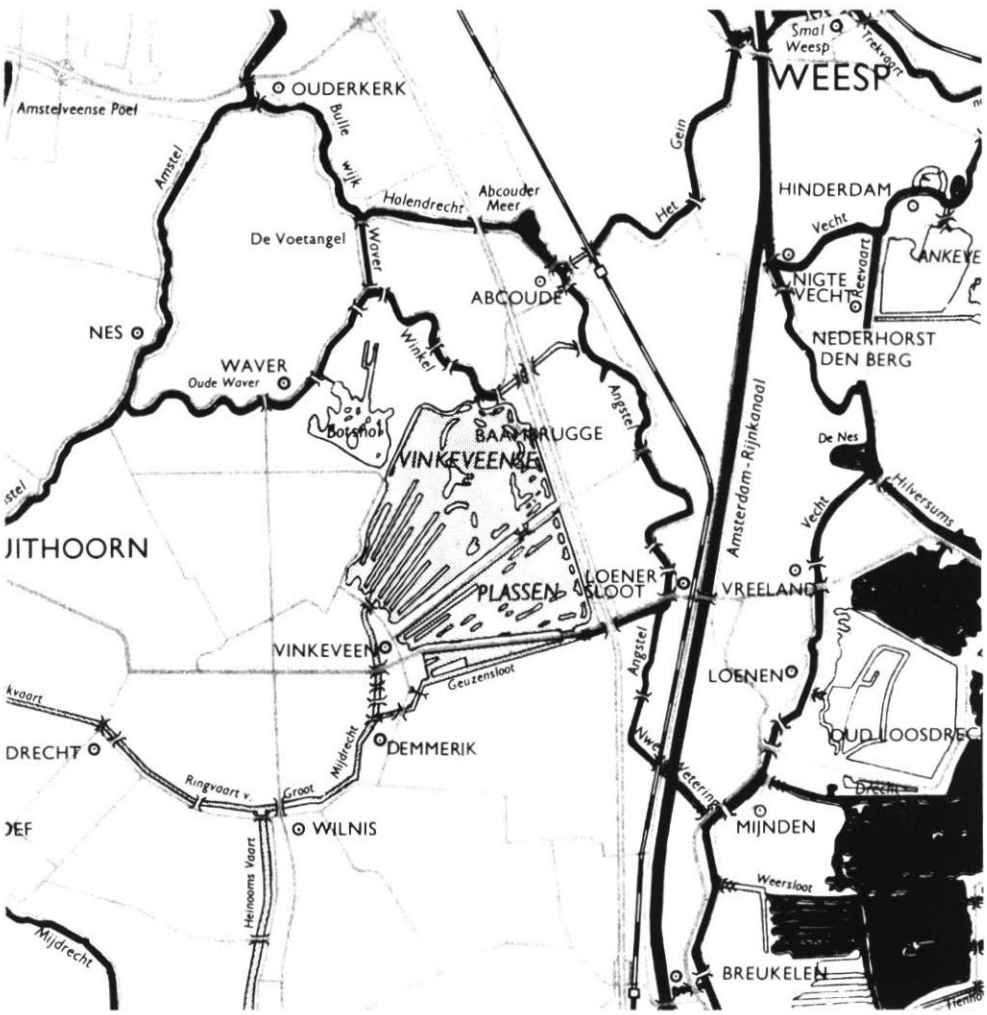
We hebben energie nodig om allerlei dingen te doen: ons lichaam in stand houden door te eten, de grond omploegen, graan oogsten, dorsen en malen, huizen bouwen en ga zo maar door.

In het verre verleden was de enige energiebron de mens zelf, menskracht dus. Al gauw wist men dieren voor werk te gebruiken. Hun energie werd ontleend aan eten, dus uiteindelijk aan de zon.
De mens leerde het vuur te gebruiken om zich te verwarmen, om eten te koken. Pas heel laat (ca. 1750) is men op wat grotere schaal brandstof gaan gebruiken om arbeid te verrichten.

Resten van energievoorzieningen uit het verleden
In het Nederlandse landschap zijn resten van energievoorzieningen uit het verleden te herkennen. Om verzekerd te zijn van voldoende hout plantten de boeren in de weidegebieden van Nederland bijvoorbeeld snelgroeiende bomen bij de boerderij, o.a. knotwilgen. Bij veel boerderijen vind je nog 'houtkampen', kleine stukjes bos van o.a. wilgen.

In veel ontwikkelingslanden is hout nog steeds de belangrijkste energiebron. Maar er vindt daardoor op grote schaal ontbossing plaats met als gevolg: grote afstanden om hout te halen én bij regenval spoelt de bodem weg

Ook van het turfsteken vind je de resten nu nog in het Nederlandse landschap terug.
Zowel in West-Nederland als in Oost-Nederland zijn grote stukken grond afgegraven voor turf.
In West-Nederland kan je die afgravingen nog herkennen aan de meren die daardoor ontstaan zijn, o.a. de Reeuwijkse plassen bij Gouda, de Loosdrechtse plassen. De afturving van het land was soms een groot gevaar: dijken werden ondergraven, de oevers van grote plassen die ontstaan waren, kalfden af bij storm. Zo ontstond onder andere de Haarlemmermeer. De overheid verbood het afgraven van turf op veel plaatsen, maar moest daar een andere energiebron tegenover stellen: o.a. de aanvoer van turf uit Oost-Nederland. Het



Een kaart van de Vinkeveense plassen. Aan de langgerekte eilanden kan je nog zien hoe ze uitgeveend zijn

grootste deel van de heidevelden zijn onder meer daardoor verdwenen. In Limburg zijn de grote bergen mijnafval nog over.
Uit deze voorbeelden kun je zien dat de energievoorziening in het verleden grote sporen nagelaten heeft in het Nederlandse landschap, ja zelfs voor grote rampen heeft gezorgd zoals overstromingen (o.a. de Biesbos). Andere overblijfselen van energievoorzieningen, die voor een deel het Nederlandse landschap bepalen, zijn de windmolens in West- en Noord-Nederland en de watermolens in het oosten.
Ze werden voor industriedoeleinden gebruikt. Ze zaagden hout, maalden graan, stampten olie, sloegen papier en, niet te vergeten, hielden het water buiten de polders.

Bij nieuwe beslissingen over de energievoorziening moeten we goed beseffen wat we ermee in het landschap en in het milieu aanrichten, zodat de mensen over 100 jaar niet zeggen: hoe hebben ze dat ooit kunnen doen!

De Hollandse molen: een energiemonument?

Opdrachten

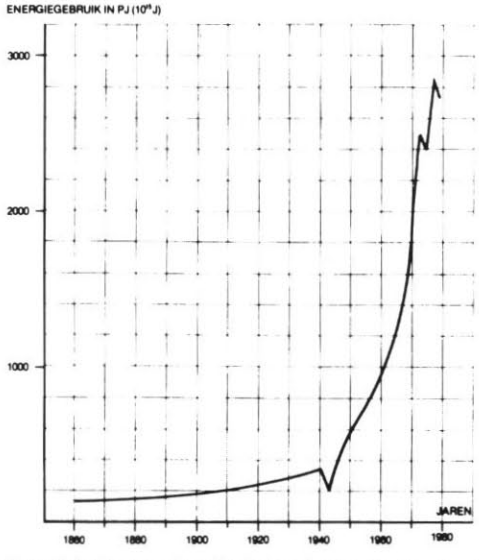
1 Kijk eens rond in je omgeving of je de restanten van voorzieningen voor energieopwekking uit het verleden kunt vinden die gebruik maakten van:
- a de wind
- b hout
- c dierkracht
- d waterkracht
- e steenkool
- f turf

Van welke van deze energievoorzieningen uit het verleden zeg je: dat hadden ze nooit zo mogen doen?

2 Bedenk hoe de stad of het dorp waar je nu woont of waar je school staat 100 jaar geleden aan zijn energie kwam om van graan brood te maken, om een huis te bouwen en om een huis te verwarmen. Welke sporen van die energievoorziening kun je nu nog terugvinden?

1-2 ENERGIE NU

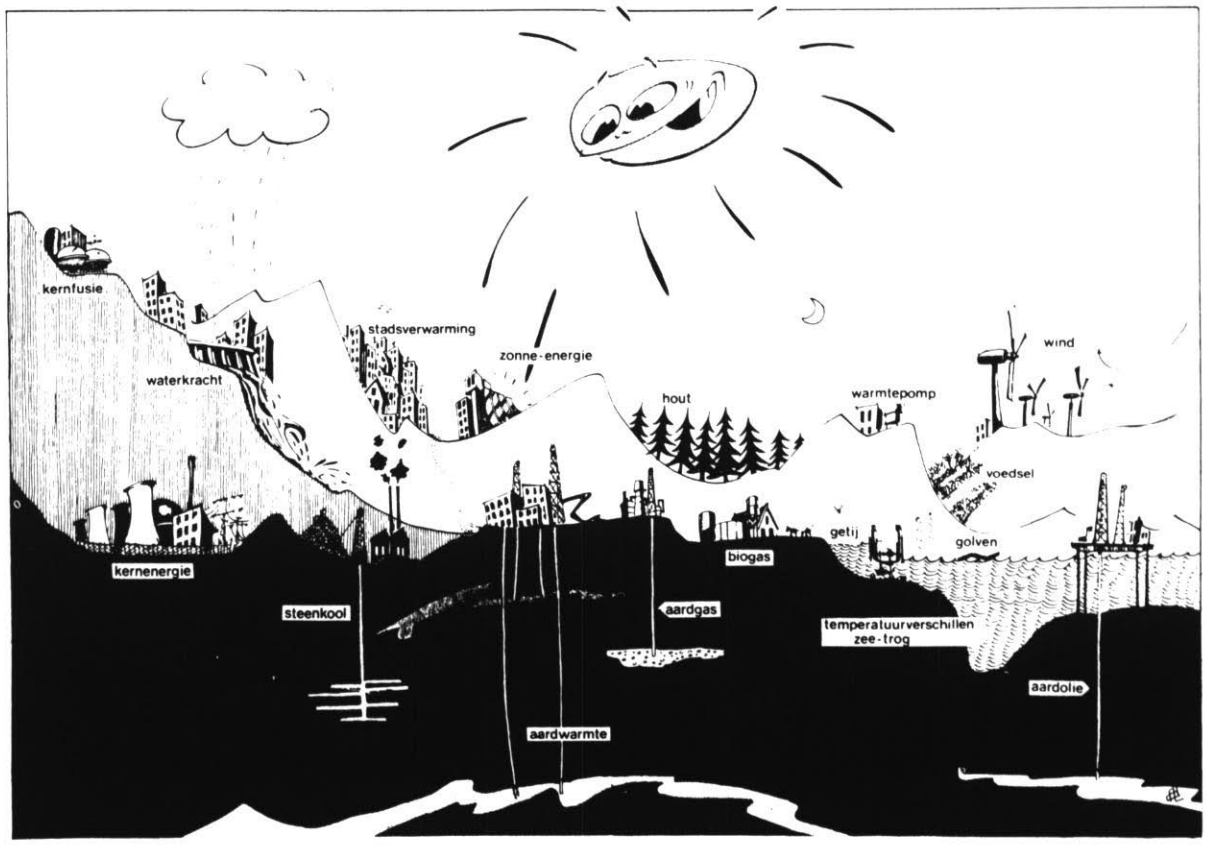
Een hoog energiegebruik zit ingebakken in onze samenleving
In de laatste 50 jaar is het energieverbuik in Nederland gigantisch gestegen.
Er zijn tal van beslissingen genomen waardoor we nu over voldoende energie beschikken: er zijn gasbronnen in Groningen aangeboord, olieraffinaderijen en elektriciteitscentrales gebouwd.
Er liggen nu overal elektriciteitsdraden in huis, gasbuizen in de grond en hoogspanningsmasten staan in het landschap.
Er zijn ook allerlei dingen gemaakt waardoor we veel energie gebruiken: moderne woningen met veel glas (doorzonwoningen, ook wel doortochtwoningen genoemd), auto's, wegen, stereo-installaties, televisietoestellen, badkamers, fabrieken, vliegtuigen enz.



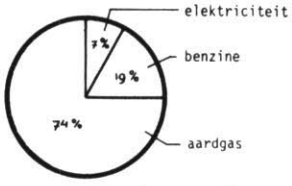
Ontwikkeling van het Nederlands energiegebruik sinds 1860

We kunnen naar een plaat luisteren, t.v. kijken, aluminiumfolie kopen enz. Allemaal dingen waarvoor veel energie nodig is.
We merken er ook de nadelen van: geluidshinder, milieuvervuiling, onveiligheid, hoge energierekeningen, economische problemen door o.a. olieprijsverhogingen. Niet wij alleen, ook mensen die er niet van profiteren merken de nadelen.
Door de gestegen olieprijzen bijvoorbeeld, zijn de mensen en de landen van de Derde Wereld nog meer in problemen gekomen (behalve de landen met veel olie, zoals Nigeria, Venezuela).

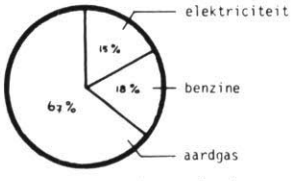
Door de ingrijpende invloed die de energievoorziening op ons leven heeft, is een grote discussie over energie op gang gekomen. Die is ontstaan door een olieboycot in 1973, door de noodzaak (?) van enorme investeringen in de energievoorziening (o.a. door olieboringen op de Noordzee), onderzoek naar kernenergie en het bouwen van kerncentrales en kolenoverslagbedrijven. Maar ook door energiebesparingen, door protesten, demonstraties tegen kernenergie en milieuvervuiling, het bouwen van windmolens en zonnecollectoren zowel door gewone mensen als door de industrie.



Veel verschillende energiebronnen zijn mogelijk



Verdeling van het energiegebruik door een gemiddeld gezin (1982) in %



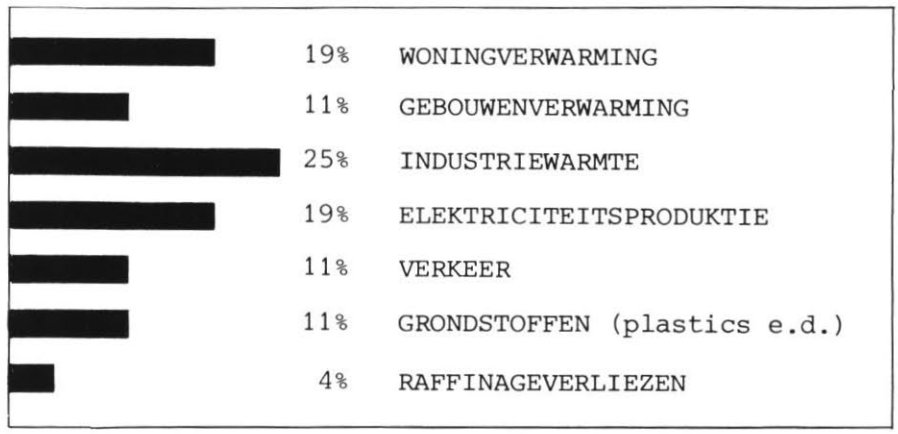
Verdeling van het *primaire* energiegebruik door een gemiddeld gezin (1982) in %

Hoeveel energie gebruiken wij?

Om nu een idee te krijgen van hoeveel energie we gebruiken, gaan we kijken naar het gemiddelde energiegebruik van een gezin met 2 kinderen en een auto:
De drie belangrijkste energiebronnen van zo'n gezin zijn (1982):
- aardgas (3550 m^3)
- benzine (900 liter)
- elektriciteit (2700 kWh)

Toch klopt dat eigenlijk niet. Om elektriciteit op te wekken heb je kolen, olie of aardgas nodig. Gemiddeld slechts 35% van de energie uit het aardgas wordt in een centrale in elektrische energie omgezet. Het aandeel van de elektriciteit is dus hoger als we ook kijken naar de energie die het gekost heeft om de elektriciteit te maken ('primaire energie'). Voor het opwekken van 2700 kWh is daarom ongeveer 900 m^3 aardgas nodig.
Bij jou thuis kunnen de getallen heel anders liggen.
Als jullie geen auto hebben, zullen jullie waarschijnlijk minder benzine gebruiken. Als jullie huis goed geïsoleerd is, scheelt dat veel aardgas (of huisbrandolie).
Probeer eens te schatten welk percentage van jullie jaarlijks energieverbruik aardgas, benzine en elektriciteit is.
Gebruik de jaarafrekeningen van het energiebedrijf of maak schattingen.

Niet alleen in en om het huis wordt energie gebruikt, maar ook in alle andere delen van de maatschappij: scholen en overheidsgebouwen worden verwarmd, het vrachtvervoer heeft benzine of dieselolie nodig, de industrie heeft aardolie en elektriciteit nodig om allerlei produkten te maken.
In onderstaand overzichtje staat aangegeven hoeveel percent van het totale binnenlandse (primaire) energieverbruik voor verschillende doeleinden gebruikt wordt.



Het aandeel van verschillende activiteiten in het totale primaire energiegebruik van Nederland

Opdrachten

1 Hoeveel joule energie verbruikt het bovengenoemde 'gemiddelde' gezin per jaar?
(1 m^3 aardgas levert $30 \cdot 10^6$ J
1 l benzine levert $33 \cdot 10^6$ J
1 kWh elektriciteit is $3{,}6 \cdot 10^6$ J)

2 Kijk eens rond in je omgeving. Welke zijn de meest opvallende voorzieningen die nodig zijn voor:
a elektriciteit
b brandstof voor auto's
c gas
d andere soorten energie
Welke invloed hebben die voorzieningen op het landschap?
Welke van die voorzieningen zullen er nog, naar jouw verwachting, over 50 jaar zijn? Heel, gedeeltelijk of als puinresten?

3 Uit de grafiek van de ontwikkeling van het Nederlands energiegebruik (zie blz. 16) kan je zien dat er 3 momenten zijn dat het energiegebruik (even) afneemt. In welke tijden was dat? Kun je er enkele oorzaken voor geven?

1-3 ENERGIE IN DE TOEKOMST

Zoals de energievoorziening vroeger en nu diepe sporen achterlaten in het landschap en in de maatschappij als geheel, zo zal dat ook voor de energievoorziening van de toekomst gelden.

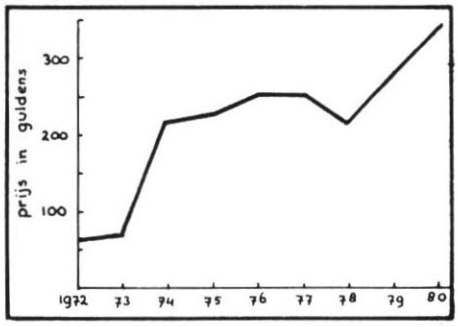
In Zuid-Holland staat 3000 megawatt aan elektrisch vermogen opgesteld. De maximale vraag naar elektriciteit komt echter niet boven de 1900 megawatt uit, als gevolg van de bij de prognoses sterk achtergebleven vraag. Een gigantische overcapaciteit in het net van het Elektriciteitsbedrijf Zuid-Holland (EZH).

Bericht uit de *Volkskrant* van 29 januari 1983

Elke gasleiding, hoogspanningsmast of raffinaderij die wordt neergezet moet in principe jarenlang mee.
'Foute' beslissingen hebben gevolgen voor jaren. In de jaren '70 verwachtte men nog een groei van de vraag naar elektriciteit. Daarom heeft men meer centrales gebouwd dan nu nodig zijn. Door besparingen en door economische achteruitgang zit men in 1983 met een enorme overcapaciteit aan elektrische centrales: de vraag is niet gestegen maar gedaald.

Energietekort?
Kolen, olie en aardgas kunnen in de toekomst opraken. Ze zijn eindig. Men heeft uitgerekend hoe lang de wereld nog vooruit kan met die energiebronnen. Dat hangt natuurlijk af van:
- hoeveel er jaarlijks wordt gebruikt
- hoeveel dat jaarlijkse verbruik groeit/daalt
- hoe groot de voorraden zijn
- of er nog voorraden bij gevonden worden
- hoeveel geld men wil uitgeven voor het ontginnen van olie, kolen of aardgasvelden

Wat het laatste punt betreft is er in de laatste jaren al veel veranderd. De olieprijs is met sprongen omhoog gegaan, en pas begin 1983 weer wat gedaald.
Daarom denkt men erover olie te gaan winnen uit teerzanden en leisteen – iets wat vroeger veel te duur was.
Het doen van voorspellingen is heel moeilijk. We zetten toch zo'n voorspelling neer. Die is gebaseerd op de bewezen voorraden van 1975 en gaat uit van het wereldenergieverbuik van 1975.



Prijsverloop van een ton ruwe aardolie

	aantal jaren na 1975 tot uitputting bij een jaarlijkse groei van het energieverbruik van				
	0%	2%	4%	6%	8%
olie	135	65	47	37	31
gas	265	92	62	48	40
steenkool	2550	200	120	85	70

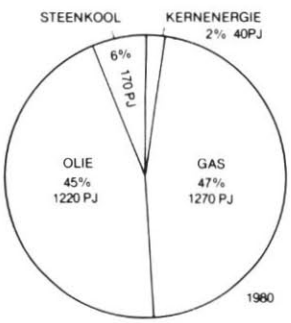
Je ziet in de tabel dat de groei van het energiegebruik heel belangrijk is. Zonder groei hebben we nog voor 2550 jaar steenkool. Met een groei van 8% (wel erg veel!) slechts voor 70 jaar! De cijfers zullen wel veranderd zijn. Dat komt door de groei in de periode 1975-1982 die veel kleiner is geweest dan men verwachtte en vanwege nieuw ontdekte voorraden.
Ook uranium, de splijtstof voor kernenergie, is maar op beperkte schaal aanwezig op de wereld. De Nederlandse regering schat in de nota *Energiebeleid* dat er zeker genoeg uranium is voor 50 jaar (dan mag het aantal kerncentrales zelfs verdubbelen). Als het lukt nieuwe splijtstof te kweken in kweekreactoren zoals in Kalkar (zie leestekst 4), is er zelfs genoeg voor enkele eeuwen.
Er zijn ook duurzame energiebronnen. Dat zijn de zon, de wind, planten, waterkracht en energie uit oceanen. Al die energiebronnen ontlenen uitein-

delijk hun energie aan de zon. Omdat de zon nog miljarden jaren kan blijven schijnen, zijn deze bronnen in feite onuitputbaar. Deze bronnen werden in *Energie thuis* al besproken. Het probleem van deze duurzame energiebronnen is meestal dat het veel geld kost deze energie in een bruikbare vorm om te zetten.
Samenvattend kun je zeggen dat er energie genoeg is op de wereld, maar dat het steeds moeilijker en duurder wordt om de energie te pakken te krijgen. Daarom: wees zuinig met energie!

Het energiebeleid van de regering
Naast de vraag: 'hoeveel energie?' is ook de vraag: 'waar halen we energie vandaan?' van belang. Worden we in toenemende mate afhankelijk van de olielanden? Maken we snel ons aardgas op? Gaan we kerncentrales bouwen?

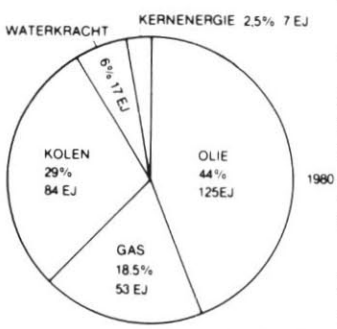
Op deze beslissingen heeft de regering een grote invloed.
De regering voert een 'energiebeleid':

Het beleid tot het jaar 2000 omvat twee hoofdpunten:
– energiebesparing
– diversificatie (dat wil zeggen: meer soorten energiebronnen gaan gebruiken)



Verdeling van het energiegebruik in Nederland naar energiebronnen (1980) in procenten en in joule.
(1 PJ = 1 petajoule = 10^{15} joule)

De regering wilde in de nota *Energiebeleid* van '79/'80 energiebesparing stimuleren door:
– voorlichting: vertellen hoe je kan besparen
– prijzen te verhogen: duurdere energie betekent dat de mensen er zuiniger mee omspringen
– voorschriften te geven: nieuw gebouwde huizen moeten goed geïsoleerd zijn, nieuwe c.v.-ketels moeten zuiniger werken, nieuwe elektriciteitscentrales moeten stadsverwarming geven, enz.
– subsidies te geven, onder andere op isolatie
– onderzoek naar energiebesparing te betalen
– het openbaar vervoer te bevorderen
– warmtekrachtkoppeling in de industrie te bevorderen. Warmtekrachtkoppeling wil zeggen: gelijktijdige opwekking van warmte en elektriciteit.
– energiezuinige produktiemethoden



Verdeling van het energiegebruik van de wereld naar energiebronnen (1980) in procenten en in joule.
(1 EJ = 1 exajoule = 10^{18} joule)

Voor bijna de helft van het Nederlandse energiegebruik wordt Gronings aardgas gebruikt. Uit het cirkeldiagram dat hiernaast staat afgebeeld, kan je dat aflezen.
Daaruit kan je ook zien dat in Nederland veel aardolie wordt gebruikt. Het andere cirkeldiagram geeft aan hoe het energieverbruik van de hele wereld is verdeeld over de verschillende energiebronnen.

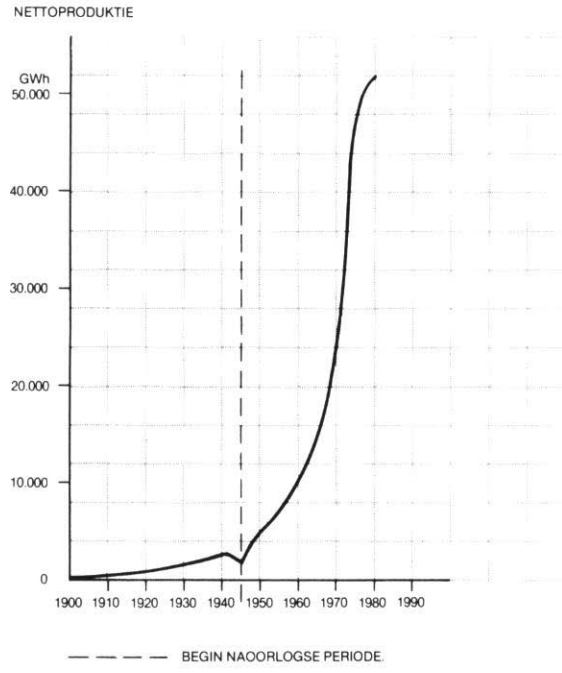
De regering vindt dat Nederland veel te veel afhankelijk is van aardgas en aardolie. Zij wil dat veranderen door het gebruik van andere energiebronnen krachtig te bevorderen. Daarvoor heeft zij tot het jaar 2000 vooral gekozen voor kolen en kernenergie. Deze twee energiebronnen moeten in hoofdzaak gebruikt worden voor het opwekken van elektriciteit.

Door het opzetten van de 'Brede Maatschappelijke Discussie' over energie hoopt de regering een energiebeleid te gaan voeren, dat door het grootste deel van het Nederlandse volk ondersteund wordt.

Waarom kolen, kernenergie en wind vergelijken?
De regering stelt in de nota *Energiebeleid* uit 1979/1980 voor, dat de afhankelijkheid van aardgas en aardolie wordt verminderd (diversificatie) door (nieuwe) elektrische centrales te laten draaien op kolen en kernenergie.

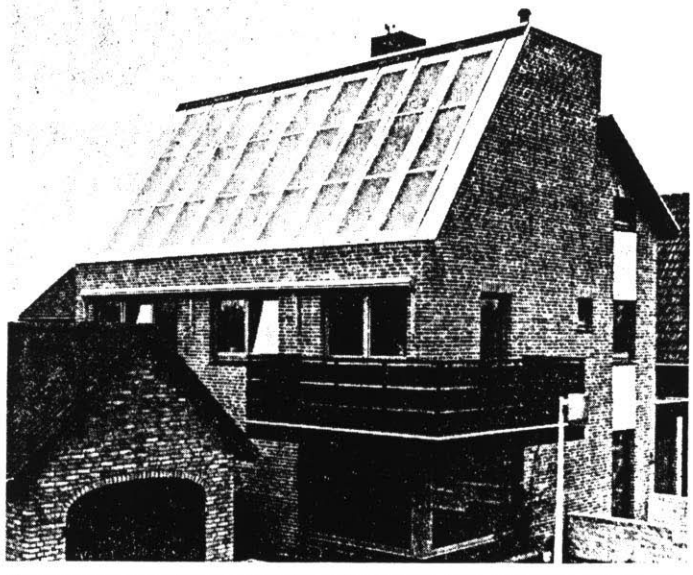
Als het mogelijk is voelt de regering ook veel voor windenergie, maar ze vindt dat er te grote problemen zijn met het overbruggen van windstille perioden en met het plaatsen van grote windturbines in ons dichtbevolkte land.
Waarom zoekt de regering de diversificatie vooral in de elektriciteitsopwekking, terwijl die toch maar 20% van het binnenlands verbruik uitmaakt?

Daarvoor zijn enkele redenen:
- kernenergie kan vrijwel alleen gebruikt worden voor elektriciteitsopwekking, evenals windenergie
- kolen geven grote milieuproblemen. Deze zijn het beste aan te pakken op de plaatsen waar grote hoeveelheden kolen moeten worden gebruikt: bij elektriciteitscentrales en grote industrieën. Voor kleinere industrieën denkt de regering aan de mogelijkheid de steenkool te vergassen of vloeibaar te maken in een grote fabriek, zodat de vervuiling op die plaats effectief kan worden bestreden
- elektriciteit wordt voor vrijwel alle doeleinden gebruikt. Als de elektriciteitsvoorziening stopt, ligt de hele economie stil. Daarom vindt de regering het juist bij de elektriciteitsopwekking belangrijk, dat die niet afhankelijk is van enkele energiebronnen of enkele olie-exporterende landen



Van 1900 tot 1980 is het elektriciteitsgebruik in Nederland snel gestegen. Let op de verschillen met de grafiek van blz. 16. Waarom begint deze grafiek pas met 1900?

– de regering verwachtte in 1980, toen de nota werd geschreven, een flinke stijging van het elektriciteitsgebruik. Van 1963 tot 1973 was die stijging 10% per jaar. Van 1974 tot 1979 was dat 5%. Na het uitkomen van de nota zijn die cijfers anders komen te liggen: in 1980 en '81 0%; in 1982 zelfs –2%.



Op huisverwarming kan veel bespaard worden. Het opvangen van zonne-energie, zoals bij dit huis, is ook een mogelijkheid om aardgas of olie te besparen

Voor ruimteverwarming is energiebesparing door isolatie en andere maatregelen het belangrijkst. Verder liggen er mogelijkheden tot het gecombineerd opwekken van warmte en elektriciteit, de zogenaamde warmtekracht koppeling. Dat kan ook in de industrie die zelf warmte en elektriciteit nodig heeft, of in een elektriciteitscentrale waar de warmte voor stadsverwarming gebruikt kan worden.
Voor de toekomst zijn de beslissingen over de opwekking van elektriciteit dus heel belangrijk. Daarom gaat het in dit thema verder over elektriciteitscentrales.
Er is gekozen voor de vergelijking van een kolencentrale, kerncentrale en windmolens, omdat daar de belangrijkste veranderingen te verwachten zijn in de toekomstige energieproduktie. Welke keuze we maken, zal van grote invloed zijn op de vraag hoe Nederland er in de toekomst uitziet.

Opdrachten

1 Verwacht jij over zo'n ca. 20 jaar méér of minder energie te gebruiken dan je ouders nu? Voor welke activiteiten verwacht je meer te gebruiken, voor welke activiteiten minder?

2 Waarom wordt, naar verwachting, het aantal gas- en oliecentrales niet uitgebreid?

3 Op welke belangrijke punten verschilt het cirkeldiagram over de verdeling naar energiebronnen van Nederland met die van de rest van de wereld? (Zie blz. 20). Noem één van de oorzaken daarvan.

4 Nederland verbruikt ongeveer 1% van het totale wereldverbruik aan energie. Hoe kun je dat uit bovengenoemde cirkeldiagrammen zien?

2 elektriciteit opwekken en transporteren

Dit deel heet 'Elektriciteit opwekken en transporteren' omdat het gaat over wat kolencentrales, kerncentrales en windmolens gemeenschappelijk hebben:
- een generator
- niet alle energie die je erin stopt komt er als elektrische energie uit
- de energie is verbonden met een grondstof. Het vrijmaken van de energie uit de grondstof kan milieuvervuiling opleveren
- de elektrische energie moet via hoogspanningsleidingen naar de verbruikers getransporteerd worden

Daarom vind je in dit deel:

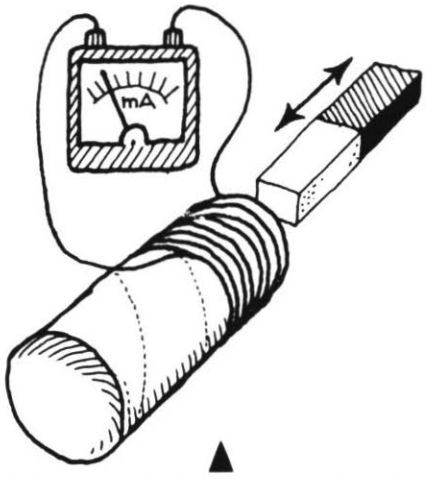
inhoud

		blz.
2-1	De opwekking van elektriciteit	27
2-2	Energiestromen in een centrale	29
2-3	De massastroom in een centrale	37
2-4	Van de centrale naar huis	48

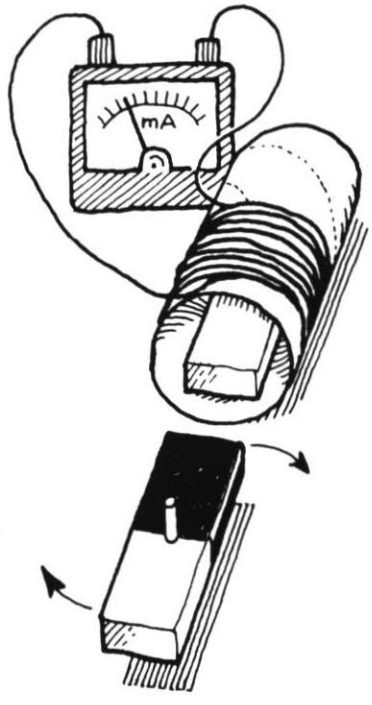
elektriciteit opwekken en transporteren

2-1 DE OPWEKKING VAN ELEKTRICITEIT

Een elektriciteitscentrale moet elektrische energie leveren aan de verbruiker. Daarvoor moet een elektrische spanning opgewekt worden zodat er een stroom gaat lopen als een verbruiker een lamp of een elektrisch apparaat aanzet.
Het hart van elke elektrische centrale is de *generator*. Daarin wordt de elektrische spanning opgewekt. Een generator kan je vergelijken met een fietsdynamo: in een fietsdynamo wordt een magneet rondgedraaid. Daardoor verandert het magnetisch veld in een spoel voortdurend. In de spoel ontstaat een *inductiespanning* waarop je voorlicht en achterlicht kunnen branden.
Als je de uiteinden van de spoel waarin je een magneet beweegt, met elkaar verbindt kan er een stroom gaan lopen. Die kun je met een (milli)ampèremeter aflezen.



Je kunt een inductiespanning opwekken door het magnetisch veld in een spoel te *veranderen*

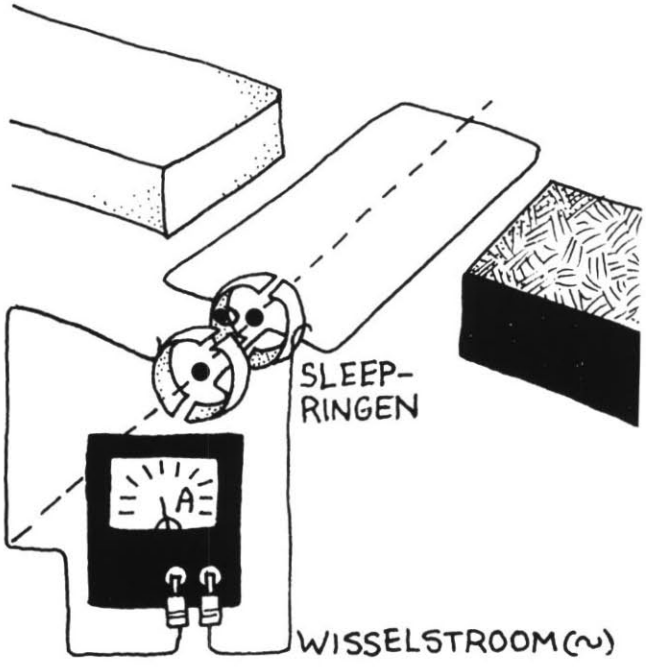


Het principe van een dynamo: door draaiing van een magneet verandert het magneetveld in een spoel: daardoor wordt een inductiespanning opgewekt.
Een stuk weekijzer in de spoel versterkt de optredende magnetische velden

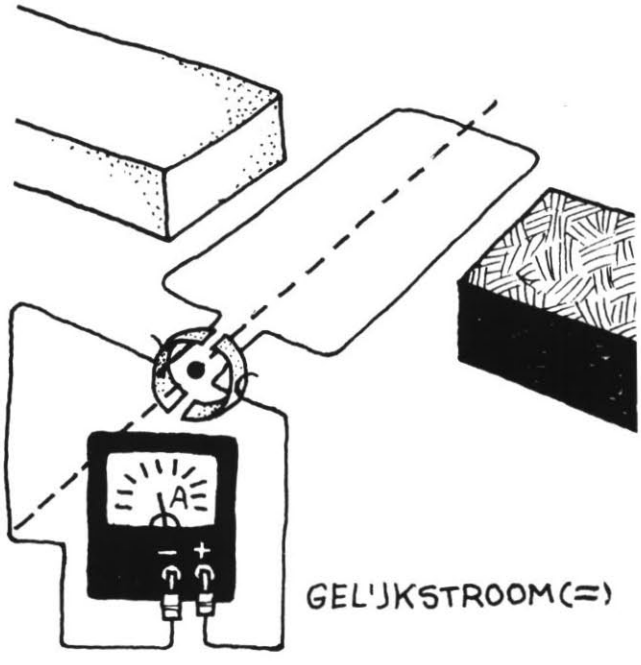
PROEF 1 Maak de opstellingen zoals hierboven getekend zijn. Beweeg de magneet. Schrijf op hoe de beweging van de magneet samenhangt met de uitslag van de milliampèremeter. Let ook op het verschil in uitslag bij het bewegen van verschillende magneetpolen in de spoel.

Aan de uitslag van de milliampèremeter kan je zien dat de stroom nu eens de ene, dan weer de andere kant op stroomt. We noemen dat een *wisselstroom*, veroorzaakt door de wisselspanning, die in de spoel wordt opgewekt (de inductiespanning).
Een andere mogelijkheid om een dynamo te maken is door de magneet te laten staan en de spoel te draaien. Door de stroom op verschillende manieren met sleepringen af te tappen, kan je zowel een wisselstroom als een gelijkstroom maken.

elektriciteit opwekken en transporteren



Het principe van een wisselstroomdynamo



Het principe van een gelijkstroomdynamo

Als de magneet van een wisselstroomdynamo snel wordt rondgedraaid, kan de wijzer van de ampèremeter het niet meer bijhouden en blijft op 0 staan. Dat klopt ook wel want er gaat evenveel stroom heen als terug: de gemiddelde stroom is 0. Maar toch lopen er wel degelijk stromen want je kunt er een lampje op laten branden: er wordt dus wel elektrische energie getransporteerd. Er bestaan ook stroommeters en spanningsmeters die altijd naar dezelfde kant uitslaan: wisselstroommeters en wisselspanningsmeters.

PROEF 2 Herhaal proef 1 met een wisselstroommeter.

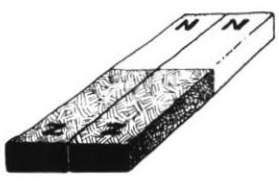
PROEF 3 Haal de dynamo van een fiets uit elkaar en onderzoek hoe de dynamo werkt, hoe de spoelen gewikkeld zijn en waar de polen van de magneet zitten. Probeer te bedenken waarom de spoelen de gevonden vorm hebben.

PROEF 4 Onderzoek de spanning die een fietsdynamo afgeeft met een voltmeter of een oscilloscoop.

PROEF 5 Doe proef 2 met de ronddraaiende magneet nog eens. Onderzoek of de uitslag van de wisselspanningsmeter afhangt van:

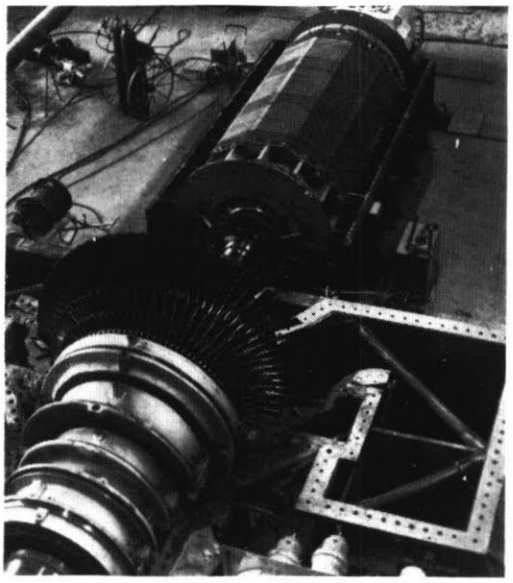
1 de draaisnelheid van de magneet
2 de sterkte van de magneet (plak twee magneten met plakband aan elkaar)
3 het aantal windingen op dezelfde lengte
4 de aanwezigheid van een weekijzeren kern
5 verzin zelf andere mogelijkheden

Schrijf je conclusies op.



Generatoren

In een elektriciteitscentrale staan grote dynamo's – generatoren genoemd. De magneet die ronddraait bestaat uit een spoel, waar een stroom doorheen loopt (elektromagneet). Deze spoel wordt de *rotor* genoemd. De spoel waarin de inductiespanning wordt opgewekt wordt de *stator* (stilstaande spoel) genoemd. De grootte van de inductiespanning is enkele duizenden volt. De stromen die in de stator gaan lopen als er ergens een elektrisch apparaat wordt aangezet, zijn wisselstromen met een frequentie van 50 hertz (50 Hz). Dat wil zeggen: 50 maal per seconde gaat de stroom dezelfde kant op en 50 maal per seconde gaat de stroom de andere kant op. In het verleden heeft men gekozen voor wisselstroom in het openbare net omdat het daarmee eenvoudig is de opgewekte spanningen te veranderen met een transformator. Een transformator (zie § 2-4) werkt alleen bij wisselspanningen.



De elektrische energie wordt vanuit de centrale aan het landelijk elektriciteitsnet afgegeven en ergens in het land kan iemand daarmee de stofzuiger, koelkast of boormachine laten draaien.
Voor het laten draaien van de generatoren is energie nodig uit brandstof, uit uranium, uit wind. Hoe dat zit komt in § 2-2 aan de orde.

Een gedemonteerde generator

Opdrachten

1 Beschrijf het verschil tussen gelijkspanning en wisselspanning.

2 In een auto zit ook een dynamo die gelijkspanning opwekt. Waarom is wisselspanning voor een auto niet handig?

3 Zal je een inductiespanning in een spoel krijgen als je een magneet binnen de spoel cirkels laat beschrijven? Probeer het maar.

2-2 ENERGIESTROMEN IN EEN CENTRALE

Niet alle energie die een centrale binnenkomt, verlaat de centrale als elektrische energie. Waar blijft de rest van de energie? Waarom kan er niet met

dezelfde hoeveelheid kolen (of een andere energiedrager) meer elektrische energie gemaakt worden? Op deze vragen gaan we in dit hoofdstuk in.

