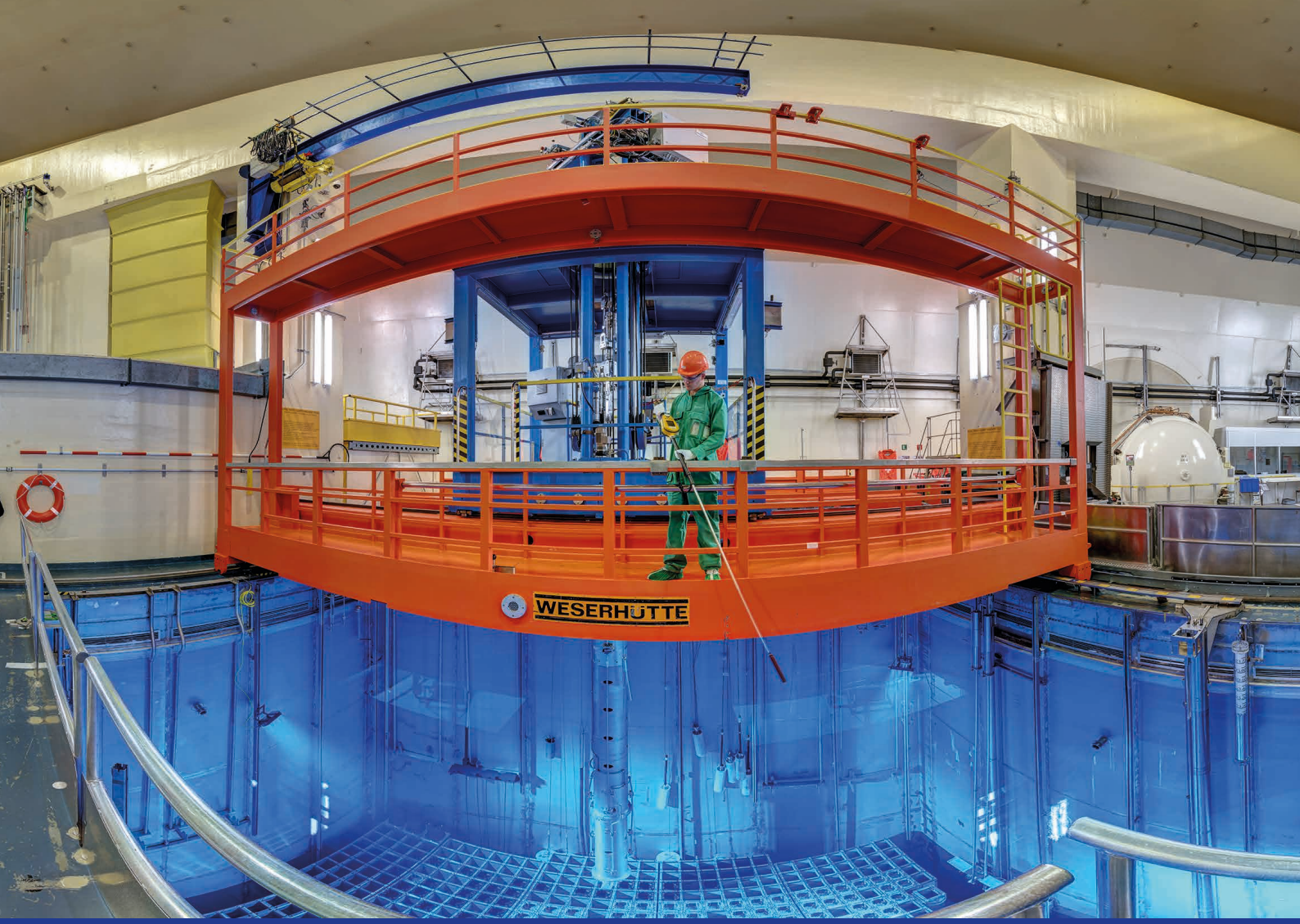


Van atoom naar stroom

KERNENERGIE

Hoe past kernenergie in een toekomst zonder fossiele brandstoffen?

NRG PALLAS ACADEMY

ENERGIE

MILIEU

VEILIGHEID

Lesmodule Kernenergie

Junior Academy NRG PALLAS

Nagenoeg alle landen in de wereld hebben afgesproken dat er in 2050 geen CO_2 meer uitgestoten wordt om de gevolgen van klimaatverandering zo veel mogelijk te beperken. Daarom wordt er wereldwijd hard gewerkt aan de overgang van fossiele brandstoffen (olie, kolen, gas) naar CO_2-vrije vormen van energie. Dat betekent onder andere dat de manier waarop elektriciteit opgewekt wordt, moet veranderen. De laatste jaren wordt daarom steeds meer elektriciteit opgewekt door wind en zon.

Ook kernenergie is een CO_2-vrije vorm van elektriciteitsproductie. In sommige landen, zoals Zweden, Frankrijk en Finland, wordt meer dan 30% van de elektriciteit al opgewekt door middel van kernenergie. Nederland heeft momenteel één kerncentrale, goed voor ongeveer 3% van de elektriciteitsproductie. Eind 2021 heeft de regering echter plannen bekend gemaakt voor de bouw van twee nieuwe kerncentrales.

Met deze lessenserie leer je meer over de werking van kernenergie en hoe er elektriciteit geproduceerd wordt in een kerncentrale. Door middel van deze lessenserie ga je daarna onderzoeken hoe kernenergie een bijdrage kan leveren aan een toekomst zonder fossiele brandstoffen.

In dit werkboek staan de benodigde theorie en instructies. Achterin is een begrippenlijst opgenomen waar moeilijke begrippen nader worden toegelicht.

De werkzaamheden van Junior Academy NRG PALLAS vormen onderdeel van het onderzoeksprogramma PIONIER dat NRG PALLAS uitvoert in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat.
Een deel van de informatie uit deze module is versimpeld voor lesdoeleinden, maar wel gebaseerd op actuele kennis omtrent (kern)energie. Voor meer informatie kijk op ensuringnuclearperformance.com of nrg.eu.
De module is opgezet en geschreven door: Cornelis Zandt, Tessa de Vries, Bart Verdonschot en Maura Baars.

© NRG PALLAS 2024 | Alle rechten zijn voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, gekopieerd, gepubliceerd, opgeslagen, aangepast of gebruikt in welke vorm dan ook, online en offline, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NRG PALLAS.

Foto cover | © EPZ

Inhoud

1 Introductie 4
1.1 Plan van aanpak 4

2 Theoretische introductie 5
2.1 Opbouw van een stof 5
2.2 Radioactieve stoffen 6
2.3 Kernsplijting 7
2.4 Kerncentrale 8
2.5 Elektrische energie 9
2.6 Opgaven 10

3 Verdiepende theorie 11
3.1 Massadefect 11
3.2 Kriticiteit 12
3.3 Opgaven 13

4 Taakverdeling 14

5 Energiedeskundige 15
5.1 Een groeiende elektriciteitsvraag 16
5.2 Elektriciteitsproductie 17
5.3 De beschikbare ruimte in Nederland 18
5.4 Ruimtebeslag van schone elektriciteit 18
5.5 Stroom wanneer het nodig is 19
5.6 Is er genoeg stroom voor de toekomst? 20

6 Milieudeskundige 21
6.1 De levencyclusanalyse 21
6.2 CO_2-voetafdruk van elektriciteitsbronnen 23
6.2.1 Kerncentrale 25
6.2.2 Zonne-energie 25
6.2.3 Windenergie 26
6.2.4 Kolencentrale 27
6.2.5 Gascentrale 28

7 Veiligheidskundige 30
7.1 Stralingsbescherming 30
7.2 Water voor de veiligheid 33
7.3 Bescherming tegen besmetting met radioactieve stoffen 34
7.4 Radioactief afval 37

8 Challenge 39

9 Begrippenlijst 40

1 Introductie

De vraag naar elektriciteit wordt steeds groter. Hoe kunnen we iedereen van elektriciteit voorzien? En hoe doen we dat op een duurzame manier? In deze module gaan jullie in de vorm van multi-disciplinair overleg onderzoeken hoe een toekomst zonder fossiele brandstoffen ingericht kan worden. Hiervoor zijn verschillende expertises nodig. Daarom gaat iedereen zich in een expertrol verdiepen. Zo kan ieder een kritiek puzzelstukje aanleveren voor het beantwoorden van die vraag.

1.1 PLAN VAN AANPAK

Om een CO_2-vrij energiesysteem te realiseren, doorloop je de komende vier lessen het stappenplan van Figuur 1.

In de eerste les wordt de theorie achter de werking van een kerncentrale gegeven.
Hierover maak je ook een aantal opgaven.

In de tweede en derde les ga je aan de slag met één van de drie expertrollen. Deze gaan over elektriciteitsproductie, milieu-impact of veiligheidsmaatregelen voor verschillende elektriciteits-bronnen. Er wordt in een team van dezelfde expertrollen samengewerkt.

In de vierde les wordt alle verzamelde informatie gedeeld met andere expertrollen.
In groepjes van drie tot zes leerlingen formuleren jullie samen jullie antwoord op de hoofdvraag:
Hoe zouden jullie een toekomst zonder fossiele brandstoffen inrichten?
Daarna worden klassikaal van alle groepjes de gekozen antwoorden besproken.

Figuur 1. Plan van aanpak

2 Theoretische introductie

Voordat je je gaat verdiepen in een functie, leer je hoe een atoom in elkaar zit en hoe je een vervalvergelijking opstelt. Daarnaast leer je hoe een kerncentrale werkt, wat de bron van energie in een kerncentrale is en wordt de hoeveelheid geproduceerde elektrische energie in context geplaatst. Deze kennis is belangrijk voor elke specialist.

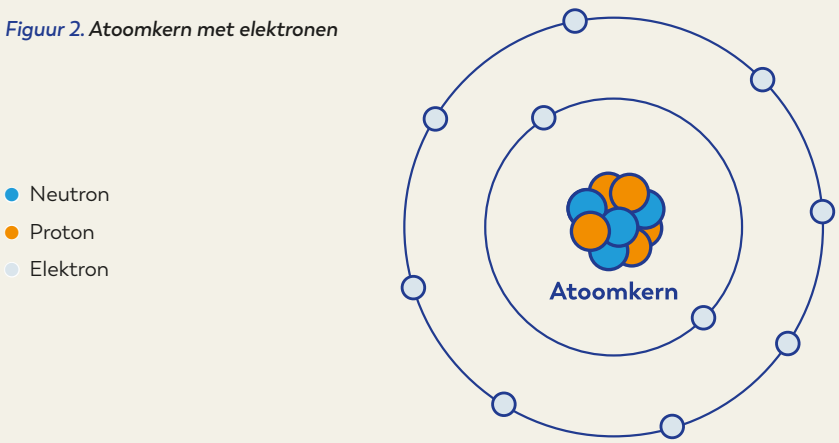
2.1 OPBOUW VAN EEN STOF

In Figuur 2 staat het atoommodel van Bohr. In dit model wordt een atoom weergegeven met in het midden de atoomkern, bestaande uit protonen en neutronen, en daaromheen een elektronenschil, bestaande uit elektronen. De massa's van deze deeltjes wordt vaak gegeven in atomaire massa-eenheid *u*, waarbij $1\ u \approx 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg$.
In BINAS tabel 7A kun je de atomaire massa's van de kerndeeltjes vinden.

Elk atoom kan je in de volgende vorm beschrijven: ${}^{A}_{Z}X$. Hierin is:
- Massagetal (A): aantal protonen + neutronen in de kern
- Atoomnummer (Z): aantal protonen in de kern
- Symbool (X): het element, bepaald door het aantal protonen

Een voorbeeld is ${}^{4}_{2}He$, waar $Z = 2$ betekent dat het atoom 2 protonen heeft (en het element dus helium is) en A = 4 betekent dat het A – Z = 4 – 2 = 2 neutronen heeft. Vaak vind je als versimpelde notatie bijvoorbeeld "helium-4", waarbij alleen het element en het massagetal wordt gegeven, oftewel de essentiële informatie. Het atoomnummer kun je namelijk nog achterhalen via de naam van het element.

Figuur 2. Atoomkern met elektronen



2.2 RADIOACTIEVE STOFFEN

Veel elementen (met een vast atoomnummer *Z*), kunnen een verschillende aantal neutronen hebben (met een ander massagetal *A*). Dit noem je een isotoop van dat element.

Een voorbeeld hiervan is ${}^{3}_{2}He$ en ${}^{4}_{2}He$, waarbij beide het element helium zijn, maar ze een verschillend aantal neutronen hebben (één ten opzichte van twee). Sommige isotopen zijn instabiel: hierbij is het aantal protonen en neutronen niet in de juiste verhouding. Deze instabiele isotopen kunnen vervallen en zenden daarmee verschillende soorten straling uit (zie ook Figuur 3):

- α-straling: ${}^{4}_{2}He^{2+}$
- β^--straling: een elektron (${}^{0}_{-1}e^{-}$) of positron (${}^{0}_{1}e^{+}$)
- γ-straling: een foton
- neutronen

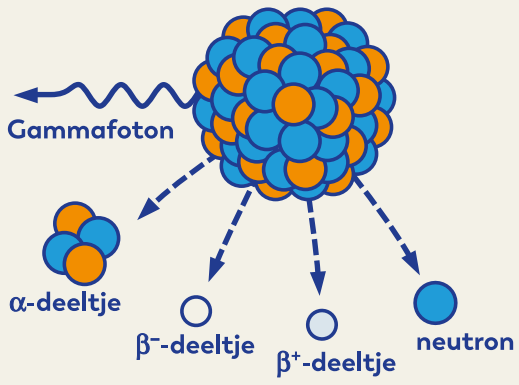
De complete reactie die optreedt bij radioactief verval kun je opschrijven in een vervalreactie, bijvoorbeeld voor α-straling: ${}^{218}_{84}Po \rightarrow {}^{214}_{82}Co + {}^{4}_{2}He + 6{,}11\ MeV$

Met behulp van BINAS tabel 25A kan je een vervalreactie kloppend maken.
Als voorbeeld wordt er in de blauwe box hieronder gekeken naar kalium-42.
Als je dit isotoop opzoekt dan zie je dat het volgens β^--straling vervalt.

Voorbeeld: vervalvergelijking opstellen

1. Schrijf links van de pijl het symbool, massagetal en atoomnummer van kalium op:
   ${}^{42}_{19}K \rightarrow {}^{\cdots}_{\cdots}\ldots + {}^{\cdots}_{\cdots}\ldots + \ldots\ MeV$
2. Schrijf rechts van de pijl het symbool voor β^-straling op:
   ${}^{42}_{19}K \rightarrow {}^{0}_{-1}e- + {}^{\cdots}_{\cdots}\ldots + \ldots\ MeV$
3. Bepaal het vervalproduct van kalium-42:
   Het gaat erom dat je voor de pijl net zo veel deeltjes hebt als na de pijl.
   Omdat β^-straling een "negatief" atoomnummer heeft, tel je bij het vervalproduct +1 bij het atoomnummer. Vervolgens kan je het element gaan opzoeken. β^-straling heeft geen massagetal dus verandert er niks aan het massagetal van de dochterkern.
   ${}^{42}_{19}K \rightarrow {}^{0}_{-1}e- + {}^{42}_{20}Ca + \ldots\ MeV$
4. Schrijf tot slot de vrijgekomen energie op:
   ${}^{42}_{19}K \rightarrow {}^{0}_{-1}e- + {}^{42}_{20}Ca + 3{,}55\ MeV$

Figuur 3. Verschillende vormen van radioactief verval



Bij een vervalreactie komt energie vrij, dat wordt meegegeven aan de deeltjes na de pijl, ook wel vervalproducten genoemd. De hoeveelheid energie die vrijkomt verschilt per vervalreactie en kan worden berekend via het massadefect: de massa van de radioactieve kern is altijd groter dan de opgetelde massa van de vervalproducten. Oftewel, bij radioactief verval wordt massa omgezet in energie. Als je precies wilt weten hoe je dit berekent, kun je hier in de verdiepende theorie meer over lezen.

