



## Kernenergie: vloek of zege?

Kernenergie, is het een zege of juist een vloek voor de toekomst? Deze discussie is weer heel actueel geworden sinds het ongeluk in Fukushima (Japan, maart 2011). In deze les worden eerst de belangrijkste aspecten (afval, veiligheid en duurzaamheid) van kernenergie behandeld, waarna deze les wordt afgesloten met een debat over de vraag of kernenergie nu wel of niet de toekomst zou moeten zijn.

### Deel 1: Afval



Afbeelding 1 De kerncentrale van Borssele

In de kerncentrales die we in deze lessenserie bestuderen, wordt verrijkt uranium als brandstof gebruikt. Natuurlijk uranium bevat 0,7%  $^{235}\text{U}$  en 99,2%  $^{238}\text{U}$ , voor gebruik in de kernreactor is het gehalte aan  $^{235}\text{U}$  in een verrijkingsfabriek verhoogt tot ongeveer 3%. Bij de splijting hiervan komen verschillende isotopen vrij, welke samen met het overgebleven, ongebruikte uranium verwerkt moet worden als radioactief afval. Al deze isotopen hebben verschillende halfwaardetijden, en ze komen in verschillende mate voor in het afval. Al deze variatie in het afval zorgt er voor dat de bewaartijd hiervan lastig te bepalen is. Om dit probleem aan te pakken kijken we eerst wat de samenstelling van het afval is, en aan de hand daarvan hoe lang we dit moeten bewaren. Tot slot bekijken we nog kort de logistieke opgave, want we moeten ook nog een plek hebben waar we het kunnen opslaan.

#### Samenstelling

Allereerst de samenstelling. In het afval komen dus verschillende isotopen voor. De volgende isotopen zijn de belangrijkste hiervan:

Tabel 1 Gegevens isotopen in kernafval

Isotoop	Voorkomen (%)	Energie per verval (keV)	Halfwaardetijd (jaar)	Kort-/ langlevend
Cesium-135 ( $^{135}\text{Cs}$ )	6,9110	269		
Cesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ )	6,3370	1176		
Technetium-99 ( $^{99}\text{Tc}$ )	6,1385	294		
Zirconium-93 ( $^{93}\text{Zr}$ )	5,4575	91		
Strontium-90 ( $^{90}\text{Sr}$ )	4,5050	2826		
Krypton-85 ( $^{85}\text{Kr}$ )	0,2180	687		
Tin-126 ( $^{126}\text{Sn}$ )	0,1084	4050		

#### OPDRACHT 1 Halfwaardetijd

**A** Wat is een halfwaardetijd?

---

---

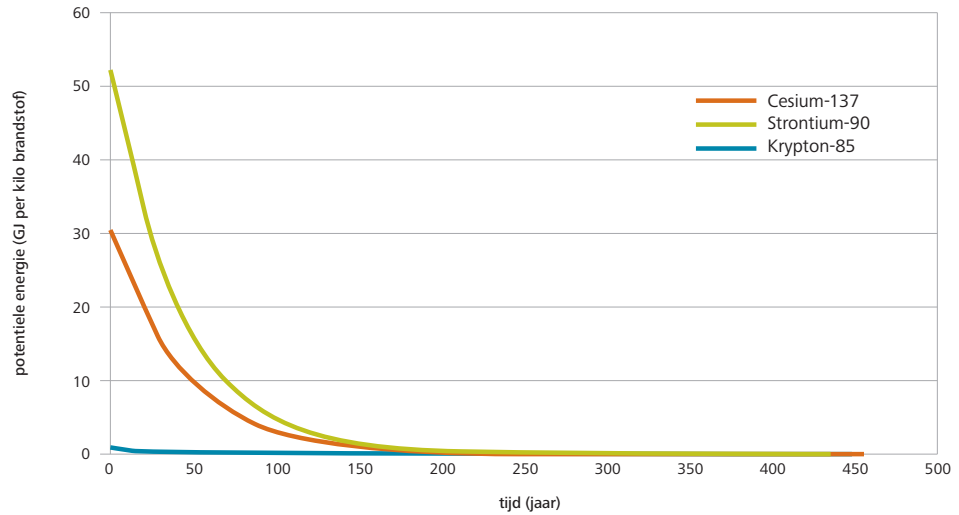
**B** Zoek de halfwaardetijden op van de bovenstaande isotopen (gebruik BINAS). Antwoorden invullen in Tabel 1.

