

Tentamen: Energie, duurzaamheid en de rol van kernenergie

Docenten: J. F. J. van den Brand en J. de Vries
Telefoon: 0620 539 484
Datum: 27 mei 2014
Zaal: WN-M143
Tijd: 08:45 - 11.30 uur

- Maak elke opgave op een apart blad.
- Vermeld je naam op elke pagina.
- Vermeld je collegenummer.
- Gebruik van een rekenmachine is toegestaan.
- Motiveer je resultaat teneinde een maximale score te bereiken.

Opgave 1.

We kunnen een windturbine met een (elektrische) capaciteit van 3 MWe plaatsen op twee mogelijke sites, A of B. De waarschijnlijkheidsverdelingen voor de windsnelheid op deze twee sites worden getoond in Fig. 1.

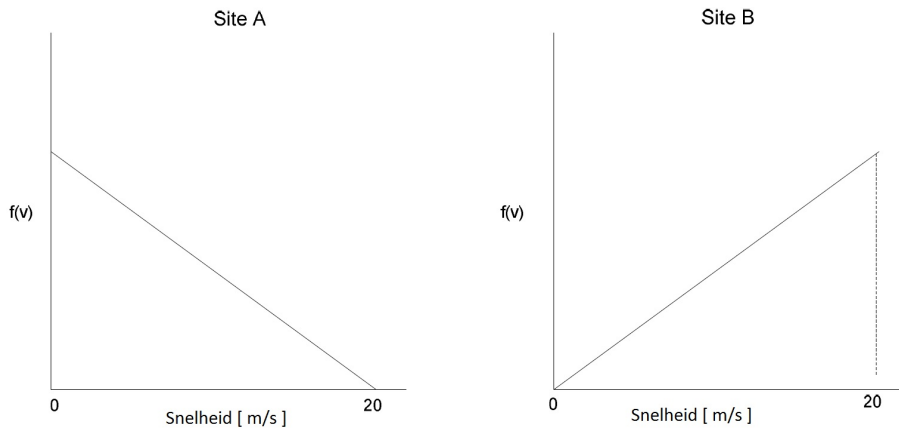


Figure 1: Waarschijnlijkheidsverdelingen voor de windsnelheid op sites A en B.

We nemen aan dat het vermogen dat door de turbine gegenereerd wordt evenredig is met de derde macht van de windsnelheid. De benodigde bouwgrond voor Site A kost € 1.0 miljoen en die voor Site B kost € 2.0 miljoen. De bedrijfskosten (inclusief onderhoud) van een turbine bedragen € 100.000 per jaar. Elektriciteit van een windturbine kan verkocht worden aan het elektriciteitsnetwerk voor €60 per MWh (megawattuur elektrische energie). De levensduur van de turbine is 20 jaar.

- Bereken het gemiddelde elektrisch vermogen dat geproduceerd kan worden voor elke site.
- Welke site biedt de grootste kans op een goede investering?
- We nemen aan dat de disconteringsvoet ("discount rate") jaarlijks gelijk is aan 0,04 (toelichting: stel dat we het geld bijvoorbeeld op de bank zetten, dan levert het jaarlijks 4% rente op, waardoor de som na 20 jaar groter is dan de initiële investering. We willen dat nu in de berekening meenemen.). Neem verder aan dat we inflatie en eventuele belastingen mogen verwaarlozen. Welke site biedt dan de grootste kans op een goede investering?

Hint: Voor een geometrische reeks geldt $S = a + ar + ar^2 + \dots + ar^{n-1} = \sum_{k=0}^{n-1} ar^k = a \frac{1-r^n}{1-r}$.

Opgave 2.

Het produceren van getij-energie en de energie in watergolven.

- Een oppervlakte-watergolf beweegt in de x -richting en wordt beschreven door

$$z = B \cos \frac{2\pi x}{\lambda}, \quad (1)$$

met λ de golflengte en B de amplitude van de golf. Toon aan dat de potentiële energie van de golf (voor één golflengte) gegeven wordt door

$$E_{\text{pot}} = \frac{1}{4} \rho g B^2 \lambda, \quad (2)$$

met ρ de dichtheid van het water ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) en $g = 9,8 \text{ m/s}^2$.