Er zijn verschillende redenen waarom de kern van een radioactief isotoop instabiel kan zijn.
Zie in Tabel 1 welke oorzaken van instabiliteit er kunnen zijn en welke soorten straling vrijkomen om deze instabiliteit op te lossen. Hier zie je dat als bijvoorbeeld het aantal protonen en neutronen niet in de juiste verhouding is, dan kunnen:

- Neutronen en/of protonen worden uitgezonden;
- Neutronen en/of protonen in elkaar worden omgezet.

Oorzaak instabiliteit	Teveel kerndeeltjes	Verkeerde kerndeeltjes	Teveel energie
Oplossing	Uitzenden kerndeeltjes	Omzetten kerndeeltjes	Uitzenden energie
Soort verval	α-straling Neutron straling	β^--straling β^+-straling	γ-straling

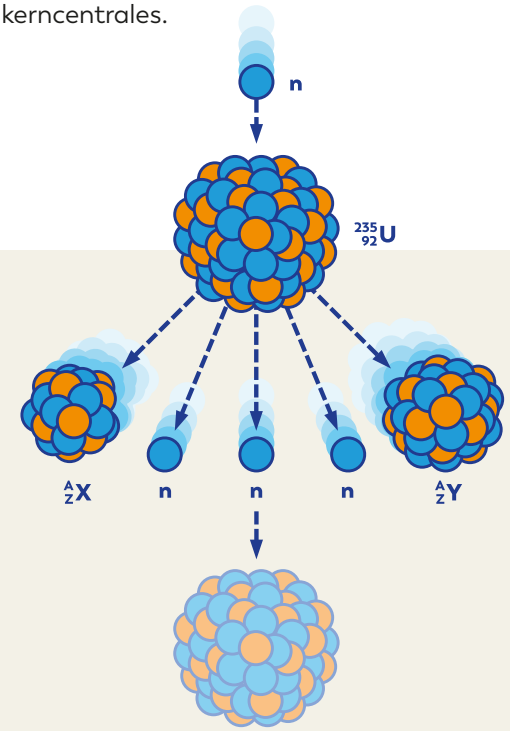
2.3 KERNSPLIJTING

In de meeste kerncentrales wordt uranium gebruikt als brandstof voor energieopwekking. Specifiek het isotoop (92 protonen, 143 neutronen). Dit isotoop is op zichzelf al instabiel, maar gemiddeld gezien duurt het lang voordat het isotoop spontaan vervalt. Als er echter een neutron op de -kern komt, neemt deze het neutron tijdelijk op, waarna de kern vrijwel meteen splijt.
De kern vervalt in twee kleinere kernen – zogenaamde dochterkernen – en twee of drie neutronen (zie Figuur 4). Dit wordt kernsplijting genoemd. Bij elke kernsplijting komt ook energie vrij, gemiddeld ~200 MeV.

Als de neutronen die uit één kernsplijting vrijkomen gemiddeld één nieuwe splijting van een $^{235}_{92}U$ -atoom veroorzaken, is er sprake een stabiele kettingreactie.
Een stabiele kettingreactie is de basis van de werking van kerncentrales.

Voorbeeld van een kernsplijting:

$$^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{92}_{36}Kr + {}^{141}_{56}Ba + 3\,{}^{1}_{0}n + E$$



Figuur 4. Voorbeeld van een kernsplijting van een uraniumkern

2.4 KERNCENTRALE

In Figuur 5 staat een schematische weergave van een kerncentrale, specifiek een zogenaamde druk-waterreactor (PWR – *Pressurized Water Reactor*), waar de belangrijkste onderdelen genummerd zijn van 1 tot 6. Een kerncentrale produceert warmte in de **reactorkern** 1 via kernsplijting. Over het algemeen bestaat de splijtstof die gebruikt wordt voor de kernsplijting uit ~4% $^{235}_{92}U$ en ~96% $^{238}_{92}U$. De warmte die vrijkomt uit de kernsplijtingen verwarmt water dat door de reactorkern stroomt, waarna deze warmte wordt afgevoerd naar de **stoomgenerator** 2. Het water koelt hier af omdat de warmte overgedragen wordt aan ander, gescheiden water binnen de stoomgenerator (blauw gekleurd in Figuur 5). Het afgekoelde water kan dan weer gebruikt worden als verkoeling voor de kern: een gesloten circuit. Dit gesloten circuit vanuit de reactorkern wordt ook wel het primaire circuit genoemd. De gemiddelde temperatuur van het water in het primaire circuit is ~300 °C. Onder normale omstandigheden zou dit betekenen dat het water verdampt, maar om dit te voorkomen staat het reactorvat onder druk, wat het kookpunt van water verhoogt.

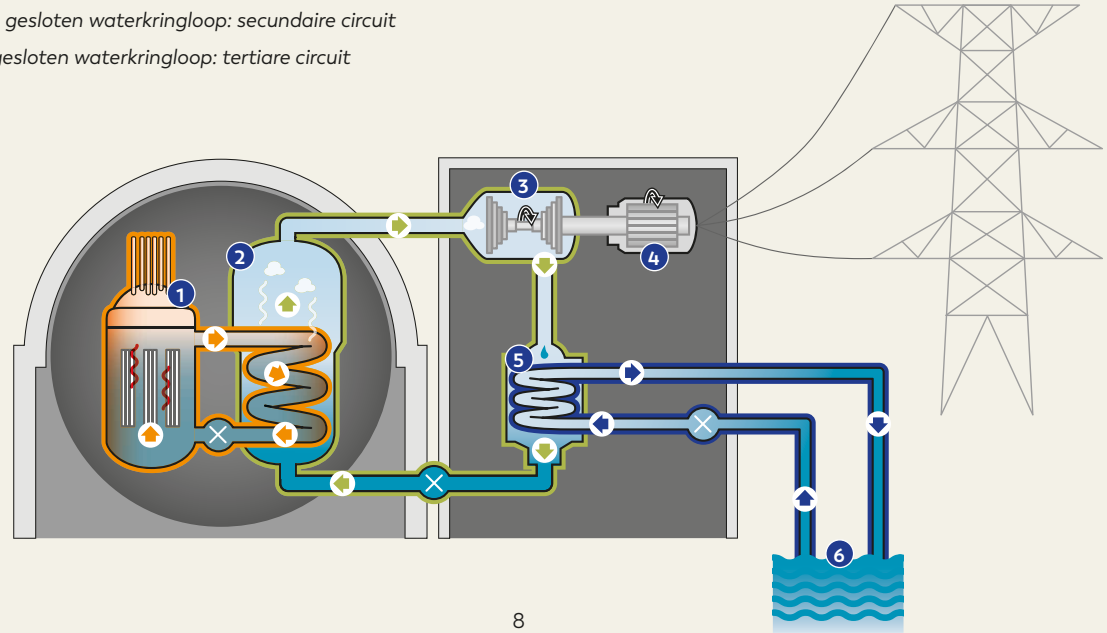
In de **stoomgenerator** 2 wordt met de warmte uit het primaire circuit stoom gemaakt. Deze stoom drijft een **stoomturbine** 3 aan en met deze mechanische energie wordt in een **generator** 4 elektriciteit gegenereerd. De stoom zelf wordt na de stoomturbine weer afgekoeld tot water in de **condensor** 5, waarna het opnieuw gebruikt kan worden in de stoomgenerator. Deze vier onderdelen zijn samen dus ook een gesloten circuit, wat het secundaire circuit wordt genoemd.

Om stoom te condenseren in de condensor, moet het aangesloten zijn op een bron van relatief koud water, of de warmte op een andere manier kwijt kunnen. Om die reden is een kerncentrale aangesloten op **oppervlaktewater** 6 of op een koeltoren. Dit is opnieuw een circuit, ook wel het tertiaire circuit genoemd, en is het enige circuit dat in direct contact staat met de buitenwereld.

Het omzetten van warmte-energie in elektrische energie is niet 1 op 1: er gaat energie verloren in deze omzetting. Over het algemeen ligt het rendement van een kerncentrale tussen de 30 en 40%. Dit betekent dat (als voorbeeld) een kerncentrale met een elektrisch vermogen van 1.500 MW, ongeveer 4.500 MW aan thermisch (warmte) vermogen in de reactorkern produceert. Hiermee is het rendement $\eta = \frac{1.500\ [MW]}{4.500\ [MW]} \cdot 100\% \approx 33\%$.

Figuur 5. ***Schematische weergave van een kerncentrale*** *(Bron: EPZ)*

- *Eerste gesloten waterkringloop: primaire circuit*
- *Tweede gesloten waterkringloop: secundaire circuit*
- *Derde gesloten waterkringloop: tertiare circuit*



2.5 ELEKTRISCHE ENERGIE

Hierboven werd als voorbeeld een kerncentrale met een elektrisch vermogen van 1.500 MW genoemd. Algemeen gezien beschrijft vermogen de energie die per seconde wordt opgewekt of gebruikt en wordt gegeven in Watt [W = J/s]. De kerncentrale uit het voorbeeld levert dus 1,5 • 10^9 Joule per seconde aan het elektriciteitsnet. Om dit grote getal in perspectief te plaatsen vind je hieronder een aantal voorbeelden van indicatievermogens van alledaagse toepassingen, met erachter tussen haakjes ongeveer hoeveel er van die toepassing tegelijk aangesloten zou kunnen worden op 1.500 MW:

- LED lamp: 5 W (300 miljoen)
- Televisie: 45 W (~33 miljoen)
- Laptop: 65 W (~23 miljoen)
- Inductiekookplaat (één element): 1.300 W (~1,2 miljoen)

Hoewel dit al een duidelijker beeld geeft van de schaal van het elektrisch vermogen van een kerncentrale, gebruiken deze toepassingen in de praktijk niet constant energie, maar slechts voor een deel van de tijd. Het kan om die reden soms nuttiger zijn om te kijken naar de totale hoeveelheid gebruikte energie over een bepaalde periode, bijvoorbeeld een jaar, in plaats van het vermogen op een bepaald moment.
Hiervoor kun je de volgende formule gebruiken: $E = P \cdot t$

Hierbij is P het elektrisch vermogen in *W*. Normaal wordt in deze formule de tijd t gegeven in seconden en de totale energie E daarmee in Joule. Het is in de elektriciteitswereld echter gebruikelijker om t in uren te geven, waardoor E de eenheid Wattuur of Wh (*Watt-hours*) krijgt. In de blauwe box onderaan de pagina zie je een voorbeeld van hoe je hiermee kunt rekenen. Uiteindelijk is het verschil tussen Wattuur en Joule niets meer dan een omrekeningsfactor: *1 Wh = 3.600 J.*

Net zoals voor vermogen is het handig een aantal voorbeelden te geven van elektrisch energieverbruik van bekende toepassingen om een idee te krijgen van de schaal. Nu wordt er tussen de haakjes vergeleken met de geschatte elektriciteitsproductie van een 1.500 MW kerncentrale over de periode van een jaar: ~1,2 • 10^7 MWh (zie de berekening hiervoor in de blauwe box).

- Mobiele telefoon, ongeveer: 5,84 kWh per jaar (~2 miljard)*
- Elektrische auto, ongeveer: 2,25 MWh per jaar (~5 miljoen)**
- Gemiddelde per huishouden: 3,50 MWh per jaar (~3.4 miljoen)

* Elke dag volledig opladen. Aannames batterijcapaciteit en -voltage: 4.000 mAh met 4,00 V
** Aannames gemiddeld verbruik en afstand per jaar: 15,0 kWh per 100 km; 15.000 km per jaar

Voorbeeld: rekenen met Wattuur

Een voorbeeldkerncentrale heeft een elektrisch vermogen van 1.500 MW. Over een periode van een jaar staat deze kerncentrale 90% van de tijd volledig aan. Bereken hoeveel elektrische energie deze kerncentrale over de periode van een jaar opwekt. Geef je antwoord in MWh.

1. **Bereken het aantal uren in een jaar.**
   24,00 [uur · dag $^{-1}$] · 365,25 [dagen · jaar $^{-1}$] = 8.766 uur · jaar $^{-1}$

2. **Bereken de totale energie die deze kerncentrale in 90% van de tijd produceert:**
   $E = P \cdot t$
   $E = 1{,}500 \cdot 10^9$ [W] · $8{,}766 \cdot 10^3$ [uur · jaar $^{-1}$] · 0,90 = $1{,}185 \cdot 10^{13}$ Wh
   $E = 1{,}2 \cdot 1\,0^7$ MWh

2.6 OPGAVEN

Vraag 1 Vul de ontbrekende gegevens van de volgende elementen in: ${}^{8}_{5}\ldots$, ${}^{218}_{\ldots}Po$, ${}^{99m}_{43}\ldots$
Hoeveel neutronen bevat ieder element?

Vraag 2 Geef de vervalvergelijkingen van radium-224 en technetium-99 samen met de vrijgekomen energie met behulp van BINAS tabel 25A.

Vraag 3 Bij de splijting van een ${}^{235}_{92}U$-kern kunnen er veel verschillende paren van vervalproducten ontstaan. In het voorbeeld zagen we bijvoorbeeld een splijting naar ${}^{92}_{36}Kr$ en ${}^{141}_{56}Ba$ en 3 neutronen. Beredeneer voor een andere mogelijke splijting van ${}^{235}_{92}U$ waaruit onder andere ${}^{99}_{42}Mo$ en 3 neutronen ontstaan wat het derde splijtingsproduct moet zijn.

Vraag 4 Hoeveel energie komt er vrij wanneer je alle kernen van 1,0 kg zuiver ${}^{235}_{92}U$ splijt?
Ga ervan uit dat er gemiddeld 200 MeV per splijting vrijkomt en geef je antwoord in MJ.

Vraag 5 Een gemiddeld huishouden gebruikt per jaar ongeveer 3,50 MWh aan elektriciteit.
Bereken hoeveel gram ${}^{235}_{92}U$ compleet gespleten moet worden om aan deze elektriciteitsvraag te voldoen. Neem in de berekening mee dat 33% van de energie uit ${}^{235}_{92}U$ omgezet wordt in elektriciteit.
Gegeven omrekeningsfactor: 1 MWh = 3.600 MJ

3 Verdiepende theorie

3.1 MASSADEFECT

In het vorige hoofdstuk heb je geleerd over kernsplijting en dat hier energie bij vrijkomt. Om de vrijgekomen energie te kunnen berekenen, wordt het zogenaamde massadefect van een vervalreactie gebruikt. Specifiek voor kernsplijting: de massa van de deeltjes vóór de splijting is altijd groter dan de opgetelde massa van de splijtingsproducten. De 'missende' massa, oftewel het massadefect, is bij de splijting omgezet in energie. Hoeveel energie kun je berekenen met de bekende formule van Einstein:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

waar ΔE het energieverschil (vrijgekomen energie bij de splijting) in Joule [J] is, Δm het massaverschil in kilogram [kg] en c de lichtsnelheid in meter per seconde [m/s]. Denk eraan dat je de massa's van de deeltjes vaak vindt of gegeven krijgt in atomaire massa u. Deze moet je dan nog omrekenen naar kilogram met de omrekeningsfactor $1\ u \approx 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ kg$. In de blauwe box hieronder staat een voorbeeld van het berekenen van de vrijgekomen energie bij een kernsplijting stap voor stap uitgewerkt.