**C** Deel de isotopen in in 2 categorieën: kort- en langlevend. Antwoorden invullen in Tabel 1.

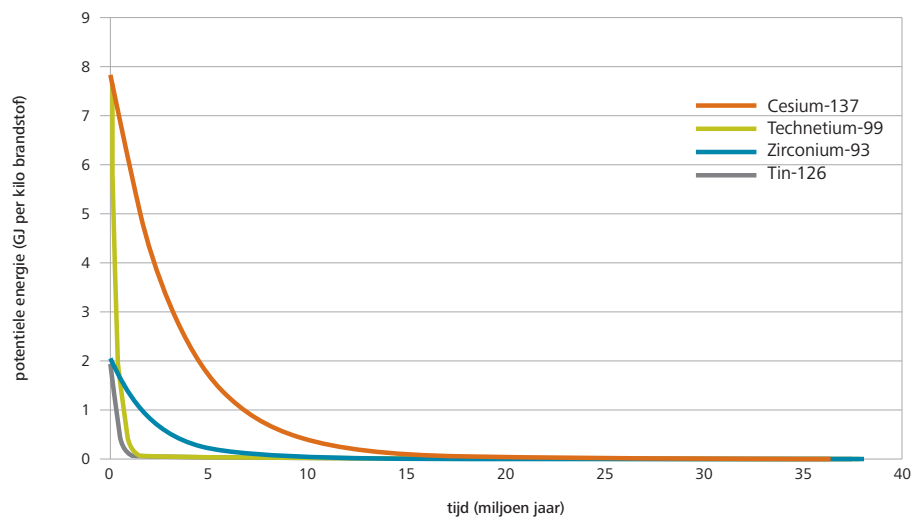
### Duur opslag

Om (versimpeld) te bepalen hoeveel straling de isotopen afgeven, op hoe veel tijd na de productie, kan de potentiële energie (voorkomen maal de energie per verval) uitgezet worden tegen de tijd. Echter, de hoeveelheid energie is hier nog per splijting van 1 atoom  $^{235}\text{U}$ . Om verder te kunnen werken met standaard eenheden rekenen we de energie om naar Joules en werken we met 1 kilogram brandstof. De grafieken die we dan verkrijgen zijn te zien in figuur 1 en 2. De afname in potentiële energie is uitgestoten in de vorm van straling (volgens de wet van behoud van energie). De afgeleide van deze curve is dus een grafiek van de hoeveelheid straling op een bepaald moment. Deze grafieken staan in figuur 3 en 4.

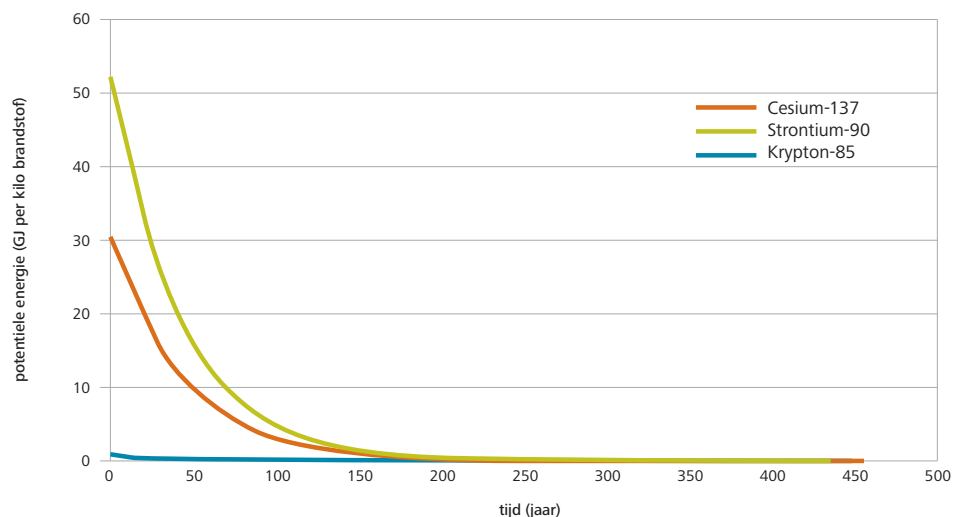
Figuur 1 Potentiële energie kort-levende isotopen



