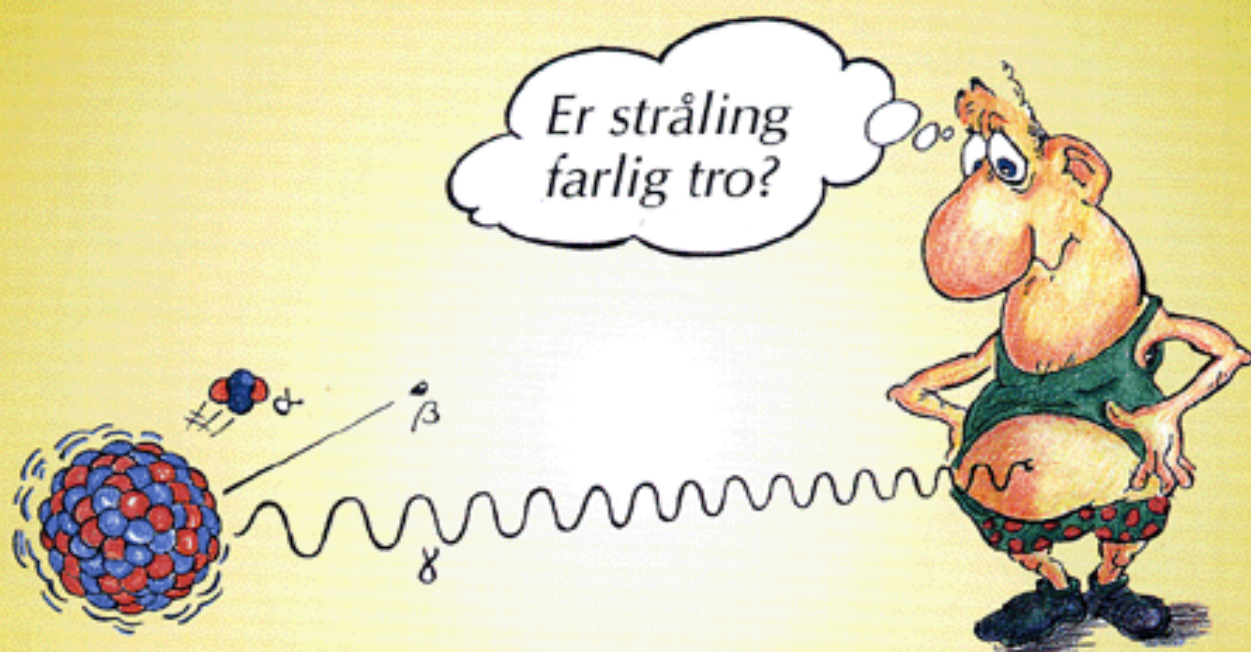


# Vår strålende Verden



## *Radioaktivitet, røntgenstråling og helse*

### TEMAHEFTE 2

Ellen K. Henriksen  
Thormod Henriksen

Fysisk institutt,  
Universitetet i Oslo



## TEMAHEFTE OM MILJØFYSIKK

laget til utstillingen

### *"Vår strålende verden"*

på Norsk Teknisk Museum

Oppdatert våren 2005



For å ta vare på natur og miljø er det viktig med kunnskap. Mer kunnskap om miljøproblemer vil gi oss et bedre og tryggere grunnlag når vi skal fatte vedtak i miljøspørsmål.

Faget fysikk er viktig for en rekke globale miljøemner (slik som radioaktivitet, drivhuseffekt, ozonlag og UV-stråling). Ved Fysisk institutt på Universitetet i Oslo gir vi informasjon om disse emnene.

I april 1996 åpnet miljøutstillingen *Vår strålende verden* på Norsk Teknisk Museum (NTM) i Oslo. Utstillingen var et samarbeid mellom NTM og Universitetet, og den omhandlet ozon og UV-stråling, drivhuseffekt og klima, radioaktivitet og helse, og nordlys.

*Fysisk institutt ved Universitetet i Oslo* har laget tre temahefter i forbindelse med utstillingen. Dette heftet (hefte 2) handler om radioaktivitet, røntgenstråling og helse. Det første heftet, *Deilig er den himmel blå*, dreier seg om ozon, UV-stråling og drivhuseffekt, mens det tredje heftet, *Nordlys*, er om nordlys. Fagstoffet i heftene er popularisert, og alle som har interesse for natur miljø kan lese dem. De kan brukes på flere trinn i skolen, av politikere og miljøorganisasjoner. Vi takker alle som har hjulpet til og en særlig takk til Per Einar Arnstad for tegninger og illustrasjoner.

2. utgave av heftet – november 1998

Ellen Henriksen

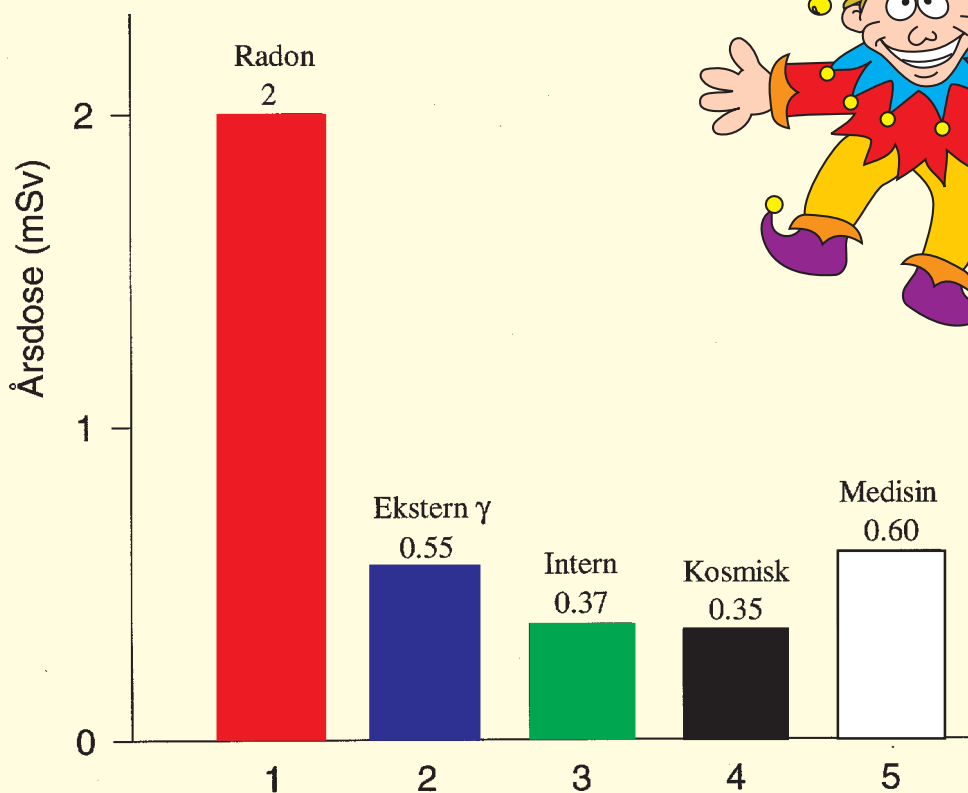
Thormod Henriksen

Forskning gjennom de siste 7 årene har ført til at vi vil oppdatere heftet igjen. Vi har fått med nye spennende resultater når det gjelder strålebiologi og studiet av celler som vokser i kultur. Vi har også et ønske om at så mange som mulig skal få tilgang til slike resultater og legger derfor heftet ut på internett. Du kan bruke dette heftet som utgangspunkt for dypere studier.

# Innhold

|   |    |  |    |
|---|----|--|----|
| Vår strålende verden.....                                       | 2  | Tsjernobylulykken.....                     | 22 |
| Røntgenstråling og radioaktivitet.....                          | 3  | Prøvesprengninger.....                     | 25 |
| Hva er stråling?.....   | 4  | Slik beregner du stråledoser.....          | 26 |
| Røntgenstråling blir til når elektroner bråbremses.....         | 4  | Konklusjon om radioaktiv forurensning..... | 29 |
| Radioaktivitet.....   | 5  | Hva skjer når du bestråles?.....           | 30 |
| Hva er en isotop?.....  | 5  | Primære strålingsprosesser.....            | 31 |
| Hvordan dør radioaktiviteten ut?.....                           | 6  | DNA-molekylet.....                         | 32 |
| Henfallsskjema.....   | 7  | Stråleskader på DNA.....                   | 33 |
| Radioaktive serier.....   | 8  | Strålebiologi celler.....                  | 35 |
| Egenskaper til $\alpha$ -, $\beta$ - og $\gamma$ -stråling..... | 9  | Stråling og helse.....                     | 36 |
| Stråledoser. Gray og sievert.....                               | 10 | Store stråledoser og helse .....           | 38 |
| Måling av stråling.....   | 11 | Små stråledoser og helse.....              | 39 |
| Fem strålekilder som angår deg.....                             | 12 | Mekanisme for kreft .....                  | 40 |
| Radon.....  | 13 | Dose-effekt kurve for kreft .....          | 41 |
| Medisinsk bruk av stråling.....                                 | 15 | Stråling – Risiko – Strålevern .....       | 43 |
| Ekstern $\gamma$ -stråling.....                                 | 16 | Stråling og genetikk .....                 | 44 |
| Radioaktivitet i kroppen (intern stråling).....                 | 17 | Energi i atomkjernen.....                  | 45 |
| Kosmisk stråling.....   | 18 | Kjernekraft.....                           | 47 |
| Stråling i forskning, industri og dagligliv.....                | 19 | Atomvåpen.....                             | 50 |
| Strålevern .....  | 21 | Radioaktivitet i nordlige havområder.....  | 51 |

## De 5 viktigste strålekilder vi har i Norge og dosene de gir oss i løpet av et år.



Din personlige stråledose er avhengig av hvor du bor, hvilket yrke du har og din livsstil. Stråledosen vi fikk i tillegg fra Tsjernobylulykken er liten i forhold til dem du ser her.

# Vår strålende verden

Det er mange typer stråling vi har rundt oss - vi kan godt si at vi lever i en "strålende" verden. Sola, lufta, jorda vi bor på; ja, selv vår egen kropp sender ustanselig ut stråling av ulike slag. Er du ute en solskinsdag, blir du truffet av synlig lys, varmestråling, og UV-stråling fra sola. Sola sender også ut partikkelstråling som på klare vinternetter gir praktfulle nordlys for oss som lever langt mot nord. Nordlyset har gitt inspirasjon til dikt og bilder, som f.eks. Nansens fine tegning nedenfor.

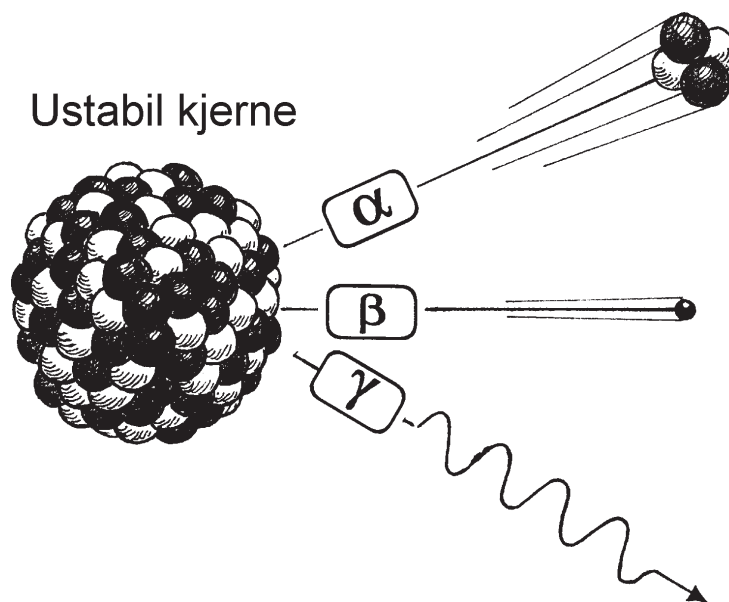
Moderne teknologi har gjort at vi nå kan påvirke deler av strålingsmiljøet. Vi kan fremstille radioaktive stoffer og lage røntgenstråling i røntgenapparater. Vi kan lage UV-stråling - mange benytter seg av det i solarier. Vi kan også lage mikrobølger, og mange har mikrobølgeovner på kjøkkenet. De fleste er også kjent med radar og lasere av ulike typer. Alle radiatorer og ovner sender ut varmestråling.

Vi skal ikke diskutere alle disse stråle-typene i dette heftet, men peke på at vi har laget et hefte om ozon, UV-stråling og drivhuseffekt (Hefte 1) og et om Nordlys (Hefte 3)



*Nordlys oppstår når partikkelstråling stoppes i jordatmosfæren*

## Ustabil kjerne



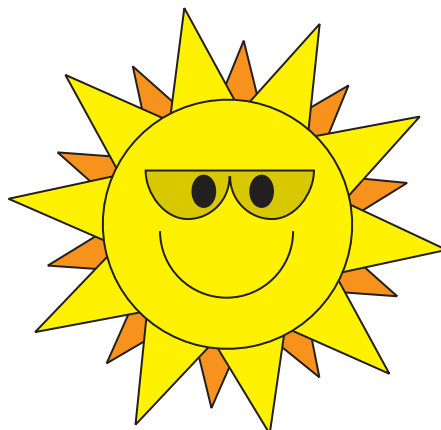
*En radioaktiv kilde består av ustabile atomer som før eller senere sender ut **stråling**. Strålingen fra radioaktive kilder kan være av 3 forskjellige typer: alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) og gamma ( $\gamma$ ). Alle tre fører til at atomer og molekyler som treffes blir **ionisert**. I dette heftet kan du lese mer om ioniserende stråling og dens egenskaper, hvordan vi måler den og ikke minst hvilken betydning den har for vår helse.*

Stråling av ulike slag er en del av våre livsbetingelser. Livet på jorda startet og utviklet seg i et hav av stråling. Kanskje var stråling - UV-stråling eller stråling fra radioaktive kilder - en nødvendig faktor i denne prosessen.

Noe av strålingen merker vi som varme, noe oppfatter øynene våre som lys. Den ioniserende strålingen, som kommer fra røntgenapparater og fra radioaktive atomkjerner, kan vi ikke merke med sansene. Likevel blir vi utsatt for slik stråling hver dag hele livet. **Det er denne ioniserende strålingen som er tema for dette heftet.**

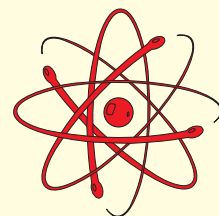
Når du er ute, blir du utsatt for ioniserende stråling fra radioaktive stoffer i bakken og kosmisk stråling fra verdensrommet. Når du er inne, utsettes du for stråling fra radioaktive stoffer i tak og vegger og fra radongass som er i lufta du puster inn. Selv din egen kropp er radioaktiv - et voksent menneske er en strålekilde på omkring 7000 becquerel.

Ioniserende stråling - det vil si stråling fra radioaktive stoffer og fra røntgenapparater - fremstilles ofte som farlig, og mange vil bruke store ressurser for å fjerne den. Vi skal vise deg at dette er en spennende og mangfoldig stråletype som har reddet langt flere menneskeliv enn den har tatt. Vi håper at faglig informasjon kan hjelpe deg å vurdere i hvilke situasjoner stråling er nyttig, og i hvilke situasjoner den kan være farlig.



*Sola sender bl.a. ut lys, varmestråling, UV-stråling og partikkelstråling.*

# Røntgenstråling og radioaktivitet



## Røntgenstrålingen oppdages



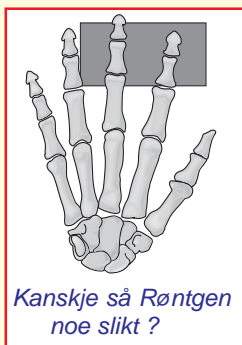
*Wilhelm Conrad Röntgen*

Det var i 1895 at tyskeren Wilhelm Conrad Röntgen rent tilfeldig oppdaget en ny stråletype som han kalte for "X-strahlen". Dette navnet brukes ennå i engelsktalende land (X-rays), mens vi på norsk ganske enkelt kaller det **røntgenstråling**. Du stifter nærmere bekjentskap med denne strålingen når du tar et røntgenbilde hos tannlegen eller på et sykehus.

Som mange andre på 1890-tallet var Röntgen opptatt av å studere elektriske utladninger ("gnister") i glassrør som inneholdt fortynnet gass. Den 8. november 1895 hadde han dekket et slikt rør med sort papir og slukket lyset i rommet før han satte høyspenning mellom elektrodene i røret. Forbauselsen var stor da han så at en fluorescerende skjerm som han hadde i laboratoriet, begynte å lyse! Han fant fort ut at det var stråling fra det tildekkede utladningsrøret som fikk skjermen til å lyse. Dette var så interessant at Röntgen "glemte" sine vanlige studier og gikk over til å studere det nye fenomenet.

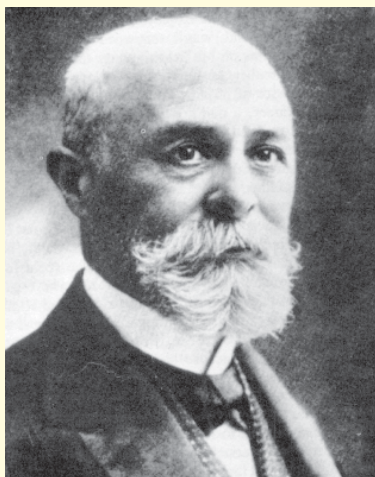
Han forsøkte å stoppe strålene, men det var ikke lett; de gikk gjennom både tykke bøker og treplater. Röntgen holdt en metallbit inn i strålegangen og så at skjermen fortsatt lyste, men svakere. Det som forbauset Röntgen

mest, var imidlertid at han så silhuetten av knoklene i sin egen hånd som holdt biten!



Bare noen uker etter Röntgens oppdagelse ble den nye strålingen tatt i bruk til medisinsk diagnostikk. I dag er røntgen et av de viktigste hjelpemidler vi har til å "se inn" i kroppen vår. Det er kanskje ikke så rart at det nettopp ble Röntgen som fikk den aller første Nobelpris i fysikk i 1901.

## Radioaktiviteten oppdages



*Henri A. Becquerel*

Bare fire måneder etter Röntgens oppdagelse skjedde en annen stor oppdagelse. Den franske fysikeren Henri A. Becquerel studerte stoffer som lyste når de ble truffet av solstråling. For å registrere lyset fra disse, brukte han fotografiske plater ("film"). Lyset svertet filmen. Et av stoffene han undersøkte, inneholdt uran. Dette stoffet hadde han liggende i en skuff sammen med de fotografiske platene. En dag kom han til å framkalle en av platene uten at den hadde vært utsatt for sollys. Til sin forbauselse fant han at filmen var svertet der det uranholdige stoffet hadde ligget! Becquerel fant ut at uranet spontant og ustoppelig sendte ut en inntil da ukjent stråling. Radioaktiviteten var oppdaget.

## Familien Curie

En ung, polsk jente som het Marie Sklodowska studerte fysikk i Paris på denne tiden. I 1895 giftet hun seg med den 8 år eldre fysikeren Pierre Curie. De fikk to barn, begge jenter, og den eldste av dem ble fysiker som foreldrene. Disse tre har satt dype spor etter seg innen utforskningen av radioaktivitet og stråling. De har vært med på å vinne hele tre Nobelpriser.

- 1. Fysikkprisen 1903:** Prisen ble delt mellom Marie og Pierre Curie og Henri Becquerel for oppdagelsen og utforskningen av radioaktiviteten. Marie og Pierre oppdaget bl.a. to nye, radioaktive grunnstoffer som fikk navnene polonium (etter Maries hjemland, Polen) og radium ("Det som stråler").
- 2. Kjemiprisen 1911:** Pierre døde i en trafikkulykke med hestekjøretrøyer i Paris i 1906, bare 47 år gammel. Marie arbeidet videre og klarte å fremstille radium, noe som fikk stor betydning i kampen mot kreft. For dette fikk hun kjemiprisen i 1911.
- 3. Kjemiprisen 1935:** I 1924 ble den unge Frederic Joliot ansatt som assistent hos Marie Curie. To år senere giftet han seg med Maries datter, Irene Curie. De arbeidet sammen, og i 1934 greide de for første gang å fremstille kunstige radioaktive stoffer. For dette fikk de kjemiprisen i 1935.



*Marie Sklodowska Curie*

## Hva er stråling?

Først skal vi komme med en ganske korrekt vitenskapelig definisjon:

**Stråling er transport av energi fra en strålekilde**

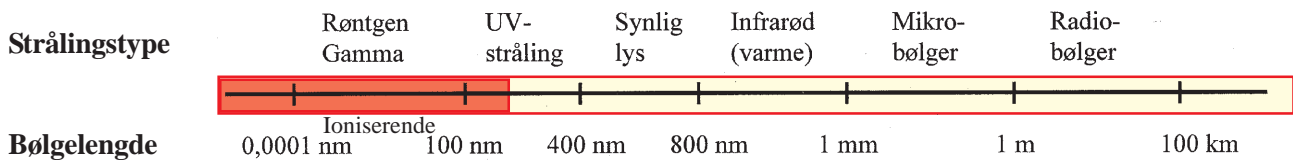
Du synes kanskje dette virker vanskelig, men når du leser videre vil du bli bedre kjent med hva stråling er. Etter hvert skal vi nærme oss et svar på spørsmålet på tegningen til høyre: *Er stråling farlig?*



Strålingen som vi snakker om, kalles med en fellesbetegnelse for **ioniserende stråling**, fordi den har energi nok til å ionisere (dvs. "sparke ut" elektroner fra) atomer og molekyler som den treffer på sin vei. Strålingen kan bestå av partikler eller av elektromagnetisk stråling (fotoner). **Partikkelstråling** er atomkjerner eller kjernepartikler i bevegelse. Den kan komme fra radioaktive stoffer ( $\alpha$ - eller  $\beta$ -stråling) eller fra verdensrommet. Partiklene har masse.

**Elektromagnetisk stråling** har ingen masse, bare energi. Den kan beskrives som bølger eller **fotoner** (små energipakker). Både gammastråling og røntgenstråling består av fotoner. Forskjellen er hvordan de produseres: Røntgenstråling kommer fra et røntgenapparat som vi kan skru på og av. En radioaktiv kilde som sender ut  $\gamma$ -stråling kan du ikke "skru av", men du kan beskytte deg mot den med betong, bly eller lang avstand.

På figuren under ser du **det elektromagnetiske spekteret**, der de ulike strålingstypene er navngitt og ordnet etter stigende energi mot venstre, eller etter økende bølgelengde mot høyre. Stråling som har nok energi til å slå ut elektroner fra atomer og molekyler (ioniserende stråling) har kortere bølgelengde enn ca. 150 nm. Mange andre typer elektromagnetisk stråling, som lys, UV-stråling eller radiobølger, er **ikke** ioniserende.