Twee energiewetten

Elke elektriciteitscentrale haalt energie uit een voor hem geschikte bron en maakt er elektrische energie van. Bovendien ontstaan er in de centrale warmte (bijvoorbeeld in de vorm van koelwater of rookgassen), straling, geluid, kortom andere vormen van energie dan je in een centrale eigenlijk zou willen. Daarbij zijn twee natuurkundige wetten die iets over energie en energieomzettingen zeggen van belang: de wet van behoud van energie en de rendementswet.

- De *wet van behoud van energie* zegt, dat energie niet zomaar kan verdwijnen of zomaar uit het niets kan ontstaan. Energie kan alleen omgezet worden van de ene vorm in één of meer andere vormen.
  Bij verbranding van steenkool in een elektriciteitscentrale bijvoorbeeld, wordt de energie in steenkool omgezet in andere energievormen: warmte van verbrandingsgassen, warmte in het koelwater, elektrische energie, enz. De hoeveelheid energie (in alle verschillende vormen), die de centrale 'levert', is gelijk aan de hoeveelheid energie die aan de centrale toegevoerd werd.
- De *rendementswet* zegt dat maar een deel van de warmte, die bij verbranding vrijkomt, gebruikt kan worden om een machine werk (arbeid) te laten verrichten. De rest van die warmte moet 'verdwijnen' (beter: afgevoerd worden), om de machine te laten werken. Bij een elektriciteitscentrale betekent dit, dat een deel van de warmte (geleverd door de verbranding van steenkool) gebruikt wordt om de turbine te laten draaien, én een deel wordt afgevoerd door het koelwater. Bij de energieomzetting in een elektriciteitscentrale komt er dus minder energie in de vorm van elektriciteit uit, dan er in de vorm van in steenkool opgeslagen energie in gestopt wordt. De hoeveelheid gewenste energie (elektrische) is altijd kleiner dan de hoeveelheid toegevoerde energie.
  Hoe 'zuinig' een energieomzetter met de toegevoerde energie omspringt, wordt weergegeven door de grootheid (energie-) 'rendement':

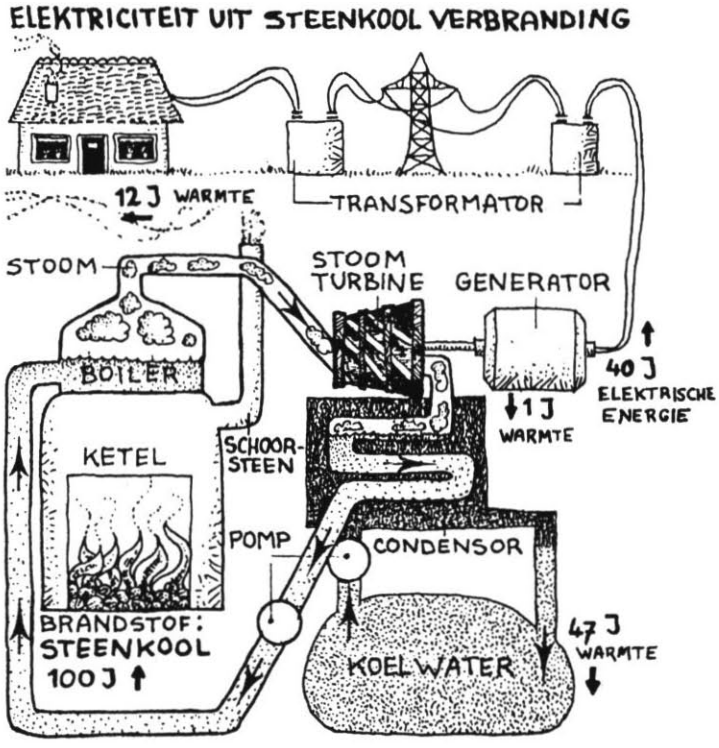
$$\text{RENDEMENT} = \frac{\text{HOEVEELHEID GEWENSTE ENERGIE}}{\text{HOEVEELHEID TOENEMENDE ENERGIE}} \times 100\,\%$$

Let op! Er bestaat ook een economisch rendement, dat aangeeft hoeveel gulden elke geïnvesteerde gulden opbrengt.

In een elektriciteitscentrale ontstaat uit elke 100 J toegevoerde energie in steenkool zo'n 40 J elektrische energie. Het rendement van zo'n centrale is dus:

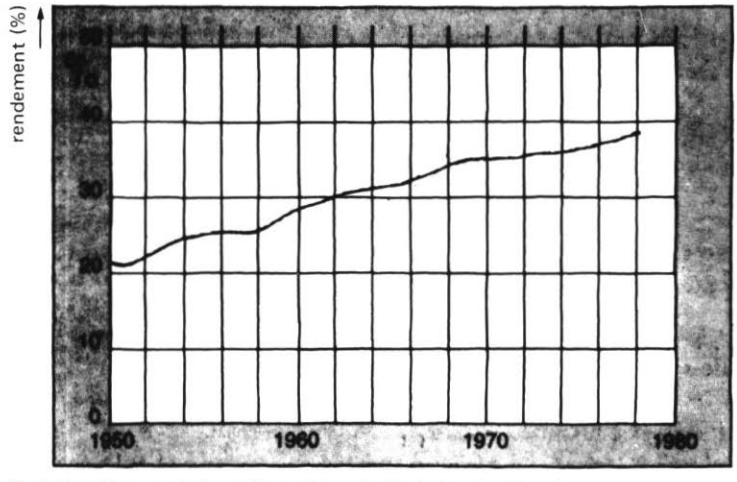
$$\text{rendement} = \frac{\text{elektrische energie}}{\text{energie in steenkool}} = \frac{40}{100} \times 100\% = 40\%$$

Van de toegevoegde energie wordt 40% omgezet in de gewenste vorm en 60% gaat 'verloren' in de vorm van niet-gewenste energie (grotendeels afval-warmte).



Als voorbeeld de energiestroom in een kolencentrale. Hoe groot is het rendement? Hoeveel energie gaat de centrale in en hoeveel komt eruit?

Zo kan je van elke centrale het rendement berekenen. Hoe belangrijk het rendement is, blijkt wel uit het feit dat er op allerlei mogelijke manieren geprobeerd wordt het rendement van elektrische centrales (maar ook van lampen, centrale verwarming, stofzuigers) groter te maken: bij minder kosten aan energie krijg je er toch evenveel uit als eerst. Het rendement van thermische centrales is in Nederland van 1958 tot 1978 van 27,8% tot 37,7% gestegen. Dus met minder brandstof kan je nu dezelfde hoeveelheid elektriciteit opwekken!

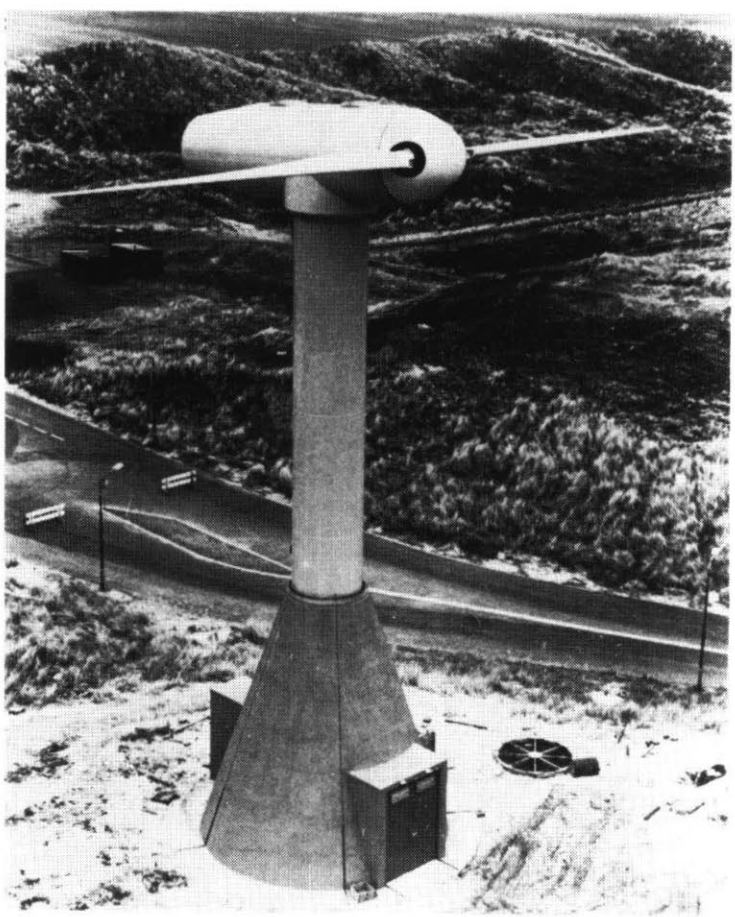


Ontwikkeling van het rendement van de Nederlandse Openbare Elektriciteitsbedrijven

Is het nu mogelijk om steeds hogere rendementen te krijgen? Volgens de tweede hierboven genoemde energiewet kan het rendement niet 100% worden. Maar hoe hoog kan dit wel worden? Dat hangt af van de soort energieomzetting die je wilt hebben. We zullen ingaan op de energieomzettingen bij de windturbine en de stoomturbine, omdat die het belangrijkste zijn bij onze vergelijking tussen de kolencentrale, kerncentrale (beide met stoomturbine) en de windturbine.

De aandrijving van een generator met een turbine
In een dieselgenerator draait een dieselmotor de generator rond zodat er elektriciteit wordt opgewekt. Voor grootscheepse elektriciteitsopwekking is deze methode niet zo geschikt, onder meer omdat het te veel brandstof kost (dus laag rendement). In plaats daarvan worden *turbines* gebruikt. Een turbine gaat draaien omdat er water, lucht of stoom met grote kracht doorheen stroomt.

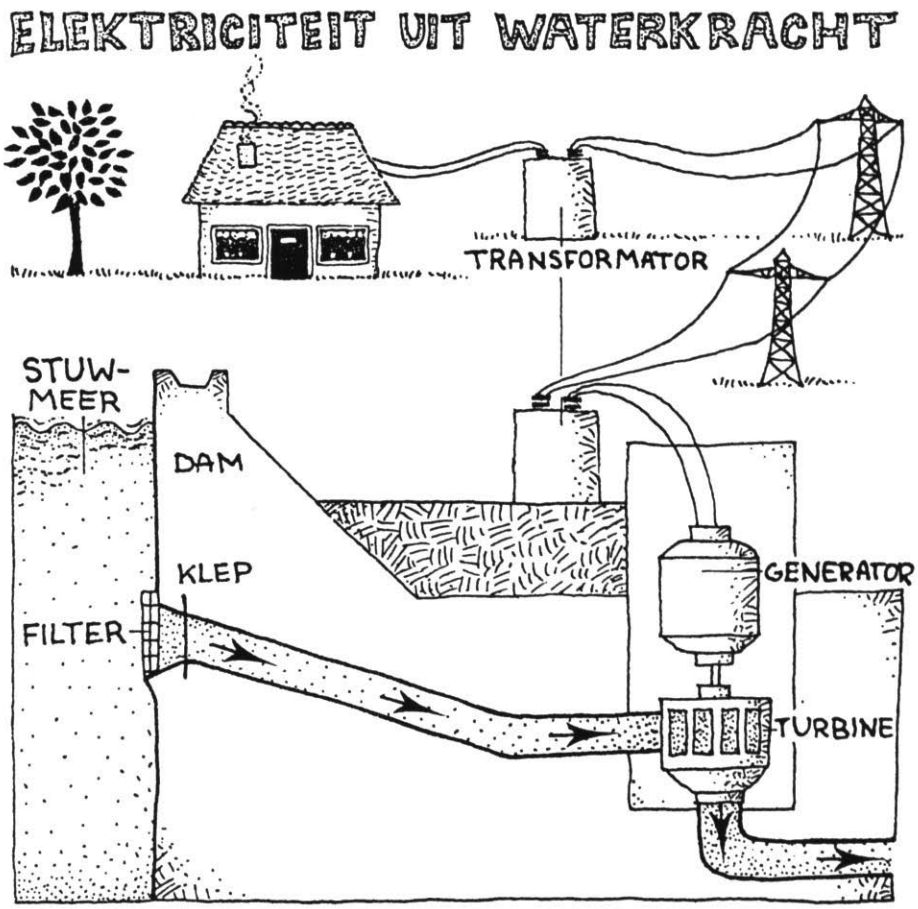
Windturbine
Windturbines zijn sneldraaiende windmolens die voor elektriciteitsopwekking gemaakt zijn.



Bij het Energiecentrum Nederland in Petten staat een experimentele windturbine

Een windturbine tapt energie af van de wind. De zon zorgt voor drukverschillen in de lucht. Daardoor gaat lucht van het ene punt op aarde naar het andere stromen. De lucht krijgt dus bewegingsenergie.
Niet alle energie van de wind kan aan de windturbine overgedragen worden. Niet alleen blijkt dat in de praktijk, ook in theorie is dat onmogelijk. Als de lucht, die met 10 m/s aankomt, al zijn bewegingsenergie zou afstaan, zou de lucht achter de turbine stil staan én zou de nieuwe lucht, die komt aanstromen, tegengehouden worden. Dat kan niet. Daarom kan de lucht slechts een deel van zijn bewegingsenergie afgeven. Men heeft berekend dat het maximaal haalbare rendement 60% is. Maar zelfs bij de beste windturbines zal het werkelijke rendement vanwege energieverliezen door wrijving, wervelingen in de lucht en dergelijke niet meer dan 50% bedragen.

Waterturbine
Door gebruik te maken van hoogteverschillen in rivieren kun je een waterturbine laten ronddraaien en daarmee een generator aandrijven.



elektriciteit opwekken en transporteren

Elektriciteit door waterkracht reële mogelijkheid

De stromingsenergie van het water wordt gebruikt om de waterturbine te laten draaien. Ook hier geldt dat niet alle energie uit het water gehaald kan worden omdat het water van de turbine nog moet wegstromen. Omdat het water al vanzelf wegstroomt bij een klein hoogteverschil, levert dat geen problemen op zoals bij de lucht. Daarom is het rendement van een waterturbine ook veel hoger: tot 95%!
In de naaste toekomst wordt waterkracht voor Nederland ook weer interessant. In de Maas in Limburg wordt een kleine waterkrachtcentrale gebouwd. Vanwege de geringe hoogteverschillen in onze rivieren kunnen we geen grote waterkrachtcentrales bouwen zoals in het buitenland.
Waterkracht is ook belangrijk voor het spaarbekken in het Plan Lievense, een plan om overtollige windenergie op te slaan in een stuwmeer in de Markerwaard. Zie verder daarover blz. 90 e.v.

Waterkracht

Het lijkt erop dat waterkracht in ons land de snelst gerealiseerde alternatieve energiebron gaat worden. Begin deze maand stelden de Samenwerkende Elektriciteitsproduktiebedrijven (SEP) dat op tien plaatsen in de Maas kleine centrales kunnen worden gebouwd, die gebruik makend van het waterverval elektriciteit produceren. Het totale vermogen van deze centrales wordt geschat op 55 en 65 megawatt.

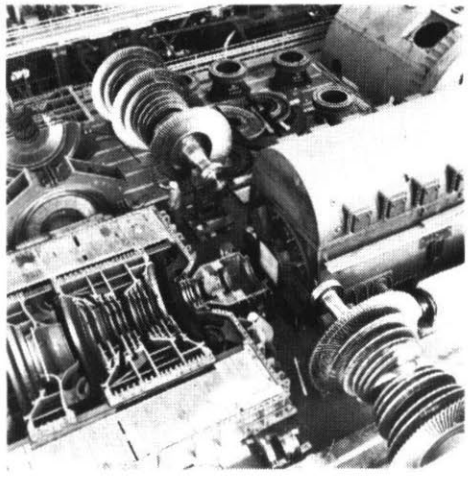
Als beste komt een lokatie bij Heel uit de bus. Daar kan een centrale van twintig megawatt worden neer gezet. In principe kan de bouw ervan in 1984 beginnen, zodat de centrale in 1986 in bedrijf kan worden gesteld.

Dit is niet het enige plan. Zo ziet de Gelderse Elektriciteitsmaatschappij PGEM mogelijkheden voor de bouw van een tien megawattcentrale in de Maas bij Lith. Ook de Roer in Limburg blijkt in aanmerking te komen voor kleine waterkrachtcentrales. In een rapport van de Nederlandse Energie-Ontwikkelings Maatschappij (NEOM), opgesteld in samenwerking met de gemeente Roermond, blijkt dat renovatie van de buiten gebruik gestelde waterkrachtcentrale in de Roer bij Roermond financieel een uiterst aantrekkelijke zaak is. Deze oude centrale heeft aan het eind van de Tweede Wereldoorlog een deel van Roermond van elektriciteit voorzien. In de studie stelt NEOM dat de oude turbine in de centrale moet worden gereviseerd. De totale kosten mogen daarvan niet boven de zes ton uit komen. Daarnaast moet er nog een turbine bij worden gebouwd.
De kosten van deze tweede turbine worden geschat op 1,7 miljoen gulden. Berekend is dat zo de gereviseerde turbine stroom kan leveren tegen een prijs van 12 cent per kilowattuur, de nieuwe turbine tegen 6 cent per kilowattuur. Aanzienlijk lager dan stroom uit bijvoorbeeld een kolencentrale.
Naast het opnieuw in gebruik nemen van de waterkrachtcentrale bij Roermond zijn er volgens de NEOM nog twee lokaties in de Roer, tussen Roermond en de Duitse grens waar kleine centrales kunnen worden neergezet, terwijl ook in de buurt van Roermond nog één à twee lokaties te vinden zijn. Globaal komt de kilowattuurprijs van deze centrales uit op acht cent. Nadere studie moet nog worden uitgevoerd.

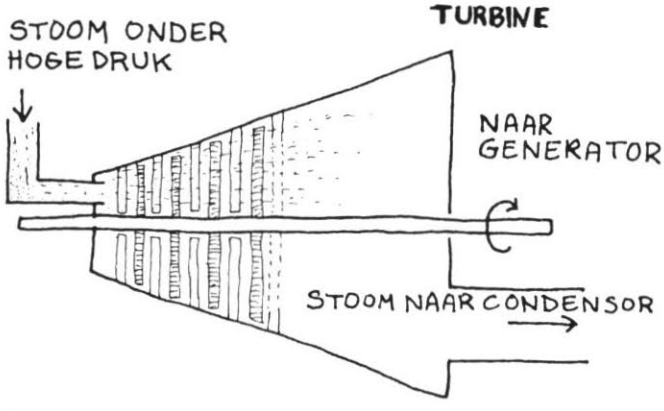
Een bericht uit de *Volkskrant* van 29 januari 1983

Stoomturbine
Centrales die niet op natuurlijke stroming van water of lucht werken, moeten op een andere manier stroming zien te maken waardoor de turbine gaat draaien. Zulke centrales op aardgas, olie, kolen of uranium wekken warmte op, die gebruikt wordt voor het maken van stoom. Vanwege het gebruik van warmte worden ze *thermische* centrales genoemd.

De stoom wordt bij hoge temperaturen gemaakt zodat het een hoge druk heeft. Met die stoom wordt een stoomturbine aangedreven. Die bestaat uit wielen met schoepen erop waar de stoom krachtig tegenaan stroomt. Daardoor gaan de wielen draaien en nemen ze een deel van de energie van de stoom over. De stoom krijgt daardoor een lagere druk en temperatuur en zet uit.



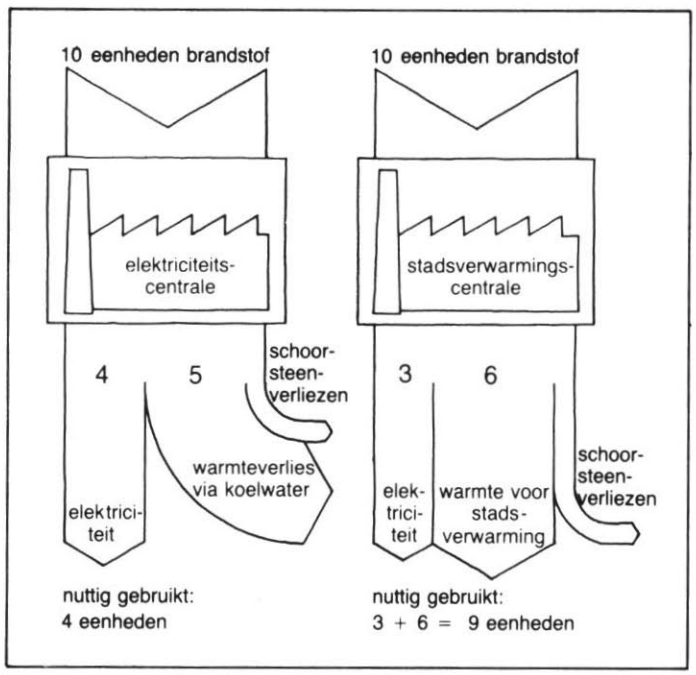
De grote schoepenwielen van een stoomturbine worden in een centrale gemonteerd



Schematische tekening van een stoomturbine. Let op de uitlopende vorm: het volume van de stoom neemt toe bij drukverlaging (niet al te snel, want ook de temperatuur neemt af)

Aan het einde van de turbine moet de druk zo laag mogelijk zijn om zoveel mogelijk energie uit de stoom in de draaiing van de turbine te stoppen. Daarom wordt de stoom in de condensor tot water gecondenseerd en weggepompt. Om te condenseren moet de stoom in temperatuur dalen. Bovendien komt er condensatiewarmte vrij. De condensor moet dus steeds gekoeld worden. Er wordt daar dus energie 'weggegooid'. Maar zonder condenseren zou er geen *drukverschil* in de turbine zijn. Hoe beter je dus in staat bent *alleen* die energie in de condensor af te voeren die echt voor condenseren nodig is, hoe hoger je rendement wordt. Maar dat kan dus nooit 100% worden.
Het maximale theoretische rendement van een stoomturbine hangt af van de begin- en eindtemperatuur van de stoom en het water. De begintemperatuur

moet zo hoog mogelijk zijn (maar hoge temperatuur betekent hoge stoomdruk, bij 350 °C al 185 atmosfeer, wat een zeer stevige en dus *dure* constructie nodig maakt). De eindtemperatuur moet zo laag mogelijk zijn, meestal 20 à 30 °C, de temperatuur van het koelwater, om het rendement zo hoog mogelijk te maken.



Stadsverwarming

Het verwarmde koelwater kan voor verwarmingsdoeleinden gebruikt worden (stadsverwarming). Dan wordt er minder warmte weggegooid en spaart men dus energie. Voor het elektrische gedeelte betekent dit echter een rendementsverlies: de temperatuur van het koelwater wordt 100 °C. Het rendement van het elektriciteitsdeel gaat daardoor omlaag van 40% naar ongeveer 30%. Het rendement van de elektriciteits- en warmteproduktie te zamen is echter aanzienlijk hoger dan 40%. Het grote probleem van stadsverwarming ligt in de investeringskosten: er moeten kilometers goed geïsoleerde warmwaterbuizen worden gelegd voor het transport van warm water van de centrale naar de huizen én terug.

Bovendien is de warmteafname in de zomer (alleen warm tapwater) veel kleiner dan in de winter. Op zeer koude winterdagen moet ook voldoende warmte geproduceerd worden. Daar zijn hulpstookketels voor nodig: extra investering!

Een hulpwarmtecentrale in Den Haag

Opdrachten

1 Bram beweert dat het rendement van een elektriciteitscentrale altijd 100% is omdat er altijd evenveel energie uitkomt als er ingestopt wordt. Wat vindt jij daarvan?

2 In een boekje van een elektriciteitsbedrijf leest Janneke dat er meer brandstof gebruikt moet worden om dezelfde hoeveelheid elektriciteit te maken als het koelwater voor stadsverwarming gebruikt wordt. 'Dus', zegt Janneke, 'bij stadsverwarming neemt het rendement af.' Wat zou jij haar antwoorden?

3 'Ik begrijp niet dat ze niet op een zuiniger manier met energiebronnen omspringen. Moet je nagaan dat ze bij het elektriciteitsbedrijf 60% van de energie weggooien!', zegt Johan. Schrijf op hoe jij aan Johan zou uitleggen dat niet alle energie in elektrische energie omgezet kan worden.

4 Probeer eens op te schrijven waarom waterkrachtcentrales een veel hoger rendement kunnen hebben dan windmolens.

5 In Breda wordt stadsverwarming aangelegd. Die warmte wordt betrokken van de centrales van Geertruidenberg op 20 km afstand van Breda.
Eerst heeft men berekend dat die hoge investeringen die daarvoor nodig zijn, er weer uit zouden komen. Omdat er echter veel energie bespaard wordt door isolatie van huizen, verwacht men nu dat er grote (geld)verliezen geleden worden. Leg dat uit. Wat is jouw conclusie?

6 Het totale verbruik aan brandstoffen van de elektriciteitsbedrijven, omgerekend in m^3 aardgas, was in 1978 161 miljard m^3. Hoeveel m^3 aardgas zouden de elektriciteitsbedrijven in 1978 verbruikt hebben als het rendement 27,8% in plaats van 37,7% geweest was? En hoeveel geld zou dat meer gekost hebben? In 1982 kostte 1 m^3 gas de elektriciteitsbedrijven ongeveer 12 cent.

2-3 DE MASSASTROOM IN EEN CENTRALE

De energie die een centrale binnenkomt, zit 'verpakt' in de grondstof waar de centrale op draait: kolen, aardgas, uranium, wind of water. Om de energie uit de grondstof te halen, moet de grondstof veranderd worden: bij de ene grondstof is de verandering klein, bij een andere grondstof is die verandering heel groot. Grofweg kan je zeggen: 'Hoe groter de verandering in de grondstof is, hoe ernstiger de milieuproblemen bij de centrale zijn.' Daarnaast is er ook op andere plaatsen van milieuvervuiling sprake: bij transport, bij opslag, bij grondstofwinning, maar daarop gaan we in dit hoofdstuk niet in.

- *Wind en water* veranderen het minst in een wind- of watercentrale: zij raken alleen snelheid kwijt. De natuurlijke stroming van wind en water blijft, wat afgeremd, optreden.
- *Kolen, aardgas en andere fossiele brandstoffen* veranderen ingrijpend: ze verbinden zich met zuurstof uit de lucht en er ontstaan andere stoffen: zelfde atomen, maar gebonden in andere moleculen. Brandstof met lucht wordt koolstofdioxide, water, zwaveldioxide enz.

– *Uranium* verandert het meest ingrijpend in een centrale: de kernen worden gespleten, waardoor er veel andere atomen ontstaan.

Eén ding blijft er (nagenoeg) hetzelfde: het aantal kilogram aan stoffen, dus de massa die de centrale in en uit gaat. Daarom gaan we in dit hoofdstuk kijken naar de *massastroom* in een centrale.

Massabehoud

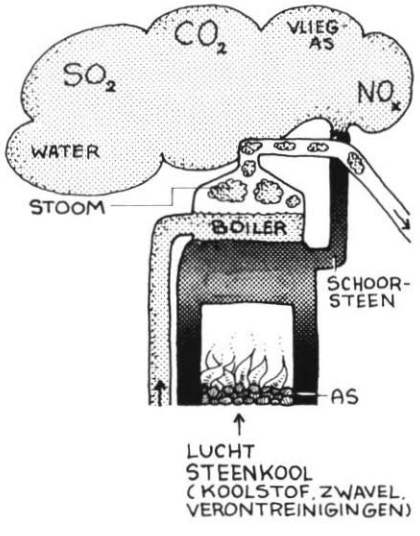
Als er 1 kg lucht door een windmolen gaat, komt er weer 1 kg lucht uit. Als er 1 kg steenkool wordt verbrand is daarvoor 13 kg lucht nodig (ongeveer 11 m^3). Via de schoorsteen en de asafvoer komen er dan 14 kg afvalstoffen van allerlei aard (as, CO_2, water, SO_2, NO_x) vrij. Als er 1 kg uranium in een kerncentrale wordt verspleten, dan komt er 1 kg afvalstoffen vrij.

Wat hierboven staat is erg vanzelfsprekend: alles wat je in een centrale stopt krijg je er later in de een of andere vorm weer uit. In de natuurkunde spreken we over de *wet van behoud van massa*.

De gevolgen van deze wet zijn echter enorm: alle stoffen, die je in een centrale stopt en daar veranderen, komen er weer uit. Daar kan je zeker van zijn!

Voor een windturbine betekent dat: de afgeremde lucht achter de turbine moet wegstromen om plaats te maken voor nieuwe afgeremde lucht. Wat dat voor gevolgen heeft voor het rendement, heb je gelezen in hoofdstuk 1.

Voor een kolencentrale betekent dat, dat je uit je centrale allerlei gasvormige stoffen en as krijgt: luchtvervuiling en afvalbergen.



De massastroom in een kolencentrale

Voor een kerncentrale betekent dat, dat je splijtingsprodukten overhoudt. Die moet je zien kwijt te raken.

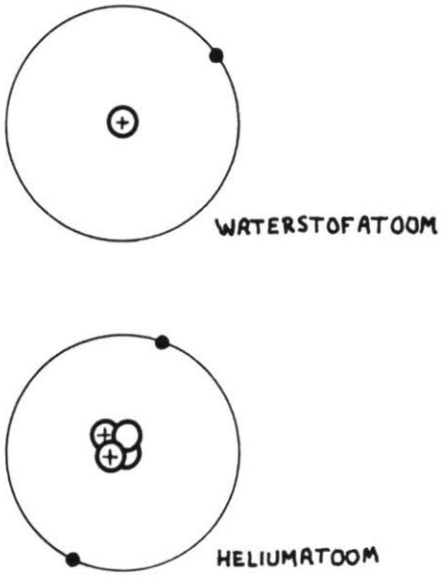
In de scheidekundeles leer je meer over verbranden. Hier gaan we vooral in op de veranderingen in de uraniumkernen en de radioactiviteit die dat oplevert.

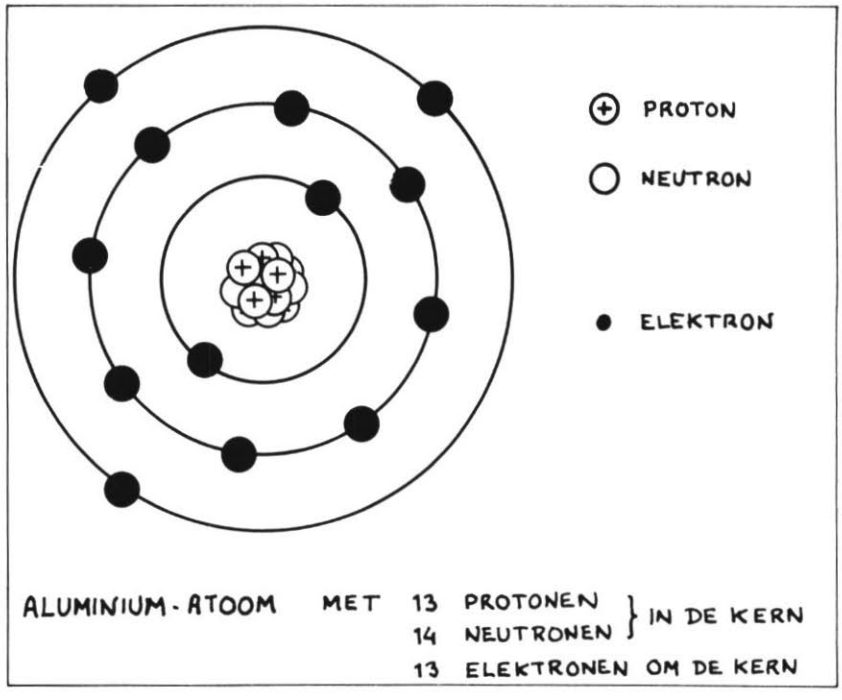
Atoom en atoomkern

Alle stoffen zijn opgebouwd uit atomen. Die atomen zijn heel klein en daarom kunnen we ze niet zien, ook niet met de beste microscoop. We kunnen ons er wel een voorstelling van maken.

Een atoom bestaat uit een atoomkern en elektronen (negatief geladen deeltjes) die zich om die atoomkern bewegen.

De kern is opgebouwd uit protonen (dat zijn positief geladen deeltjes) en neutronen (niet geladen deeltjes). Er zijn evenveel protonen in de kern van een neutraal atoom als elektronen om de kern heen. De massa van een proton is ongeveer gelijk aan de massa van een neutron. Maar een elektron is veel lichter. Daardoor bevat de atoomkern vrijwel de hele massa van het atoom (kern en elektronen samen). De kern neemt echter een ontzettend klein deel van de ruimte van het atoom in: als een korrel zand in een kathedraal. De verhoudingen in het getekende aluminiumatoom kloppen dus helemaal niet, maar het is onmogelijk die verhoudingen goed te tekenen. De tekening hieronder dient er alleen voor om je een *voorstelling* van een atoom te geven.





Voorstelling van een aluminiumatoom. In elk atoom zijn de elektronen gerangschikt in *schillen*. In de eerste schil kunnen 2 elektronen, in de tweede 8, en in de derde 18. In aluminium zitten er slechts 3 in de derde schil.

Het lichtste atoom dat we kennen is het waterstofatoom: één proton met één elektron er om heen.

De kern van lithium – een licht metaal – bevat drie protonen en vier neutronen. Zo heeft elk element een eigen aantal protonen. Het zwaarste element dat in de natuur op aarde aanwezig is, is uranium. Dat heeft 92 protonen en 146 neutronen. In het periodiek systeem der elementen, zoals je dat uit de scheikunde misschien al kent, zijn de elementen gerangschikt naar het aantal protonen in hun kern (en dus het aantal elektronen om de kern heen).

elektriciteit opwekken en transporteren

Periodiek systeem van de elementen

Groep / Periode	Ih	IIh	IIIn	58/71 90/103	IVn	Vn	VIn	VIIn	VIII	In	IIn	IIIh	IVh	Vh	VIh	VIIh	O	Groep / Periode
1	1 H																2 He	1
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	2
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	3
4	19 K	20 Ca	21 Sc		22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	4
5	37 Rb	38 Sr	39 Y		40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	5
6	55 Cs	56 Ba	57 La	58/71 *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	6
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90/103 **	104 Ku	105 Ha														7

58/71 *	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90/103 **	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

In dit periodiek systeem staan alle elementen die er zijn. Bij reacties die door de scheikunde beschreven worden, zoals de verbranding van steenkool, blijven de atomen hetzelfde. Alleen met de elektronen in de buitenste schil (bijvoorbeeld de drie elektronen aan de buitenkant van het aluminiumatoom dat op blz. 39 getekend staat) gebeurt er bij scheikundige reacties iets waardoor verschillende atomen samen een nieuw molecuul gaan vormen, CO_2 bijvoorbeeld. Bij kernreacties verandert er iets in de kern van het atoom, waardoor het atoom zelf verandert. Om dat preciezer te bekijken kan je hierna meer lezen over kernen en kernreacties.

Isotopen

Het aantal protonen in de kern van een atoom bepaalt tot welk element het atoom behoort. Maar alle kernen van één element zijn daarom nog niet hetzelfde!

Laten we als voorbeeld chloor nemen. Er blijken in de natuur twee soorten chloorkernen voor te komen. Beide hebben (natuurlijk) evenveel protonen (17), maar ongeveer 75% van de chloorkernen in de natuur bezit 18 neutronen, 25% daarentegen bezit 20 neutronen. We zeggen dat deze twee soorten kernen *isotopen* van chloor zijn.

De ene kern noemen we chloor-35 (^{35}Cl) omdat er 35 deeltjes in de kern zitten. De andere is dus chloor-37 (^{37}Cl). Ook andere elementen bezitten verschillende isotopen.

Twee isotopen van uranium zijn belangrijk in verband met kernsplijting. Deze zijn uranium-235 (^{235}U) en uranium-238 (^{238}U), beide met 92 protonen in de kern.

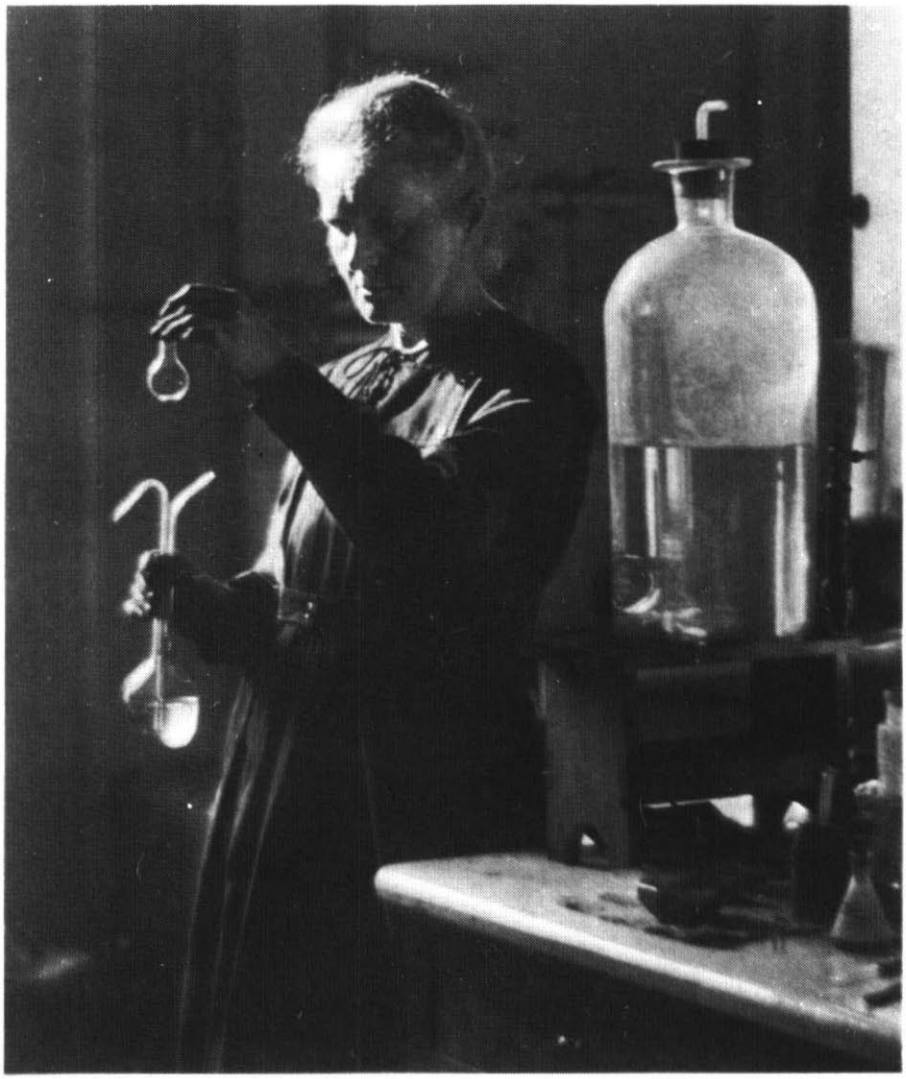
Vragen

1 Hoeveel neutronen bevatten de bovengenoemde isotopen van uranium?

2 Er bestaan koolstofkernen met 14 kerndeeltjes en stikstofkernen met 14 kerndeeltjes. Zijn deze isotopen van elkaar?

3 Het zuurstofisotoop ^{16}O bevat 8 protonen. Hoeveel neutronen zitten daarin? En hoeveel neutronen bevat het zuurstofisotoop ^{18}O?
4 Hoeveel elektronen draaien er rond een zuurstofkern?
5 Er bestaan drie isotopen van waterstof: ^{1}H, ^{2}H (ook wel deuterium genoemd) en ^{3}H (ook wel tritium genoemd). Teken een voorstelling van de kernen van die drie isotopen met het juiste aantal protonen en neutronen.

Radioactieve straling

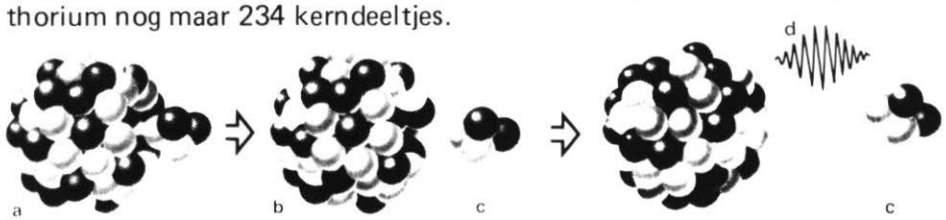


Marie Curie (1867-1934) bestudeerde radioactieve straling en ontdekte onder andere de radioactieve elementen polonium en radium

Radioactieve straling werd rond 1900 ontdekt door Henri Becquerel in Frankrijk. Hij merkte dat bepaalde stoffen straling uitzenden die fotografisch papier zwart kan maken. Marie Curie onderzocht de straling verder. Er bleken drie soorten radioactieve straling te zijn. Later is er nog een vierde soort straling bijgevonden.

Ook in een kerncentrale komen de vier soorten radioactieve straling vrij. De straling ontstaat omdat in de centrale kernen gevormd worden die *radioactief* zijn. Dat wil zeggen dat ze na korte of lange tijd veranderen in een ander soort kern, waarbij radioactieve straling uitgezonden wordt.
De drie stralingssoorten, die rond 1900 ontdekt zijn bij radioactieve stoffen die in de aarde voorkomen, heeft men toen met de eerste drie letters van het Griekse alfabet alfa-, bèta- en gammastraling genoemd. De vierde soort heet neutronenstraling.

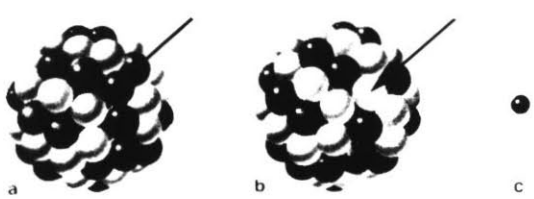
– *Alfastraling* bestaat uit deeltjes met twee protonen en twee neutronen: helium-4-kernen dus. Deze straling komt vooral vrij als zware kernen spontaan splijten. Een voorbeeld daarvan is ^{238}U, deze kern kan vanzelf uit elkaar vallen: $^{238}U \rightarrow {}^{234}Th + {}^{4}He$ + gammastraling.
Omdat er vier kerndeeltjes uit het uranium meegaan bevat het gevormde thorium nog maar 234 kerndeeltjes.



Uranium (a) vervalt tot thorium (b) onder het uitzenden van een alfa-deeltje (c) en gammastraling (d)

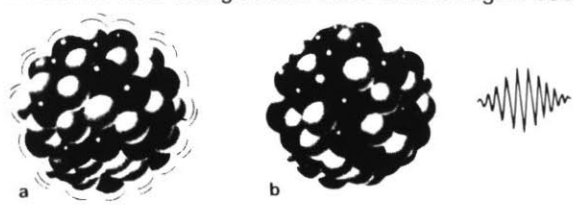
Het alfa deeltje bevat meestal zeer veel bewegingsenergie, maar raakt die door botsingen snel kwijt. Een stukje krantepapier, enkele centimeters lucht of je huid kunnen een alfadeeltje al stoppen.

– *Bètastraling* wordt door een stof uitgezonden als in de kernen een neutron in een proton en een elektron wordt omgezet. De splijtingsprodukten die in een kerncentrale ontstaan (o.a. ^{90}Br) zenden bètastraling uit en gaan daardoor over in andere kernen ($^{90}Br \rightarrow {}^{90}Kr$ + elektron). Bètastraling bestaat uit elektronen met zeer grote snelheden. Zij raken hun snelheid bij botsingen minder snel kwijt dan alfadeeltjes en kunnen daarom in de lucht enige meters afleggen. Bètadeeltjes worden niet door de huid tegengehouden. Zij kunnen in aluminium enkele millimeters doordringen.



Het radioactieve isotoop broom-90 (a) vervalt onder uitzending van een bèta-deeltje (c) tot krypton-90 (b)

– *Gammastraling* ontstaat als de kernen van een radioactieve stof te veel energie bezitten. Ze raken hun energie dan kwijt door gammastraling uit te zenden. Je zou die kunnen beschouwen als een lichtflits maar dan van een onzichtbaar soort licht met grote energie. Gammastraling is moeilijk tegen te houden. Het dringt zelfs door dikke lagen beton en lood heen.