Voorbeeld: rekenen met massadefect

Bereken ΔE (in MeV) die vrijkomt bij de volgende kernsplijting:

$${}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{92}_{36}Kr + {}^{141}_{56}Ba + 3\,{}^{1}_{0}n + E$$

1. Zoek de massa's van de isotopen op en bereken Δm in u

   $m_{{}^{235}_{92}U} + m_{{}^{1}_{0}n} = m_{{}^{92}_{35}Kr} + m_{{}^{141}_{56}Ba} + 3\,m_{{}^{1}_{0}n} + \Delta m$

   $\Delta m = \left(m_{{}^{235}_{92}U} + m_{{}^{1}_{0}n}\right) - \left(m_{{}^{92}_{35}Kr} + m_{{}^{141}_{56}Ba} + 3\,m_{{}^{1}_{0}n}\right)$

   $\Delta m = (235{,}044 + 1{,}00866) - (91{,}926 + 140{,}914 + 3{,}026) = 0{,}18666\ u$

2. Reken de massa om naar kg

   $1\ u = 1{,}660 \cdot 10^{-27}\ kg$ (BINAS tabel 5)

   $m = 0{,}18666\ [u] \cdot 1{,}660 \cdot 10^{-27}\ [kg/u] = 3{,}099 \cdot 10^{-28}\ kg$

3. Bereken ΔE

   $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

   $\Delta E = 3{,}099 \cdot 10^{-28}\ [kg] \cdot 2{,}998 \cdot 10^{8}\ [m/s]^2 = 2{,}785 \cdot 10^{-11}\ J$

   $1\ eV = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ Joule$ (BINAS tabel 5)

   $$\Delta E = \frac{2{,}785 \cdot 10^{-11}\ [J]}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ [J/eV])} = 173{,}8\ MeV$$

De massa van isotopen staat in BINAS T25, de massa van de kerndeeltjes in T7B.

Denk eraan dat je voor α-straling de massa van ${}^{4}_{2}He^{2+}$ gebruikt!

3.2 KRITICITEIT

In het vorige hoofdstuk werd uitgelegd dat de basisprincipe van de werking van een kerncentrale een stabiele kettingreactie van kernsplijtingen is. Dit is niet de enige situatie die in een kerncentrale kan voorkomen; over het algemeen zijn er drie situaties:

- ***Superkritisch***
  Elke splijting veroorzaakt *meer* dan één nieuwe splijting en het aantal reacties neemt toe.
- ***Kritisch***
  Elke splijting veroorzaakt *precies* één andere splijting en er is sprake van stabiel kettingreactie.
- ***Subkritisch***
  Elke splijting veroorzaakt *minder* dan één nieuwe splijting en het aantal reacties neemt af.

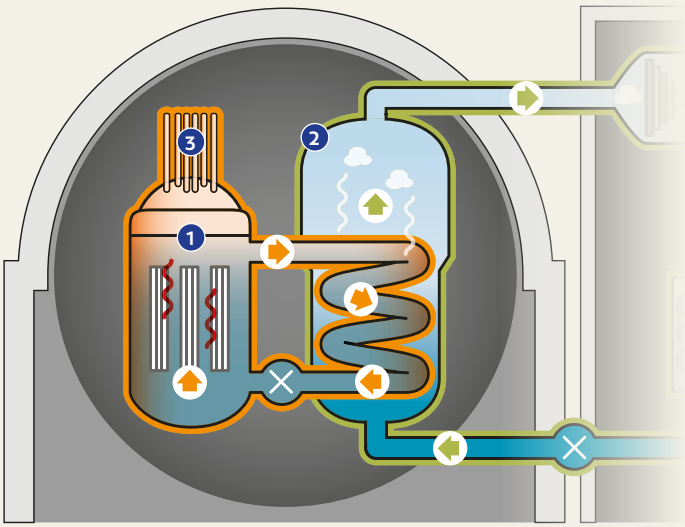
Alle drie de situaties kunnen gebruikt worden: superkritisch is belangrijk tijdens het opstarten van de kerncentrale, kritisch tijdens normale operatie en subkritisch tijdens het uitzetten.

Om in de verschillende situaties terecht te komen of te blijven, kunnen er zogenaamde **regelstaven** 3 in of uit de kern gebracht worden. Deze regelstaven zijn gemaakt van een materiaal dat heel effectief neutronen kan opvangen, waardoor het de neutronen 'wegneemt' uit de kettingreactie.
Hoe meer regelstaven er in de kern gebracht worden, hoe meer neutronen opgevangen worden en dus hoe minder kernsplijtingen er kunnen voorkomen.

Regelstaven worden ook gebruikt om de kerncentrale direct uit te zetten wanneer er iets fout dreigt te gaan: alle regelstaven vallen in dat geval automatisch naar beneden, waardoor de kettingreactie vrijwel meteen wordt uitgedoofd (ook wel SCRAM genoemd).

Figuur 6. ***De reactorkern en stoomgenerator in een kerncentrale*** *(Bron: EPZ)*

1 *Reactorvat*
2 *Stoomgenerator*
3 *Regelstaven*



3.3 OPGAVEN

Vraag 1 Maak de volgende splijtingsreactie compleet: ${}^{235}_{92}U + {}^{\cdots}_{\cdots}n \rightarrow {}^{140}_{\cdots}Xe + {}^{\cdots}_{\cdots}\ldots + 2\,{}^{\cdots}_{\cdots}n + E$

Vraag 2 Geef de massa (in atomaire massa-eenheid) voor en na de splijting.

Vraag 3 Hoeveel energie (in MeV) komt er vrij bij deze splijting?

Vraag 4 Bij deze reactie komen 3 neutronen vrij. Stel dat elk van deze 3 neutronen na precies 1 nanoseconde een ander ${}^{235}_{92}U$-atoomatoom splijt, welke weer 3 neutronen uitzendt, waarvan elk neutron weer na precies 1 nanoseconde een ander ${}^{235}_{92}U$-atoomatoom splijt. Hoeveel seconden duurt het totdat er 1 miljoen splijtingen tegelijk zijn?

Vraag 5 ${}^{60}_{27}Co$ vervalt door middel van β^--straling naar ${}^{60}_{28}Co$, waarbij ook energie vrijkomt. De vervalreactie zie je hieronder. Bij β^--verval wordt in de kern een neutron omgezet in een proton en elektron: ${}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p^+ + {}^{0}_{-1}e^-$.
Geef de massa (in atomaire massa-eenheid) voor en na het verval.

${}^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni^+ + {}^{0}_{-1}e^- + E$

Vraag 6 Bereken het massadefect en daarmee de energie die bij dit verval vrijkomt.
Kom je niet op het juiste antwoord uit? Kijk dan bij de vorige vraag kritisch naar het totaal aantal elektronen die zich rechts van de pijl bevinden.

Vraag 7 Stel dat er in een reactorkern een constante, stabiele kettingreactie aan splijtingen aanwezig is. Hierbij is het thermisch vermogen constant.
Leg uit wat er gedaan kan worden binnen de reactorkern zodat een er een lager thermisch vermogen ontstaat.

4 Taakverdeling

HOE ZOUDEN JULLIE EEN TOEKOMST ZONDER FOSSIELE BRANDSTOFFEN INRICHTEN?

Om expert te worden, verdiep je je in één van de volgende specialismes: energiedeskundige, milieudeskundige of veiligheidskundige. Alle kennis van deze experts samen wordt gebruikt om uiteindelijk de bovenstaande hoofdvraag te beantwoorden.

Let er op dat je tijdens de challenge in de laatste les gaat vertellen over jouw expertise. Om je een beetje een richtlijn te geven voor wat je gaat vertellen, staan er leerdoelen aan het begin van de volgende hoofdstukken. Check voor jezelf of je deze leerdoelen beheerst nadat je het hoofdstuk hebt gemaakt!

Specialisme 1: ENERGIEDESKUNDIGE

Als energiedeskundige houd je je bezig met de elektriciteitsvraag en -productie in Nederland. Je leert over het stijgende elektriciteitsverbruik in de toekomst en je zoekt uit hoe we dit met CO_2-vrije elektriciteitsbronnen kunnen voorzien.

Heb je deze specialisatie? Dan ga jij je bezighouden met de energietransitie.
Ga naar ***Hoofdstuk 5*** *Energiedeskundige.*

Specialisme 2: MILIEUDESKUNDIGE

Om de opwarming van de aarde tegen te gaan willen we als samenleving zo min mogelijk CO_2 en andere broeikasgassen uitstoten. Als milieudeskundige ga jij daarom verschillende elektriciteitsbronnen met elkaar vergelijken en breng je in kaart wat de impact van deze bronnen is op het milieu.

Heb je deze specialisatie? Dan ga jij je bezighouden met milieuaspecten.
Ga naar ***Hoofdstuk 6*** *Milieudeskundige.*

Specialisme 3: VEILIGHEIDSKUNDIGE

Het is belangrijk dat toekomstige elektriciteitsopwekking veilig is voor mens en milieu. Als veiligheidskundige leer je specifiek voor kernenergie hoe veiligheid geregeld is en kijk je daarnaast naar de afvalverwerking van CO_2-vrije elektriciteitsbronnen.

Heb je deze specialisatie? Dan ga jij je bezighouden met veiligheid.
Ga naar ***Hoofdstuk 7*** *Veiligheidskundige.*

5 Energiedeskundige

Als energiedeskundige ga je je bezighouden met de elektriciteitsvraag en -productie in Nederland. Nederland heeft samen met andere Europese landen het doel om in 2050 klimaatneutraal te zijn. Dit houdt onder andere in dat we elektriciteit fossielvrij willen opwekken – dus zonder het gebruik van de fossiele brandstoffen: kolen, olie en aardgas. Dit lijkt in eerste instantie een simpele opgave: we vervangen alle elektriciteitscentrales die op fossiele brandstoffen werken met windturbines, zonnepanelen en kerncentrales en we zijn 100% klimaatneutraal. Maar is dit wel zo simpel?

Hoeveel elektriciteit verbruiken we in Nederland eigenlijk? Hoeveel ruimte is er beschikbaar in Nederland voor elektriciteitsproductie? En hoeveel elektriciteit leveren de elektriciteitsbronnen daadwerkelijk door het jaar heen? Deze vragen ga je in de komende twee lessen als energie-deskundige beantwoorden. Succes!

De volgende leerdoelen komen aan bod in dit hoofdstuk:
Aan het einde van de les kan je...

1. *De toekomstige verwachte elektriciteitsvraag benoemen en beantwoorden of hier in de toekomst aan voldaan kan worden;*
2. *Benoemen waarom de elektriciteitsvraag steeds meer toe zal nemen;*
3. *Het geïnstalleerd vermogen van verschillende elektriciteitsbronnen berekenen;*
4. *De capaciteitsfactor van verschillende elektriciteitsbronnen berekenen;*
5. *Beredeneren waarom we (nog) niet volledig elektriciteit kunnen opwekken met zonne- en windenergie;*
6. *Een vergelijking maken tussen de benodigde hoeveelheid kolen en uranium om dezelfde hoeveelheid elektrische energie te produceren.*

5.1 EEN GROEIENDE ELEKTRICITEITSVRAAG

In 2021 gebruikte Nederland 120 TWh aan elektriciteit (T = Tera = 10^{12}). Hiervan werd ongeveer 63% met fossiele brandstoffen opgewekt, voornamelijk aardgas en kolen. De andere 37% van de elektriciteit werd fossielvrij opgewekt, met kern-, wind- en zonne-energie. Uiteindelijk willen we helemaal geen aardgas en kolen meer gebruiken en 100% van onze elektriciteit opwekken met CO_2-vrije bronnen. Volgens deze gegevens hebben we dus nog 63% van de 120 TWh te gaan, maar is dat ook echt zo?

Vraag 1: Een huishouden van 4 personen gebruikt gemiddeld 3.840 kWh aan elektriciteit per jaar.

- ***a.*** Bereken hoeveel huishoudens er in Nederland zouden zijn met een totaal elektriciteitsverbruik van 120 TWh per jaar.
- ***b.*** Hoeveel inwoners zouden dit zijn?
- ***c.*** Kun je een reden bedenken waarom dit op veel meer dan het huidige inwoneraantal van Nederland uitkomt (17,5 miljoen)?

In de toekomst is 120 TWh niet genoeg: elk jaar gaan mensen gemiddeld meer en meer elektriciteit gebruiken. Verklaringen hiervoor kun je het beste voor je zien door te kijken naar veelvoorkomende veranderingen binnen een huishouden, welke je misschien herkent:

1. Mensen vervangen hun auto met verbrandingsmotor met een elektrische variant. Zo wordt er geen fossiele brandstof meer gebruikt en is er minder uitstoot van CO_2, maar de elektriciteit voor het opladen van de auto moet wel ergens opgewekt worden.
2. Met koken is er een verschuiving naar het gebruik van elektriciteit. Er wordt steeds vaker gekookt met inductie in plaats van met gas.
3. Mensen verwarmen hun huizen met elektrische warmtepompen in plaats van gasgestookte cv-ketels.

Als iedereen in Nederland deze veranderingen doorvoert in 2050, in combinatie van het elektrisch maken van veel industriële processen, is naar verwachting de elektriciteitsvraag in 2050 vier keer zo groot is als die van vandaag, dus 480 TWh.

Piekverbruik is bij de elektriciteitsvraag ook een belangrijke term: dit is het hoogste elektriciteitsverbruik op één moment in een jaar, gegeven in Watt [W]. Het is belangrijk dat er voldoende elektriciteit kan worden opgewekt om te voldoen aan het piekverbruik. Is er niet voldoende, dan kan er een gedeelte van het elektriciteitsnet in het land wegvallen. Het piekverbruik in Nederland in 2021 was 18 GW (G = Giga = 10^9). Als dit zoals de totale elektriciteitsvraag ook vier keer zo groot wordt, moet er in 2050 minimaal 72 GW aan vermogen geleverd kunnen worden.

Vraag 2: Als Nederland het hele jaar door constant een vermogen van 18 GW zou verbruiken, wat zou in dat geval de totale jaarlijkse elektriciteitsvraag zijn (in TWh)?

Weet je niet meer hoe je de elektrische energie kan berekenen? Kijk dan terug in Hoofdstuk 2.5!

5.2 ELEKTRICITEITSPRODUCTIE

In Hoofdstuk 2 is uitgelegd dat een kerncentrale het element uranium gebruikt als brandstof, specifiek een combinatie van de isotopen $^{235}_{92}U$ en $^{238}_{92}U$. De energie die vrijkomt uit de splijting van $^{235}_{92}U$ wordt gebruikt om elektriciteit op te wekken. Maar hoeveel $^{235}_{92}U$ heb je eigenlijk nodig om een kerncentrale draaiende te houden? En hoe vergelijkt zich dat met bijvoorbeeld de benodigde hoeveelheden kolen of olie?