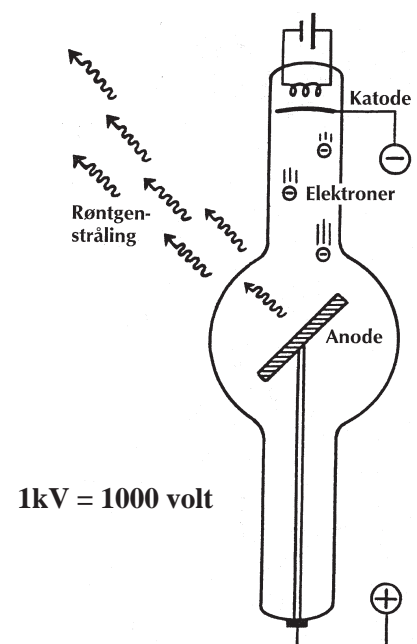
## Røntgenstråling blir til når elektroner bråbremses

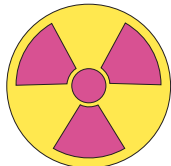
For å lage røntgenstråling må du ha et glassrør slik som i figuren til høyre. Du pumper ut luften i røret og har to elektroder som du setter høyspenning mellom. Så varmer du opp katoden (den negative elektroden) slik at den sender ut elektroner. De er negativt ladd og vil trekkes over mot anoden (den positive elektroden). Jo større spenning mellom elektrodene, desto større fart og energi får elektronene.

Så braser elektronene med full fart inn i anoden, som er laget av wolfram eller et annet tungmetall. Når elektronene bråbremses i metallet, mister de energi. Det meste går over til varme i

anoden (den må derfor kjøles med vann), men litt omformes til elektromagnetisk stråling. Det er røntgenstråling! Den delen av energien som går over til stråling, vil variere fra null og opp til en øvre grense som er lik energien elektronene hadde da de traff anoden. Dette betyr at fotonene i røntgenstrålingen fra et slikt rør kan ha mange ulike energier - et helt spektrum av røntgenstråling. Noen ganger kaller vi dette for **bremsstråling**.

For å beskrive røntgenstråling oppgir vi gjerne maksimalenergien, som er bestemt av spenningen mellom elektrodene. Den kan være fra 25 til 300 kV.

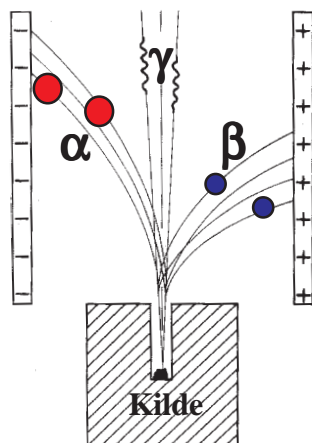




## Radioaktivitet

En radioaktiv kilde består av ustabile atomkjerener. De vil før eller senere gå over i en mer stabil tilstand. Dette skjer ved utsendelse av stråling.

Det er tre typer stråling som sendes ut fra radioaktive stoffer. De kalles  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta) og  $\gamma$  (gamma) etter de tre første bokstavene i det greske alfabet. Ved å la strålingen passere gjennom et elektrisk felt, kan man se at  $\alpha$ -strålingen er positivt ladd,  $\beta$  har negativ ladning og  $\gamma$  er nøytral.



### Hva er $\alpha$ -, $\beta$ - og $\gamma$ -stråling?

**$\alpha$ -stråling** er partikler som består av 2 protoner og 2 nøytroner. Det er kjernen i heliumatomet.

**$\beta$ -stråling** er elektroner – evt. positroner.

**$\gamma$ -stråling** er fotoner (energipakker av elektromagnetisk stråling).

Når en radioaktiv kjerne sender ut stråling, sier vi at den **henfaller**. Kjernen går da over til et annet grunnstoff. For eksempel kan kjernen til radium, Ra-226 (tallet betyr at kjernen veier 226 atomvektenheter) sende ut en  $\alpha$ -partikkel og derved bli til radon (Rn-222) som veier 4 atomvektenheter mindre.

Noen kjerner har altså evnen til å henfalle til andre kjerner ved utsendelse av stråling. Men hva er det som gjør at noen kjerner er stabile, andre ikke? Atomkjernen er satt sammen av kjernepartikler, dvs. protoner og nøytroner. Det viser seg at noen sammensetninger av kjernepartikler er energimessig mer gunstige enn andre; kjernen "foretrekker" visse spesielle kombinasjoner av antall protoner og nøytroner. En kjerne som har et ugunstig antall kjernepartikler, kan være ustabil, dvs. at den har en viss sannsynlighet for spontant å henfalle - den er **radioaktiv**.

Enhver ustabil kjerne har en viss **sannsynlighet** for å henfalle når som helst. Men det går ikke an å forutsi **når** en bestemt kjerne vil henfalle. Har vi et stort antall kjerner, kan vi imidlertid forutsi nokså nøyaktig **hvor mange** av dem (men ikke **hvilke**) som kommer til å sende ut stråling i et bestemt tidsintervall.

En radioaktiv kildes styrke eller aktivitet viser hvor mange kjerner som henfaller hvert sekund. Det måles i enheten becquerel (Bq), oppkalt etter den franske fysikeren.

**1 becquerel er ett henfall pr sekund.**

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

Les om isotoper her !



### Hva er en isotop ?

En **isotop** er en "variant" av et grunnstoff. Du har sikkert lært at i et grunnstoff er alle atomene like, og det stemmer - nesten! Alle atomkjerener i et grunnstoff har et bestemt antall positivt ladde protoner. Men i kjernen finnes også nøytroner, som har samme masse som protonene, men ingen elektrisk ladning. De fleste grunnstoffer kan forekomme i flere varianter med ulikt antall nøytroner i kjernen.

Nøytrontallet har liten virkning på grunnstoffets kjemiske egenskaper, med det påvirker selvsagt atommassen. Variantene kalles **isotoper**. De fleste grunnstoffer forekommer i flere isotoper, og i mange tilfeller er minst én av dem radioaktiv. Dette er f.eks. tilfellet med hydrogenisotopen tritium, H-3 (fig. 1). Den sender ut en  $\beta$ -partikkel og henfaller til He-3. Tritium brukes mye i molekylærbiologisk forskning og kan bl.a. gi informasjon om dannelsen av DNA i levende celler.

Vanlig hydrogen



1 proton

Døyterium H-2



1 proton  
1 nøytron

Tritium H-1 H-3



1 proton  
2 nøytroner

Figur 1. Et forsøk på å fremstille de tre hydrogenisotopene

# Hvordan dør radioaktiviteten ut ?

Når en radioaktiv (ustabil) atomkjerne henfaller og sender ut stråling, går den over i en stabil tilstand og er ikke lenger radioaktiv (det finnes unntak fra dette: de radioaktive serier, se s. 8). En radioaktiv kilde vil derfor bli svakere med tiden og til slutt dør ut.

**Halveringstiden** er den tiden det tar før halvparten av kjernene har henfalt og aktiviteten er redusert til det halve.

For eksempel er halveringstiden for radon-222 ca. 4 dager, mens uran-238 har en halveringstid på hele 4,5 milliarder år (like lenge som jorda har eksistert). Etter én halveringstid er altså halvparten av de radioaktive kjernene igjen; etter to halveringstider er 1/4 igjen og etter tre halveringstider 1/8 osv. Dette kan fremstilles grafisk slik du ser i figur 2. Antall atomer som sender ut stråling er stort i starten, men avtar etter hvert. Vi beskriver forløpet best ved å bruke matematikk og formler. Radioaktiviteten dør ut etter en **eksponensialfunksjon**:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Her er  $N_0$  antall radioaktive atomer når vi begynner (tid:  $t = 0$ ),  $N$  er antall atomer som er igjen etter tiden  $t$ , og  $\lambda$  er en konstant (henfallskonstanten eller desintegrasjonskonstanten). Det er den som avgjør hvor fort en radioaktiv kilde dør ut. Det er selvfølgelig en sammenheng mellom  $\lambda$  og halveringstiden, slik at når vi kjenner den ene, kan vi beregne den andre.

Det meste om doser og stråling kan du regne ut med en enkel kalkulator. Men du må kunne litt matte og fysikk.



De som er vant til å regne med eksponensialfunksjoner kan lett finne frem til et uttrykk for halveringstiden,  $t_{1/2}$ . Du setter da  $N = 1/2 N_0$  og løser ligningen. Da får du:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Halveringstiden til en isotop er viktig å kjenne når vi skal vurdere betydningen av for eksempel en radioaktiv forurensning.

La oss peke på noe eiendommelig ved den henfallskurven som er gitt i Figur 2. Kurven vil rent teoretisk aldri bli null (dvs. ingen radioaktive atomer tilbake). I praksis er det imidlertid en nedre grense der vi ikke lenger kan måle noen aktivitet. Etter 20 halveringstider er bare én milliondel av de radioaktive atomene igjen.

## Aktivitet

Aktiviteten til en radioaktiv kilde definerer vi som antall atomer som henfalt pr. sekund. Matematisk skriver vi det som forandringen i antall atomer ( $dN$ ) pr. tidsenhet ( $dt$ ):

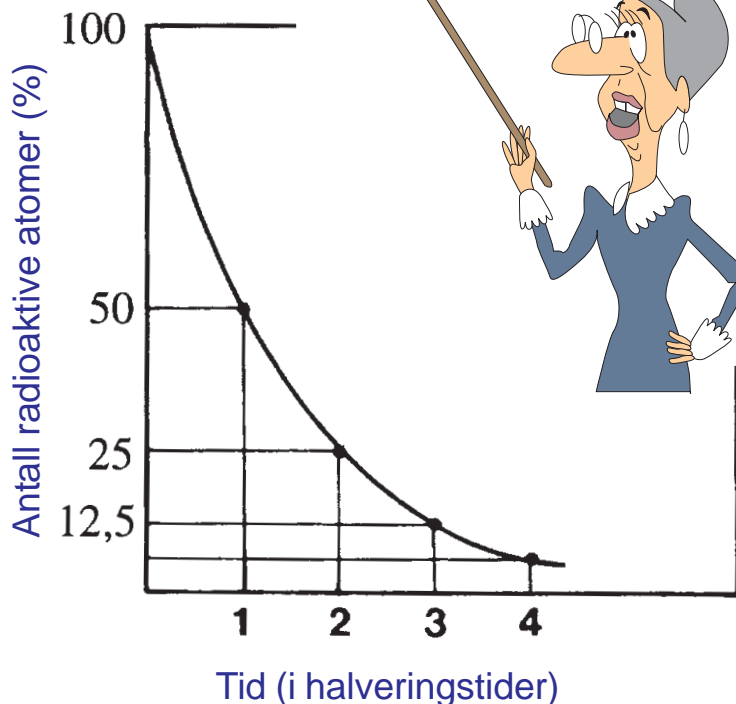
$$A = -dN/dt = \lambda N$$

Hvis du setter aktiviteten ved start ( $A_0$ ) lik  $\lambda N_0$ , ser du at aktiviteten følger den samme kurven som vist i fig.2.

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Hvis du ikke er vant til å regne med eksponensialfunksjoner og synes dette virker vanskelig, skal du ikke gi opp - du kan likevel følge med i det aller meste av stoffet utover i heftet.

Det er bra å kunne litt om eksponensialfunksjonen ! Den beskriver kurven her



Figur 2. Antall radioaktive atomer i en kilde avtar med tiden som vist her. Figuren demonstrerer hva som menes med halveringstid. Som du ser, faller kurven veldig fort til å begynne med, men så går det langsommere. Teoretisk sett når den aldri helt ned til null.



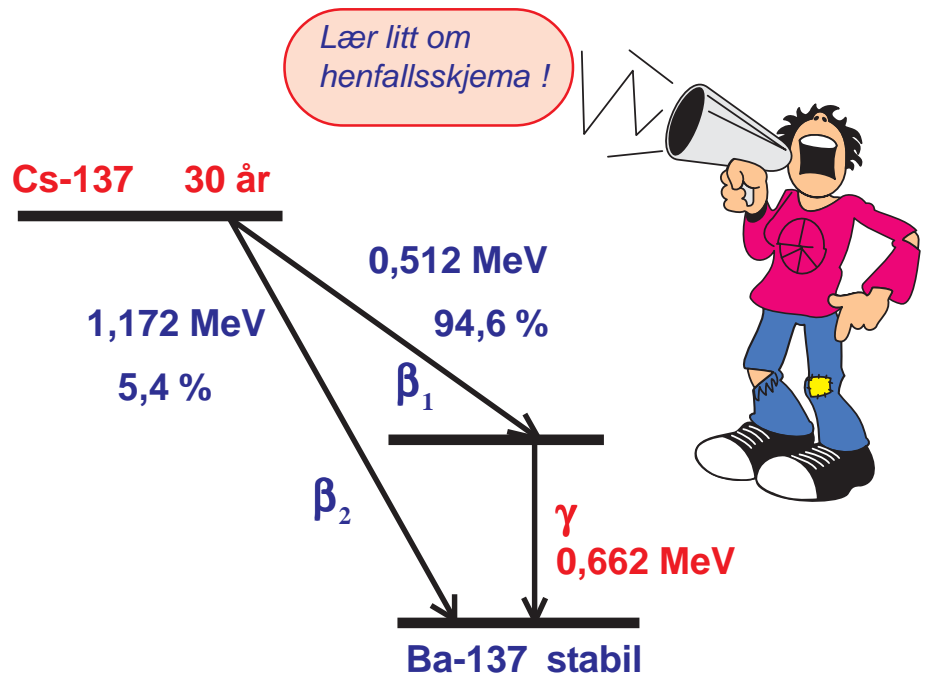
# Henfallsskjema

Hvis vi ønsker mer informasjon om henfallsprosessen til den enkelte isotop (stråletype, energi osv), ser vi på det såkalte **henfallsskjemaet**. I figur 3 ser du henfallsskjemaet til isotopen cesium-137. Vi kan bruke det til å forklare en rekke ting.

I et slikt skjema tenker vi oss at kjerne-nes atomnummer øker mot høyre, mens energitilstanden øker vertikalt.

Skjemaet viser at halveringstiden til Cs-137 er 30 år og at Cs-137 kan henfalle på to måter: I 94,6 % av tilfellene sendes det ut en  $\beta$ -partikkel med maksimalenergi på 0,512 MeV (se definisjon av MeV under), mens i de resterende 5,4 % av tilfellene sendes det ut en  $\beta$ -partikkel med maksimalenergi 1,172 MeV. I det første tilfellet vil den nye Ba-kjernen være i en **eksitert** tilstand, dvs. at den har høyere energi enn hvileenergien. Kjernen vil raskt sende ut denne ekstra energien i form av et  $\gamma$ -foton med energi 0,662 MeV. Da havner den på samme energi som i det andre tilfellet - nemlig grunntilstanden for Ba-137-atomet.

0,662 MeV er en ganske stor energi, og  $\gamma$ -strålingen når langt. Det er denne strålingen vi observerer når vi måler aktiviteten av Cs-137 i en prøve, fordi det stort sett er bare denne strålingen som klarer å nå frem til en teller.



Figur 3. Et skjema som viser hvordan Cs-137 henfaller.

Etter  $\alpha$ - eller  $\beta$ -utsendelse følger nesten alltid  $\gamma$ -stråling. Ingen radioaktive stoffer sender ut bare  $\gamma$ -stråling!

## Metastabil tilstand

Hvis  $\gamma$ -strålingen ikke sendes ut med én gang (på brøkdelen av et sekund), men det tar litt tid (minutter eller timer), sier vi at kjernen er i en **metastabil tilstand**. En metastabil tilstand får vi når den radioaktive isotopen Mo-99 (molybden) sender ut en  $\beta$ -partikkel og går over til metastabilt technetium (Tc-99m). Istedenfor at  $\gamma$ -fotonet sendes ut direkte, forsinkes prosessen med flere timer (halveringstid 6 timer).

Dette kan vi dra nytte av på et sykehus. Vi kan skylle fysiologisk saltvann over Mo-99, og da vil den mengde Tc-99m som er dannet, følge med vannet (det kan sammenlignes med å melke). Vannet med Tc-99m tilsettes stoffer som binder technetium. Gir man denne løsningen til en pasient, vil stoffene med Tc-99m bundet til seg samles spesifikt i organer som lunger eller skjelett. Tc-99m sender ut  $\gamma$ -stråling som vi kan måle, og ved hjelp av et såkalt  $\gamma$ -kamera kan vi få et bilde av lungene eller skjelettet. Da kan vi se om alt er i orden eller om det er sykdom tilstede. Etter noen dager vil omtrent alt Tc-99m ha henfalt.

Mange sykehus bruker en slik metode til diagnostikk fordi stråledosene til både pasienter og sykehuspersonale blir små til tross for at det i en enkelt undersøkelse brukes kilder på mange millioner becquerel.

En pasient med *bein-kreft*, fotografert med gammakamera.



## Elektronvolt

Elektronvolt er en måleenhet for energi.

En elektronvolt er den energien et elektron får når det akselereres gjennom et spenningsgap på 1 volt.

Elektronvolt er ladning ganger spenning.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$



## Radioaktive serier



*De 4 seriene. De to i midten er det lite eller intet igjen av!*

I de fleste tilfeller henfaller en radioaktiv kjerne til en stabil (ikke-radioaktiv) kjerne. Men det finnes unntak fra denne regelen. Et eksempel er uranisotopen U-238. Den henfaller til thorium-234 ved  $\alpha$ -utsendelse. Men Th-234 er også radioaktiv - den sender ut en  $\beta$ -partikkel og henfaller til protactinium-234. Og slik fortsetter det. Uran-238 er start-isotopen til en hel **radioaktiv serie** med 14 radioaktive isotoper som ender i den stabile isotopen bly-206. Serien er vist i skjemaet under. Vi har ikke tatt med  $\gamma$ -strålingen i dette skjemaet, men flere av isotopene, blant annet radium, sender ut  $\gamma$ -stråling i tillegg til  $\alpha$  eller  $\beta$ .

I denne serien finner vi bl.a. radium og radon. Radon er en edelgass med ganske kort halveringstid. De etterfølgende fire produktene er metaller som også har en meget kort halveringstid. Radon og disse fire produktene kaller vi gjerne **radon og radondøtre**. De spiller en betydelig rolle for den stråledosen hver enkelt av oss får i dagliglivet. Vi skal komme tilbake til dette (s. 13-14).

| Navn          | Startisotop | Sluttisotop | Halveringstid            |
|---------------|-------------|-------------|--------------------------|
| Uran-radium   | U-238       | Pb-206      | $4,47 \cdot 10^9$ år     |
| Neptunium     | Np-237      | Bi-209      | $2,14 \cdot 10^6$ år     |
| Uran-actinium | U-235       | Pb-207      | $7,038 \cdot 10^8$ år    |
| Thorium       | Th-232      | Pb-208      | $1,405 \cdot 10^{10}$ år |

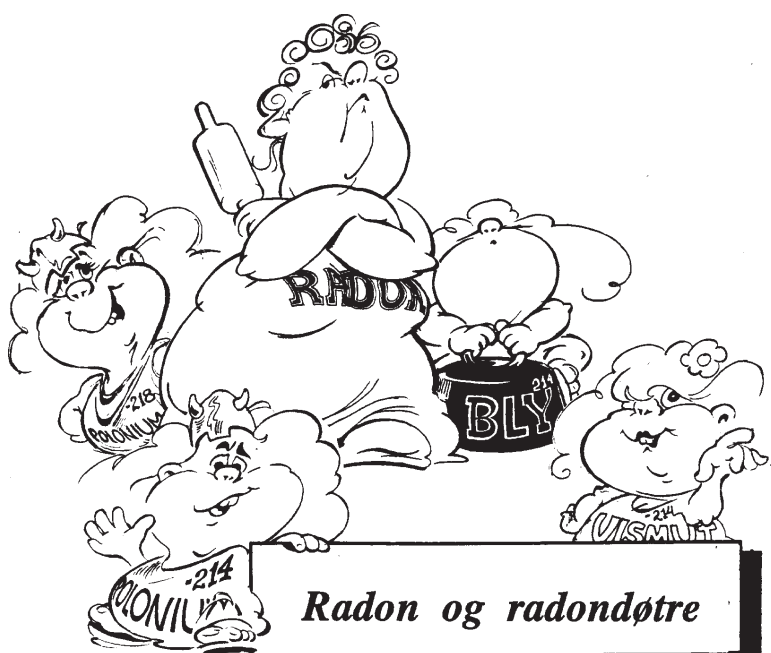
Det har eksistert fire radioaktive serier på jorda. To av dem er så godt som forsvunnet fordi startisotopene har relativt kort halveringstid i forhold til jordas alder. Tabellen over viser de fire seriene med halveringstider.

Som vi skal se senere, kan uran-isotopen U-235 spaltes i to deler (fisjon). Da avgis energi, og denne kan bl.a. komme til nytte i kjernereaktorer. På grunn av den "korte" halveringstiden (over 700 millioner år som er kort i forhold til jordas levealder) er det lite igjen av denne isotopen. Bare 0,72 % av naturlig forekommende uran er U-235.

Hvis vi skal bruke uranet i en reaktor, må vi øke denne prosentandelen kunstig. Det kalles å **anrike** uran.

Hvis vi beveget oss bakover i tiden noe slikt som 2 milliarder år, ville det selvsagt være langt mer av U-235. Da ville andelen ikke være 0,72 %, men omkring 3 %. En slik konsentrasjon av U-235 er vanlig i reaktorer. Det betyr at det den gang kunne være mulig å finne en "naturlig reaktor". Og tro det eller ei, i Gabon i Afrika, tett oppunder ekvator, har en funnet restene av en naturlig reaktor som var i virksomhet i tusener av år. Du kan lese mer om det i boka *Stråling og Helse*.

| Isotop                     | $t_{1/2}$          |
|----------------------------|--------------------|
| $\alpha$ ↓ Uran-238        | 4,47 milliarder år |
| $\beta$ ↓ Thorium-234      | 24,1 dager         |
| $\beta$ ↓ Protactinium-234 | 1,17 min           |
| $\alpha$ ↓ Uran-234        | 245 000 år         |
| $\alpha$ ↓ Thorium-230     | 77 000 år          |
| $\alpha$ ↓ Radium-226      | 1600 år            |
| $\alpha$ ↓ Radon-222       | 3,82 dager         |
| $\alpha$ ↓ Polonium-218    | 3,05 min           |
| $\beta$ ↓ Bly-214          | 26,8 min           |
| $\beta$ ↓ Vismut-214       | 19,8 min           |
| $\alpha$ ↓ Polonium-214    | 0,164 millisekund  |
| $\beta$ ↓ Bly-210          | 22,3 år            |
| $\beta$ ↓ Vismut-210       | 5,01 dager         |
| $\alpha$ ↓ Polonium-210    | 138,4 dager        |
| ● Bly-206                  | Stabil             |



Figur 4. Radon-222 og de fire kortlivede radondøtrene. Den første (skal vi si den eldste) er Po-218, så følger Pb-214, Bi-214 og Po-214.

# Egenskaper til $\alpha$ -, $\beta$ - og $\gamma$ -stråling

## $\alpha$ -stråling

$\alpha$ -partikler som kommer fra én bestemt isotop har alltid samme energi. Når  $\alpha$ -partikkelen treffer stoff, vekselvirker den med elektronene og mister energi - den bremses gradvis ned.  $\alpha$ -partikler mister mye energi pr. lengdeenheter av stoffet de går igjennom, og **derfor rekker de ikke langt før de stopper helt**. I luft kan  $\alpha$ -partikler bare gå noen få cm. De trenger ikke gjennom klærne, og stoppes av et tynt papirark. Derfor kan  $\alpha$ -stråling bare nå deg hvis strålekilden (de radioaktive atomene) er **inne i kroppen** din, slik at strålingen avsetter energien sin der.

