© NRG 2025
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.

Uitwerkingenboek lesmodule Kernenergie
Junior Academy NRG

Dit is het uitwerkingenboek voor de opgaven van de lesmodule "Kernenergie" van Junior Academy NRG. Waar mogelijk zijn de omrekeningsfactoren en atomaire gegevens uit de BINAS (zesde editie) gebruikt. Als hiervan wordt afgeweken, wordt dit aangegeven met een voetnoot en staat dit uitgelegd in Bijlage A van de docentenhandleiding. Conform de standaarden worden alleen eindantwoorden afgerond, maar voor de leesbaarheid worden in dit document in tussenantwoorden maximaal 3 decimalen weergegeven. Let op dat het gebruik van online opgezochte waardes kleine verschillen in antwoorden kan opleveren.

De werkzaamheden van Junior Academy NRG vormen onderdeel van het onderzoeksprogramma PIONIER dat NRG uitvoert in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Voor meer informatie kijk op www.ensuringnuclearperformance.com of www.nrg.eu. Deze module is opgezet en geschreven door: Cornelis Zandt, Tessa de Vries, Bart Verdonschot en Maura Baars.

Inhoud

2.6 Opgaven

Vraag 1

- Tabel 25A in BINAS is een goede optie om alle ontbrekende gegevens te vinden.
- Over het algemeen voor het aantal neutronen bij ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$: $N_n = A - Z$
- Eerste: ${}^{8}_{5}\mathbf{B}$: $N_n = 8 - 5 = 3$
- Tweede: ${}^{218}_{\mathbf{84}}\mathrm{Po}$: $N_n = 218 - 84 = 134$
- Derde: ${}^{99\mathrm{m}}_{43}\mathbf{Tc}$: $N_n = 99 - 43 = 56$

Vraag 2

- In de laatste kolom van BINAS tabel 25A staat de benodigde informatie.
- Voor radium-224: verval door middel van α-straling. Vervalvergelijking:
  ${}^{224}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{220}_{\mathbf{86}}Rn + {}^{\mathbf{4}}_{\mathbf{2}}\boldsymbol{He} + 5{,}7\ \mathrm{MeV}$ *of* ${}^{224}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{220}_{\mathbf{86}}Rn + \alpha + 5{,}7\ \mathrm{MeV}$
- Voor technetium-99: verval door middel van β^--straling. Vervalvergelijking[1]:
  ${}^{99}_{43}\mathrm{Tc} \rightarrow {}^{99}_{\mathbf{44}}Ru + {}^{\mathbf{0}}_{-\mathbf{1}}\boldsymbol{e} + 0{,}32\ \mathrm{MeV}$ *of* ${}^{99}_{43}\mathrm{Tc} \rightarrow {}^{99}_{\mathbf{44}}Ru + \beta^- + 0{,}32\ \mathrm{MeV}$

Vraag 3

- Makkelijkste en minst foutgevoelige manier om het derde splijtingsproduct te beredeneren is door de splijtingsreactie op te stellen. Uit de gegeven informatie:
  ${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{99}_{42}\mathrm{Mo} + {}^{\dots}_{\dots}\dots + 3\ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + \mathrm{E}$
- Atoomnummer (Z) van het onbekende splijtingsproduct:
  $\mathrm{Z} = \mathrm{Z}_{\mathrm{links}} - \mathrm{Z}_{\mathrm{rechts}} = (92 + 0) - (42 + 3 \cdot 0) = 50$ → Element voor $Z = 50$: Sn (Tin)
- Massagetal (A) van Sn-isotoop:
  $\mathrm{A} = \mathrm{A}_{\mathrm{links}} - \mathrm{A}_{\mathrm{rechts}} = (235 + 1) - (99 + 3 \cdot 1) = 134$ → tin-134
- Derde splijtingsproduct moet ${}^{134}_{50}\mathrm{Sn}$ zijn. Complete splijtingsreactie (optioneel):
  ${}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{99}_{42}\mathrm{Mo} + {}^{134}_{50}\mathrm{Sn} + 3\ {}^{1}_{0}\mathrm{n} + \mathrm{E}$

Vraag 4

- Molaire massa van ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$: $235{,}044\ \frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mol}}$
- 1,0 kg puur ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ is: $\frac{1.000[\mathrm{g}]}{235{,}044[\mathrm{g\ mol^{-1}}]} = 4{,}255\ \mathrm{mol}$
- Aantal deeltjes ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$: $4{,}255[\mathrm{mol}] \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23}[\mathrm{mol}^{-1}] = 2{,}562 \cdot 10^{24}$ deeltjes
- Gemiddeld 200 MeV per splijting. Als elk deeltje in 1,0 kg ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ splijt:
  $\mathrm{E} = 2{,}562 \cdot 10^{24}[\mathrm{splijtingen}] \cdot 200[\mathrm{MeV\ splijting^{-1}}] = 5{,}124 \cdot 10^{26}\ \mathrm{MeV}$
- Omrekenen naar Joule, met vorige antwoord in eV:
  $\mathrm{E} = 5{,}124 \cdot 10^{26}[\mathrm{eV}] \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}[\mathrm{J\ eV^{-1}}] = 8{,}210 \cdot 10^{13}\ \mathrm{J}$
- Totale hoeveelheid energie in 1,0 kg puur ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ is: $\mathrm{E} = 8{,}2 \cdot 10^{13}\ \mathrm{J} = 8{,}2 \cdot 10^{7}\ \mathrm{MJ}$

[1] Ruthenium-99 staat niet expliciet als isotoop weergegeven in BINAS.