Om dat te vergelijken wordt de grootheid energiedichtheid gebruikt. Energiedichtheid is de maximale hoeveelheid energie die in theorie uit 1 kg van een bepaalde brandstof gehaald kan worden, door de stof compleet te splijten of te verbranden, gegeven in MJ/kg. De energiedichtheid voor $^{235}_{92}U$, kolen en olie is gegeven in Tabel 2. Let op dat dit dus niet direct de elektrische energie per kilogram is! Dat komt omdat het rendement van het proces waarbij de energie omgezet wordt naar elektriciteit nooit 100% is. Meestal ligt dit tussen de 30% en 50%.

Tabel 2. Energiebron en energiedichtheid

ENERGIEBRON	Energiedichtheid [MJ/kg]
$^{235}_{92}U$ (splijting)	82.100.000
Kolen (verbranding)	26,6
Olie (verbranding)	43,0

Vraag 3 Hoeveel kilogram kolen is er nodig om dezelfde hoeveelheid energie te produceren als 1 kg $^{235}_{92}U$?

Vraag 4 Hoeveel kilogram kolen is er nodig voor de volledig elektriciteitsvraag van 120 TWh per jaar als we alleen gebruik zouden maken van kolen? Ga uit van een rendement van 50% voor de omzetting van energie uit kolen naar elektriciteit.
Gegeven omrekeningsfactor: 1 TWh = 3.600 TJ

? ***Wist je dat ...***

een kolencentrale ongeveer 9.000.000 kg kolen per dag verbrandt om een vermogen van 1000 MW te leveren? Om dit te vervoeren zijn treinen met 90 wagons van 3 km lang nodig!

Vraag 5 Hoeveel kilogram $^{235}_{92}U$ is er nodig voor de volledig elektriciteitsvraag van 120 TWh per jaar als we alleen gebruik zouden maken van kerncentrales? Ga uit van een rendement van 33% voor de omzetting van energie uit $^{235}_{92}U$ naar elektriciteit.

Vraag 6 In de eerste les is verteld dat de splijtstof in een kerncentrale bestaat uit ongeveer 4% $^{235}_{92}U$ en 96% $^{238}_{92}U$. Met de aanname dat deze isotopen even zwaar zijn, hoeveel kilogram uranium zou er in totaal per jaar gebruikt worden?

Vraag 7 ***(verdiepend):***
Als je nu over een digitaal hulpmiddel beschikt, probeer dan op internet op te zoeken hoeveel uranium er op dit moment wereldwijd beschikbaar is en in welke landen dit aanwezig is. Als je dat vergelijkt met het antwoord op de vorige vraag, hoe lang zou Nederland in theorie met de totale voorraad kunnen doen?

5.3 DE BESCHIKBARE RUIMTE IN NEDERLAND

Om af te stappen van kolen en gas voor de elektriciteitsproductie, is er in het laatste decennium ingezet op de ontwikkeling van wind- en zonneparken. Daardoor is het aandeel van wind en zon bij de elektriciteitsproductie al sterk toegenomen tot de eerder genoemde 37%. Het uiteindelijke doel is 100%, maar dat is een complexe opgave om meerdere redenen. Om te begrijpen waarom dat een complexe opgave is, gaan we als eerste kijken naar een belangrijke belemmering: de beschikbare ruimte.

Nederland is een van de meest dichtstbevolkte en -bebouwde landen van Europa; bijna elk stukje land heeft wel een bepaalde invulling. Bovendien zijn niet alle plekken geschikt voor CO_2-vrije elektriciteits-bronnen. Een windturbine mag bijvoorbeeld niet te dicht bij een woongebied staan vanwege geluids-overlast en een grotere kerncentrale heeft veel water nodig (*de veiligheidskundige weet hier meer over!*). De geschatte beschikbare ruimte in Nederland per elektriciteitsbron vind je in Tabel 3. Deze geschatte beschikbare oppervlaktes per zijn gebaseerd op realistische aannames uit de literatuur.

Tabel 3. Elektriciteitsbron en beschikbare ruimte

Elektriciteitsbron		Beschikbare oppervlakte	Aannames
Kernenergie		5,00 km^2	Max. vijf locaties geschikt van ~1 km^2
Windenergie	Op land	3.000 km^2	Geplande opschaling vanaf huidig gebruikt
	Op zee	8.750 km^2	15% van Nederlands Continentaal Plat (NCP)
Zonne-energie		500 km^2	Groot deel van geschikte daken

Hieruit kun je zien dat er relatief veel ruimte voor wind beschikbaar is, vooral op zee: het Nederlands Continentaal Plat (NCP) is het Nederlandse gedeelte van de Noordzee, wat in totaal ongeveer 59.000 km^2 beslaat. Een schatting is dat ongeveer 15 - 20% van het NCP beschikbaar gesteld kan worden voor elektriciteitsproductie, zonder dat daarbij bijvoorbeeld vaarroutes of het ecosysteem hevig verstoord worden. Ter vergelijking: momenteel beslaat wind op land ongeveer 2.200 km^2 en wind op zee 500 km^2, dus verdere uitbreiding van windenergie zal voornamelijk op zee plaatsvinden. De enige kerncentrale van Nederland, in Borssele, neemt ongeveer 0,5 km^2 aan ruimte in beslag.

5.4 RUIMTEBESLAG VAN ELEKTRICITEITSBRONNEN

Beschikbare ruimte voor een elektriciteitsbron is een belangrijke factor om op te letten, maar er zijn nog twee factoren die net zo belangrijk zijn: de zogenaamde vermogensdichtheid en capaciteitsfactor. Allereerst gaan we de vermogensdichtheid bespreken. Dit is het vermogen dat kan worden opgewekt per km^2 en is verschillend voor elke elektriciteitsbron. Deze informatie wordt samengevat voor kern-, wind- en zonne-energie in Tabel 4.

Bijvoorbeeld voor een windturbine: een windturbine op land heeft een gemiddeld elektrisch vermogen van 2 MW. Om ervoor te zorgen dat windturbines elkaars wind niet opvangen, zit er ruimte tussen. Op deze manier beslaat één windturbine gemiddeld 0,75 km^2 oppervlakte, of omgerekend 3,00 MW/km^2 zoals in de tabel. Een windpark heeft dus meer oppervlakte nodig dan een kerncentrale om hetzelfde vermogen te kunnen leveren, maar zijn daarentegen wel makkelijker neer te zetten. De combinatie van het beschikbare oppervlakte én de vermogensdichtheid geeft inzicht in hoeveel vermogen er in totaal neergezet kan worden: het “geïnstalleerd vermogen”.

Tabel 4. Elektriciteitsbron en vermogensdichtheid

Elektriciteitsbron		Vermogensdichtheid [MW/km²]
Kernenergie		3.000
Windenergie	Op land	3,00
	Op zee	8,00
Zonne-energie		200

Vraag 8: Vul met de gegevens van Tabel 3 en 4 het totaal mogelijk geïnstalleerd vermogen van Tabel 5 in [in GW!].

Tabel 5. Elektriciteitsbron en totaal geïnstalleerd vermogen

Elektriciteitsbron		Totaal geïnstalleerd vermogen [GW]
Kernenergie		
Windenergie	Op land	
	Op zee	
Zonne-energie		
Totaal		

Vraag 9: Als je het goed hebt uitgerekend, komt het totaal geïnstalleerd vermogen (ruim) hoger uit dan het 72 GW piekvermogen dat in 2050 nodig is. Bedenk samen met je groepsgenoten een reden waardoor dit in de praktijk alsnog onvoldoende kan zijn als alles daadwerkelijk neergezet is.

5.5 STROOM WANNEER HET NODIG IS

Geen enkele elektriciteitsbron kan honderd procent van de tijd haar piekvermogen leveren. Omdat er niet de hele dag zonlicht aanwezig is, kan een zonnepaneel niet altijd maximaal elektriciteit opwekken. Als er geen of weinig wind staat produceren ook windturbines niet maximaal. Kerncentrales leveren tijdelijk geen elektriciteit als er nieuwe brandstof in de kern moet worden geladen en er onderhoud uitgevoerd wordt. Deze factoren zorgen ervoor dat het gemiddelde vermogen dat geleverd wordt niet gelijk is aan het geïnstalleerd vermogen dat je in vraag 7 hebt uitgerekend. Een weging voor hoe vaak de verschillende technieken daadwerkelijk elektriciteit kunnen produceren, wordt gegeven door de grootheid “capaciteitsfactor”:

$$\text{Capaciteitsfactor} = \frac{\text{werkelijke elektriciteitsproductie}}{\text{maximale elektriciteitsproductie}} \cdot 100\%$$

Als we inzicht willen krijgen in de elektriciteitsproductie van alle elektriciteitsbronnen over een jaar, is het dus belangrijk de capaciteitsfactor te weten. Deze worden gegeven in Tabel 6. Let op dat je de capaciteitsfactor alleen kunt gebruiken bij elektriciteitsproductie over een langere periode! Je kunt geen “werkelijk vermogen” krijgen als je de capaciteitsfactor vermenigvuldigt met het geïnstalleerd vermogen.

Tabel 6. Elektriciteitsbron en capaciteitsfactor

Elektriciteitsbron		Capaciteitsfactor [%]
Kernenergie		90
Windenergie	Op land	30
	Op zee	50
Zonne-energie		10

Voorbeeld: capaciteitsfactor

Met een totaal geïnstalleerd vermogen aan zonnepanelen van 10,0 GW, is de maximale elektriciteitsproductie in één jaar:

10,0 [GWh] · 24,0 [uur] · 365,25 [dagen] = 87.660 GWh = 87,660 TWh per jaar

Aan het einde van het jaar blijken de zonnepanelen echter maar 9,00 TWh aan elektriciteit geproduceerd te hebben. De capaciteitsfactor over dat jaar voor deze zonnepanelen was dus:

$$\text{Capaciteitsfactor} = \frac{9{,}00\ [\text{TWh}]}{87{,}660\ [\text{TWh}]} \cdot 100\% = 10{,}3\%$$

Vraag 10: Stel een huishouden van 4 personen wil hun jaarlijkse elektriciteitsgebruik van 3.840 kWh volledig opwekken met zonnepanelen. Bereken, gegeven een capaciteitsfactor van 10%, wat het geïnstalleerd vermogen van de zonnepanelen zou moeten zijn.
Geef het antwoord in kW.

Vraag 11: Eén zonnepaneel kan een geïnstalleerd vermogen hebben van 400 W. Bereken hoeveel zonnepanelen dit huishouden moet installeren om in theorie hun jaarlijkse elektriciteitsgebruik volledig te dekken.

5.6 IS ER GENOEG STROOM VOOR DE TOEKOMST?

Nu zijn de drie belangrijkste factoren voor het schatten van de mogelijke elektriciteitsproductie in 2050 besproken: de beschikbare oppervlakte (Tabel 3), de vermogensdichtheid (Tabel 4) en de capaciteitsfactor (Tabel 6). Het doel was om aan totale elektriciteitsproductie van 480 TWh te komen. Bij vraag 12 ga je erachter komen of dat lukt.

Vraag 12: Vul met behulp van de tot nu toe verzamelde gegevens Tabel 7 in voor de totale mogelijke geproduceerde elektrische energie in 2050. Voldoet dit aan de geschatte elektriciteitsbehoefte? Bespreek met je groepje welke uitdagingen zich kunnen voordoen bij de uitvoering van dit plan.

Tabel 7. Elektriciteitsbron en jaarlijks geproduceerde elektrische energie

Elektriciteitsbron		Geproduceerde elektrische energie [TWh]
Kernenergie		
Windenergie	Op land	
	Op zee	
Zonne-energie		
Totaal		

6 Milieudeskundige

Als milieudeskundige ga je de milieu-impact van de verschillende elektriciteitsbronnen onderzoeken. We zullen dit doen door te kijken naar de uitstoot van broeikasgassen, zoals CO_2, bij de bouw-, elektriciteitsproductie- en afvalfase van de verschillende elektriciteitsbronnen door middel van de levenscyclusanalyse.

De volgende leerdoelen komen aan bod in dit hoofdstuk:
Aan het einde van de lesmodule kan je...

1. *Onderscheid maken tussen de CO_2-voetafdruk van de verschillende elektriciteitsbronnen;*
2. *Uitleggen wat het CO_2-equivalent inhoudt;*
3. *Uitleggen wat een levenscyclusanalyse inhoudt;*
4. *De bouw- en totale CO_2-voetafdruk voor verschillende elektriciteitsbronnen berekenen en de verschillen hiertussen identificeren.*

6.1 DE LEVENCYCLUSANALYSE

Allereerst een achtergrond over broeikasgassen. De twee belangrijkste bronnen van warmte op aarde zijn invallend zonlicht en warmte uit het binnenste van de aarde, met bijvoorbeeld een temperatuur van 6000 °C in de kern. Een deel van deze warmte wordt uitgezonden richting de ruimte in de vorm van infrarode fotonen (warmtestraling). Door de aanwezigheid van broeikasgassen in de atmosfeer wordt een gedeelte daarvan weer teruggekaatst richting de aarde, waardoor de warmte effectief “gevangen” wordt. Dit is een volledig natuurlijk proces en zorgt ervoor dat de aarde niet teveel afkoelt: zonder broeikasgassen zou het gemiddeld -18 °C zijn!

Bij een overschot aan broeikasgassen wordt het natuurlijke evenwicht echter verstoord en heeft dat tot gevolg dat er gemiddeld meer warmtestraling teruggekaatst wordt. Dit leidt tot een algehele opwarming van de aarde en uiteindelijk tot drastischere effecten zoals klimaatverandering. Om de opwarming van de aarde tegen te gaan, is het voor onder andere toekomstige elektriciteitsbronnen belangrijk zo min mogelijk broeikasgassen uit te stoten.

Het bekendste broeikasgas is CO_2, maar er zijn ook andere moleculen die de eigenschap van een broeikasgas hebben, bijvoorbeeld methaan (CH_4), lachgas (N_2O), ozon (O_3) en waterdamp (H_2O). Om een eerlijke vergelijking te kunnen maken tussen het broeikaseffect van deze verschillende gassen

wordt de zogenaamde *carbon footprint* gebruikt, uitgedrukt in kilogram CO_2-equivalent. Dit betekent dat de invloed van verschillende gassen op het broeikaseffect wordt vergeleken met 1 kilogram CO_2. Bijvoorbeeld: de uitstoot van 1 kilogram methaan staat gelijk aan 25 kilogram CO_2-equivalent.

Voor de uitstoot van broeikasgassen van elektriciteitsbronnen wordt vaak gekeken naar de uitstoot *tijdens* elektriciteitsproductie; zolang er geen fossiele brandstoffen worden gebruikt wordt een elektriciteitsbron vaak CO_2-vrij genoemd. Een tweede, net zo belangrijk aspect als we het hebben over de milieu-impact van elektriciteitsbronnen is echter het grondstof- en materiaalgebruik bij de bouw en afbraak van deze bronnen. Bijna alles wat we maken brengt uitstoot met zich mee, omdat bijvoorbeeld grondstoffen hiervoor verkregen moeten worden, en tegelijkertijd zorgt bijna alles wat we doen voor afval. Het liefst gebruiken we afval voor een volgend product of proces, een zogenaamde circulaire economie, maar dit kan niet altijd.