## $\beta$ -stråling

$\beta$ -partikler har som regel langt mindre energi enn  $\alpha$ -partikler. Det er også en annen viktig forskjell:

**$\beta$ -partikler som kommer fra én isotop har ikke samme energi alle sammen.**

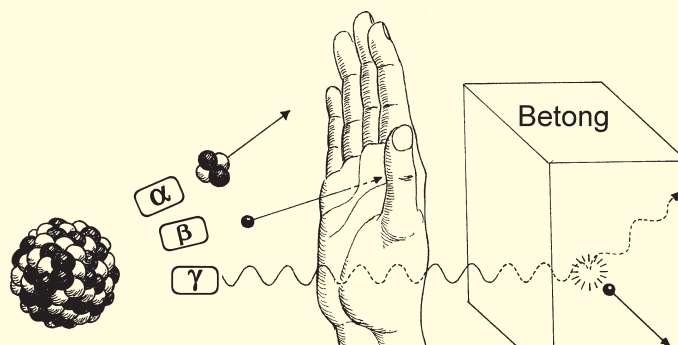
Dette kommer av at det sammen med  $\beta$ -partikkelen sendes ut en liten, nøytral partikkel - et **nøytrino** - som tar med seg en del av energien. Energien deles mellom nøytrinoet og  $\beta$ -partikkelen. Enhver  $\beta$ -isotop har en karakteristisk maksimalenergi som svarer til at  $\beta$ -partikkelen får all energien og nøytrinoet ingen. Det er maksimalenergien som oppgis i henfallsskjemaer (figur 3, side 7).



## Tommelfingerregel for $\beta$ -partikler:

Den gjennomsnittlige energien til  $\beta$ -partikler er ca. 1/3 av maksimalenergien.

Akkurat som  $\alpha$ -partikler, bremses  $\beta$ -partikler gradvis ned i et stoff.  $\beta$ -partiklene har **litt** lengre rekkevidde enn  $\alpha$ . De mest energirike av dem kan trenge gjennom klærne og et stykke ned i huden. I luft har de en rekkevidde på maksimalt noen få meter.



Figur 5. Figuren viser rekkevidden av stråling fra radioaktive kilder.  $\alpha$ - og  $\beta$ -partiklene mister fort energi, og har rekkevidde på bare noen cm i luft.  $\gamma$ -strålingen når mye lengre. Den har også ofte større energi og derfor lengre rekkevidde enn vanlig røntgenstråling på et sykehus.

## $\gamma$ -stråling

$\gamma$ -stråling kan følge etter en  $\alpha$ - eller en  $\beta$ -utsendelse.  $\gamma$ -stråling består av **fotoner** - energipakker av elektromagnetisk stråling. Energien ( $E$ ) til en slik pakke avhenger av strålingens frekvens. Den skrives:

$$E = h \nu$$

$h$  er Plancks konstant ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js) og  $\nu$  er strålingens frekvens. En radioaktiv isotop kan sende ut  $\gamma$ -fotoner med én eller flere karakteristiske frekvenser (dette kan du se på henfallsskjemaet).

$\gamma$ -stråling kan trenge langt inn i stoff, og går som regel tvers gjennom et menneske. Vi kan bruke bly eller andre metaller for å skjerme mot strålingen, men et lag med vann er også effektivt.

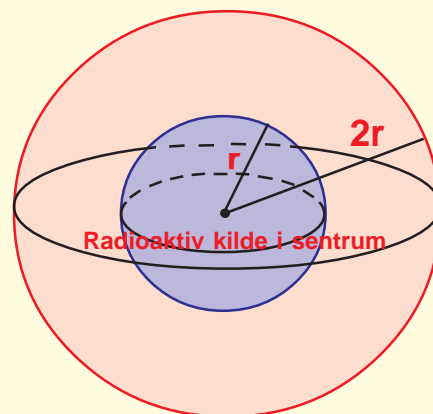
## Er stråling farlig ?

Når vi skal vurdere om en strålekilde er farlig for mennesker, er det ikke nok å kjenne aktiviteten ("styrken") til kilden målt i becquerel. Vi må også kjenne stråletypen og energien til partiklene, og vi må vite om kilden vil befinne seg i eller utenfor kroppen. Vi er interessert i hvor mye stråling som faktisk treffer cellene i kroppen vår og avsetter energi der.

## Avstandsloven

Intensiteten av strålingen fra en kilde (dvs. dvs energien som treffer en flate pr sekund) avtar med kvadratet av avstanden fra kilden.

Du forstår dette hvis du tenker deg en kilde som sender ut fotoner i alle retninger fra et punkt (se figur 6). Hvis fotonene ikke blir borte på veien (absorberes i lufta), vil de fordele seg over stadig større arealer (tenk deg kuleflater) etter hvert som de kommer lengre og lengre bort fra kilden. Arealet av overflaten til en kule med radius  $r$  er  $A = 4\pi r^2$ . Kommer du dobbelt så langt fra kilden ( $2r$ ), blir den flaten som strålingen fordeles over lik  $16\pi r^2$ . Strålingen fordeles altså over et areal som **øker** med kvadratet av avstanden. Det betyr igjen at intensiteten **avtar** med kvadratet av avstanden.



Figur 6. Kilde i sentrum og 2 kuleflater med radius  $r$  og  $2r$  utenfor.

# Stråledoser

Hvordan kan du vite om en strålings-eksponering - f.eks. et røntgenbilde - er farlig? "Til et røntgenbilde trengs bare en liten mengde stråling", tenker du kanskje. Men hva mener du med "mengde"? Du har bruk for et mål for **stråledose**.

Når vi bestråler en metallbit, blir den varm. Det betyr at strålingen må ha tilført metallbiten **energi**. Dette er kjernen i dosebegrepet:

## Gy

En stråledose er den energi som blir avsatt i stoffet som bestråles.

Enheden for dose er energi absorbert pr. masse og kalles gray (oppkalt etter L. H. Gray).

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

stråling kan passere tvers igjennom deg uten å avsette energi. Da har du ikke fått noen stråledose, og heller ingen øket helserisiko.

Men historien om stråledoser er ikke over med dette. De tre strålingstypene avsetter nemlig energien sin på ulike måter: Mens  $\alpha$ -strålingen avsetter mye energi på et lite område, avsetter  $\beta$ - og  $\gamma$ -stråling energien sin mer spredt. Vi har prøvd å vise det i fig. 7. Hvis

du kunne se i et kjempemikro-skop, ville du se at ionene som dannes av en  $\alpha$ -partikkel, er annerledes fordelt enn ioner dannet av  $\beta$  eller  $\gamma$ .

Det har vist seg at når energi-avsetningen er tett, er den biologiske virkningen størst. 1 Gy med  $\alpha$ -stråling har altså større effekt enn 1 Gy med  $\beta$ - eller  $\gamma$ -stråling. Derfor har man innført et dosebegrep – **ekvivalent dose** – som tar hensyn til denne forskjellen.

## Sv

Ekvivalent dose er den fysiske stråledosen (målt i Gy) multiplisert med en strålingsvektfaktor  $w_R$ . Enheden for dose-ekvivalent er sievert (etter R.M. Sievert).

$$Sv = Gy \cdot w_R$$

Vektfaktorene er bestemt på grunnlag av strålebiologiske studier. Verdiene er ikke absolutt sikre - de er vedtatt som en rettesnor. **Det er ekvivalentdose som brukes når vi skal vurdere biologiske virkninger av en stråledose.** Når vi snakker om doser til personer, mener vi oftest doseekvivalenter.



L.H. Gray



R.M. Sievert

Det er enda et kapittel i historien om dose. Vi kan spørre: Er det like farlig å få bestrålt huden som lungene? Hva med kjønnscellene? Det viser seg at de forskjellige organene i kroppen har forskjellig **strålefølsomhet**. Kjønnskjertlene er mest følsomme, dernest lunger, beinmarg og tarmen. Hud og knokler er mindre strålefølsomme.

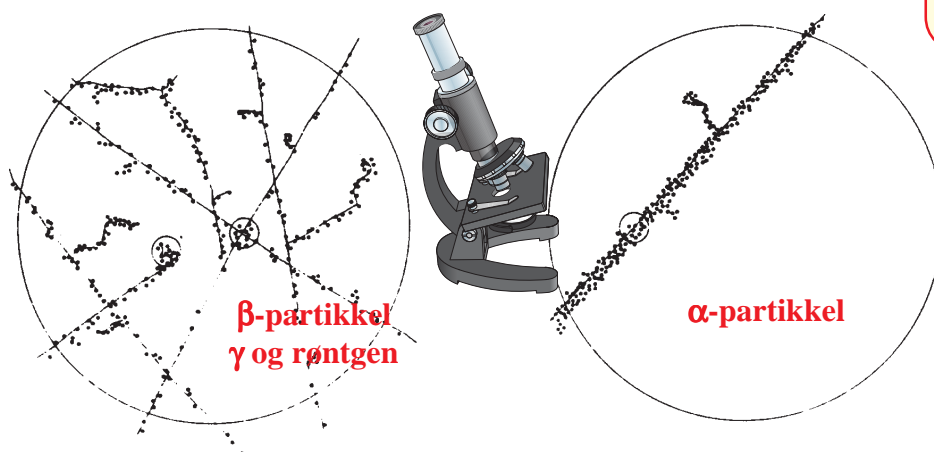


## Viktig å huske om stråledoser:

\* 1 sievert (Sv) er en stor stråledose. De dosene du får i dagliglivet, er på tusendels sievert (mSv).

\* En dose du får over lang tid (f.eks. et helt år) er **mindre** farlig enn den samme dosen over kortere tid (f.eks. en time).

\* En dose til hele kroppen er farligere enn den samme dosen til en bestemt kroppsdel.



Figur 7. Energiavsetning i et stoff, f. eks. en celle. Hver av de små prikkene representerer en ionisasjon, dvs en "begivenhet" der strålingen har avsatt energi. Det er like mange prikker i hver sirkel, men for  $\alpha$ -strålingen er ionisasjonene mer konsentrert.

## Strålingsvektfaktorer $w_R$

|                     |    |
|---------------------|----|
| $\gamma$ -stråling  | 1  |
| røntgenstråling     | 1  |
| $\beta$ -partikler  | 1  |
| $\alpha$ -partikler | 20 |

# Måling av stråling

For å påvise om vi har en radioaktiv kilde i nærheten, trenger vi måleinstrumenter (detektorer). Alle strålingsdetektorer består av to hoveddeler (selv om vi ikke alltid kan se to adskilte deler): **Det følsomme volumet ("øynene")** og **signalomformerdel med telleverk ("hjernen")**.

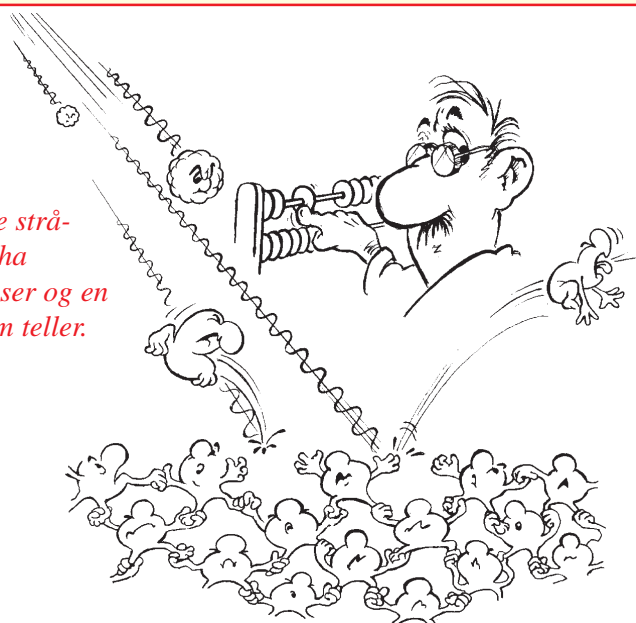
Som "øyne" brukes en eller annen fysisk eller kjemisk forandring som strålingen gir. I signalomformerdelen registreres denne forandringen og gjøres om til et tall eller viserutslag som kan avleses på et måleinstrument. Det finnes to hovedtyper av måleinstrumenter for radioaktiv stråling: **tellere** og **dosemålere**.

## Tellere

Tellere måler **hvor mange**  $\alpha$ -,  $\beta$ - eller  $\gamma$ -partikler som treffer det følsomme volumet. Hver partikkel gir en forbigående forandring i det følsomme volumet. Forandringen registreres i et telleverk før det følsomme volumet går tilbake til begynnelsestilstanden og instrumentet er klart til å registrere en ny partikkel.

Det vanligste telleinstrumentet er **geigertelleren** (fig. 8). Her er det følsomme volumet et såkalt **ionisasjonskammer**. Det er en gassfylt sylinder med to elektroder. Når en strålingspartikkel kommer inn i gassvolumet, vil den ionisere gassen, dvs. rive løs elektroner. Elektronene vil vandre mot den positive elektroden (anoden), mens de positive ionene vil vandre mot den negative (katoden). Er spenningen stor, slik at elektroner og ioner får stor fart, vil de danne nye ionisasjoner på sin vei mot hver sin elektrode. Slik kan en enkelt ionisasjon gi opphav til en hel sverm av ioner, og det vil oppstå en kortvarig strømpuls gjennom gassvolumet. Strømpulsen registreres i signalomformerdelen av detektoren og gir én telling. Ofte har geigertellere en høyttaler som gir et knepp eller pip

*Skal du måle stråling, må du ha "øyne" som ser og en "hjerne" som teller.*



for hver telling. Geigertellere måler først og fremst  $\gamma$ -stråling. Noen kan måle energirik  $\beta$ , mens  $\alpha$ -partikler ikke kan trenge inn i telleren.

Vi må også nevne **scintillasjonstellerseren**. Den har selektive "øyne", og kan brukes til å skille stråling fra ulike isotoper fra hverandre. Og "øynene", det er et stoff som lyser opp ("scintillierer") når det treffes av stråling. Lysglimtet er sterkere desto høyere energi strålingen har. På denne måten kan vi gjenkjenne isotoper ut fra energien på strålingen de sender ut.

## Dosemålere

I en dosemåler (et dosemeter) vil forandringene i det følsomme volumet "samles opp". Etter en tid kan man se hvor mye energi strålingen totalt har avsatt i volumet - altså hvilken **dose** strålingen har gitt.

Et dosemeter blir gjerne brukt når vi vet at vi skal oppholde oss i et område hvor stråling er til stede og vi ønsker å vite hvilken dose strålingen gir oss. Det er best å bære måleutstyret på kroppen. Men da må ikke utstyret være for stort og tungt.



*Figur 8. En vanlig geigerteller.*

En liten og lett dosemåler som ofte brukes av stråleutsatt personell er **filmdosemeteret** (fig. 9). Dette består rett og slett av et stykke fotografisk film. Husk hvordan Becquerel gjorde sin epokegjørende oppdagelse - han hadde fotografiske plater liggende i en skuff i nærheten av en radioaktiv kilde.



Figur 9. Et filmdosemeter. Filmen er innkapslet i en liten plastholder med små, tynne absorpsjonsplater av bly, kadmium og plast. I tillegg er det et åpent vindu der den minst gjennomtrengende strålingen slipper inn til filmen. Svertingen bak de ulike platene avhenger av strålingens energi og om det er  $\beta$ - eller  $\gamma$ -stråling.

Ioniserende stråling virker på film på samme måte som synlig lys: **Strålingen eller lyset spalter sølvbromid i filmen slik at den svertes**. Her er "øynene" sølvbromid, mens svertingen av filmen er den målbare størrelsen (telleverket eller "hjernen") som gir oss dosen. For å måle svertingen, må vi fremkalle filmen. Deretter sender vi lys gjennom den fremkalte filmen og måler hvor mye som kommer igjennom - slik får vi et kvantitativt mål for svertingsgraden, og dermed for dosen.

I filmdosemetere legger man ofte inn tynne plater av plast og metall som dekker ulike deler av filmen. Svertingsgraden bak hver av platene forteller noe om strålingstype og energi på strålingen: Røntgen og  $\gamma$  er mer gjennomtrengende enn  $\beta$ , og stråling med høy energi er mer gjennomtren-

gende enn den med lav. Vi måler i første rekke røntgenstråling,  $\beta$ - og  $\gamma$ -stråling med et filmdosemeter. Det er vanskelig å måle  $\alpha$ -stråling med et filmdosemeter - men det er som regel heller ikke nødvendig, siden  $\alpha$ -kilder sjelden er noe stråleproblem så lenge de befinner seg utenfor kroppen.

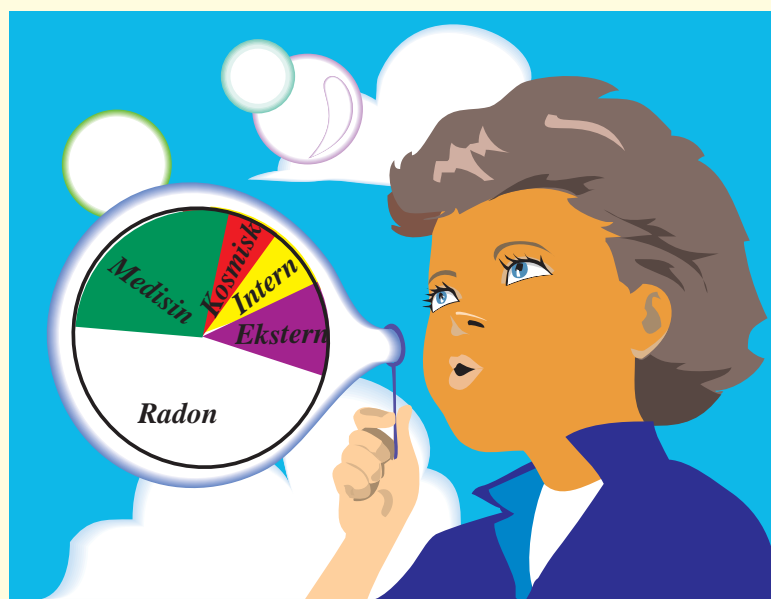
## Fem strålekilder som angår deg

På side 1 er et diagram over fem strålekilder som gir oss en stråledose i hverdagen. Søylene viser de gjennomsnittlige stråledosene Kari og Ola Nordmann får i løpet av et år. Som du ser, får gjennomsnittsnordmannen en årlig dose på ca. 4 mSv. (Spør du om dosen gitt i gray, er den omkring halvparten så stor, fordi dosen fra radon for det meste skyldes  $\alpha$ -partikler som har en stor strålingsvektfaktor.)

En årsdose på 2 mGy innebærer at det skjer 600 - 800 millioner ionisasjoner i kroppen din (hvis du veier omkring 60 kg) **pr. sekund** (ja, du leste riktig - det er pr. sekund)!

De enkelte strålekildenes størrelse varierer avhengig av hvor du bor, hvilket yrke du har og hvilken livsstil du har. Hvis du synes dette høres rart ut, så følg med når vi nå tar for oss disse strålekildene. Alle forstår at det er en viss risiko for å få en litt større stråledose enn gjennomsnittet hvis du arbeider med røntgen på et sykehus, men ikke mange er klar over at du får en ekstra stråledose f.eks. når du er oppe i et fly.

Vi skal se nærmere på de fem hovedkildene til stråledoser i hverdagen.



Skal vi "blåse i" de naturlige stråledosene og istedet sette inn tiltak mot de langt mindre dosene vi får etter bombeprøver og kjernekraftulykker?

# Radon

Ca. 2 mSv pr. år

På side 8 finner du uran-radium-serien og en tegning av radon med "radondøtre", som er fire av medlemmene i denne serien. Overalt hvor det er uran i berggrunnen vil vi også finne radium. Når radium, som er et metall, sender ut en  $\alpha$ -partikkel, blir den til radon. Radon er en gass, til og med en edelgass, det vil si at den ikke inngår i noen kjemisk forbindelse.

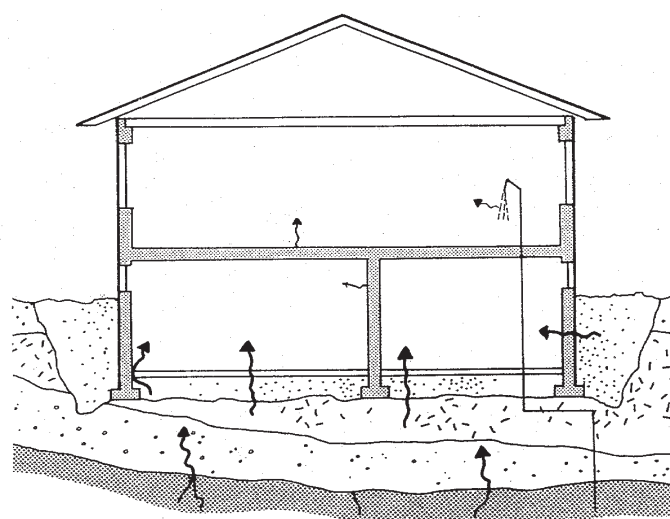
Når radon sender ut en  $\alpha$ -partikkel, går den over til polonium-218, den første av radondøtrene. Alle "døtrene" er metaller med kort halveringstid. Sammen med radon representerer de en betydelig strålingskilde som vi må leve med.

Siden radon er en gass, vil den sive opp gjennom berget fra uranholdige bergarter og frigjøres til lufta. Hvis den henfaller før den når opp til overflaten, vil ikke radondøtrene bli frigjort til lufta.

Når radon frigjøres til lufta ute, er den en ubetydelig strålekilde. Men når den kommer inn i boligene våre, blir det annerledes. Radon finnes i større eller mindre mengder i alle hus. Den siver inn gjennom sprekker i kjellermuren, og kan komme inn med vannet hvis det stammer fra borede brønner i radiumholdig granitt.

Radonkonsentrasjonen i inneluft måles i  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . Konsentrasjonen i norske hus varierer mye. Den avhenger bl.a. av følgende forhold:

1. Konsentrasjonen av radium og thorium i bergartene under huset. Det er særlig granitt og alunskifer som er rike på disse stoffene.
2. Hvor lett gassen slipper inn i huset (hvor tett kjellermuren er).
3. Hvor god ventilasjon huset har (en del moderne hus er så godt isolert at radonkonsentrasjonene blir svært høye).



Figur 10. Slik kan radon komme inn i husene våre. Det er stort sett to hovedveier; enten fra omgivelsene (gjennom kjeller og mur) eller fra vannet.

Gjennomsnittskonsentrasjonen i en norsk bolig er ca.  $70 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . De laveste gjennomsnittsverdier finner vi i Møre og Romsdal og de høyeste i Oppland. De lokale variasjonene er store, og vi kan godt finne verdier fra  $10 \text{ Bq}/\text{m}^3$  til  $1000 \text{ Bq}/\text{m}^3$  innen samme kommune. Det er, som du lett forstår, kjellerrom som har de største radonkonsentrasjonene. Hvis du bor i blokk, høyere enn 3. etasje, er det svært lite radon i boligen din. En god del av boligmassen i Norge (ca. 12 % i Oppland, 11 % i Buskerud og 9 % i Telemark) har en radonkonsentrasjon på mer enn  $200 \text{ Bq}/\text{m}^3$ .