Vraag 5

- Energie uit de vorige vraag omrekenen naar MWh (met gegeven omrekeningsfactor):
  $$\mathrm{E} = 8{,}210 \cdot 10^7 \ \mathrm{MJ} = \frac{8{,}210 \cdot 10^7 [\mathrm{MJ}]}{3.600 [\mathrm{MJ\ MWh^{-1}}]} = 2{,}281 \cdot 10^4 \ \mathrm{MWh}$$
- Elektrische energie 33% van totale energie:
  $\mathrm{E_{elek}} = 2{,}281 \cdot 10^4 [\mathrm{MWh}] \cdot 0.33 = 7{,}526 \cdot 10^3 \ \mathrm{MWh}$
- Gemiddeld jaarlijks gebruik van een huishouden: 3,50 MWh. Percentage van totale elektrische energie uit 1,0 kg puur $^{235}_{92}\mathrm{U}$:
  $$\frac{3{,}50[\mathrm{MWh}]}{7{,}526 \cdot 10^3 [\mathrm{MWh}]} \cdot 100\% = 4{,}651 \cdot 10^{-2} \ \%$$
- Hetzelfde percentage kan vervolgens gebruikt worden voor het aandeel in massa:
  $$\mathrm{m} = 1{,}0[\mathrm{kg}] \cdot \frac{4{,}651 \cdot 10^{-2} [\%]}{100} = 4{,}651 \cdot 10^{-4} \ \mathrm{kg}$$
- Massa puur $^{235}_{92}\mathrm{U}$ nodig voor jaarlijkse elektriciteitsbehoefte van een gemiddeld huishouden van 3,50 MWh is: $\mathrm{m} = 4{,}651 \cdot 10^{-4} \ \mathrm{kg} = 0{,}47 \ \mathrm{g}$
- *Opmerking: in plaats van alles omrekenen naar MWh kan de opgave ook in MJ gedaan worden. Daarnaast is het omrekenen naar percentages in de tussenstap optioneel en wordt hier gedaan omdat rekenen met percentages vaak als intuïtiever wordt ervaren.*

3.3 Opgaven

Vraag 1

- Notatie van neutronen: $^{1}_{0}\mathrm{n}$
- Met behulp van BINAS tabel 25A, opzoeken atoomnummer van Xenon (Xe): $Z = 54$
- Atoomnummer onbekende element:
  $\mathrm{Z} = \mathrm{Z_{links}} - \mathrm{Z_{rechts}} = (92 + 0) - (54 + 2 \cdot 0) = 38$ → Element voor $Z = 38$: Sr (Strontium)
- Massagetal (A) van Sr-isotoop:
  $\mathrm{A} = \mathrm{A_{links}} - \mathrm{A_{rechts}} = (235 + 1) - (140 + 2 \cdot 1) = 94$ → strontium-94
- Complete splijtingsreactie:
  $^{235}_{92}\mathrm{U} + \boldsymbol{^{1}_{0}}\mathrm{n} \rightarrow {}^{140}_{\boldsymbol{54}}\mathrm{Xe} + \boldsymbol{^{94}_{38}\mathrm{Sr}} + 2\,\boldsymbol{^{1}_{0}}\mathrm{n} + \mathrm{E}$

Vraag 2

- Voor de splijting heb je:
  $^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$
  $235{,}044 + 1{,}009 = 236{,}053 \ \mathrm{u}$
- Na de splijting heb je (voor beide isotopen is de massa 5 decimalen gegeven in BINAS tabel 25A):

$^{140}_{54}Xe + {}^{94}_{38}Sr + 2\ {}^{1}_{0}n$
$139{,}92 + 93{,}915\ + (2 \cdot 1{,}009)\ =\ 235{,}854\ u$

Vraag 3

- Massadefect: $\Delta m = 236{,}053 - 235{,}854 = 0{,}199\ u$
- Massa omrekenen naar kg: $0{,}199\ [u]\ \cdot\ 1{,}661 \cdot 10^{-27}[kg\ u^{-1}] =\ 3{,}298 \cdot 10^{-28}\ kg$
- Energie in Joule met $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$:
  $\Delta E = 3{,}298 \cdot 10^{-28}[kg] \cdot (2{,}998 \cdot 10^{8}[m\ s^{-1}])^2 = 2{,}964 \cdot 10^{-11}\ J$
- Energie omrekenen naar eV en antwoord in MeV:
  $$\Delta E = \frac{2{,}964 \cdot 10^{-11}[J]}{1{,}602 \cdot 10^{-19}[J\ eV^{-1}]} = 1{,}850 \cdot 10^{8}\ eV = 185\ MeV$$

Vraag 4

Optie 1

- $3 \cdot 3 \cdot 3 \cdot$ ... totdat het antwoord groter is dan 1 miljoen.
- Dit is bij 3^{13}, dus na **12 splijtingen** vanaf de eerste drie neutronen. Dat duurt: $12 \cdot 1[ns] = 12\ ns$

Optie 2 (logaritmes)

- Deze situatie heeft de volgende vergelijking: $3^n = 1{,}00 \cdot 10^6$ (met n het aantal stappen)
  $n = \log_3(1{,}00 \cdot 10^6) = \frac{\log_{10}(1{,}00 \cdot 10^6)}{\log_{10}(3)} = 12{,}58 \approx 13$ stappen.
- We beginnen al met 3 neutronen; er zijn **12 splijtingen** nodig. Dat duurt: $12 \cdot 1[ns] = 12\ ns$

Vraag 5

- Voor het verval heb je:
  $^{60}_{27}Co = 59{,}93382\ u$ (met meer decimalen opgeschreven voor volgende opgave)
- Na het verval heb je:
  $^{60}_{28}Ni^{+} + {}^{0}_{-1}e^{-}$
  Optie 1: $(59{,}93079 - 0{,}00055) + 0{,}00055 = 59{,}93079$ (positief geladen nikkel plus elektron)
  Optie 2: direct de atomaire massa van neutraal $^{60}_{28}Ni$: 59,93079

Vraag 6

- Massadefect: $\Delta m = 59{,}93382 - 59{,}93079 = 0{,}00303\ u$
- Massa omrekenen naar kg: $0{,}00303\ [u]\ \cdot\ 1{,}661 \cdot 10^{-27}[kg\ u^{-1}] =\ 5{,}031 \cdot 10^{-30}\ kg$
- Energie in Joule met $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$:
  $\Delta E = 5{,}031 \cdot 10^{-30}\ [kg] \cdot (2{,}998 \cdot 10^{8}[m\ s^{-1}])^2 = 4{,}522 \cdot 10^{-13}\ J$
- Energie omrekenen naar eV en antwoord in MeV:
  $$\Delta E = \frac{4{,}522 \cdot 10^{-13}[J]}{1{,}602 \cdot 10^{-19}[J\ eV^{-1}]} = 2{,}822 \cdot 10^{6}\ eV = 2{,}82\ MeV$$

Vraag 7

- Om een lager thermisch vermogen te krijgen in de reactorkern, kunnen regelstaven *in* de kern gebracht worden. De regelstaven zullen dan meer neutronen opvangen, wat voor minder kernsplijtingen zorgt en dus in totaal een lager thermisch vermogen oplevert.