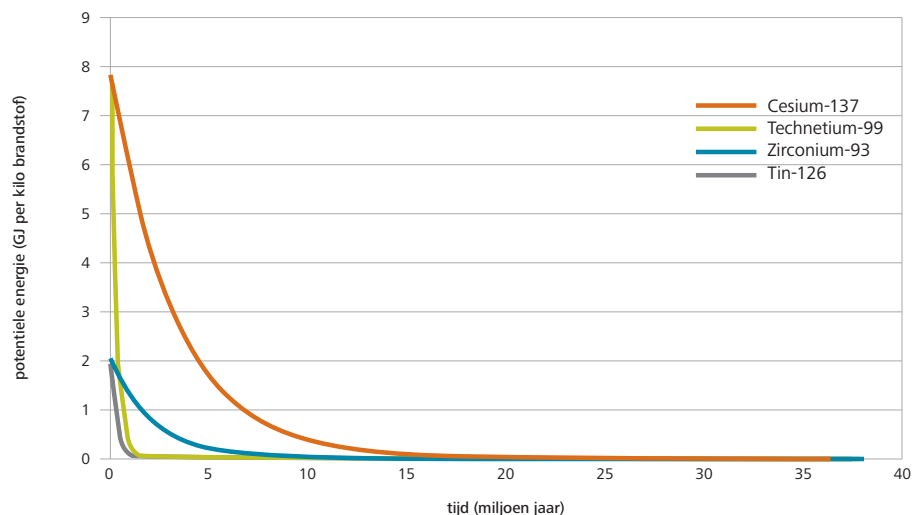
Figuur 2 Potentiële energie lang-levende isotopen



Figuur 3 Straling kortlevende isotopen



Figuur 4 Straling langlevende isotopen (let op eenheid!)



### OPDRACHT 2 Stralingsduur

**A** Na hoeveel tijd is de straling van kortlevende isotopen te verwaarlozen, dus bijna gelijk aan 0?

---



---

**B** En van de langlevende isotopen?

---



---

#### Logistiek

We hebben nu bepaald (of juist niet?) hoe lang het afval opgeslagen moet worden. Het volgende probleem is nu hoe we het op gaan slaan. We verpakken het afval in vaten, maar nu? Het afval moet voor lange tijd worden opgeslagen.

### OPDRACHT 3 Opslag

Aan welke voorwaarden zou de opslaglocatie moeten voldoen? Bedenk hierbij dat de vaten met afval niet beschadigd mogen raken.



Afbeelding 2 Een transport van kernafval

---



---



---

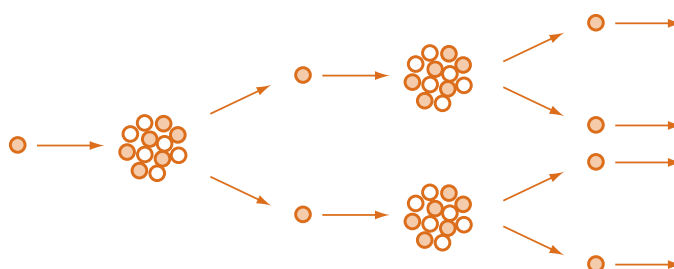
## Deel 2: Veiligheid



Afbeelding 3 Het Oekraïense Tsjernobyl veranderde in een spookstad na de kernramp van 1986

De kernramp in Tsjernobyl, in Fukushima en iets langer geleden in de Three Mile Island centrale in Harrisburg tonen aan dat het goed mis kan gaan als er een ongeval plaatsvindt in een nucleaire centrale. Maar is deze kans groot genoeg om kernenergie af te serveren, of is het risico aanvaardbaar? Om over dit vraagstuk te kunnen debatteren, verdiepen we ons verder in de werking van een kernreactie.