Een atoomkern die te veel energie bevat kan gammastraling uitzenden

– *Neutronenstraling* bestaat uit neutronen die met grote snelheden worden uitgezonden. Als een kern gespleten wordt of als 2 kernen botsen en samensmelten kan er neutronenstraling ontstaan. De neutronenstraling is moeilijk tegen te houden. Alleen bij botsingen met kernen raken neutronen een deel van hun snelheid kwijt. Omdat neutronen de meeste snelheid kwijtraken bij botsingen met waterstof, is het het beste de neutronenstralingsbron af te schermen met meters dikke lagen water of paraffine. Die stoffen bevatten beide veel gebonden waterstofatomen.
Bij de splijting van uranium in een kerncentrale speelt de neutronenstraling een belangrijke rol.

Vragen

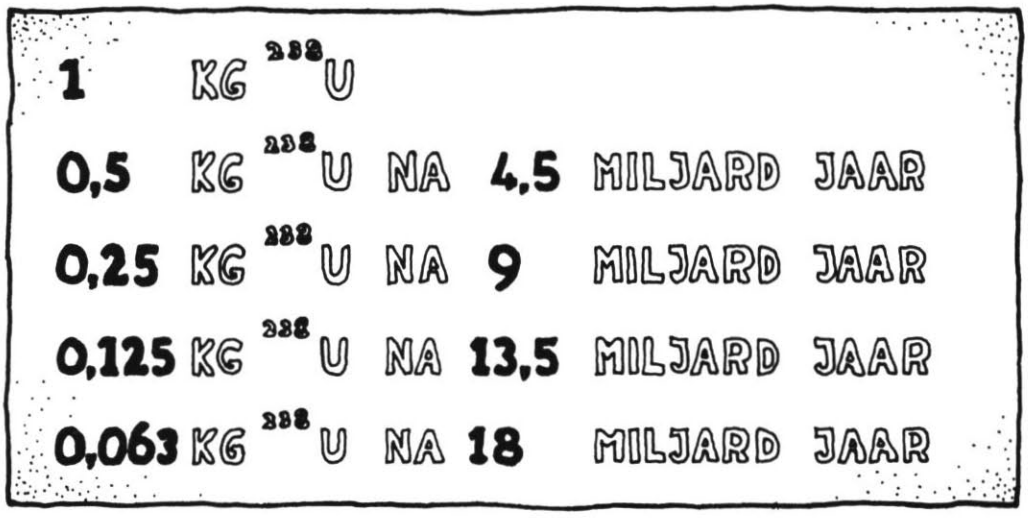
1 ^{14}C vervalt onder uitzending van straling tot stikstof-14 (^{14}N). Zendt ^{14}C alfa- of bètastraling uit?

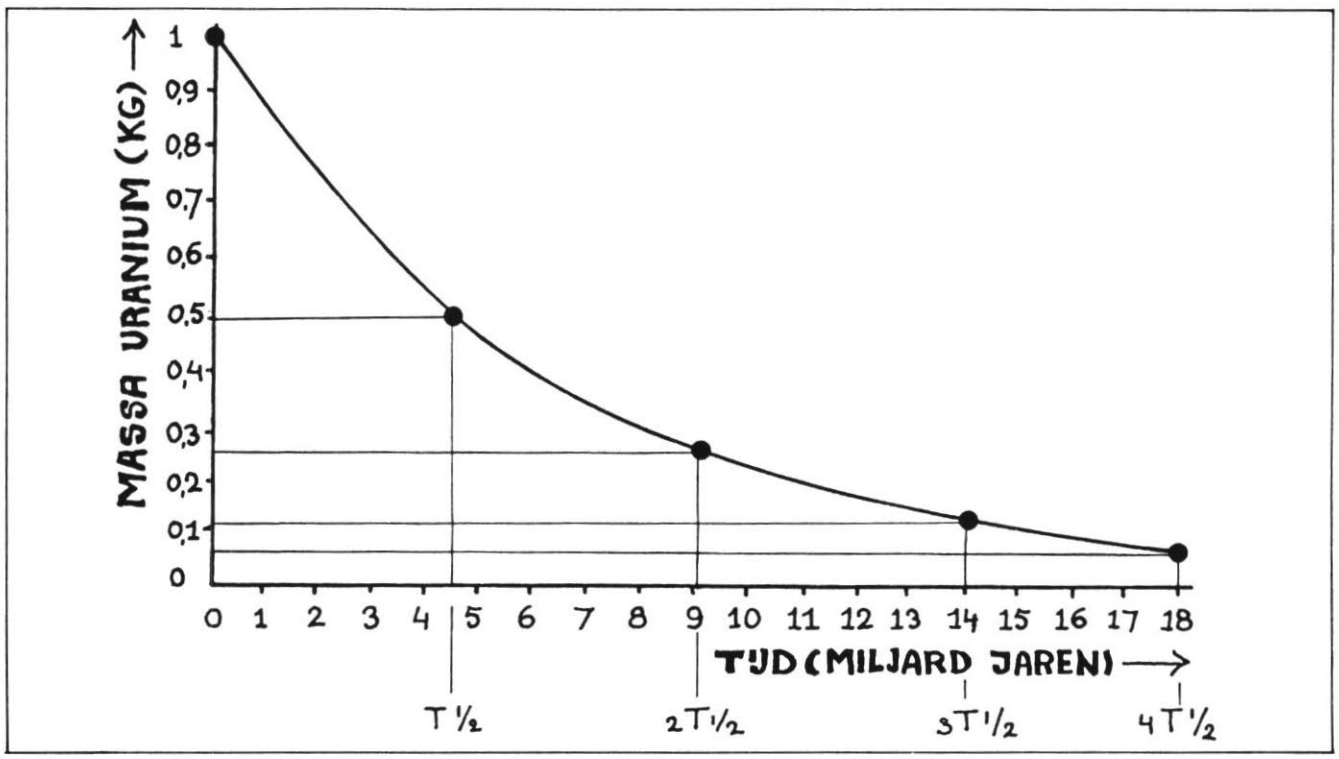
2 De radiumisotoop ^{224}Ra vervalt onder uitzending van een alfadeeltje. Er ontstaat het element radon. Hoeveel deeltjes bevat de radonkern?

Hoe lang blijft een stof radioactieve straling uitzenden?

In de natuur komen allerlei zwak-radioactieve stoffen voor. Sommige daarvan, zoals ^{238}U, ^{235}U en ^{40}K bevonden zich al op de aarde toen deze ontstond. Andere stoffen, zoals ^{14}C en ^{3}H ontstaan voortdurend in de buitenste luchtlagen die aan een continue stroom 'kosmische straling' blootstaan. De kosmische straling is afkomstig van kernreacties die in de zon en andere sterren plaatsvinden.

In een radioactieve stof vallen kernen uit elkaar onder uitzending van radioactieve straling. Niet alle kernen vallen tegelijk uit elkaar, slechts nu en dan één. Welke hangt af van het toeval. Hoeveel er per seconde uit elkaar vallen, hangt af van de hoeveelheid radioactieve stof en van de soort stof. In sommige stoffen vallen er zó snel kernen uit elkaar, dat de stof na een paar minuten helemaal veranderd is. Voor andere stoffen duurt het miljarden jaren voor ze veranderd zijn. Het zijn vooral díe radioactieve stoffen die we nog in de aardkorst kunnen vinden.





Uranium is zo'n stof. Sinds het ontstaan van de aarde, ca. 4,6 miljard jaar geleden, is een deel van het ^{238}U uit elkaar gevallen. Maar dat gaat zo langzaam, dat pas na 4,5 miljard jaar de helft van alle ^{238}U-atomen uit elkaar gevallen is. Dat betekent dat er nu nog ongeveer de helft van de oorspronkelijke hoeveelheid ^{238}U in de aarde over is.

We zeggen dat ^{238}U een *halveringstijd* van 4,5 miljard jaar heeft. Elke radioactieve stof heeft zo'n halveringstijd. Stoffen met een (relatief) korte halveringstijd komen in de natuur niet voor, tenzij ze voortdurend bijgemaakt worden zoals ^{14}C (halveringstijd 5730 jaar) en tritium (halveringstijd 12 jaar). Van de radioactieve stoffen, die altijd al op aarde voorkomen, moet de halveringstijd heel lang zijn: 0,71 miljard jaar voor ^{235}U en 1 miljard jaar voor ^{40}K.
Het gevaar dat radioactieve stoffen opleveren is onder andere sterk afhankelijk van de halveringstijd. Pas na een aantal halveringstijden is er van een radioactieve stof zo weinig meer over, dat zij geen straling meer uitzendt (tenminste, als de nieuw-ontstane stoffen ook niet-radioactief zijn). De hoeveelheid kernen van een radioactieve bron, die per seconde uit elkaar vallen, bepaalt hoeveel radioactieve straling de bron uitzendt. Bij lange halveringstijden is die hoeveelheid klein: het duurt lang voordat de helft van de kernen uit elkaar gevallen is. We zeggen: de *activiteit* van zo'n bron is klein. Een bron met een korte halveringstijd heeft dus een veel grotere activiteit als die evenveel radioactieve kernen bevat.

Vragen

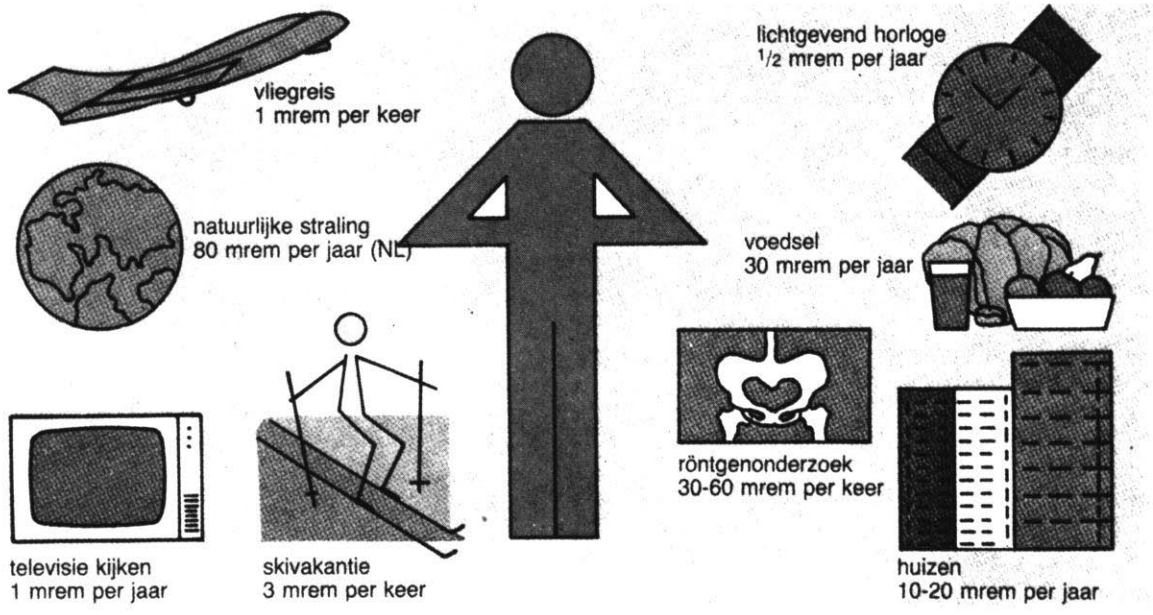
1 Waarom zou tritium niet op aarde voorkomen als het niet voortdurend bijgemaakt zou worden?
Tritium wordt ook in kleine hoeveelheden in een kernreactor gemaakt. Zal er dus steeds meer tritium op aarde voorkomen?

2 Het koolstofisotoop ^{14}C heeft een halveringstijd van 5730 jaar. Hoeveel is er over van 1 kg ^{14}C als er driemaal 5730 jaar verlopen is? Hoeveel kg afvalstoffen van de radioactieve koolstof zijn dan ontstaan?

De invloed van de soort straling

De werkingen van de vier soorten straling verschillen onderling.

– Alfadeeltjes zijn vrij ongevaarlijk buiten het lichaam omdat de huid ze tegenhoudt. Maar als een radioactief stofdeeltje, dat bij radioactief verval alfadeeltjes uitzendt, in het lichaam is opgenomen, is het uiterst gevaarlijk omdat het alfadeeltje met heel veel moleculen in het lichaam zal botsen en dus veel moleculen zal kunnen beschadigen. Plutonium-239 (^{239}Pu) is zo'n stof. Zouden er kleine deeltjes ^{239}Pu via de lucht in de longen terecht komen, dan is er een vrij grote kans dat ze daar longkanker veroorzaken. Daarom is men uiterst voorzichtig met plutonium. In elke kernreactor wordt wat plutonium gevormd.
We hebben gezien dat plutonium een halveringstijd van 24 000 jaar heeft. Daarom zou je misschien denken dat een stofdeeltje van bijvoorbeeld 10 microgram (0,00001 gram) ^{239}Pu, dat in je longen terecht komt, daar wel weinig stralingsschade zal aanrichten. Tien microgram plutonium bevat echter heel veel atomen plutonium-239 (ongeveer tweemaal 10 tot de macht 16). Per dag splijten er meer dan een miljard. Per uur splijten er nog minstens 40 miljoen. De alfadeeltjes dringen niet ver door in het longweefsel, maar ze vernielen wel de levende cellen vlakbij de plaats waar het plu-



De mens ontvangt natuurlijke straling en kunstmatige straling. De mrem (millirem) is een maat voor de hoeveelheid radioactieve straling

toniumstofdeeltje zit. Dit langdurige en zeer plaatselijke bombardement verhindert de cel om de schade te herstellen en zo kan er op die plaats kanker ontstaan. Alfastraling heeft dus een erg klein doordringingsvermogen, maar is als inwendige straling (ten gevolge van inademen of opeten van met plutonium besmet materiaal) uiterst gevaarlijk.
De activiteit van zo'n stofdeeltje is dus groot.

- Bètadeeltjes (snelle elektronen) zijn veel lichter dan alfadeeltjes. Ze worden minder afgeremd en dringen enkele millimeters in het lichaam door. De schade aan de cellen wordt over een groter gebied verspreid. Daardoor is de kans groter dan bij inwendige bestraling met alfadeeltjes dat de cellen zich kunnen herstellen.
- Gammastraling dringt door het hele lichaam heen. De schade aan de cellen wordt daardoor nog over een groter gebied verspreid dan bij bètastraling, maar daar tegenover staat dat gammastraling meestal veel meer energie bevat en dus groter schade kan aanrichten en dat het heel moeilijk is de gammastraling tegen te houden.
- Neutronen kunnen ook moeilijk worden tegengehouden. Zij richten ook grote schade aan door moleculen in cellen kapot te maken. Bovendien kan een neutron een atoom, veranderen wanneer het in de kern doordringt.

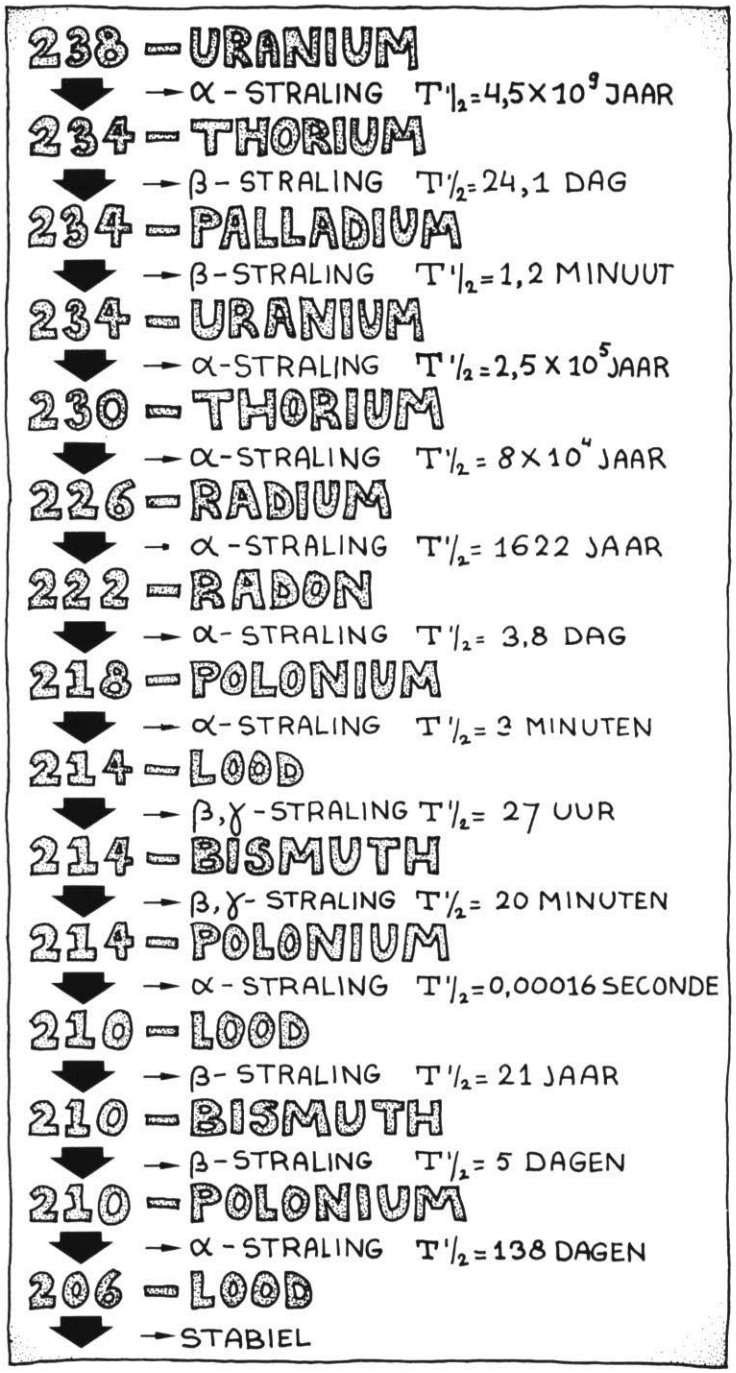
De invloed van de halveringstijd

Bij het schatten van het gevaar van radioactieve stoffen die bijvoorbeeld bij kernsplijting vrijkomen, is behalve de soort straling die vrijkomt ook de halveringstijd van belang.

We kunnen de radioactieve stoffen aan de hand van hun halveringstijd in drie soorten verdelen:

- stoffen met een zeer lange halveringstijd (miljarden jaren). Deze vervallen zeer langzaam en hebben dus een kleine activiteit. Deze stoffen komen vrij veel in de natuur voor. Ze zijn alleen gevaarlijk in grote hoeveelheden bij elkaar.
- stoffen met een middellange halveringstijd (enige duizenden jaren). Deze hebben dus een grotere activiteit en het duurt lang voordat ze volledig zijn uitgewerkt. Deze zijn dus zeer gevaarlijk en moeten heel lange tijd worden opgeslagen.
- stoffen met een korte halveringstijd. Deze hebben een heel grote activiteit maar raken hun activiteit vrij snel kwijt. Ze zijn dus gedurende redelijk korte tijd erg gevaarlijk maar daarna niet meer.

Vanwege de gevaren van radioactieve afvalstoffen in een kerncentrale moet de massastroom voor de kerncentrale zeer goed gecontroleerd worden.



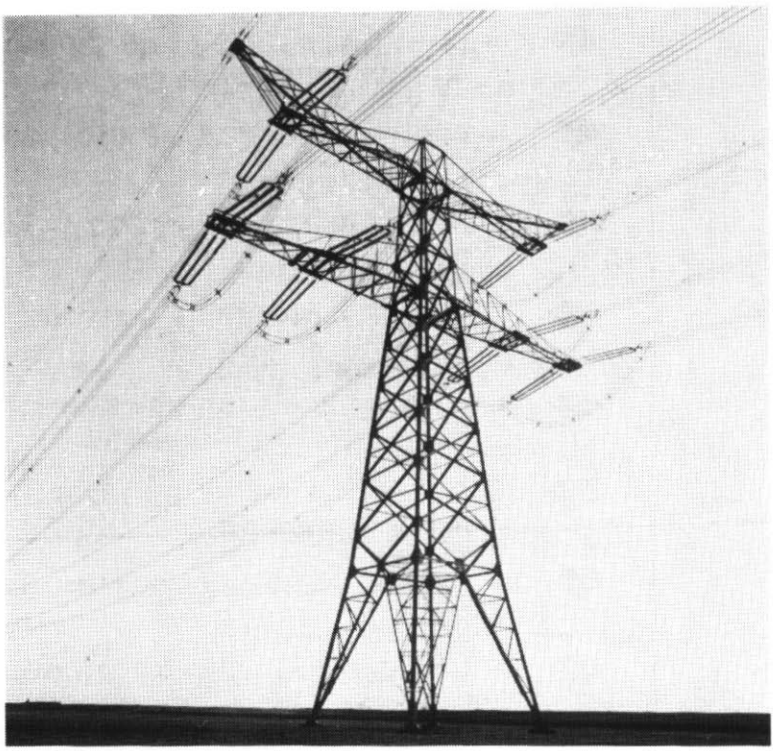
De vervalreeks van uranium. Het duurt heel lang voor uit uranium een stabiele kern is ontstaan. Er zijn allerlei radioactieve tussenprodukten met korte of langere halveringstijd

Uranium in steenkool

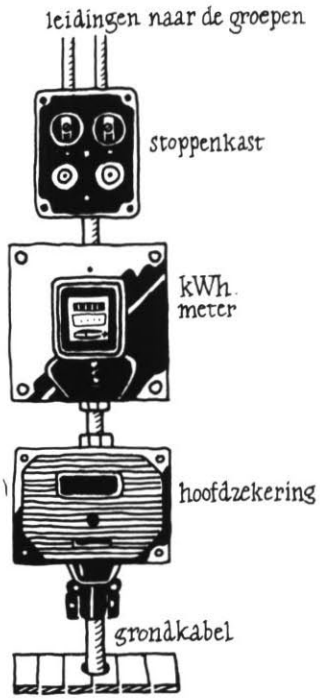
In steenkool komen ook kleine hoeveelheden uranium voor. Bij verbranding komt dit uranium voor een deel in de lucht terecht. Het uraniumisotoop ^{238}U vervalt spontaan, onder uitzending van radioactieve straling. Daardoor zal bij een toename van het steenkoolgebruik de hoeveelheid radioactiviteit in de lucht toenemen.

2-4 VAN DE CENTRALE NAAR HUIS

Kolencentrales, kerncentrales en windturbines hebben met elkaar gemeen dat ze ver van de verbruikers kunnen staan. De elektrische energie moet dus over flinke afstanden getransporteerd worden. Dat gebeurt via de hoogspanningsleidingen die het Nederlandse landschap doorsnijden. Waarom moet het transport onder hoge spanning gebeuren? Hoe wordt de spanning omlaag gebracht tot 220 V, de spanning die we in huis gebruiken? Deze vragen zullen we in dit hoofdstuk beantwoorden.



Hoogspanningsleidingen kosten veel ruimte: een strook van 75 m onder een 380 kV-leiding moet vrijgelaten worden



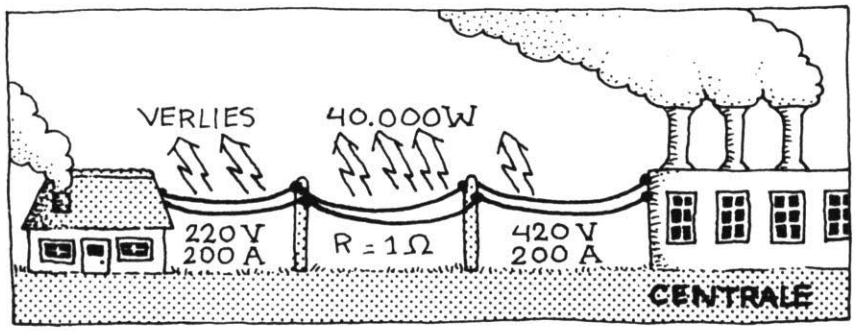
Zo komt de elektrische energie het huis binnen. De beveiliging geschiedt met de stoppen (zekeringen)

Transport onder hoge spanning

In huis gebruik je een spanning van 220 V. Zoals je weet is dat een spanning waarmee je heel voorzichtig moet zijn: bij het aanraken van draden onder spanning, kan je een dodelijke schok krijgen. Maar waarom levert de elektriciteitsmaatschappij dan geen lagere spanning? Waarom wordt voor transport over grote afstanden zelfs een veel hogere spanning gebruikt? Het antwoord op die vraag is: omdat bij hogere spanningen energie met minder *transportverliezen* naar de verbruiker gebracht kan worden.

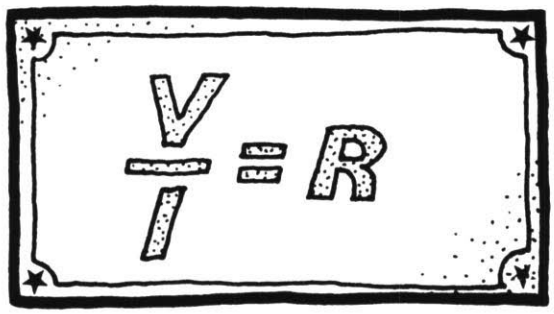
Uit *Energie thuis* weet je dat je in huis een zekering (of smeltveiligheid) nodig hebt om te voorkomen dat de leidingen in huis oververhit raken, als je te veel vermogen afneemt (door bijvoorbeeld een elektrische oven, een wasmachine

en een elektrisch kacheltje tegelijk op dezelfde groep [zekering] aan te zetten). Algemeen geldt: *als er een stroom door een draad loopt wordt de draad warm.* Hoeveel warmte er vrij komt hangt af van de *stroom* die er doorheen gaat en de *weerstand* van de draad.
Bij het transport van elektrische energie van de centrale naar een stad kan het gaan om zeer grote stromen. Er kan daarom een aanzienlijk verlies aan energie optreden door warmteontwikkeling in de transportleidingen. De hoogspanning in de transportleidingen dienen ervoor om de transportverliezen te beperken. Uit het volgende rekenvoorbeeld zal blijken hoe dat komt.



Een dorpje gebruikt een stroom van 200 A (spanning 220 V). Dat is dus een vermogen van 44 000 W. De centrale staat 30 km verder. Het dorpje is met de centrale verbonden via twee vrij dikke koperen kabels, één voor heen, één voor terug. De weerstand van elke leiding is maar 0,5 Ω. Dat betekent dat elke kabel een diameter van maar liefst 3,6 cm heeft. Met de wet van Ohm kan je uitrekenen hoeveel de spanning in de kabels daalt:

$V_{kabel} = I \cdot R_{kabel}$
$V_{kabel} = 200 \cdot 0{,}5 = 100$ V
Zowel voor de heen- als de terugleiding. Dat is bij elkaar 200 V. De centrale moet dus 220 + 200 = 420 V leveren, terwijl de spanning in het dorpje maar 220 V is.
Er gaat veel vermogen verloren:
$P_{verlies} = V_{kabels} \cdot I =$
$(100 + 100)\ 200 = 40\,000$ W.
Dat is bijna evenveel als het dorp verbruikt!



Om die verliezen te verlagen kan je drie dingen doen:

1 *De weerstand van de leidingen verminderen.*
Noem 2 manieren waarop je de weerstand van de leidingen kunt verkleinen. Wat hebben die manieren voor nadelen?

2 *De afstand tussen het dorpje en de centrale kleiner maken.*
Noem een manier om de afstand tussen het dorpje en de centrale kleiner te maken. Wat is daarvan het nadeel?

3 *De stroom kleiner maken.*
Om aan het dorp 44 000 W vermogen te leveren kan je in plaats van 200 A bij 220 V ook 2 A bij 22 000 leveren. Reken maar na.

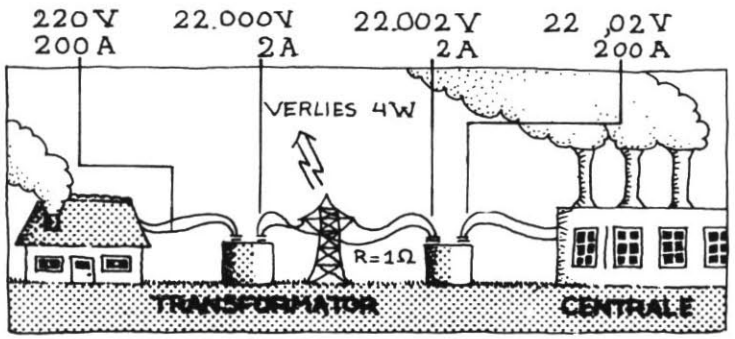
Het spanningsverlies in een kabel neemt daardoor enorm af:

$V_{kabel} = I \cdot R_{kabel} = 2 \cdot 0{,}5 = 1$ V

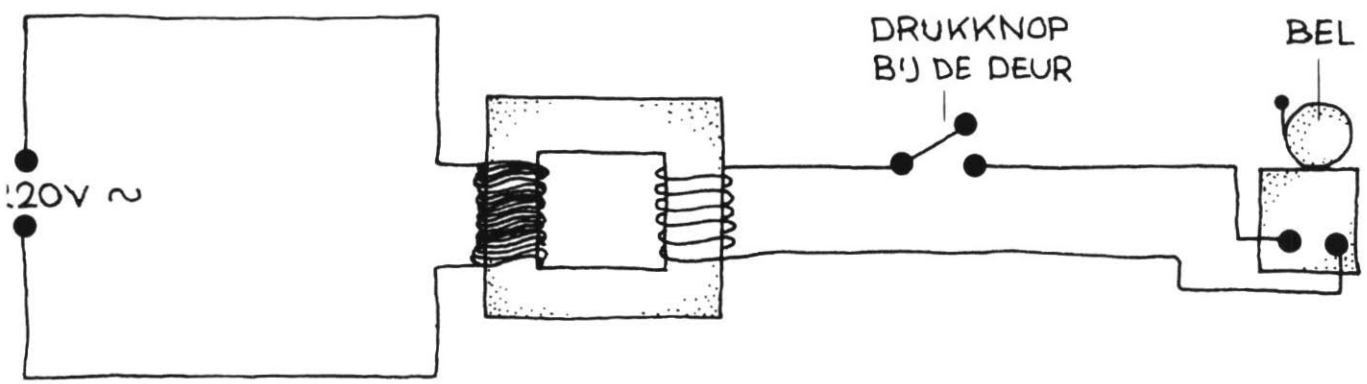
De centrale hoeft dus slechts 22 002 V te leveren! Het vermogen dat als warmte in een kabel vrijkomt is:

$P_{verlies} = V_{kabel} \cdot I = (1 + 1) \cdot 2 = 4$ W

Dat is dus wel heel veel minder.
Maar ... wat heeft een dorp aan een spanning van 22 000 V en een stroom van 2 A? Dat is helemaal levensgevaarlijk! Die spanning moet teruggebracht worden tot 220 V en de stroom moet dan 200 A worden. Dat kan ... met een transformator.



De transformator
Een transformator is een apparaat waar je aan de ene kant elektrisch vermogen instopt dat er aan de andere kant weer uitkomt, maar onder een andere spanning. Slechts een klein deel van het vermogen komt in de transformator vrij als warmte.
De transformator ben je al tegengekomen in *Geluid weergeven*, bijvoorbeeld de transformator van een huisbel.



Schema van een huisbel met transformator

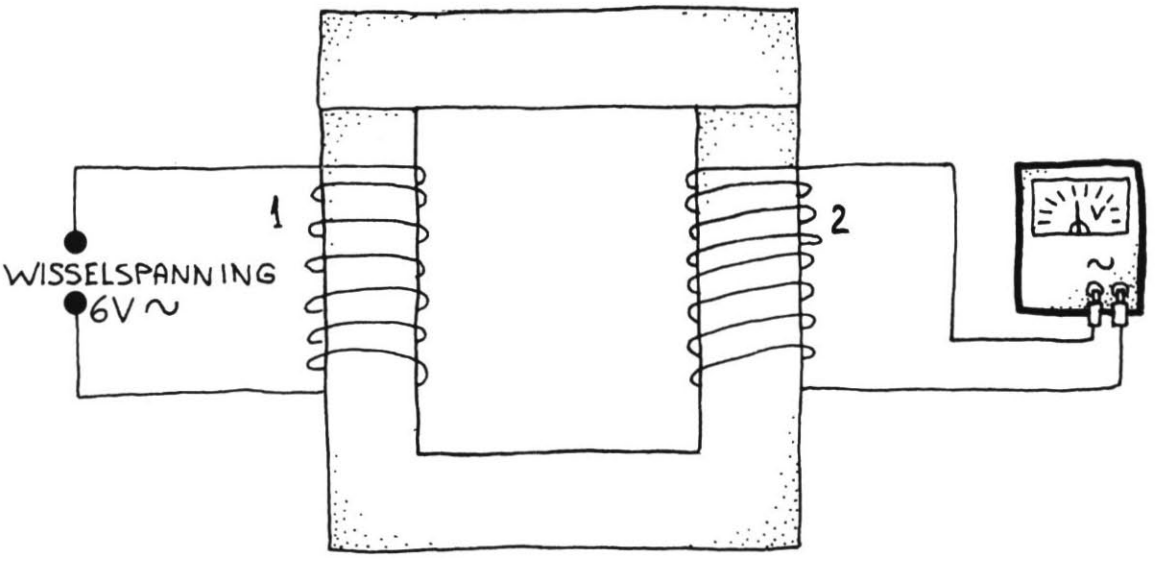
Door de spoel van de tekening die op 220 V is aangesloten loopt een wisselstroom. Daardoor wordt er in de spoel een magnetisch veld opgewekt dat voortdurend verandert. In de gesloten weekijzeren kern wordt het magneetveld naar de andere spoel doorgegeven. Door inductie wordt daar ook een

spanning opgewekt. Maar omdat daar minder windingen zijn is de spanning ook lager: de nieuwe spanning hangt af van de verhouding van het aantal windingen aan de ene en aan de andere kant. In formulevorm:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$ (N is het aantal windingen)

PROEF 1 Met onderstaande schakeling kun je de formule nog eens nagaan.

Ga ook na dat de transformator alleen maar werkt op wisselspanning.



Als de verhouding tussen het aantal windingen bijvoorbeeld 10 is, $\left(\frac{N_1}{N_2} = 10\right)$ wordt de spanning 10 maal zo groot $\left(\frac{V_1}{V_2} = 10\right)$

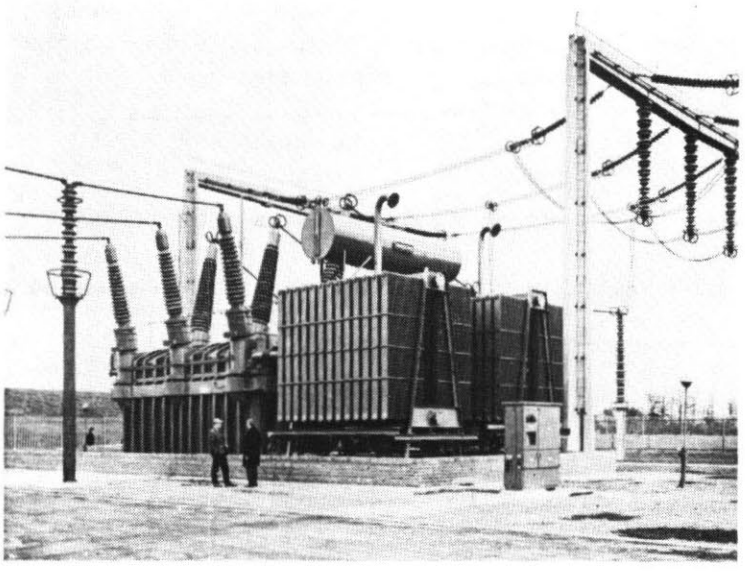
Maar de stroom aan kant 2 wordt kleiner : $\frac{1}{10}$ van de stroom aan kant 1.

Dat komt omdat er aan kant 2 evenveel vermogen uitkomt als er aan kant 1 ingestopt is (in het ideale geval; in de werkelijkheid komt er iets minder aan kant 2 vrij door warmteontwikkeling in de transformator).
Vermogen aan kant 1 = vermogen aan kant 2

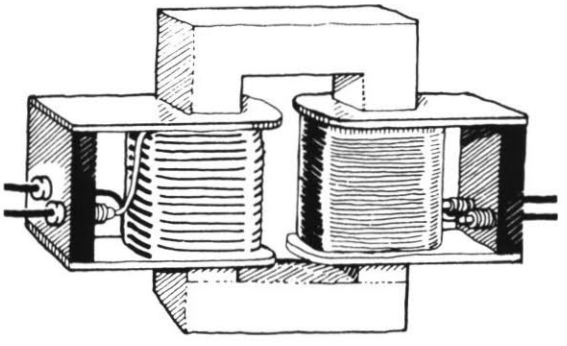
$$V \cdot I = 10\ V \cdot \frac{1}{10} I$$

Bij de transformatoren die je op school gebruikt, kan de stroom aanmerkelijk minder dan $\frac{1}{10}$ I zijn omdat die transformatoren helemaal niet ideaal zijn: er wordt vrij veel warmte in ontwikkeld.
De transformatoren van het elektriciteitsbedrijf zijn echter uitgekiend: slechts 0,3 tot 2% van het getransformeerde vermogen komt als warmte in de transformator vrij.

elektriciteit opwekken en transporteren



Een heel grote transformator van een elektriciteitsbedrijf



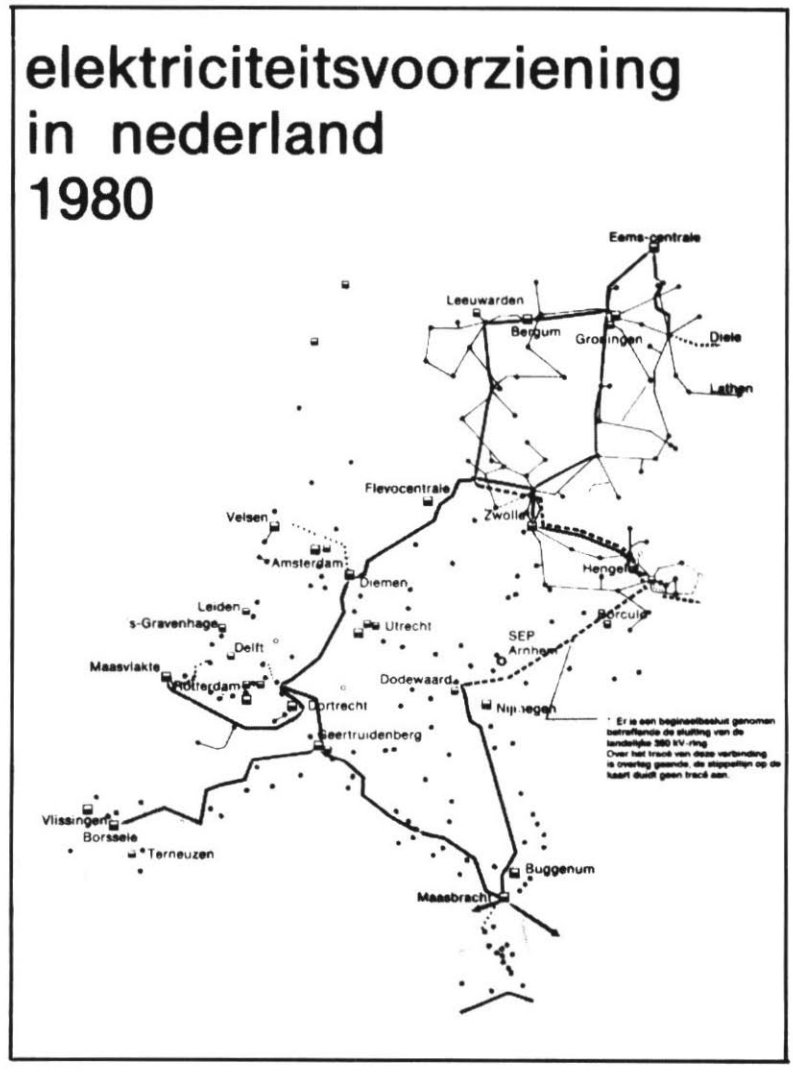
Een schooltransformator

PROEF 2 Ontwerp een schakeling waarmee je het vermogen dat een transformator ingaat en dat eruit komt kunt meten. Je kunt daarvoor 2 wisselspanning- en 2 wisselstroommeters gebruiken. Belast kant 2 met een weerstand van 100 Ω.
Sluit kant 1 op ongeveer 6 V wisselspanning aan. Neem verschillende verhoudingen in het aantal windingen.

PROEF 3 Maak zelf een model van het transportsysteem van de centrale naar het dorp. Neem als centrale een spanningsbron van 6 V wisselspanning. Als transportleidingen kan je 2 weerstandsdraden of weerstanden van 30 Ω nemen. De verbruiker wordt voorgesteld door een lampje van 6 V; 1 A.
Probeer eerst het lampje zonder transformator te laten branden.
Probeer het daarna met 2 transformatoren (1:600).

Door het grootschalig transportsysteem met hoogspanningsleidingen en transformatoren en het landelijk en Europees koppelnet is een betrouwbaar systeem voor elektriciteitsvoorziening ontstaan. Als een centrale voor reparatie of onderhoud uitgeschakeld wordt, kunnen andere centrales wat meer elektriciteit leveren, tot buitenlandse centrales toe. Het is echter moeilijk na te gaan of de elektriciteit die je op een bepaald moment gebruikt, geleverd wordt door een aardgascentrale, kerncentrale of windmolen.

elektriciteit opwekken en transporteren



Het landelijk koppelnet

Vragen

1 In Nederland bestaan onder andere hoogspanningsleidingen van 110 kV, 150 kV en 380 kV. (1 kV = 1 kilovolt = 1000 V).
Waarom is het juist de 380 kV-leiding die op het Europese koppelnet is aangesloten?

2 In de stad vindt de distributie naar de stadswijken plaats in 10 kV-leidingen. In de bekende transformatorhuisjes wordt die spanning omlaaggebracht tot 220 V. Waarom zal het transport naar de wijken niet bijvoorbeeld met 110 kV gebeuren of met 220 V?

3 Hoe groot is het rendement van de transformator die jij onderzocht hebt in proef 2? Vergelijk dat met het rendement van een transformator van het elektriciteitsbedrijf.