Uitwerkingen Expertrollen

5. Energiedeskundige

Vraag 1

- Van TWh naar kWh: $120\ \mathrm{TWh} = 1{,}20 \cdot 10^{11}\ \mathrm{kWh}$
- Aantal huishoudens met dit verbruik: $\frac{1{,}20\cdot 10^{11}[\mathrm{kWh}]}{3{,}840\cdot 10^{3}[\mathrm{kWh\ huish.^{-1}}]} = 3{,}13 \cdot 10^{7}$ huishoudens
- Aantal inwoners: $3{,}125 \cdot 10^{7}[\mathrm{huish.}] \cdot 4[\mathrm{inw.\ \ huish.^{-1}}] = 1{,}25 \cdot 10^{8}$ inwoners (125 miljoen)
- Naast huishoudens is de industrie bijvoorbeeld een grote verbruiker van elektrische energie.

Vraag 2

- Een vermogen van 18 GW betekent in één uur een elektrische energie van 18 GWh
- In één jaar: $18[\mathrm{GWh}] \cdot 24[\mathrm{uur\ dag^{-1}}] \cdot 365{,}25[\mathrm{dagen\ jaar^{-1}}] = 157.788\ \mathrm{GWh\ jaar^{-1}}$
- Totale jaarlijkse elektriciteitsvraag: $158\ \mathrm{TWh\ jaar^{-1}}$
- *Opmerking: hier (en verderop in dit hoofdstuk) wordt 365,25 dagen/jaar gebruikt voor een gemiddelde over 4 jaar, maar 365 dagen/jaar is ook goed.*

Vraag 3

- $1\ \mathrm{kg}\ {}^{235}_{92}\mathrm{U}$: $8{,}210 \cdot 10^{7}\ \mathrm{MJ}$
- Energiedichtheid kolen: $26{,}6\ [\mathrm{MJ\ kg^{-1}}]$
- Massa kolen voor dezelfde hoeveelheid energie als $1\ \mathrm{kg}\ {}^{235}_{92}\mathrm{U}$:

$$\mathrm{m} = \frac{8{,}210 \cdot 10^{7}[\mathrm{MJ}]}{26{,}6[\mathrm{MJ\ kg^{-1}}]} = 3{,}086 \cdot 10^{6}\ \mathrm{kg} = 3{,}09 \cdot 10^{6}\ \mathrm{kg}$$

Vraag 4

- Van TWh naar MJ:

$$120\ \mathrm{TWh} = 120[\mathrm{TJ}\ s^{-1}] \cdot 1{,}00[\mathrm{uur}] = 120[\mathrm{TJ}\ s^{-1}] \cdot 1{,}00[\mathrm{uur}] \cdot 3{,}600 \cdot 10^{3}[\mathrm{s\ uur^{-1}}]$$
$$= 4{,}320 \cdot 10^{5}\ \mathrm{TJ} = 4{,}320 \cdot 10^{11}\ \mathrm{MJ}$$

- Energiedichtheid kolen: $26{,}6\ \mathrm{MJ\ kg^{-1}}$
- Massa kolen voor volledige elektriciteitsvraag, met 50% rendement:

$$\mathrm{m} = \frac{4{,}320 \cdot 10^{11}[\mathrm{MJ}]}{26{,}6[\mathrm{MJ\ kg^{-1}}] \cdot 0{,}5} = 3{,}248 \cdot 10^{10}\ \mathrm{kg} = 3{,}25 \cdot 10^{10}\ \mathrm{kg}$$

Vraag 5

- In de vorige vraag is $120\ \mathrm{TWh}$ al omgerekend naar MJ: $4{,}320 \cdot 10^{11}\ \mathrm{MJ}$
- Energiedichtheid ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$: $8{,}210 \cdot 10^{7}\ \mathrm{MJ\ kg^{-1}}$
- Massa ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ voor volledige elektriciteitsvraag, met 33% rendement:
$$\mathrm{m} = \frac{4{,}320 \cdot 10^{11}[\mathrm{MJ}]}{8{,}210 \cdot 10^{7}[\mathrm{MJ\ kg^{-1}}] \cdot 0{,}33} = 1{,}595 \cdot 10^{4}\ \mathrm{kg} = 1{,}59 \cdot 10^{4}\ \mathrm{kg}$$
- *Opmerking: afronding naar 1,59 doordat niet-afgeronde getal 1,5945… is*

Vraag 6

- $1{,}59 \cdot 10^{4}\ \mathrm{kg}$ gevonden in de vorige vraag is 4% van het geheel
- Andere 96% is ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$. Aanname is dat de twee isotopen even zwaar zijn. Vanuit 4% naar 100%:
$$\mathrm{m} = \frac{1{,}595 \cdot 10^{4}[\mathrm{kg}]}{4} \cdot 100 = 3{,}986 \cdot 10^{5}\ \mathrm{kg} = 3{,}99 \cdot 10^{5}\ \mathrm{kg}$$
- *Opmerking: het ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$-deel (96% van de totale massa) kan gerecycled worden. Dit betekent dat de berekende massa wel gebruikt wordt in een kerncentrale, maar niet in zijn geheel wordt verbruikt. De veiligheidskundige leert hier meer over.*

Vraag 7 (verdiepend)

- Snel te vinden via zoektermen als "Uranium beschikbaarheid"
- Bijvoorbeeld op world-nuclear.org een overzicht van beschikbaar uranium per land.
- De landen met de grootste voorraden zijn: Australië, Kazachstan en Canada.
- Hier wordt een totale voorraad van 6,1 miljoen ton genoemd: $6{,}1 \cdot 10^{9}\ \mathrm{kg}$ uranium
- Met de totale massa uit de vorige vraag is de tijd die alleen Nederland met deze voorraad kan doen:
$$\mathrm{t} = \frac{6{,}1 \cdot 10^{9}[\mathrm{kg}]}{3{,}986 \cdot 10^{5}[\mathrm{kg\ jaar^{-1}}]} = 1{,}530 \cdot 10^{4}\ \mathrm{jaar} = 1{,}5 \cdot 10^{4}\ \mathrm{jaar}$$
- *Opmerking: hier nemen we dus niet mee dat 96% gerecycled zou kunnen worden*

Vraag 8

- Het vermenigvuldigen van de getallen uit tabellen 3 en 4 geeft het benodigde antwoord.

		Totaal geïnstalleerd vermogen [GW]
Kernenergie		15
Windenergie	Op land	9,0
	Op zee	70
Zonne-energie		100
Totaal		194

Vraag 9

- Hoofdreden: elektriciteitsbronnen kunnen niet 100% van de tijd elektriciteit leveren (bewolkte dag/geen of weinig wind/onderhoud)
- Hierop volgend: niet genoeg opslagcapaciteit voor elektriciteit kan betekenen dat er ’s avonds tijdens piekuren niet genoeg elektriciteit geleverd kan worden, ook al werd er bijvoorbeeld overdag door zonnepanelen meer dan genoeg geleverd.