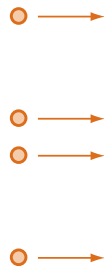
De kernreactie in onze uraniumgestookte centrale wordt gestart met het 'afvuren' van een neutron op een uranium-235 kern. Deze valt dan uiteen en stoot hierbij weer neutronen uit. Deze komen op hun beurt weer op nieuwe kernen, waardoor de kettingreactie gaat lopen. In figuur 5 is het eerste deel van de keten te zien, als er bij elke reactie twee nieuwe neutronen vrijkomen.



Figuur 5 Reactie  $k=2$

#### OPDRACHT 4 Kettingreactie

Teken de volgende twee stappen van de reactie



Zoals je kunt zien neemt het aantal reacties explosief toe. In de reactor zelf zou dit een groot probleem zijn: elke stap duurt slechts  $10^{-4}$  seconden, dus na een seconde hebben we 210000 keer zoveel reacties. Het is dus van belang om de vermenigvuldigingsfactor, het aantal nieuwe reacties dat voorkomt uit 1 reactie, ook bekend als k-waarde, zo dicht mogelijk bij 1 te krijgen. In tabel 2 zie je de invloed van een k-waarde die net geen 1 is op het aantal reacties:

Tabel 2 Invloed van k-waarde

Reactiestappen	k = 1,00	k = 0,99	k = 1,01
0	1	1	1
1	1	0,99	1,01
2	1		
10	1		
100	1		
1000	1		
10.000	1		

#### OPDRACHT 5 Gevolg $k \neq 1$

**A** Vul de tabel aan.

**B** Welk scenario ( $k=1$ ,  $k=0,99$  of  $k=1,01$ ) is ideaal, welke is veilig en welke loopt mogelijk op een ramp uit?

Bedenk hierbij dat er 10.000 stappen per seconde plaatsvinden!

---

---

---

---

---



Afbeelding 4 Protest in Spanje tegen kernenergie

#### Meltdown

Om de vermenigvuldigingsfactor bij te regelen wordt moderator, staven van bijvoorbeeld grafiet, gebruikt. Deze staven hebben de eigenschap neutronen te absorberen, waardoor deze geen nieuwe kernsplijting in gang zetten. Door dan meer of minder staven in het reactorvat te laten zakken is de k-waarde zeer nauwkeurig op 1 te houden.

Een meltdown is het door de bodem van de reactor smelten van de brandstof, waardoor het radioactieve materiaal vrijkomt.

Op het moment dat men een centrale wil stoppen, doet men dit door alle moderatorstaven in een keer snel in te brengen, opdat de k-waarde zeer klein wordt en de reactie uitdooft.

De kerncentrale is dus relatief eenvoudig stil te leggen door de moderatorstaven in te brengen. Toch vonden in de centrale van Fukushima de meeste meltdowns plaats nadat de reactor was stilgelegd! Voor de warmteontwikkeling na stillegging zijn enkele oorzaken aan te wijzen. Allereerst het absorberen

van de neutronen door de moderator. Volgens de wet van behoud van energie moet deze kinetische energie (van de neutronen) ook weer vrijkomen. Dit gebeurt in de vorm van thermische energie, dus warmte.

Ten tweede moeten we ons afvragen of wel alle kernreacties stoppen door het wegvangen van de neutronen. Naast de splijting van uranium, waarvoor de neutronen nodig zijn, vinden er namelijk nog meer reacties plaats.

### **OPDRACHT 6** Warmteproductie

#### **A** Welke reacties vinden nog meer plaats naast de kernsplijting?

**Tip:** zie deel 1.

---

---

#### **B** Vormt dit direct een probleem? Leg uit waarom.

---

---

---

Ook deze reacties leveren thermische energie. Naast deze twee warmtebronnen is het bij een ongeluk mogelijk dat de koelwatervoorziening defect raakt. Hierdoor vermindert de koeling in de centrale, wat de problemen verergert.

### **Extra: Fukushima**

De meest recente ramp met een kerncentrale is uiteraard de ramp in Japan, in de centrale van Fukushima.