## Dose fra radon

Vi kan måle ganske godt konsentrasjonen av radon og radondøtre i inneluften i en bolig (gitt i  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Det er derimot adskillig vanskeligere å beregne stråledosen gitt i mSv til dem som bor i boligen. Beregningene er basert på en rekke antagelser om beboernes livsmønster, som f.eks. hvor stor del av døgnet de oppholder seg innendørs, deres lungevolum og pustefrekvens, støvinnholdet i lufta etc. (radondøtrene fester seg på støvpartikler i lufta, og når de trekkes ned i lungene kan de feste seg til bronki-

ene og avgi strålingen sin). Beregninger tyder på at en konsentrasjon i boligen på  $70 \text{ Bq}/\text{m}^3$  gir en årtdose til lungene på omkring 17 mSv. Dette tilsvarer en **effektiv** årtdose på 2 mSv. En effektiv dose er en tenkt dose til hele kroppen som tilsvarer dosen til ett enkelt organ (i dette tilfellet lungene).

Statens strålevern anbefaler at vi setter igang mottiltak hvis radonkonsentrasjonen er over  $400 \text{ Bq}/\text{m}^3$  og at vi bør vurdre enkle og billige tiltak hvis den ligger mellom 200 og  $400 \text{ Bq}/\text{m}^3$ . Det er mange boliger i Norge hvor slike tiltak kan være aktuelle.

## Tiltak mot radon

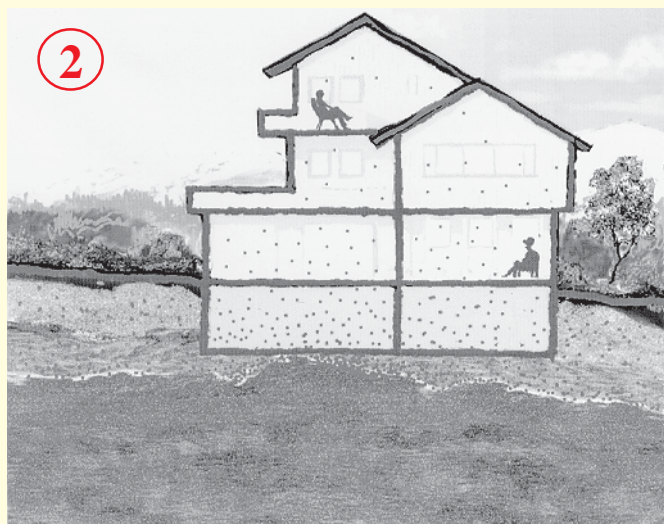
Mottiltak mot høye radonkonsentrasjoner omfatter:

1. God ventilasjon.
2. Tetttest mulig mur mot berggrunnen.
3. Ved svært høye konsentrasjoner kan vi montere en vifte under kjellergulvet som suger radongassen ut i det fri.

# Historien om radon

1.

Huset står på en bergart som inneholder radium. Radium henfaller til gassen radon, som siver opp gjennom fjellet mot overflaten.

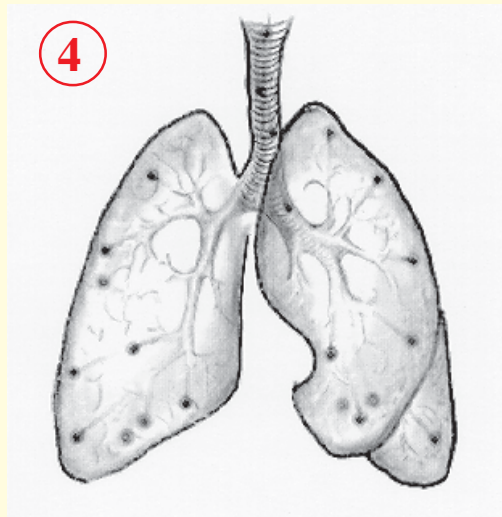


2.

Radon siver inn i huset gjennom kjellermuren og videre oppover i etasjene. Det er mest radon i kjelleren. I utsatte områder lønner det seg ikke å plassere soverommene i kjelleretasjen.

3.

Radon henfaller til radondøtre. Disse er metaller som lett fester seg på støvpartikler i luften. Radon og døtrene er vist som prikker på tegningen. Hver gang du trekker pusten, følger radongass og radondøtre festet til støvpartikler med ned i lungene.



4.

Radondøtrene sender ut stråling som avsetter energi i lungene dine. Er dosen stor, vil den øke din risiko for lungekreft.

Den som bor i et "radonhus" får de største stråledosene om vinteren. Da er vi mye innendørs og luften lite, slik at radonkonsentrasjonen blir høy.

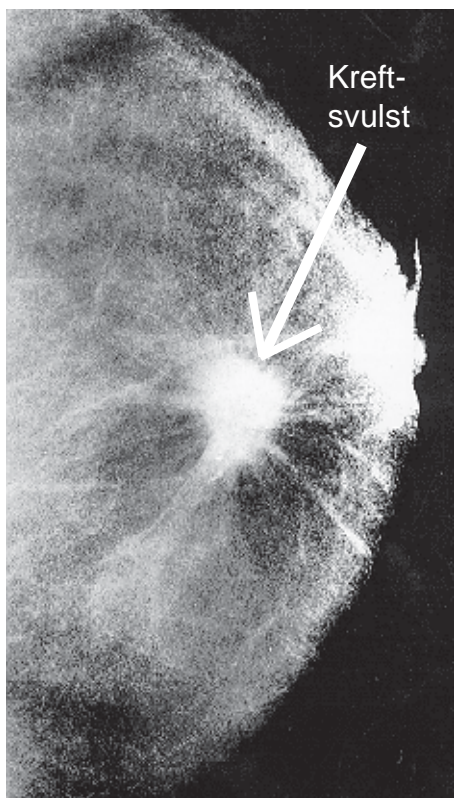
Det er vanskelig – eller umulig – å tallfeste risikoen ved strålingen fra radon og radondøtre. Det vi kan si, er at **radon og døtrene representerer den største og viktigste strålekilden for oss i Norge.**



# Medisinsk bruk av stråling

Ca. 0,6 – 1,0 mSv pr. år

En av de viktigste anvendelsene av ioniserende stråling er innen medisinsk diagnostikk og terapi. Et opplagt eksempel på **diagnostikk** er røntgenfotografering. Når vi tar et røntgenbilde, lar vi strålingen passere gjennom den kroppsdelen vi vil studere. Strålingen passerer gjennom ulike typer vev (bløtvev, kreftsvulst, bein), og disse har ulik evne til å absorbere (stoppe) strålingen. Strålingen som kommer gjennom kroppsdelen, treffer en fotografisk film. Filmen blir svartet, og den blir mørkest der det er mest



Når vi skal ta et røntgenbilde, er det en rekke ting som kan varieres slik at vi får frem det vi er på jakt etter. Det er lett å skille bein fra bløtvev, men vanskeligere å skille mellom ulike typer vev, som på dette bildet. Vi ser en kreftsvulst i et bryst. Det er ørsmå forskjeller i "tetthet" mellom svulsten og det friske vevet. Ved å bruke røntgenstråling med liten energi ("bløt stråling") kan vi få frem slike små forskjeller.

stråling. På denne måten får vi et skyggebilde på filmen: Den blir lysest bak organer som absorberer mye stråling, og mørkest bak organer som absorberer lite.

På røntgenbildet til venstre ser du et bryst (bildet kalles et mammografi). Bildet viser at det er en kreftsvulst i brystet. Filmen er lysest bak svulsten. Dette er fordi kreftvevet absorberer mer stråling enn vevet omkring.

Vi bruker også en rekke radioaktive isotoper til diagnostikk. På side 7 nevnte vi bruken av metastabile isotoper som Tc-99 (technetium).

**Terapi** er den andre store anvendelsen av stråling innen medisin. Det er først og fremst kreft som behandles på denne måten. Til tross for alle "cellegifter" er stråling og kirurgiske inngrep de viktigste våpnene vi har i kampen mot kreft.

Prinsippet for all strålebehandling er at dosene til kreftvevet skal være så store at kreftcellene dør. Samtidig må dosene til de friske cellene omkring være så små at disse overlever. Dette er en krevende balanse.

Strålingen som brukes er for det aller meste røntgenstråling fra spesialbygde terapimaskiner. For å behandle en dypereleggende svulst må en ha stråling som gir en gunstig **dybdedosekurve** (figur 11), dvs. at energiavsetningen bør være størst der svulsten er. For hudlidelser er lav energi (70 kV) gunstig, men er svulsten noen cm inne i kroppen må energien opp i 15 til 20 MeV.

## Doser

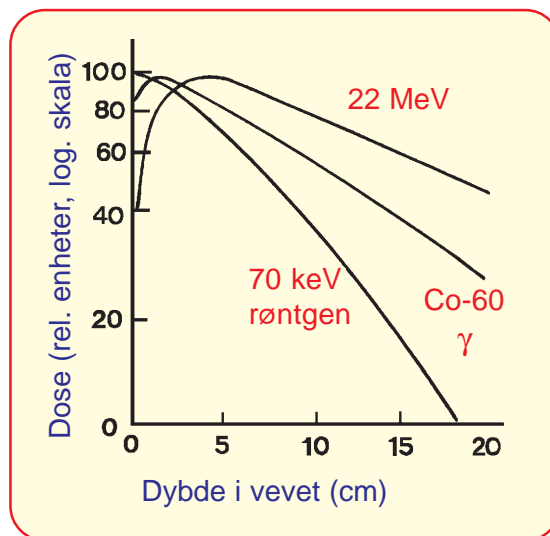
Gjennomsnittsnordmannen får en dose på ca. 0,6 – 1,0



*Røntgendiagnostikk er helt nødvendig på et sykehus.*

mSv pr. år fra medisinsk bruk av stråling. Et røntgenbilde hos tannlegen gir deg ca. 0,03 mSv; en undersøkelse av rygg, bekken eller nyrer gir 1 - 5 mSv. Den røntgenbaserte teknikken **computer-tomografi** (CT) gir relativt store doser, og bruken av denne teknikken er økende.

I Norge foretas omkring 2,5 millioner røntgenundersøkelser pr. år. I enkelte industriland, f.eks. Frankrike, er den beregnede årsdosen betraktelig større enn i Norge. For hele verdens befolkning er gjennomsnittsdosen 0,4 mSv – i første rekke fordi mange ikke har tilgang på røntgendiagnostikk.



Figur 11. Dybdedosekurver viser hvor mye av strålingens energi som avsettes i forskjellige dybder i vevet. Som du ser varierer den fra én stråletype til en annen. Maksimum dose flytter seg "innover" i vevet når energien øker.

# Ekstern $\gamma$ -stråling

Ca. 0,55 mSv pr. år

Ekstern gammastråling er stråling fra radioaktive isotoper i berggrunnen og i byggematerialer. Rekkevidden av både  $\alpha$ - og  $\beta$ -partiklene er meget kort, så de vil ikke gi deg noen stråledose så lenge de radioaktive isotopene er utenfor kroppen din.  $\gamma$ -strålingen, derimot, stoppes ikke så lett, og det er grunnen til at vi bare snakker om  $\gamma$ -stråling når det gjelder kilder utenfor kroppen.

Ekstern gammastråling stammer stort sett fra de radioaktive seriene: uran-radiumserien og thoriumserien. I tillegg har vi stråling fra kaliumisotopen K-40. Vi finner naturlig radioaktivitet overalt i naturen, men mengden varierer fra sted til sted avhengig av bergarter og jordtyper. Vi angir aktiviteten i Bq/kilo eller som antall radioaktive atomer pr. million atomer totalt, ppm (*parts per million*).

**Ra-226** er en viktig isotop i uran-radium-serien. Enkelte typer av alunskifer inneholder opptil 4500 Bq/kg av Ra-226. Det er mer enn 100 ganger gjennomsnittet for norske bergarter. Granitt, gneiss, morenejord og leire inneholder 20 - 120 Bq/kg av Ra-226.

**Th-232** finner vi i en konsentrasjon på opptil 80 Bq/kg i ulike typer jord og fjell. Enkelte steder, som f.eks. i Fenfeltet i Telemark, er det mye thorium, og her står thorium for mer enn 90 % av den eksterne stråledosen. Det finnes områder i India, Brasil og Iran der stråledosen fra thorium er svært høy.

Kalium finnes overalt - i jord, planter, dyr og mennesker. Det er tre naturlig forekommende isotoper av kalium. Én av disse, nemlig **K-40**, er radioaktiv. Denne isotopen utgjør bare 0,0118 % av naturlig forekommende kalium, og den har en halveringstid



på 1,27 milliarder år. Mengden av K-40 i jord og fjell er gjerne omkring 1000 Bq/kg. Omkring 40 % av den eksterne stråledosen får vi fra K-40.

Byggematerialer som betong og murstein er laget av jord, leire eller stein, og inneholder følgelig en del radioaktive stoffer. I en murbygning bestråles vi fra gulv, vegger og tak. I trehus er strålingen mindre. Mengden av radioaktive stoffer varierer fra en landsdel til en annen. Følgelig vil også radioaktiviteten i betong variere, avhengig av den sanden som benyttes.

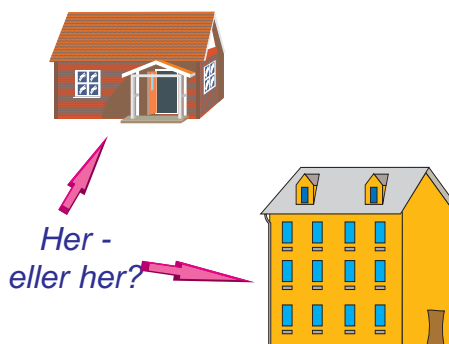
I Norge oppholder vi oss mye innendørs. Det er derfor svært viktig å få informasjon ikke bare om radon, men også om  $\gamma$ -strålingen. I et trehus vil den være størst i første etasje (omtrent

som utendørs), og så vil den avta oppover fordi trematerialer gir mindre stråling enn bakken, betong og mur.

For en del år siden ble strålenivået i boliger på Østlandet målt. Boligene ble delt inn i tre grupper: trehus, betonghus og mursteinshus. Det totale strålenivået, som er summen av kosmisk stråling og ekstern  $\gamma$ -stråling, ble målt. Det viste seg at strålenivået for én bestemt hustype kunne variere med en faktor 2. Middelerverdiene for stråledoser pr. år i de ulike hustypene var:

|              |          |
|--------------|----------|
| Trehus       | 0,87 mGy |
| Betonghus    | 1,14 mGy |
| Mursteinshus | 1,28 mGy |

Hvilken hustype tror du gir mest  $\gamma$ -stråling?



Synes du disse forskjellene er store? De innebærer at hvis du flytter fra et trehus og inn i et murhus, vil du øke årsdosen (i gjennomsnitt) med omkring 0,4 mSv. Er dette noe vi skal ta hensyn til, eller er det for lite til å bry seg om? Se avsnittet om risiko og små stråledoser.

# Radioaktivitet i kroppen (intern stråling)

ca. 0,37 mSv pr. år

Vi har alle i oss radioaktive stoffer helt fra fosterstadiet, og vi får stadig "på-fyll" gjennom maten vi spiser. De viktigste isotopene er kalium-40, karbon-14, bly-210, bismut-210 og polonium-210. De tre siste isotopene finner du i uran-radium-serien.

Vi spiser omtrent 2,5 gram kalium hver dag, og isotopen **K-40** utgjør 0,0118 % av dette. *Det innebærer at vi spiser omkring 70 Bq med K-40 hver eneste dag.* Kalium er tilstede i cellene som bygger opp musklene, og det er ganske jevnt fordelt i kroppen. Innholdet av K-40 pr. kg kroppsvekt vil variere en god del med alder, kjønn og forholdet mellom muskelmasse og total kroppsvekt. Det vil si at veltrente unge mennesker med stor muskelmasse inneholder mest K-40 og får den største stråledosen. I figur 12 er vist hvordan K-40-aktiviteten varierer med kjønn og alder.

Karbonisotopen **C-14** finnes i alt levende. I mennesker er C-14-aktiviteten ca. 30 Bq pr. kg kroppsvekt. C-14 er en naturlig isotop som dannes i atmosfæren når nøytroner fra verdensrommet treffer nitrogenatomer. Reaksjonen skrives på følgende måte:



Isotopen C-14 går inn i atmosfærens  $\text{CO}_2$ , og via fotosyntesen kommer den inn i plantene og næringskjeden og videre til oss. C-14 har en halveringstid på 5730 år. Den sender ut en  $\beta$ -partikkel med maksimalenergi på 156 keV.

Fra radon i luften, via radondøtrene, dannes blyisotopen **Pb-210**. Den sender ut en  $\beta$ -partikkel og omdannes til **Bi-210**, som igjen henfaller ved  $\beta$ -utsendelse til **Po-210**. Denne sender ut

en  $\alpha$ -partikkel med energi på 5,3 MeV. **Alle disse isotopene bidrar til den interne stråledosen.** Siden vi regner med en strålingsvektfaktor på 20 for  $\alpha$ -partikler, blir dosen fra Po-210 relativt stor.

Mengden av Po-210 i matvarer varierer en del. Det er relativt mye i reinkjøtt fordi reinlaven lett tar opp radioaktivitet fra luften. Vi kan også nevne at tobakksplanter tar opp Po-210. Det betyr at de som røyker får en liten ekstra dose i forhold til de som ikke røyker. Po-210 samler seg i skjelettet og avgir den største dosen der.

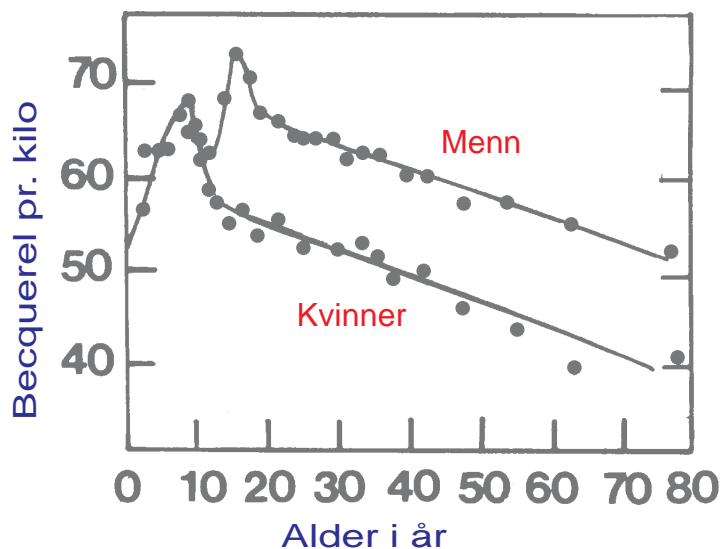
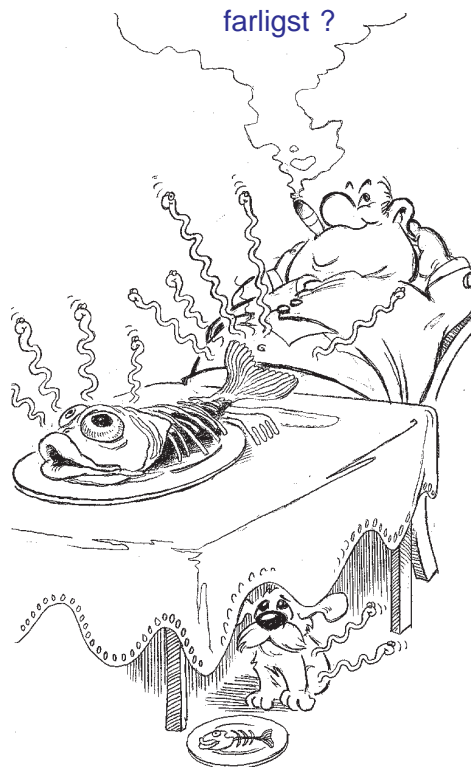


Fig. 12. Konsentrasjonen av K-40 i kroppen varierer med alder og kjønn

Røyk eller radioaktiv mat ?

Hva tror du er farligst ?



Alt levende inneholder en del naturlige radioaktive isotoper. Et voksent menneske har en aktivitet på ca. 6–7000 Bq. Det er  $\gamma$ -strålingen som kommer ut av kroppen som gjør det mulig å måle radioaktiviteten i levende mennesker og dyr.

# Kosmisk stråling

Ca. 0,35 mSv pr. år

Fra verdensrommet kommer en kontinuerlig strøm av partikler som treffer jordatmosfæren. Noen av partiklene kommer fra sola, og noen kommer fra kilder utenfor vårt solsystem. Det er for det meste protoner og  $\alpha$ -partikler, men også større atomkjerner. En del partikler blir avvist av jordas magnetfelt. Det har også evnen til å sperre inne partikler slik at det dannes strålingsbelter (de såkalte Van Allen-beltene, som ble oppdaget i 1958 ved hjelp av en geigerteller ombord på satellitten Explorer 1).

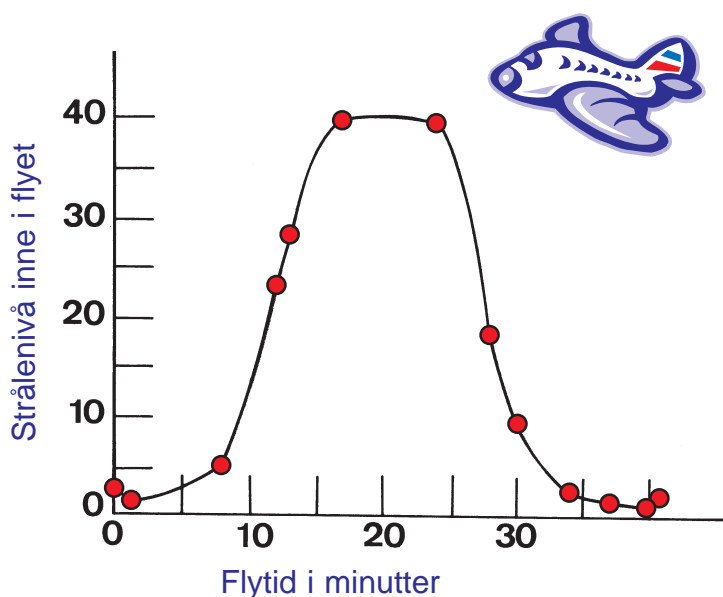
Noen av partiklene som kommer flykende fra verdensrommet har en voldsom energi. De kan inngå i kjernereaksjoner med atomer i atmosfæren, og det dannes en rekke nye partikler som myoner, elektroner, nøytroner og  $\gamma$ -stråling. Det er dette som utgjør den sekundære kosmiske strålingen og som kan trenge ned til bakken og gi oss en stråledose.

Den kosmiske strålingen varierer med breddegraden: strålingen er litt sterkere ved polene enn ved ekvator. Dette kommer av at partiklene styres av jordas magnetfelt mot polområdene.

Strålingen varierer også med høyden over havet. Strålingen kommer jo fra verdensrommet, og det er naturlig at intensiteten øker med høyden over havet. Hvis vi kommer opp i ca. 1500 meter, øker intensiteten til det dobbelte, og i 5000 meters høyde er intensiteten 8 til 10 ganger større enn ved havets overflate.

## Stråledoser ved flyreiser

Du forstår sikkert av dette at du vil få en ekstra stråledose hver gang du er oppe i et fly. Men hvor store er disse dosene?



