

**FASIT oppgave 8**

Den 7. april 1989 sank den sovjetiske u-båten Komsomolets i nærheten av Bjørnøya.

Da u-båten sank inneholdt den  $3,1 \cdot 10^{15}$  Bq av Cs-137 og  $2,8 \cdot 10^{15}$  Bq av Sr-90.

Både Cs-137 og Sr-90 har halveringstider på ca 30 år.

Anrikningsfaktorene for fisk i saltvann er 48 for Cs-137 og 0,43 for Sr-90.

Strontium-90 er en rein  $\beta$ -emitter med en  $\beta_{\max}$  energi på 0,55 MeV.

Cesium-137 har to desintegrasjonsveier; 1) ved 5,4 % av desintegrasjonene emitteres det kun  $\beta$  ( $\beta_{\max} = 1,172$  MeV); 2) ved 94,6 % av desintegrasjonene emitteres det en  $\beta$  ( $\beta_{\max} = 0,512$  MeV) og en  $\gamma$  (0,662 MeV).  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

- a. Vi antar at båten ligger på en dybde på 1000 meter og at all Cesium og Strontium slipper ut og umiddelbart fordeles jevnt i de vannmassene som er innen en radius på 10 km fra båten.

**Hvilken spesifikk aktivitet (Bq/l) vil det være i vannmassen fra Cs-137 og Sr-90?**

\*\*\*

Volum av vannet:  $\pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot 10000^2 \text{ m}^2 \cdot 1000 = 3,142 \cdot 10^{11} \text{ m}^3 = 3,142 \cdot 10^{14} \text{ dm}^3$  (dvs liter)

Spesifikk aktivitet i vann fra Cs-137	$3,1 \cdot 10^{15} \text{ Bq} / 3,142 \cdot 10^{14} \text{ l}$	=	<u>9,9 Bq/l</u>
Spesifikk aktivitet i vann fra Sr-90	$2,8 \cdot 10^{15} \text{ Bq} / 3,142 \cdot 10^{14} \text{ l}$	=	<u>8,9 Bq/l</u>

- b. Fisk som oppholder seg i det forurensede området vil bli radioaktiv.

**Vis at fisken vil få en total spesifikk aktivitet i kroppen på ca 480 Bq/kg, hvorav ca 475 Bq/kg skyldes Cs-137.**

\*\*\*

Anrikningsfaktoren =  $C(\text{fisk}) \text{ Bq/kg} / C(\text{vann}) \text{ Bq/l}$

Spesifikk aktivitet i fisk fra Cs-137 = Anrik(Cs-137) · Spesifikk aktivitet i vann fra Cs-137  
 =  $48 \cdot 9,9 \text{ Bq/l} = \underline{475 \text{ Bq/l}}$  (dvs Bq/kg)

Spesifikk aktivitet i fisk fra Sr-90 = Anrik(Sr-90) · Spesifikk aktivitet i vann fra Sr-90  
 =  $0,43 \cdot 8,9 \text{ Bq/l} = \underline{3,8 \text{ Bq/l}}$  (dvs Bq/kg)

- c. **Vis at hver desintegrasjon av Cesium-137 (inne i fiskens kropp) avsetter i snitt ca 0,5 MeV; og at hver desintegrasjon av Strontium-90 (inne i fiskens kropp) avsetter i snitt ca 0,2 MeV.**

\*\*\*

Antar at 100%  $\beta$ -stråling og 50%  $\gamma$ -stråling avsettes inne i fisken.

Husk at  $\beta_{\text{middel}} = 1/3 \beta_{\max}$

Cs-137 har to desintegrasjonsveier (5,4 % og 94,6%)

<u>Cs-137:</u>	$\beta_1$	$0,054 \cdot 1,172 \text{ MeV} \cdot 1/3 \cdot 100\% = 0,021 \text{ MeV}$	
	$\beta_2$	$0,946 \cdot 0,512 \text{ MeV} \cdot 1/3 \cdot 100\% = 0,163 \text{ MeV}$	
	$\gamma$	$0,946 \cdot 0,662 \text{ MeV} \cdot 50\% = 0,318 \text{ MeV}$	
		<u>Middelenergi pr desintegrasjon <math>\approx 0,5 \text{ MeV}</math></u>	QED
<u>Sr-90:</u>	$\beta$	$100\% \cdot 0,54 \text{ MeV} \cdot 1/3 \cdot 100\% = 0,18$	
		<u>Middelenergi pr desintegrasjon <math>\approx 0,2 \text{ MeV}</math></u>	QED

- d. **Beregn de absorberte dosene som fisken forventes å få i løpet av ett år som følge av henholdsvis Cs-137 og Sr-90.** Du kan for enkelthetskyld anta at den spesifikke aktiviteten i fisken holder seg konstant hele året.