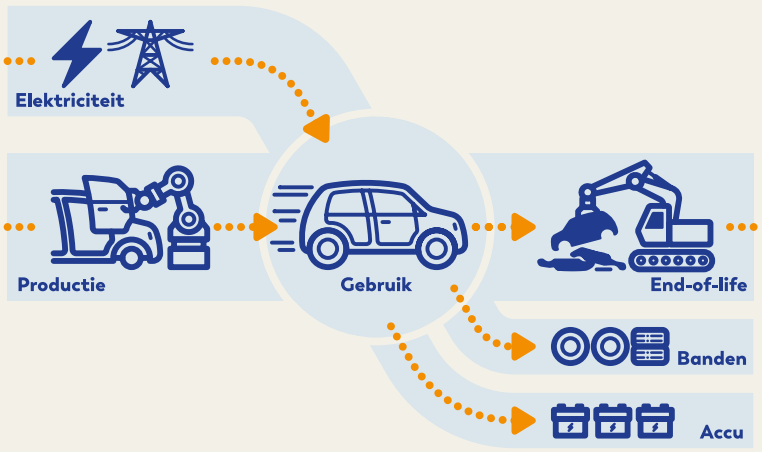
Een analyse waarbij de uitstoot van deze twee aspecten samen wordt genomen is de levenscyclus-analyse (LCA). In deze analyse maken we een onderscheid tussen drie fases binnen een proces: de productiefase (extractie en verwerking van grondstoffen), de gebruiksfase (in ons geval de productie van elektriciteit) en de afvalfase (de afbraak en de verwerking van onbruikbaar afval). Om het idee van een LCA duidelijker te maken, wordt allereerst een voorbeeld van de levenscyclus van een elektrische auto gegeven (zie Figuur 7).

1. ***Productiefase***
   Eerst moeten alle grondstoffen worden verzameld. IJzererts wordt gemijnd, ijzer wordt hieruit gewonnen, het ijzer wordt in de juiste vorm omgesmolten, naar de fabriek verscheept, waar dit samen met de andere onderdelen in elkaar wordt gezet als auto. Bij al deze stappen komen broeikasgassen vrij, ongeveer 8.000 kg CO_2-equivalent, ook als het een elektrische auto is.

2. ***Gebruiksfase***
   Wanneer iemand een elektrische auto koopt en ermee gaat rijden worden niet direct broeikas-gassen uitgestoten (de auto rijdt niet op fossiele brandstoffen). De elektriciteit moet wel opgewekt worden en op dit moment kan dat nog niet volledig CO_2-vrij. Met de elektriciteitsproductie meegenomen, komt er per kilometer 40 gram CO_2-equivalent vrij. Bij een geschatte levensduur van 250.000 km komt dit uit op in totaal 10.000 kg CO_2-equivalent.

3. ***Afvalfase***
   Op het moment dat de auto niet meer gebruikt kan worden, kunnen een aantal onderdelen worden hergebruikt, zoals het geraamte, en tellen niet mee in het CO_2-equivalent van dit product. Het afval dat niet kan worden hergebruikt, zoals de banden en accu, wordt weggegooid en telt nogmaals mee voor de uitstoot. Voor een elektrische auto is er 5.000 kg CO_2-equivalent afval.

Figuur 7.
Levenscyclus van een elektrische auto



Vraag 1: Voer een levenscyclusanalyse uit voor een elektrische auto. Bereken de totale uitstoot en uitstoot per kilometer (in g km^{-1}) voor een elektrische auto en vul Tabel 8 in.

Vraag 2: Een benzineauto stoot tijdens het gebruik meer uit, zo'n 120 g/km CO_2-equivalent. Stel een benzineauto heeft evenveel uitstoot bij productie en afval als een elektrische auto. Hoeveel kilometer zou een benzineauto kunnen rijden om in totaal evenveel uit te stoten als een elektrische auto?

Aantal kilometers: 250.000	CO_2-equivalent (kg)	Gemiddelde CO_2-equivalent per km (g/km)
Productie	8.000	
Gebruik	10.000	
Afval	5.000	
Totaal		

6.2 CO_2-VOETAFDRUK VAN ELEKTRICITEITSBRONNEN

Om eenzelfde soort levenscyclusanalyses uit te voeren op verschillende elektriciteitsbronnen is het van belang dat we voor alle bronnen met dezelfde meetstandaard werken. Centrales die elektriciteit produceren door de verbranding van fossiele brandstoffen stoten CO_2 uit tijdens de stroomproductie. Fossielvrije bronnen doen dat niet, maar daarbij wordt alsnog CO_2 uitgestoten tijdens de bouw en via het afval. Door middel van een korte LCA worden er vijf elektriciteitsbronnen met elkaar vergeleken: kerncentrale, zonne-energie, windenergie, kolencentrale en gascentrale.

Vraag 3: Welke meetstandaard is het beste (a, b of c) om de CO_2-voetafdruk van verschillende technologieën te vergelijken? Bespreek dit in een paar minuten met je groepje.

- ***a.*** De totale CO_2-equivalent uitstoot over de levensduur [kg CO_2-equivalent]
- ***b.*** De productie voetafdruk [kg CO_2-equivalent/MW]
- ***c.*** De gemiddelde CO_2-voetafdruk [kg CO_2-equivalent/MWh]

De rest van dit hoofdstuk gebruik je Tabel 9 om de berekende gegevens in te vullen. Het kan handig zijn om de tabel apart geprint te krijgen. *Om de tabel in te vullen moeten vraag 4 t/m 15 beantwoord worden. Je mag dit samen met jouw expertgroep doen en de taken per elektriciteitsbron verdelen. Het doel is om de gemiddelde CO_2-voetafdruk van elke elektriciteitsbron te vergelijken dus zorg ervoor dat iedereen in de groep hierover kan vertellen.*

Tabel 9. Vergelijking van de CO_2-voetafdruk van verschillende elektriciteitsbronnen

	Kerncentrale	Zonne-energie	Windenergie	Kolencentrale	Gascentrale
Vermogen	1.000 MW	1,00 MW	2,00 MW	800 MW	50 MW
Levensduur	60 jaar	20 jaar	25 jaar	50 jaar	30 jaar
Capaciteitsfactor	0,9	0,1	0,4	0,6	0,6
CO_2-equivalent uitstoot [kg CO_2-eq]					
Bouwvoetafdruk [kg CO_2-eq MW^{-1}]					
Gemiddelde CO_2-voetafdruk [kg CO_2-eq MW^{-1}]					

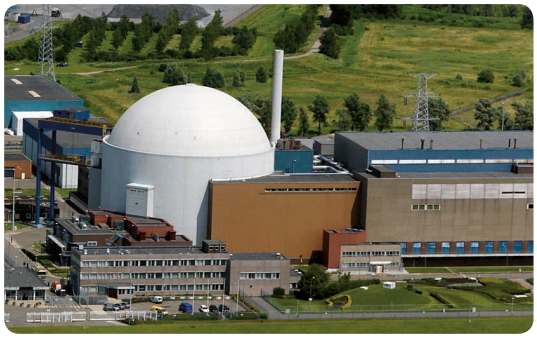
6.2.1 Kerncentrale

We beginnen met de LCA van een kerncentrale, waarvan de fases uitgelicht staan in Tabel 10. De fases worden na de tabel in detail beschreven.

Tabel 10. Fases en uitstoot van een kerncentrale

Fases	Uitstoot
Bouwfase	Tijdens de bouw van de kerncentrale, de winning en verwerking van uranium en het vervoer van kernbrandstof naar de centrale.
Operationele fase	Weinig tot geen tijdens de stroomproductie.
Afvalfase	Het vervoer van gebruikte brandstof/ radioactief materiaal en de ontmanteling van de centrale.

Figuur 8. Reactorkoepel van kerncentrale Borssele (EPZ)



Alle constructieonderdelen van een kerncentrale zijn componenten met een CO_2-voetafdruk. Een aantal componenten met een grote voetafdruk zijn bijvoorbeeld het reactorgebouw (Zie Figuur 8), de stoomturbines en het reactorvat. Daarnaast is er tijdens de operationele fase splijtstof nodig. De uraniumerts die nodig is voor deze splijtstof moet, net als bij ijzer, worden gemijnd en via chemische processen worden verrijkt.

Tijdens de stroomproductie van de kerncentrale is er geen uitstoot: er is geen verbranding van fossiele brandstoffen en de splijting van atomen brengt geen broeikasgassen met zich mee.

Zowel gedurende de levenscyclus van de kerncentrale als aan het einde is er (radioactief) afval: dit kan niet volledig worden hergebruikt. Daarnaast zal de gehele kerncentrale met al zijn onderdelen aan het einde van zijn ongeveer 60-jarige levensduur moeten worden ontmanteld. Het onbruikbare afval wordt onder- of bovengronds opgeslagen. Over de opslag van radioactief afval weet veiligheidskundige meer te vertellen!

Concrete getallen bij elke fase van deze cyclus: bij de bouw van een kerncentrale komt 2,80 Mton CO_2-equivalent vrij. Tijdens de operationele fase wordt niets uitgestoten. Voor het afval wordt wederom 2,80 Mton CO_2-equivalent uitgestoten. Deze totale uitstoot is 5,60 Mton CO_2-equivalent over 60 jaar. Ter vergelijking: dit is per jaar 0,025% (5,60 Mton/60 jaar) van de Nederlandse jaarlijkse uitstoot.

Om deze uitstoot eerlijk te vergelijken met de andere elektriciteitsbronnen in dit hoofdstuk, zetten we deze uitstoot af tegen de hoeveelheid elektriciteit die wordt opgewekt. Een kerncentrale met een elektrisch vermogen van 1.000 MW levert ongeveer 60 jaar elektriciteit. Soms moet er onderhoud gepleegd worden en kan de centrale niet draaien. Gemiddeld draait deze 90% van de tijd.

Vraag 4: Hoeveel elektrische energie produceert een kerncentrale over zijn gehele levenscyclus in MWh? Gebruik hiervoor een kerncentrale die 1.000 MW levert.
Weet je niet meer hoe je de elektrische energie kan berekenen? Kijk dan terug in Hoofdstuk 2.5!

Vraag 5: De totale uitstoot tijdens de bouw en het verwerken van het afval is 5,60 Mton CO_2-equivalent. Wat is de bouwvoetafdruk [kg CO_2-equivalent/MW] en de gemiddelde CO_2-voetafdruk per MWh [kg MWh^{-1}]?

Heb je binnen jouw groepje per elektriciteitsbron de taken verdeeld? Help eerst de groepsgenoten die nog niet klaar zijn en ga dan met z'n allen door naar ***Vraag 16****.*

6.2.2 *Zonne-energie*

Voor zonne-energie wordt er in deze paragraaf een zonnepark van één voetbalveld groot gebruikt. Een zonnepark van deze grootte heeft een (piek)vermogen van 1,00 MW en een levensduur van ongeveer 20 jaar. Omdat er niet de hele dag zonlicht aanwezig is en er minder zonuren zijn in de winter, produceert dit zonnepark niet continu 1,00 MW. Figuur 9 laat een voorbeeldopbrengst zien van een zonnepaneel.

Van 7 tot 12 uur is de zon aan het opkomen, van 12 tot 15 uur schijnt zij volledig en van 15 tot 20 uur gaat de zon weer onder. Op een zonnige dag levert een zonnepaneel daardoor gemiddeld 33% van het maximale vermogen. Maar op jaarbasis produceert een zonnepaneel 10% van het maximale vermogen. Dit noemen we de capaciteitsfactor.

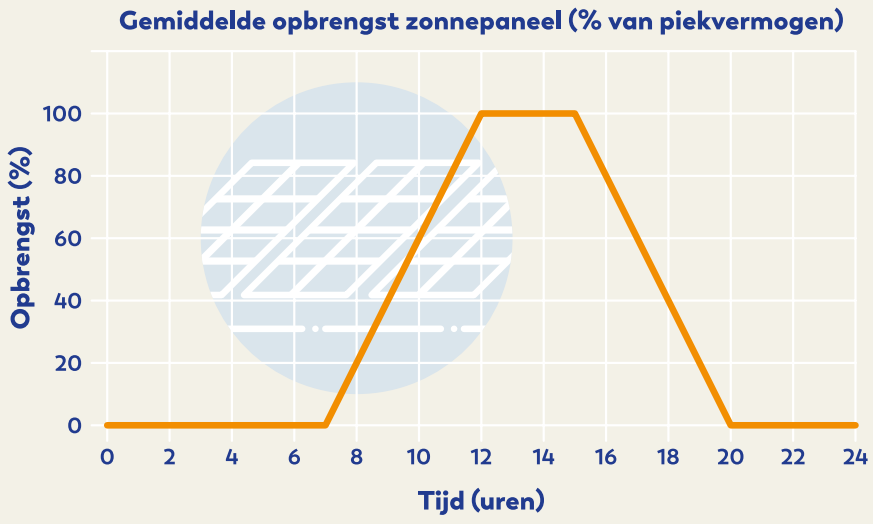
Vraag 6: Bereken hoeveel elektrische energie [MWh] een zonnepark van één voetbalveld over zijn levensduur produceert. Neem een capaciteitsfactor van 10%.

Een zonnepark stoot geen CO_2 uit tijdens het produceren van elektriciteit, maar alle zonnepanelen moeten wel worden gefabriceerd en geïnstalleerd. Een zonnepaneel is een ingewikkeld product om te fabriceren, waar veel verschillende materialen voor nodig zijn, inclusief zeldzame aardmetalen. Omdat deze materialen gemijnd en verwerkt moeten worden, vaak via chemische processen, gaat ook de productie van een zonnepaneel gepaard met de uitstoot van broeikasgassen. Daarnaast is op dit moment nog niet al het gebruikte materiaal herbruikbaar, waardoor er ook uitstoot vrijkomt bij de afvalfase. De totale uitstoot van de productie- en de afvalfase voor het zonnepark in ons voorbeeld is 800 ton CO_2-equivalent.

Vraag 7: Bereken met deze informatie de bouwvoetafdruk [kg CO_2-equivalent/MW] en de gemiddelde CO_2-voetafdruk [kg CO_2-equivalent/MWh] van dit zonnepark. Gebruik Tabel 9 om je antwoord in te vullen.

Heb je binnen jouw groepje per elektriciteitsbron de taken verdeeld? Help eerst de groepsgenoten die nog niet klaar zijn en ga dan met z'n allen door naar ***Vraag 16****.*

Figuur 9. ***Voorbeeldopbrengst van een zonnepaneel op een dag*** *(% van piekvermogen)*



6.2.3 Windenergie

Voor windenergie wordt er gekeken naar een windturbine op land aan de Nederlandse kust. Een grote windturbine heeft een vermogen van 2,00 MW en een levensduur van zo'n 25 jaar. Een windturbine zet windenergie om naar elektrische energie doordat de wieken aangesloten zijn op een generator met sterke magneten (hetzelfde als het principe van de dynamo). Figuur 10 laat de gemiddelde opbrengst over een jaar zien van een windturbine. De wind waait niet altijd even hard: in de zomer waait het bijvoorbeeld minder hard dan in de winter. Aan de kust, waar de wind het vaakst en het hardst waait, kan een windturbine een capaciteitsfactor van 40% halen. Dat wil zeggen, over een heel jaar levert de windturbine gemiddeld 40% van zijn piekvermogen.