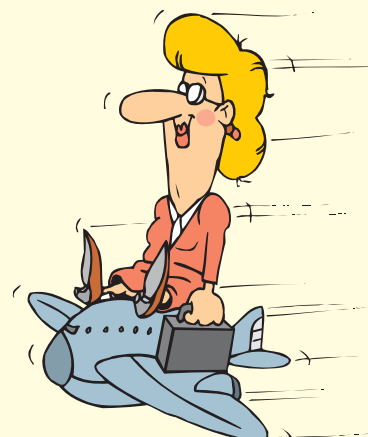
Figur 13. Kurven viser strålingsintensiteten inne i et fly på en tur mellom Trondheim og Oslo. Intensiteten når flyet står på flyplassen er satt lik 1. Det er summen av kosmisk stråling og ekstern gammastråling. Når flyet starter og går ut over Trondheimsfjorden, synker bidraget fra den eksterne  $\gamma$ -strålingen, og totalverdien synker litt. Flyet går opp i 8500 m høyde, og da er strålenivået omkring 40 ganger høyere enn ved bakken. Flyet lander på Fornebu fra sjøsiden, og igjen er strålenivået mindre over vann enn på bakken.

Det er gjort mange målinger i fly. Det tyske instituttet "Gesellschaft für Strahlenforschung" har målt både  $\gamma$ -stråling og nøytronstråling i Luft-hansas fly. De fant at flypersonale som i løpet av et år hadde 600 flytimer i 10 000 meters høyde ville få en ekstra stråledose på 3 mSv. Det er faktisk en dose som er omtrent like stor som den naturlige bakgrunnsstrålingen. Ved en flyhøyde på 11 700 meter økte dosen til 5 mSv.

**Dosehastigheten** i fly ved ekvator er ca. 2 – 3  $\mu$ Sv pr. time. Ved våre breddegrader er det ca. 4 – 8  $\mu$ Sv per time. En kan således kartlegge individuelle doser ved flyreiser. Noen eksempler er gitt i tabellen

## Ekstradoser ved flyreiser

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| Oslo - Tromsø     | 0,01 mSv  |
| Oslo - Hellas     | 0,025 mSv |
| Oslo - New York   | 0,04 mSv  |
| Jorda rundt tur   | 0,27 mSv  |
| Romreise i 1 mnd. | 10 mSv    |



# Stråling i forskning, industri og dagligliv

Stråling er et nyttig verktøy i mange sammenhenger. Vi bruker stråling ikke bare i medisin, men også innen industri og forskning. Idag kan vi spesiallage isotoper til bestemte formål. Men hvordan lager vi radioaktive isotoper?

På side 3 ble det nevnt at ekteparet Joliot-Curie fikk nobelprisen i 1935 for å ha laget den første kunstige radioaktive isotopen. Eksperimentet de gjennomførte viser hvordan fremgangsmåten er. De bombarderte en aluminiumsplate med  $\alpha$ -partikler fra en naturlig radioaktiv kilde. Når en  $\alpha$ -partikkel trengte inn i en aluminiumskjerne, ble kjernen meget ustabil, sendte ut et nøytron og ble selv omdannet til fosfor - som var radioaktivt. Denne kjernereaksjonen skriver vi slik:



Når man først hadde klart dette én gang, var utviklingen videre rask. Det var mange som klarte å akselerere protoner og  $\alpha$ -partikler slik at de fikk stor nok energi til å trenge inn i atomkjerner. Energien må være stor fordi både atomkjernen og partiklene har en positiv ladning slik at de frastøter hverandre. Nøytronet, derimot, har ingen ladning og vil ikke bli møtt med slike frastøtningskrefter når det nærmer seg en atomkjerne. Det betyr at nøytroner er svært nyttige når det gjelder å lage radioaktive isotoper.

I desember 1942 startet Enrico Fermi verdens første atomreaktor under tribunen på Stagg fotballstadion i Chicago. Reaktoren var en effektiv nøytronkilde som gjorde det mulig å lage en lang rekke radioaktive isotoper. Vi kjenner nå mer enn 1300 kunstige isotoper, og i de følgende avsnittene skal vi se noen eksempler på hvordan vi kan ha nytte av dem.



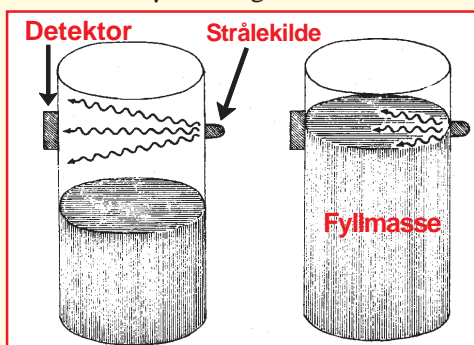
Enrico Fermi

## Røykvarslere

Mange røykvarslere er basert på en radioaktiv kilde. Vi plasserer en  $\alpha$ -partikkelkilde i et lite luftkammer (vi kaller det et ionekammer).  $\alpha$ -partiklene danner ioner i kammeret, og når det er elektrisk spenning over kammeret (derfor må vi ha et batteri), vil ionene føre til en elektrisk strøm. Kommer det røykpartikler inn i kammeret, vil de redusere ionestrømmen, og alarmen vil gå. En  $\alpha$ -partikkelkilde som ofte brukes er grunnstoffet americium (isotopen Am-241). Kildens aktivitet er vanligvis ca. 40 000 Bq.

## Nivåvakter

Tenk deg en kornsilo som skal fylles. Du har en  $\gamma$ -kilde og en detektor.



Kilden som brukes kan være Cs-137 eller Co-60 - i alle fall en kilde som sender ut  $\gamma$ -stråling. Er nivået av korn lavere enn strålekilden og detektoren (til venstre), kommer strålingen frem til detektoren og gir et signal som viser at siloen kan fylles. Når kornet i siloen når opp til strålekilden, vil strålingen stoppe i kornet, detektoren får ikke noe signal lenger, og påfyllet stoppes. Prinsippet er omtrent det samme som for en fotocelle - men lys kan ikke brukes i siloer fordi det ville stoppes av støv.

## Biokjemi

Innen biologi og biokjemi kan radioaktive isotoper være til stor nytte. Dette har sammenheng med at slike isotoper kan hektes på store biologiske molekyler som deltar i ulike prosesser i cellene. V.h.j.a. en strålingsdetektor kan man følge disse

molekylene og studere reaksjonene de deltar i. Vi kan f.eks. "merke" basen thymin (som inngår i DNA) med isotopen tritium (H-3). Hvis vi dyrker celler i en næringsvæske som inneholder den radioaktivt merkede basen, vil cellene bygge den inn når de lager nytt DNA før celledeling (se s. 33). Ved å måle radioaktiviteten i cellene og næringsvæsken på ulike tidspunkter kan vi få informasjon om hvordan DNA bygges opp i cellene. Dette er bare ett av utallige eksempler på elegante anvendelser av radioaktive isotoper i cellebiologien.

## C-14-datering

Innen arkeologien har **C-14-metoden** vært et uvurderlig verktøy til å tidfeste gjenstander av tre som graves fram. Isotopen C-14 dannes ustanselig i atmosfæren i reaksjonen mellom nitrogen og nøytroner fra den kosmiske strålingen (se s. 17). I en karbonforbindelse som CO<sub>2</sub> i atmosfæren vil det alltid være ca. 50 milliarder C-14-atomer pr. gram karbon. Siden CO<sub>2</sub> kommer inn i næringskjeden via fotosyntesen, vil alt levende innholde samme C-14-konsentrasjon. Dette tilsvarer en aktivitet på 0,19 Bq pr. gram karbon.

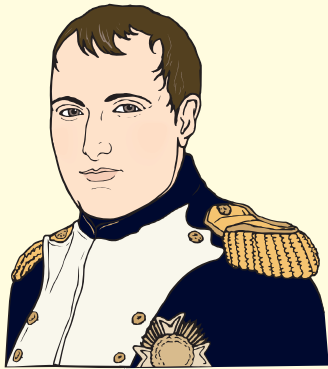
Når et tre dør, vil det ikke lenger ta opp karbon, og aktiviteten dør langsomt ut ( $T_{1/2} = 5730$  år) etter formelen på s. 6. Kan du måle aktiviteten og bruke formelen, kan du bestemme alderen på gamle tregjenstander.

Du "teller"  $\beta$ -partikler som trebiten sender ut og beregner alderen.



## Aktiveringsanalyse

En metode til å påvise meget små konsentrasjoner av et grunnstoff er **aktiveringsanalyse**. Husk at hver radioaktiv isotop sender ut stråling med en bestemt energi, og hvis vi kan måle denne energien, kan vi identifisere isotopen. De aller fleste isotoper i naturen er ikke radioaktive, men mange kan omdannes til en radioaktiv isotop ved bestråling med nøytroner. Hvis vi bestråler en ukjent prøve med nøytroner, kan det dannes radioaktive isotoper som kan røpe stoffer som er til stede i prøven selv i ørsmå mengder. En fordel med denne metoden er at den (i motsetning til en del kjemiske analysemetoder) ikke ødelegger prøven.



Det ble brukt aktiveringsanalyse på noen hårlokker fra Napoleon. Analysen viste små mengder av grunnstoffet arsen i hårlokkene, og dette økte mistanken om at den franske keiseren i sin tid ble arsenikkforgiftet.

Det kan også nevnes at månens sammensetning ble bestemt svært nøyaktig ved hjelp av aktiveringsanalyse av stein som romfarerne brakte med seg hjem.

### Bestråling av mat

Det å bestråle mat høres kanskje litt merkelig og risikabelt ut. Men vi vet at stråling i store doser kan drepe bakterier, og uten bakterier får maten lengre holdbarhet og risikoen for sykdom blir mindre. Bestråling er derfor et alternativ til bruk av kjemiske holdbarhetsmidler, hermetisering eller kjøling.

Det er  $\gamma$ -stråling (oftest fra isotopen kobolt-60) som brukes. Kildene er meget kraftige ( $10^{15} - 10^{16}$  becquerel), og dosene er enorme - 5000 til 10 000 Gy brukes til behandling av matvarer.

Når matvarene bestråles, absorberes strålingen både i maten og i mikroorganismene. Store doser vil føre til at bakteriene dør. Strålingen som absorberes i maten vil føre til kjemiske forandringer, men det er til nå ikke funnet stoffer i bestrålt mat som er giftige eller skadelige på andre måter. Vi kan ikke helt utelukke at det kan dannes forbindelser som vi ikke kjenner den biologiske virkningen av. Risikoen forbundet med dette ansees imidlertid som svært liten.

Ikke alle matvarer egner seg for strålebehandling. For eksempel vil melk få endret smak ved relativt små doser. Men en del kjøtt, fisk, frukt og grønnsaker, og særlig tørket frukt og krydder, egner seg godt for bestråling.

### Bestrålt mat blir ikke radioaktiv.

Dette kan vi si med 100 % sikkerhet fordi det benyttes  $\gamma$ -stråling fra Co-60 eller Cs-137. Denne strålingen har ikke stor nok energi til å gi en kjerneaksjon og danne radioaktive isotoper. Hvis vi derimot brukte nøytroner, ville vi lett laget nye isotoper slik som nevnt ovenfor.

Myndighetene i Norge tillater stråling brukt på krydder og tørket frukt. I en del andre land praktiseres bestråling også av andre næringsmidler, som egg, grønnsaker, fjærfekjøtt osv. Denne metoden kunne med fordel brukes for langtransport av mat til den tredje verden der mulighetene for kjøling og frysing er dårlig.



*Når pepper bestråles med fotoner, dør bakterier og mikroorganismer. Peppret blir ikke radioaktivt.*

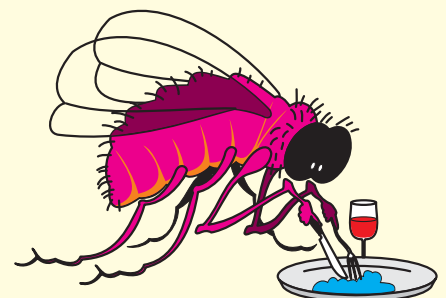
## Insektkontroll

Innen landbruket brukes store mengder plantevernmidler og kjemiskegifter til insektkontroll. Et interessant alternativ til dette er bestråling. Den foregår slik:

1. Du samler inn en del eksemplarer av insektene du vil bekjempe og lar dem formere seg i "fangenskap".
2. Når du har et passende antall, bestråler du insektene (ganske liten dose) slik at de blir sterile.
3. Insektene slippes løs og blander seg med andre insekter.

De bestrålte insektene **er ikke lenger i stand til å formere seg**, og vil derfor dempe tilveksten til bestanden.

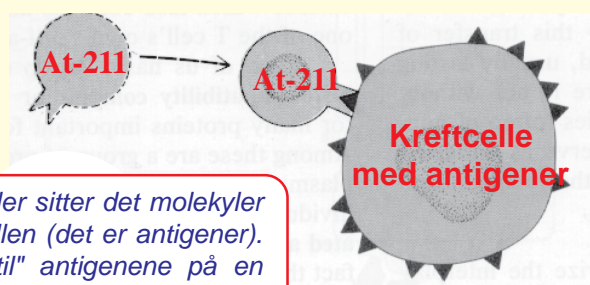
Problemet med metoden er å beregne hvor mange insekter som må bestråles for å holde bestanden i sjakk.



## Lovende medisinsk bruk

Vi har allerede vært inne på at stråling brukes innen kreftbehandlingen til å drepe kreftceller. Den store utfordringen er å drepe alle kreftcellene, mens de friske cellene skades minst mulig. Strålingen må derfor være mest mulig rettet mot de syke cellene. Dette er ingen lett oppgave, og flere metoder har vært benyttet. Vi skal her nevne en lovende metode med radioaktive isotoper som kan hektes på antistoffer.

Metoden går i korthet ut på at vi ønsker å bringe strålekilden direkte tilsvulsten eller de syke cellene. "Frak-tebåten" er **antistoffer**.



På overflaten av alle celler sitter det molekyler som er spesifikke for cellen (det er antigener). Antistoffer som "passer til" antigenene på en kreftcelle kan brukes til å frakte radioaktive atomer (f.eks. At-211) til kreftcellen.

Dette er store molekyler med en spesiell overflate som kan gjenkjenne tilsvarende strukturer (antigener) på overflaten av celler. På antistoffene kan en hekte radioaktive isotoper, aller helst slike som sender ut stråling med kort rekkevidde ( $\alpha$ -partikler og

$\beta$ -partikler). Når antistoffet fester seg til overflaten på kreftcellen, vil strålingen avsette energien sin lokalt i de syke cellene. Det betyr at de syke cellene får en stor stråledose, mens de friske slipper lettere unna fordi strålingen har så kort rekkevidde.

## Strålevern

Vi har ganske kort nevnt noen eksempler fra dagligliv og forskning der det brukes stråling. Vi kan lett finne flere; særlig innen forskning og medisin er det mange interessante bruksområder.

De radioaktive isotopene må lages og fraktes til stedet der de brukes. Etter bruk må de oppbevares på en trygg måte inntil aktiviteten er så liten at den er ubetydelig. Hvis du lurer på hvor lenge det er, må du se på halveringstiden. Etter 20 halveringstider er det bare én milliondel igjen av aktiviteten.

Hvis det dreier seg om I-131 med bare 8 dagers halveringstid, er 20 halveringstider bare 20 uker. Derfor er ulykker med jodutslipp kritiske bare i noen få uker. Cs-137, derimot, har en halveringstid på 30 år, og da vil det gå omkring 600 år før aktiviteten er redusert til én milliondel. For plutonium Pu-239 er halveringstiden 24 400 år, så her reduseres aktiviteten nesten ikke i løpet av et menneskeliv.

De menneskene som arbeider med stråling og radioaktive isotoper må lære seg en del forsiktighetsregler. De fleste bruker et dosemeter i sitt arbeid slik at de hele tiden holder kontroll med om de utsettes for stråling. En internasjonal komité (ICRP) set-

ter retningslinjer for bruk av stråling, og i Norge er det Statens strålevern som har ansvar for dette.

### ICRP

ICRP står for "*International Commission on Radiological Protection*". Den ble dannet i 1928, og svensken Rolf M. Sievert var en av initiativtagerne. Hans innsats har ført til at navnet hans brukes i enheten for ekvivalent dose – sievert (Sv).

ICRP anbefaler at dosen til folk som arbeider med stråling til daglig ikke skal overskride 20 mSv pr. år, midlet over en 5-årsperiode (Det betyr at dosen kan være litt høyere i ett år hvis den er litt lavere i et annet). Dosen bør ikke overskride 50 mSv i løpet av ett år.

ICRP gir i første rekke retningslinjer for **planlagt bruk av stråling**, f.eks. i forsknings-, helse- eller industrisammenheng. Vi kan ikke uten videre bruke de samme retningslinjene for å vurdere i hvilke tilfeller ekstra stråledoser ved f.eks. ulykker representerer en reell helserisiko (se s. 38-41 om små stråledoser).



I Norge er det **Statens strålevern** som holder kontroll med alle strålekilder på sykehus, i industri og forskning. Strålevernet følger retningslinjene som trekkes opp av ICRP.

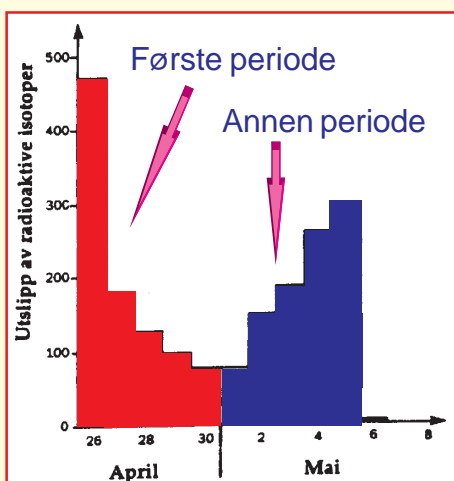
Statens strålevern ble opprettet i 1939 med navnet "Statens fysiske kontrollaboratorium". Oppgaven var å føre tilsyn med røntgenloven av 18. juni 1938. I 1964 gikk laboratoriet over til å bli et eget institutt, "Statens institutt for strålehygiene" (SIS). Instituttet fikk egen bygning i Bærum i 1975. I 1993 skiftet SIS navn til **Statens strålevern**.

Statens strålevern skal føre tilsyn med bruken av både ioniserende og **ikke**-ioniserende stråling (f.eks. UV). Det skal være et kompetanseorgan når det gjelder vern og sikkerhet ved bruk av radioaktivt materiale og røntgenutstyr. Instituttet har i dag en stab på mer enn 50 personer, og de utgir en egen publikasjonsserie.

# Tsjernobylulykken

## Hva skjedde?

26. april 1986 løp en av reaktorene ved kjernekraftverket i Tsjernobyl løpsk. Varmeutviklingen førte til en gasseksplisjon (ikke en atomeksplisjon - reaktoren oppførte seg **ikke** som en atombombe). Eksplisjonen gjorde at topplokket på reaktoren ble delvis sprengt bort, og reaktoren hadde ingen inneslutning som hindret de radioaktive stoffene i å slippe ut. I eksplosjonen og den etterfølgende brannen ble det frigjort store mengder radioaktive stoffer. Reaktorkjernen med grafitt brant i mange dager, og utslippet fortsatte i hele ni dager (fig.14). Isotopene som slapp ut var bl.a. cesium, strontium, jod og en lang rekke andre, deriblant plutonium.



Figur 14. Utslipp av radioaktive stoffer fra Tsjernobyl. Høyden på søylene viser samlet utslipp pr. dag (relative enheter). Alle de radioaktive gassene slapp ut den første dagen, mens utslipp av radioaktive støvpartikler fortsatte i ni dager.

Alt strontium og det meste av plutoniumet falt ned igjen innenfor et område på 30 km fra reaktoren. Men andre isotoper, som I-131 og Cs-137, ble ført med vinden og spredt over store landområder. Vinden blåste mot Skandinavia de første dagene etter ulykken, og en god del radioaktivt materiale falt ned med nedbør over Midt-Norge.

Vi skal her se litt nærmere på nedfallet omkring Tsjernobyl, stråledosene til befolkningen der og de helsemessige konsekvensene. Vi skal også behandle konsekvensene som ulykken fikk for Norge og de stråledosene vi ble utsatt for.

## Doser nær Tsjernobyl

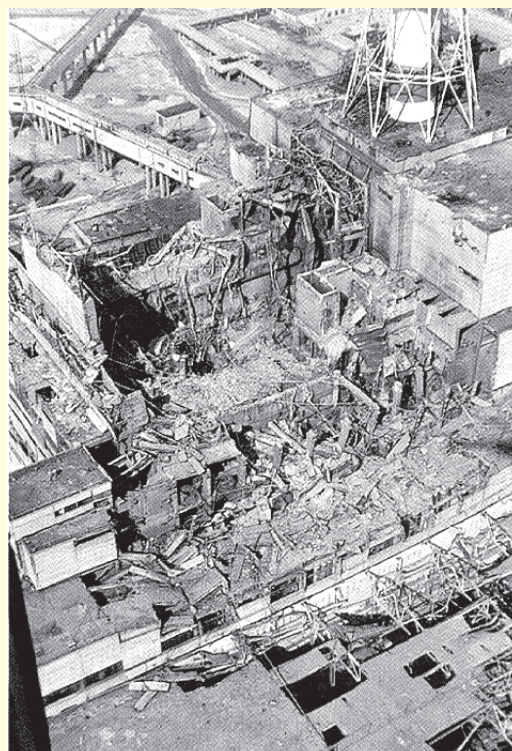
I de første dagene etter ulykken jobbet ca. 1000 mennesker intenst med å slukke brannen og kapsle inn restene av reaktoren for å unngå nye eksplisjoner og utslipp av radioaktivt materiale. En del av disse arbeiderne fikk betydelige stråledoser, og 28 personer døde som følge av akutte stråleskader, mens 3 døde av brann- eller andre skader.

Ca. 135 000 mennesker ble evakuert fra nærområdene rundt kraftverket i løpet av den første uka etter ulykken. Man antar at disse vil få en middeldose på 10-20 mSv over 50 år som følge av ulykken. Ca. 4 millioner mennesker i Hviterussland og Ukraina lever i dag i områder med betydelig nedfall etter ulykken. Disse antas å få doser på 6 - 20 mSv over 50 år.

Hva betyr disse dosene for helsa til de aktuelle folkegruppene? For å svare på det, må vi se litt på hvilke isotoper det dreier seg om.

Isotopen jod I-131 har halveringstid på 8 dager, og vil derfor gi stråledoser over kort tid. Hvis vi får jod inn i kroppen, vil den samle seg i skjoldbruskkjertelen og gi en stråledose til denne.

Det ble ikke satt inn noen tiltak mot radioaktivt jod i områdene nær Tsjernobyl, og dette førte til at jod-dosene til befolkningen antakelig var relativt store. Vi vet lite om dette, og det er



Slik så reaktoren og omgivelsene ut tre dager etter eksplosjonen i Tsjernobyl.

vanskelig å beregne dosene i ettertid. Hvis man skal sette inn tiltak mot I-131, må det skje umiddelbart etter utslippet. Et aktuelt tiltak er å tilføre **ikke**-radioaktive jodisotoper som tabletter til folk. Kroppen kan ikke skille mellom radioaktivt og ikke-radioaktivt jod. Det blir derfor en konkurranse om opptak som kan bety at opptaket av I-131 blir mindre.