### **OPDRACHT 7** Fukushima

**Maak een stroomschema van de gebeurtenissen in Fukushima, die uiteindelijk leidden tot de meltdown. Maak hierbij gebruik van het artikel op pagina 6, en zoek eventueel aanvullend materiaal.**

**Hint:**

op Wikipedia is een zeer bruikbaar artikel te vinden (Kernongeluk van Fukushima).

## Drie meltdowns in Fukushima

Toegevoegd: dinsdag 24 mei 2011, 04:31 Update: dinsdag 24 mei 2011, 11:38

In drie reactoren van de kerncentrale in het Japanse Fukushima zijn splijtstofstaven gesmolten. Exploitant Tepco heeft dat laten weten. Vorige week werd al vastgesteld dat er in reactor 1 een meltdown is geweest. Nu blijkt dat ook in de reactoren 2 en 3 te zijn gebeurd, waarschijnlijk al kort na de tsunami van 11 maart.

Dat dit pas 2,5 maand na het natuurgeweld bekend wordt, komt omdat personeel nu pas bij de reactoren kan komen.

### Bodem

De ontdekking komt voor atoomfysicus Wim Turkenburg van de Universiteit Utrecht niet als een verrassing. "Het koelwater lekte weg, waardoor de splijtstof staven, in elk geval voor een deel, droog kwamen te staan."

Als gevolg daarvan liep de temperatuur in de reactoren steeds verder op, met het smelten van de staven als gevolg.

In reactor 1 zijn de splijtstofstaven waarschijnlijk volledig gesmolten, zegt Turkenburg. "Daar is materiaal door de bodem van het reactorvat gezakt en op de betonnen vloer van het reactorhuis terechtgekomen."

### Gloeiende massa

Het weglekkende koelwater is een groot probleem. Er ligt nu in de kelders van de reactoren een grote hoeveelheid water die hoog radioactief is.

Voorlopig kan nog niemand bij de staven komen. "Het is een gloeiende massa die nog zeker twee jaar moet worden gekoeld."

Volgens Turkenburg is het de bedoeling om bij afwezigheid van een gesloten systeem toch een kringloopsysteem voor het koelwater te maken voor elk van de drie reactoren.

### Omhulsel

"Om te voorkomen dat er verder nog straling naar buiten komt, moet om de reactoren een omhulsel worden gebouwd. Dan kun je na een jaar of tien, vijftien proberen de boel op te ruimen."

Vanaf vandaag zijn deskundigen van de internationale atoomorganisatie IAEA voor onderzoek in Fukushima. Ze blijven ruim een week.

Bron: <http://nos.nl/artikel/242815-drie-meltdowns-in-fukushima.html>, geraadpleegd: 05-07-2011

## Deel 3: Duurzaamheid



Afbeelding 5 Uraniummijn in Australië

Het laatste aspect van kernenergie dat we behandelen is duurzaamheid. Hierbij gaan we in op de hoeveelheid brandstof die een kerncentrale nodig heeft, en vergelijken we dit met de hoeveelheid kolen die een kolencentrale nodig heeft om dezelfde hoeveelheid energie op te wekken.

### Hoeveelheid uranium

In de berekening werken we met een 1 GW kerncentrale, die we een jaar lang op vollast (dus volledig vermogen) laten draaien. Met dit vermogen kunnen we dan maar liefst een miljoen huishoudens van elektriciteit voorzien. 1 GW betekent 1 gigajoule per seconde.

#### OPDRACHT 8 Benodigde energie

##### A Hoeveel seconden bevat een jaar?

---

---

##### B Hoeveel Joule moeten we in een jaar produceren (1GJ = 10<sup>9</sup> J)? Rond alle getallen af op 3 cijfers achter de komma, dus bijvoorbeeld 3,123×10<sup>8</sup>.

---

---

Helaas is het rendement van de centrale niet 100%. In onze berekening gaan we er daarom van uit dat 38,5% van de energie die uit de uranium komt wordt omgezet in elektriciteit. De splijting van 1 kg <sup>235</sup>U levert  $8,2 \times 10^{13}$  J aan energie op. Hieruit komt dan  $0,385 \times 8,2 \times 10^{13} = 3,16 \times 10^{13}$  J aan elektriciteit per kg.