\*\*\*

Absorbert dose (Gy) = Energi absorbert (J) / masse (kg)

Energi absorbert = (Antall desintegrasjoner pr år) · (energi avgitt pr desintegrasjon)

Antall desintegrasjoner pr år = Aktivitet · sekunder pr år

Bq = s<sup>-1</sup>

Antall sekunder pr år = 365 · 24 · 60 · 60 = 3,1536 · 10<sup>7</sup> sek/år

Cs-137: 475 Bq/kg · 3,15 · 10<sup>7</sup> s/år · 0,5 · 10<sup>6</sup> eV · 1,6 · 10<sup>-19</sup> J/eV = 1,2 · 10<sup>-3</sup> J/kg · år = 1,2 mGy/år

Sr-90: 3,8 Bq/kg · 3,15 · 10<sup>7</sup> s/år · 0,2 · 10<sup>6</sup> eV · 1,6 · 10<sup>-19</sup> J/eV = 3,8 · 10<sup>-6</sup> J/kg · år = 3,8 μGy/år

---

e. Anta at det radioaktive materialet i u-båten ikke slipper ut før etter 15 år (dvs i år 2004).

**Hvilken absorbert dose vil fisken i området forventes å motta i perioden 2004-2005 som følge av Cs-137 og Sr-90 i fiskekroppen?**

\*\*\*

$$I = I_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = \ln 2 / 30 \text{ år} = 2,31 \cdot 10^{-2} \text{ år}^{-1}$$

$$t = 15 \text{ år}$$

$$\ln(I/I_0) = -\lambda t = -0,3465$$

$$I/I_0 = 0,71$$

Etter 15 år er intensiteten *I* lik 71 % av utgangintensiteten *I*<sub>0</sub>

Dosen som mottas i løpet av året 2004-2005 (når vi igjen forutsetter konstant aktivitet i løpet av året) blir derfor 71 % av verdiene funnet i oppgave d)

Cs-137: 475 Bq/kg · 3,15 · 10<sup>7</sup> s/år · 0,5 · 10<sup>6</sup> eV · 1,6 · 10<sup>-19</sup> J/eV · 0,71 = 1,2 · 10<sup>-3</sup> J/kg · år · 0,71 = 0,85 mGy/år

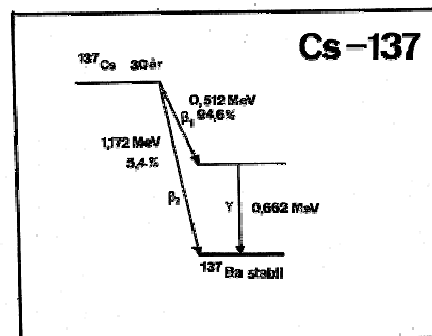
Sr-90: 3,8 Bq/kg · 3,15 · 10<sup>7</sup> s/år · 0,2 · 10<sup>6</sup> eV · 1,6 · 10<sup>-19</sup> J/eV · 0,71 = 3,8 · 10<sup>-6</sup> J/kg · år · 0,71 = 2,7 μGy/år

---

FASIT oppgave 9

Svømmetur i Tsjernobylnedfallet.

Den viktigste isotop som ble sluppet ut ved Tsjernobylulykken var Cs-137.  
 Totalt utslipp av Cs-137 var ca  $38\,000\text{ T Bq} = 38 \times 10^{15}\text{ Bq}$ .  
 $T_{1/2}$  (Cs-137) = 30 år  
 Massen til Cs-137 er ca 137 amu.  
 Avogadros tall  $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ .



a) Vis at det ble sluppet ut ca 11, 8 kg Cs-137.

For å finne mengde i gram eller kilo, må vi finne antall atomer – for så å finne totalmassen utfra vekten til ett atom (som er oppgitt til å være 137 amu)

Finner antall atomer ut fra aktiviteten og halveringstiden:  $A = \lambda \cdot N$

Finner  $\lambda$  ut fra halveringstiden:  $\ln 2 = \lambda \cdot t_{1/2} \rightarrow \lambda = \ln 2 / (30 \text{ år} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60) = 7,3265 \cdot 10^{-10}$

$$N = A / \lambda = 38 \cdot 10^{15} / 7,3265 \cdot 10^{-10} = 5,1867 \cdot 10^{25}$$

Ut fra antall atomer og kunnskap om vekten av ett atom kan vi beregne den totale massen.