Det meste av jodaktiviteten døde ut etter noen få uker, og i ettertid er det cesium, Cs-137, som gir størst bidrag til befolkningens stråledose. Den sender ut  $\gamma$ -stråling og vil derfor bidra til den eksterne dosen. I tillegg kommer den inn i næringskjeden og tas opp i menneskekroppen gjennom maten.

En rekke forskergrupper har studert helsekonsekvensene for befolkningen omkring ulykkesstedet. Ut fra vår kunnskap om de japanerne som ble bestrålt ved bombingene av Hiroshima og Nagasaki i 1945, antok man at det ville begynne å oppstå ekstra tilfeller av leukemi (blodkreft) omkring Tsjernobyl i løpet av noen (5 - 10) år.



Dette skjedde imidlertid ikke, og det er fortsatt, 19 år etter ulykken, ikke funnet overhyppighet av leukemi. Derimot har omkring 2000 barn i de forurensede områdene fått kreft i skjoldbruskkjertelen, sannsynligvis pga. stråling fra I-131. Mer enn 95 % av tilfellene kan helbredes. Kreft tar gjerne mange år på å utvikle seg, derfor var det først 5-6 år etter ulykken at økningen i krefttilfeller ble merkbar.

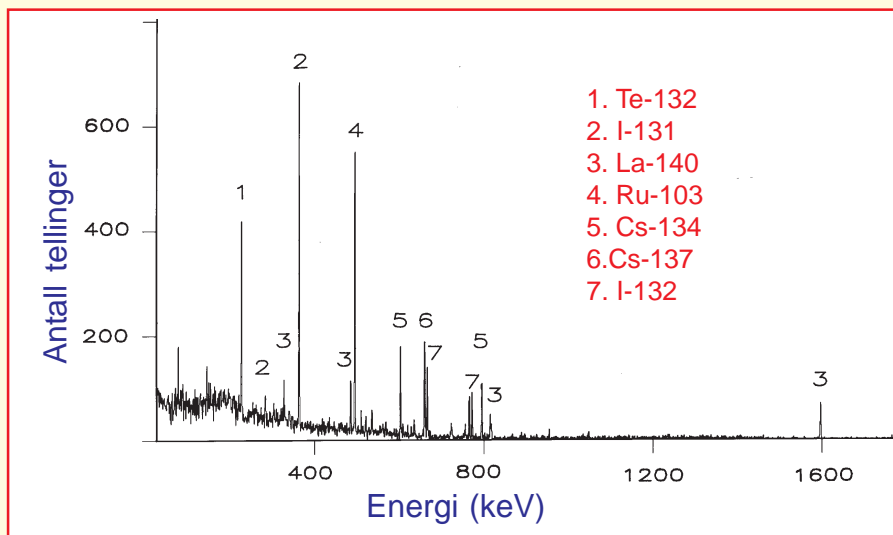
Det ble altså en uventet fordeling av kreftformer etter Tsjernobyl. Noe av forklaringen ligger nok i at strålingen omkring Tsjernobyl var av et annet slag enn den i Japan (strålingen fra atombombene inneholdt bl.a. mye nøytroner). Videre kom dosene fra Tsjernobyl i løpet av dager og uker (måned), mens dosen til japanerne kom momentant idet bomben sprang.

Det er observert økning også i en rekke andre kreftformer i befolkningen i de berørte områdene etter ulykken. Imidlertid er det en like stor økning i områder som **ikke** er forurenset av radioaktive stoffer, og man regner derfor ikke med at disse krefttilfellene kan tilbakeføres til **stråling**. Mulige faktorer som kan ha påvirket kreftforekomsten i det tidligere Sovjetunionen er politisk og sosial uro, usikkerhet, flytting, endrede matvaner, økt stress osv.

Tsjernobylulykken førte til redsel, usikkerhet og angst hos store befolkningsgrupper. Mange måtte flytte fra hjem og arbeid. Den psykiske belastningen på befolkningen etter ulykken har vært stor, og slike påkjenninger vil påvirke helsen. Totalt sett kan det sies at de direkte **strålingsrelaterte** helseproblemer etter Tsjernobylulykken er små, mens de psykiske, politiske og økonomiske problemene er enorme.

Det er **ikke** observert overhyppighet av misdannelser hos barn som er født etter ulykken av bestrålte foreldre.

Kreft og andre helsemessige følger av stråling utvikler seg imidlertid sakte,



Figur 15. Figuren viser hvilke radioaktive isotoper som falt ned i Norge etter Tsjernobyl. Prøven som er målt besto av gress fra plenen utenfor Universitetet i Oslo. Den ble målt 9. mai 1986, 2 uker etter eksplosjonen. Prøven er målt med en teller som registrerer energien til  $\gamma$ -strålingen. Det gir igjen grunnlag for å bestemme hvilke isotoper vi har.

og det vil ennå gå mange år før vi har full oversikt over ulykkens konsekvenser. Dosene var tross alt beskjedne, og vi kan trolig ikke vente noen øking i kreft.

### Ulykkens følger for Norge

Selv om Norge ligger langt fra Tsjernobyl, fikk ulykken relativt store konsekvenser også for oss. Vinden sto mot Norge, og vi hadde mye nedbør i den aktuelle perioden slik at de radioaktive partiklene i lufta festet seg til regndråper og falt ned på bakken.

Figur 15 viser en måling som er gjort på en gressprøve fra Blindern i Oslo 9. mai 1986. Det er  $\gamma$ -stråling som er målt, og energien til strålingen er registrert. Dette gir grunnlag for å bestemme hvilke isotoper som er tilstede. Det er kun cesium-isotopene som har en halveringstid på mer enn et år, mens en viktig isotop som I-131 har en halveringstid på kun 8 dager. Det betyr at allerede 9. mai var I-131-mengden redusert til under det halve.

Nedfallet over Norge ble størst i de områdene som hadde nedbør i dagene etter ulykken. Særlig hardt rammet ble fjellområdene i Midt-Norge. Regnvannet med de radioaktive isotopene ble tatt opp av gress og planter, og kom

dermed inn i næringskjeden. Sauer og reinsdyr som beitet i de berørte områdene, fikk isotopene inn i kroppen.

Siden halveringstiden til Cs-137 er 30 år, betyr det at 10 år etter ulykken var det 79 % igjen av aktiviteten og etter 30 år vil det være 50 %.

Det er foretatt en rekke målinger for å undersøke hvor det er blitt av de radioaktive stoffene. Det meste ligger nok fortsatt der det falt ned, men kanskje litt dypere i jorda. Endel har rent ut i bekker og vassdrag. Noe finner veien inn i planter og næringsstoffer og til slutt inn i oss.

Hvis du bor i et område med cesiumnedfall, vil du få en ekstra stråledose. Mye av den skyldes  $\gamma$ -strålingen fra det som ligger på bakken, og en del skyldes at du spiser mat som inneholder Cs-137. Det gir både en ekstern og en intern dose.

Etter Tsjernobylulykken ble det foreslått at det skulle settes grenser for hvor stor Cs-aktivitet som skulle tilates i matvarer. I Norge vedtok man en grenseverdi på 600 Bq/kg. Dette førte til at vi måtte kassere store mengder saue- og reinsdyrkjøtt. Det var særlig reinsdyra i Midt-Norge som var utsatt.

Vi kan slå fast at hvis vi skulle tviholdt på grenseverdien på 600 Bq/kg, ville det fått katastrofale følger for rein-driften. Følgelig ble vedtaket etter kort tid omgjort slik at grensen for reinsdyrkjøtt ble hevet til 5000 Bq/kg. Senere er grenseverdiene for reinsdyrkjøtt igjen redusert.

De stråledosene vi får fra Cs-137 i kjøtt er små - betydelig mindre enn dosene vi får fra naturlig stråling. For å redusere radioaktiviteten i sauer til under tiltaksgrensen, ble det satt i gang såkalt **nedfôring**. Det kan skje på to måter:

1. Gi dyra et stoff (f.eks. berlinerblått) som gjør at cesium skilles fortere ut av kroppen (**redusere biologisk halveringstid**).

2. Fôre sauene med **ikke**-radioaktivt fôr i noen uker.

Nedfôrings-tiltakene har kostet Norge omkring en halv milliard kroner, men reduksjonen i befolkningens stråledose har vært liten.

Gjennomsnittsnordmannen mottok en ektradose på ca. 0,25 mSv det første året etter ulykken. Uten tiltak ville dette tallet antakelig vært omkring 0,33 mSv. Dosereduksjonen er altså på ca. 0,1 mSv - mindre enn reduksjonen på 0,27 mSv som du oppnår ved å flytte fra et betonghus til et trehus (se s.16).

For en del samer i Sør-Norge, som spiser mye reinsdyrkjøtt, har dosene fra Tsjernobyl vært større, og tiltakene har hatt større betydning. Man regner med at dosen fra Tsjernobyl totalt (over 50 år) vil bli ca. 2 mSv for en gjennomsnittsnordmann og opptil 20 mSv for en same som spiser mye reinsdyrkjøtt. Den totale dosen fra andre kilder i samme tidsrom er ca. 200 mSv.

## Konklusjon

Dosen til Kari og Ola etter Tsjernobyl er bare 1 - 2% av naturlig stråledose. Vi vil aldri kunne påvise sykdomstilfeller som er direkte forårsaket av en så liten ektradose.



## Biologisk halveringstid

Når du får i deg en radioaktiv isotop, vil den kunne skilles ut igjen via svette, urin og avføring. Vi snakker derfor om en **biologisk halveringstid,  $t_B$** .

Et radioaktivt stoff i kroppen din forsvinner altså på to måter: enten ved at det skilles ut biologisk eller ved at det henfaller fysisk. Det er altså ikke bare den fysiske halveringstiden,  $t_F$ , som er viktig.

Hvis vi kjenner den biologiske og den fysiske halveringstiden til et radioaktivt stoff, kan vi beregne en **effektiv halveringstid,  $t_E$** .

$$t_E = \frac{t_F \cdot t_B}{t_F + t_B}$$

Når den biologiske halveringstiden er mye kortere enn den fysiske (som for Cs-137), vil  $t_E$  og  $t_B$  være nesten like.

Den effektive halveringstiden er forskjellig fra art til art og fra isotop til isotop, og avhenger dessuten av hvilken kjemisk forbindelse det radioaktive stoffet er en del av. Den biologiske halveringstiden for Cs-137 er 2-3 uker for sauer, ca. 1 måned for reinsdyr og ca. 3 måneder for mennesker.

Grunnen til at det fortsatt er en del radioaktivitet i sau og rein etter tidligere utslipp er at de beiter på gress og lav som tar opp radioaktivitet fra bakken. På denne måten får beitende dyr stadig "påfyll" av radioaktivt materiale.



Her måles innholdet av Cs-137 i en levende sau. Det blir brukt en teller som måler  $\gamma$ -strålingen som kommer fra sauene. Hvis du ser på henfallsskjemaet på side 7, ser du at energien til  $\gamma$ -strålingen er 0,662 MeV. Det betyr at strålingen har energi nok til å komme ut av sauene og treffe telleren. Foto: Landbruksdepartementet.

# Prøvesprengninger



Figur 16. Den aller første kjernefysiske test fant sted nær Almagordo i New Mexico i juli 1945. Senere er det foretatt mer enn 1900 tester. Kartet her viser teststedene. Av størst betydning for Norge er Novaja Semlja.

I perioden etter den 2. verdenskrig og fram til ca. 1980 har USA, den daværende Sovjetunionen og andre stormakter foretatt til sammen 461 kjernefysiske prøvesprengninger i atmosfæren. Ved en kjernefysisk eksplosjon i atmosfæren blir radioaktive stoffer ført med luftstrømmene og fordelt over store områder. De viktigste isotopene er cesium-137, strontium-90 og jod-131. Når det gjelder miljø og radioaktivt utslipp, er det helt avgjørende om prøven finner sted i atmosfæren eller under bakken. Det totale utslippet fra bombetestene (målt i becquerel) er større enn utslippet fra Tsjernobyl-ulykken, men det er også endel ting som skiller de to typene utslipp:

1. Utslippet fra Tsjernobyl nådde aldri høyder på mer enn 8 - 9 km, dvs. at det var begrenset til "værsonen" eller troposfæren. Bombeprovne, derimot, førte til at en betydelig del av aktiviteten nådde opp i stratosfæren. Dette har avgjørende betydning for nedfallet. Det er liten utveksling av luft mellom troposfæren og stratosfæren, og de radioaktive stoffene kan derfor bli i stratosfæren i årevis før de faller ned.

2. Sammensetningen av nedfallet er avhengig av hvor bomben sprenges (høyden) og hvor lang tid som går før det faller ned. Tidsaspektet er lett å forstå, fordi de kortlevede produktene, som I-131, vil forsvinne etter noen ukers forløp.

Hvis sprengningen foregår nær bakken, vil jord og løsmateriale suges opp, og nøytronstrålingen danner radioaktive **aktiveringsprodukter** som f.eks. C-14.

I perioden 1961-1962 foretok Sovjetunionen 87 prøvesprengninger over Novaja Semlja, og nedfallet fra disse testene var betydelig i Finnmark og på Vestlandet, der det regnet mye.

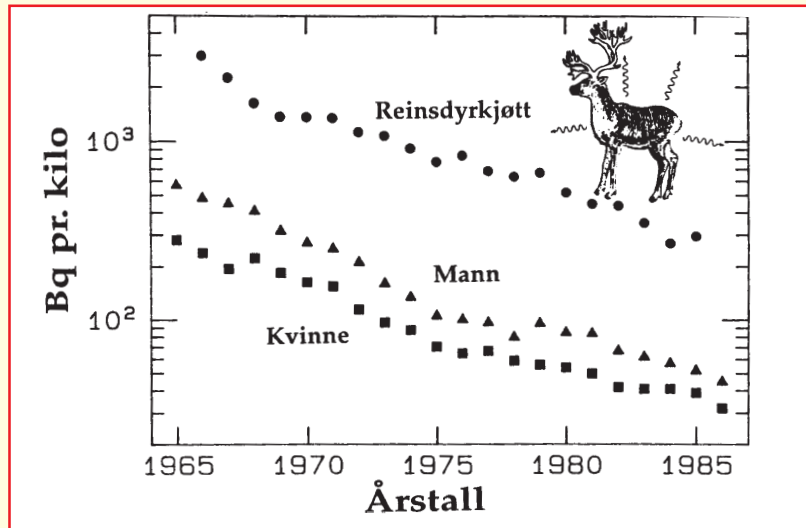
Jod-131 kom fra gress via kuer inn i melken. I forbindelse med de store prøveseriene i høstmånedene i 1961 og 1962 ble det målt en konsentrasjon av jod-131 i melk på opp til 50 Bq pr. liter. Jod samler seg i skjoldbruskkjertelen. På s. 27 skal vi forsøke å beregne stråledoser som muligens kunne bli resultatet ved å drikke melk med I-131. Som vi skal se, er dosene så små at det er lite sannsynlig at det kan ha gitt helseeffekter.

Det nedfallet som har vært av betydning etter prøvesprengningene er i første rekke Cs-137. På midten av 1960-tallet inneholdt reinsdyrkjøttet i Finnmark noen tusen Bq pr. kilo. Det førte til at samene, som bruker store mengder reinsdyrkjøtt, fikk i seg denne isotopen. I fig. 17 på neste side ser du utviklingen i perioden 1965 til 1985, både for reinsdyrkjøttet og for samene som spiste det. Samlet ekstradose til disse samene blir ca. 12 mSv. For resten av den norske befolkningen har dosetillegget fra bombetestene vært omkring 0,15 mSv.



I 1963 inngikk de fleste stormaktene en avtale om å slutte med prøvesprengninger i atmosfæren. Siden den tid har testene stort sett foregått under jorda, og spredningen av radioaktivt materiale har vært langt mindre. Det pågår nå internasjonale forhandlinger om full stans i alle prøvesprengninger.

Vi har ingen forståelse for at det fortsatt utvikles og testes atomvåpen. Debatten omkring dette må imidlertid ikke forveksles med debatten om bruk av atomkraft som energikilde til fredelige formål. Du kan lese om fordeler og ulemper ved atomkraft (kjernekraft) på s. 43-45.



Figur 17. Cs-137 i flyttsamer fra Kautokeino-området i perioden 1965-1985. Tar du hensyn til at skalaen på y-aksen er logaritmisk, ser du at radioaktiviteten i samene avtok med en "halveringstid" på ca. 6 år. Menn hadde omtrent dobbelt så stor cesiumkonsentrasjon som kvinner. En tilsvarende situasjon finner vi for kalium (se fig. 12, s. 17). Data fra E.A. Westerlund, Statens strålevern.

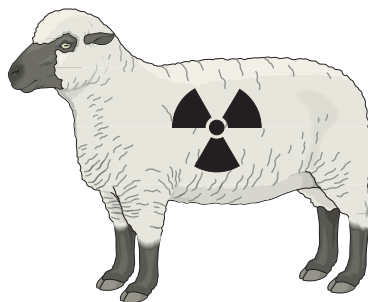
## Slik beregner du stråledoser

Vi har nå gjennomgått naturlige og kunstige radioaktive kilder. Vi vet at vi lever i et "hav" av stråling og at vi til enhver tid blir utsatt for små stråledoser. Gjennomsnittsmennesket får nok en større stråledose i dag enn for 100 år siden. Det skyldes i første rekke bruk av stråling i helsesektoren, men også utstrakt bruk av fly og økt radoninnhold i våre boliger, som stadig blir bedre isolert. Det er et paradoks at disse strålekildene og dosene bekymrer folk flest svært lite, mens de langt mindre dosene vi får fra prøvesprengninger og atomulykker stadig fremkaller store overskrifter.

Det er grunn til å se nærmere på hvordan vi kan anslå stråledoser i forbindelse med radioaktiv forurensning. Følg med i de tre eksemplene vi skal gi på beregninger av stråledoser. Hvis du synes det matematiske er vanskelig, ikke gi opp, men hopp over utregningene og følg med på konklusjonene. Kanskje vil du selv i neste omgang kunne gjennomføre slike overslag som er viktige for samfunnets behandling av stråling.

### 1) Cs-137 i kjøtt

Sauen har beitet i et område med stort Cs-nedfall.



1. La oss anta at sauekjøttet inneholder 1000 Bq/kg, dvs. en del mer enn tiltaksgrensen på 600 Bq/kg.
2. La oss anta at du spiser én middag med 200 gram kjøtt. Du får altså i deg Cs-137 med en aktivitet på 200 Bq.
3. Vi antar at du veier 60 kg og at aktiviteten fordeler seg jevnt i kroppen.

#### Hvilken dose gir dette?

Cs-137 har en fysisk halveringstid på



Her er vist 3 eksempler som noen kanskje synes er litt vanskelige. Du kan hoppe over selve beregningene, men prøv litt først da vel!

30 år, mens den biologiske halveringstiden for mennesker er ca. 3 måneder. Det betyr at den effektive halveringstiden er på 90 dager (se s. 24).

Vi vet at aktiviteten avtar etter en eksponentialfunksjon, og med en effektiv halveringstid på 90 dager betyr det at du vil motta mer enn 93 % av den totale stråledosen i løpet av ett år (4 halveringstider). Sagt på en annen måte synker aktiviteten fra 200 Bq til 12 Bq det første året.

Det totale antall henfall i løpet av et år, finner du ved å integrere eksponentialfunksjonen (fra tid 0 til et år). Det er det samme som å summere antall henfall i hvert eneste sekund fra du spiser kjøttet til ett år senere. Matematisk er det:

$$X = \int_{t=0}^{t=1 \text{ år}} A_0 e^{-\lambda t} \cdot dt$$

der  $A_0$  er lik aktiviteten ved start (200 Bq) og  $\lambda$  er henfallskonstanten ( $\lambda = \ln 2/t_{1/2}$ ) der den effektive halveringstiden er på 90 dager. Du vil finne at det totale antall henfall er:

$$X = A_0/\lambda = 2,2 \cdot 10^9$$

Som vi ser, er det mer enn 2 milliarder henfall.

I figur 3 på side 7 kan du se hva slags stråling Cs-137 fører med seg. Det er  $\beta$ -partikler og  $\gamma$ -stråling.  $\beta$ -partiklene har så kort rekkevidde at de avsetter all sin energi i kroppen. Det er ifølge henfallsskjemaet to veier som fører til  $\beta$ -partikler med noe forskjellig maksimalenergi. For enkelthets skyld antar vi at **alle** henfallene gir  $\beta$ -partikler med maksimalenergi på 0,512 MeV (i virkeligheten skjer dette i 94,6% av henfallene). Vi har tidligere sagt at gjennomsnittsennergien til  $\beta$ -partiklene er ca. 1/3 av maksimalenergien, hvilket betyr ca. 0,17 MeV pr. henfall.

$\gamma$ -strålingen som sendes ut har en energi på 0,662 MeV. En god del av denne strålingen går rett og slett ut av kroppen (det er jo derfor vi kan måle radioaktivitet i levende vesener). Ca. halvparten av  $\gamma$ -strålingsenergien blir avsatt i kroppen. Det er derfor en rimelig antakelse at hvert henfall gir et gjennomsnittlig dosebidrag på ca 0,5 MeV (0,17 fra  $\beta$ -partiklene og 0,33 fra  $\gamma$ -strålingen). Det betyr at den samlede energiavsetning i kroppen blir:

$$0,5 \text{ MeV} \cdot 2,2 \cdot 10^9 = 1,12 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

Vi vet at  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , og vi kjenner også definisjonen på dose. For en person på 60 kg blir dosen fra midt dagen totalt på:

$$D = \frac{1,12 \cdot 10^{15} \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}}{60 \text{ kg}}$$

$$D = 3,0 \cdot 10^{-6} \text{ J/kg} = \mathbf{0,003 \text{ mGy}}$$

Siden det er snakk om  $\beta$ -partikler og  $\gamma$ -stråling, blir den ekvivalente dosen **0,003 mSv**.

Denne ekstradosen er så liten at den er mindre enn ekstradosen du får ved å fly fra Oslo til København. Hvis du spiser to slike middager hver uke gjennom hele året, vil samlet dose fortsatt være litt mindre enn den dosen du får fra naturlige radioaktive stoffer i kroppen din.

## 2) I-131 og doser til skjoldbruskkjertelen

I områdene rundt Tsjernobyl er det nå registrert en øking i skjoldbruskkjertelkreft som høyst sannsynlig skyldes doser fra radioaktivt jod i ukene etter ulykken. Vi har ingen informasjon om stråledosene, men de må ha vært relativt store hvis kreften skyldes strålingen.

Da det ble foretatt atmosfæresprengninger på Novaja Semlja i 1961 og 1962, var det i ukene etterpå en del nedfall av I-131 i Norge. Det kan være interessant å se om vi kan beregne noen stråledoser basert på de målinger som ble gjort den gangen.

I-131 kom inn i melk og ga en maksimal aktivitet på ca. 50 Bq pr. liter. La oss gjennomføre en beregning med følgende forutsetninger.