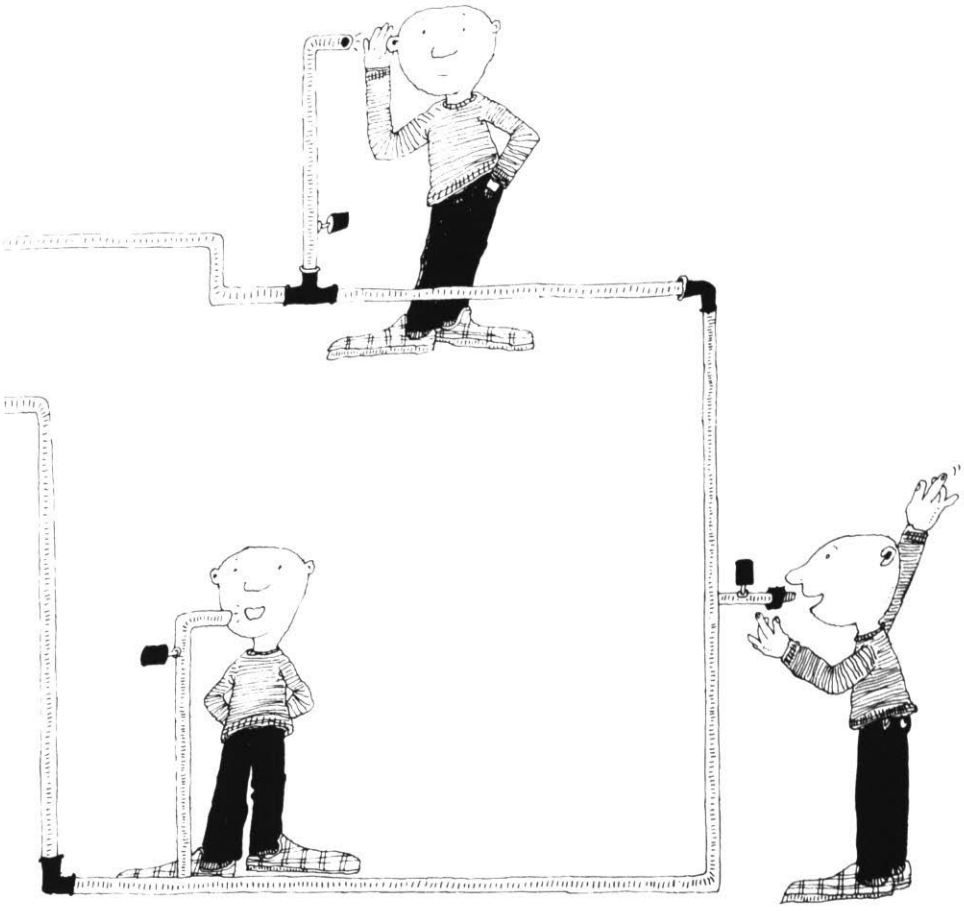
4 Probeer met je eigen woorden te zeggen waarom het transport van elektriciteit het beste onder hoge spanning kan plaatsvinden.

inhoud

			blz.
3-1	Inleiding:	de vergelijking van kolencentrales, kerncentrales en windturbines	57
3-2	Werkgroep 1:	elektriciteit uit kolen	60
3-3	Werkgroep 2:	elektriciteit uit kernsplijting	72
3-4	Werkgroep 3:	elektriciteit uit de wind	89
3-5	Meningen:	kolencentrales, kerncentrales of windturbines	102
3-6	Afsluiting van het thema		111

3-1 INLEIDING: de vergelijking van kolencentrales, kerncentrales en windturbines

In 1980 stelde de regering in de nota *Energiebeleid* voor om voor het veiligstellen van de energievoorziening tot na het jaar 2000 spoedig drie nieuwe elektrische centrales te bouwen. Omdat de regering streefde (en nog steeds streeft) naar het benutten van meer energiebronnen dan (hoofdzakelijk) aardolie en aardgas, zag ze zich voor de keus gesteld: moeten het kolencentrales of kerncentrales worden?
Via de zgn. 'Brede Maatschappelijke Diskussie' (BMD) over energie hoopt de regering tot een keus te komen die door de meeste mensen in Nederland ondersteund wordt.



Sinds het uitbrengen van die nota zijn er veel dingen anders komen te liggen dan te voorzien was. Die belangrijke veranderingen zijn:

1 Door het teruglopen van de economische activiteiten en door flinke energiebesparingen is het energiegebruik in Nederland niet gestegen zoals verwacht, maar flink gedaald in de periode 1980-1982. Alleen al in 1982 daalde het elektriciteitsgebruik in Nederland 2% en het aardgasgebruik maar liefst 6%.

Kolencentrale A'dam is van de baan

Van onze verslaggever

ARNHEM — De bouw van een kolencentrale bij Amsterdam-Hembrug is van de baan. Plannen voor de bouw van de centrale zijn samen met die voor de bouw van een kolencentrale bij Dordrecht, geschrapt uit de lijst voornemens van de Samenwerkende Electriciteitsproduktiebedrijven (SEP).

De vooruitzichten met betrekking tot het toekomstige stroomverbruik zijn zodanig dat tot zeker 1993 geen nieuw produktievermogen meer nodig is. Het aandeel van steenkolen als brandstof voor stroomopwekking kan bovendien ook worden vergroot door ombouw van bestaande olie- en gasgestookte centrales.

Een en ander blijkt uit het concept electriciteitsplan 1987-88 dat volgende week door de raad van commissarissen van de SEP zal worden vastgesteld.

Bericht uit de *Volkskrant* van 5 februari 1983

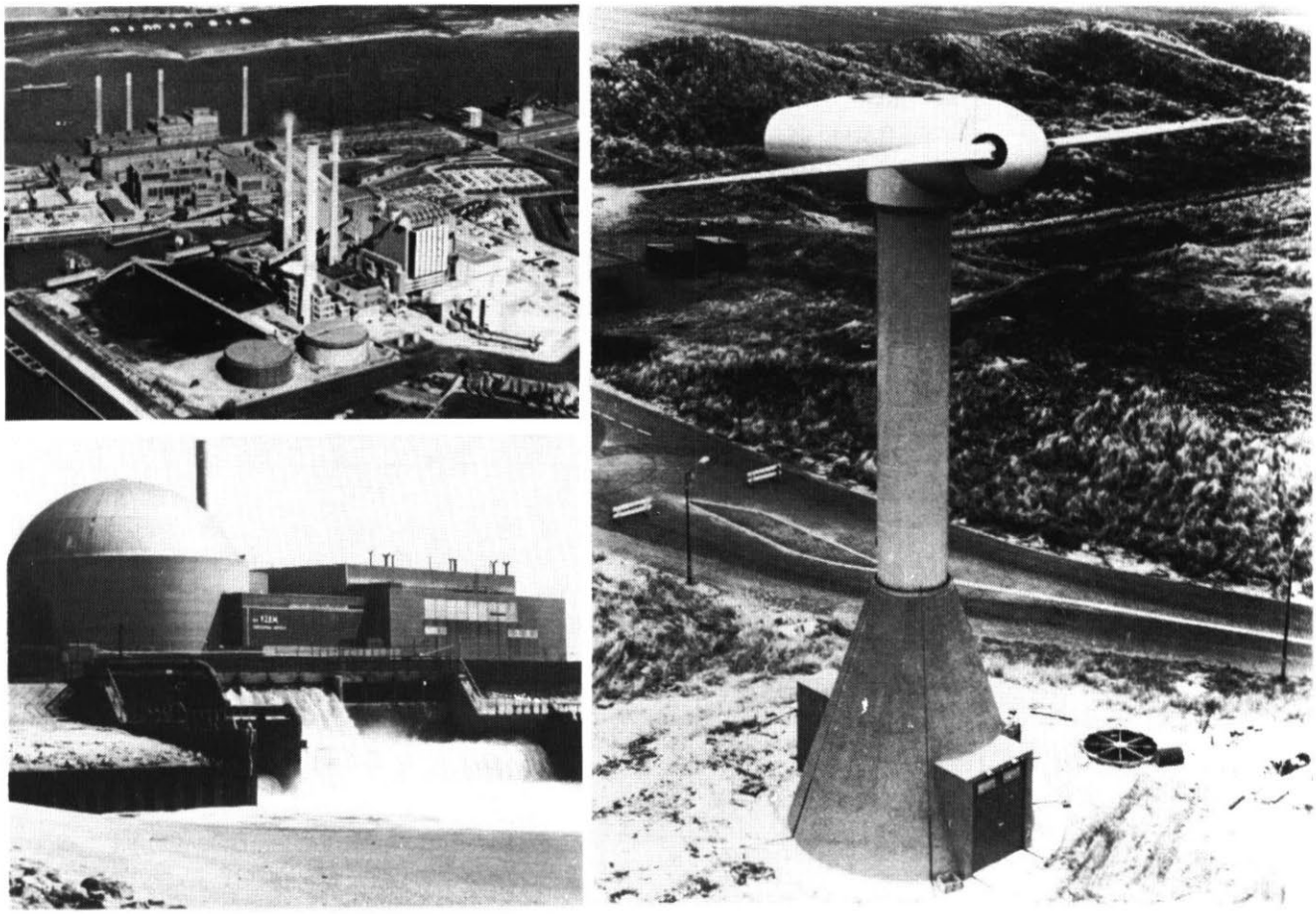
Om voldoende aardgas af te zetten worden elektriciteitsbedrijven gestimuleerd gas te stoken (o.a. de IJsselcentrale in Zwolle).

2 Door de daling van het elektriciteitsgebruik kampen de elektriciteitsproducenten met overcapaciteit.
Nieuwe geplande centrales (zoals de kolencentrales Dordrecht en Hemcentrale – Amsterdam) zullen niet gebouwd worden.

3 De belangstelling voor windturbines is enorm toegenomen.
Veel elektriciteitsbedrijven doen proeven met windturbines die elektriciteit opwekken.
Misschien komt er een windmolenpark in Friesland bij Burum.
Er zijn uitgebreide studies verricht naar de mogelijkheden van opslag van windenergie in een soort kunstmatig stuwmeer (het Plan Lievense).

De discussies over de vraag welk soort centrales we in de toekomst nodig hebben gaan voort. De voor- en nadelen van kolencentrales, kerncentrales en windturbines moeten tegen elkaar afgewogen worden. In de volgende drie hoofdstukken staan die centrales beschreven met de bedoeling uit te leggen hoe de centrales werken.
In elk hoofdstuk komt aan de orde:
– de energie in de grondstof
– van grondstof tot stroom
– milieu-effecten
– meer dan alleen de centrale ...

inleiding



Kolencentrale, kerncentrale of windturbine?

Met de gegevens uit de drie hoofdstukken kan je de drie centrales met elkaar gaan vergelijken.
In 3-5 staat een aantal meningen van mensen uit kranten en folders naast elkaar gezet.
Die kunnen je helpen bij het beantwoorden van de vraag: waarom lopen de meningen over de energievoorziening in de toekomst zo uit elkaar?

3-2 WERKGROEP 1: elektriciteit uit kolen

Energie in steenkool
Steenkool is in de loop van miljoenen jaren ontstaan uit de resten van afgestorven planten. Het wordt daarom een 'fossiele brandstof' genoemd. Andere fossiele brandstoffen zijn aardolie en aardgas.
In steenkool zit energie opgeslagen. Die energie kan eruit gehaald worden door verbranding: een reactie van de steenkool met zuurstof (uit de lucht). De opgeslagen energie komt dan vrij in de vorm van warmte. Bij de verbranding ontstaan afvalstoffen: de verbrandingsprodukten.

STEENKOOL + ZUURSTOF → WARMTE + VERBRANDINGSPRODUKTEN

De zon en het leven op aarde
Zonder de zon zou het leven op aarde niet mogelijk zijn. Planten gebruiken de energie van het zonlicht voor het maken van hun eigen voedingsstoffen. Zij hebben daarvoor ook water en koolstofdioxide (CO_2) nodig. De wortels halen het water uit de grond, en de CO_2 komt via huidopeningen (poriën) uit de lucht. Speciale stoffen in vooral de groene delen van de plant, zorgen voor de absorptie (opname) van het zonlicht.
Bij dit proces van fotosynthese ontstaat, naast voedingsstoffen als koolhydraten en eiwitten, ook de zuurstof die wij nodig hebben voor onze ademhaling.

Mensen kunnen niet zelf op deze manier koolhydraten en eiwitten maken. Zij zijn daarvoor in eerste instantie aangewezen op de planten die ze eten. Hetzelfde geldt voor de meeste dieren.

Fossiele brandstoffen als steenkool, aardgas en aardolie zijn een vorm van opgeslagen zonne-energie. Deze brandstoffen zijn namelijk ontstaan uit de afgestorven resten van planten en dieren. Een klein deel van de planten en dieren ontsnapt aan de voortdurende kringloop van grondstoffen in de natuur. In dikke lagen plantenresten, zoals die in oerwouden gevormd worden, kan geen rotting optreden. De bacteriën, die voor de rotting zorgen, gaan door zuurstofgebrek dood. Als er steeds weer nieuwe lagen op worden afgezet, neemt de druk toe. Dan komt het 'inkolingsproces' op gang, waardoor de plantenresten via turf en bruinkool na miljoenen jaren overgaan in steenkool.
Aardolie ontstond op plaatsen waar vroeger de oceaanbodem met lagen dode zeedieren en -planten bedekt werd.
Bij de vorming van steenkool en aardolie kan aardgas als bijprodukt ontstaan.

Opdrachten
1 Geef aan welke vormen zonne-energie achtereenvolgens opgeslagen is geweest, voordat de energie weer als warmte bij steenkoolverbranding vrijkomt.

2 Het belangrijkste bestanddeel van fossiele brandstoffen is koolstof. Geef kort aan hoe deze koolstof daarin terechtkomt.

De hoeveelheid warmte die vrijkomt bij de reactie, hangt af van de hoeveelheid brandstof (steenkool) én de 'verbrandingswarmte':

Verbrandingswarmte
De hoeveelheid warmte die ontstaat bij de verbranding van fossiele brandstoffen, wordt gegeven door de verbrandingswarmte. Dit is de warmte die vrijkomt bij de verbranding van 1 kg of 1 m^3 fossiele brandstof. De verbrandingswarmte wordt opgegeven in joule per kilogram (J/kg) of in joule per kubieke meter (J/m^3)

brandstof	verbrandingswarmte	
hout	$16 \cdot 10^6$	J/kg
steenkool	$29 \cdot 10^6$	J/kg
benzine	$33 \cdot 10^9$	J/m^3
stookolie	$40 \cdot 10^9$	J/m^3
aardgas	$30 \cdot 10^6$	J/m^3
methaan (gas)	$34 \cdot 10^6$	J/m^3

Het belangrijkste bestanddeel van steenkool is koolstof. Bij de verbranding van zuivere koolstof ontstaat als verbrandingsprodukt het gasvormige koolstofdioxide.

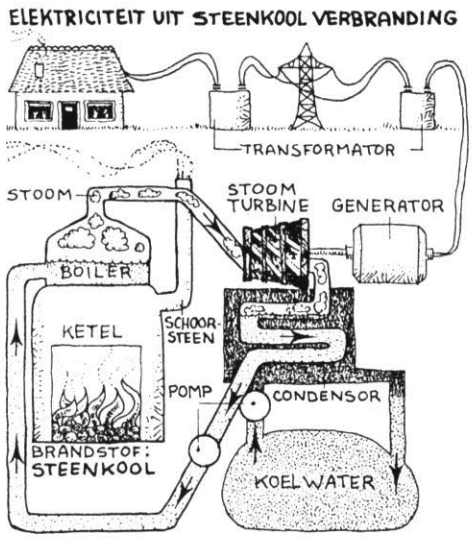
In schema:

KOOLSTOF + ZUURSTOF → WARMTE + KOOLSTOFDIOXIDE

$C + O_2 \rightarrow$ WARMTE + CO_2

Van steenkool tot stroom

De warmte, die de verbranding oplevert, wordt gebruikt om water in de boiler te verhitten tot stoom. Die stoom wordt onder hoge druk naar de turbine ge-

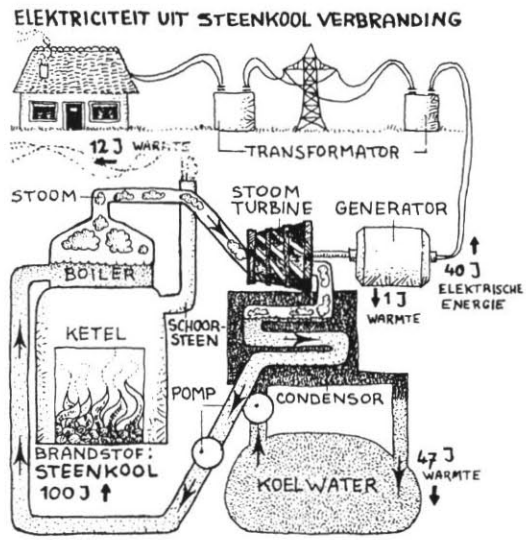


In een kolencentrale wordt de energie, die in steenkool opgeslagen zit, vrijgemaakt door verbranding

voerd. Aan de turbine is een generator (dynamo) gekoppeld. De draaiende beweging van de turbine wordt overgebracht op de generator. Die wekt elektrische energie (stroom) op.
Via transformatorstations en hoogspanningsleidingen wordt deze elektrische energie naar de plaats van gebruik getransporteerd.
De stoom die de turbine verlaat moet afgekoeld worden tot water. Dat gebeurt in de condensor. Het water wordt weer naar de boiler teruggepompt. Voor het afkoelen van de stoom in de condensor is koelwater nodig.

Meer informatie over de techniek van energieomzetting in een kolencentrale vind je in leestekst 1.

Het rendement van een moderne centrale is nu zo'n 40%: uit elke 100 J energie in de vorm van steenkool die de centrale binnenkomt, ontstaat 40 J elektrische energie. De rest van de energie gaat verloren, voornamelijk in de vorm van warmte in de verbrandingsgassen (12 J) en in het koelwater (47 J).



De energiestroom in een kolencentrale

In stadsverwarmingscentrales wordt de warmte van het koelwater gebruikt voor verwarming van huizen. Omdat de temperatuur van het koelwater na koeling dan hoger is (ca. 100 °C) dan bij opname van koelwater uit een meer (ca. 10 °C), ligt het (elektriciteits)rendement wat lager. Aan de andere kant neemt het totale rendement toe omdat ook de afvalwarmte nuttig gebruikt wordt.

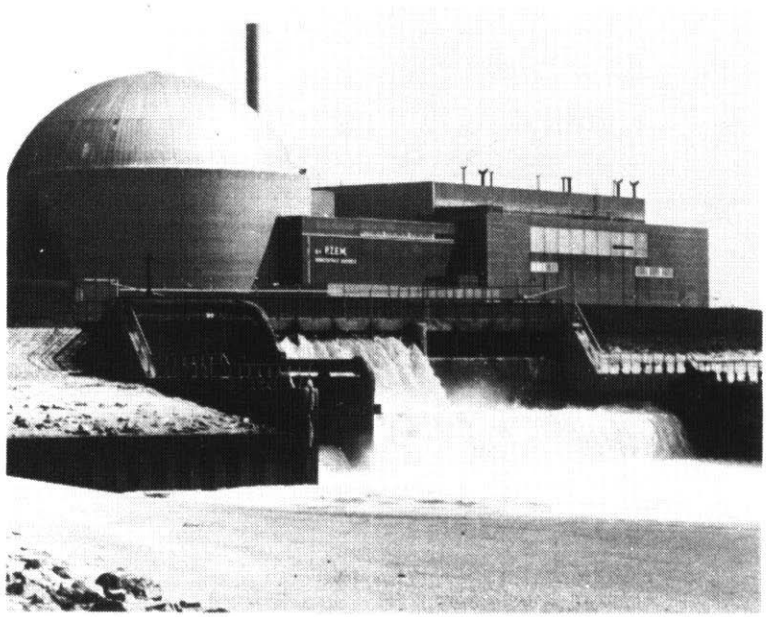
Vragen

1 Waarom moet de stoom gecondenseerd worden?

2 Leg uit waarom aan weerskanten van de pomp tussen de condensor en de boiler de druk in het water sterk verschilt.

Milieu-effecten

Thermische verontreiniging
Een elektriciteitscentrale gebruikt in het algemeen water uit rivieren of meren om de warmte af te voeren, die bij het condenseren van de stoom in de condensor vrijkomt. Daardoor neemt de temperatuur van dat oppervlaktewater toe. Deze 'thermische verontreiniging' verstoort het biologisch evenwicht. Uiteindelijk kan dit leiden tot het verdwijnen van waterplanten en -dieren uit het verwarmde water.



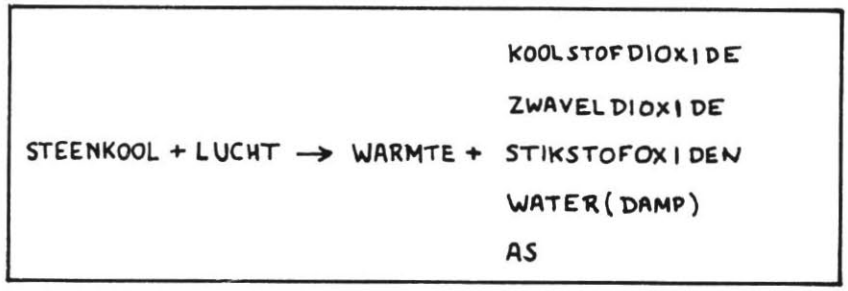
Volgens internationale normen mag rivierwater, dat als koelwater wordt gebruikt niet meer dan 3 °C in temperatuur verhoogd worden.

Opdracht
3 Leg uit waarom de thermische verontreiniging van een centrale 's winters aanzienlijk minder wordt maar 's zomers niet, als de centrale wordt omgebouwd voor stadsverwarming.

Afval
Steenkool bestaat voor het grootste deel uit koolstof. Verbranding levert het afvalgas koolstofdioxide (CO_2). Andere bestanddelen van steenkool zijn stoffen als zwavel, waterstof en gesteente. Er ontstaan bij de verbranding van steenkool daarom méér verbrandingsprodukten dan alleen CO_2: zwaveldioxide (SO_2), en waterdamp. De onbrandbare bestanddelen in de steenkool (het gesteente) blijven na verbranding over in de vorm van as, of gaan met de verbrandingsgassen door de schoorsteen mee naar buiten (het 'vlieg-as').

Bovendien kunnen er stikstofoxiden (NO en NO_2) ontstaan door verbinding van de stikstof met zuurstof uit de lucht in de hete rookgassen.

In schema:



Welke gevolgen hebben deze afvalprodukten voor het milieu en de gezondheid van mensen?

– *Vlieg-as*
Een groot deel van het vlieg-as kan in de schoorsteen worden opgevangen. Er komt dus weinig vlieg-as in de lucht terecht. Vlieg-as van kolenverbranding kan allerlei stoffen bevatten, die in zeer kleine hoeveelheden in steenkool voorkomen, zoals kwik, cadmium, fluor en thallium. Van veel van deze stoffen is bekend, dat ze voor de mens giftig zijn. Bij toenemend steenkolenverbruik, moet rekening gehouden worden met een toename van deze stoffen in de lucht (en in je longen), de bodem en het oppervlaktewater. De gevolgen hiervan zijn nog niet te overzien.
Er bestaan mogelijkheden om met het vlieg-as nuttige produkten te maken zoals het verwerken in de wegenbouw (o.a. als onderlaag voor wegen, ver-

Grote zorgen

Eddy Stuers brengt ons naar een stortplaats in de gemeente Rumst aan de rivier de Rupel, een oude kleiafgraving van steenfabriek Heylen. Wat hij laat zien is geen kleiput meer. Ook het woord kleiafgraving is te zwak. Het is een geweldige vlakte van tientallen hectaren, een immense krater, waar heel ver weg aan de noordkant nog klei voor de steenbakkerij afgegraven wordt. Deze put, zegt Stuers, is een schoolvoorbeeld van wat er in België allemaal gebeurt. Want hier wordt het volgende gestort: vliegas van Nederlandse kolencentrales, gips, asbest als restant van eternietproduktie en huisvuil van de stad Antwerpen.

Wat hier aan Nederlands vliegas ligt is niet te geloven. Aan één kant ligt de krater nog een meter of drie beneden het maaiveld. Daaronder is alles opgevuld met vliegas, tien, twintig, misschien wel dertig meter hoog. Vliegas is grijs, fijn, korrelig spul dat in de lichte vorst en aangereden door vrachtauto's keihard wordt. Als je naar de rand van het stort loopt zie je in de diepte — in de bodem van de put — nog een paar visvijvers liggen: lieflijk groen in de rotzooi. „Er waren hier eerst allemaal van die vijvers," zegt Eddy. „Deze worden straks ook opgevuld."

Bericht uit de *Volkskrant* van 12 februari 1983

werking in asfalt) en in bouwmaterialen (cement, baksteen). Maar daarvoor moeten aparte fabrieken gebouwd worden en transport van vlieg-as is vrij moeilijk. Het moet in afgesloten vrachtwagens vervoerd worden, anders waait het nog weg. In kolen komt ook een spoor uranium voor. Het uranium komt vooral in het vlieg-as terecht.
Omdat uranium radioactief is kan het leiden tot een kleine verhoging van de radioactiviteit waaraan de mensen blootgesteld zijn.

– *As*
De as, die na verbranding overblijft, moet ergens gestort worden. Dit geldt ook voor het in de schoorsteen opgevangen vlieg-as.
Problemen hierbij zijn onder andere het vinden van een stortplaats en een mogelijke verontreiniging van grondwater met de eerder genoemde stoffen.

– *Zwaveldioxide (SO_2)*
Bij een klein deel van de bevolking zorgt SO_2 in de lucht voor een geringe of matige afname van de werking van de longen. Bij een toenemende concentratie zullen meer mensen daar last van krijgen.
Door een reactie met water(damp) in de lucht, kan SO_2 overgaan in zwavelzuur. Dit zwavelzuur is aanzienlijk schadelijker voor de slijmvliezen van de luchtwegen dan SO_2. Daarnaast kan er 'zure regen' ontstaan. Dit heeft nadelige gevolgen voor het leven van bepaalde planten en waterdieren. Sommige meren in Zweden zijn vrijwel levenloos geworden door een te hoge zuurgraad. De zure regen is ontstaan door luchtvervuiling met SO_2 in de landen van West-Europa (o.a. van Nederland). Export van vervuiling!
Het is mogelijk SO_2 bij de centrale uit de verbrandingsgassen te halen. Deze worden dan door kalk geleid, waarbij gips ontstaat. Dit gips kan voor een deel als bouwmateriaal worden gebruikt. De rest moet ergens gestort worden.
In het gips kan ook het uranium dat in geringe mate in kolen voorkomt, terecht komen.
Radon, een radioactief edelgas dat bij het uit elkaar vallen van uranium vrij komt, wordt na verloop van tijd in het gips gevormd. Men vermoedt dat bij toepassing van gips in huis (o.a. gipsplaat) bij slechte ventilatie de concentratie radon te hoog kan oplopen. Dat kan een gevaar voor de gezondheid betekenen. Radon zendt alfastraling uit.

– *Stikstofoxiden (NO en NO_2)*
Stikstofmonoxide (NO) heeft de eigenschap de zuurstofopname door het bloed in de longen te verminderen.
Stikstofdioxide (NO_2) is een prikkelend gas, dat verouderingsprocessen in weefsels bevordert.

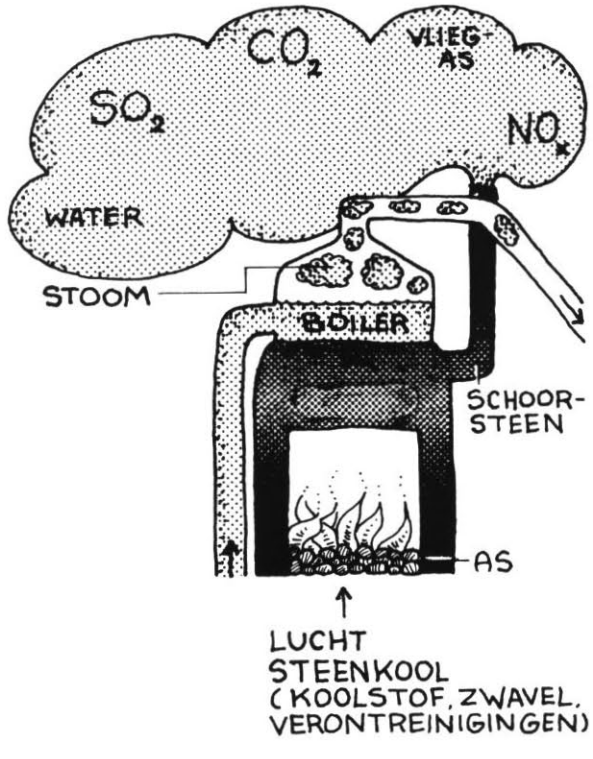
– *Koolstofdioxide*
Eén van de produkten die altijd vrijkomen bij de verbranding van fossiele brandstoffen is koolstofdioxide (CO_2). In tegenstelling tot verbrandingsprodukten als SO_2, NO en NO_2, maakt men zich bij CO_2 niet zoveel zorgen over effecten op de gezondheid. Toename van het CO_2-gehalte in de lucht kan echter wél invloed hebben op het klimaat op aarde.
Informatie over de mogelijke effecten van een toename van het CO_2-gehalte op het klimaat vind je in leestekst 2.

De laatste tientallen jaren is de luchtverontreiniging, met name het SO_2-gehalte in de lucht, enigszins afgenomen, ondanks een stijgend energieverbruik. De afname van luchtverontreiniging werd voornamelijk veroorzaakt door de overschakeling van steenkool op het 'schonere' aardgas.

Als in de toekomst meer steenkool gebruikt gaat worden, zal deze vorm van luchtverontreiniging weer toenemen. Het is nog de vraag of men tegen die tijd voldoende technieken heeft kunnen ontwikkelen om die toenemende verontreiniging tegen te gaan.

	Londen		Rotterdam
	dec. '52	dec. '62	dec. '62
duur van de smogperiode in dagen	5	5	3
aantal dagen met zeer hoge gehalten	2	1	1
voorgaand SO_2-niveau (ρ/m^3)	500	400	250
SO_2-maximum ($\rho g/m^3$)	4000	3300	1200
voorgaand rookniveau ($\rho g/m^3$)	400	200	150
rookmaximum ($\rho g/m^3$)	4000	2000	500
oversterfte	4000	850	niet meetbaar

Drie voorbeelden van ernstige luchtverontreiniging ('smog') en haar gevolgen



De massastroom in een kolencentrale

Smerige kolen verbranden schoner in een wervelbed

Een krantekop over een nieuwe methode die luchtverontreiniging door zwavel in kolen moet voorkomen

Opdrachten

4 Een kolencentrale van 600 MW gebruikt per jaar ongeveer 1,2 miljoen ton kolen. In één jaar komt er 125 000 ton as, voornamelijk vlieg-as, vrij.

a Hoeveel hectare land is er nodig om de asproduktie van 1 jaar op te slaan? Neem aan dat de aslaag 10 meter dik mag worden. De gemiddelde dichtheid van de as is 2 ton per m^3 (2000 kg/m^3).

b Hoeveel land zal er voor de as, die in de centrale tijdens zijn levensduur (ca. 25 jaar) ontstaat, nodig zijn?

c (voor de echte rekenaars)
Hoe groot is het rendement van deze centrale?
Om het rendement uit te rekenen kan je de volgende tussenstappen maken:

1 Bereken hoeveel joule aan verbrandingswarmte (zie blz. 61) vrijkomt per jaar.

2 Bereken hoeveel joule elektrische energie de centrale per jaar produceert. Veronderstel dat de centrale 70% van de tijd op vol vermogen werkt en het andere deel stilstaat. (reparaties, onderhoud, geen vraag naar elektriciteit)

3 Bereken het rendement van deze centrale.

5 Er bestaat tegenwoordig steeds meer weerstand tegen het verwerken van gipsplaat en gipsblokken in huis vanwege de radioactiviteit die dat zou afgeven. Leg eens uit hoe dat zit.

Meer dan alleen een centrale ...

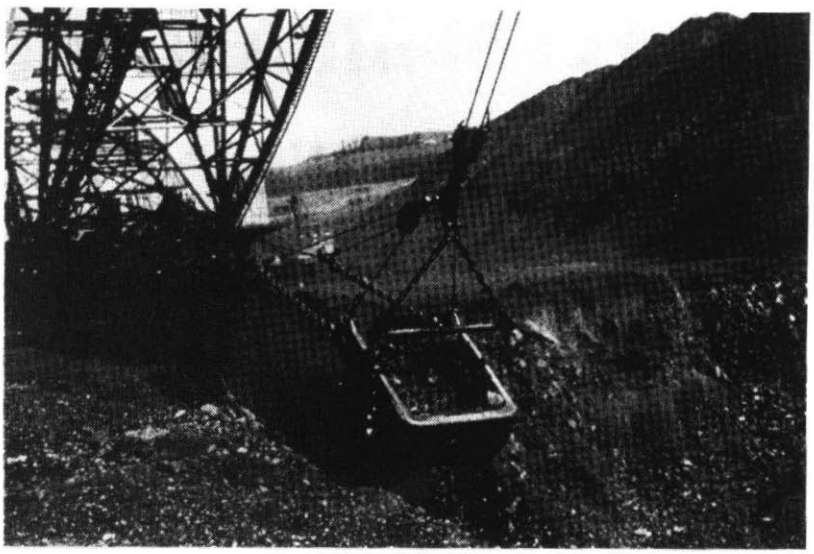
Om de energie in steenkool in een bruikbare vorm om te zetten, moet er heel wat gebeuren:

- winning en zuivering van de steenkool
- steenkooltransport naar de centrale
- bouw en onderhoud van de centrale, en later weer afbraak ervan
- verwerking van het verbrandingsafval
- transport en opslag
- transport van de elektriciteit naar de gebruikers

Voor al deze activiteiten zijn grondstoffen en energie nodig. Bij het vergelijken van verschillende manieren van energieomzetting (in bijvoorbeeld een kolen- of kerncentrale, of met een windmolen), moet je met deze 'energie- en grondstoffenkosten' van het hele proces rekening houden.

Winning en transport

In veel gevallen bevinden de fossiele brandstoffen zich diep onder de grond. Steenkool kan hier en daar aan de oppervlakte gewonnen worden (dagbouw); waar dit niet mogelijk is, moeten er mijnen aangelegd worden.



Steenkoolwinning aan de oppervlakte

Het werken in een mijn is niet ongevaarlijk: technische verbeteringen hebben de risico's van ontploffend mijngas of instortende mijngangen niet geheel kunnen uitbannen. Daarnaast ademen mijnwerkers stof in, dat bij de kolendelving ontstaat. Dit kan het ontstaan van een stoflong veroorzaken (deze ziekte heet silicose), die de zuurstofopname in het bloed belemmert.

De steenkool wordt bij de mijn ontdaan van een groot deel van het meegekomen gesteente met behulp van water (het 'wassen' van de steenkool). De ge-

Steenkooloverslag

zuiverde steenkool wordt per schip of trein naar de plaats van bestemming vervoerd. Dat het daarbij om forse afstanden gaat, blijkt uit de herkomst van de steenkool die in Nederland ingevoerd wordt: Australië, Zuid-Afrika, Polen, Canada en de Verenigde Staten van Amerika.
Het transport van de steenkool is ook niet zonder milieuproblemen. Vooral het overladen en opslag van voorraden zijn een bron van verontreiniging van de lucht met stof.

Opdrachten

6 Noem de belangrijkste redenen waarom de uitbreiding van het aantal kolencentrales gevolgen heeft voor het milieu.

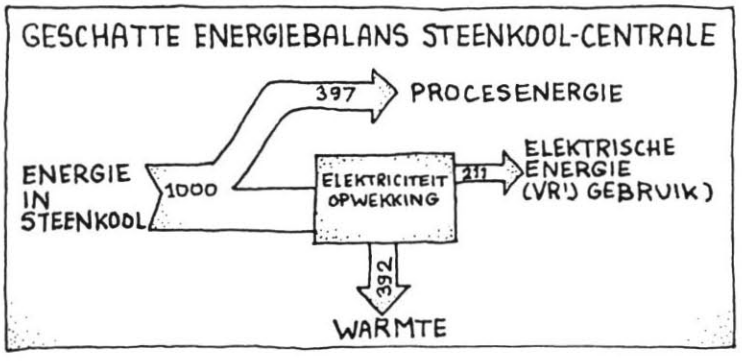
7 In de Nederlandse bodem zitten enorme hoeveelheden steenkool. Noem enkele redenen waarom we die er niet uithalen, maar kolen uit andere landen halen.

Het bouwen en de afbraak van de centrale
Een elektriciteitscentrale moet gebouwd worden, en na verloop van zo'n 25 jaar weer worden afgebroken of vernieuwd. Dat levert afval op en daarvoor is energie nodig. Ook de machines die nodig zijn voor de bouw en de afbraak slijten en leveren daardoor afval.
Dat afval moet ergens gedumpt worden of kan opnieuw gebruikt worden. In het algemeen zal dat geen grote afvalproblemen opleveren.

Energiebalans
Al deze activiteiten als winning en transport van steenkool, bouw en afbraak van de centrale, afvalverwerking en -opslag, distributie van elektriciteit, enz. kosten flinke hoeveelheden energie en grondstoffen.
Voor het maken van een produkt is energie nodig. Daarom kun je spreken van de 'energie-inhoud' van een produkt. Hoe meer energie het maken van een produkt kost, hoe groter de energie-inhoud ervan is.
Het bouwen van een elektriciteitscentrale kost een hoeveelheid energie. Bouwkranen, vrachtwagens, elektrische gereedschappen, zoals lasapparatuur, enz. gebruiken allemaal energie, en in de bouwmaterialen zelf is ook energie gestoken. Een gebouwde centrale heeft daarom een bepaalde energie-inhoud. Tijdens de levensduur van een centrale wordt energie opgewekt (in de vorm van elektriciteit). Van die opgewekte hoeveelheid moet de energie-inhoud worden afgetrokken. We houden dan de netto energie over. Natuurlijk moet een centrale tijdens zijn leven méér energie opwekken dan voor de bouw noodzakelijk was. Anders zou de netto energie nul of minder zijn: we zouden energie uitgeven, maar er niets voor terugkrijgen.
Een kolencentrale moet ongeveer vier jaar werken, voordat hij de energie, nodig voor zijn bouw, heeft opgewekt. Maar dan houden we nog geen rekening met de energie die geïnvesteerd moet worden in opsporing, winning, transport, distributie van elektriciteit en afvalverwerking en -opslag. De werkelijke energie-terugverdientijd is dus langer dan vier jaar.

Het berekenen van de hoeveelheid energie, die nodig is om het hele proces van energieomzetting mogelijk te maken, is vrij ingewikkeld. Vaak zijn de precieze cijfers niet bekend, en moet er geschat worden. Door deze berekeningen en schattingen ontstaat een zogenaamde 'energie-balans'. Daarin is te

zien hoeveel energie er oorspronkelijk opgeslagen zat in de ruwe brandstof, hoeveel er daarvan gebruikt wordt om het hele proces van energieomzetting mogelijk te maken, en hoeveel energie er uiteindelijk beschikbaar komt voor vrij gebruik.



Uit de geschatte energiebalans van een steenkoolcentrale blijkt dat van elke 1000 J energie in steenkool 397 J nodig is om het hele proces van elektriciteitsopwekking (van winning tot afvalopslag) te laten draaien. Uiteindelijk komt er 211 J aan elektrische energie voor vrij gebruik beschikbaar.

Opdrachten

8 Hoe groot is volgens de geschatte energiebalans het rendement van het hele proces van elektriciteitsopwekking met behulp van steenkool?
Vergelijk dit met het rendement van alleen de elektriciteitscentrale.

9 In het *Tussenrapport van de Maatschappelijke Discussie Energiebeleid* staat dat de energie-inhoud van een kolencentrale 10 miljoen MJ (10^{16} J) is. Helaas staat er niet bij vermeld hoe groot het vermogen van de bedoelde centrale is. Om nu toch een schatting van de 'terugverdientijd' te maken, nemen we aan dat het gaat om een 600 MW-centrale met een rendement van 40%. Bovendien nemen we aan dat de centrale over een jaar gemiddeld 70% van de tijd op volle toeren heeft gedraaid. Bereken daaruit hoe lang het duurt voordat de centrale zijn eigen energie-inhoud heeft geproduceerd (de terugverdientijd dus).

10 Misschien wil je nog meer weten over kolencentrales.
Schrijf die vragen op.
Zoek een boek in de bibliotheek over kolencentrales, waarin misschien een antwoord op je vragen staat.
Je kunt je vragen ook stellen aan een elektriciteitsfabriek in de buurt die een kolencentrale beheert, aan de Samenwerkende Elektriciteitsproducenten (SEP) of aan actiegroepen voor het milieu. Je leraar weet wel adressen.

Rapportageopdrachten

11 Schrijf (minstens) 4 dingen over de kolencentrale op die heel nieuw voor je waren en die jij over de kolencentrale aan anderen zou willen vertellen.

12 Een belangrijk punt om kolencentrales, kerncentrales en windturbines met elkaar te vergelijken is de *veiligheid* van de werkers in de centrale, bij de grondstofproduktie en de afvalverwerking. En ook de veiligheid van de mensen in de omgeving van de centrale.
- Noem minstens 4 belangrijke veiligheidsvoorzieningen die rond kolen en de kolencentrale getroffen moeten worden.
- Vergelijk de kolencentrale, de kerncentrale en de windturbine met elkaar wat betreft de veiligheid.

13 Schrijf andere belangrijke punten op waarop jij de kolencentrale zou willen vergelijken met de kerncentrale en de windturbine.

3-3 WERKGROEP 2: elektriciteit uit kernsplijting

Energie in kernen

In de natuur komen allerlei kernen voor: lichte kernen (dus met slechts enkele protonen en neutronen) en zware kernen (met veel protonen en neutronen). Elke kern bevat een hoeveelheid energie. Maar het is heel moeilijk om die energie eruit te halen. Er is een mogelijkheid zware kernen in twee brokken (lichtere kernen) te splijten.
Omdat de oorspronkelijke zware kern meer energie bevat dan de twee lichtere brokken bij elkaar, komt er energie vrij.

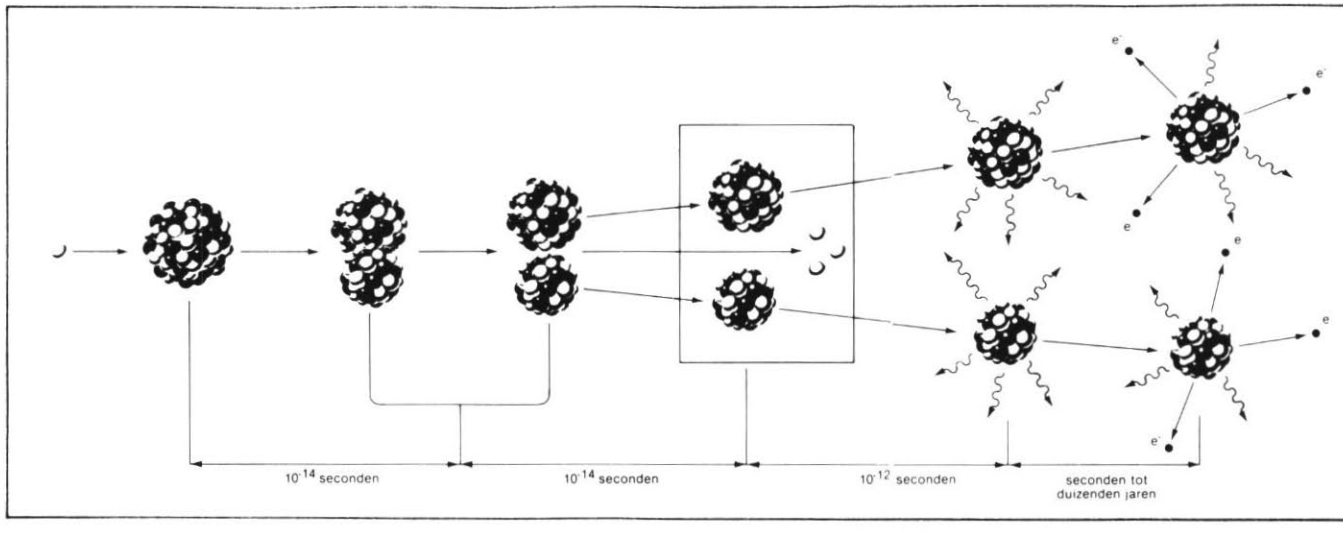
> Je zou dat kunnen vergelijken met het maken van dubbeltjes uit een kwartje. Een kwartje weegt 3 gram. Als een dubbeltje 1 gram zou wegen, zou je met veel moeite uit 1 kwartje drie dubbeltjes kunnen maken.
> Een winst van een half dubbeltje! Maar dubbeltjes zijn 1,5 gram. Daardoor is het omgekeerde wel mogelijk: uit 2 dubbeltjes 1 kwartje maken: 5 cent winst. Maar of dat de kosten dekt ...?