- b) Neem aan dat we equupartitie van energie mogen gebruiken en dat de amplitude van de golf 1,5 m is. De golflengte is 80 m. Bereken het totale vermogen van de golf per eenheid golffront, als de groepsnelheid van de golf 5 m/s is.
- c) We beschouwen een getijbekken ter grootte van 2 km bij 2 km. Bereken de maximale hoeveelheid energie die dit getijbekken theoretisch kan produceren tijdens een enkele getijd cyclus, als het verschil tussen laag en hoog tij gelijk is aan 8 m.
- d) Kun je een manier bedenken om de energieproductie van het getijbekken te verbeteren zonder het oppervlak te vergroten?
- e) Welk oppervlak zouden we moeten bestrijken met een normaal getijbekken om 10 kWh per persoon en per dag aan elektriciteit te produceren voor elke Nederlander (er wonen 17 miljoen mensen in Nederland)? Neem aan dat de efficiëntie 80% is, en dat het gemiddelde getijdeverschil gelijk is aan 7 m.

Opgave 3.

We beschouwen een thermische PWR ("pressurized water reactor") kernreactor. Tijdens het bedrijf van een PWR ondergaat ^{235}U kernsplijting. Door invangst van neutronen kunnen nieuwe kernen ontstaan (zie Fig. 2).

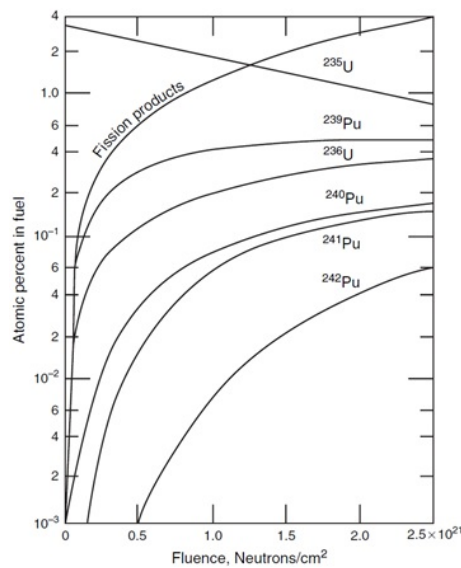


Figure 2: Opbouw van transuranen door het invangen van neutronen die geproduceerd worden door kernsplijting van ^{235}U .

We nemen aan dat de kernreactor een conversieratio $C = 0,10$ heeft. Dit betekent dat je de productie van ^{239}Pu bij benadering mag bepalen door aan te nemen dat elke ^{235}U kern die splijting ondergaat, vervangen wordt door C ^{239}Pu kernen. Het is nodig om de reactor regelmatig te laden met 30 ton verse UO_2 brandstof, die 5% verrijkt is in ^{235}U , terwijl er een gelijke massa aan verarmde brandstof (dat zijn brandstofstaven waarbij de ^{235}U concentratie gedaald is tot 1%) uit de reactor verwijderd wordt.

- a) Waaruit bestaat het splijtbare materiaal in de verwijderde brandstofstaven?
- b) Bereken de massaconcentratie van de splijtingsproducten in de verwijderde brandstofstaven. Neem aan dat enkel ^{235}U splijting heeft ondergaan.

- c) Bereken voor elke 1 kg verse brandstof die in de kernreactor wordt gebracht, hoeveel thermische energie geproduceerd wordt voordat de brandstofstaven verwijderd worden uit de reactor. Neem weer aan dat enkel ^{235}U splijting heeft ondergaan.
- d) Waarom zijn de aannames gedaan in vragen b) en c) niet correct?
- e) Men stelt voor om de conversieratio C te verhogen tot $C = 0,50$. Als we het vermogen van de kernreactor gelijk houden, hoe zal dan de snelheid waarmee ^{239}Pu geproduceerd wordt veranderen? Hoe verandert de tijd voordat brandstofstaven uit de reactor verwijderd moeten worden? Verklaar uw antwoord! Neem aan dat enkel ^{239}Pu geproduceerd wordt.