Vraag 10

- Formule voor capaciteitsfactor omschrijven naar maximale elektriciteitsproductie:

$$\mathrm{Max.\,elek.-productie}\ [\mathrm{kWh\ jaar^{-1}}] = \frac{\mathrm{werkelijke\ elek.-productie}\ [\mathrm{kWh\ jaar^{-1}}]}{\mathrm{capaciteitsfactor}\ [\%]} \cdot 100\%$$

- Gegeven: $werkelijke$ $\mathrm{elektriciteitsproductie} = 3.840\ \mathrm{kWh\ jaar^{-1}}$ en $\mathrm{capaciteitsfactor} = 10\%$
- Maximale elektriciteitsproductie in één jaar:

$$\mathrm{Max.\,elek.-productie}\ [\mathrm{kWh\ jaar^{-1}}] = \frac{3.840[\mathrm{kWh\ jaar^{-1}}]}{10[\%]} \cdot 100\% = 3{,}840 \cdot 10^4\ \mathrm{kWh\ jaar^{-1}}$$

- Delen door uren in een jaar voor omrekening naar benodigde geïnstalleerd vermogen:

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{t}} = \frac{3{,}840 \cdot 10^4[\mathrm{kWh}]}{1[\mathrm{jaar}]} = \frac{3{,}840 \cdot 10^4[\mathrm{kW}] \cdot 1[\mathrm{uur}]}{24[\mathrm{uur\ dag^{-1}}] \cdot 365{,}25[\mathrm{dagen\ jaar^{-1}}]} = 4{,}381\ \mathrm{kW} = 4{,}4\ \mathrm{kW}$$

Vraag 11

- Uit de vorige vraag: $4{,}381\ kW$ aan geïnstalleerd vermogen is nodig. Met $400\ W$ per zonnepaneel:

$$\mathrm{N_{zonnepaneel}} = \frac{4{,}381 \cdot 10^3[\mathrm{W}]}{400[\mathrm{W}]} = 10{,}951 = 11$$

Opmerking: dit is een opgave om een idee te krijgen van de elektriciteitsproductie van een zonnepaneel, waarbij $400\ W$ *per zonnepaneel onder ideale omstandigheden is. In de realiteit ligt dit vaak lager en zou er opslagcapaciteit nodig zijn om fluctuaties in elektriciteitsproductie op te vangen.*

Vraag 12

- De berekening is voor alle elektriciteitsbronnen als volgt:

$$\mathrm{E} = \frac{\mathrm{P[GW]} \cdot 24[\mathrm{uur\ dag^{-1}}] \cdot 365{,}25[\mathrm{dagen\ jaar^{-1}}] \cdot \mathrm{capaciteitsfactor}}{10^3\ [\mathrm{GWh\ TWh^{-1}}]}$$

		Geproduceerde elektrische energie [TWh]
Kernenergie		118
Windenergie	Op land	23,7
	Op zee	307
Zonne-energie		87,7
Totaal		537

- Er kan dus aan de geschatte elektriciteitsbehoefte in 2050 van 480 TWh voldaan worden.
- Mogelijke uitdagingen die genoemd kunnen worden bij de uitwerking van dit plan:
    - Praktisch alle plek die op dit moment geschat wordt beschikbaar te zijn voor deze elektriciteitsbronnen wordt bij deze invulling ook daadwerkelijk gebruikt. In theorie is het dus mogelijk, maar het moet ook daadwerkelijk allemaal gefabriceerd en neergezet worden.
    - Bij deze invulling wordt er veel wind- en zonne-energie gebruikt. Dit betekent dat er mogelijk naast de elektriciteitsbronnen zelf ook veel opslagcapaciteit neergezet moet worden voor momenten dat er meer elektriciteit gevraagd wordt dan geproduceerd.
    - De 480 TWh blijft een schatting. Als de elektriciteitsvraag op minder uitkomt in 2050 valt het alleen maar mee, maar als er toch meer nodig blijkt te zijn, moet daarvoor in de ruimte en bouw voor gecompenseerd worden.
    - Het elektriciteitsnet zal bij de bouw van meer elektriciteitsbronnen ook uitgebreid moeten worden. Dit is over het algemeen duur, maar onafhankelijk van de keuze in elektriciteitsbronnen zal dit hoe dan ook moeten gebeuren bij een groei in elektriciteitsvraag.

6. Milieudeskundige

Vraag 1

- De linkerkolom kan meteen opgeteld worden.
- Voor de rechterkolom alle getallen delen door $250.000\ \mathrm{km}$. Daarna vermenigvuldigen met 1.000 voor $\mathrm{g\ km^{-1}}$.

Aantal kilometers: 250.000	CO_2-equivalent (kg)	Gemiddelde CO_2-equivalent per kilometer ($\mathrm{g\ km^{-1}}$)
Productie	8.000	$\mathbf{32,00}$
Gebruik	10.000	$\mathbf{40,00}$
Afval	5.000 $+$	$\mathbf{20,00}$ $+$
Totaal	$\mathbf{= 23.000}$	$\mathbf{= 92,00}$

Vraag 2

Optie 1

- Uitstoot van productie en afval bij een benzineauto zijn gelijk. Er wordt alleen gekeken naar gebruik
- Uitstoot gebruik: $10.000\ \mathrm{kg} = 1,000 \cdot 10^7\ \mathrm{g}$
- Om van gemiddelde CO_2-equivalent naar aantal kilometers te komen:

$$s = \frac{1,000 \cdot 10^7\ [\mathrm{g}]}{120\ [\mathrm{g\ km^{-1}}]} = 8,333 \cdot 10^5\ \mathrm{km} = 8,33 \cdot 10^5\ \mathrm{km}$$

Optie 2

- Bij het vergelijken van $120\ [\mathrm{g\ km^{-1}}]$ en $40,00\ [\mathrm{g\ km^{-1}}]$ is te zien dat de uitstoot 3,00x zoveel is
- Dit betekent dat de afstand die een benzineauto kan rijden 3,00x minder is:

$$s = \frac{250.000\ [\mathrm{km}]}{3,00} = 8,333 \cdot 10^5\ \mathrm{km} = 8,33 \cdot 10^5\ \mathrm{km}$$

Vraag 3

Uiteindelijk geeft optie “C” — de gemiddelde CO_2-voetafdruk (in kg CO_2-equivalent $\mathrm{MWh^{-1}}$) — het meeste inzicht: elektriciteitsopwekking is altijd een afweging tussen zo min mogelijk CO_2-equivalente uitstoot tegen zoveel mogelijk geleverde elektriciteit. Optie ‘A’ kan daardoor misleidend zijn, omdat iets dat met weinig uitstoot kan worden neergezet daarmee altijd de beste optie lijkt, terwijl het misschien wel óf niet lang meegaat óf niet veel elektriciteit oplevert. Optie ‘B’ is eerlijker, al komen daarbij bronnen met weinig uitstoot maar een korte levensduur beter naar voren. Optie ‘C’ neemt alle relevante informatie over elektriciteitsbronnen mee, waardoor een eerlijke vergelijking kan worden gemaakt.