Om een elektriciteitscentrale op kernsplijtingsenergie te laten draaien moet je de hoeveelheid energie – en dus het aantal kernen dat gespleten wordt – kunnen *regelen*. Er zijn veel soorten kernen die bij splijting energie afgeven. Er zijn maar enkele soorten kernen waarvoor een methode is bedacht waarmee het aantal kernen dat gespleten wordt, geregeld kan worden.
Eén zo'n soort is ^{235}U, het uraniumisotoop dat voor 0,7% in het natuurlijke uranium voorkomt.

Energie uit uranium

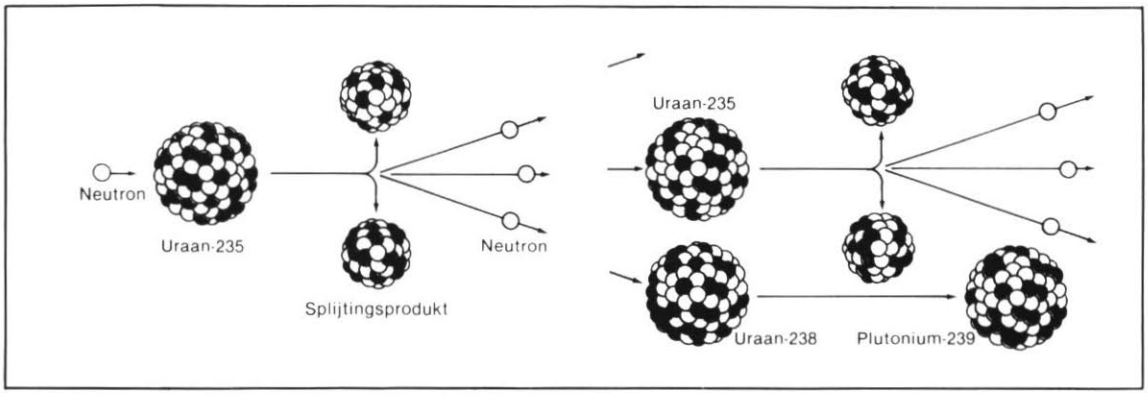
Hoe kan nu de energie uit uranium vrijgemaakt worden zó, dat de hoeveelheid vrijgekomen energie geregeld kan worden?

Een ^{235}U-kern wordt getroffen door een neutron die op een of andere wijze in het uranium is geschoten. Daardoor splijt de kern in 2 brokstukken waarbij – dat is het bijzondere – 2 of 3 nieuwe neutronen vrijkomen.



De energie komt vrij in de vorm van straling en als snelheid van de vrijgekomen deeltjes. De brokstukken vormen de kernen van nieuwe atomen. *De neutronen kunnen nieuwe* ^{235} *U-kernen splijten*: er komt een kettingreactie op gang: door de ene splijting komen er weer nieuwe splijtingen. Dat kan razend snel gaan.

Een belangrijke eis bij een constant werkende kerncentrale is, dat voor elke uraniumkern die gespleten wordt, er één – niet meer en niet minder – één nieuwe uraniumkern gespleten wordt. Is dat aantal gemiddeld groter dan 1, bijvoorbeeld 1,5 dan neemt het aantal splijtingen per seconde zéér snel toe, bijvoorbeeld 1; 1,5; $1{,}5^2 = 2{,}3$; $1{,}5^3 = 3{,}3$ enz.
Dat *kan* en *mag* in een kerncentrale absoluut niet gebeuren. Alleen even bij het starten van de centrale mag het aantal splijtingen per seconde toenemen. Daarna moet het constant blijven.
Is het aantal neutronen dat een nieuwe uraniumkern splijt gemiddeld kleiner dan 1, (bijvoorbeeld 0,9), dan neemt het aantal splijtingen per seconde zeer snel af: 1; 0,9; $0{,}9^2 = 0{,}81$; $0{,}9^3 = 0{,}72$ enz.



Kernreactie waarbij gemiddeld één neutron een nieuwe kern splijt

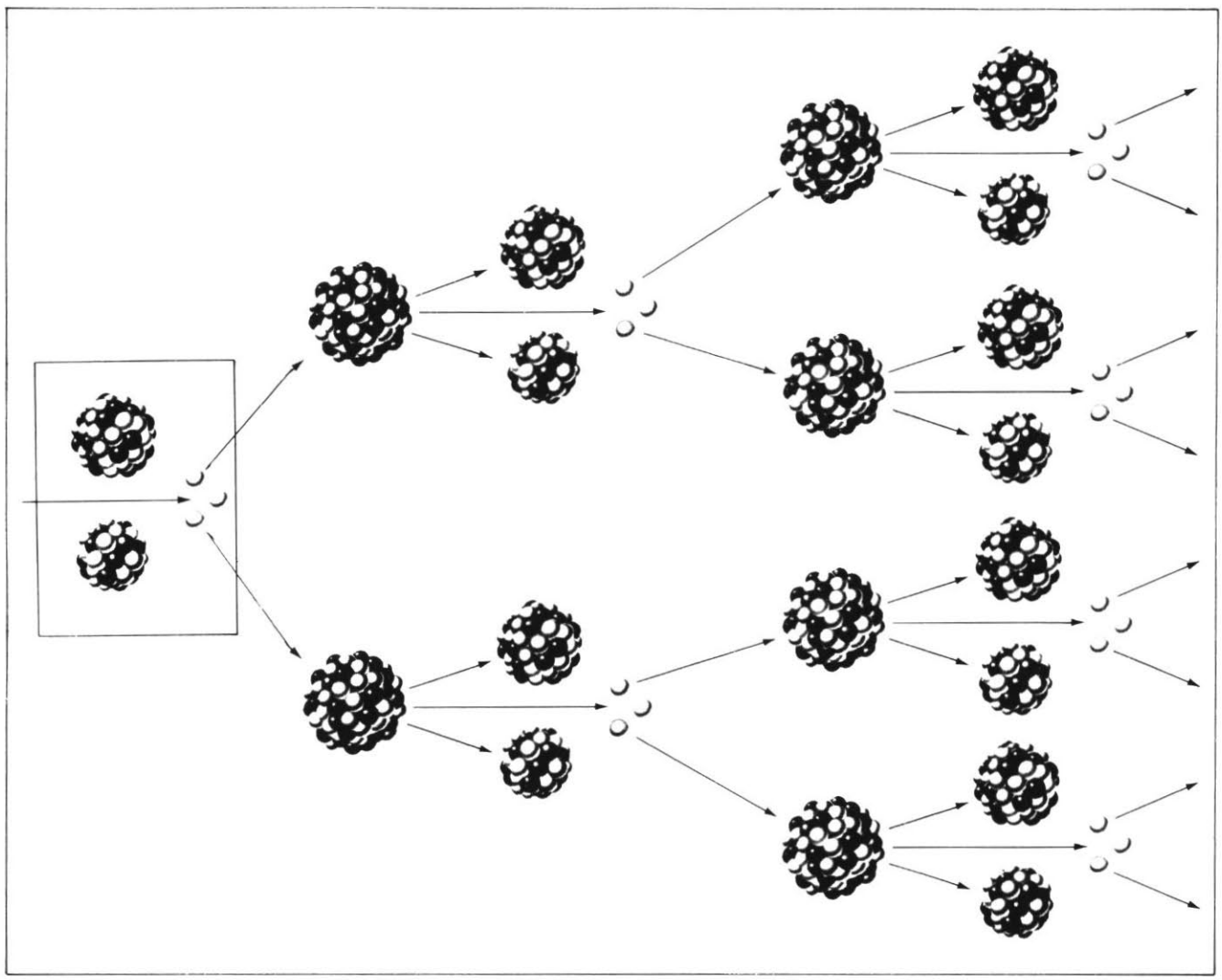
Het aantal splijtingen kan geregeld worden door het aantal neutronen in de kernreactor te beïnvloeden. Met regelstaven van cadmium of borium wordt een regelbaar aantal neutronen weggevangen, zodat die niet meer meedoen met het splijten van uraniumkernen.

In leestekst 3 vind je meer informatie over de manier waarop in de kernreactor het aantal splijtingen per seconde van uraniumkernen in de hand gehouden wordt.

Opdrachten

1 Ga eens na hoe snel het aantal splijtingen toeneemt als gemiddeld 1,1 neutron, die bij een kernsplijting vrijkomt, een nieuwe kernsplijting kan veroorzaken.

2 Wat zal er in een kernreactor gebeuren als er van elke 6 neutronen één neutron een nieuwe splijting veroorzaakt?



De kernreactie waarbij gemiddeld twee neutronen een nieuwe kern splijten, leidt tot een explosieve warmteontwikkeling

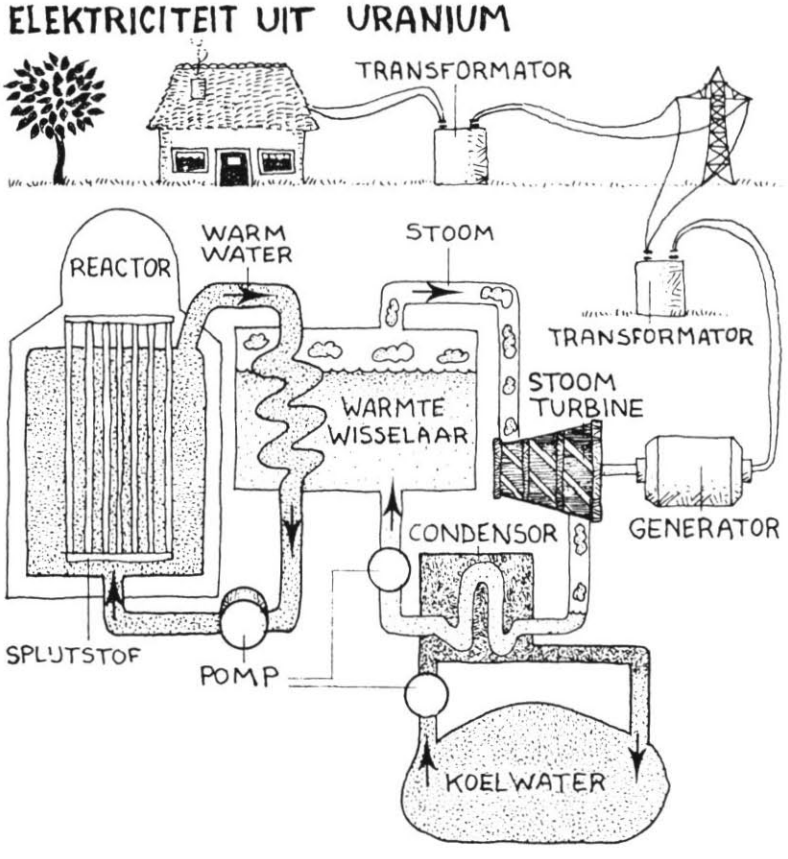
3 Hoe groot is het totaal aantal protonen en het totaal aantal neutronen in de twee brokstukken die ontstaan zijn bij splijting van ^{235}U?

Van uranium tot stroom

In de kernreactor bevindt het uranium zich in splijtstofelementen. Een neutronenbron brengt de kernsplijtingen op gang. Met de regelstaven wordt het vermogen op een constante waarde gehouden. De splijting van de ^{235}U-kernen levert warmte op.

Deze warmte wordt afgevoerd door water dat langs de splijtstofstaven stroomt. Dit water staat onder hoge druk (ongeveer 160 atm), zodat het bij de hoge temperatuur in de reactor toch niet gaat koken.

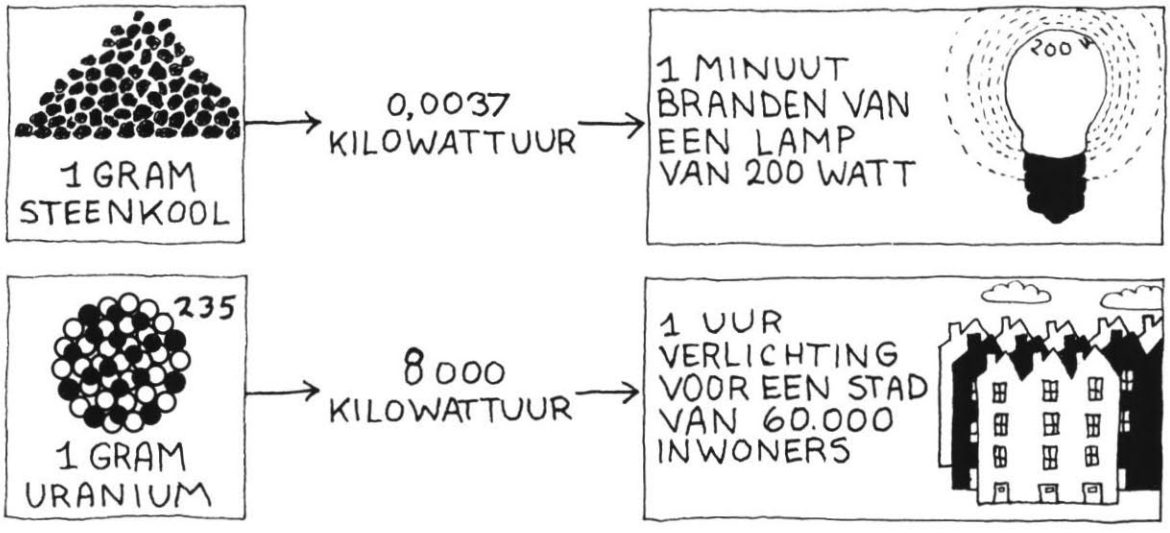
Via een warmtewisselaar ontstaat er in een tweede kringloop stoom. De stoom drijft een stoomturbine met een daaraan gekoppelde generator aan. Deze levert de elektrische energie. De stoom wordt in een condensor met behulp van water uit een rivier of meer gecondenseerd en teruggevoerd naar de warmtewisselaar.



De warmteoverdracht vanuit de reactor, via twee warmtewisselaars naar de stoomketel, wordt toegepast omdat het langs de splijtstofelementen stromende water radioactief besmet wordt. Door het toepassen van de extra warmtewisselaar blijft deze radioactieve vervuiling grotendeels beperkt tot de reactor zelf en het water in de eerste kringloop.

Het rendement van een kerncentrale zelf bedraagt 30%. Dus 30% van de warmte die bij kernsplijting vrijkomt, wordt omgezet in elektrische energie. De rest van die warmte wordt afgevoerd door het koelwater.

Splijtingswarmte
De hoeveelheid warmte die uit 1 kg uranium vrijgemaakt kan worden door de aanwezige ^{235}U te splijten, noemen we de splijtingswarmte.
De splijtingswarmte van 1 kg natuurlijk uranium is 0,4 2 · 10^{12} J.
Dat is ongeveer 14 600 maal zoveel als de verbrandingswaarde van 1 kg steenkool!
Er moet echter heel wat gebeuren om uranium zuiver te krijgen.
Natuurlijk uranium bevat slechts 0,72% ^{235}U. Als we de splijtingswarmte van zuiver ^{235}U zouden nemen, komen de getallen nog hoger uit: 60 · 10^{12} J, dat wil zeggen 2 miljoen maal zoveel als de verbrandingswarmte van 1 kg steenkool.



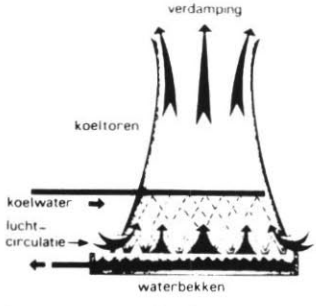
Het koelwater van de kerncentrale is in principe geschikt voor stadsverwarmingsdoeleinden: het leveren van warm water voor verwarming van huizen. Tot nu toe is dat in Nederland nog niet toegepast vanwege de te verwachten bezwaren van de bewoners in verband met de vrees voor de (kleine) kans op radioactief water in de verwarmingsbuizen.

Een kerncentrale heeft 50% meer koelwater nodig dan een kolencentrale. Daarvoor zijn twee redenen: het rendement van de kerncentrale is 30%, van de kolencentrale 40%; de kolencentrale loost een deel van de warmte met de rookgassen door de schoorsteen. Een kerncentrale raakt alle niet-bruikbare warmte via het koelwater kwijt.

4 Opdracht
Beschrijf in je eigen woorden wat er allemaal met de energie uit uranium gebeurt vanaf de splijting waarbij deze vrijkomt tot het moment dat je haar thuis kunt gebruiken.

Milieu-effecten

Thermische verontreiniging
Een kerncentrale gebruikt in het algemeen water uit rivieren of meren voor de noodzakelijke koeling. Daardoor neemt de temperatuur van dat water toe. Deze 'thermische verontreiniging' verstoort het biologisch evenwicht in het water: bij hogere temperatuur gaan de planten sneller groeien. Dat kan bijvoorbeeld leiden tot een gebrek aan zuurstof in het water. Daardoor dreigt het gevaar van een grote vermindering of zelfs het verdwijnen van bepaalde plantensoorten en vissen uit het meer of de rivier waarop het warm water geloosd wordt.



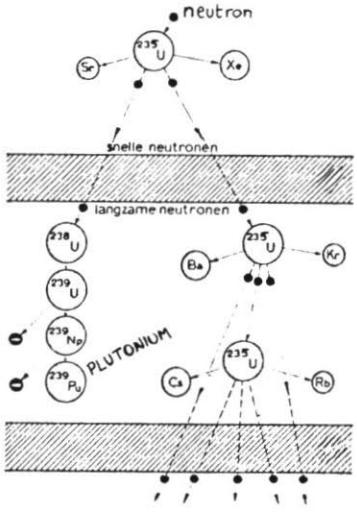
Schema van een koeltoren met natuurlijke trek

Om verontreiniging van rivieren en meren met (afval)warmte te voorkomen, worden wel eens koeltorens gebruikt. Het van de condensor komende koelwater druipt in een tegengestelde luchtstroom naar beneden, en verdampt gedeeltelijk. De warmte die voor dat verdampen nodig is, wordt onttrokken aan de rest van het koelwater. Dat daalt dus in temperatuur.

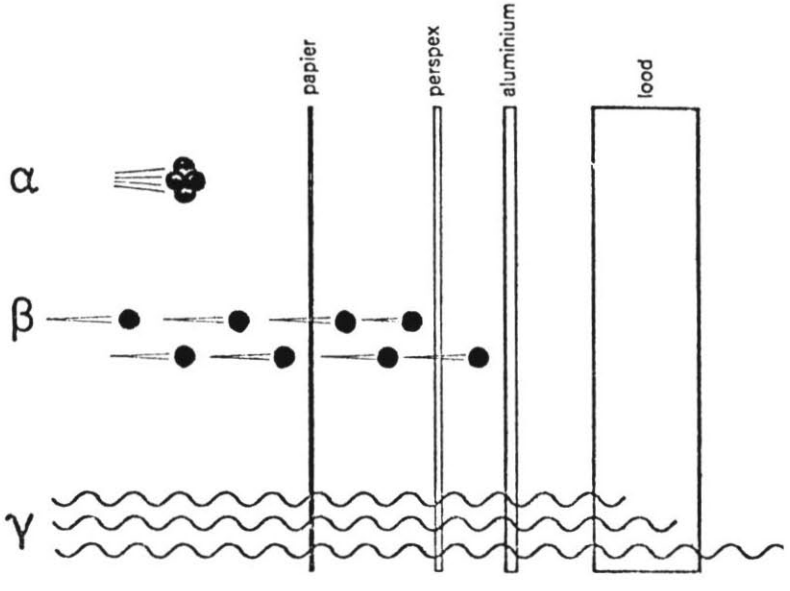
Het koelwater kan opnieuw gebruikt worden voor de koeling van de centrale, op het kleine deel na dat door verdamping is verdwenen. Koeltorens worden overigens in het buitenland ook voor andere thermische centrales gebruikt op plaatsen waar weinig koelwater aanwezig is. In Nederland zijn nauwelijks koeltorens in gebruik.

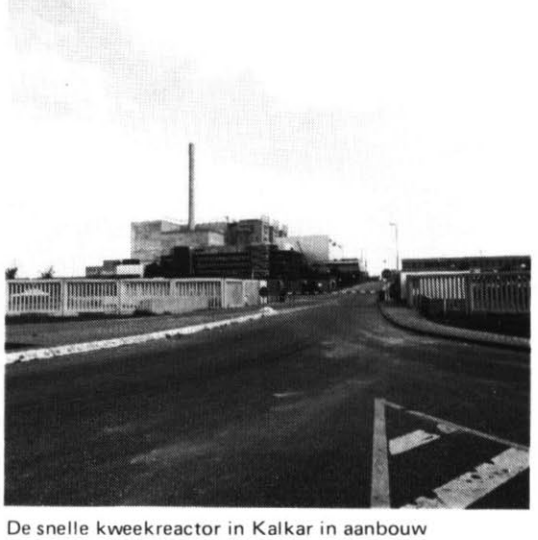
5 Opdracht
De twee kerncentrales van Nederland, Borssele en Dodewaard, staan beide aan het water: de Westerschelde en de Waal. Leg uit waarom men centrales bij voorkeur aan het water zet.

Afval
Het afval van een kerncentrale ontstaat op twee manieren: de splijtingsprodukten van het uranium en de materialen om de splijtstofelementen heen die door de intense radioactieve straling in de kernreactor zelf radioactief zijn geworden.
De brokstukken van het uranium blijven binnen de splijtstofelementen waarin het uranium verpakt zit. Ze komen pas vrij in de opwerkingsfabriek (zie blz. 86).
Een bijzondere plaats in het afval neemt het plutonium in, dat in elke centrale gevormd wordt. En wel om twee redenen:
– plutonium is zwaar giftig door zijn radioactiviteit
– plutonium kan zelf gebruikt worden als kernbrandstof (en overigens ook als grondstof voor kernbommen),
^{239}Pu komt in de natuur niet voor.
Als een neutron doordringt in de kern van een ^{238}U-atoom gaat dat atoom over in ^{239}Pu onder uitzending van twee bètadeeltjes. In Kalkar, net over de grens bij Nijmegen, is een kweekreactor in aanbouw. Deze reactor is bedoeld om tijdens het splijten van ^{235}U – dus tijdens het leveren van elektriciteit – extra veel ^{239}Pu te vormen. Men hoopt op die manier nieuwe kernbrandstof te kweken.

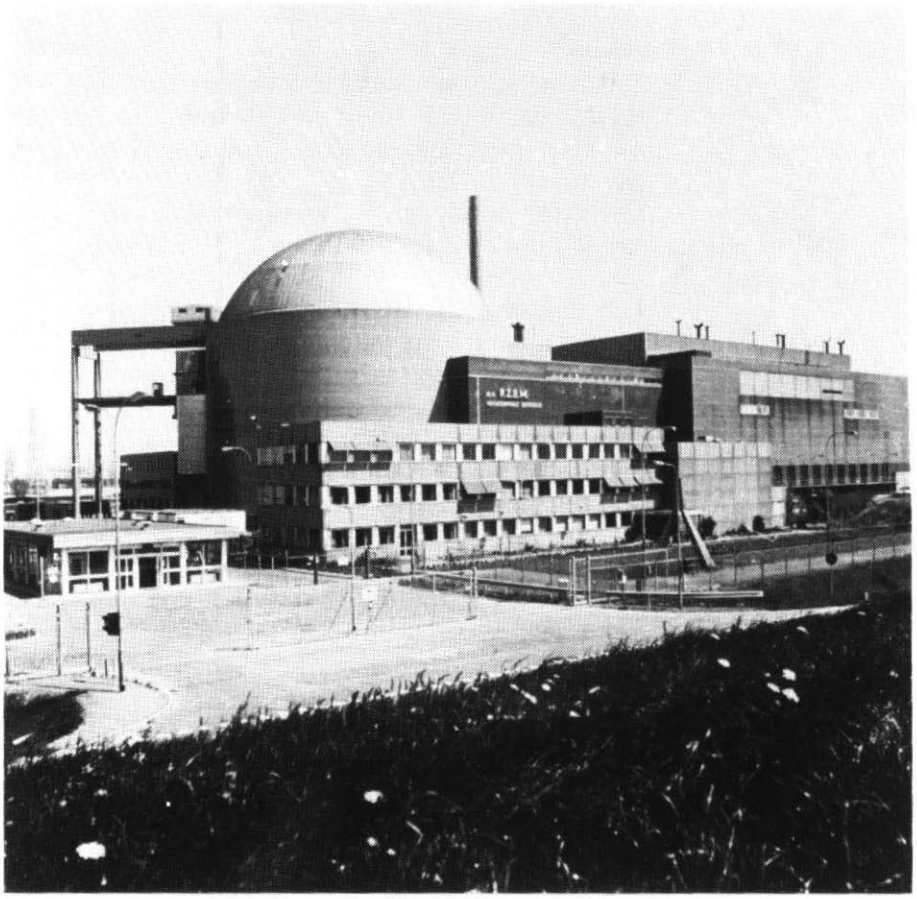


De vorming van plutonium in een kweekreactor




De snelle kweekreactor in Kalkar in aanbouw

De materialen rond de splijtstofstaven kunnen radioactief worden, omdat ze een neutron in de kern invangen.
De aldus gevormde radioactieve stoffen komen gedeeltelijk vrij bij schoonmaakwerkzaamheden en reparaties in de kernreactor.
Rond de splijtstofstaven komen enkele radioactieve gassen vrij, o.a. tritium (^{3}H), Krypton (^{85}Kr) en Xenon (^{133}Xe en ^{135}Xe). Via filters worden de afvalstoffen zoveel mogelijk uit de lucht en het koelwater weggehaald voordat de ventilatielucht uit de schoorsteen van de centrale verdwijnt.



De kerncentrale van Borssele (Zeeland)

Het radioactieve afval dat in een jaar wordt verzameld in de kerncentrales van Dodewaard en Borssele en ook van ziekenhuizen, laboratoria werd tot 1982 verzameld bij het Energiecentrum Nederland in Petten en vandaar naar een schip gebracht, dat het ten westen van Spanje in de oceaan stortte. Daartegen zijn intensieve acties gevoerd o.a. door Greenpeace, die met rubberboten het storten van het afval probeerde te verhinderen.
Vanaf 1983 wordt het afval bovengronds opgeslagen in afwachting van een definitieve oplossing voor het opbergen van radioactief afval.

Actie van Greenpeace tegen het storten van radioactief afval in zee

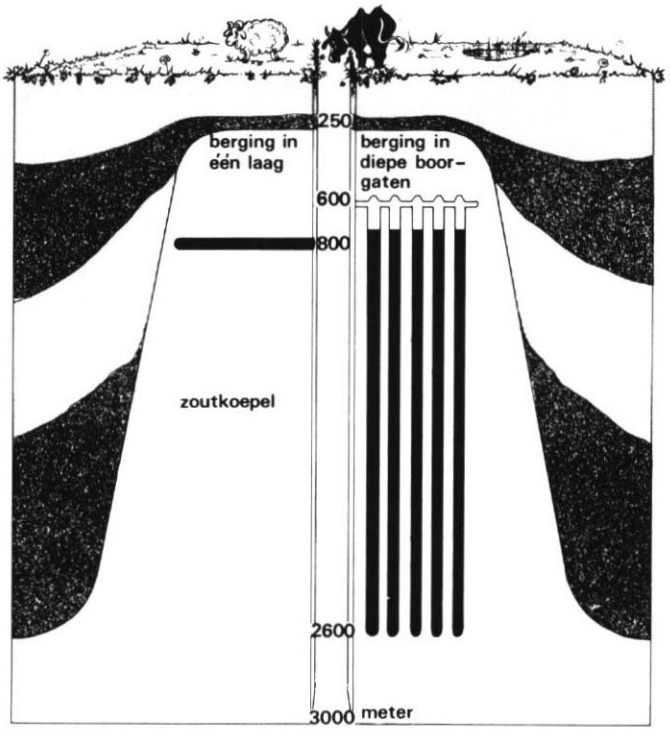
Enkele krantekoppen over het opslaan van radioactief afval

De problemen van het verwerken van hoog-radioactief afval, dat bij het opwerken van verbruikte splijtstofelementen vrijkomt, zijn nog groter. Vanwege de warmte die bij het radioactieve verval van de afvalstoffen vrijkomt moet het voordurend, gedurende 200 à 300 jaar gekoeld worden. In die tijd vervalt het grootste deel van de splijtingsprodukten met een niet al te lange halveringstijd. Die maken het grootste deel van het kernsplijtingsafval uit – en zorgen voor het grootste deel van de warmteproduktie.

De stoffen met een lange halveringstijd, zoals plutonium 24 000 jaar, blijven echter nog duizenden jaren gevaarlijk. Daarom moet het kernsplijtingsafval opgeborgen worden op een plaats waar het gedurende duizenden jaren niet weg kan. Men denkt erover het afval in glas te verwerken en dan in zoutkoe-

Demonstranten protesteren in Onstwedde (Gr.) tegen plannen voor het opslaan van radioactief afval in zoutkoepels in Groningen en Drente

pels ondergronds op te slaan. Zoutkoepels bevinden zich onder andere in Noord-Nederland. Men verwacht dat deze zoutkoepels gedurende miljoenen jaren op hun plaats zullen blijven.
Opgeborgen in zoutkoepels zou het grondwater niet bij het kernafval kunnen komen. De meningen over de veiligheid van het opslaan van kernafval in zoutkoepels zijn overigens verdeeld.



Opdrachten

6 Leg uit waarom radioactief afval met een korte halveringstijd wel gekoeld moet worden en een even grote hoeveelheid radioactief afval met een lange halveringstijd niet.

7 Een kerncentrale van 1000 MW heeft per jaar ongeveer 30 000 kg verrijkt uranium (zie blz. 85) nodig. Dat bevat 3% ^{235}U.

a Hoeveel kg ^{235}U is dat?

Daarvan wordt 600 kg in een jaar verspleten (d.w.z. door splijting verbruikt). In het afval vindt men 900 kg splijtingsprodukten en 300 kg plutonium.

b Hoe kan je aan deze hoeveelheden zien dat er behalve ^{235}U ook een deel van de uit het ^{238}U gevormde plutonium is verspleten?

Na opwerking kan een groot deel van het uranium en plutonium weer gebruikt worden. Er blijft 1100 kg kernsplijtingsafval over dat opgeborgen moet worden: 930 kg splijtingsprodukten (15 kg plutonium, 15 kg ^{235}U en 140 kg ^{238}U), dat gebonden aan oplosmiddelen en verpakt in vaten een volume van 5,5 m^3 heeft en vanwege de grote warmteproduktie (8 kW/m^3) gekoeld moet worden.
Bovendien ontstaat er door besmetting van fabrieksonderdelen, handschoenen, kleding en dergelijke nog 22 m^3 hoog-radioactief afval, 9 m^3 middel-radioactief afval en 6 m^3 laag-radioactief afval.

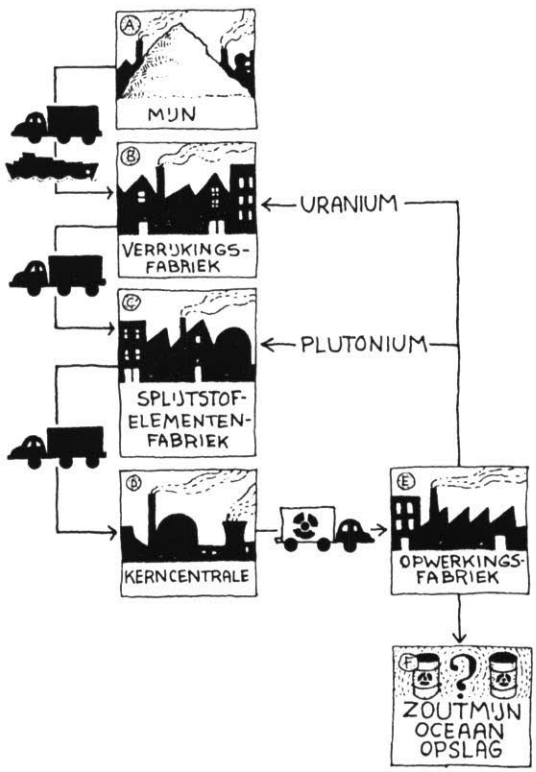
c Hoeveel ruimte zal er minstens nodig zijn voor de opslag van al het afval dat in en rond een kerncentrale geproduceerd wordt tijdens de (geschatte) levensduur van een kerncentrale (25 jaar)?
(Geen rekening houden met het afval dat bij de afbraak van de centrale vrijkomt)

d (Voor de echte rekenaars)
Hoe groot is het rendement van deze centrale?
Je kunt daarvoor de volgende tussenstappen maken.
1 Bereken de hoeveelheid aan splijtingswarmte (zie blz. 75) die per jaar vrijkomt.
2 Bereken hoeveel joule elektrische energie de centrale per jaar produceert. Veronderstel daarbij dat de centrale 80% van de tijd op vol vermogen draait en het andere deel van de tijd stilligt (reparaties en onderhoud of minder vraag naar elektriciteit).
3 Bereken het rendement van de centrale.
(Gegevens ontleend aan de nota *Energiebeleid 1980*, deel 3).

Meer dan alleen de centrale...
Om de energie van uranium in een bruikbare vorm om te zetten, moet er heel wat gebeuren:

– winning van uraniumerts
– het uraniumoxide uit erts halen
– uraniumoxide omzetten in uranium
– transport naar de verrijkingsfabriek

DE SPLIJTSTOF CYCLUS



Brown Boveri staakt bouw kerncentrales

DUSSELDORF (DPA) — Het Zwitsers/Duitse bedrijf Brown Boveri stopt voorlopig met de bouw van kerncentrales. Met het oog op de steeds harder wordende concurrentie laat de onderneming de activiteiten op dit gebied enige tijd rusten. Maar volgens de directie trekt het bedrijf zich niet geheel uit de bedrijfstak terug. Voor de reeds gebouwde installaties zal Brown Boveri nog zeker twintig tot dertig jaar beschikbaar moeten zijn.

Volgens president-directeur Herbert Gassert wordt op het ogenblik in de wereld ongeveer de helft van de capaciteit voor de bouw van kerncentrales niet gebruikt. Het gevolg is dat de internationale concurrentiestrijd om elke grote opdracht steeds feller wordt.

De bouwcapaciteit is in het leven geroepen in een tijd waarin nog een toeneming van het stroomverbruik met 7,2 percent per jaar werd verwacht. Recessie en oliecrisis hebben de vraag naar energie sterk verminderd. Op het ogenblik neemt de vraag naar electriciteit met slechts twee tot drie percent per jaar toe. Daardoor wordt de bouw van nieuwe kerncentrales aanzienlijk vertraagd.

- verrijken van het uranium: verhogen van het percentage ^{235}U van 0,7% naar ongeveer 3%
- splijtstofelementen maken
- transport naar de kerncentrale
- bouw en onderhoud van de centrale, later moet die weer afgebroken worden
- het opwerken van gebruikte splijtstof in een opwerkingsfabriek
- transport en opslag van afval in zoutkoepels of dumpen in zee
- transport van de elektriciteit naar de gebruikers

Voor al deze activiteiten zijn grondstoffen en energie nodig. Bij het vergelijken van verschillende manieren van energieomzetting (in bijvoorbeeld een kolen- of kerncentrale of met een windmolen), moet je met deze 'energie- en grondstoffenkosten' van het hele proces rekening houden.

Winning

De brandstof voor een splijtingsreactor is de uraniumisotoop ^{235}U. Natuurlijk uranium bevat slechts 0,71% van dit isotoop. De rest is niet splijtbare ^{238}U.

Uranium wordt in de natuur aangetroffen in allerlei gesteenten. Die met de hoogste gehalten noemt men ertsen. Het uranium zit in die gesteenten in de vorm van uraniumoxide, een verbinding van uranium met zuurstof: U_3O_8. De rijke ertsen bevatten ongeveer 0,3% van dit oxide, de arme 0,006 tot 0,001%. Winning is slechts lonend voor erts met 0,1% uranium.

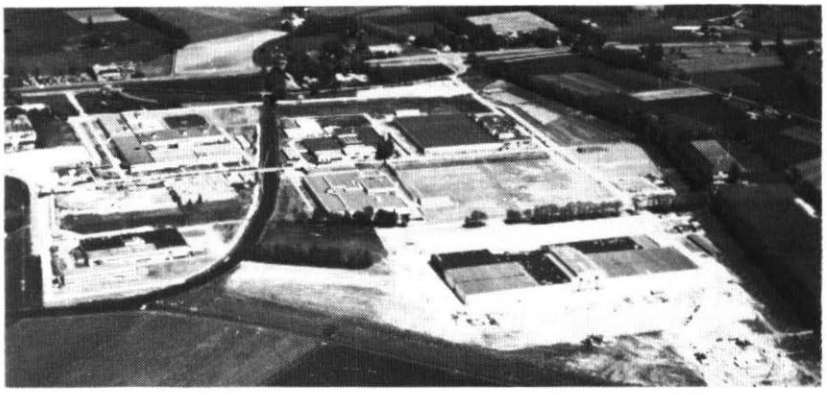
Geschatte uraniumreserves en -voorraden

Landen	reserves + voorraden in 10^3 ton
Verenigde Staten	858
Canada	895
overige Amerikaanse landen	171
totaal Amerika	2.924
Zuid-Afrika	420
Niger	213
overige Afrikaanse landen	79
totaal Afrika	712
Frankrijk	102
Spanje	19
Zweden	304
overige Westerse landen	79
totaal West-	504
Australië	352
India	53
overige landen Verre Oosten	13
totaal Australië en Azië	418
Totaal	4.558

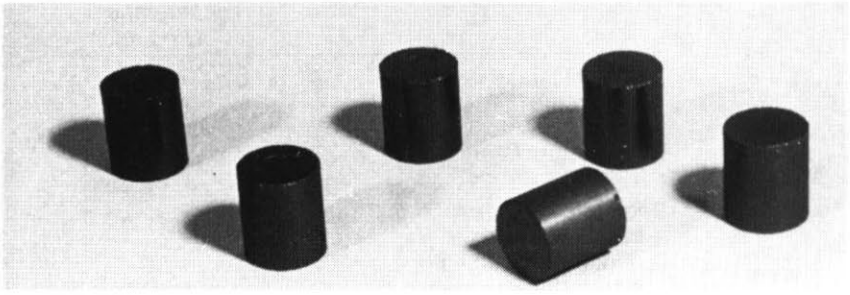
Van de oostblokstaten zijn geen zekere gegevens bekend

Het erts wordt gedolven in open of ondergrondse mijnen, net als steenkool. Door de lage uraniumgehalten moeten aanzienlijke hoeveelheden gesteente verwerkt worden.
De winning van uraniumerts kan gevaar opleveren voor de gezondheid van de mijnwerkers. Met name de inademing van het radioactieve gas radon (een produkt van het natuurlijk verval van ^{238}U), veroorzaakt op langere termijn stralingsziekten.

Verrijking
In de verrijkingsfabriek wordt de concentratie van ^{235}U van 0,7% in het natuurlijk uranium opgevoerd tot 3%. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in massa tussen beide uraniumisotopen. Er zijn op dit moment twee methoden om uranium te verrijken: de *gasdiffusie-* en de *ultracentrifugemethode*. Beide methoden gebruiken een verbinding van uranium met fluor, UF_6, die gasvormig is.
Bij gasdiffusie maakt men gebruik van het feit dat de lichtere $^{235}UF_6$-moleculen iets sneller bewegen dan de $^{238}UF_6$-moleculen. Het is ook mogelijk beide isotopen te scheiden in zeer snel ronddraaiende trommels (een paar duizend omwentelingen per seconde). In Nederland wordt deze ultra-centrifugemethode gebruikt in de verrijkingsfabriek in Almelo. Beide methoden moeten vele malen herhaald worden om tot een noodzakelijke verrijking van 3% ^{235}U te komen. In beide gevallen kost dit veel energie.



De verrijkingsfabriek voor uranium in Almelo (ultracentrifugefabriek)



Splijtstoftabletten

Fabricage van splijtstofelementen
Het verrijkt UF_6 moet daarna omgezet worden in het vaste uraniumdioxide UO_2. In de splijtstofelementenfabriek wordt dit poeder tot tabletten geperst

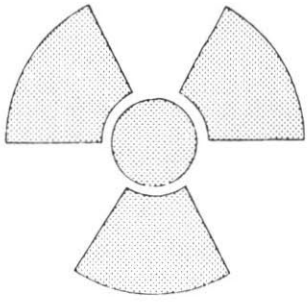
en in lange, dunne buizen van roestvrij staal of zirkoon verpakt. Deze buizen, splijtstofpennen genoemd, worden tot splijtstofelementen gebundeld. Die worden in een kernreactor geplaatst.

Transport
De energie die vrijkomt bij de splijting van uraniumkernen is heel groot in vergelijking met de verbranding van steenkool. Wat het transport betreft, gaat het bij uranium na de raffinage dus om betrekkelijk kleine hoeveelheden te vervoeren splijtstof.

Opwerking
Na een verblijf van ongeveer drie jaar in de (werkende) reactor is het percentage ^{235}U door het splijtingsproces te laag geworden. Er moeten dan nieuwe splijtstofelementen ingebracht worden.
De verbruikte splijtstofelementen zijn sterk radioactief. Ze worden voorlopig opgeslagen in diepe waterbekkens bij de centrale. Het is de bedoeling dat in de toekomst alle verbruikte splijtstofelementen in opwerkingsfabrieken verwerkt gaan worden. Op dit moment verwerken de bestaande opwerkingsfabrieken nog geen verbruikte splijtstofelementen op grote schaal.
In de opwerkingsfabriek moeten de splijtstofelementen in stukken gezaagd worden. De splijtingsprodukten en het overgebleven uranium worden opgelost in kokend salpeterzuur. Uit deze oplossing moet het overgebleven ^{235}U en het, tijdens het splijtingsproces gevormde, plutonium gewonnen worden. De rest is afval, dat voorlopig opgeslagen wordt in gekoelde, roestvrij stalen vaten. In dit afval zit 99% van de radioactiviteit die in de reactor geproduceerd wordt.
Het herwonnen uranium kan weer naar de splijtstofelementenfabriek. Een deel van het plutonium kan gebruikt worden als splijtstof, of voor het maken van kernbommen.
Om het gebruik van plutonium in kernbommen (zie leestekst 5) te voorkomen zijn er voorstellen om het Internationale Bureau voor Atoomenergie (IAEA) in Wenen nauwkeurig toezicht te laten houden op de hoeveelheid geproduceerd plutonium en het gebruik daarvan.

omschrijving	*schatting KIVI/NIRIA*	*schatting Milieu-federatie Groningen*
bouwtijd (jaar)	7	7
reële rente (%)	4	4
belastingfactor (%)	65	60
levensduur (jaar)	25	20
kosten elektr. in ct/kWh:		
kapitaallasten	3,9	6,4
onderhoud, bediening	1,1	1,5
splijtstofcycluskosten	2,9	5,7
totaal (ct/kWh)	7,9	13,6

De kosten van 1 kWh, geproduceerd door een kerncentrale. De meningen van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs (KIVI) en de milieufederatie Groningen lopen sterk uiteen



Op elke bron van radioactiviteit moet dit teken als waarschuwing staan

Door de sterke radioactiviteit van de afvalprodukten moet de hele afvalverwerking in een opwerkingsfabriek met op afstand bediende machines plaatsvinden. Er is gevaar voor lozing van radioactieve stoffen, o.a. plutonium in de atmosfeer.
Dit onderdeel van de 'splijtstofcyclus' is een nog erg onzekere factor.
Er is nog te weinig ervaring met het opwerken van splijtstof op grote schaal.

De afbraak van de centrale
Een kerncentrale wordt na verloop van 20 tot 30 jaar buiten gebruik gesteld.
Met de afbraak van kerncentrales is nog geen ervaring.
De kosten van de afbraak vormen dan ook één van de belangrijkste twistpunten tussen voor- en tegenstanders van kernenergie.
De centrale bevat grote hoeveelheden radioactief materiaal als die buiten gebruik gesteld wordt. Omdat het gaat om radioactieve stoffen met een korte tot middellange halveringstijd (o.a. kobalt-60, halveringstijd 5,3 jaar, zendt onder meer gammastraling uit) moet de centrale 15 tot 20 jaar afkoelen.
Zelfs na die tijd zal de kernreactor met op afstand bediende apparaten gesloopt moeten worden.
Men schat dat het slopen van de kerncentrale 1000 tot 2000 m^3 middel- en hoog-radioactief afval oplevert.
Over de hoeveelheid energie die voor de sloop nodig is, is moeilijk wat te zeggen, maar die zal toch wel aanzienlijk zijn.