**OPDRACHT 9** Hoeveelheid  $^{235}\text{U}$  Bereken uit je antwoord op opdracht 8 hoeveel kg  $^{235}\text{U}$  de fabriek per jaar moet versplijten. Rond je antwoord opnieuw af.

---

---

---

---

Het volgende punt is dat natuurlijk uranium niet puur uit de isotoop  $^{235}\text{U}$  bestaat. Het gehalte aan deze isotoop in natuurlijk uranium is namelijk slechts 0,7%. Uranium wordt gewonnen uit uraniumerts, dat 0,1% uranium bevat.

**OPDRACHT 10** Totale hoeveelheid erts

**A** Bereken hoeveel natuurlijk uranium nodig is om aan de hoeveelheid  $^{235}\text{U}$  uit opdracht 9 te komen.

---

---

**B** Bereken de benodigde hoeveelheid erts voor de hoeveelheid uranium uit deelvraag A

---

---



Afbeelding 6 Kolentrein in Nederland

#### Kolencentrale

Maar is deze hoeveelheid erts groot? Om deze vraag te beantwoorden, vergelijken we de hoeveelheid erts met de hoeveelheid kolen die nodig zou zijn om dezelfde hoeveelheid energie op te wekken. De verbrandingswarmte van kolen is  $3,3 \times 10^7$  J per kg. Het rendement van de centrale is weer 38,5%, dus dit percentage van de verbrandingswarmte wordt omgezet in elektriciteit.

**OPDRACHT 11** Kolencentrale

**A** Bereken hoeveel kolen er nodig is om de 1 GW centrale een jaar te laten draaien. Zie voor de relevante gegevens de gegevens bij opdracht 8 en 9.

---

---

---

---

**B** Vergelijk dit met de hoeveelheid uraniumerts.

---

---

Qua logistiek is het gebruik van erts dus een stuk duurzamer: veel minder treinen en/of vrachtwagens moeten rijden om de centrale draaiend te houden.

## Deel 4: Debat

Nu we een aantal aspecten van kernenergie bekeken hebben, is het tijd hier eigen invulling aan te geven. Wat vind je er nu zelf van, en vooral: waarom? Om nog eens beide opties, voor en tegen kernenergie, te belichten een debat over de stelling 'Nederland moet extra kerncentrales bouwen om het energieprobleem aan te pakken'.

Hieronder enkele aspecten die je kunt uitwerken om je voor te bereiden:

- De logistiek: om welke volumes brandstof praten we, en hoe is dat bij alternatieven (kolen, aardgas, windenergie etc.). Hoe voeren we dit aan?
- Uitstoot: stoot een kerncentrale direct schadelijke stoffen uit? En de alternatieven?
- Afval: wat zijn de problemen en risico's van het afval? Wederom: wat geldt voor de alternatieven?
- Risico: wat is de kans dat het misgaat, en hoe erg is dat dan?
- Kosten: vergelijk de kosten tussen kernenergie en andere vormen.



Afbeelding 7 Een kerncentrale

Voel je vrij om ook andere argumenten aan te dragen!

---

Technologisch is al bijna alles mogelijk, maar in de praktijk wordt nieuwe technologie nog maar mondjesmaat toegepast. Bij **Natuurwetenschap en Innovatiemanagement** leer je hoe je technologische innovaties kunt bevorderen. En dat is niet alleen van belang voor de groei van de economie, maar ook voor het oplossen van belangrijke maatschappelijke problemen als klimaatverandering, fileproblematiek en dure gezondheidszorg. Sla een brug tussen wat technologisch mogelijk en wat maatschappelijk haalbaar is.

---

[www.uu.nl/geo](http://www.uu.nl/geo)



**Universiteit Utrecht**

**Colofon** Dit is een uitgave van de faculteit Geowetenschappen Universiteit Utrecht. Door: Ingo van 't Oor, Hannah Mai van Dijkhuizen en Mies Mikx  
Design & Cartografie: C&M | (Carto-)grafische Vormgeving 8067  
Deze uitgave is gemaakt in het kader van een Sprint project 2011