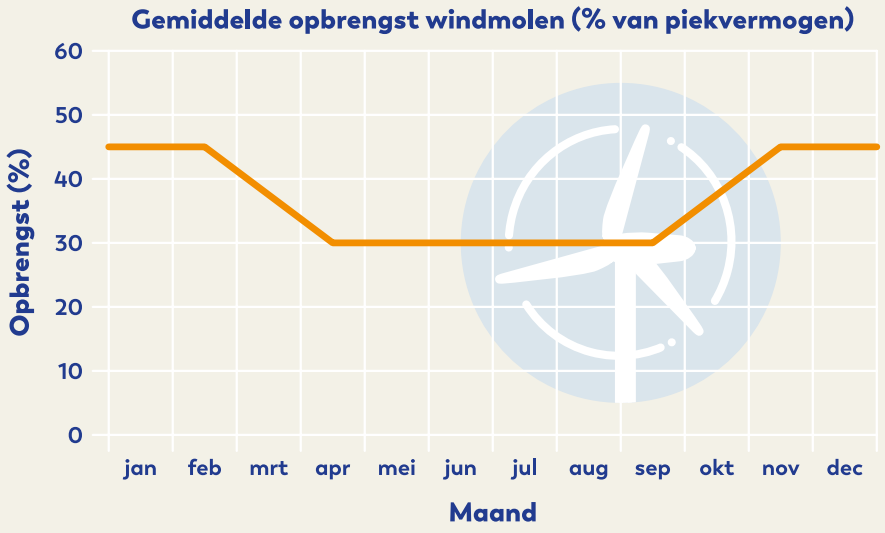
Vraag 8: Bereken hoeveel elektrische energie [MWh] een windturbine aan de kust over zijn levensduur produceert. Neem een capaciteitsfactor van 40%.

Een windturbine is groot. Dat is om de windenergie efficiënter in elektrische energie om te kunnen zetten (twee keer zo lange bladen geeft een vier keer zo groot oppervlak). Een windturbine van 2 MW is 100 meter hoog en heeft rotorbladen van 40 meter lang, waarvoor metalen en plastics nodig zijn. Daarnaast komt er tijdens gebruik veel kracht te staan op de wieken van de windturbine.
Om te zorgen dat de windturbine niet omwaait, moet hij goed gefundeerd zijn, waar veel beton voor nodig is. Deze materialen moeten worden verkregen, verwerkt, getransporteerd en gemonteerd.
In totaal levert de bouw van een windturbine 1.200 ton CO_2-equivalent. Omdat niet alle materialen goed herbruikbaar zijn, resulteert de afvalfase in 800 ton CO_2-equivalent.

Vraag 9: Bereken met deze informatie de bouwvoetafdruk [kg CO_2-equivalent/MW] en de gemiddelde CO_2-voetafdruk [kg CO_2-equivalent/MWh] van deze windturbine. Gebruik Tabel 9 om je antwoord in te vullen.

Heb je binnen jouw groepje per elektriciteitsbron de taken verdeeld? Help eerst de groepsgenoten die nog niet klaar zijn en ga dan met z'n allen door naar ***Vraag 16****.*

Figuur 10: Gemiddelde opbrengst windturbines per maand (% van piekvermogen)



6.2.4 Kolencentrale

Kolencentrales zijn er in allerlei soorten en maten. Bij een kolencentrale worden kolen verbrand in een grote ketel. Door de ketel loopt een buis met water. Door de warmte wordt het water omgezet in stoom. De stoom drijft een stoomturbine aan waardoor de elektriciteit wordt opgewekt, zie Figuur 11. De grootste kolencentrale van Europa, de Belchatów centrale in Polen, levert een elektrisch vermogen van 5.100 MW. In Nederland is een gebruikelijk vermogen voor een kolencentrale 800 MW.
Deze waarde gaan we ook gebruiken bij de rekenopdrachten.

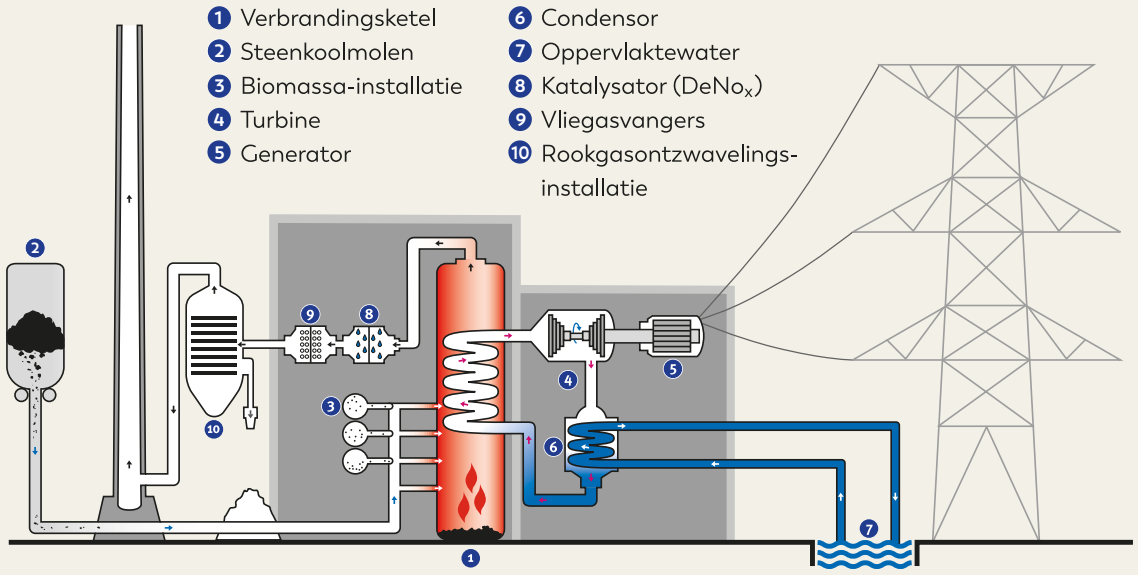
Een kolencentrale heeft een levensduur van ongeveer . Ondanks dat het niet waarschijnlijk is dat er nieuwe kolencentrales gebouwd gaan worden – het is de bedoeling is dat de huidige kolencentrales in Nederland in 2030 gaan sluiten – gebruiken we voor de opdrachten de volledige levensduur van een kolencentrale.

In principe kan een kolencentrale, op onderhoudstops na, de hele tijd stroom produceren. Omdat een kolencentrale echter makkelijk op en af te schakelen is, is dit niet het geval. Een kolencentrale produceert alleen wanneer het nodig is om aan de elektriciteitsvraag te voldoen. Als overdag de elektriciteitsvraag hoog is, produceert de kolencentrale op vol vermogen. Maar als 's nachts de elektriciteitsvraag laag is, schakelt hij af. Daarom is de capaciteitsfactor voor een kolencentrale over een jaar gemeten ongeveer 60%. Het feit dat het regelbaar is, is wel een voordeel ten opzichte van bijvoorbeeld zonne- en windenergie

Vraag 10: Bereken hoeveel elektrische energie een kolencentrale tijdens zijn volledige levensduur produceert. Neem een capaciteitsfactor van 60%.

Een nadeel van een kolencentrale is dat deze CO_2-equivalente uitstoot als bijproduct heeft tijdens het produceren van elektriciteit. In de levenscyclusanalyse moeten we dus niet alleen rekening houden met de uitstoot tijdens de bouw en de afvalfase, maar ook tijdens de elektriciteitsproductie.

Figuur 11. ***Schematische weergave van een kolencentrale*** *(Bron: EPZ)*



Bij het bouwen van een kolencentrale van 800 MW wordt ongeveer 1,20 Mton CO_2-equivalent uitgestoten. Alle onderdelen, vooral staal en beton, moeten verkregen, verwerkt, vervoerd en gemonteerd worden. Omdat na 50 jaar gebruik de materialen slecht herbruikbaar zijn, is er ook 0,90 Mton CO_2-equivalent aan afval. De centrale gebruikt tijdens de elektriciteitsproductie kolen.

Door de verbranding van kolen ontstaan broeikasgassen. Uiteindelijk stoot een kolencentrale 0,81 ton CO_2-equivalent per MWh uit in de operationele fase.

Vraag 11: Bereken de volledige uitstoot van een kolencentrale over zijn levensduur. Dit bestaat uit de uitstoot die vrijkomt tijdens de bouw en met het afval, maar ook de uitstoot die vrijkomt bij het produceren van elektriciteit.

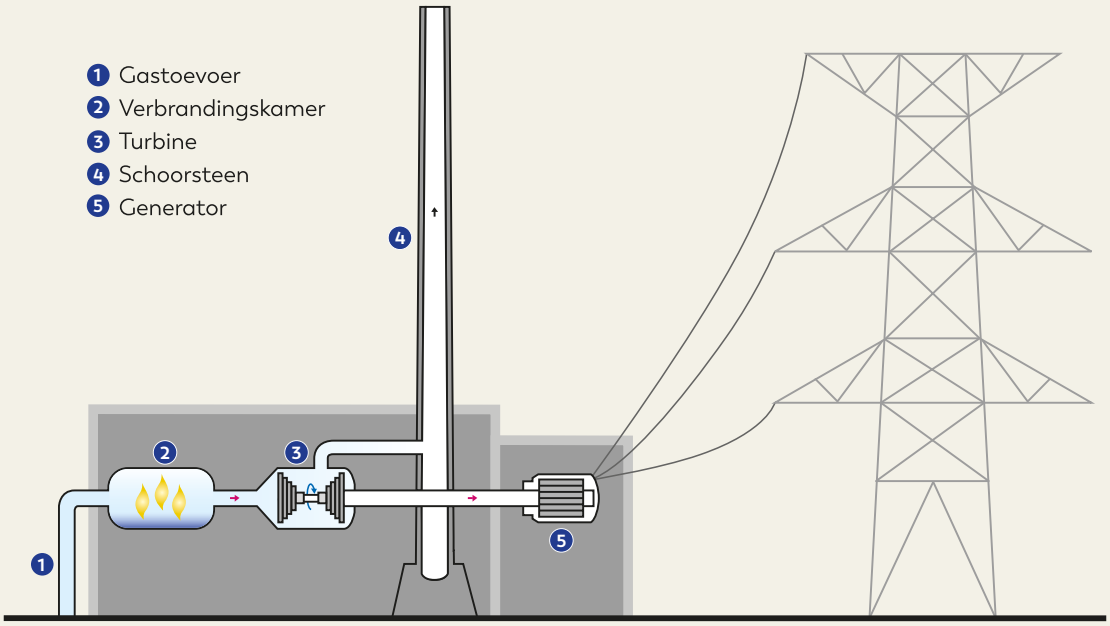
Vraag 12: Bereken de bouwvoetafdruk [kg CO_2-equivalent/MW] en de gemiddelde CO_2-voetafdruk [kg CO_2-equivalent/MWh] van deze kolencentrale. Gebruik Tabel 9 om je antwoord in te vullen.

Heb je binnen jouw groepje per elektriciteitsbron de taken verdeeld? Help eerst de groepsgenoten die nog niet klaar zijn en ga dan met z'n allen door naar ***Vraag 16****.*

6.2.5 Gascentrale

Een gasturbine heeft een verbrandingskamer. Hier wordt lucht en aardgas tegelijkertijd ingespoten en verbrand. De temperatuur stijgt tot 1.000 °C. Het gevolg hiervan is dat de samengeperste lucht gaat uitzetten. De uitgezette lucht laat een turbine draaien die een generator aandrijft om elektriciteit op te wekken. De uitgezette lucht heeft nog een temperatuur van 540 °C en gaat via de schoorsteen weer naar buiten. Zie Figuur 12 voor een schematisch overzicht. Vaak worden de hete uitlaatgassen nog gebruikt om een stoomturbine aan te drijven, zoals bij de kern- of kolencentrale.
Er staan circa 45 gascentrales in Nederland, ieder met een verschillend vermogen. Voor de reken-opdrachten gebruiken we een grote gascentrale van 400 MW.

Figuur 12. ***Schematische weergave van een gascentrale*** *(Bron: EPZ)*



Een gascentrale heeft een levensduur van ongeveer 30 jaar. Ook al werken gascentrales op fossiele brandstoffen, ze zullen in Nederland voorlopig nodig blijven. Dit komt omdat gascentrales makkelijk op- en afgeschaald kunnen worden en dus het mogelijke tekort kan opvullen van een CO_2-vrij elektriciteitsnet in ontwikkeling. Door de op- en afschaalfunctie is de capaciteitsfactor van een gascentrale ongeveer 60%.

Vraag 13: Bereken hoeveel elektrische energie een gascentrale tijdens zijn volledige levensduur produceert. Neem een capaciteitsfactor van 60%.

Een nadeel van een gascentrale is dat deze CO_2-uitstoot tijdens het produceren van elektriciteit. In de levenscyclusanalyse moet er dus niet alleen rekening gehouden worden met de uitstoot tijdens de bouw en het afval, maar ook tijdens de operationele fase.

Bij het bouwen van een gascentrale van 400 MW wordt ongeveer 350 kton CO_2-equivalent uitgestoten. Alle onderdelen, vooral staal en beton, moeten verkregen, verwerkt, vervoerd en gemonteerd worden. Omdat na 30 jaar gebruik de materialen slecht herbruikbaar zijn, resulteert de afvalfase in 300 kton CO_2-equivalent.

De centrale gebruikt tijdens de elektriciteitsproductie aardgas, grotendeels methaan. Door de verbranding van aardgas ontstaan broeikasgassen. Uiteindelijk stoot een gascentrale 0,48 ton CO_2-equivalent per MWh uit.

Vraag 14: Bereken de volledige uitstoot van een gascentrale over zijn levensduur. Dit bestaat uit de uitstoot die vrijkomt tijdens de bouw en met het afval, maar ook de uitstoot die vrijkomt bij het produceren van elektriciteit.

Vraag 15: Bereken de bouwvoetafdruk [kg CO_2-equivalent MW^{-1}] en de gemiddelde CO_2-voetafdruk [kg CO_2-equivalent MWh^{-1}] van deze kolencentrale.
Gebruik Tabel 9 om je antwoord in te vullen.

Vraag 16: Nu Tabel 9 volledig is ingevuld, wat valt je op aan de verzamelde gegevens?
Vergelijk de gegevens met elkaar en ga hier met elkaar over in discussie.

7 Veiligheidskundige

Als veiligheidskundige ben je verantwoordelijk voor de veiligheid van een kerncentrale. Veiligheid is hét nummer één begrip bij een kerncentrale. Regelgeving moet ervoor zorgen dat een kerncentrale, vooral in operatie, geen nadelige effecten heeft op mens en milieu.

Deze nadruk op veiligheid komt doordat er in een kerncentrale gewerkt wordt met radioactief materiaal. Dit zendt ioniserende straling uit die je niet kunt zien/ruiken/horen/voelen/proeven. In dit hoofdstuk leer je hoe er in een kerncentrale veilig met straling wordt gewerkt, welke systemen de kans op een ongeval zo klein mogelijk maken en hoe er met radioactief afval wordt omgegaan. Binnen de stralingswereld geldt: het gebeurt veilig of het gebeurt niet!