Vraag 4

- Kerncentrale levert in één uur $1.000\ \mathrm{MWh}$. Over een levensduur van 60 jaar is dit:
  $E = 1.000\ [\mathrm{MWh}] \cdot 24\ [\mathrm{uur\ dag^{-1}}] \cdot 365,25\ [\mathrm{dagen\ jaar^{-1}}] \cdot 60\ [\mathrm{jaar}] = 5,260 \cdot 10^8\ \mathrm{MWh}$
- De kerncentrale staat gemiddeld 90% van de tijd aan:
  $E = 5,260 \cdot 10^8\ [\mathrm{MWh}] \cdot 0,90 = 4,734 \cdot 10^8\ \mathrm{MWh}$

- *Opmerking: hier (en verderop in dit hoofdstuk) wordt 365,25 dagen/jaar gebruikt voor een gemiddelde over 4 jaar, maar 365 dagen/jaar is ook goed.*

Vraag 5

- Totale uitstoot over de gehele levenscyclus: $5{,}60\ \mathrm{Mton\ CO_2\text{-}eq} = 5{,}60 \cdot 10^9\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq}$
- Geïnstalleerd vermogen van een kerncentrale: $1.000\ \mathrm{MW}$
- De bouwvoetafdruk is:

$$\mathrm{Bouwvoetafdruk} = \frac{5{,}60 \cdot 10^9 [\mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq}]}{1.000\ [\mathrm{MW}]} = 5{,}60 \cdot 10^6\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq\ MW^{-1}}$$

- Totale elektriciteitsproductie van een kerncentrale over de gehele levenscyclus: $4{,}734 \cdot 10^8\ \mathrm{MWh}$
- De gemiddelde CO_2-voetafdruk is:

$$\mathrm{Gem.\ voetafdruk} = \frac{5{,}60 \cdot 10^9 [\mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq}]}{4{,}734 \cdot 10^8 [\mathrm{MWh}]} = 11{,}830\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq\ MWh^{-1}} = 11{,}8\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq\ MWh^{-1}}$$

Vraag 6

- Het zonnepark uit het voorbeeld levert in één uur 1,00 MWh. Over de levensduur van 20 jaar is dit:
  $\mathrm{E} = 1{,}00[\mathrm{MWh}] \cdot 24[\mathrm{uur\ dag^{-1}}] \cdot 365{,}25[\mathrm{dagen\ jaar^{-1}}] \cdot 20[\mathrm{jaar}] = 1{,}753 \cdot 10^5\ \mathrm{MWh}$
- Het zonnepark levert op jaarbasis 10% van zijn maximale vermogen:
  $\mathrm{E} = 1{,}753 \cdot 10^5 [\mathrm{MWh}] \cdot 0{,}10 = 1{,}753 \cdot 10^4\ \mathrm{MWh} = 1{,}75 \cdot 10^4\ \mathrm{MWh}$

Vraag 7

- Totale uitstoot van het 1,00 MW zonnepark: $800\ \mathrm{ton\ CO_2\text{-}eq} = 8{,}00 \cdot 10^5\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq}$
- De bouwvoetafdruk is:

$$\mathrm{Bouwvoetafdruk} = \frac{8{,}00 \cdot 10^5 [\mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq}]}{1{,}00\ [\mathrm{MW}]} = 8{,}00 \cdot 10^5\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq\ MW^{-1}}$$

- Totale elektriciteitsproductie van het zonnepark over de gehele levenscyclus: $1{,}753 \cdot 10^4\ \mathrm{MWh}$
- De gemiddelde CO_2-voetafdruk is:

$$\mathrm{Gem.\,voetafdruk} = \frac{8{,}00 \cdot 10^5 [\mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq}]}{1{,}753 \cdot 10^4 [\mathrm{MWh}]} = 45{,}631\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq\ MWh^{-1}} = 45{,}6\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq\ MWh^{-1}}$$

Vraag 8

- De windmolen levert in één uur 2,00 MWh. Over de levensduur van 25 jaar is dit:
  $\mathrm{E} = 2{,}00[\mathrm{MWh}] \cdot 24[\mathrm{uur\ dag^{-1}}] \cdot 365{,}25[\mathrm{dagen\ jaar^{-1}}] \cdot 25[\mathrm{jaar}] = 4{,}383 \cdot 10^5\ \mathrm{MWh}$
- De windmolen levert op jaarbasis 40% van zijn maximale vermogen:
  $\mathrm{E} = 4{,}383 \cdot 10^5 [\mathrm{MWh}] \cdot 0{,}40 = 1{,}753 \cdot 10^5\ \mathrm{MWh} = 1{,}75 \cdot 10^5\ \mathrm{MWh}$

Vraag 9

- Totale uitstoot van de 2,00 MW windmolen: $2.000\ \mathrm{ton\ CO_2\text{-}eq} = 2{,}00 \cdot 10^6\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq}$
- De bouwvoetafdruk is:

$$\mathrm{Bouwvoetafdruk} = \frac{2{,}00 \cdot 10^6 [\mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq}]}{2{,}00\ [\mathrm{MW}]} = 1{,}00 \cdot 10^6\ \mathrm{kg\ CO_2\text{-}eq\ MW^{-1}}$$

- Totale elektriciteitsproductie van de windmolen over de gehele levenscyclus: $1{,}753 \cdot 10^5$ MWh
- De gemiddelde CO_2-voetafdruk is:

$$\text{Gem. voetafdruk} = \frac{2{,}00 \cdot 10^6 [\text{kg CO}_2\text{-eq}]}{1{,}753 \cdot 10^5 [\text{MWh}]} = 11{,}408 \text{ kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1} = 11{,}4 \text{ kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}$$