Energiebalans
Doordat het hele proces van elektriciteitsopwekking door kerncentrales nogal uitgebreid en ingewikkeld is, levert een schatting van de energiebalans moeilijkheden op. Bovendien is er met opwerking en opslag van radioactief afval nog nauwelijks ervaring op grote schaal, zodat een schatting van de energiekosten daarvan nauwelijks mogelijk is.
De schattingen over de hoeveelheid energie, die nodig is om het hele proces van elektriciteitsopwekking door kernsplijting mogelijk te maken, lopen dan ook nogal uiteen.
Een schatting van de energie-inhoud van een kerncentrale (dat wil zeggen de totale energie die nodig is om een kerncentrale te maken) die in het tussenrapport van de 'Maatschappelijke Discussie Energiebeleid' (1983) staat, komt uit op 10 000 miljoen MJ, dus 10^{16} J. Helaas staat er niet bij hoe groot het vermogen van die centrale is.

Opdrachten

8 Laten we aannemen dat de bedoelde kerncentrale 600 MW aan vermogen heeft en 80% van de tijd dat vermogen levert. Hoe lang moet de centrale werken om zijn eigen energie-inhoud te produceren?

9 Misschien wil je nog meer te weten komen over de kerncentrale.
Schrijf de vragen waarop je een antwoord zou willen hebben op.
Zoek in de bibliotheek een boek over kerncentrales waarin misschien een antwoord op je vragen staat.
Je kunt je vragen ook stellen aan de Samenwerkende Elektriciteits Producenten (SEP) of aan actiegroepen over kernenergie. Je leraar weet wel enkele adressen.

Rapportageopdrachten

10 Schrijf (minstens) 4 dingen over de kerncentrales op die heel nieuw voor je waren en die jij over de kerncentrale aan anderen zou willen vertellen.

11 Een belangrijk punt om kolencentrales, kerncentrales en windturbines met elkaar te vergelijken is de *veiligheid* van de werkers in de centrale, bij de grondstofproduktie en bij de afvalverwerking. En ook de veiligheid van de mensen in de omgeving van de centrale.
- Noem minstens 4 belangrijke veiligheidsmaatregelen die rond uranium en rond kerncentrales getroffen moeten worden.
- Vergelijk de kolencentrale, de kerncentrale en de windturbine met elkaar wat betreft veiligheid.

12 Schrijf andere belangrijke punten op waarop jij de kerncentrale zou willen vergelijken met de kolencentrale en de windturbine.

3-2 WERKGROEP 3: elektriciteit uit de wind

Energie in de wind

Na zonnestraling is wind de meest voorkomende vorm van zonne-energie op aarde. Ongeveer 0,2% van de totale zonne-energie die de aarde bereikt, wordt omgezet in wind. Die wind vertegenwoordigt een hoeveelheid energie die op dit moment ongeveer dertig keer zo groot is als het totale energiegebruik in de wereld!

De Hollandse molen, oerdegelijk maar met een laag rendement. Een Hollandse molen met een wieklengte van 12 m heeft een vermogen van ongeveer 40 kW.
Een moderne molen met even grote wieken (maar veel sneller draaiend) kan zo'n 400 kW vermogen leveren

De beperkingen van het gebruik van windenergie

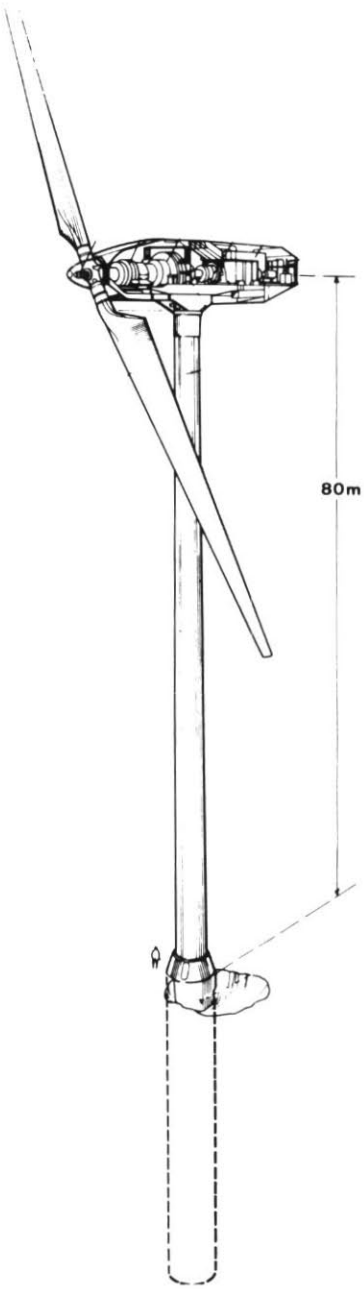
De energie van de wind zit in de beweging van de lucht. Een molen haalt de energie uit de lucht door de lucht een beetje tegen te houden.
Hoeveel vermogen (energie per seconde) de molen uit de lucht haalt, hangt af van:

1 de bewegingsenergie van een bepaalde hoeveelheid (bijvoorbeeld 1 m^3) lucht. Die hoeveelheid hangt af van de windsnelheid: als de windsnelheid 2 maal zo groot wordt, wordt de bewegingsenergie 4 maal zo groot. De bewegingsenergie hangt ook nog af van de massa (de formule voor bewegingsenergie is $\frac{1}{2}\ m\ v^2$), maar de massa 1 m^3 lucht dicht bij het aardoppervlak wijkt nooit veel af van 1,2 kg.
2 de hoeveelheid lucht die langs de wieken stroomt. Die is afhankelijk van de

oppervlakte van de draaicirkel van de wieken én van de snelheid waarmee de lucht langs de wieken stroomt. Als de windsnelheid verdubbelt, zal er ook tweemaal zoveel lucht langs de wieken stromen.

3 van het rendement van de molen: hoeveel energie van de totale hoeveelheid energie die langs stroomt, haalt de molen uit de wind?

Je kunt daaruit zien dat bij verdubbeling van de windsnelheid de molen 4 x 2 = 8 maal zo veel vermogen uit de wind kan halen: 4 maal vanwege de bewegingsenergie, 2 maal vanwege de hoeveelheid langsgestroomde lucht.



Een ontwerp van een 80 m hoge windturbine met wieken van 40 m lengte

In Den Helder is de windsnelheid op 10 m hoogte gemiddeld 6,9 m/s. Dat is een flinke wind! Toch waait er gemiddeld over een jaar slechts 14 W vermogen door elke loodrecht op de wind opgestelde vierkante meter op 10 m hoogte. Dat is erg weinig. Om veel energie uit de wind te halen zijn dus windturbines met hele grote wieken nodig. Voor een windturbine met een vermogen van 3,25 MW bij Den Helder is een wieklengte van 40 meter nodig. De as van de turbine moet zich dan 80 meter boven de grond bevinden. Op die grote hoogte is de windsnelheid groter dan op de grond. Zo'n molen levert niet altijd 3,25 MW, alleen als er voldoende wind is. Bij een windsnelheid lager dan 5 m/s stopt de turbine. Van 5 tot 14 m/s neemt zijn vermogen toe tot 3,25 MW.
Bij windsnelheden groter dan 22 m/s wordt de molen uit veiligheidsoverwegingen gestopt.
Elektriciteit opwekken met wind heeft dus twee belangrijke beperkingen:

1 Voor grote vermogens heb je grote wieken nodig vanwege het lage vermogen per vierkante meter.
2 De windsnelheid kan variëren van 0 tot stormkracht.
Omdat het geleverde vermogen sterk afhankelijk is van de windsnelheid varieert het afgegeven vermogen ook sterk.

Het maken van grote wieken betekent dat je stevige torens moet maken die ook bij flinke storm blijven staan. Dat maakt de molens duur.
Het zeer wisselende aanbod is eigenlijk het grootste probleem bij het gebruik van windenergie voor het opwekken van elektriciteit. Iedereen wil elektriciteit gebruiken op het moment dat hij het nodig heeft. Maar de wind waait niet altijd precies op dat moment.
De wind kan je niet opslaan, elektriciteit ook niet in grote hoeveelheden (wel een beetje in accu's).

Opslag van windenergie

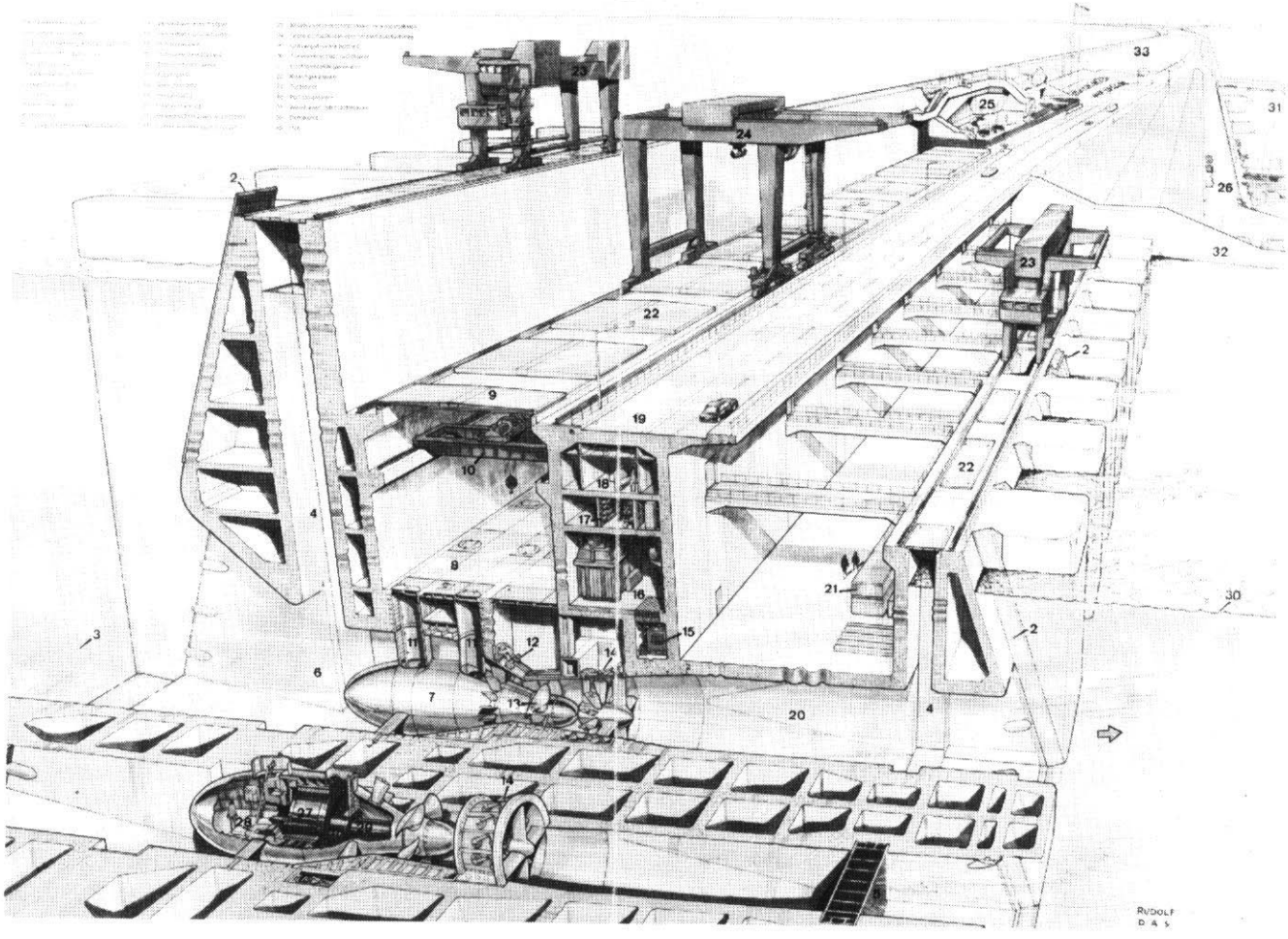
Nu is er in principe een aantal mogelijkheden om de sterke wisseling in aanbod van stroom door windmolens op te vangen:

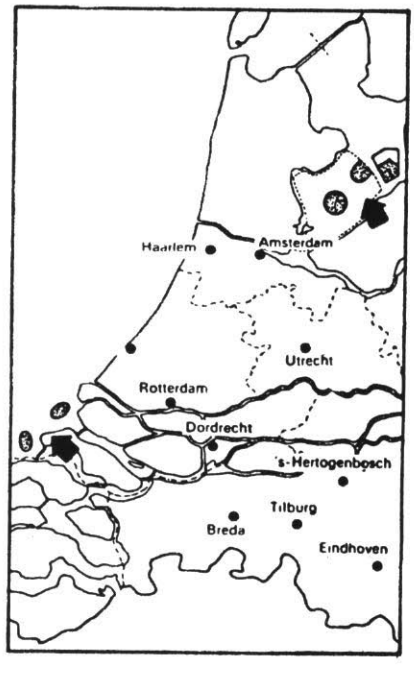
1 Als de wind niet waait, wordt de stroom geleverd door een gewone elektrische centrale. Dat is duur, want dan moeten er behalve windmolens ook reservecentrales gebouwd worden die dus maar een deel van de tijd draaien.
2 Als de wind waait moet er extra veel elektrische energie gebruikt worden. Elektrische boilers zouden dan moeten aanslaan, wasmachines zouden dan moeten draaien en fabrieken die veel elektriciteit verbruiken (bijvoorbeeld aluminiumsmelterijen) zouden op die tijden op volle toeren moeten draaien. Met zo'n systeem voor 'windstroom' is nog geen ervaring.

3 De windenergie moet worden opgeslagen. Daarvoor zijn twee mogelijke systemen:
   a water omhoog pompen als er veel wind is en via turbines naar beneden laten stromen als de wind wegvalt. Dat kan ondergronds in mijngangen of bovengronds in een stuwmeer, ook wel spaarbekken genoemd
   b lucht in ondergrondse opslagplaatsen (bijv. zoutkoepels) persen als er veel wind is. Bij weinig wind kan de samengeperste lucht turbines aandrijven.

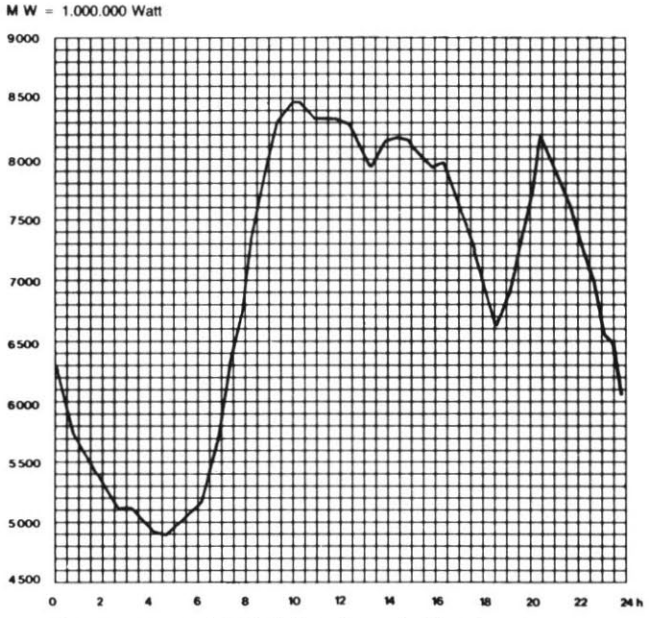
Het plan Lievense

De Nederlandse regering heeft een uitvoerige studie laten verrichten naar de mogelijkheid windenergie op te slaan in een opslagmeer in de Markerwaard (het plan Lievense). Ir. Lievense heeft dit plan verzonnen. Achter 30 m hoge dijken zou het water 23 m boven het water van het IJsselmeer komen te staan. Door een variatie van 7 m in de waterhoogte (tussen 16 en 23 m) in een stuwmeer van 30 km^2 zou energie opgeslagen kunnen worden die door waterturbines van in totaal 1200 MW gebruikt kan worden. De centrale zou een pompturbinecentrale zijn: geschikt voor het elektrisch omhoogpompen van water én het opwekken van elektriciteit uit het omlaag vallende water. Het rendement van zo'n systeem is ongeveer 80%. Dus van de 100% elektriciteit die aan de pompturbines wordt toegevoerd leveren dezelfde pompturbines op een later tijdstip 80% terug voor gebruik ergens in Nederland.
Het is niet nodig dat de windmolens dichtbij het opslagmeer staan. Via een aansluiting op het landelijk koppelnet kan een windmolen in Zeeland elektriciteit leveren voor het oppompen van water in het opslagmeer.
Overigens kan een andersoortige centrale die energie natuurlijk ook leveren.
De pompturbines zullen vooral elektriciteit leveren op de piekuren, als de meeste elektriciteit wordt afgenomen. Dat heeft ook voordelen voor de gewone centrales omdat die met een veel constanter vermogen kunnen draaien. Dat betekent een hoger energierendement voor de centrales. De wisselingen in vraag kunnen vooral door de pompturbinecentrale worden opgevangen.
Over de vraag of een opslagmeer inderdaad gemaakt moet worden en economisch rendabel is, bestaan veel verschillen van mening. Voorlopig probeert men eerst hoeveel windvermogen zonder opslagsysteem in het landelijk elektriciteitsnet inpasbaar is. Men schat dat 1000 MW zonder opslag gebruikt kan worden.





Mogelijke plaatsen voor een opslagmeer



De vraag naar elektriciteit gedurende één etmaal.

Energie uit het opslagmeer zorgt voor elektriciteit als hier veel vraag naar is. Bij weinig vraag en veel wind wordt het water omhoog gepompt

Vragen en opdrachten

1 Hoe zou het komen dat stromend water per m^3 zoveel meer energie bevat dan even hard stromende lucht?

2 Als een 20 kW windturbine bij een windsnelheid van 12 m/s 16 kW vermogen levert (en bijvoorbeeld pas bij 13 m/s aan zijn maximale vermogen van 20 kW zit), hoe groot is dan het vermogen dat de turbine kan leveren bij een windsnelheid 6 m/s? (Zelfde rendement wordt verondersteld.) Denk daarbij aan hoe het geleverd vermogen afhankelijk is van de windsnelheid.

3 Een windturbine, die een maximum vermogen van 3,25 MW kan leveren, levert bij een windsnelheid van 10 m/s 1,2 MW. Hoe groot zou het geleverde vermogen zijn als men in plaats van wieken van 20 m wieken van 10 m had gekozen?
Wat zou het voordeel van wieken nog langer dan 20 m zijn? Wat het nadeel?

4 Waarom is de opslag van windenergie in bergachtige streken makkelijker dan in Nederland? Wat voor een nadeel hebben die gebieden veelal wat betreft de wind? (denk bijv. aan de Alpen, in Wales ligt dat wat anders).

Van wind tot stroom

De stromingsenergie die nodig is om de generator aan te drijven is bij wind direct voorhanden: de stromingsenergie van de lucht.
Daarom zijn er bij het omzetten van windenergie in stroom weinig tussenstappen nodig. (Bij kolen- en kerncentrales wél: er moet eerst stoom geproduceerd worden.)
In theorie kan maximaal 60% van de energie van de wind in elektriciteit omgezet worden. In de praktijk kan dat belangrijk lager zijn door energieverliezen in de generator en in de koppeling tussen de wiekas en de generator. Bo-

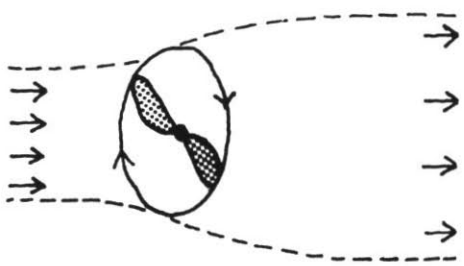
vendien wordt bij grote windsnelheden een deel van de windenergie niet gebruikt omdat de generator maar een bepaald maximaal vermogen kan leveren.

Nieuwe ontwikkelingen
Toch zijn er ontwikkelingen in de wetenschap die het verhogen van het rendement van een windmolen mogelijk maken.

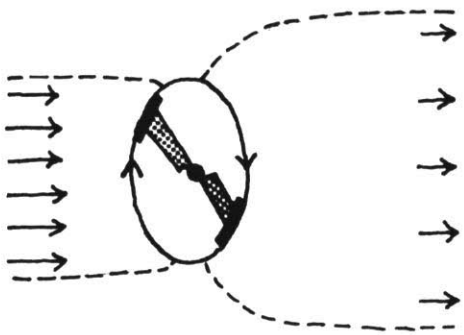
1 *Tipvanes.* De hoeveelheid energie die een molen uit de wind kan halen hangt af van de hoeveelheid lucht die door de draaicirkel van de wieken stroomt.

Experimentele turbine met tipvanes in Hoek van Holland

Hoe groter de draaicirkel dus hoe langer de wiek, hoe meer vermogen de molen kan leveren.
Met *tipvanes* kan men meer lucht door de draaicirkel van de wieken laten stromen. Een tipvane is een vleugeltje dat dwars aan het uiteinde van de wiek staat. Als de wiek gaat draaien, zorgt de tipvane ervoor dat er extra



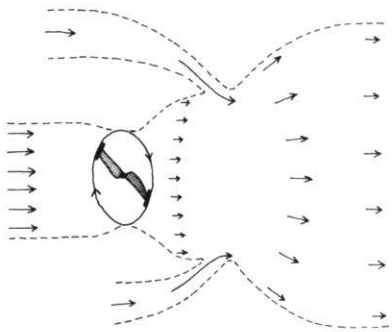
De luchtstroom bij een gewone molen



Tipvanes zorgen voor extra lucht door de molen

lucht door de draaicirkel van de wieken wordt gezogen door een soort draaikolk in de lucht te maken. Het gevolg is dat de molen extra energie toegevoerd krijgt. De eerste molen met tipvanes wordt sinds 1982 uitgeprobeerd in Hoek van Holland.

2 *Het meesleep-effect.* Het rendement van een turbine wordt o.a. beperkt door het feit dat de lucht achter de wieken energie over moet hebben om weg te kunnen stromen (zie blz. 32).
De lucht achter de molen kan de energie daarvoor ook krijgen van de lucht die om de molen heen is gestroomd en dus nog geen energie heeft afgestaan omdat de lucht meegesleept wordt.
Men probeert met kunstgrepen dit effect te vergroten.



Het meesleep-effect: de lucht achter de molen wordt meegesleept door de lucht die door de wieken heen gaat

De opstelling van meer windturbines

In het oude Nederlandse recht komt het 'recht op vrije wind' voor: nabij molens mochten geen andere molens, hoge gebouwen of bomen staan. Een molen kan daardoor minder wind vangen en dus minder arbeid verrichten. Ook bij de moderne windturbines speelt de verstoring van de wind door gebouwen of andere turbines een rol.
Een windturbine moet dus in het vrije, vlakke veld geplaatst worden. Een aantal turbines wat dichter bij elkaar (windturbineparken) staat misschien minder lelijk in het landschap dan overal een alleenstaande turbine. Maar de turbines mogen elkaar niet te veel beïnvloeden.
Daarom mogen ze niet te dicht bij elkaar staan. Men heeft berekend dat de windturbines minstens 10 wieklengten uit elkaar moeten staan. Dan nog krijgt men 20% minder energie per molen vergeleken met een vrijstaande molen. Een windturbinepark heeft een groot oppervlak. Maar eigenlijk alleen de

Een zogenaamde twinmolen. Welk nadeel heeft deze molen? Welk voordeel staat daar tegenover?

plaats van de turbinevoet en de weg naar de turbine worden echt aan het verbruik onttrokken. Door de turbines langs een weg te plaatsen wordt het landgebruik nog verder beperkt. Hoe een aantal 'in lijn' staande turbines eruitziet, zien we op de montagefoto van blz. 97.

Opdrachten

5 Leg uit waarom een turbine in een windturbinepark minder elektriciteit levert dan een even grote vrijstaande turbine.

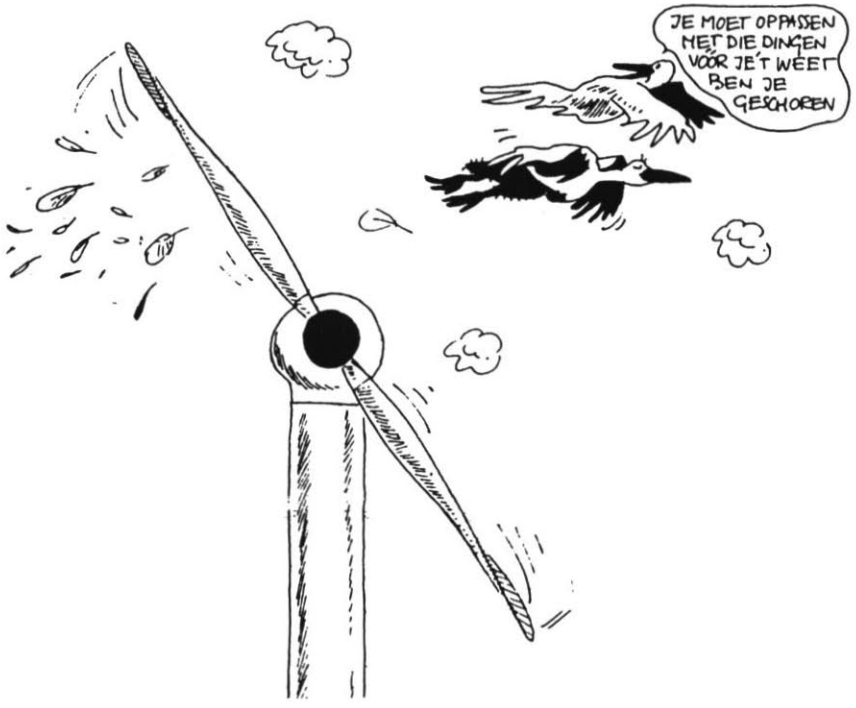
6 Probeer in eigen woorden te vertellen waarom een turbine met tipvanes in principe meer energie kan leveren.

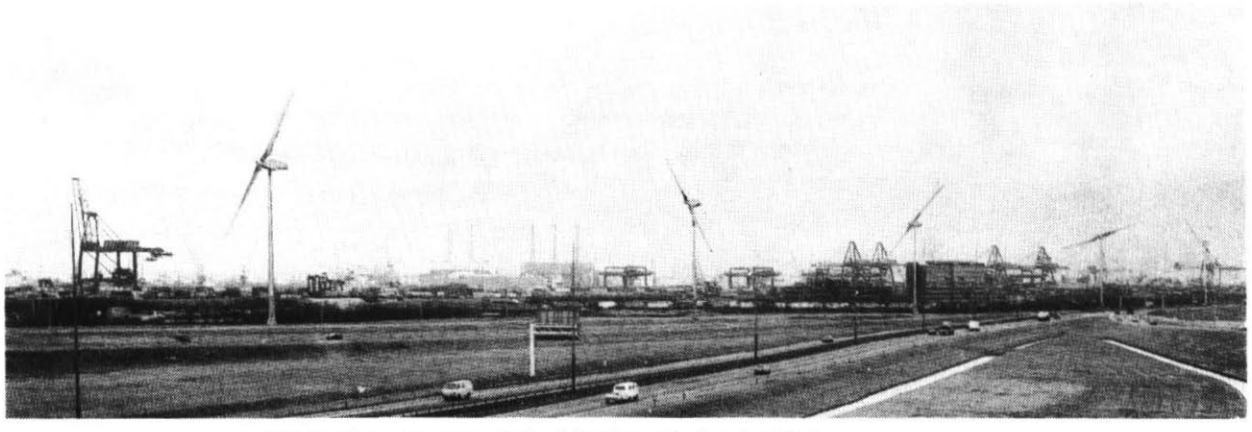
7 Waardoor kan het rendement van een gewone turbine niet meer dan 60% zijn, maar kan het meesleep-effect dat rendement toch groter maken dan 60%? Waar komt die extra energie dan vandaan?

Milieu-effecten

Omdat windenergie gebruik maakt van natuurlijke stromingen op aarde, is er geen probleem met grondstoffen en afval, behalve wat betreft het bouwen en afbreken van de molens en voorzieningen voor de opslag van energie. De windsnelheid boven Nederland zal door de molens wel iets afnemen, maar men verwacht dat er daardoor nauwelijks gevolgen voor het milieu zullen zijn.
Wel kan het draaien van de turbines gevolgen hebben voor de vogels. Als een vogel in de buurt van een molen komt kan die door de wieken geraakt worden. Verder kan het draaien van de wieken de nodige rust voor de vogels

verstoren. De molens zullen vooral door hun hoogte de aanblik van het landschap overheersen. Men spreekt wel van horizonvervuiling. Door fotomontage kan je er een indruk van krijgen.
De turbines zullen enig geluid veroorzaken, maar niet zoveel. Zeker niet te vergelijken met het geluid van een helicopter of een vliegtuig.
Bovendien maken ze alleen geluid als het waait. Dan is er toch al vrij veel achtergrondgeluid. De verwachting is dus dat er weinig van geluidsoverlast sprake zal zijn.
Het draaien van de molens kan radio- en televisie-ontvangst storen.
Daarom moeten de molens niet in de buurt van bestaande zendinstallaties neergezet worden.
Men denkt voor het plaatsen van windmolens aan toch al onrustige, maar windrijke gebieden.

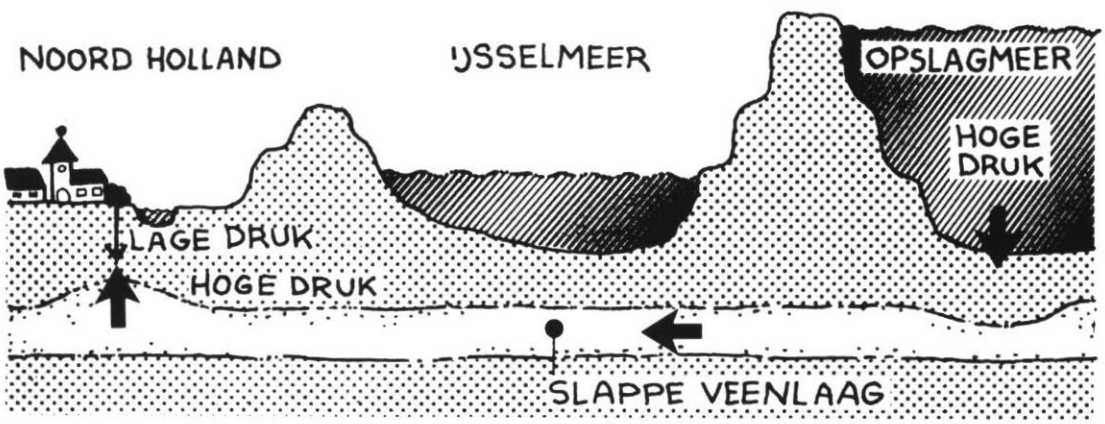




Montagefoto van grote windturbines in een industriegebied

Opslagmeer
Het effect van een opslagmeer voor het milieu zal veel groter zijn dan de windmolens. Naast de ingreep die het aanleggen van het meer zelf met de brede hoge dijken op bijv. het Markermeer zal hebben zijn er nog een aantal niet te ontkomen bij-effecten.

– Er is het gevaar van kwelwater. Dat wil zeggen: door de hoge druk van het water uit het spaarbekken op de bodem kan er water via zachte veenlagen in de bodem van het IJsselmeer elders, bijvoorbeeld in Noord-Holland omhoog stromen of de bodem kan daar omhoog gedrukt worden. Dat kan de hele waterhuishouding en bodemgesteldheid verstoren en kan een gevaar voor de sterkte van de IJsselmeerdijken betekenen.



Via slappe veenlagen onder het IJsselmeer kan de druk op de bodem van het opslagmeer ergens anders de bodem of het grondwater omhoogstuwen

– Het peil van het opslagmeer en het IJsselmeer varieert steeds, meer dan nu het geval is. Dat heeft vooral gevolgen voor de planten die langs de waterlijn groeien en voor de watervogels die juist daar hun voedsel vinden.
– Door voortdurende waterbeweging rond de pompturbines wordt bodemslib opgewerveld. Er bereikt daardoor minder zonlicht de bodem. Bodemplanten zullen bij gebrek aan licht verdwijnen.
– Water uit de onderste lagen van het opslagmeer kan in het IJsselmeer terecht komen. Water uit de diepte bevat minder zuurstof en het aantal planten en dieren zal afnemen.
– Vissers zullen een stuk visgebied missen.

Opdrachten

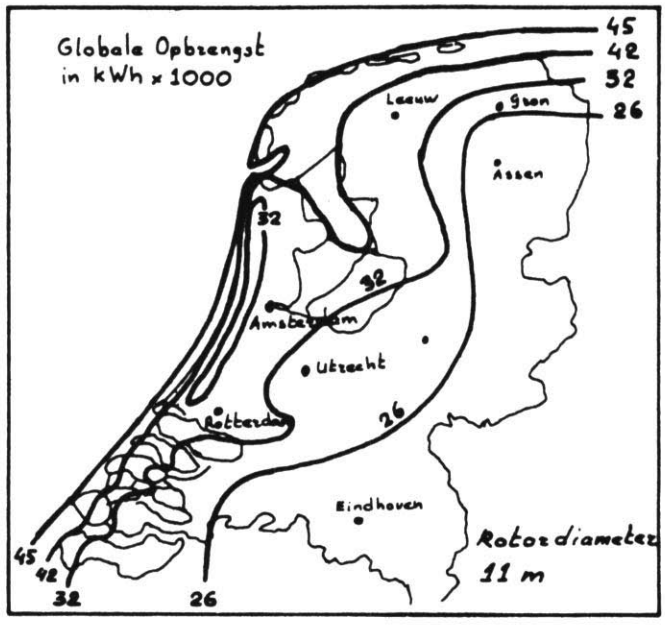
8 Leg uit waarom het milieu-effect van een windturbine in een onrustig gebied zoals het Noordzeekanaalgebied, of het Waterweggebied minder ernstig is dan plaatsing op een rustige plaats, bijvoorbeeld op een waddenzee-eiland.

9 Leg uit waarom het de voorkeur heeft windmolens dichtbij een hoogspanningsleiding te plaatsen.

10 Op vliegvelden heeft men allerlei methoden ontwikkeld om vogels weg te jagen zoals waarschuwingsschreeuwen, de schreeuw van roofvogels en dergelijke. Zouden die methoden ook bij windmolens toepasbaar zijn?

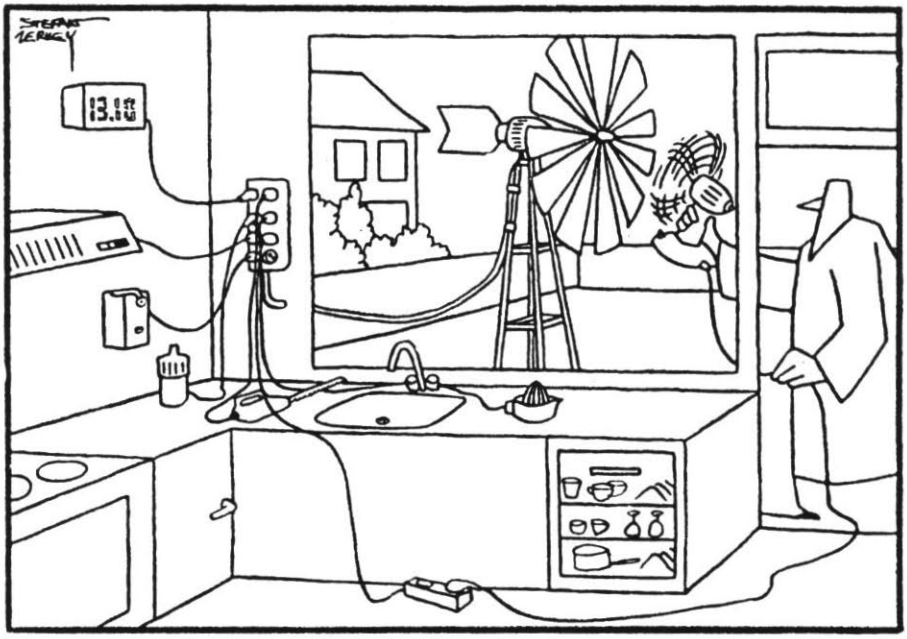
Meer dan alleen de windturbine
Om de energie uit de wind te halen en in bruikbare vorm om te zetten moet er heel wat gebeuren:
- de windmolen moet gebouwd (en later weer afgebroken) worden
- de windmolen moet bereikbaar zijn met een weg
- er moeten maatregelen genomen worden om het wisselvallige karakter van de energielevering door windmolens op te vangen (o.a. windstroom, regeling van aanvullende gasgestookte centrales e.d.)
- als er tot een grootscheepse inschakeling van windenergie besloten wordt, moet er een opslagsysteem voor windenergie gemaakt worden
- de elektrische energie moet naar de gebruiker getransporteerd worden.

Voor al deze activiteiten zijn energie én grondstoffen nodig. Bij het vergelijken van verschillende manieren van energieomzetting (in bijvoorbeeld een kolen- of kerncentrale of met een windturbine) moet je met deze energie- en grondstoffenkosten rekening houden.



Winning en transport
Aan de winning en transport van de wind hoef je niets te doen. Het enige is dat je de turbine op een windrijke plaats moet zetten. Dat kan het beste langs de Nederlandse kust: daar bevat de wind per jaar het dubbele aan energie vergeleken met het binnenland. Door het aantal turbines over veel plaatsen langs de kust te verdelen is de kans dat alle windturbines tegelijk stil staan, kleiner. Als het in Zeeland windstil is, kan het in Groningen nog waaien. Via het landelijk koppelnet kan de elektriciteit getransporteerd worden. Dat betekent dat de noodzaak van opslag van windenergie dan kleiner is.

De bouw en afbraak van de windturbine
Het bouwen van een windturbine kost energie en grondstof, voornamelijk staal en aluminium en ook wel (gewapend) beton, afhankelijk van het type



molen. Bij de afbraak zal het grootste deel van de grondstoffen weer opnieuw gebruikt kunnen worden (aluminium, staal).

Een windturbine zal zo (ook indirect) weinig afval en weinig milieuvervuiling geven.
De bouw van een stuwmeer zal een gigantische hoeveelheid energie kosten vanwege de miljoenen kubieke meters zand die in de dijken gaan zitten en de bouw van de pompturbines.

De experimentele windmolen op het terrein van de KEMA in Arnhem

Energiebalans

Een gebouwde windturbine heeft een bepaalde energie-inhoud: alle energie die nodig is geweest voor het maken van de molen, het winnen en zuiveren van het ijzer en aluminium, het vervoer naar de bouwplaats en dergelijke. Tijdens de levensduur van een molen (20-30 jaar) wordt energie opgewekt. Daarvan moet de energie-inhoud van de windturbine worden afgetrokken. We houden dan de netto-energie over.

Een windmolen levert in één jaar al meer energie op dan het installeren gekost heeft.

Enkele ruwe schattingen moeten daarbij gemaakt worden:

1 De windturbine bevat 40 kg staal en 2 kg aluminium per m^2 verticaal bestreken wiekoppervlak (windturbine op stalen mast).
2 De energieopbrengst is 1500 kWh per m^2 per jaar.
3 De produktie van 1 kg staal vereist 8 kWh, van 1 kg aluminium 70 kWh.

Opdrachten

8 Bereken uit deze gegevens hoe lang een turbine ongeveer moet draaien om zijn eigen energie-inhoud te leveren.

9 Een molen bestaat natuurlijk uit nog meer materialen dan alleen staal en aluminium. Welke zijn daarvan de belangrijkste?
Verhogen die de energie-inhoud van de molen sterk?

10 Misschien wil je nog meer te weten komen over windturbines.
Schrijf de vragen waarop je een antwoord zou willen hebben op.
Zoek in de bibliotheek boeken op over windturbines.
Je kunt ook vragen stellen aan het Energiecentrum Nederland (ECN), de Samenwerkende Elektriciteitsproducenten of actiegroepen rond windmolens. Je leraar weet wel adressen.

Rapportageopdrachten

11 Schrijf (minstens) 4 dingen over de windturbine op die heel nieuw voor je waren en die jij aan anderen zou willen vertellen.

12 Een belangrijk punt om kolencentrale, kerncentrale en windturbines met elkaar te vergelijken is de *veiligheid* van de werkers in en rond de centrales. En ook van de mensen in de omgeving van de centrale.
- Noem minstens 4 belangrijke veiligheidsmaatregelen die er bij een windmolen getroffen moeten worden
- Vergelijk de kolencentrale, de kerncentrale en de windturbine met elkaar wat veiligheid betreft.

13 Schrijf andere belangrijke punten op waarop jij de windturbine met opslagmeer zou willen vergelijken met de kolencentrale en de kerncentrale.

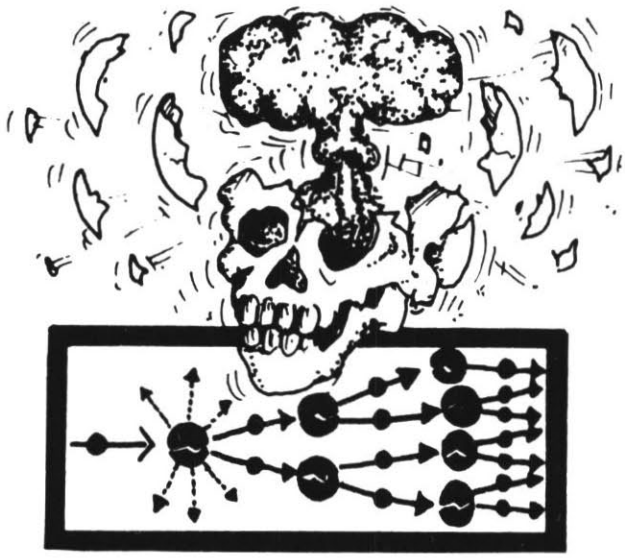
3-5 MENINGEN: kolencentrales, kerncentrales of windturbines

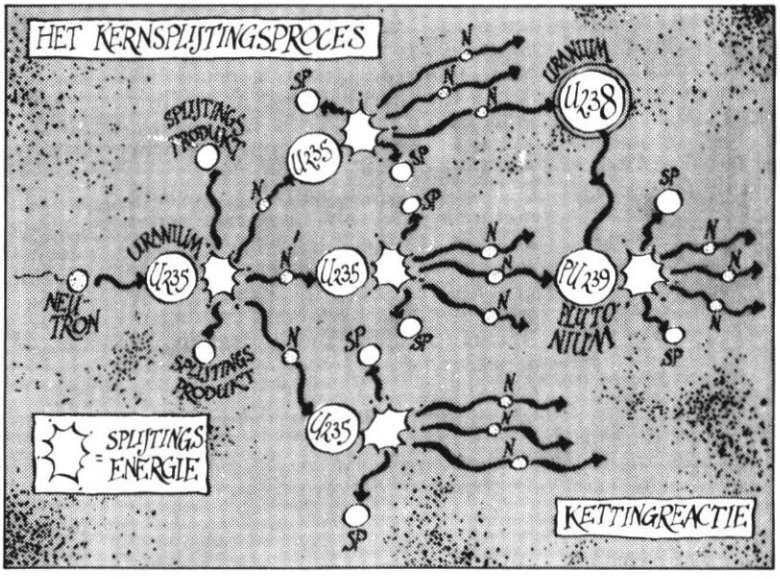
Feiten en meningen
In de discussies over het energiebeleid van de regering en over beslissingen over energie voor de toekomst spelen *feiten* en *meningen* een rol. Over feiten kan je het in beginsel eens worden.