Opgave 4.

Een thermische reactor met een core volume van $V = 30 \text{ m}^3$ heeft een neutronenflux van $\phi = 2 \times 10^{17} \text{ s}^{-1}\text{m}^{-2}$. De macroscopische werkzame doorsnede voor kernsplijting bedraagt $\Sigma_f = 5 \text{ m}^{-1}$.

- a) Bereken de power output P van de reactor (Hint: per kernsplijting komt er 200 MeV aan energie vrij).
- b) Hoeveel kilogram ^{235}U zit er in de reactor?
- c) Hoeveel kilogram ^{235}U wordt er per seconde geconsumeerd door kernsplijting (dat is de zogenaamde *burn-up rate*)?

BIJLAGE:

$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$e = -1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$

$\tau_P = 1 \text{ ms}$

$1 \text{ b} = \text{barn} = 10^{-28} \text{ m}^2.$

$1 \text{ amu} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}.$

Constante van Avogadro

Lading van het elektron

Levensduur van de ‘prompt’neutronen.

Eenheid van werkzame doorsnede.

Atomaire massa eenheid.

Tabel met materiaaleigenschappen.

De atomaire massa van ^{235}U bedraagt 235.0439 en van ^{238}U 238.0508.

Material	Density (kg m^{-3})	n (10^{28}m^{-3})	$\sigma_f(\text{b})$	$\sigma_s(\text{b})$	$\sigma_a(\text{b})$	ξ	$\Sigma_s(\text{m}^{-1})$	$\Sigma_a(\text{m}^{-1})$
Graphite (C)	1600	8.23	–	4.7	0.0045	0.158	37.7	0.037
^{235}U	18700	4.79	579	10	680		47.9	3229
^{238}U	18900	4.79	–	8.3	2.72		39.8	13.0

* σ are at thermal energies: 0.025 eV

Tabel met halfwaardetijden en opbrengten van beta-vertraagde neutron-emitters die ontstaan in de reactie $n+^{235}\text{U}$.

Half-lives and yields of beta-delayed neutron emitters following $n + ^{235}\text{U}$

$t_{1/2}$	Yield (%)
55.7	0.0215
22.7	0.1424
6.22	0.1274
2.30	0.2568
0.61	0.0748
0.23	0.0273

Kernenergie definities pagina

Nuclide density	N	$= \frac{\rho N_0}{A}$ [nuclei/cm ³]
Microscopic cross-section	σ	[cm ² , barns]
Macroscopic cross-section	Σ	$= N\sigma$ [1/cm]
Elastic scattering E loss ratio	α	$= \frac{E'}{E} = \frac{(A-1)^2}{(A+1)^2}$
Slowing down decrement	ξ	$= 1 + \frac{\alpha}{1-\alpha} \ln \alpha \approx 6/(3A + 1)$
Slowing down power	$\xi\Sigma_s$	
Slowing down ratio	$\xi\Sigma_s/\Sigma_a$	
Fission neutron production	ν	# neutrons produced per fission
Neutron multiplication (infinite medium)	k_∞	$\frac{\text{neutron productie door splijting in generatie } i}{\text{neutron absorptie in generatie } i - 1}$
Fast fission factor	ϵ	$\frac{\text{\# snelle neutronen geproduceerd door alle splijtingen}}{\text{\# snelle neutronen geproduceerd door thermische splijtingen}}$
Resonance escape probability	p	$\frac{\text{\# neutronen die thermische energie bereiken}}{\text{\# snelle neutronen die met slow down beginnen}}$
Thermal utilization factor	f	$\frac{\text{\# thermische neutronen geabsorbeerd in fuel}}{\text{\# thermische neutronen geabsorbeerd in alles}}$
Reproduction factor	η_T	$\frac{\text{\# snelle neutronen geproduceerd in thermische splijting}}{\text{\# thermische neutronen geabsorbeerd in de fuel}}$