Vi benytter oss av molbegrepet; dvs at 1 mol Cs-137 veier 137 gram (ettersom atommassen er 137 amu) og i ett mol av Cs-137 er det  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  atomer.

$$\text{Antall mol} = 5,1867 \cdot 10^{25} \text{ atomer} / 6,02 \cdot 10^{23} \text{ atomer/mol} = 86,16 \text{ mol}$$

$$\underline{\underline{\text{Totalmasse Cs-137} = 86,16 \text{ mol} \cdot 0,137 \text{ kg/mol} = 11,8 \text{ kg}}}$$

Anta at all Cs-137 detter ned i en forholdsvis liten innsjø, på 10 km x 10 km og 20 meter dyp.

b) Hvor stor stråledose vil en få etter en svømmetur på 10 minutter hvis en ikke drikker noe av vannet?

For å komme fra til stråledosen må det gjøres en del mellomregninger og antagelser. Hvis du følger "trinnene" nedenfor bør du kunne komme i havn.....

b-1) Finn konsentrasjonen (spesifikk aktivitet) av Cs-137 i vannet

$$\underline{\underline{\text{Volum av innsjøen: } 10\,000 \cdot 10\,000 \cdot 20 = 2,0 \cdot 10^9 \text{ m}^3 = 2 \cdot 10^{12} \text{ dm}^3 = 2 \cdot 10^{12} \text{ liter}}}$$

$$\underline{\underline{\text{Konsentrasjonen (spesifikk aktivitet) av Cs-137 i vannet} = 38 \cdot 10^{15} \text{ Bq} / 2 \cdot 10^{12} \text{ l} = 19\,000 \text{ Bq/l}}}$$

Først beregnes dosebidraget fra  $\beta$ -strålingen (deretter fra  $\gamma$ -strålingen. Dose er som kjent gitt som mildere energi absorbert pr masse (dvs kroppsvekt). Du må følgelig finne  $\beta$ -energien som avgis pr desintegrasjon, og hvor mange  $\beta$ -partikler som når kroppen :

b-2) Finn middelenergi fra  $\beta$ -stråling som avgis pr. desintegrasjon ved å bruke decayskjemaet.

Middelenergi avgitt pr. desintegrasjon

$$94,6\% \cdot 0,512 \text{ MeV} / 3 + 5,4\% \cdot 1,172 \text{ MeV} / 3 = 0,18 \approx \underline{\underline{0,2 \text{ MeV}}}$$

**b-3) Finn hvor mange  $\beta$ -partiklene som når kroppen i løpet av 10 minutter, når du antar:**

- $\beta$ -partikler med energi på 0,2 MeV har en rekkevidde på ca 1mm i vann.
- Kroppen kan simuleres ved hjelp av en sylinder med høyde 180 cm og diameter 22 cm (volum = 68,4 dm<sup>3</sup>, tetthet  $\approx$  1 kg/dm<sup>3</sup>, dvs vekt  $\approx$  70 kg).
- Kroppen er oppreist og  $\beta$ -partiklene beveger seg kun horisontalt.
- Halvparten av  $\beta$ -partiklene i det 1 mm tykke vannskallet rundt kroppen treffer kroppen (se bort fra topp- og bunnflater ettersom det antas at  $\beta$ -partiklene beveger seg horisontalt).

Rekkevidden til  $\beta$ -partikler med energi på 0,2 MeV er ca 1mm i vann.

→  $\beta$ -dosebidrag kun fra de Cs-137 atomene som befinner seg i et skall på 1 mm utenfor kroppen

Antar en et kroppsvolum som en cylinder med høyde 180 cm og diameter 22 cm (volum = 68,4 dm<sup>3</sup>, dvs vekt  $\approx$  70 kg).