Als Jannie beweert dat 1 kilogram uranium-235 evenveel energie bevat als 200 ton kolen, dan kan je dat nagaan door in boeken te kijken of dat zo is, of als je de boeken niet gelooft, door uiteindelijk zelf de experimenten te doen die het bewijs kunnen leveren. Jannie heeft het dus over een feit.

Als Gerard beweert dat je door kolen te verbranden veel meer vervuiling veroorzaakt dan door uranium te versplijten in een kerncentrale, spreekt hij een mening uit. Wat bedoelt hij met vervuiling? Is CO_2, dat bij de verbranding van kolen vrijkomt ook vervuilend vanwege het broeikaseffect? Wat is 'veel meer vervuilend'? Is zwaveldioxide meer vervuilend dan evenveel kernafval omdat het kernafval in de centrale blijft, maar SO_2 vrij in de lucht komt zodat iedereen het kan inademen? Gerard doet deze uitspraak misschien omdat hij banger is voor zwaveldioxide dat vrij in de lucht zit, dan voor radioactief afval dat veilig opgesloten in zoutkoepels terecht komt. Jij hebt misschien een andere mening en bent banger voor het radioactieve afval. Als je achter jullie verschil van mening komt, kan je elkaar misschien begrijpen en waarderen, overigens zonder het met elkaar eens te zijn.

Meningen kunnen erg verpakt zitten. De uitspraak van Jannie bijvoorbeeld kan gebruikt worden om het voordeel van uranium aan te tonen. Toch vind je nergens op de aarde zuiver ^{235}U. Uranium bestaat altijd uit ^{235}U en ^{238}U. Bovendien bevat uraniumerts maar 0,2% uranium of nog minder. De uitspraak van Jannie kan dus bedoeld zijn om indruk te maken. Het is wel een feit, maar het verzwijgen van andere feiten, bijvoorbeeld dat het uranium in een kerncentrale slechts 3% ^{235}U bevat, kan gebruikt worden om meningen te versterken.





Vergelijk deze plaatjes met elkaar. Ze gaan beide over uraniumsplijting. Het ene plaatje komt uit een boek van de actiegroep 'Stop Kalkar', het andere is van de Stichting Energie Informatie, die vóór kernenergie is

Het is moeilijk een goede discussie te voeren. Toch is het belangrijk dat de discussie, ook bij jullie in de klas, gevoerd wordt. Als je goed naar elkaar luistert, kom je samen dichter bij een oplossing. En bovendien kom je er beter achter wat je zelf het belangrijkst vindt en wat anderen belangrijk vinden.
Oplossingen kunnen niet aan iedere mening rechtdoen. Daarom zal er soms geen goede oplossing zijn, maar misschien is er wel een die de minst slechte is.

Meningen
De volgende stukken gaan over de vergelijking tussen kolen, kernenergie en wind. Ze bevatten stuk voor stuk feiten die meningen moeten ondersteunen.

Je kunt deze stukken gebruiken als start voor de discussie in de klas. Je kunt ze ook gebruiken om meer te weten te komen over feiten en meningen en tegelijk de kennis die je in dit thema hebt opgedaan te oefenen. Daartoe zijn er aan het eind van elk stukje vragen opgenomen. Voor woorden die je niet begrijpt of die je terug wilt zoeken, kun je de onderwerpenlijst achterin gebruiken.

A Gedeelte uit een artikel in de *Haagse Courant* van 11 oktober 1980, vlak voor de blokkade van de kerncentrale van Dodewaard door antikernenergiedemonstranten. (Twee werknemers van Dodewaard: 'Hier binnen voelen wij ons veilig.')

„Elke dag ben ik bang wanneer ik over de dijk rij, met al die bochten. Dat valt van me af zodra ik hier veilig binnen ben".

Dat veilige binnen is de kerncentrale Dodewaard, voor velen juist het symbool van dodelijke onveiligheid. De uitspraak is van een werknemer. De fraaist gelegen stroomfabriek van ons land vormt een zere plek in het gulle land van de Waal. Prikkeldraadhekken, waakhonden en snijdraadspiralen maken de installatie tot een vesting. In de toegangsbrug is een stalen plaat aangebracht die omhoog gaat bij dreigende indringing.

Angst

Erg bang lijken ze niet met de aangekondigde bezettingsactie in het vooruitzicht. „Er waren acht jaar geleden ook al actiegroepen", zegt Folkert Schuurman, die voornamelijk het woord doet, terwijl Herman Evers aanvult. „Toen we hier kwamen wisten we wat er aan vast zat". Is hun standpunt ten opzichte van de kernenergie het zelfde gebleven?

„Dat is niet veranderd. Want wij beschikken over de juiste gegevens. De actievoerders worden gedreven door angst, die ze de mensen aanpraten. Hun verzet tegen de kernenergie komt voort uit hun gevoel. Natuurlijk zijn er risico's. Maar die zijn precies uit te rekenen. Als er sinds het uitvinden van de auto vijf miljoen mensen zijn doodgereden, dan nemen we dat als gemeenschap. De risico's hier zijn veel en veel kleiner. Waar praten we dan over".

Afval

Radioactief afval. „Dat is voornamelijk een politieke moeilijkheid geworden", vinden Schuurman en Evers. „Technisch niet. Het huishoudelijk afval, gebruikte kleding en zo, alles wat licht-radioactief is, wordt in betonnen containers gegoten en onder strenge internationale controle op zorgvuldig uitgezochte plaatsen in de oceaan gegooid. Na dertig tot veertig jaar is de straling te verwaarlozen. Er is net een installatie van vijftien miljoen voor gebouwd.
Ook is er volkomen betrouwbare methode om van hoog-radioactief afval af te raken. Je giet het in glazen bolletjes die je opbergt in roestvrij stalen containers. En die sla je op in geologisch stabiele zoutlagen. Het kan zo nooit met het milieu in aanraking en ligt voor miljoenen jaren veilig. De radioactiviteit ervan neemt erg snel af. Volgens de nieuwste berekeningen heeft het na driehonderd jaar een natuurlijk peil, zoals je dat in uraniummijnen hebt".

Alledaags

Radioactiviteit is een electromagnetische straling, wat licht ook is, en is een alledaags en overal voorkomend verschijnsel. In India en Brazilië zijn streken waar de mensen blootstaan aan een dosis natuurlijke straling die driemaal hoger is dan het maximum aan straling dat werknemers in de centrale Dodewaard mogen ontvangen. Ook onze bouwmaterialen vertonen uiterst geringe radioactiviteit.

„Haast niets is zo grondig bestudeerd als straling", zeggen de twee heren die er dagelijks mee te maken hebben en op hun werk voortdurend worden 'gemeten'.

„Er is alleen nog een groot gebrek aan informatie. De regering zou daar veel meer aan moeten doen".
Bij het woord straling denk je meteen aan kanker. In Nederland sterft vijfentwintig procent er aan. De sterfte als gevolg van straling is moeilijk te bewijzen als het om lagere doses gaat. Door te roken aanvaard je de kans op longkanker. Die is zeven maal groter als de kans op kanker door straling hier in Dodewaard, op z'n ongunstigst voorgesteld".
Straling wordt afgegeven en is dan weg. Het bestraalde is niet 'besmettelijk'. Weerzin tegen bestraald fruit uit dien hoofde is onnodig. Wat straling blijft uitzenden is de radioactieve stof zelf. De halveringstijden brengen vooral aanvankelijk de intensiteit van de straling snel terug.

Over andere energie: „Alternatieve energie is hooguit een middel om te besparen. Grote vermogens levert het nog niet. De besparing moet overigens niet te lang op zich laten wachten. Anders is de belangstelling al gauw dood. Je loopt natuurlijk het gevaar dat bespaard geld wordt besteed aan een grotere auto. Dus dan had het allemaal niet gehoeven".

De energiebewustheid binnen de centrale hoeft niet strijdig te zijn met die er buiten, zo blijkt. „Een kolencentrale voert net zoveel radioactieve stoffen door de schoorsteen af als wij. In kolen zit ook radioactiviteit. Ook de thermische verontreiniging die de waterkoeling van de turbine met zich brengt is gelijk. Echt, kernenergie is voor het milieu een schone energie en verdient een eerlijke kans"

Vragen

1 Welke van de volgende zinnen uit dit artikel bevatten meningen en welke bevatten feiten:
- 'Natuurlijk zijn er risico's. Maar die zijn precies uit te rekenen.'
- 'In India en Brazilië zijn streken waar de mensen blootstaan aan een dosis natuurlijke straling die driemaal hoger is dan het maximum aan straling dat de werknemers in de Centrale Dodewaard ontvangen.'
- 'Ook is er een volkomen betrouwbare methode om van hoog radioactief afval af te raken.'
- 'Alternatieve energie is hooguit een middel om te besparen.'

2 In het artikel komt het volgende feit voor: 'In kolen zit ook radioactiviteit.' Dit feit wordt gebruikt om een mening te ondersteunen. Welke mening is dat?

3 Welke feiten zou jij als antikernenergiebetoger tegen het in 2 vermelde feit inbrengen?

4 Wat is er onvolledig aan het volgende feit dat in het artikel staat: 'Radioactiviteit is een elektromagnetische straling, wat licht ook is.' Waarom wordt dit feit vermeld, denk je?

5 Staan er feiten in het stuk die volgens jou onjuist zijn? Leg uit hoe je die onjuistheid zou willen aantonen.

'Om te huilen' stond onder dit plaatje.
Is de tekenaar tegen windenergie?

B Een gedeelte van een artikel in de *Groene Amsterdammer* van twee leden van de Vereniging Milieudefensie over het plan om windenergie op te slaan in een spaarbekken voor waterkracht.
Gebruik voor woorden die je niet kent of die je nog eens wilt opzoeken de lijst van onderwerpen achterin.

Het plan-Lievense en de kernenergie

De windmolens gekortwiekt?

Het plan van de Bredase ingenieur Lievense om in het IJsselmeer een gigantisch spaarbekken te bouwen, is allerwegen enthousiast ontvangen. Lievense heeft voorgesteld het spaarbekken te laten volpompen door windmolens. Op het eerste gezicht lijkt het dus een ondersteuning te zijn van de alternatieve energiepolitiek, die de milieubeweging voorstaat. Maar is het dat ook? Wij vinden van niet. Het plan past volkomen in het beleid van de SEP, de *Samenwerkende Elektriciteitsproducenten*, dat is gericht op de bouw van grote konventionele centrales. Het spaarbekken kan ook zeer goed dienen om overtollige stroom van kolen- en kerncentrales op te slaan. Van een gedecentraliseerde energievoorziening, zoals de milieubeweging wil, zal bij de uitvoering van het plan-Lievense niets terechtkomen. En omgekeerd, als dat gedecentraliseerde beleid er zou komen, als op een groot aantal plaatsen windmolens aan het elektriciteitsnet worden gekoppeld en het gebruik ervan beter wordt gereguleerd, is een spaarbekken à la Lievense helemaal niet nodig.

Het is niet ondenkbaar dat ondanks de mooie plannen over de plaatsing van windmolens deze uiteindelijk toch te duur worden geacht en uit het plan verdwijnen. Wat dan overblijft is het energiespaarbekken met de waterkrachtcentrale. Ook in zo'n geval is de hele onderneming voor de SEP nog lukratief. Het idee van een spaarbekken (zonder windmolens) past namelijk óók heel goed in de toekomstplannen van de elektriciteitsmaatschappijen, die ons willen laten kiezen tussen kernenergie en kolencentrales. Deze beide typen centrales leveren relatief goedkope energie, als ze tenminste kontinu kunnen draaien. De oplossing van het probleem om èn kontinu te draaien èn tegelijkertijd aan het vraagpatroon te voldoen, kan worden gevonden in een spaarbekken met waterkrachtturbines, zoals een gekortwiekt plan-Lievense: het water wordt 's nachts opgepompt met de elektriciteit die niet nodig is, en overdag wordt met het vallend water stroom opgewekt. Het plan-Lievense zonder windmolens is daardoor dus óók zeer interessant voor de elektriciteitsproducenten, omdat er meer (financieel) rendement uit de kolen- en kerncentrales kan worden gehaald.

Alternatief

Volgens ons is het ook mogelijk om zonder het plan-Lievense windmolens op veel grotere schaal dan nu het geval is in de elektriciteitsvoorziening in te passen. Het spaarbekken voor tijdelijke opslag van windenergie is niet nodig. Windmolens hebben natuurlijk het nadeel dat ze geen stroom leveren als het niet waait. Maar dat nadeel is ook op andere manieren te ondervangen dan via een opslagbekken. Om te beginnen kunnen molens over het hele land worden gespreid. Ten tweede kan de vraag naar elektriciteit worden aangepast aan het aanbod, door apparatuur in te schakelen, wanneer de molens draaien.

CHRIS WESTRA
JACQUELINE CRAMER

Vragen

1 Zijn de schrijvers voor- of tegenstanders van het gebruik van windenergie voor het opwekken van elektriciteit?

2 Is de volgende bewering uit het artikel waar?

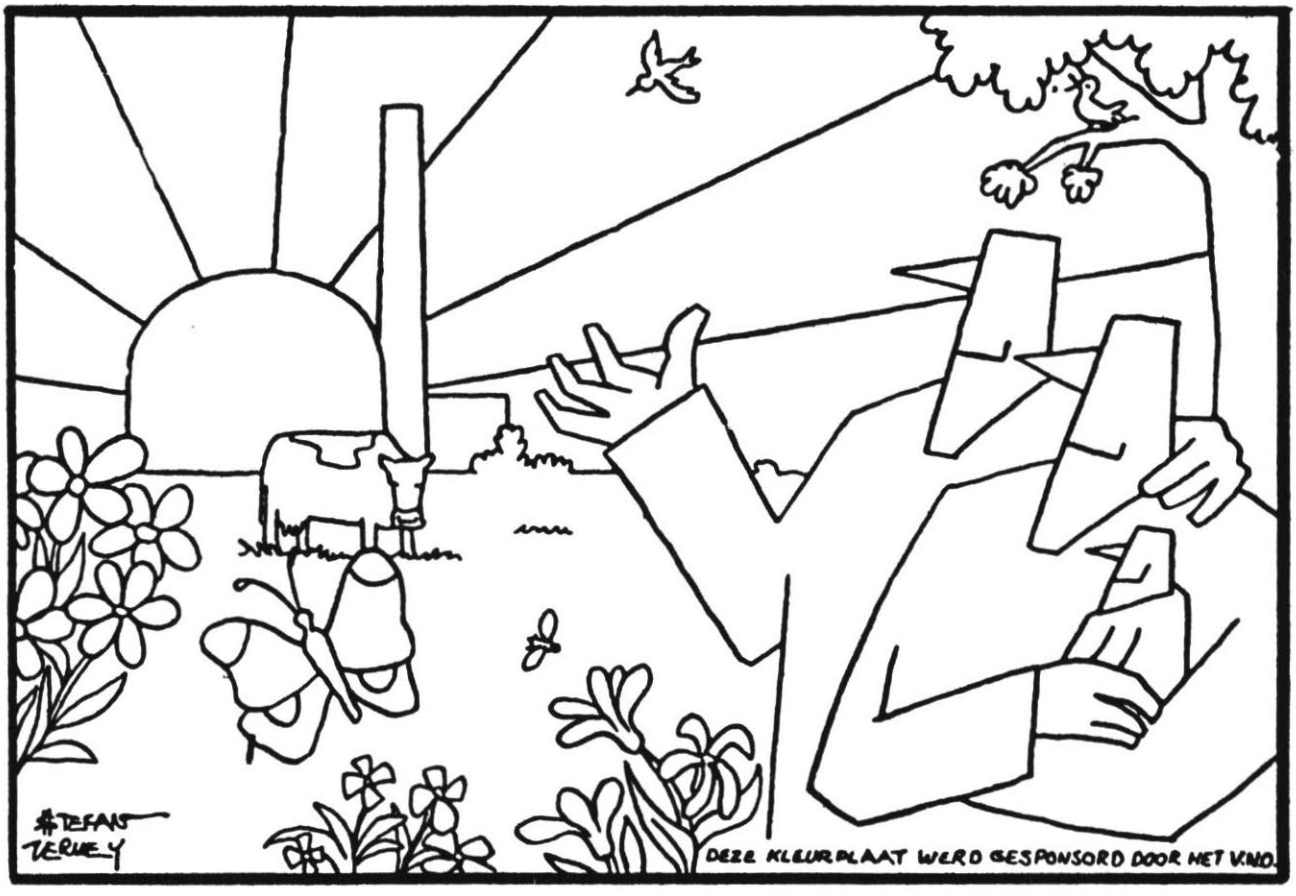
— 'Het spaarbekken kan ook zeer goed dienen om overtollige stroom van kolen- en kerncentrales op te slaan.'

Leg je antwoord uit.

Leg uit dat deze bewering voor de schrijvers een argument is om tegen het plan Lievense te zijn.

3 Welke argumenten zou jij in de rol van 'voorstander van het plan Lievense' aanvoeren met betrekking tot de bewering uit vraag 1.

4 Geef kort aan hoe de schrijvers windmolens in de landelijke energievoorziening willen inpassen.



Een cartoon van Stefan Verwey. Met welke mening spot hij hier?

C Een stukje uit de brochure *Warm lopen voor de toekomst* van de stichting Energie Informatie (artikel 2 van de statuten: 'een objectief beeld van de energievoorziening en de rol van de kernenergie daarin').

Art. 2 van de Statuten: "... een objectief beeld van de energievoorziening en de rol van de kernenergie daarin".

Aantasting van ons milieu ten behoeve van de energievoorziening is een ernstige zaak. Daarom is het goed dat in tal van landen de wetgeving op dit gebied steeds strenger wordt, dat de industrie methoden ontwikkelt om ongewenste lozingen te verminderen of zelfs geheel te vermijden, en dat actiegroepen proberen om onnodige milieuvervuiling te voorkomen.

Met onze huidige kennis is echter niet aan een zekere mate van aantasting van het milieu te ontkomen, welke keuze we ook doen op energiegebied. Bovendien lopen de meningen uiteen over wat acceptabel is: in de discussies daarover blijkt voortdurend dat er grote verschillen in inzicht bestaan.

Juist omdat zoiets de discussie vaak vertroebelt, lijkt het zinvol om bij de belangrijkste energie-grondstoffen en stromingsbronnen aan te geven op welke wijze het milieu wordt beïnvloed. In hoeverre men de ene vorm van aantasting ernstiger vindt dan een andere, zal iedereen voor zichzelf moeten uitmaken.

Kernenergie

Voor kernenergie is relatief zeer weinig uranium nodig, zodat de mijnbouwkundige gevolgen voor het milieu veel minder groot zijn dan bij steenkool. Ook de toepassing lijkt voor het milieu geen problemen op te leveren; de aangevoerde (al dan niet terechte) bezwaren tegen kernenergie betreffen dan ook vooral de eventuele gevolgen van straling voor de gezondheid. Het belangrijkste gevaar voor het milieu zit in het afval, dat gedurende geruime tijd (1000-10.000 jaar) uit het leefmilieu moet worden gehouden. De tot nu toe opgedane (geringe) ervaring lijkt erop te wijzen dat zo'n afvalverwerking veilig en milieutechnisch verantwoord mogelijk is.

Waterkracht

Deze energiebron heeft mogelijk de meest directe invloed op het milieu, omdat bij de aanleg van stuwmeren grote (en vaak vruchtbare) gebieden overstroomd raken. Mede daarom hebben milieugroeperingen in Noorwegen de laatste jaren sterk geageerd tegen de aanleg van waterkrachtcentrales in het noorden van het land.

Het verschijnen van een groot meer kan in de omgeving de dieren- en plantenwereld ook sterk doen veranderen; dat daarbij ook ziekteverwekkers een grotere kans krijgen (malaria in bijv. Suriname, bilharzia bij de Assoeandam) is mogelijk beter te omschrijven als een gezondheids- dan als een milieuprobleem.

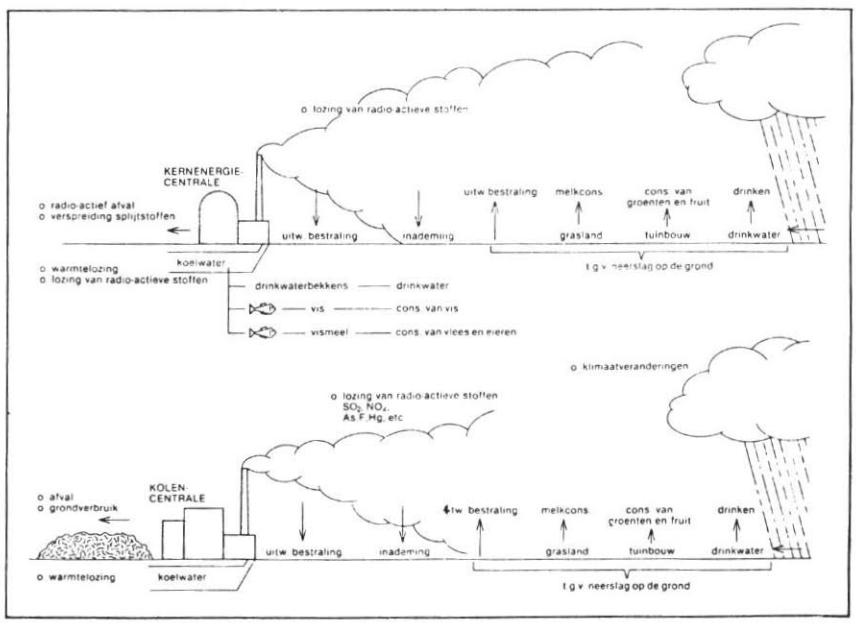
Windenergie

Zeker in het molenrijke Nederland zal het onderzoek naar windenergie worden aangepakt. Maar nu reeds zijn er diverse bezwaren tegen geuit zoals horizonvervuiling en lawaai-overlast. Zelfs het Centrum voor Energiebesparing heeft gewaarschuwd tegen grootschalige invoering van deze energiebron, met name omdat daarbij onder de vogelstand nog veel meer slachtoffers zouden vallen dan nu het gevolg is van het (toch al drukke) verkeer.

Steenkool

Verontreiniging

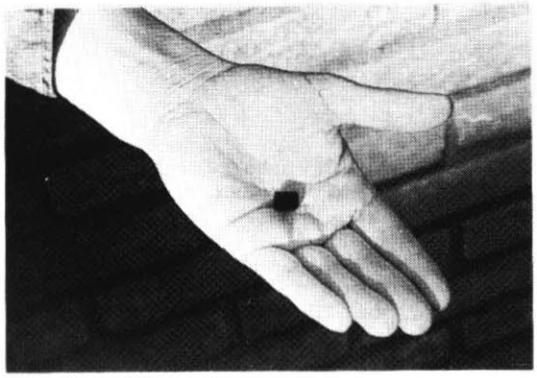
Wanneer het kolenverbruik in Nederland van 1,5 miljoen ton per jaar zou toenemen tot 26 miljoen ton per jaar in het jaar 2000, neemt tegelijkertijd de vraag om toepassing van moderne technieken teneinde milieuverontreinigingen op afdoende wijze te kunnen tegengaan, toe. Steenkool bevat naast koolstof, stikstof, zwavel, chloor en fluor, sporen van zware metalen (chroom, kwik, seleen, cadmium) en radioactieve elementen (uranium, thorium en radium). De concentraties waarin deze stoffen voorkomen zijn afhankelijk van het gebied waar vandaan de steenkool komt.
Naast een aanzienlijke hoeveelheid afval dat bij het verbranden van steenkool in de atmosfeer en op het land achterblijft, wordt het milieu ook bij bovengrondse steenkoolwinning aangetast omdat grote hoeveelheden grond moeten worden verplaatst. De bodemstructuur kan door een dergelijke verplaatsing van grond volledig worden verwoest. Bij de ondergrondse kolenwinning is de schade aan het landschap weliswaar niet zo ingrijpend, maar wel spelen factoren als bodemverzakkingen, mijnafval (20%) en sterk verontreinigd (bodem)water (per ton geproduceerd steenkool tussen de 0,4 en 6,5 m³) een rol.
Bij het transport van steenkool leidt de relatief lage dichtheid en fijne deeltjesgrootte tot stofvorming en verstuiving. Stofvorming kan doeltreffend worden tegengegaan door de steenkool met water te besproeien.



Effecten van een kolencentrale vergeleken met die van een kerncentrale

Vragen

1 Vind je dat de Stichting Energie Informatie erin slaagt de doelstelling 'een objectief beeld te geven' te verwezenlijken? Zo nee, waar vind je dat de Stichting (verstopt) een mening in de aangeboden informatie stopt?
2 Er zijn plannen om waterkracht in Nederland te gebruiken voor opwekking van elektriciteit, met name in de Maas en in de Roer. Denk je dat de informatie die de Stichting Energie Informatie over waterkracht geeft, daarop van toepassing is?
3 In het plaatje over de effecten van een kolencentrale vergeleken met die van de kerncentrale staan alleen de effecten tijdens de werking van de centrale. Hoe verandert de vergelijking als ook de winning van de kolen en het uranium en de afbraak van de centrales bij de vergelijking betrokken worden?



Een splijtstoftablet. Door de splijtstoftablet op een hand te fotograferen wordt op een verborgen wijze een mening ondersteund. Welke mening zou dat zijn?

D Hierna volgen twee stukjes uit de *Volkskrant*, waarin tegenovergestelde meningen bij elkaar worden gezet. Bedenk eens wat je allemaal extra zou willen weten om uit te maken wie er gelijk heeft of met wie je het eens bent.

Vuiligheid in Vlaanderen

De Nederlandse bedrijven die in België storten ontkennen ten stelligste dat ze iets illegaals doen en dat ze verboden chemisch afval tussen het huisvuil en daarmee te vergelijken bedrijfsvuil mengen. Een transporteur, die niet met name genoemd wil worden, zegt dat hij gewoon huisvuil stort. „Maar dat ze in België bezwaar maken tegen die vliegas, dat kan ik me heel goed indenken." En wat zegt ing. S. Prins, directeur van de Vliegasunie, een bedrijf van de elektriciteitsmaatschappijen PNEM, PGEM en PLEM: „Onze vliegas in Rumst is voor het milieu niet belastend. Dat blijkt uit regelmatige controles van het Provinciaal Instituut voor Hygiëne in Antwerpen. Maar dat er in België bezwaren zijn tegen al dat huisvuil, dat kan ik me goed voorstellen."

Wat gebeurt er met de Vlaamse bodem met alleen legale stortingen? Neem nu vliegas. Dit is een produkt van de centrales Buggenum, Geertruidenberg en Nijmegen. De verbrandingsrook van de steenkolen wordt daar gefilterd om luchtverontreiniging te voorkomen. Wat er met die filters wordt opgevangen heet vliegas. Er zitten allerlei giftige zware metalen in, zoals cadmium, en kleine hoeveelheden radio-actief uranium en thorium. Volgens Eddy Stuers in de Rupelstreek zou de vroegere steenbakkerij Heylen een contract met de Nederlandse centrales hebben gesloten voor het storten van 500.000 ton vliegas.

Klopt dat, vragen we aan ing. Prins. „We hebben een contract voor minstens 500.000 ton. We hopen nog enige tijd te mogen doorgaan." Sinds 1980 heeft de Vliegasunie daar al 500.000 ton gestort, zegt hij. En legt omstandig uit dat alles binnen de in België vastgestelde wettelijke perken blijft. Er zitten zware metalen in de vliegas. Maar de uitloogeffecten (het langzaam doordruppelen in de bodem en het grondwater) zijn zeer gering door de dikke kleilaag onder in de put. Hopelijk komt het nog eens zover dat alle vliegas hergebruikt kan worden. Nu al wordt een deel verwerkt in steen of beton, omdat er van vliegas cement gemaakt kan worden. Dat er in Nederland zo weinig vliegas gestort wordt komt omdat de vergunningen zo lang uitblijven.

ONDERZOEK COMMISSIE IN OPDRACHT REGERING:

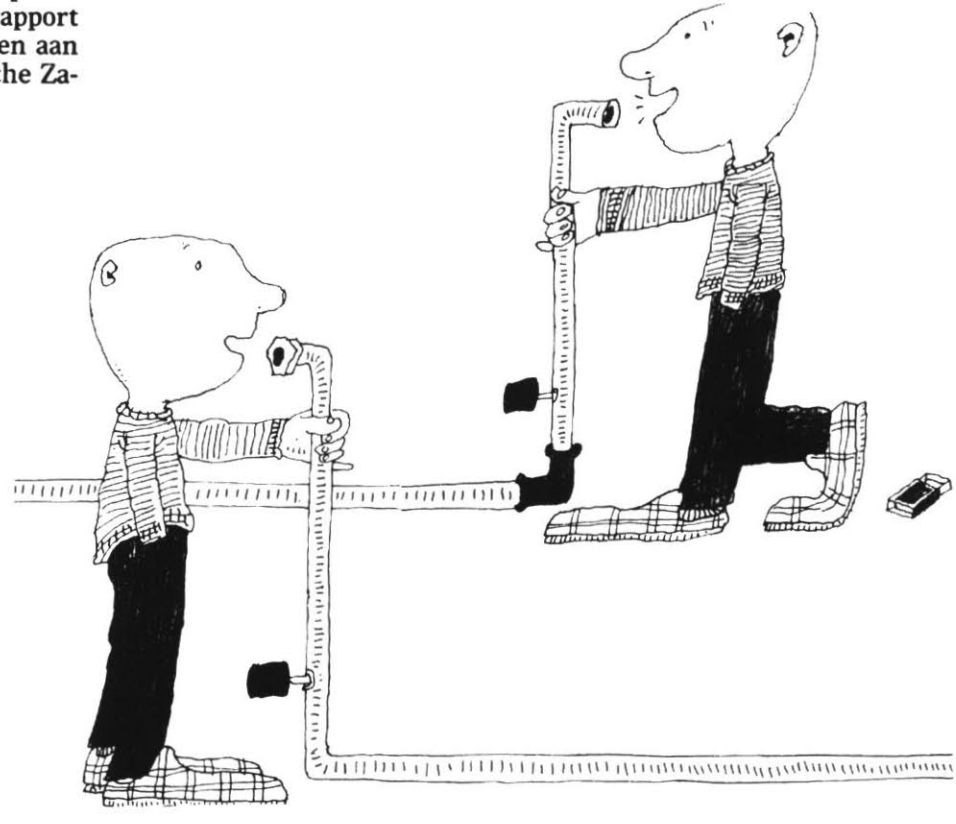
Sluiten kerncentrales zal ruim vijf miljard kosten

Van onze verslaggever

DEN HAAG — Als nu wordt besloten de beide kerncentrales Borssele en Dodewaard te sluiten gaat dat de Nederlandse staat 5 tot 6 miljard gulden kosten. Verder levert sluiting een verlies op van 450 arbeidsplaatsen. Dit schrijft de commissie Bestaande Kerncentrales, onder voorzitterschap van prof. dr ir W. Beek in een rapport dat donderdag is aangeboden aan de minister van Economische Zaken.

Goedkoper

Drs. H. Damveld, die indertijd door de PvdA was voorgesteld zitting te nemen in de commissie-Beek, maar door de toenmalige minister van Economische Zaken Terlouw werd geweigerd, heeft grote bezwaren tegen de uitkomsten van het onderzoek. Uit een studie die hij met behulp van een computer op de Rijksuniversiteit van Groningen heeft uitgevoerd, blijkt dat directe sluiting van de beide kerncentrales juist 100 miljoen gulden goedkoper is dan sluiting over tien jaar.



Niet alleen praten, ook luisteren ...

3-6 AFSLUITING VAN HET THEMA

In dit thema ben je veel te weten kunnen komen over energie en de discussies over de maatschappelijke kanten van energie.
Wat kan jij en wat kan de klas nu verder met deze informatie doen als afsluiting van het thema?
Enkele mogelijkheden

1 Reageren op de discussies die er rond energie bijvoorbeeld in je woonplaats tussen actiegroepen, gemeente of het energiebedrijf worden gevoerd. Je kunt ook reageren op discussies in de krant of standpunten die je in informatiemateriaal van energiebedrijven of maatschappelijke groeperingen hebt gevonden.
   Een groep uit de klas die het niet eens is met het standpunt van het plaatselijk energiebedrijf (dat bijvoorbeeld meer kolencentrales in Nederland wil) zou een brief kunnen schrijven waarin de argumenten tegen kolencentrales worden genoemd.
   Een groep uit de klas die kernenergie dé energie van de toekomst vindt, kan bijvoorbeeld zijn standpunt schrijven aan het Landelijk Energie Komité dat kerncentrales wil tegenhouden.
2 Je kunt met elkaar het *kolen-kern-windspel* van het PLON spelen. In dat spel neem je met elkaar beslissingen over de energievoorziening en ondervind je de gevolgen daarvan.
   Natuurlijk kun je ook buiten de school, nu en later, veel dingen doen met de kennis die je in dit thema hebt opgedaan, deelnemen aan discussies, besluiten zelf een windmolen te maken of een zonnecollector op het dak te zetten, energie besparen (of niet).
   Zo besteed je ook je eigen energie voor de toekomst van jezelf en van andere mensen. Hopelijk kan de natuurkunde jou en de samenleving daarbij helpen.

leesteksten

inhoud

		blz.
Leestekst 1	De kolencentrale	115
Leestekst 2	CO_2 en het klimaat	120
Leestekst 3	Beheerste kettingreactie in een kernreactor	121
Leestekst 4	De kweekreactor	123
Leestekst 5	Een mening over kernenergie en kernwapens: Wie zei: 'Ik wist het niet'?	124

de kolencentrale

In een kolencentrale wordt de verbrandingswarmte van steenkool gebruikt om water te verhitten tot stoom. Die stoom wordt gebruikt om een turbine te laten draaien.
Vroeger gebruikte men geen turbines. In de onderstaande figuur zie je een vereenvoudigd model van één van de eerste stoommachines, gebouwd door Thomas Newcomen in 1712. De machine werd gebruikt om het water uit de Engelse steenkolenmijnen te pompen.

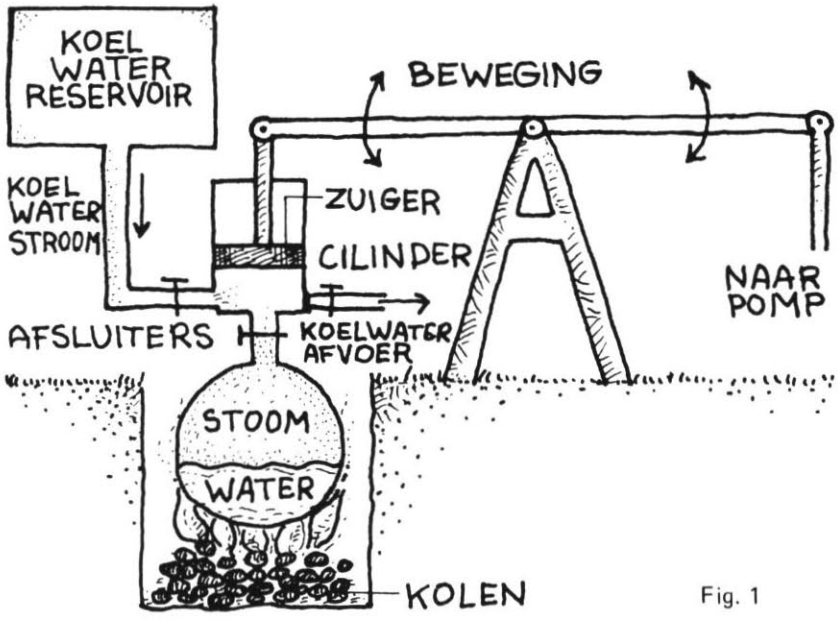


Fig. 1

In deel 2 'Elektriciteit opwekken en transporteren' staat op blz. 30, dat maar een deel van de warmte die bij verbranding vrijkomt, gebruikt kan worden om een machine werk (arbeid) te laten verrichten.
De rest van de warmte moet 'verdwijnen' (beter: afgevoerd worden) om de machine te laten werken.
Die wet komt bij deze stoommachine van Newcomen duidelijk tot uiting. Om de zuiger weer omlaag te laten gaan, moet de stoom eerst condenseren tot water. De warmte die hierbij vrijkomt, wordt afgevoerd door het koelwater. Dus: een deel van de warmte die eerst aan de machine is toegevoerd, wordt even later (door het koelwater) afgevoerd. Deze warmteafvoer is noodzakelijk om de machine te laten werken.

De stoom uit de boiler duwt de zuiger in de cilinder omhoog. Dan wordt de stoomtoevoer afgesloten en er stroomt koelwater de cilinder in. Daardoor condenseert de stoom, en de druk in de cilinder neemt af. De luchtdruk buiten de cilinder duwt de zuiger dan omlaag. De koelwatertoevoer wordt gestopt, de stoomtoevoerkraan gaat open, en het proces begint opnieuw. Zo krijgt de zuiger een op- en neergaande beweging. De huidige stoomturbines zijn het resultaat van een lange ontwikkeling, die begon met deze eerste stoommachine van Newcomen.

Figuur 2 geeft een heel vereenvoudigd beeld van de moderne stoomturbine.

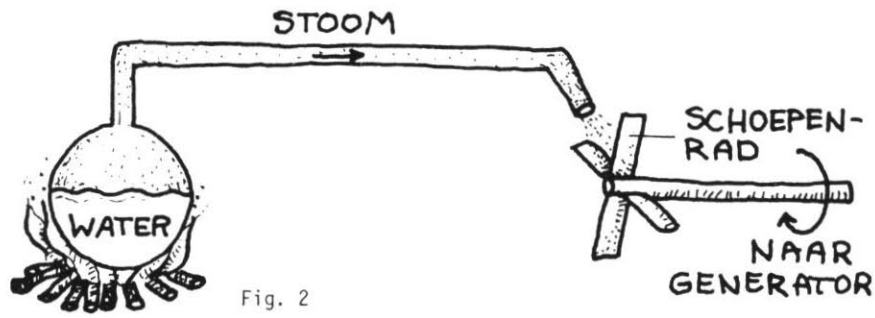


Fig. 2

Het rendement van zo'n turbine is minder dan 1%. De stoomturbines in moderne elektriciteitscentrales hebben een veel groter rendement: ca. 40%. Ze zijn dan ook veel ingewikkelder.
In figuur 3 zie je de combinatie van ketel en boiler in een kolengestookte centrale.

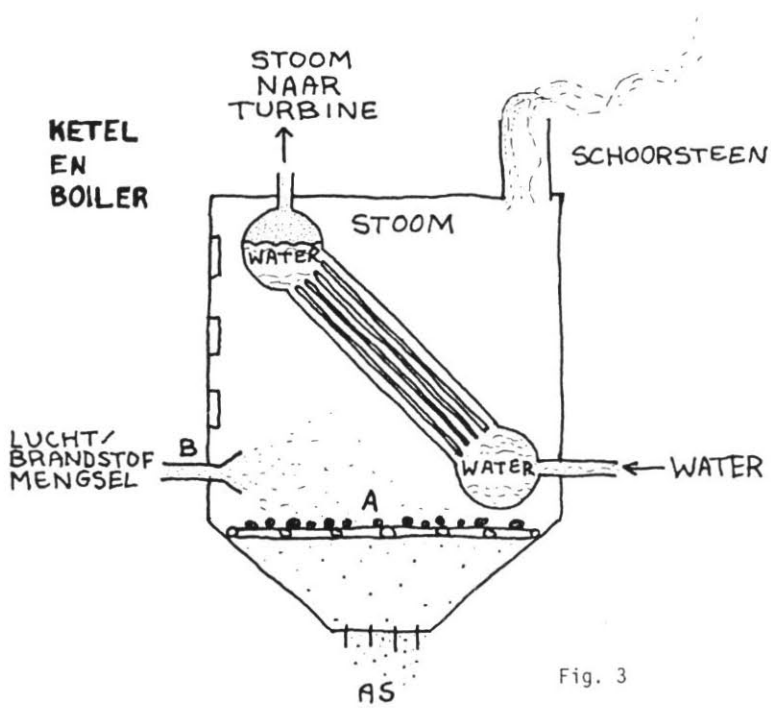


Fig. 3

De vlam of de hete verbrandingsgassen verwarmen het water in de boiler tot stoom.
De steenkool wordt toegevoerd in de vorm van brokstukken via een transportband (A), of wordt in poedervorm in de ketel gespoten (B). De verbrandingsgassen verdwijnen via de schoorsteen naar buiten, en het vaste afval (de as) valt omlaag in bijvoorbeeld spoorwegwagons.
De hete stoom in de boiler heeft een hoge druk. Deze stoom kan ontsnappen naar de turbine. Zo'n turbine zie je in fig. 4.

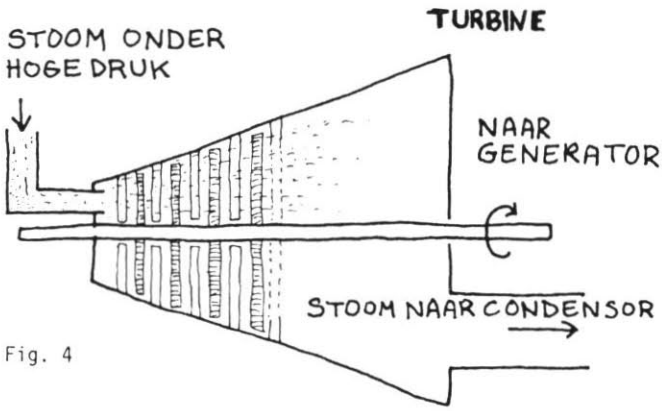


Fig. 4

De breedte van de turbine neemt toe in de richting waarin de stoom beweegt. Tijdens het aandrijven van de schoepenraderen kan de stoom dan uitzetten, waardoor de druk afneemt. Het drukverschil tussen de ingang en de uitgang van de turbine is één van de oorzaken waardoor de stoom door de turbine stroomt.
Als de stoom in de turbine zijn werk gedaan heeft, wordt de stoom in de condensor afgekoeld tot water en teruggepompt naar de boiler. De condensor zie je in fig. 5. Het is een 'warmtewisselaar'. De stoom staat zijn warmte af aan het koude water dat in pijpen door de condensor stroomt.

Op dit moment kunnen er twee vragen bij je opkomen:
- Waarom laten we de stoom uit de turbine niet gewoon naar buiten stromen, en gebruiken we nieuw water om tot stoom te verhitten (zodat we geen condensor hoeven te bouwen)?
- Waarom koelen we de stoom uit de turbine af in de condensor om deze daarna in de boiler weer te gaan verhitten?

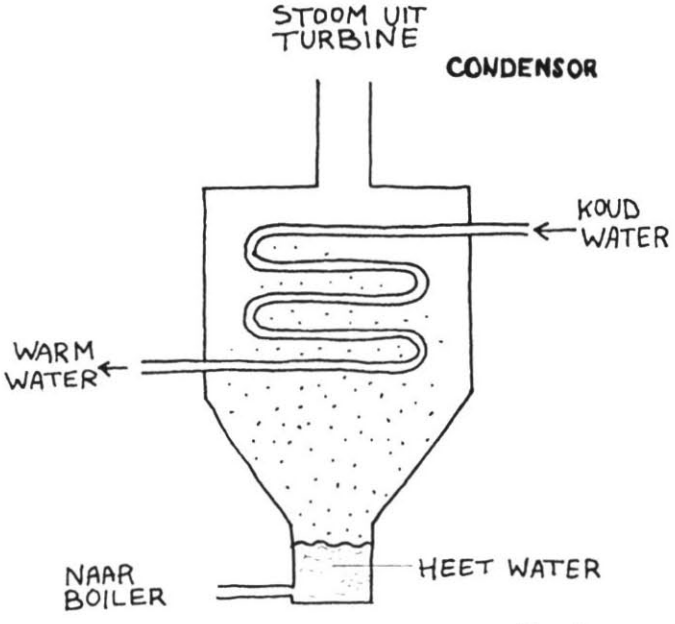


Fig. 5

Er zijn drie redenen om steeds hetzelfde water te gebruiken:
- Als we de stoom laten ontsnappen, komen er grote hoeveelheden waterdamp in de lucht, die het plaatselijke klimaat nadelig zouden beïnvloeden
- Er zou steeds nieuw water in de boiler gebracht moeten worden, en dat kan een probleem zijn op plaatsen waar water schaars is
- Het water dat gebruikt wordt, moet heel zuiver zijn om aantasting van boiler, pijpen en turbine te voorkomen. Het zou erg veel geld kosten om voortdurend water te zuiveren voordat het in de boiler gebracht wordt

Het antwoord op de tweede vraag heeft te maken met de noodzaak van koeling, zoals je ook al tegenkwam bij de stoommachine van Newcomen op blz. 115. Bij de stoomturbine beweegt de stoom vanuit de boiler naar de condensor. Deze beweging drijft de turbine aan. Maar de beweging van de stoom is alléén mogelijk als er een drukverschil bestaat tussen boiler en condensor. De lage druk in de condensor wordt, net als bij de stoommachine, bereikt door het laten condenseren van de stoom.