Vraag 10

- De kolencentrale uit het voorbeeld levert in één uur 800 MWh. Over de levensduur van 50 jaar is dit:
  $\text{E} = 800[\text{MWh}] \cdot 24[\text{uur dag}^{-1}] \cdot 365{,}25[\text{dagen jaar}^{-1}] \cdot 50[\text{jaar}] = 3{,}506 \cdot 10^8 \text{ MWh}$
- De kolencentrale levert op jaarbasis 60% van zijn maximale vermogen:
  $\text{E} = 3{,}506 \cdot 10^8[\text{MWh}] \cdot 0{,}60 = 2{,}104 \cdot 10^8 \text{ MWh} = 2{,}10 \cdot 10^8 \text{ MWh}$

Vraag 11

- Uitstoot bij de bouw en afval: $1{,}20 + 0{,}90 = 2{,}10 \text{ Mton CO}_2\text{-eq}$
- Omgerekend naar kg CO_2-eq: $2{,}10 \text{ Mton CO}_2\text{-eq} = 2{,}10 \cdot 10^9 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
- De kolencentrale stoot $810 \text{ kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}$ uit. Bij de totale elektriciteitsproductie uit vraag 10:
  $810[\text{kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}] \cdot 2{,}10 \cdot 10^8[\text{MWh}] = 1{,}704 \cdot 10^{11} \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
- Alles bij elkaar levert dit een uitstoot op van:
  $2{,}10 \cdot 10^9 + 1{,}704 \cdot 10^{11} = 1{,}725 \cdot 10^{11} \text{ kg CO}_2\text{-eq} = 1{,}73 \cdot 10^{11} \text{ kg CO}_2\text{-eq}$

Vraag 12

- Totale uitstoot van de 800 MW kolencentrale: $1{,}725 \cdot 10^{11} \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
- De bouwvoetafdruk is:

$$\text{Bouwvoetafdruk} = \frac{1{,}725 \cdot 10^{11}[\text{kg CO}_2\text{-eq}]}{800 \text{ [MW]}} = 2{,}156 \cdot 10^8 \text{ kg CO}_2\text{-eq MW}^{-1}$$
$$= 2{,}16 \cdot 10^8 \text{ kg CO}_2\text{-eq MW}^{-1}$$

- Totale elektriciteitsproductie van de kolencentrale over de gehele levenscyclus: $2{,}104 \cdot 10^8$ MWh
- De gemiddelde CO_2-voetafdruk is:

$$\text{Gem. voetafdruk} = \frac{1{,}725 \cdot 10^{11}[\text{kg CO}_2\text{-eq}]}{2{,}104 \cdot 10^8[\text{MWh}]} = 819{,}982 \text{ kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}$$
$$= 820 \text{ kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}$$

Vraag 13

- De gascentrale uit het voorbeeld levert in één uur 400 MWh. Over de levensduur van 30 jaar is dit:
  $\text{E} = 400[\text{MWh}] \cdot 24[\text{uur dag}^{-1}] \cdot 365{,}25[\text{dagen jaar}^{-1}] \cdot 30[\text{jaar}] = 1{,}052 \cdot 10^8 \text{ MWh}$
- De kolencentrale levert op jaarbasis 60% van zijn maximale vermogen:
  $\text{E} = 1{,}052 \cdot 10^8[\text{MWh}] \cdot 0{,}60 = 6{,}312 \cdot 10^7 \text{ MWh} = 6{,}31 \cdot 10^7 \text{ MWh}$

Vraag 14

- Uitstoot bij de bouw en met afval: $350 + 300 = 650 \text{ kton CO}_2\text{-eq}$
- Omgerekend naar kg CO_2-eq: $650 \text{ kton CO}_2\text{-eq} = 6{,}50 \cdot 10^8 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$
- De gascentrale stoot $480 \text{ kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}$ uit. Bij de totale elektriciteitsproductie uit vraag 13:

$480[\text{kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}] \cdot 6{,}31 \cdot 10^7[\text{MWh}] = 3{,}030 \cdot 10^{10}\ \text{kg CO}_2\text{-eq}$

- Alles bij elkaar levert dit een uitstoot op van:
  $6{,}50 \cdot 10^8 + 3{,}030 \cdot 10^{10} = 3{,}095 \cdot 10^{10}\ \text{kg CO}_2\text{-eq} = 3{,}10 \cdot 10^{10}\ \text{kg CO}_2\text{-eq}$

Vraag 15

- Totale uitstoot van de 400 MW gascentrale: $3{,}095 \cdot 10^{10}$ kg CO_2-eq
- De bouwvoetafdruk is:

$$\text{Bouwvoetafdruk} = \frac{3{,}095 \cdot 10^{10} [\text{kg CO}_2\text{-eq}]}{400\ [\text{MW}]} = 7{,}736 \cdot 10^{7}\ \text{kg CO}_2\text{-eq MW}^{-1}$$
$$= 7{,}74 \cdot 10^{7}\ \text{kg CO}_2\text{-eq MW}^{-1}$$

- Totale elektriciteitsproductie van de gascentrale over de gehele levenscyclus: $6{,}312 \cdot 10^{7}$ MWh
- De gemiddelde CO_2-voetafdruk is:

$$\text{Gem. voetafdruk} = \frac{3{,}095 \cdot 10^{10} [\text{kg CO}_2\text{-eq}]}{6{,}312 \cdot 10^{7} [\text{MWh}]} = 490{,}299\ \text{kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}$$
$$= 490\ \text{kg CO}_2\text{-eq MWh}^{-1}$$

De volledige invulling van de Tabel 9 met behulp van vragen 4 t/m 15 is uiteindelijk:

	Kernenergie	Zonne-energie	Windenergie	Kolencentrale	Gascentrale
Vermogen	1.000 MW	1,00 MW	2,00 MW	800 MW	500 MW
Levensduur	60 jaar	20 jaar	25 jaar	50 jaar	30 jaar
Capaciteitsfactor	0,90	0,10	0,40	0,60	0,60
CO_2-equivalent uitstoot [kg CO_2-eq]	$\mathbf{5,60 \cdot 10^{9}}$	$\mathbf{8,00 \cdot 10^{5}}$	$\mathbf{2,00 \cdot 10^{6}}$	$\mathbf{1,73 \cdot 10^{11}}$	$\mathbf{3,10 \cdot 10^{10}}$
Bouwvoetafdruk [kg CO_2-eq MW^{-1}]	$\mathbf{5,60 \cdot 10^{6}}$	$\mathbf{8,00 \cdot 10^{5}}$	$\mathbf{1,00 \cdot 10^{6}}$	$\mathbf{2,16 \cdot 10^{8}}$	$\mathbf{7,736 \cdot 10^{7}}$
Gemiddelde CO_2-voetafdruk [kg CO_2-eq MWh^{-1}]	$\mathbf{11,8}$	$\mathbf{45,6}$	$\mathbf{11,4}$	$\mathbf{820}$	$\mathbf{490}$

Vraag 16

- Mogelijke aspecten die opvallen in deze tabel:
  - Kolen- en gascentrales hebben verreweg de hoogste gemiddelde CO_2-voetafdruk. Gascentrales hebben wel een iets lagere uitstoot.
  - Van de CO_2-vrije bronnen, is de gemiddelde CO_2-voetafdruk van zonne-energie relatief hoog, maar alsnog 10x lager dan die van gascentrales.