Volum av 1 mm tykt skjell utenfor kroppen

$$V = (\pi R^2 - \pi r^2) \cdot h \quad r = 220/2 = 110 \text{ mm} \quad R = 220/2 \text{ mm} + 1 \text{ mm} = 111 \text{ mm} \\ = \pi \cdot 1,8(0,111^2 - 0,11^2) = 1,25 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = \underline{1,25 \text{ liter}}$$

$\beta$ -partiklene går i "alle" retninger

→ antar at halvparten (50%) av  $\beta$ -partiklene i det 1 mm tykke skjellet treffer kroppen.

$$\underline{\text{Antall } \beta\text{-som når kroppen pr. sekund}} = 19\,000 \text{ Bq/l} \cdot 1,25 \text{ l} \cdot 50\% = 11\,875$$

$$\underline{\text{Antall } \beta\text{-som når kroppen i løpet av 10 minutter}} = 11\,875 \text{ s}^{-1} \cdot 10 \text{ min} \cdot 60 \text{ s/min} = \underline{7,1 \cdot 10^6}$$

*Du har nå funnet antall  $\beta$ -partikler som antas å nå huden i løpet av de 10 minuttene badeturen varer. Når du kjenner energien til hver av disse  $\beta$ -partiklene, samt hvor mye av denne energien som avsettes i kroppen, og i hvilket volum energien avsettes (husk at  $\beta$  har kort rekkevidde) kan den absorberte dosen beregnes.*

**b-4) Finn total  $\beta$ -energi avsatt i kroppen når du antar at  $\beta$ -partiklene taper omlag 50% av sin energi før de treffer huden.**

Middelenergi avgitt pr. desintegrasjon  $\approx$  0,2 MeV

$\beta$ -partiklene avgir en del energi før de treffer huden, anta at de taper omlag 50%

→ Middelenergi deponert i huden pr. desintegrasjon  $\approx$  0,1 MeV

Middelenergi deponert i huden i løpet av 10 minutter =

$$7,1 \cdot 10^6 \text{ desintegrasjoner} \cdot 0,1 \cdot 10^6 \text{ eV/desintegrasjon} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} \approx \underline{1,14 \cdot 10^{-7} \text{ J}}$$

*Da gjenstår det bare å finne massen som denne energien fordeles utover. Ettersom  $\beta$ -strålingen har så kort rekkevidde kan en ikke anta at den fordeles utover hele kroppen (dvs ca 70 kg).*

**b-5) Finn massen av huden (hvor energien deponeres) når du antar at  $\beta$ -strålingen ikke trenger dypere inn enn 1,0 mm.**

Du kan anta at tettheten til hud er omtrent det samme som tetthet til vann, dvs 1,0 kg/dm<sup>3</sup>

Se bort fra topp- og bunnflater ettersom det antas at  $\beta$ -partiklene beveger seg horisontalt.

Antar at alle energien avsette i det øvre hudlaget, dvs ca 1 mm.

Massen til dette hudlaget  $\approx$  1 · 10<sup>-3</sup> m (2 $\pi$  · h)

$$= 1 \cdot 10^{-1} \text{ m} \cdot 2\pi \cdot 0,11 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ m} = 0,00124 \text{ m}^3 = 1,24 \text{ dm}^3 \\ = \underline{1,24 \text{ kg}} \text{ (antar samme tetthet som vann, dvs 1 kg/dm}^3\text{)}$$

**b-6) Og da kan du endelig finne den absorberte dosen som skyldes  $\beta$ -stråling fra Cs-137 etter en 10 minutters svømmetur i Tsjernobyltjupp.**

Dose absorbert i huden fra  $\beta$ -partiklene

$$D = 1,14 \cdot 10^{-7} \text{ J} / 1,24 \text{ kg} = 9,19 \cdot 10^{-8} \text{ J/kg} \approx \underline{0,1 \mu\text{Gy}}$$

dvs SVÆRT LITE

*Men, du er ikke ferdig riktig enda; det gjenstår å finne dosebidraget fra  $\gamma$ -strålingen fra Cs-137.*

**b-7) Finn midlere  $\gamma$ -energi pr desintegrasjon.**

$$\text{Middelenergi pr desintegrasjon: } 94,6\% \cdot 0,662 \text{ MeV} = \underline{0,626 \text{ MeV}}$$

*På samme måte som for  $\beta$ -strålingen må du beregne hvor mange  $\gamma$ -kvanter som når fram til huden.*

*$\gamma$ -stråling absorberes forholdsvis bra i vann, men har likvel en langt større rekkvidde enn  $\beta$ -partikler. Halveringstykkelser er ca 10 cm for  $\gamma \approx 0,7 \text{ MeV}$  i vann. Bergningen av antall fotoner som når fram til kroppen gjøres etappevis.*

*Det er kun 3 % ( $1/2^5 = 0,03$ ) av strålingen som når lenger enn 5 halveringslag dvs 50 cm. Vi antar derfor for enkelthetskyld at det kun er  $\gamma$ -partikler som er 50 cm eller nærmere kroppen som vil kunne nå fram til kroppen. Vi antar fortsatt at strålingen beveger seg horisontalt, det betyr at alle vannlagene har samme høyde som kroppen, dvs 180 cm.*