1. Du drikker 1/2 liter melk pr. dag i en periode på 12 uker.

2. Melken inneholder hele tiden I-131. med aktivitet på 50 Bq/l.

3. Vi bruker en effektiv halveringstid lik den fysiske på 8 dager (lengre kan den ikke bli).

4. Vi antar at alt det radioaktive jod blir tatt opp i skjoldbruskkjertelen, som veier 25 gram.

Når I-131 henfaller, sender det ut en  $\beta$ -partikkel med maksimal energi på 0,6 MeV og  $\gamma$ -stråling med energi på 0,36 MeV. Vi antar at alle  $\beta$ -partikler avsettes i kroppen med 1/3 av maksimalenergien, og at halvparten av

$\gamma$ -energien avsettes. Det betyr at hver desintegrasjon avsetter omkring 0,4 MeV i kroppen. For enkelthets skyld kan vi anta at alt avsettes i skjoldbruskkjertelen.

Vi beregner det totale inntaket til 2100 Bq I-131 til en skjoldbruskkjertel på 25 gram. Halveringstiden er 8 dager, og energien pr. henfall er 0,4 MeV. Vi må integrere på samme måte som i eksempel 1, og finner at totalt antall henfall, X, blir:

$$X = A_0/\lambda = 2100/\lambda = 2,1 \cdot 10^9$$

Energiavsetningen i skjoldbruskkjertelen blir da:

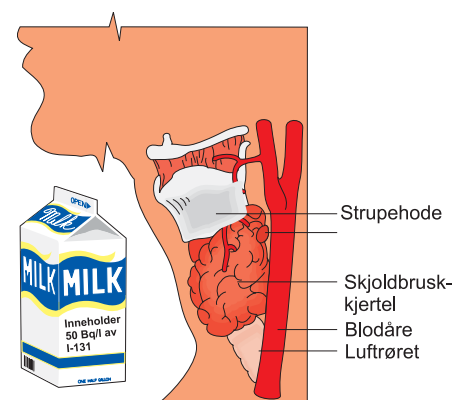
$$D = 0,4 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 2,1 \cdot 10^9 = 8,4 \cdot 10^{14} \text{ eV}$$

Dosen til skjoldbruskkjertelen, som veier 0,025 kg, blir:

$$D = \frac{8,4 \cdot 10^{14} \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}}{0,025 \text{ kg}}$$

$$D = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ J/kg} = \mathbf{5,4 \text{ mSv}}$$

En slik dose til skjoldbruskkjertelen vil gi samme risiko som en dose på 0,27 mSv til hele kroppen. Det er denne såkalte **effektive dosen** vi bruker når vi skal angi risikoen ved en strålingseksponering. Det betyr at I-131-nedfallet i Norge i forbindelse med bombeprøvene ga en ubetydelig helserisiko - tilsvarende flytting fra trehus til betonghus. Menneskene omkring Tsjernobyl som har fått skjoldbruskkjertelkreft etter ulykken må altså antas å ha fått betraktelig større doser enn dette.



### 3) Bading i radioaktivt vann

Vi skal ta med et scenario som som har vært oppe i mediene fra tid til annen. Store mengder radioaktivt avfall er helt ut i en sjø der det bor folk og der det muligens kunne være aktuelt med et bad. Dette er kanskje situasjonen enkelte steder i Russland med store forurensninger etter atomvåpenproduksjon. I dette scenariet skal vi holde oss til hjemlige forhold. Vi skal regne litt og vise at vann gir en meget god beskyttelse mot stråling - så følg med!

La oss anta at **alt Cs-137-utslippet fra Tsjernobyl-ulykken faller ned i Mjøsa og blir jevnt fordelt i vannet (ingenting synker til bunns)**. Hvor stor stråledose ville du få ved et bad på 10 minutter?

Det første vi må finne er **aktiviteten** i vannet. Ifølge de opplysninger vi har, ble det fra Tsjernobyl frigjort Cs-137 med en total aktivitet på  $38 \cdot 10^{15}$  Bq. Vi antar at alt dette faller ned i Mjøsa og blandes jevnt i vannet.

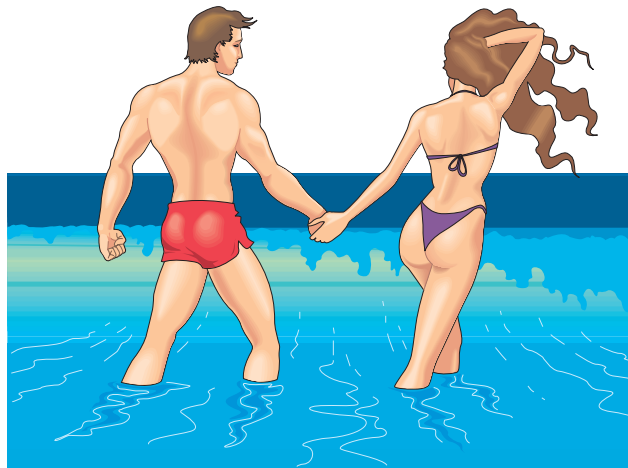
Mjøsa har en flate på  $368 \text{ km}^2$  og er 449 meter på det dypeste. For enkelhets skyld antar vi en gjennomsnittsdypde på 50 meter. Det betyr at Mjøsa inneholder ca.  $18,4 \text{ km}^3$  vann. Det er  $1,84 \cdot 10^{13}$  liter vann. **Det betyr at hver liter vann vil inneholde ca. 2000 Bq Cs-137.**

#### **Drikk ikke mens du bader !**

Vi regner med at du ikke drikker noe vann mens du bader. Det betyr at vi bare vil ta ekstern stråling med i beregningen. Henfallsskjemaet til Cs-137 finner du på side 7.  $\beta$ -partiklene som sendes ut har en midlere energi på ca. 0,17 MeV (se eks. 1). De har en rekkevidde i vann på ca. 1 mm. Det betyr at det kun er  $\beta$ -partikler fra et vannlag på 1 mm (ca. 1,2 liter) omkring kroppen som har mulighet til å treffe huden. Dosen fra  $\beta$ -stråling vil bare bli gitt til det ytterste hudlaget, og blir meget liten (kanskje du klarer å beregne det), så vi skal se bort fra den og konsentrere oss om  $\gamma$ -strålingen.

$\gamma$ -strålingen fra Cs-137 har en energi på 0,662 MeV. Strålingen blir absorbert i vann, og intensiteten avtar med tykkelsen på vannlaget etter en eksponensialfunksjon. Vannet absorberer så godt at et vannlag på litt under 10 cm reduserer  $\gamma$ -strålingen fra Cs-137 til det halve. Etter 5 slike "halvverdilag" (50 cm vann) er strålingen redusert til ca. 3 %. Vi kan altså regne med at bare de Cs-137 atomene som er nærmere enn 0,5 meter kan gi deg stråling mens du bader.

La oss anta at kroppen din er som en sylinder; 180 cm høy og 22 cm i diameter (da veier du ca. 70 kg). Det sylinderskallet med vann rundt deg som **kan** gi deg en stråledose, har da en diameter på 1,22 meter og inneholder omtrent 2000 liter vann med en total aktivitet på ca.  $4 \cdot 10^6$  Bq. Strålingen sendes ut i alle retninger. Det betyr at omkring



halvparten av strålingen i vannlaget går bort fra deg og halvparten mot deg. Den delen som går mot deg, vil delvis absorberes av vannet. Vi deler vannlaget i 5 "skall" som hvert er på ett halvverdilag (10 cm tykt). På grunn av absorpsjon vil ca. 71 % av strålingen i det nærmeste laget nå kroppen din. I neste skall vil 35 % nå frem, og videre i skall 3 vil 18 %, i skall 4 vil 9 %, og i skall 5 vil 4 % nå frem (hvis du er god til å regne med eksponensialfunksjoner, kan du vise dette).

Skallene er like tykke, men siden radien øker vil de gradvis inneholde mer vann. Vi tar hensyn til det og til at bare halvparten av strålingen går mot deg. Da finner vi at hvis du bader i 10 minutter, vil du bli truffet av tilsammen  **$2,26 \cdot 10^8$   $\gamma$ -fotoner**. Vi antar at all energien fra disse avsettes jevnt i kroppen din. Hvis du veier 70 kg, vil stråledosen bli:

$$D = \frac{2,26 \cdot 10^8 \cdot 0,662 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J / eV}}{70 \text{ kg}}$$

$$D = 0,34 \cdot 10^{-6} \text{ J/kg}$$

**Stråledosen vil altså bli ca. 0,34  $\mu\text{Gy}$  eller 0,34  $\mu\text{Sv}$ .** Denne dosen er overraskende liten. Prøv gjerne å utføre beregningen selv og se om du får dette svaret.

Dette eksempelet viser at vann er meget godt egnet til beskyttelse mot stråling. Det er bare radioaktivitet innen en halv meter med vann du må ta hensyn til.

Et helt annet regnestykke ville vi få hvis du begynte å **drikke** vannet. For planter og dyr (fisk) som lever i vann, vil det bety at de etterhvert tar opp Cs-137, noe som fører til en intern dose. Vi mangler kunnskaper om hvorledes radioaktiviteten kan "hope seg opp" (vi kaller det for "anriking") i forskjellige biologiske systemer som plankton, alger, skalledyr og fisk. Vi vet at hos noen arter blir konsentrasjonen adskillig større enn i vannet de lever i. Å studere radioaktive stoffers vandring i næringskjedene er en viktig oppgave for fremtidig forskning.

# Konklusjon om radioaktiv forurensning

Vi håper at de tre regneeksemplene har vist deg hvordan du ved å gjøre enkle antakelser kan beregne omtrentlig hvor store stråledoser du kan få i ulike situasjoner med radioaktiv forurensning. Det er noen få punkter du bør være oppmerksom på i forbindelse med utslipp og nedfall av radioaktive isotoper.

## 1. Utslippets sammensetning

Utslipp fra en reaktorulykke eller en bombep prøve i atmosfæren vil inneholde en rekke forskjellige radioaktive isotoper. Det er av betydning å kjenne sammensetningen hvis vi skal sette igang tiltak.

I den første fasen (noen få uker) må oppmerksomheten rettes mot de kortlivede isotopene, i første rekke I-131. Disse vil avgi all strålingen sin i løpet av denne perioden. Etter en tid må vi rette oppmerksomheten mot de langlivede isotopene, som Cs-137 og Sr-90.

## 2. Den første fasen: I-131

Store mengder I-131 har gitt betydelige stråledoser til skjoldbruskkjertelen hos en mengde barn i Hviterussland, Ukraina og Russland. Det har ikke vært mulig å beregne disse dosene, så vi kan ikke si noe særlig om den såkalte "dose-effekt-kurven" for skjoldbruskkjertelkreft (se s. 38-39). Tiltak i denne første fasen kan være å gi jodtabletter til folk, slik at skjoldbruskkjertelen "fylles opp" med vanlig jod og ikke er mottakelig for den radioaktive jod-isotopen.

## 3. Cs-137

De fleste forbinder radioaktiv forurensning først og fremst med Cs-137-forurensning. Det er også riktig når det gjelder nedfallet i Norge etter Tsjernobyl og tildels nedfallet etter bombep prøvene. Vi kan lett måle aktiviteten og oppgi den som Bq/kg eller Bq/m<sup>2</sup>. Vi får da som regel store tall. Vær oppmerksom på at mange bruker den gamle enheten curie (1 Ci = 3,7·10<sup>10</sup>

Bq), noe som gjør at tallene blir små. Det er viktig ved enhver forurensning at vi forsøker å beregne de stråledosene forurensningen kan føre til. Vi har gjort det i eksemplene 1 - 3. Slike enkle beregninger bør foretas før vi setter igang tiltak og bestemmer grenseverdier for radioaktivitet i næringsmidler. Når vi først setter en grenseverdi på for eksempel 600 Bq/kg (slik som etter Tsjernobyl), er samfunnet nærmest bundet til å sette igang tiltak for å overholde grenseverdiene. Det har kostet og koster fortsatt det norske samfunn betydelige summer å overholde grenseverdiene som ble satt etter Tsjernobyl. Tiltakene har bl.a. omfattet kassering av kjøtt og nedfôring av sau.

## 4. Plutonium

Plutonium er et stoff som det snakkes mye om og som til og med er blitt kalt "verdens farligste". Det finnes flere radioaktive plutoniumisotoper, men det er i første rekke Pu-239 med halveringstid på 24 400 år som vi er opptatt av. Den lages i kjernereaktorer ved nøytronbestråling av U-238. Pu-239 kan brukes som brensel i reaktorer, men den kan også brukes til å produsere våpen.

Plutonium sender ut  $\alpha$ -partikler med en energi på 5,15 MeV. Rekkevidden i luft er noen få cm. Det betyr at plutonium ikke er farlig så lenge den er utenfor kroppen.

Plutonium kan komme inn i kroppen enten via maten eller ved innånding. Hvis inntaket er gjennom mat, vil svært lite tas opp fra tarmen og gå inn i blodstrømmen - det meste passerer rett igjennom kroppen og rekker ikke å gi noen nevneverdig stråledose. Dette inntaket er derfor av liten betydning.

Ved innånding kan vi få plutonium inn i bronkier og lunger. Plutonium som er knyttet til små partikler kan avsettes i lungene. Noe forsvinner ut igjen med en halveringstid på ca. 500 dager, mens noe føres med blodstrømmen til skjelettet og leveren. I disse organene er den biologiske halveringstiden på 35 - 70 år. Lungekreft og kreft i bein, lever og mage kan bli resultatet. Eksperimenter med hunder, mus, rotter og kaniner tyder på at dosene som skal til må være relativt store.

Etter Tsjernobyl ble det spredt endel Pu-239 i en sone med ca. 30 kilometers radius omkring reaktoren. Når det blåser, kan noe av dette hvirvles opp som støv og trekkes ned i lungene, og det vil da representere en helserisiko. Ellers representerer plutonium et lite helseproblem.

Plutonium er farlig på en helt annen måte hvis det er samlet i en klump som er så stor at det representerer en såkalt "kritisk masse" (ca. 2 kg). Da kan det spontant starte en kjedereaksjon i plutoniumet, og en atomeksplosjon vil bli resultatet (se s. 43-44). Det er derfor svært viktig at plutonium ikke kommer i gale hender.



*Alt radioaktivt materiale skal lagres. Det må lagres så lenge at radioaktiviteten kommer ned på et forsvarlig nivå. Med et forsvarlig nivå mener vi at aktiviteten er omtrent som den naturlige bakgrunnsstrålingen.*

# Hva skjer når du bestråles?

Det er en oppfatning hos mange at små stråledoser kan føre til kreft. Strålevernet – både her hjemme og ICRP arbeider etter modellen at alle stråledoser gir en viss risiko for kreftutvikling. Dette har ført til at en del mennesker som bor i nærheten av kjernekraftanlegg og avfallsdeponier føler at de er utsatt for en ekstra risiko. Vi skal derfor se nærmere på de modeller vi nå har for kreftutvikling og vi skal se hva strålebiologien kan fortelle.

## Strålebiologi

Det skjer en lang rekke prosesser fra det øyeblikk en celle blir truffet av stråling til cellen utvikler seg til en kreftcelle eller eventuelt dør. Vi skal, på en enkel måte, forsøke å følge med i disse prosessene. Underveis skal vi innom en hel rekke fysiske, kjemiske og biologiske prosesser.

Figur 18 viser en skjematisk oversikt over hendelsesforløpet etter en bestråling. Det deles inn i en fysisk, en kjemisk og en biologisk fase.

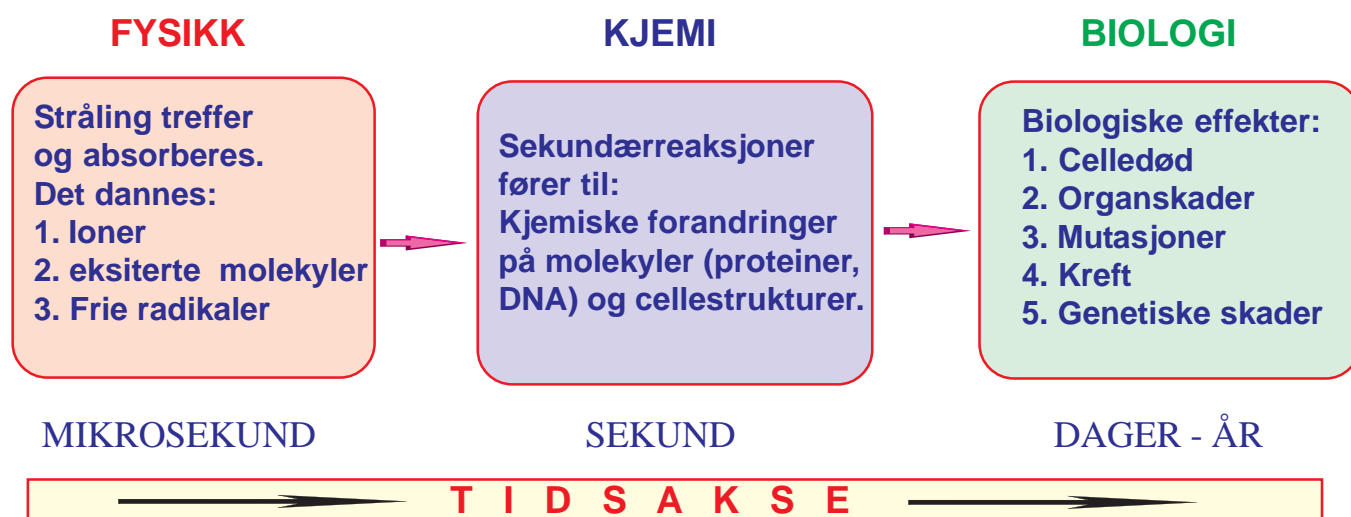


I den **fysiske fasen** absorberes strålingen, og det dannes ioner, eksiterte molekyler og frie radikaler. Et fritt radikal er meget ustabil og reagerer videre i brøkdelen av et sekund ved vanlig temperatur. Når vi skal studere primærproduktene, kan vi stabilisere dem ved "å fryse dem fast". Til det formål kan vi bruke flytende nitrogen (med temperatur på  $-196^{\circ}\text{C}$ ) eller helium ( $-269^{\circ}\text{C}$ ).

I den **kjemiske fasen** skjer det endringer på biologiske molekyler. Det er særlig skader på DNA-molekylet som er interessante. Skader på DNA kan i sin tur føre til både genetiske og

somatiske mutasjoner – som da i sin tur kan gi genetiske forandringer og kreft. Som vi skal se, har vi forsvarsmekanismer (**reparasjonsmekanismer** og det som kalles **apoptose**) som hjelper oss. I senere år er det vist at stråling – både UV-stråling og ioniserende stråling kan trigge disse forsvarsmekanismene.

Den **biologiske fasen** kan ta lang tid, avhengig av hvilken slutteffekt vi ser på. Vi studerer celler som dyrkes i laboratoriet – eller vi kan studere dyr ( gjerne mus). Tilsist må vi nevne epidemiologiske studier på mennesker som har fått ekstra stråledoser.



Figur 18. En skjematisk fremstilling av hendelsesforløpet ved bestråling av et biologisk system. Energiabsorpsjon og dannelse av ioner og radikaler representerer en fysisk fase som gjerne er over på brøkdelen av et sekund. Så kommer en kjemisk fase som gir mer permanente forandringer på molekyler og cellestrukturer. Den biologiske slutteffekten kan det ta lang tid (fra dager til år) før den kan observeres. Skader på DNA som ikke repareres kan i sin tur endre en normal celle til en kreftcelle (en mutasjon). Denne cellen kan i sin tur utvikles til en livstruende kreft.



## Primære strålingsprosesser

La oss begynne med de primære, fysiske prosessene, de som skjer i løpet av mikrosekunder når strålingen trefter og blir absorbert i en levende celle. Vi er interessert i hvordan strålingen avsetter energi i det biologiske vevet.

**Røntgen- og gammastråling** består av fotoner. Intensiteten av strålingen (dvs. mengden av fotoner) avtar innover i stoffet etter en eksponentialfunksjon:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Her er  $I$  intensiteten av strålingen (dvs. antall fotoner pr. flate),  $x$  er dybden i stoffet og  $\mu$  er en konstant – *absorpsjonskoeffisienten*.

Fotoner forsvinner altså på sin vei gjennom cellen. Energien til disse fotonene går med til å rive løs elektroner fra molekyler i cellen. Disse kan i sin tur rive løs nye elektroner.

Energioverføring fra  **$\alpha$ - og  $\beta$ -partikler** skjer litt-og-litt ettersom partiklene beveger seg innover i et stoff. Det som skjer er at  $\alpha$ - og  $\beta$ -partiklene kolliderer med elektronene i stoffet.

I hver kollisjon blir det avgitt energi og partiklene bremses etterhvert ned.

Partiklenes energitap pr. lengdeenhet,  $dE/dx$ , kalles "*Linear Energy Transfer*" (LET), og avhenger bl.a. av partiklenes ladning og hastighet og av elektrontettheten i det absorberende stoffet. LET er langt større for  $\alpha$ -partikler enn for  $\beta$  og  $\gamma$ . Det er derfor  $\alpha$ -partikler har en større biologisk effekt (se side 10 om strålingsvektfaktorer).

### Radikaler

Strålingen - både fotoner og ladde partikler - avsetter energien sin i stoffet gjennom ionisasjoner og eksitasjoner. Men hva skjer videre?

De løsrivne elektronene kan i sin tur eksitere og ionisere nye molekyler. Kjemiske bindinger kan ryke og det dannes **radikaler**. Et radikal kan bestå av ett eller flere atomer. Det som særpreger et radikal er at det er svært reaktivt. Radikalene vil reagere raskt med andre molekyler i cellen, og de har derfor en meget kort levetid (brøkdelen av et sekund).

En levende celle består for en stor del



av vann, og noen av de viktigste strålingsproduktene er **vannradikaler**. De viktigste vannradikalene er **H**, **OH** og et **elektron** som en kort tid er stabilisert ved at det omgir seg med et skall av vannmolekyler. Vi betegner det med  $e_{aq}$  (aq står for *aqua*, latin for vann).

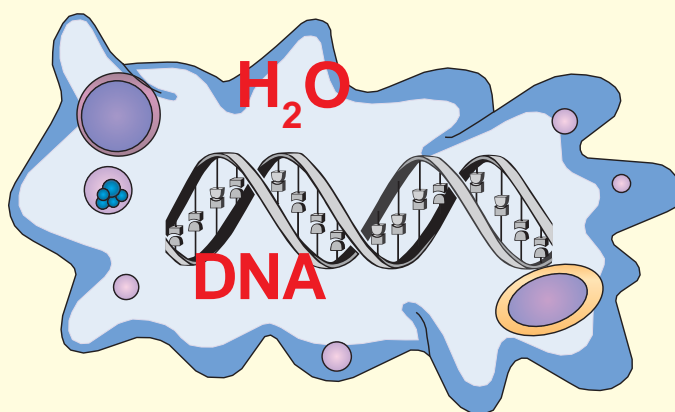
Radikaler kan reagere med de fleste molekyler i en celle. Studiet av reaktive radikaler som er dannet av stråling har i mange år vært en hovedoppgave for en rekke fysikere ved Universitetet i Oslo. De har særlig konsentrert seg om stråleinduserte radikaler i de store, biologiske molekyler – særlig DNA-molekylet. Studiene er ofte gjennomført ved ekstremt lave temperaturer slik at primærproduktene er "frosset fast". Da får vi mer tid til å studere de før de slippes fri og reagerer videre.