De volgende leerdoelen komen aan bod in dit hoofdstuk:
Aan het einde van de les kan je...

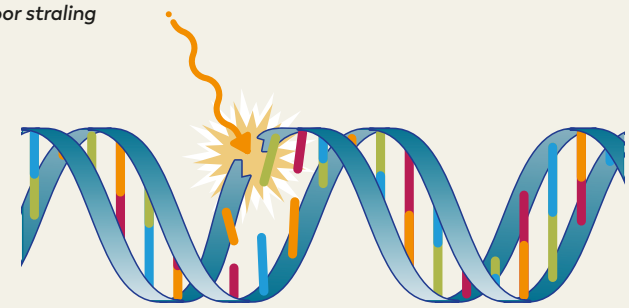
1. *Rekenen met de formule voor de halveringsdikte:* $I(d) = I(0) \cdot ½^{d/d_{½}}$;
2. *De impact van straling op het menselijk lichaam uitleggen en benoemen hoe je de stralingsblootstelling zo laag mogelijk kan houden;*
3. *Uitleggen welke functies water in een reactorkern heeft;*
4. *Benoemen welke veiligheidslagen er gebruikt worden in een kerncentrale;*
5. *Vertellen hoe er met radioactief afval wordt omgegaan en om hoeveel onbruikbaar afval het gaat.*

7.1 STRALINGSBESCHERMING

Als door het verval van een radioactief deeltje straling of deeltjes vrijkomen die genoeg energie hebben om een elektron van een atoom weg te slaan, spreek je van ioniserende straling.

Ioniserende straling kan in het lichaam schade aanrichten aan het DNA in cellen, zoals in Figuur 13 te zien is. Niet alle DNA-beschadigingen hebben gevolgen: in de meeste gevallen wordt de schade gerepareerd of gaat de cel dood. Als de DNA-schade niet wordt hersteld of als de reparatie niet goed gaat, verhoogt dat de kans op het ontstaan van kanker. In het dagelijks leven staan we continu bloot aan ioniserende straling: er is namelijk constante achtergrondstraling aanwezig vanuit de grond, lucht en gebouwen om ons heen. Dit betekent niet dat blootstelling aan straling altijd kanker veroorzaakt. Stralingseffecten zijn kansprocessen, waardoor straling vooral gevaarlijk is in grote hoeveelheden. Het is daarom belangrijk om de stralingsblootstelling altijd zo laag mogelijk te houden.

Figuur 13. Schade aan DNA door straling



Vraag 1: De blootstelling aan straling wordt uitgedrukt in de grootheid effectieve dosis, met als eenheid Sievert [1 Sv = 1 J/kg]. De gemiddelde effectieve dosis door natuurlijke achtergrondstraling in Nederland is 1,7 mSv/jaar. Als je binnen een paar kilometer rond een kerncentrale woont, ontvang je van de kerncentrale zelf daarbovenop gemiddeld $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ mSv/jaar. Hoeveel uur aan achtergrondstraling is dit?

Hoe wordt er voor gezorgd dat de stralingsblootstelling zo laag mogelijk wordt gehouden bij bronnen die veel ioniserende straling uitzenden, zoals een reactorkern? De drie belangrijkste maatregelen zijn:

1. ***Afstand***
   De dichtheid van straling neemt af met de afstand tot de stralingsbron. Dit komt doordat de bron vaak gelijkmatig in alle richtingen straalt waardoor straling zich over een steeds groter oppervlakte verdeelt (omgekeerd kwadratisch verband).

2. ***Afscherming***
   Door een object tussen een persoon en een stralingsbron te plaatsen, zal een deel van de straling tegen het materiaal botsen en zal de stralingsintensiteit afnemen.

3. ***Tijdsduur***
   Hoe korter iemand zich bij een stralingsbron bevindt, hoe minder straling diegene ontvangt en dus hoe kleiner de kans op schadelijke effecten.

Het afschermen van deeltjesstraling, zoals bèta- en alfastraling kan relatief gemakkelijk.
Een kunststof plaat van één centimeter dik is over het algemeen genoeg om deeltjesstraling volledig tegen te houden. De dikte van het materiaal dat nodig is om de deeltjes volledig tegen te houden (af te schermen) noemen we dracht.

Het afschermen van fotonenstraling, zoals gamma- en röntgenstraling, werkt anders.
De effectiviteit van afscherming tegen fotonenstraling verschilt per materiaal en is afhankelijk van de energie van de fotonen. Hiervoor wordt het begrip halveringsdikte gebruikt. Dit is de materiaaldikte waarbij de stralingsintensiteit halveert. Dit wordt vaak gegeven in centimeters. In BINAS tabel 28F vind je de halveringsdiktes van een aantal materialen. Je kunt met deze waardes de overgebleven intensiteit I(d) na de afscherming, bij een bepaalde dikte van het materiaal, uitrekenen met:

$$I(d) = I(0) \cdot \tfrac{1}{2}^{d/d_{\frac{1}{2}}},$$

waar $I(0)$ de beginintensiteit is, d de dikte van het materiaal en $d_{1/2}$ de halveringsdikte van het materiaal in centimeters. Qua materiaal wordt lood en beton veelgebruikt om de intensiteit van fotonenstraling te verminderen.

Voorbeeld: halveringsdikte

Beton heeft voor gammastraling van 500 keV een halveringsdikte van 0,75 cm. Bereken met hoeveel procent de stralingsintensiteit afneemt als gammastraling door een stuk beton van 3,0 cm dik gaat.

1. Bepalen welke variabelen gegeven zijn in de formule voor de halveringsdikte:
   $d_{½} = 0{,}75$ cm
   $d = 3{,}0$ cm
2. Formule invullen, door voor $I(0)$ 100% of 1,00 te nemen. Dit kan omdat we alleen geïnteresseerd zijn in wat de stralingsvermindering in dit materiaal is:
   $I(3{,}0\ cm) = 100\% \cdot ½^{3{,}0/0{,}75} = 6{,}25\%$
3. Omrekenen van procentueel overgebleven stralingsintensiteit naar vermindering:
   100% – 6,25% = 93,75%
   ~94% vermindering van stralingsintensiteit na 3,0 cm beton.

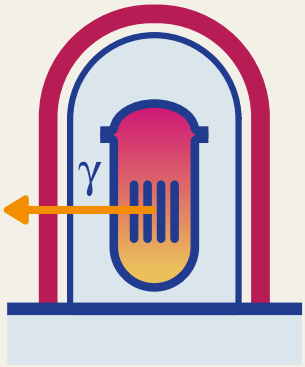
Vraag 2: Bij het verval van radioactieve deeltjes in de reactorkern komt veel gammastraling vrij. Voordat deze straling buiten het reactorgebouw komt, moet het eerst door vier verschillende materiaallagen heen: water, ijzer van het reactorvat, lucht en uiteindelijk het beton van het reactorgebouw (zie Figuur 14). Tabel 11 bevat informatie over de halveringsdiktes van deze materialen voor gammastraling van 50 keV en geeft ook de afstand weer die een gamma-foton vanuit de reactorkern door elk materiaal aflegt.

Welk deel van de reactor zorgt voor de grootste afname van gammastraling?
Bereken daarvoor voor ieder materiaal de overgebleven intensiteit na de afgelegde weg.

Tabel 11. Halveringsdikte voor gammastraling (50 keV) per materiaal

	Halveringsdikte [cm]	Materiaaldikte [cm]
Water	3,08	180
IJzer	0,049	20
Lucht	2.800	1.000
Beton	0,75	150

Figuur 14. Het pad van gamma-straling door de veiligheidslagen van een kerncentrale



7.2 WATER VOOR DE VEILIGHEID

In hoofdstuk 1 heb je geleerd hoe kerncentrales elektriciteit opwekken. Nog even samengevat: door middel van de energie die vrijkomt bij kernsplijtingen kan water worden omgezet in stoom, die vervolgens turbines aandrijft om elektriciteit te produceren. Omdat er veel energie vrijkomt uit de reactorkern tijdens standaardoperatie is er koelwater nodig om de kern op een constante temperatuur te houden. Bij het merendeel van de bestaande kerncentrales ligt de temperatuur van het koelwater dat langs de kern stroomt rond de 300 °C.

Het is belangrijk dat er constant koelwater door de reactorkern gaat: bij een gebrek aan koelwater stijgt de kerntemperatuur, wat bij temperaturen boven de 700 °C kan leiden tot het smelten van de metalen in de behuizing van de brandstofstaven. Als de hoofdpompen die voor een constante koelwaterstroom zorgen onvoorzien uitvallen, bijvoorbeeld door een stroomstoring, kan er meteen worden overgeschakeld op reservepompen. Naast pompen zijn ook andere veiligheidssystemen in een kerncentrale dubbel uitgevoerd om het risico op ongevallen zo minimaal mogelijk te houden. Het is essentieel dat deze veiligheidssystemen bij elke (nood)situatie blijven werken.

Om een kerncentrale te blijven koelen, is er een grote hoeveelheid water nodig. Hoeveel precies hangt af van het type kerncentrale: gemiddeld is er voor elke opgewekte MWh ongeveer 2000 liter water nodig. Dit is de reden dat kerncentrales altijd naast zee of een grote rivier geplaatst worden.
Een deel van het koelwater zal iets verwarmd weer teruggaan in de rivier of zee, of gaat via koeltorens de lucht in als waterdamp (zie Figuur 15). Hierbij wordt ervoor gezorgd dat het geloosde koelwater binnen de milieuregelgeving valt, waarin limieten voor temperatuur en radioactiviteit gegeven zijn.
Let op dat het water het thermische vermogen van de reactorkern koelt en de benodigde hoeveelheid water dus ook schaalt met het thermische vermogen. De totale opgewekte elektrische energie, in MWh, is in dit geval echter een gebruikelijkere eenheid.

Vraag 3: De nieuwe generatie kerncentrales kunnen een elektrisch vermogen van 1.500 MW hebben. Hoeveel liter per uur hebben deze kerncentrales nodig? Hoeveel m^3/s is dit?
Neem aan dat deze kerncentrales ook 2.000 L/MWh nodig hebben.
Weet je niet meer hoe je de elektrische energie kan berekenen? Kijk dan terug in Hoofdstuk 2.5!

Figuur 15. ***De koeltorens van kerncentrale Doel in België*** *(ANP, 2020)*

Verdieping: meer functies van water

Naast de gecombineerde functie van koelwater en stoom voor de turbine, is water voor nog twee andere redenen heel bruikbaar:

1. Neutronen uit een splijtingsreactie hebben veel energie. De kans dat een neutron tegen een ander uraniumdeeltje botst en voor een nieuwe splijting zorgt, is het grootst als het neutron een relatief lage energie heeft. Het moet dus gemodereerd (afgeremd) worden. Dit kan effectief gedaan worden met water, wat water de functie geeft al moderator.
2. Water is een uitstekend oplosmiddel. In een kerncentrale wordt deze eigenschap gebruikt om boor op te lossen. Boor "absorbeert" neutronen en kan er dus mede voor zorgen dat de kettingreactie wordt afgeremd.

Vraag 4: De Maas is een van de grootste rivieren van Nederland. Bij een van de meetstations langs de Maas wordt een stroomsnelheid van 200 m^3/s gemeten, het zogenaamde gemeten debiet. Hoeveel kerncentrales van 1.500 MW zouden er in theorie met dit debiet gekoeld kunnen worden?

Wist je dat ...

in de kern van de Hoge Flux Reactor (HFR) in Petten, een onderzoeksreactor van 45 MW, het koelwater in ~1 seconde door de reactorkern stroomt en daarbij ongeveer 10 °C warmer wordt?

7.3 BESCHERMING TEGEN BESMETTING MET RADIOACTIEVE STOFFEN

Afschermen of afstand nemen is geen optie meer zodra je radioactieve stoffen op je huid of in je lichaam krijgt. Dit noemen we radioactieve besmetting. Als de besmetting zich voordoet op de huid, kunnen de radioactieve stoffen vaak goed afgewassen worden. Het is een ander verhaal wanneer je radioactieve stoffen inademt of doorslikt. De radioactieve bron bevindt zich dan in je lichaam en verdwijnt daar alleen nog door radioactief verval en uitscheiding via de urine/ontlasting.

Vraag 5: In een banaan zit veel kalium. Van het kalium in een banaan is 0,012% de radioactieve stof kalium-40. Een banaan van 150 gram geeft door dit isotoop ongeveer 0,10 µSv aan effectieve dosis. Hoeveel bananen zou je in theorie moeten eten om evenveel effectieve dosis op te lopen om de jaarlijkse achtergrondstraling binnen te krijgen (zie vraag 1)?

Er is een kans op besmetting als er zogeheten radioactieve vrijzetting plaatsvindt. Dat wil zeggen dat radioactieve materialen vrijkomen in de lucht of op een andere onbedoelde manier de kerncentrale verlaten. De veiligheidsvoorzieningen in een kerncentrale zijn erop gericht om dat te voorkomen, of het effect van vrijzetting, wanneer dit toch gebeurt, voor mens en milieu zo beperkt mogelijk te houden.

Er is een kans op besmetting als er zogeheten radioactieve vrijzetting plaatsvindt. Dat wil zeggen dat radioactieve materialen vrijkomen in de lucht of op een andere onbedoelde manier de kerncentrale verlaten. De veiligheidsvoorzieningen in een kerncentrale zijn erop gericht om dat te voorkomen, of het effect van vrijzetting, wanneer dit toch gebeurt, voor mens en milieu zo beperkt mogelijk te houden.

De belangrijkste veiligheidsvoorzieningen zijn de verschillende veiligheidslagen, van kleine pellets tot de buitenmuur, zoals te zien in Figuur 16. Om te beginnen bij de eerste veiligheidslaag wordt er gekeken naar een zogenaamde **pellet** 1. Dit zijn kleine cilinders van ongeveer 1 x 1 cm, gemaakt van uraniumoxide (UO_2). Deze bevatten dus het radioactieve materiaal dat gebruikt wordt voor de splijtingsreactie en pellets worden voor die reden ook wel de brandstof van de kerncentrale genoemd. Tijdens operatie van de kerncentrale blijven de splijtingsproducten en de splijtstof in de pellet zitten, wat de besmettingskans minimaliseert.

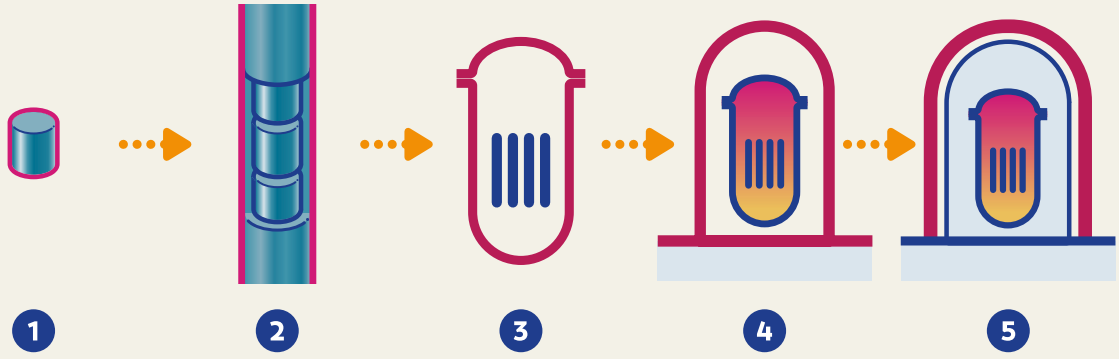
Pellets worden op elkaar gestapeld en omhuld door een metaallegering. Dit omhulsel wordt een **splijtstofstaaf** 2 genoemd, waarvan de lengtes variëren tussen de 1 en 5 meter. Deze splijtstofstaven worden gebundeld en in een reactorvat geplaatst. Het **reactorvat, en het daarbij behorende gesloten primaire circuit** 3 dat voor de koeling zorgt, is op zijn beurt de derde veiligheidslaag.