*Vi deler opp vannlaget på 50 cm i 5 lag:*

0-10 cm      10-20 cm      20-30 cm      30-40 cm      40-50 cm

*og setter middelavstand i hvert lag til*

5 cm      15 cm      25 cm      35 cm      45 cm

**b-8) Beregn hvor mye stråling som når fram til huden fra hvert av de 5 lagene ved å bruke**

$$N/N_0 = e^{-\mu x}$$

*x angir middelavstanden i laget.*

*Husk at absorpsjonskoeffisienten  $\mu$  kan relateres til halvverdilaget.*

0-10	10-20	20-30	30-40	40-50 cm	Lag
71%	35%	18%	9%	3%	Andel som kan nå fram*

*\*Strålingen går i "alle" retninger, hvilket betyr at ca 50% av alle fotonene peker i retning kroppen*

**b-9) Beregn volumet til hvert av lagene.**

0-10	10-20	20-30	30-40	40-50 cm	Lag
181 l	294 l	407 l	520 l	633 l	Volum

**b-10) Finn totalt antall fotoner som når kroppen i løpet av 10 minutter** når du antar (på samme måte som for  $\beta$ -strålingen) at bare halvparten av  $\gamma$ -kvantene vil treffe kroppen (den beveger seg i "alle" retninger).

*Strålingen går i alle retninger, hvilket betyr at ca 50% av alle fotonene peker i retning kroppen*

*Total antall fotoner som når kroppen pr sekund:*

$$19\,000 \text{ Bq/l} \cdot 50\% (0,71 \cdot 181 + 0,35 \cdot 294 + 0,18 \cdot 407 + 0,09 \cdot 520 + 0,03 \cdot 633)l = 3,5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$$

Total antall fotoner som når kroppen i løpet av 10 minutter:  $2,1 \cdot 10^9$

$\gamma$ -strålingen har langt større rekkevidde enn  $\beta$ -stråling, og du kan derfor anta at strålingen som treffer huden vil gå langt dypere enn bare det ytterste hudlaget.

**b-11) Finn den absorberte dosen når du antar at all  $\gamma$ -strålingen som treffer kroppen deponeres i kroppen og at energien fordeles jevnt gjennom kroppen.**

Antar at strålingen fordeles jevnt gjennom kroppen, dvs masse  $\approx 70 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} \text{Energi deponert} &= 2,1 \cdot 10^9 \text{ desintegrasjoner} \cdot 0,626 \cdot 10^6 \text{ eV pr desintegrasjon} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} \\ &= \underline{2,1 \cdot 10^{-4} \text{ J}} \end{aligned}$$

Dose absorbert i kroppen fra  $\gamma$ -stråling

$$\underline{D} = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ J} / 70 \text{ kg} = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ J/kg} = \underline{3 \mu\text{Gy}}$$

**b) Hva er den totale dosen fra  $\beta$ -og  $\gamma$ -strålingen?**

$$\begin{aligned} \text{Absorbert dose til hud fra } \beta &= 0,1 \mu\text{Gy} & w_R=1 & w_o(\text{hud})=0,01 \\ \text{Effektiv dose fra } \beta &= 1 \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 0,01 = 1 \cdot 10^{-9} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Absorbert dose til helekroppen fra } \gamma &= 3 \mu\text{Gy} & w_R=1 & w_o(\text{kroppen})=1 \\ \text{Effektiv dose fra } \gamma &= 3 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1 = 3 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

$$\underline{\text{Total effektiv dose}} = 3,01 \cdot 10^{-6} \text{ Sv} \approx \underline{3 \mu\text{Sv}}$$

*Dersom innsjøen var blitt redusert til  $1 \times 1 \text{ km}^2$ , men med samme dybde, ville stråledosen blitt omlag det samme som et røntgenbilde av brystkassa.*

**c) Hva er en typisk dose fra et røntgenbilde av brystkassa?**

Reduksjon av innsjøen fra  $10 \times 10 \text{ km}$  til  $1 \times 1 \text{ km}$  ville bety en faktor hundre i reduksjon av volum, dvs en faktor 100 i Cs-137 konsentrasjonen.

$$\text{Dosen ville følgelig økt med en faktor 100: } 3 \cdot 10^{-6} \text{ Gy} \cdot 100 = 3 \cdot 10^{-4} = \underline{0,3 \text{ mGy}}$$