- Alhoewel de CO_2-equivalente uitstoot van kernenergie 1000x hoger is dan die van bijvoorbeeld windenergie, is de gemiddelde CO_2-voetafdruk vrijwel gelijk doordat kernenergie een hoog vermogen, lange levensduur en hoge capaciteitsfactor heeft.

7. Veiligheidskundige

Vraag 1

- Dosis van achtergrondstraling is: $1{,}7\ \mathrm{mSv\ jaar^{-1}}$
- Extra ontvangen dosis van een kerncentrale binnen een paar kilometer per jaar: $1{,}0 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{mSv}$
- Berekenen aan hoeveel jaar achtergrondstraling dit gelijk staat:
  $$\mathrm{t} = \frac{1{,}0 \cdot 10^{-3}[\mathrm{mSv}]}{1{,}7[\mathrm{mSv/jaar}]} = 5{,}882 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{jaar}$$
- Antwoord omrekenen naar uren:
  $$\mathrm{t} = 5.882 \cdot 10^{-4}[\mathrm{jaar}] \cdot 365{,}25[\mathrm{dagen\ jaar^{-1}}] \cdot 24[\mathrm{uur\ dag^{-1}}] = 5{,}156\ \mathrm{uur} = 5{,}2\ \mathrm{uur}$$

Vraag 2

- Voor alle vier de materialen berekenen met: $\mathrm{I(d)} = \mathrm{I}(0) \cdot \frac{1}{2}^{\mathrm{d/d_{1/2}}}$
- Voor $I(0)$ zal voor iedere berekening 100% gebruikt worden omdat we geïnteresseerd zijn in de individuele afname in intensiteit door één laag en niet de cumulatieve afname over alle lagen.
- In de tabel is voor elk materiaal $\mathrm{d_{1/2}}$ in de eerste kolom en d in de tweede kolom gegeven. Voor elk materiaal is de overgebleven stralingsintensiteit na de materiaaldikte:
  $I(180[\mathrm{cm}])_{\mathrm{water}} = 2{,}555 \cdot 10^{-16}\ \% = 2{,}55 \cdot 10^{-16}\ \%$ (afronding anders door 4e decimaal)
  $I(20[\mathrm{cm}])_{\mathrm{ijzer}} = 1{,}351 \cdot 10^{-121}\ \% = 1{,}4 \cdot 10^{-121}\ \%$
  $I(1.000[\mathrm{cm}])_{\mathrm{lucht}} = 78{,}07\ \%$
  $I(150[\mathrm{cm}])_{\mathrm{beton}} = 6{,}223 \cdot 10^{-59}\ \% = 6{,}2 \cdot 10^{-59}\ \%$
- IJzer is verreweg het effectiefst in de vermindering van stralingsintensiteit, al treedt er in het water (waar de straling als eerste doorheen gaat) ook een grote vermindering op. Uit deze berekeningen is verder op te merken dat lucht relatief slecht beschermd tegen straling.

Vraag 3

- Kerncentrales met een vermogen van 1.500 MW leveren in één uur:
  $E = 1.500[MW] \cdot 1{,}000[uur] = 1.500\ \mathrm{MWh}.$
- Per MWh hebben de kerncentrales $2.000\ \mathrm{L\ MWh^{-1}}$ nodig. Totaal benodigde water:
  $\mathrm{V} = 1.500[\mathrm{MWh\ uur^{-1}}] \cdot 2.000[\mathrm{L\ MWh^{-1}}] = 3{,}000 \cdot 10^{6}\ \mathrm{L\ uur^{-1}}$
- Omrekenen naar $\mathrm{m^3\ s^{-1}}$:
  $\mathrm{V} = 3{,}000 \cdot 10^{6}[\mathrm{L\ uur^{-1}}] = 3{,}000 \cdot 10^{6}[\mathrm{dm^3\ uur^{-1}}] = 3{,}000 \cdot 10^{3}\ \mathrm{m^3\ uur^{-1}}$
  $$\mathrm{V} = \frac{3{,}000 \cdot 10^{3}[\mathrm{m^3\ uur^{-1}}]}{3.600[\mathrm{sec\ uur^{-1}}]} = 0{,}8333\ \mathrm{m^3\ s^{-1}}$$

Vraag 4

- Stroomsnelheid in de Maas: $200\ \mathrm{m^3\ s^{-1}}$. Met het antwoord op vraag 3:

$$N_{\text{kerncentrales}} = \frac{200[\text{m}^3\ \text{s}^{-1}]}{0{,}8333[\text{m}^3\ \text{s}^{-1}]} = 240$$

- *Opmerking: dit is een opgave om de schaal van benodigde koelwater aan te geven. In de praktijk zouden er natuurlijk nooit 240 kerncentrales aan één rivier aangesloten worden.*

Vraag 5

- Dosis van één jaar natuurlijke achtergrondstraling is: $1{,}7\ \text{mSv}$
- Dosis van één banaan: $1{,}0 \cdot 10^{-4}\ \text{mSv banaan}^{-1}$
- Berekenen hoeveel bananen gelijk staat aan de dosis van één jaar achtergrondstraling

$$N_{\text{bananen}} = \frac{1{,}7\ [\text{mSv}]}{1{,}0 \cdot 10^{-4}\ [\text{mSv banaan}^{-1}]} = 1{,}7 \cdot 10^4\ \text{bananen}$$

- *Opmerking: dit is puur een vergelijkingsopgave. De dosis uit bananen werkt niet cumulatief, omdat je lichaam het kalium uitscheidt en er een evenwichtssituatie van kalium in je lichaam ontstaat. De totale jaarlijkse dosis door kalium komt in werkelijkheid neer op ongeveer 0,2 mSv.*