De verschillende onderdelen als ketel, boiler en condensator worden tot één geheel samengevoegd. Een aantal extra voorzieningen zorgt voor een toename van het rendement tot ongeveer 40%.
Allereerst de verbranding van steenkool (of een andere brandstof). Voor verbranding zijn brandstof en zuurstof (uit de lucht) nodig. De koele lucht wordt voorverwarmd in pijpen, die door de schoorsteen lopen. Dit voorverwarmen van de lucht zorgt ervoor dat de verbranding beter verloopt. De hoeveelheid toegevoerde lucht moet nauwkeurig geregeld worden. Te veel luchttoevoer zorgt voor afkoeling in de verbrandingsketel; te weinig lucht geeft een onvolledige verbranding en de vorming van het giftige koolstofmonoxide.
De verbrandingswarmte zorgt voor de omzetting van water in stoom. Die stoom verzamelt zich bovenin de boiler. Onderweg naar de turbine wordt de

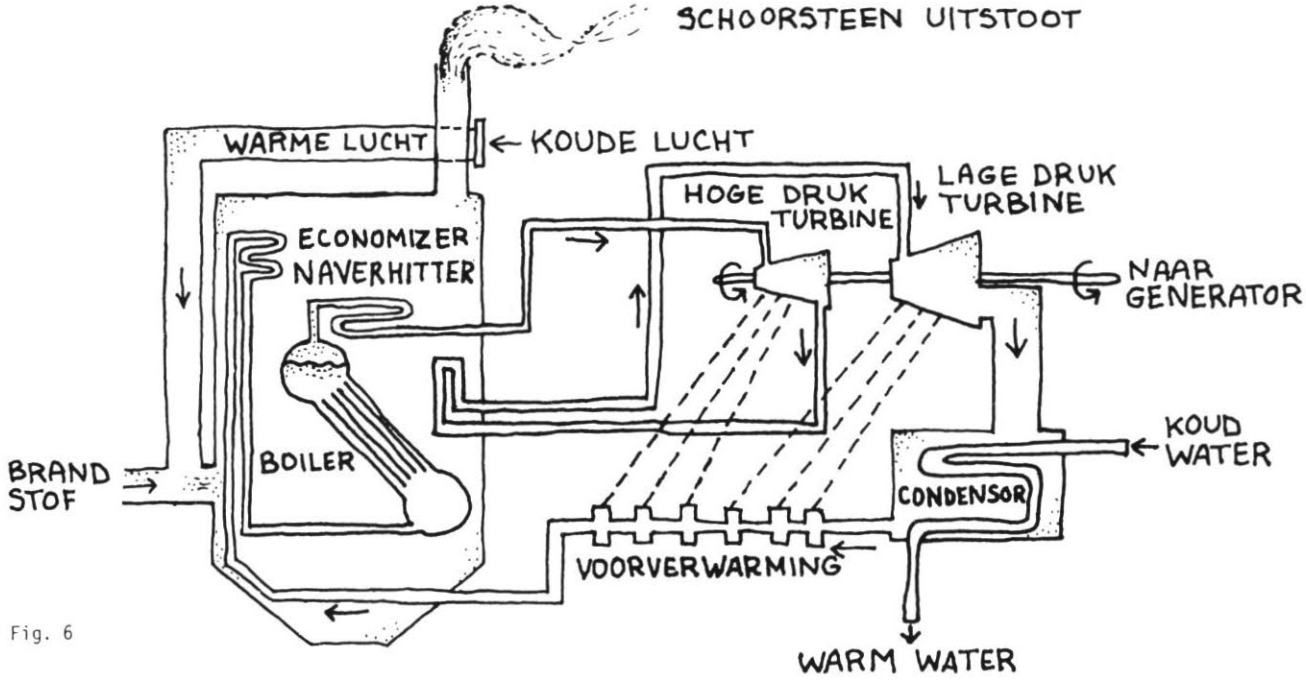


Fig. 6

stoom nog eens extra verhit, waardoor deze sterk in temperatuur stijgt. Dit heeft een belangrijke invloed op het rendement.
De stoom stroomt dan door een paar turbines. De stoom die uit de hogedrukturbine komt, wordt opnieuw verhit en gaat naar de lagedrukturbine.

In de condensor wordt de gebruikte stoom afgekoeld tot water. Toevoer van dit water aan de boiler zou de temperatuur van het daar al aanwezige water nadelig beïnvloeden. Daarom wordt het water vanuit de condensor voorverwarmd met behulp van stoom, die afgetapt wordt van de turbines. Daarna vindt er een verdere voorverwarming plaats in de *economizer*; een stel buizen, die zich vrij hoog in de verbrandingsketel bevinden. Dan pas komt het water weer in de boiler terecht.

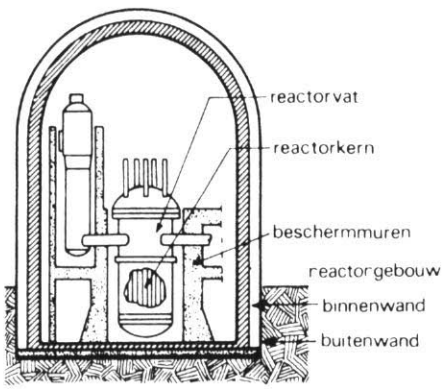
CO_2 en het klimaat

CO_2 is een normaal bestanddeel van de lucht, maar het komt ook voor in alle levende organismen, in bepaalde grondsoorten en opgelost in de oceanen. Een toename van de hoeveelheid CO_2 kan op twee manieren opgevangen worden. Een deel zal in de oceanen oplossen, en een ander deel wordt omgezet door planten. Hiervoor zijn vooral de tropische regenwouden van belang. Groene planten kunnen namelijk, onder invloed van zonlicht, CO_2 opnemen en met water omzetten in voedingsstoffen, waarbij zuurstof vrijkomt.
Het steeds toenemend verbruik van fossiele brandstoffen, in combinatie met een omvangrijk kappen van tropisch regenwoud, zorgt voor een geleidelijke toename van het CO_2-gehalte in de atmosfeer. Sinds het begin van de Industriële Revolutie (ca. 1800) is het CO_2-gehalte van de lucht met zo'n 20% toegenomen.
CO_2-ophoping in de atmosfeer wordt in het algemeen in verband gebracht met een toename van de temperatuur. De temperatuur wordt beïnvloed door de hoeveelheid zonnestraling die de aarde bereikt. Zonnestraling dringt door de atmosfeer en verwarmt het aardoppervlak. Daarnaast straalt de aarde zelf ook warmte uit. De door de aarde uitgezonden warmtestraling wordt voor een deel door de zeer kleine hoeveelheid CO_2 tegengehouden (zoals ook het glas van een broeikas de warmte binnen houdt). Dit wordt het 'broeikas-effect' genoemd. Een toename van CO_2 zou er toe leiden dat een groter deel van de uitgestraalde warmte in de atmosfeer blijft. Daardoor zou de luchttemperatuur kunnen toenemen. Er zijn ook tegengestelde effecten. Stofdeeltjes in de atmosfeer kaatsen een deel van de zonnestraling op zijn weg naar de aarde terug. Een grotere hoeveelheid stofdeeltjes kan juist een afkoelend effect hebben. Dit zou een verklaring kunnen zijn voor het feit dat op het noordelijk halfrond (nog) geen temperatuurstijging gemeten is, maar wél op het zuidelijk halfrond. De lucht boven het noordelijk halfrond bevat namelijk meer stof, onder andere afkomstig van allerlei industriële activiteiten.
Of, en hoeveel de luchttemperatuur zal stijgen als gevolg van een toenemend CO_2-gehalte in de atmosfeer is niet met zekerheid te voorspellen. Daarvoor zit het klimaat op aarde te ingewikkeld in elkaar. Als er temperatuurstijgingen optreden, dan is een mogelijk gevolg het smelten van een deel van het (Zuid)poolijs. Zo'n smeltende ijsmassa kan een verhoging van het zeewaterniveau van vijf meter of meer veroorzaken. De gevolgen daarvan zijn vrij ingrijpend.

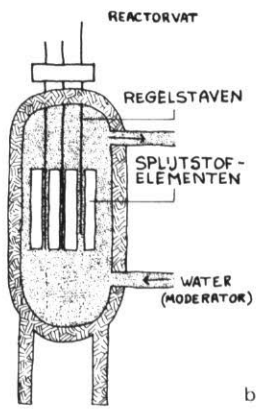
Leestekst 3

beheerste kettingreactie in een kernreactor

De meeste kernreactoren werken door de splijting van ^{235}U-kernen doordat er een langzaam bewegend neutron tegen botst. Bij deze splijting ontstaan, behalve energie in de vorm van warmte en splijtingsprodukten, drie snelle neutronen. Die neutronen kunnen, als ze zijn afgeremd, opnieuw splijtingen veroorzaken. De stof die de neutronen afremt, wordt *moderator* genoemd. De moderator kan bestaan uit grafiet, zwaar water (D_2O) of gewoon water.
Om de warmteproduktie per tijdseenheid constant te houden, moet het aantal kernsplijtingen per seconde constant blijven. Daarom moeten van de drie neutronen die bij één splijting vrijkomen, er twee verwijderd worden. Tussen de splijtstofelementen bevinden zich daarvoor regelstaven (van cadmium of borium), die zeer goed in staat zijn om neutronen te absorberen. Door de staven op en neer te bewegen kan men de warmteproduktie per seconde (het vermogen) regelen.
Als de regelstaven tussen de splijtstofelementen geschoven worden, worden alle neutronen geabsorbeerd. De kettingreactie stopt dan.



a



b

Het reactorvat zit in een dicht omhulsel van staal en beton. Dat omhulsel is zo ontworpen dat het geacht wordt weerstand te bieden aan aardbevingen en zelfs aan de inslag van een Boeïng 747 die er bovenop neerstort.

Vragen

1 In figuur a zie je de doorsnede van een kernreactor, die met ^{235}U als splijtingsmateriaal werkt. Bij elke splijting van een uraniumkern komt een energie vrij van 3.10^{-11} J.
In de kernreactor komt ten gevolge van deze splijtingen een energie van 9.10^{12} J per uur vrij.
a Bereken het aantal splijtingen dat per uur plaatsvindt. De kernenergiecentrale waarvan deze reactor de energiebron is, kan 4.10^{8} W aan elektrisch vermogen afgeven.
b Bereken het rendement van deze kerncentrale.

2 De drie neutronen die bij elke kernsplijting vrijkomen hebben een te grote snelheid om nieuwe kernsplijtingen te veroorzaken. Ze moeten eerst afgeremd worden. Het afremmen kan gebeuren door de neutronen te laten botsen tegen de kernen van een remstof (de moderator, zie fig. b).
Waarom kan men als moderator beter een stof met lichte kernen (grafiet, zwaar water of gewoon water) gebruiken dan een stof met zware kernen?

beheerste kettingreactie in een kernreactor

3 Als alle drie bij een kernsplijting vrijkomende neutronen na afremming een nieuwe splijting veroorzaken, zegt men: 'De vermenigvuldigingsfactor K = 3.'
   a Wat is het gevolg voor de warmteproduktie per seconde in de reactor als K = 3?
   b Wat is het gevolg voor de warmteproduktie (het aantal splijtingen) per seconde als door verlies van neutronen K kleiner dan 1 wordt?

Het aantal neutronen dat aan het splijtingsproces blijft deelnemen kan men regelen met cadmiumstaven. Bij botsing tegen een cadmiumkern wordt een neutron in deze kern opgenomen. Door meer cadmium tussen het uranium te schuiven, kan men een groter deel van de vrijgekomen neutronen absorberen.

   c De reactor werkt op een bepaald constant vermogen (het aantal kernsplijtingen per seconde is constant). Hoe groot is de vermenigvuldigingsfactor dan?
   d Welke handelingen moet men met de cadmiumstaven uitvoeren om de reactor op een lager, constant vermogen in te stellen?

Harrisburg
'Een kerncentrale kan zeker niet exploderen als een bom, maar de mogelijkheid van een ongeval dat grote hoeveelheden radioactiviteit kan verspreiden, kan nooit helemaal uitgesloten worden.'

28 maart 1979: Harrisburg

'Noodtoestand na lek in Amerikaanse kernreactor. Radioactieve neerslag tot op 25 kilometer van kerncentrale'

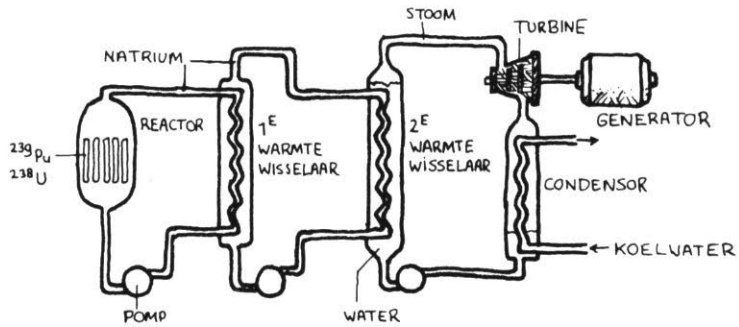
Naar alle waarschijnlijkheid is alles begonnen met werkzaamheden aan de afvoerleidingen van de stoom naar de condensor. Mogelijk is er daarbij lucht in het systeem gekomen. Daardoor staakten de watercirculatiepompen hun werk. De temperatuur in de reactor is daardoor gaan oplopen. Een automatisch systeem zorgde er toen voor dat de neutronenvangende regelstaven volledig tussen de splijtstofelementen zakten, zodat de reactor afsloeg. Dit afslaan van zo'n reactor levert wat problemen op. Hoewel de kettingreactie vrij direct stopt, blijft de reactor nog flink wat warmte produceren. Dat wordt veroorzaakt door het radioactief verval van de splijtingsprodukten, waarbij ook energie vrijkomt. Normaal gesproken is er in een reactor dan ook een noodkoelsysteem, dat zeer snel grote hoeveelheden koelwater langs de reactor laat stromen. Dit noodkoelsysteem heeft in Harrisburg niet (automatisch) gewerkt. Door de grote hitte werden de splijtstofelementen beschadigd en functioneerden allerlei meetinstrumenten ook niet meer. Daardoor wist men in de regelkamer van de centrale ook niet meer waar men aan toe was.
Door de reactie van stoom in het reactorvat met het zirkoon uit de bekleding van de splijtstofpennen ontstond het uiterst explosieve waterstofgas. Een explosie zou dit radioactief besmette gas in de atmosfeer gebracht hebben.
Het gevaar voor een ontploffing van de kerncentrale was dus niet denkbeeldig. Gelukkig is het niet gebeurd. Maar de onwaarschijnlijk geachte samenloop van omstandigheden heeft zich dan toch maar voorgedaan. De vraag is nu nog wat men met de grote hoeveelheden radioactief besmet gas en water in het reactorgebouw aan moet.

de kweekreactor

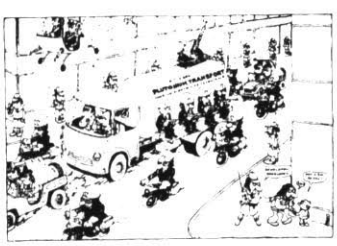
Een kweekreactor moet twee dingen doen:
- warmte produceren door de splijting van plutonium; de warmte wordt gebruikt om stoom te leveren voor de aandrijving van turbines
- nieuw splijtbaar materiaal kweken door de beschieting van ^{238}U met neutronen

De splijtstofstaven bestaan uit een mengsel van ^{239}Pu (dat in een normale kerncentrale ontstaat) en ^{238}U. Net als bij een gewone reactor zijn een koelmiddel en regelstaven nodig. Een moderator is niet nodig, omdat voor de splijting van ^{239}Pu snelle neutronen nodig zijn. Water kan daarom niet gebruikt worden. Meestal neemt men dan vloeibaar natrium (het kookpunt van natrium ligt boven de reactortemperatuur). Het nadeel (gevaar) van natrium is dat het een ontploffing veroorzaakt als het in contact komt met water (in de tweede warmtewisselaar bijvoorbeeld.

ELEKTRICITEIT UIT PLUTONIUM



Rond het eigenlijke reactorgedeelte bevindt zich een mantel van ^{238}U, afkomstig uit de verrijkingsfabrieken. Elke splijting van ^{239}Pu levert, behalve warmte en splijtingsprodukten ook twee neutronen op. Eén hiervan wordt gebruikt om een volgende Pu-kern te splijten, de rest wordt geabsorbeerd in de regelstaven of in de ^{238}U-mantel. Het invangen van een neutron door een ^{238}U-kern betekent het ontstaan van ^{239}Pu.
Bij een goed werkende kweekreactor wordt op deze manier in 7 à 10 jaar tweemaal zoveel ^{239}Pu gevormd als waar oorspronkelijk mee begonnen was. De ene helft kan worden gebruikt als brandstof voor de reactor zelf, de andere om een volgende reactor te laden.
De tot nu toe werkende kweekreactoren halen dit niet. Met de huidige stand van de techniek verbruikt een kweekreactor meer plutonium dan hij produceert. De huidige kweekreactoren 'kweken' dus niet.
De bouw van experimentele kweekreactoren wordt verdedigd met het argument dat een overschakeling op plutonium als splijtstof noodzakelijk is vanwege de beperkte voorraden ^{235}U (als splijtstof voor gewone kweekreactoren).



De grote giftigheid van plutonium en het feit dat deze stof als grondstof voor kernbommen dient, zullen uiterst strenge veiligheidsmaatregelen vereisen.

Tegenstanders van deze ontwikkeling vrezen het ontstaan van een politiestaat, waarin politie en leger de hele samenleving effectief onder controle zullen hebben, om mogelijk misbruik van plutonium tegen te gaan.

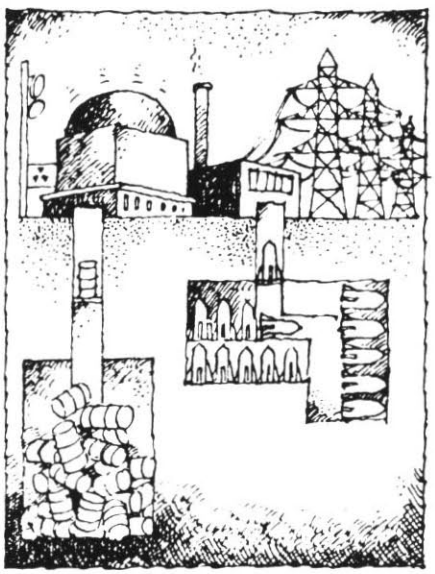
Leestekst 5

een mening over kernenergie en kernwapens

INLEIDING

Waar gaat het over? Waarom?

Deze brochure heeft tot doel, de relatie tussen kernenergie en kernwapens duidelijk te maken.
Nu zullen de meeste mensen er wel van overtuigd zijn dat kernwapens slecht zijn en door de radioaktieve straling een verschrikkelijke bedreiging vormen voor alles wat leeft op de aarde.
"Kernenergie" zegt velen echter niet zoveel. "Wat hebben kerncentrales en kernwapens nou met elkaar te maken?" zeggen ze. "We hebben nu eenmaal energie nodig. En kernenergie kan tot geen kwaad?"
Maar kernenergie kan wel degelijk kwaad! En wat ons, van Vrouwen voor Vrede, betreft, is een van de belangrijkste redenen om tegen kernenergie te zijn: het verband dat er bestaat tussen kernenergie en kernwapens.
Een heel sprekend, onthullend voorbeeld: onlangs voerde Israël (voor de tweede maal, nu met succes) een bombardement uit — in vredestijd! — op een in aanbouw zijnde kerncentrale in Irak. De reaktor werd zodanig vernield dat de centrale voorlopig niet opgestart kan worden.
Volgens Israël was dit gedaan om zo te voorkomen dat Irak via deze reaktor een atoombom zou kunnen gaan produceren!
In onze strijd tegen kernwapens kan en mag 'kernenergie' dus niet buiten schot blijven. Dat zal duidelijk worden bij het lezen van deze brochure. Aktie tegen het ene kan niet zonder aktie tegen het andere.
Er bestaan allerlei mooie, aanlokkelijke publikaties die ons doen geloven dat kernenergie als noodzakelijk, onvermijdelijk of minstens als mogelijkheid gezien moet worden. Wij willen via deze brochure daar onze inzichten tegenover stellen.
Om te komen tot een schone leefbare aarde voor iedereen zullen kernwapens èn kernenergie uitgebannen moeten worden.
Kernenergie en kernwapens: een ongewenste tweeling!



Kernenergie èn kernwapens

Vlak voor de Tweede Wereldoorlog werd door geleerden het procédé van 'kernsplijting' ontdekt. Al meteen werd dit in verband gebracht met de mogelijkheid, zo bijzonder krachtige bommen te maken: atoombommen. In 1945 vielen de eerste bommen op Japan. Pas na 1950 begon men te bedenken hoe er 'vreedzaam' gebruik van gemaakt kon worden (voor de produktie van elektriciteit): 'atoms for peace'. Tot 1970 draaiden over de hele wereld meer kerncentrales voor militaire doeleinden dan voor de produktie van elektriciteit.

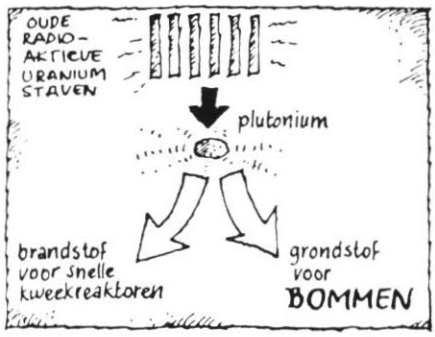
De atoombom 'Little Boy' die in 1945 Hiroshima verwoestte, was gemaakt van wat men in de natuurkunde Uranium-235 noemt. In de

natuur is U-235 niet in zuivere vorm te vinden. 'Natuurlijk Uranium' bestaat slechts voor een heel klein gedeelte (0,7%) uit U-235, en voor de rest uit een andere zwaardere Uraniumsoort, U-238. Dit laatste kan niet tot ontploffing worden gebracht.
Wil je een kernbom maken, dan is het eerste wat je nodig hebt: natuurlijk Uranium. Vervolgens moet je een installatie hebben waarmee je uit dit natuurlijke Uranium zoveel mogelijk het onbruikbare U-238 verwijdert.
Bij de produktie van kernenergie gebeurt hetzelfde. Want ook hierbij is het noodzakelijk, het natuurlijk Uranium te 'verrijken' (d.w.z. het percentage U-235 te verhogen door het te zuiveren van het teveel aan U-238). Zoiets gebeurt bv. in Almelo via het zogeheten Ultra Centrifuge Procédé.Voor kernenergie is het dan voldoende als je het Uranium verrijkt hebt tot zo'n 3% U-235. Voor het maken van een kernbom moet je verrijken tot 80 à 90% U-235. Vuistregel is volgens Frank Barnaby[1]: hoe minder je het Urani-

1 Dr. Frank Barnaby: ex-direkteur van het Zweeds vredesinstituut SIPRI.

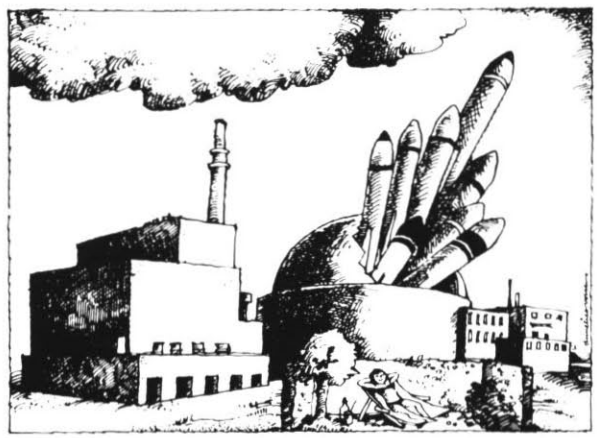
um verrijkt, hoe logger en onbetrouwbaarder je kernbom is.

De kernbom 'Fat Man' die in 1945 boven Nagasaki tot ontploffing werd gebracht, bestond uit Plutonium (Pu). Dit materiaal komt in de natuur niet voor en is alleen langs chemische weg te maken. In een kerncentrale ontstaat Pu tijdens het splijtingsproces als restprodukt uit het U-238 dat naast U-235 in de splijtstofstaven zit.
Het Uranium zit als brandstof in deze zogeheten Uraniumstaven van de reaktor. Na zo'n twee jaar bedrijfstijd worden deze staven vervangen door verse. De oude, zeer radioaktief geworden staven worden enkele jaren afgekoeld, en daarna 'opgewerkt' (zoals in het Franse La Hague).
In een opwerkingsfabriek probeert men o.a. het bruikbare Pu uit de staven te halen, wat een uiterst moeilijk en gevaarlijk karwei is. De veiligheidswaarborgen moeten zeer groot zijn vanwege het gevaar van radioaktieve besmetting.
Pu is de gifstigste stof die we kennen; minder dan eenduizendste gram kan kanker veroorzaken en Pu moet honderdduizenden jaren uit het milieu geweerd worden wegens de uiterst langzaam afnemende straling!
Er zijn twee redenen om het Pu uit de brandstofstaven te halen. Pu kan nl. èn als grondstof voor kernbommen gebruikt worden èn dienen als brandstof voor 'snelle Kweekreaktoren' (zoals in Kalkar). Kernenergie in de toekomst moet nl. uit kweekreaktoren komen omdat de voorraden 'natuurlijk Uranium' in de wereld over ongeveer dertig jaar uitgeput zijn.
Vrij snel na de Tweede Wereldoorlog werd het procédé ontdekt voor het maken van een ander soort atoombom, van veel zwaarder kaliber: de waterstofbom (H-bom). De zeer hoge temperatuur (15 miljoen °C) die nodig is om een H-bom te laten ontploffen, wordt geleverd door een daar omheen aangebrachte U-bom, die als ontstekingsmechanisme dienst doet.



Of het nu gaat om een U-bom, een Pu-bom of een H-bom, de kernenergietechnologie (Verrijking, Splijting en Opwerking) en de kernenergie-installaties zijn voor alle drie nodig.

WIE ZEI:
'IK WIST HET NIET!'
?



OVER DE RELATIE TUSSEN
KERNENERGIE EN KERNWAPENS

onderwerpenlijst

In deze lijst vind je alfabetisch een aantal onderwerpen die in dit thema aan de orde komen. De nummers achter de onderwerpen verwijzen naar de bladzijden waar het betreffende onderwerp (wat uitgebreider) aan de orde komt.

aardgas 19, 37, 57, 60
aardolie 57, 60
activiteit (radio-), van deeltjes 44, 46
afvalwarmte 30
alfadeeltjes 45
alfastraling 42
arbeid 30
as 63, 65
atoom 39
atoomkern 39

Becquerel 41
bètadeeltjes 46
bètastraling 42
bewegingsenergie 33, 89
brandstof 37
brandstoffen, fossiele- 60, 61
Brede Maatschappelijke Discussie 21, 57
broeikaseffect 102, 120
bruinkool 60

condensatiewarmte 35
condensor 35, 62, 74, 117
Curie, Marie 41

dagbouw 68
diversificatie 20, 21
doordringingsvermogen 46
drukverschil 117
dynamo 27

economizer 119
elektriciteitsbedrijf 51
elektriciteitscentrale 23, 27
elektriciteitsgebruik in Nederland 57
elektriciteitsgebruik, stijging van het – 22
elektrische centrales 57
elektrische energie 29
elektronen 39
element 39
energie 19
energie, primaire – 17
energie, wet van behoud van – 30
energiebalans 69, 88, 101
energiebeleid 20
energiebeleid, nota – 19, 20
energiebesparing 20, 57
energiebronnen 17, 19
energiebronnen, duurzame – 19
Energiecentrum Nederland 78
energiegebruik 16
energiegebruik, gemiddelde- 17
energiegebruik, Nederlands – 16, 20
energiegebruik in Nederland 57
energiegebruik, wereld- 19
energie-inhoud 69, 88, 101
energiestromen 29
energieverbruik, van de hele wereld 20
energievoorzieningen 13, 14, 59
erts 84
Europees kabelnet 52

fossiele brandstoffen 37, 60, 61
fotosynthese 60
frequentie 29

gammastraling 42, 46
gasdiffusie 85
generator 27, 74
gips 65
Greenpeace 78

halveringstijd 44, 46, 80
Harrisburg 122
hertz 29
hoog-radioactief afval 80
hoogspanningsleidingen 48, 62
hout 13
hulpwarmtecentrale 36
Hz 29

isotopen 40
inductie 50
inductiespanning 27
inkolingsproces 60

kabels 49
Kalkar 19, 77
kern 39, 72
kernbom 86, 123
kernbrandstof 77
kerncentrale 73
kernreacties 40
kernreactor 45, 74, 121
kernsplijting 40, 72
kernsplijtingen, aantal per seconde 73
kernsplijtingsafval 80
kernwapens 124
klimaat 65, 120
koeltorens 76
koelwater 30, 36, 62, 76, 115
kolen 19, 37
kooldioxide 37, 120
koolstofdioxide 60, 63, 65
koppelnet, landelijk- 99
kosmische straling 43
kweekreactor 19, 77, 123
kwelwater 98

landelijk elektriciteitsnet 29
landelijk koppelnet 52, 91
landschap 15
levensduur, van een kerncentrale 69
longkanker 45
luchtvervuiling 65

magnetisch veld 27, 50
Markerwaard 34, 91
massabehoud 38
massastroom 37, 47
meesleepeffect 95
milieu 15, 63, 96
milieuvervuiling 37
moderator 121
mijnen 68
mijngas 68

natuurlijke stroming 37
neutron 72, 121,
neutronen 39, 46, 72

onderwerpenlijst

neutronenstraling 43
nota energiebeleid 57

Ohm, wet van – 49
olie 19
olieboycot 16
olie-exporterende landen 21
oppervlaktewater 63
opslag 90
opslagmeer 91, 98
opwerken 80
opwerking 86
opwerkingsfabriek 77, 86
overcapaciteit 19, 58

periodiek systeem der elementen 39
piekuren 91
plan Lievense 34, 58, 91
planten 19, 60
plutonium 77, 86, 123
plutonium-239 45
pompturbinecentrale 91
protonen 39, 72

radioactief 42, 75
radioactief afval 78
radioactieve straling 41
radioactiviteit 77, 86
radon 65, 85
reactor 74
reactorvat 121
recht op vrije wind 95
regelstaven 73, 121
rendement 30, 35, 62, 75, 90, 91
rotor 29

schil 40
silicose 68
smeltveiligheid 48
smog 66
spaarbekken 34, 91
spanning, van 220 V 48
spanningsverlies 50
splijtingsprodukten 77, 80, 121
splijtingswarmte 75
splijtstofcyclus 87
splijtstofelementen 74, 85
splijtstoftabletten 85
spoel 27, 50
stadsverwarming 23, 36, 62, 76
stator 29
steenkool 19, 47, 60
steenkoolwinning 68
stikstofoxiden 63, 65
stoflong 68
stoom 61
stoommachine 115
stoomturbine 32, 74
stromingsenergie 34, 93
stroom 49
stuwmeer 34, 58, 100

thermische centrales 34
thermische verontreiniging 63, 76
tipvanes 94
transformator 29, 50
transformatorstations 62
transport 48
transportverliezen 48
tritium 44, 78
turbine 30, 32, 61, 115
turbine, hogedruk- 119
turbine, lagedruk- 119
turbine, stoom- 118
turf 13, 60

ultracentrifuge 85
uranium 19, 38, 39, 72
uranium-235 40
uranium-238 40
uranium, natuurlijk – 75, 84
uraniumoxide 84

verbranding 60
verbrandingsgassen 62
verbrandingswarmte 61, 75
vermenigvuldigingsfactor 122
vermogen 49, 74, 89
verrijking 85
verrijkingsfabriek 85
vervuiling 21
vlieg-as 63, 64
voorraden 19

warmte 30, 36, 60
warmtekrachtkoppeling 20, 23
warmtewisselaar 74, 117
waterkracht 19, 34
waterkrachtcentrale 34
waterturbine 33, 91
weekijzeren kern 28, 50
weerstand 49
wet van behoud van massa 38
wind 19
windingen 51
windmolenpark 58
windsnelheid 90
windstille perioden 21
windturbine 32
windturbineparken 95
wisselspanning 27
wisselspanningsmeters 28
wisselstroom 27
wisselstroomdynamo 28
wisselstroommeters 28

zekering 48
zon 19, 33, 60
zoutkoepels 80
zure regen 65
zuurgraad 65
zwavel 63
zwaveldioxide 37, 63, 65
zwavelzuur 65

verantwoording

Arkel, J. van, *Stop Kalkar*. Amsterdam 1977

Begeleidingscommissie Voorstudie Plan Lievense, *Windenergie en waterkracht*. 's-Gravenhage 1981

Brochure van Vrouwen voor Vrede, *'Wie zei ik wist het niet'*, met enkele illustraties uit *Kernenergie voor beginners*

Cartoons: Stefan Verwey

Fast, J.D., *Energie uit atoomkernen*. Natuur en Techniek. Maastricht

Frank Smulders/Werkgroep Energiediskussie

Jong, W.M. de e.a., *Energie, veiligheid en gezondheid*. Cahiers Bio-Wetenschappen en Maatschappij. Leiden 1980

Stichting Energie Informatie, *Warmlopen voor de toekomst*. Den Haag

Stuurgroep Maatschappelijke Discussie Energiebeleid, *Energiebeleid voor morgen*. Den Haag 1983

Stuurgroep Maatschappelijke Discussie Energiebeleid, *Het Tussenrapport*. Den Haag 1983

Vereniging van Exploitanten van Elektriciteitsbedrijven in Nederland, *Elektriciteit nu en straks*. Arnhem

Vereniging van Exploitanten van Elektriciteitsbedrijven in Nederland (VEEN), *De centrale*. Arnhem

VEEN, *De kerncentrale*. Arnhem

VEEN, *Stadsverwarming*. Arnhem

VEEN, *Zonne- en windenergie*. Arnhem

PLON

Begeleidingscommissie S.V.O.-project 0213 (vooronderzoek voor het PLON, 1972-1974)

F. van de Maesen (voorzitter tot 1973); hoogleraar natuurkunde Technische Hogeschool Eindhoven
N.J. Heijkoop (voorzitter 1973-1974); inspecteur voortgezet onderwijs
W.P.J. Lignac (secr.); secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
S. Auer, algemeen didacticus Universiteit van Amsterdam
F. Balkema, inspecteur voortgezet onderwijs
H.P. Hooymayers, lector natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
H.J.L. Jongbloed (1972-1973), mediadeskundige NIAM
J. Schweers, leraar natuurkunde havo/vwo
J. Smit, inspecteur voortgezet onderwijs
E. Warries, hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
M. van Wieringen (1973-1974), mediadeskundige NIAM

Stuurgroep PLON (1974-heden)

H.P. Hooymayers (voorzitter), hoogleraar natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
W.P.J. Lignac (secr. tot 1978), secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
A.A.M. Agterberg (secr. sedert 1978), secretaris Advies Commissie voor de Leerplan Ontwikkeling Natuurkunde in oprichting
P. Broekman (sedert 1980), hoofd afdeling Bèta en Gamma-vakken CITO
F. Dekkers (sedert 1979), hoofddocent natuurkunde Moller Instituut
H. Lengkeek (tot 1977), leraar natuurkunde mavo
D.A. Lockhorst (tot 1978), leraar natuurkunde havo/vwo
J. Schipper (sedert 1980), medewerker A.P.S.
A. Snater (tot 1980), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
F.J. Steenbrink (tot 1978), leraar natuurkunde vwo
J.M.F. Teunissen (tot 1975), onderwijskundige Rijks Universiteit Utrecht
W.C. Vink (tot 1979), directeur Christelijke Mavo te Putten
R. de Vries (sedert 1980), leraar natuurkunde havo, vwo, namens de NVON
E. Warries (tot 1975), hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
S.A. Wouthuysen (tot 1976), hoogleraar natuurkunde Universiteit van Amsterdam

Kerngroep mavo

G.H. Frederik, vakdidacticus Rijksuniversiteit Utrecht; tot 1979 voorzitter van de ACLO-n i.o.
H. Eeftink (sedert 1980), leraar natuurkunde mavo
D. Hobo (tot 1979), directeur van de Chr. Mavo de Lier
S.G.C. Markering, hoofddocent natuurkunde Gelderse Leergangen
Ch. van Raemdonck (sedert 1980), leraar natuurkunde mavo (PLON)
J. Vastbinder (sedert 1980), leraar natuurkunde M.T.S.
W.C. Vink (tot 1979), directeur Christelijke Mavo Putten

PLON-team mavo/havo/vwo-onderbouw

H.F. van Aalst
W. van Bochoven (1976-1978)
W. Bijker (1979-1981), Rijks Universiteit Utrecht
H. Boelhouwer (sedert 1979), S.V.O.
S.O. Ebbens (1976-1980)
C. Floor (1979-1980)
A.C.L. van Gameren (sedert 1977)
D. van Genderen, Rijks Universiteit Utrecht
F.L. Gravenberch (sedert 1978)
C.A.S. Groen (tot 1980)
W.H. Kamphuis (sedert 1975)
J. Kortland (sedert 1980)
B.M. de la Parra (sedert 1977)
B. Pelupessy
P. de Raad (1977-1978), onderzoeksassistent
A.E. van der Valk (sedert 1980)
R.F.A. Wierstra
Th. Wubbels (1978-1979)
J. Zwarts (1977-1978), onderzoeksassistent

PLON-administratie

E. van den Broek (1976-1979)
R. Lindeman (1977-1980)
M. Rolff van den Baumen (1974-1979)
B. Schillert (sedert 1980)
A.G. Schwering (sedert 1980)
H. Veurink (tot 1974)

Tekeningen

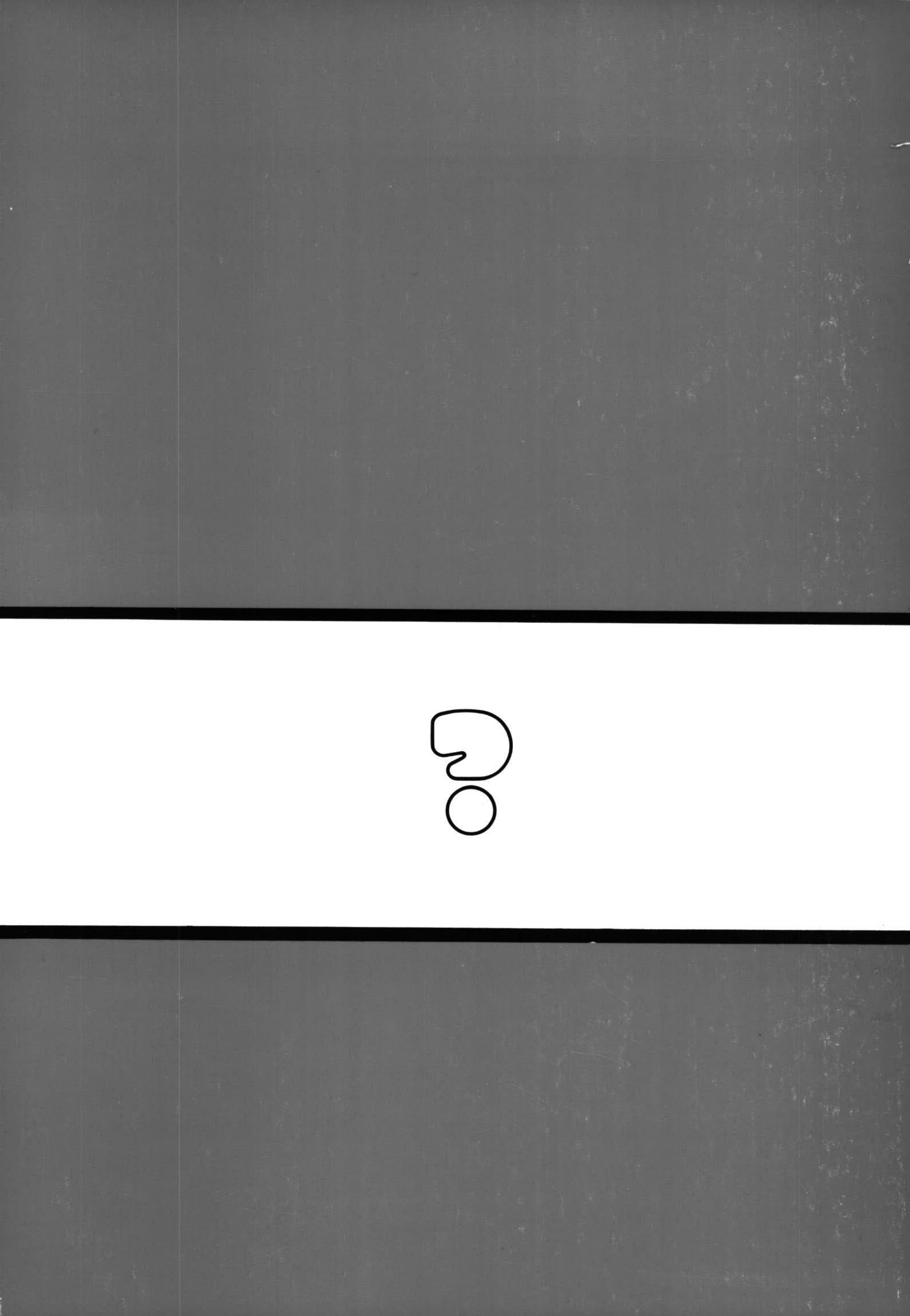
A. Lurvink (Onderwijsmedia instituut – Rijks Universiteit Utrecht)
H. de Waal (Onderwijsmedia instituut – Rijks Universiteit Utrecht)

Foto's

A.C.L. van Gameren (PLON)
W.H. Kamphuis (PLON)

PLON-CITO (namens CITO)

F. Boessenkool
P. Broekman
C. Hellingman
T. Heuvelmans
H. Jaspers
J. de Kanter

Proef- en volgscholen 1980-1981

Chr. Mavo Putten te Putten
Chr. Mavo de Lier te De Lier
Thorbecke S.G. te Arnhem (mavo-afdeling)
Edith Stein College te Den Haag
Chr. Mavo Mariahoeve te Den Haag
Maasveld Mavo te Blerick
Regina Pacis Streekschool te Oudewater
R.S.G. Schagen te Schagen
Hertog Jan College te Valkenswaard
Marnix College te Ede
Niels Stensen College te Utrecht
Ashram College te Alphen a/d Rijn
Mavo de Bark te Zaandam
S.G. Oost Betuwe te Bemmel
R.S.G. Broklede te Breukelen
Eemland College Noord te Amersfoort
Grotius College te Heerlen
S.G. Nijmegen Oost te Nijmegen
Chr. S.G. de Brug te Lelystad
Dr. Edith Stein Mavo te Eindhoven
Michaël Mavo te Beek-Ubbergen
Chr. S.G. Jan van Arkel te Hardenberg
Mavo 't Fregat te Zaandam
Chr. S.G. Revius te Deventer