Het reactorvat staat in een ruimte die omhuld wordt door het reactorgebouw. Het omhulsel van het reactorgebouw bestaat uit een binnen- en buitenkant. De **binnenkant van het reactorgebouw** 4 zorgt ervoor dat het reactorgebouw compleet afgesloten is van de omgeving. Ook is er in het binnenste omhulsel onderdruk. Dat wil zeggen dat de luchtdruk daar lager is dan buiten, waardoor lucht altijd van buiten naar binnen gaat. Hierdoor kunnen radioactieve stoffen niet zomaar ontsnappen. De **buitenkant van het reactorgebouw** 5 is een koepel, die de kerncentrale beschermt tegen gevaren van buitenaf. Beide omhulsels zijn gemaakt van gewapend beton dat ruim 1 meter dik kan zijn.

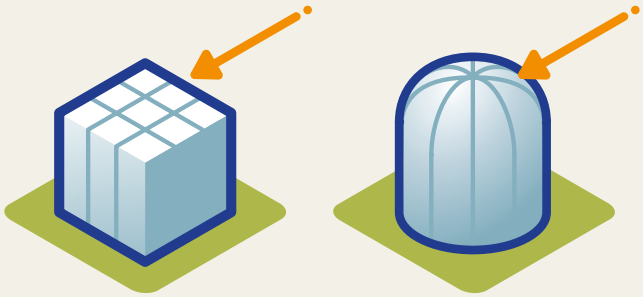
In de volgende situatie wordt er gekeken naar de functie van de buitenkant van een reactorkoepel. Stel dat een groot vliegtuig de controle kwijt is over de besturing en precies op een kerncentrale terecht komt. Het vliegtuig heeft tijdens de impact een snelheid van 1.440 km/uur en weegt 180.000 kg. Bij de impact komt het vliegtuig in 1 seconde tot stilstand.

Vraag 6: Bereken de kracht die het vliegtuig op de kerncentrale uitoefent tijdens de crash. Gebruik hierbij $F_{netto} = m \cdot a$.

Figuur 16. De veiligheidslagen van een kerncentrale



Figuur 17. Schematische weergave van een kubus- en bolvormige reactorkoepel



Vraag 7: Stel we hebben twee ontwerpen voor de “koepel”: een kubusvorm en een halve bol (zie Figuur 17). Deze “koepel” moet stevig genoeg zijn zodat het de impact van een vliegtuig kan opvangen. De zijden van de kubus zijn 60 meter lang en de straal van de halve bol is 30 meter.
Bereken de oppervlakte van het vlak waar het vliegtuig op neerstort in het geval van de kubus en de bol.

Vraag 8: Gewapend beton van 1,5 meter dik kan per vierkante meter een impact van 15 kN weerstaan zonder kapot te gaan.
Bereken de maximale impact voordat het gebouw het begeeft voor beide ontwerpen.
Welk gebouw is het meest geschikt om te gebruiken als ontwerp?

Risicobeleving

Risicoanalyse is een belangrijk onderwerp bij nucleaire installaties. Hierbij wordt gekeken naar de kans dat een potentieel incident optreedt en het effect van dat incident:

Risico = kans · effect

Volgens psychologisch onderzoek zijn mensen niet zo goed in het inschatten van kansen. Dit komt omdat het effect van een incident vaak veel beeldender is en daarmee beter voor te stellen dan de kans dat een incident gebeurt. Er is sprake van een verschil tussen het reële risico en de ervaring van het risico (de risicobeleving). Een voorbeeld hiervan is de kans van het optreden van een kernsmeltscenario: alhoewel de kans hiervan voor West-Europese ontwerpen klein is (ordegrootte 0,0001% per reactorjaar) weegt het beeldend effect van Tsjernobyl en Fukushima vaak veel zwaarder.

Kan je nog meer voorbeelden verzinnen waarbij het risico en de risicoperceptie van elkaar verschillen?

7.4 RADIOACTIEF AFVAL

Veiligheid van kernenergie speelt niet alleen een rol binnenin de kerncentrale. Een kerncentrale maakt als gevolg van de elektriciteitsproductie namelijk radioactief afval, een veelbesproken onderwerp in de discussie rondom kernenergie. Radioactief afval bestaat onder andere uit het niet-gespleten uranium en de splijtingsproducten, waarvan meer dan zestig isotopen radioactief zijn.
Ongeveer 95% van het afvalvolume kan worden hergebruikt in bijvoorbeeld nieuwe splijtstof.
De andere 5% van het volume bestaat voornamelijk uit onbruikbare splijtingsproducten, die het merendeel van de radioactiviteit bevatten (~95%) en lang actief kunnen blijven. Dit onbruikbare gedeelte van het radioactief afval moet voor een langere tijd veilig opgeslagen worden:
het wordt verglast, in een roestvrijstalen container geplaatst en voorzien van een betonwand.

Vraag 9: De halveringsdikte van gammastraling van 10 MeV in lood is 1,23 cm.
Hoeveel lood is nodig om 99% van de straling af te schermen?
Gebruik de formule uit Paragraaf 7.1.

Vraag 10: Wat moet de dikte van het lood zijn om 99,9% van de straling af te schermen?

Bij elke centimeter extra inpakmateriaal wordt de straling exponentieel afgeschermd. Het verpakte radioactieve afval wordt de eerste honderd jaar bovengronds opgeslagen, omdat het inpakmateriaal verwarmd wordt door het absorberen van de straling. Na honderd jaar is door radioactief verval het stralingsniveau, en dus de warmteproductie, afgenomen en is het afval voldoende afgekoeld.

Maar om hoeveel radioactief afval gaat het eigenlijk? Zoals besproken in de theorieles zit er in een kilogram splijtstof relatief veel energie in vergelijking met bijvoorbeeld kolen. Dit betekent dat er in termen van massa en volume relatief weinig materiaal nodig is voor elektriciteitsproductie en dus ook dat het afvalvolume klein is (waarvan ongeveer 95% kan worden hergebruikt).
Een schatting is dat voor een kerncentrale met een elektrisch vermogen van 1.000 MW het onbruikbare afvalvolume ongeveer 2-3 m^3 per jaar is.

Vraag 11: Reken 3,0 m^3 radioactief afval om naar kilogram. Gebruik hierbij om een schatting te maken de dichtheid van uranium: 19 g/cm^3.

Vraag 12: Een kerncentrale met een elektrisch vermogen van 1.000 MW wekt $7{,}889 \cdot 10^9$ kWh aan elektriciteit per jaar op. Een gemiddeld huishouden van 4 personen gebruikt $3{,}840 \cdot 10^3$ kWh aan elektriciteit per jaar.
Bereken de afvalmassa dat per huishouden geproduceerd wordt in gram.

Om aan de gemiddelde jaarlijkse elektriciteitsbehoefte van één persoon te voldoen, zou er per jaar ongeveer 5-10 gram aan onbruikbaar afval geproduceerd worden. Alhoewel dit een relatief kleine hoeveelheid is, neemt dit niet weg dat het afval voorzien moet worden van een veilige en lange-termijn opslagplek. Vooralsnog is het idee om het afval na de afkoelperiode diep ondergronds op te slaan in een eindberging, waar het voor een lange tijd blijft liggen.
Daarnaast wordt er veel onderzoek gedaan naar innovatieve en alternatieve technieken en methodes om minder radioactief afval te produceren en om meer te recyclen.

Soortgelijk onderzoek is ook gaande voor andere CO_2-vrije elektriciteitsbronnen. Bij windturbines bijvoorbeeld, vormen de turbinebladen een uitdaging voor recycling, en door de complexiteit van zonnepanelen worden er methoden gezocht om hun recycling economisch aantrekkelijk te maken.

Daarnaast zal de recyclingsector van windturbines en zonnepanelen zich nog moeten ontwikkelen om de toekomstige capaciteitsbehoeften aan te kunnen: de meerderheid van de huidige windturbines en zonnepanelen is recent geïnstalleerd en zal pas in de komende twee decennia het einde van hun levensduur bereiken. Innovatie in recycling, samen met een veilige en milieuvriendelijke opslag van niet-recyclebaar afval, van kern-, wind- en zonne-energie is een belangrijke stap richting de toekomst van een duurzame elektriciteitssector.

8 Challenge

Deze les ga je jouw opgedane kennis delen met je klasgenoten van een andere expertrol. Lees de opdracht eerst goed door voordat je aan de slag gaat en volg eventuele instructies van je docent op.

Delen van opgedane kennis (15 minuten)

Allereerst is het tijd om jouw expertise te delen en te combineren met die van je klasgenoten! Daarvoor vormen jullie of de docent groepjes van 3 tot 6 personen, waarbij er minstens één van elke expertise in het groepje aanwezig is (er kunnen dus meerdere experts van hetzelfde onderwerp in het groepje aanwezig zijn). Elke expert vertelt vervolgens aan de rest van het groepje waar ze de afgelopen twee lessen mee bezig zijn geweest en wat ze hebben geleerd over het onderwerp.
Een paar belangrijke punten om hierbij te bespreken zijn:

- *Welke kennis heb je opgedaan bij jouw expertise (met welke leerdoelen ben je bezig geweest)?*
- *Wat is het interessantste dat je hebt geleerd in jouw hoofdstuk?*
- *Welke mening heb je gevormd over het onderwerp bij jouw expertise?*

Het is belangrijk dat de bespreking per expertise niet veel langer dan 5 minuten duurt, zodat er nog genoeg tijd overblijft voor het overleg dat zal volgen.
Degenen die luisteren naar de expert krijgen een aantal luistervragen, zodat je er zeker van bent dat je de leerdoelen van elke expertrol meekrijgt. Je schrijft de antwoorden op. Is een vraag niet beantwoord? Dan kun je dus een tegenvraag stellen.

Overleg over de fossielvrije toekomst (~20 minuten)

Na het delen van de opgedane kennis met elkaar gaan jullie in overleg over de hoofdvraag:

- *Hoe zouden jullie een toekomst zonder fossiele brandstoffen inrichten?*

Geef iedereen de kans en tijd om inzichten vanuit de expertrollen te delen. Gebruik de informatie die jullie uit de lessen hebben gehaald en vooral ook eigen meningen. Stel hierbij vragen en respecteer elkaars meningen. Onderbouw de keuzes die gemaakt worden. Als jullie vast komen te zitten, kunnen jullie gebruik maken van de leerdoelen en luistervragen van elke expertrol. Denk ook bijvoorbeeld aan:

- *Wat zijn in jullie ogen de belangrijkste voor- en nadelen van de elektriciteitsbronnen?*
- *Hoeveel ruimte is er in Nederland voor duurzame elektriciteitsbronnen?*
- *Hoe zit het met afvalverwerking van duurzame elektriciteitsbronnen?*

Bereid vervolgens een kort stukje voor (van ~1 minuut) om straks jullie plan als antwoord op de hoofdvraag voor te leggen aan de andere groepjes.

Bespreking met de hele klas (~10 minuten)

Als laatste legt ieder groepje hun antwoord plus argumenten voor aan de rest van de klas.
Let bij de andere groepjes op of er argumenten zijn waar je zelf nog niet aan gedacht had. Worden er argumenten genoemd waar je het misschien niet mee eens bent of waar je een aanvulling op hebt? Ga dan vooral in discussie!

9 Begrippenlijst

Eenheden worden in de haakjes '[ ]' gegeven in hun meest voorkomende vorm

Capaciteitsfactor	De verhouding tussen de werkelijke en maximale elektriciteitsproductie in dezelfde periode [%].
Carbon footprint	De hoeveelheid uitgestoten broeikasgassen bij een bepaald product of proces [kg CO_2-equivalent].
Elektriciteitsbron	Een installatie die energie omzet in elektriciteit.
Elektriciteits-productie	De hoeveelheid elektrische energie die wordt geproduceerd in een bepaalde periode [TWh].
Elektriciteitsverbruik	De hoeveelheid elektrische energie die wordt verbruikt in een bepaalde periode [TWh].
Elektrische stroom	De hoeveelheid lading die per seconde langs een bepaald punt in een geleider stroomt.
Elektrisch vermogen	De hoeveelheid elektrische energie die wordt opgewekt per seconde [W = J/s].
Fossiele brandstof	Brandstoffen die ontstaan zijn uit miljoenen jaren oude resten van plantaardige materialen. Bij de verbranding ervan komt thermische energie en CO_2 vrij.
Ioniserende straling	Straling of deeltjes met voldoende energie om een elektron van een atoomkern weg te slaan en deze te ioniseren.
Isotoop	Atomen van hetzelfde element, dus met hetzelfde aantal protonen, waarbij het aantal neutronen verschilt.
Kerncentrale	Een nucleaire installatie waar in de reactorkern kernsplijting van splijtbaar materiaal plaatsvindt. De thermische energie die hierbij vrijkomt kan gebruikt worden voor elektriciteitsopwekking.

Kernongeval	Een situatie waarbij radioactieve stoffen en/of ioniserende straling onbedoeld vrijkomen in het milieu (biosfeer). Als de gezondheid van een grote groep mensen in een gebied rondom de nucleaire installatie in gevaar komt door een kernongeval, spreek je van een kernramp.
Meltdown (kernsmelt)	Incident waarbij de reactorkern oververhit raakt door verlies aan koelvermogen met als gevolg het smelten van de kern.
Kernsplijting	Het proces waarbij een atoomkern zich splijt in twee of meer lichtere kernen en waarbij energie vrijkomt.
Levenscyclusanalyse (LCA)	Een methode om de totale milieubelasting van een product te bepalen over de gehele levenscyclus: van winning van grondstoffen tot afvalverwerking.
Massadefect	Het verschil in massa voor en na kernsplijting of fusie door de verandering van bindingsenergie.
Piekverbruik	Het hoogste elektriciteitsverbruik in een bepaalde periode [GW].
Radioactief afval	Afval dat radioactief materiaal bevat en veilig en gecontroleerd opgeslagen moet worden.
Radioactief materiaal	Materiaal dat instabiele atoomkernen bevat, die spontaan vervallen waarbij zij ioniserende straling kunnen uitzenden.
Radioactief verval	Een proces waarbij een instabiele atoomkern spontaan ioniserende straling uitzendt en zo energie kwijtraakt en daarmee stabiel of stabieler wordt. Hierbij ontstaat een isotoop van hetzelfde of een ander element.
Radioactieve vrijzetting	Het ontsnappen van radioactief materiaal uit een nucleaire installatie ten gevolge van een ongeval.
Reactorkern	Het deel van een kerncentrale waar de brandstofelementen zich bevinden en kernsplijting plaatsvindt.
Vermogensdichtheid	De hoeveelheid elektrisch vermogen per oppervlakte-eenheid [MW/km^2].

NRG
PALLAS

Nuclear. For Life.

www.nrg.eu