Vraag 6

- Voor het berekenen van de kracht wordt $F = m \cdot a$ gebruikt
- Hierin is $m = 180.000\ \text{kg}$ en $a = 1.440\ \text{km uur}^{-1}$
- De versnelling omrekenen naar m s^{-1}:

$$a = \frac{1.000[\text{m km}^{-1}] \cdot 1.440[\text{km uur}^{-1}]}{3.600[\text{sec uur}^{-1}]} = 400{,}0\ \text{m s}^{-1}$$

- De kracht berekenen met deze gegevens:

$$F_{\text{vliegtuig}} = 180.000[\text{kg}] \cdot 400{,}0[\text{m s}^{-1}] = 7{,}200 \cdot 10^7\ \text{N}$$

Vraag 7

- Bovenste vlak kubus is een vierkant met zijden van $60\ \text{m}$:

$$A = \text{lengte} \cdot \text{breedte} = 60[\text{m}] \cdot 60[\text{m}] = 3{,}600 \cdot 10^3\ \text{m}^2 = 3{,}6 \cdot 10^3\ \text{m}^2$$

- Formule voor de oppervlakte van een bol is $A_{\text{bol}} = 4\pi r^2$. Met $r = \frac{60[\text{m}]}{2} = 30\ \text{m}$:

$$A_{\text{bol}} = 4\pi \cdot (30\ [\text{m}])^2 = 1{,}131 \cdot 10^4\ \text{m}^2$$

- Voor de koepel, wat een halve bol is, is de oppervlakte dus $A = 5{,}655 \cdot 10^3\ \text{m} = 5{,}7 \cdot 10^3\ \text{m}$

Vraag 8

- Het weerstaan van een impact op gewapend beton wordt gegeven als: $15\ \text{kN m}^{-2} = 1{,}50 \cdot 10^4\ \text{N m}^{-2}$
- Voor de kubus betekent dat een maximale kracht van:

$$F_{\text{max}} = 3{,}600 \cdot 10^3[\text{m}^2] \cdot 1{,}5 \cdot 10^4\ [\text{N m}^{-2}] = 5{,}400 \cdot 10^7\ \text{N} = 5{,}4 \cdot 10^7\ \text{N} < F_{\text{vliegtuig}}$$

- Voor de koepel betekent dat een maximale kracht van:

$$F_{\text{max}} = 5{,}655 \cdot 10^3[\text{m}^2] \cdot 1{,}5 \cdot 10^4\ [\text{N m}^{-2}] = 8{,}482 \cdot 10^7\ \text{N} = 8{,}5 \cdot 10^7\ \text{N} > F_{\text{vliegtuig}}$$

- De koepel heeft een grotere oppervlakte en verspreidt daarover de impact waardoor het in dit geval, in tegenstelling tot de kubus, de klap kan opvangen.

- **Vraag 9**
- De volgende formule kan gebruikt worden: $\mathrm{I(d)} = I(0) \cdot \frac{1^{\mathrm{d}/\mathrm{d}_{1/2}}}{2}$
- Het afschermen van 99% van de stralingsintensiteit betekent dat de overgebleven stralingsintensiteit $I(d) = 100\% - 99\% = 1\%$ is. Met $I(0) = 100\%$ naar de linkerkant wordt de vergelijking:

  $$0{,}01 = \frac{1^{\mathrm{d}/\mathrm{d}_{1/2}}}{2}$$

- Uit deze vergelijking moet d berekend worden. Hiervoor het logaritme[2] van beide kanten nemen:

  $$\log_{1/2}(0{,}01) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}_{1/2}}$$

  $$\mathrm{d} = \mathrm{d}_{1/2} \cdot \log_{1/2}(0{,}01)$$

- De halveringsdikte voor gammastraling van 10 MeV in lood is gegeven: $\mathrm{d}_{1/2} = 1{,}23\ \mathrm{cm}$
- Dit invullen geeft voor de gevraagde looddikte: $\mathrm{d} = 8{,}172\ \mathrm{cm} = 8{,}17\ \mathrm{cm}$

Vraag 10

- Hiervoor kan direct verder gewerkt worden vanuit de vergelijking van de vorige opgave: $\mathrm{d} = \mathrm{d}_{1/2} \cdot \log_{1/2}(\mathrm{x})$
- Nu is in plaats van 0,01 (voor 99%) de overgebleven stralingsintensiteit 0,001 (99,9%)
- Dit geeft voor de benodigde looddikte:

  $$\mathrm{d} = 1{,}23[\mathrm{cm}] \cdot \log_{1/2}(0{,}001) = 12{,}258\ \mathrm{cm} = 12{,}3\ \mathrm{cm}$$

Vraag 11

- Gegeven is de dichtheid $19\ \mathrm{g\ cm}^3$. Omrekenen naar $\mathrm{kg\ m}^3$:

  $$19\ \mathrm{g\ cm}^3 = 1{,}9 \cdot 10^7\ \mathrm{g\ m}^3 = 1{,}9 \cdot 10^4\ \mathrm{kg\ m}^3$$

- Vermenigvuldigen met het gegeven volume van $3{,}0\ \mathrm{m}^3$ om de massa te berekenen:

  $$m = 3{,}0[\mathrm{m}^3] \cdot 1{,}9 \cdot 10^4[\mathrm{kg\ m}^3] = 5{,}7 \cdot 10^4\ \mathrm{kg}$$

Vraag 12

- De berekende massa van $5{,}7 \cdot 10^4\ \mathrm{kg}$ is de totale afvalmassa dat een kerncentrale met een vermogen van $1.000\ \mathrm{MW}$ in een jaar produceert, dus bij $7{,}889 \cdot 10^9\ \mathrm{kWh}$. Procentueel aandeel elektriciteitsgebruik van een gemiddeld huishouden is:

  $$\frac{3{,}840 \cdot 10^3[\mathrm{kWh}]}{7{,}889 \cdot 10^9[\mathrm{kWh}} \cdot 100\% = 4{,}868 \cdot 10^{-5}\ \%$$

- Hetzelfde procentuele aandeel aan afvalmassa is:

  $$\mathrm{m}_{\mathrm{huishouden}} = 5{,}7 \cdot 10^4[\mathrm{kg}] \cdot \frac{4{,}868 \cdot 10^{-5}[\%]}{100} = 2{,}774 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{kg} = 28\ \mathrm{g}$$

[2] Havo hoeft niet op deze manier met logaritmes te kunnen rekenen

- *Opmerking: het omrekenen naar percentages in de tussenstap is optioneel en wordt hier gedaan omdat rekenen met percentages vaak als intuïtiever wordt ervaren.*