## Sekundære prosesser Effekter på biomolekyler

Kikk igjen på figur 18 på side 30. De reaksjoner vi skal behandle nå, er i den andre boksen på figuren: Kjemiske forandringer på biomolekyler.

Alle molekyler i en celle er utsatt for forandringer ved bestråling. Vi studerer hvordan stråling forandrer viktige molekyler slik at de ikke kan utføre sine oppgaver. Alvorligst er skader på DNA, for i det tilfellet kan selve planen for det biologiske bygget gå tapt.

Stråling gir skader to ulike måter. Ved **direkte effekt** opptrer skaden i det molekylet som absorberer strålingen. Ved **indirekte effekt** er det et annet molekyl (som regel vann) som absorberer strålingen – deretter vil vannradikalene som dannes "angripe" biologiske molekyler og forårsake en endring.



Strålevirkningen på en celle – som består av 70 % vann – kan være både direkte og indirekte.

- 1. Direkte.** Strålingen treffer direkte viktige molekyler som DNA.
- 2. Indirekte.** Strålingen lager vannradikaler H, OH og  $e^-$ , som i sin tur reagerer med DNA.

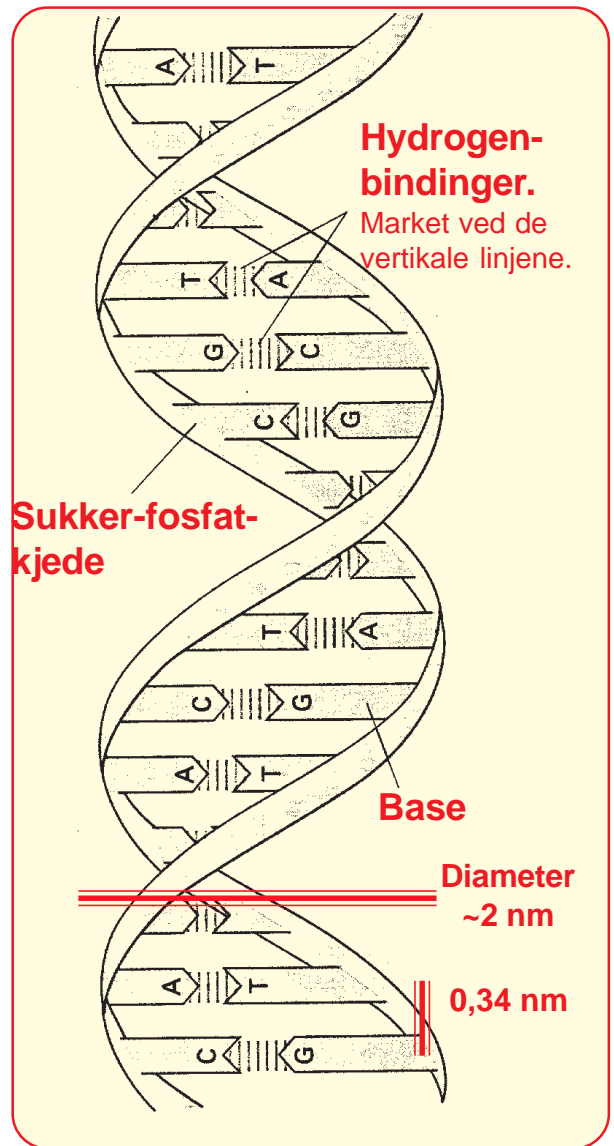
## DNA-molekylet

Alle celler hos planter, dyr og mennesker inneholder DNA. DNA er organismens databank som inneholder instruksene om cellers og organismers egenskaper. DNA-molekylet har form som en dobbeltspiral – en vindeltrapp der sidekantene er kjeder av sukker- og fosfat-molekyler. Hvert trinn består av to **baser** som er bundet sammen med hydrogenbindinger på midten (se figur 19). I hver omdreining av DNA-spiralen er det 10 basepar. Et basepar kan bestå enten av **adenin** og **thymin (A-T)** eller av **cytosin** og **guanin (C-G)**. Det er bare fire forskjellige baser som inngår. Sitter det en thymin på den ene siden, vet vi at det må være en adenin på den andre, og omvendt. Det samme gjelder paret cytosin-guanin. Diameteren i spiralen er ca. 2 nm, og avstanden mellom baseparene er 0,34 nm.

DNA i en menneskecelle har en samlet lengde på omtrent 2 meter. Det tilsvarer ca. 6 milliarder "trappetrinn" (basepar). Hos oss er den fordelt på 46 kromosomer. Et gen er en bit av DNA-tråden som inneholder nok informasjon til å lage et protein, f.eks. insulin, hemoglobin eller et enzym.

### Hvor er informasjonen ?

Det er rekkefølgen av baser langs DNA-spiralen som utgjør informasjonen om hvordan cellen er bygget opp og fungerer. Sekvensen av baser langs den ene sidekanten av spiralen kan "leses som en kodet melding" om hvordan proteinene, cellens arbeidere, skal bygges opp. Proteiner bygges av aminosyrer. Tre og tre baser koder for én bestemt aminosyre. F.eks. betyr baserekken C-A-G at aminosyren glutamin skal bygges inn i proteinet. Aminosyrene bindes sammen i lange kjeder til proteiner som sørger for at cellen får utført sine oppgaver.



Figur 19. DNA (**D**eoxyribo**N**ucleic **A**cid) består av to sukker-fosfat tråder bundet sammen av baseparene A-T og G-C. Trådene er komplementære – noe som er viktig for reparasjon.

### Strukturen av DNA-molekylet

Hvordan kan et molekyl som DNA sitte inne med all informasjon om en organisme? Hemmeligheten ligger i **strukturen** av molekylet. Derfor var det så viktig å få kjennskap til den tredimensjonale strukturen av DNA, og da Watson og Crick presenterte sin dobbeltspiralmodell i april 1953, kom vi et langt skritt frem mot en dypere forståelse av hvordan alt liv fungerer.



Nordmannen **Sven Furberg** (1920 - 1982) spilte en viktig rolle for å finne strukturen av DNA-molekylet. Det var hans dr. gradsarbeide fra 1951 som ga viktig informasjon. Furberg var professor i fysisk kjemi ved Universitetet i Oslo.



Formen på DNA-molekylet var lenge en gåte. Den ble løst av D.J. Watson og F.H. Crick i 1953 da de publiserte sin berømte modell av DNA-molekylet.

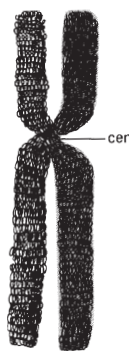
## Stråleskader på DNA

Siden DNA er så viktig skal vi se nærmere på skader i dette molekylet. En viss sekvens av basepar langs DNA-tråden utgjør et **gen**, og hvert gen koder for ett protein. Siden et proteinmolekyl består av 100 til noen hundre aminosyrer koblet sammen, vil et gen bestå av fra 300 til noen tusen basepar.

Hvis det blir en feil ved en base, enten den er forårsaket av kjemiske stoffer, stråling eller andre påvirkninger, blir informasjonen forstyrret, og det kan føre til at proteinet ikke blir korrekt. Noen ganger kan dette være avgjørende for en organisme – og føre til sykdom. Et eksempel på dette er sigdcelleanemi som er en fryktet sykdom i Afrika.

### Celledeling

Hver celle i kroppen har en kopi av hele "kommandosettet", det vil si at identiske DNA-molekyler finnes i alle celler. Før en celle kan dele seg, må den lage en kopi av hele DNA-molekylet, slik at de to dattercellene får hver sin komplette utgave av "kommandosettet".



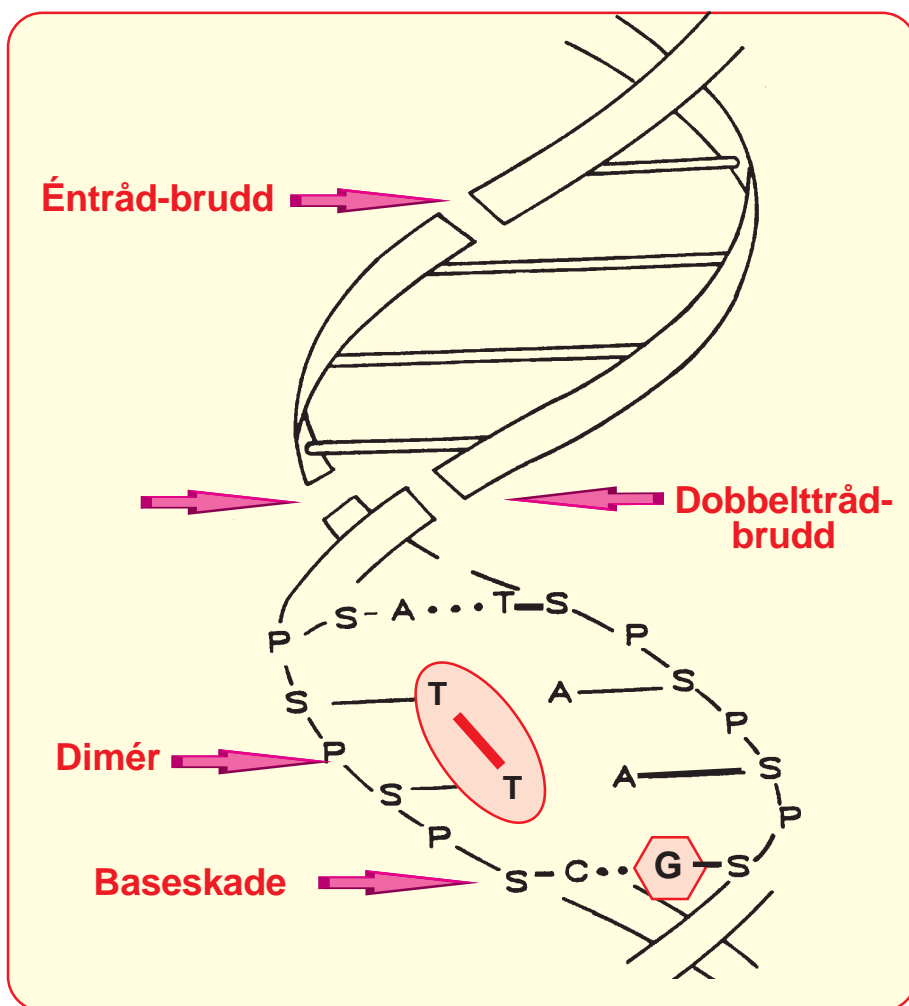
Ser vi i mikroskop på en celle som skal til å dele seg, kan vi se DNA som små, X-formede bunter, **kromosomene**. I en menneskecelle er det 44 "vanlige" kromosomer og 2 kjønnskromosomer.

Når cellen deler seg, overføres DNA til dattercellene. Derfor kalles DNA ofte **arvestoffet**.

Når kjønnscellene – eggcelle og sædcelle – smelter sammen, vil DNA fra både mor og far overføres til barnet. Alle mennesker har noe DNA fra faren og noe fra moren. Derfor har de fleste noen egenskaper som ligner mor og andre som ligner far.

Stråling kan føre til forandringer (skader) i DNA-molekylet. Det er nettopp slike skader – *som hvis de ikke fjernes* – kan gi kreft eller genetiske endringer. Før vi går nærmere inn på dette må vi nevne at en deler DNA-skadene inn i to grupper – avhengig av hvordan de oppstår. Det er **endogene skader** som forårsakes av de normale livsprosessene i cellene (f.eks. oksidative radikaler). Hver dag er det mange tusen entrådbrudd og ca. 8 dobbeltrådbrudd i en celle. Videre har vi **exogene skader** som skyldes ytre årsaker – det vil si stråling, og kjemiske stoffer. En dose på 1 Gy gir for eks. ca. 1000 entrådbrudd og 40 dobbeltrådbrudd.

I figur 20 er vist 4 hovedtyper av DNA-skader. De betegnes som; entrådbrudd, dobbeltrådbrudd, dimèr og baseskade (se neste side).



Figur 20. DNA-molekylet med fire hovedtyper av stråleskader. Det er entrådbrudd, dobbeltrådbrudd, dimerer og baseskader. Når flere skader oppstår nær hverandre, kalles det "clustered damage".

**1. Trådbrudd** eller «enkeltrådbrudd». Det er et brudd i sukker-fosfat-kjeden. Det dannes både av UV-stråling og av ioniserende stråling og av prosesser i cellene.

**2. Dobbeltrådbrudd.** Dette er en langt mer alvorlig skade og betyr brudd på begge trådene – enten rett overfor hverandre eller ganske nær. Denne typen skade er vanskeligere å reparere. Den dannes ikke av UV-stråling. Den er mer hyppig for  $\alpha$ -partikler i forhold til  $\gamma$ -stråling.

**3. Dimér** er en type skade der to trappetrinn (med pyrimidinbaser) i DNA bindes sammen. Den normale tilstand brytes ned – det vil si hydrogenbindingene endres,

og det dannes en binding mellom to trappetrinn. Det er flere typer dimerer (i figur 20 bindes to thyminnukleotider sammen til en T – T dimér). En kan også ha C – C dimører og C – T dimører.

Vi har eksperimenter (blant annet med fisk) som viser at ureparerte pyrimidindimører kan gi kreft. Vi mener også at UV-induserte dimører kan gi *ikke-melanom* hudkreft (dvs. ondartet føflekksvulst).

**4. Baseskade.** Det er flere typer av baseskader. Selve molekylet kan miste et atom eller en gruppe. Det kan også bindes til et atom eller en gruppe – og basen kan byttes ut med en annen.

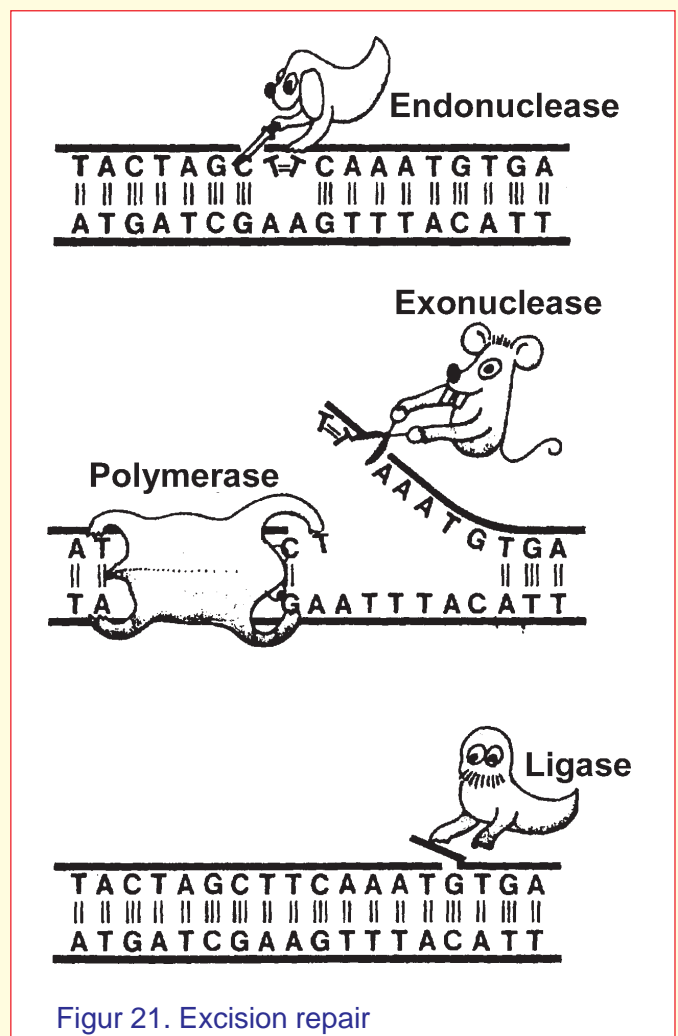
## Reparasjon av DNA-skader

Vi ville raskt gå tilgrunne hvis vi ikke hadde forsvarsmekanismer mot alle de skadene som dannes i DNA-molekylet hver dag i livet. Vi trenger et reparasjonssystem som reparerer skader like fort som de dannes. Vi trenger også systemer og kontrollmekanismer som kan «vrake» celler som er altfor skadet og derfor risikable å ha med seg videre (se senere).

Heldigvis viser det seg at vi har en rekke forsvarsmekanismer. Allerede i 1960 viste amerikanerne M.M. Elkind og B. Sutton ved National Institute of Health, at celler kan reparere stråleskader. Dette var et betydelig gjennombrudd, så la oss se nærmere på dette eksperimentet.

Elkind og Sutton bestrålte celler (fra en hamster) som vokste i kultur i et laboratorium. Først bestrålte de cellene med en stor stråledose og observerte hvor mange celler som overlevde. I et nytt eksperiment bestrålte de med en like stor dose, men delte den i to med en hvilepause på noen timer imellom. Resultatet var at flere celler overlevde. De tok dette eksperimentet som et bevis på at cellene hadde et reparasjonssystem som arbeidet i pausen mellom bestrålingene og som derved reddet en del celler fra døden.

Det er enzymer (proteiner) som er arbeiderne i cellenes reparasjonssystem. Vi kan beskrive flere typer av reparasjonsmekanismer – der en av de viktigste som kalles *excision repair* – er vist i figur 21. Tegningen er laget av prof. Gunnar Ahnstrøm ved Stokholm universitetet. Det er enzymer som oppdager DNA-skadene. Så kommer det til enzymer som klipper ut den skadde delen – og videre vil enzymet polymerase bygge inn nye baser. Tilslutt vil enzymet ligase skjøte det hele sammen igjen. Siden DNA-molekylet består av to komplementære tråder vil enzymet polymerase finne frem til de riktige byggesteinene



Figur 21. Excision repair

– og reparasjonen blir korrekt. Mer kompliserte skader der begge tråder er berørt (dobbeltrådbrudd) er det vanskeligere å reparere. Vi kan også merke oss at reparasjonssystemet svekkes med alderen, slik at antall ureparerte skader vil øke med alderen. Som vi vet øker også kreftforekomst med alderen.

# Strålebiologi – celler



I figur 18 er strålebiologien delt inn i tre deler. Biologidelen omfatter strålevirkninger på planter, dyr og mennesker. De er alle bygget opp av celler. De enkleste organismene (som f.eks. bakterier) består av én eneste celle, mens kompliserte skapninger som oss selv er bygget opp av milliarder av celler. I menneskekroppen finnes celler i en rekke varianter, fra de små, hvite blodlegemene på noen få mikrometer til de lange nervecellene på 1-2 m.

En celle er avgrenset mot omverdenen av en **membran** ("hinne"). Gjennom denne kan små molekyler – vann og næringsstoffer – passere. Menneske- og dyreceller har også en **cellekjerne**, som er avgrenset fra resten av cellen med en kjernemembran. I kjernen finner vi **DNA-molekyler**, som vi nettopp har diskutert.

Både i kjernen og i resten av cellen finnes en rekke ulike **proteiner** – store molekyler som er bygget opp av aminosyrer. De er cellens arbeidere. Proteinene utfører en rekke oppgaver i cellen – de gjenkjenner fremmedlegemer, behandler næringsstoffer, reparerer skader og mye mer.

I mange sammenhenger er det nyttig å studere enkeltcellers reaksjoner på stråling for å lære noe om hvordan stråling påvirker menneskekroppen. De fleste slike forsøk utføres på **cellekulturer** – det vil si celler som kan leve og formere seg i en liten flaske i laboratoriet. Tar man ut celler fra menneske- eller dyrevæv og dyrker dem i en flaske, vil cellene formere seg og trives gjennom en del celledgenerasjoner (typisk ca. 60), men så vil de etterhvert dø ut.

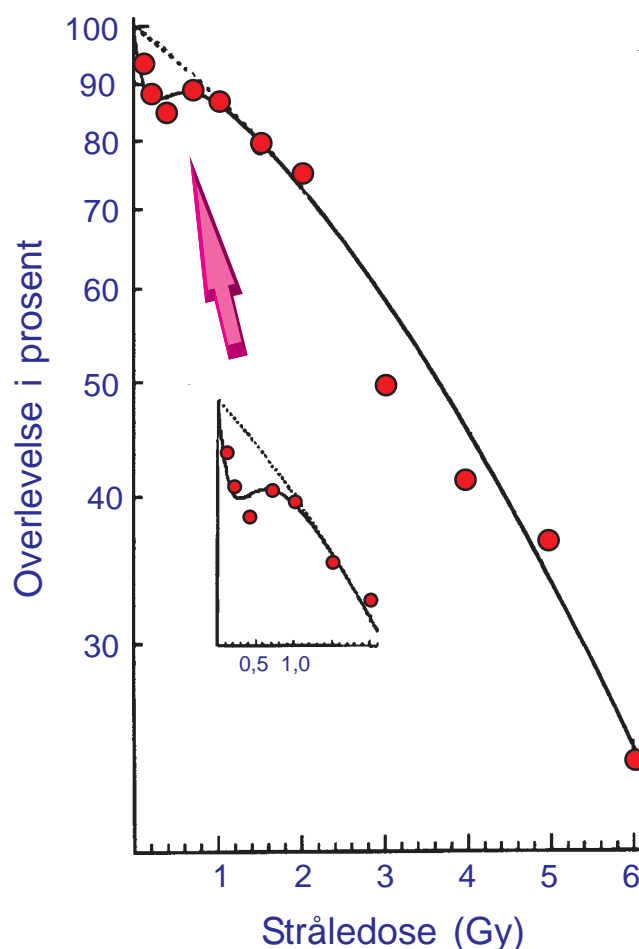
Teknikken med å dyrke celler i laboratoriet startet i 1956. Da klarte T. T. Puck og P. I. Marcus å dyrke celler fra en kreftsvulst hos en kvinne og celletypen er senere kjent som **HeLa celler**. De hadde fra det

øyeblikk et fantastisk fint verktøy i studiet av for eksempel virkningen av stråling på levende celler. De kunne studere overlevelse av celler etter røntgenbeståling.

For å få en såkalt **cellelinje** – en cellekultur som kan fortsette å deles i det uendelige – må det skje en mutasjon i en av cellene – en endring som gjør denne cellen og dens avkom skikket til å leve i næringsvæske i en plastflaske i stedet for i et organ i en levende kropp. Slike celler er altså litt ulike celler i kroppen, men de viktigste egenskapene og reaksjonene til cellene er bevart. Det er gjerne kreftceller som har slike egenskaper og som dyrkes i laboratoriet.

Vi kan nevne at vi har flere norske cellelinjer som er etablert på Radiumhospitalet – og som oppbevares i flytende nitrogen inntil en skal bruke de i eksperimenter.

Vi bruker cellekulturer i stråleforskningen. Det er et glimrende system – fordi en lett kan studere et stort antall celler (slik at en får god statistikk) – og vi har god kontroll på systemet. Den biologiske slutteffekt en studerer er gjerne celledød, men det kan også være andre.



Figur 22. Her er vist et eksempel på overlevelseskurve for bestrålte celler. Ofte vil en finne at det er noe ekstra ved små stråledoser – og vi har forstørret det i den lille figuren. Dette er ny og spennende forskning som omtales nærmere i teksten.

Vi klarer ikke å observere døde celler – men istedet kan en studere de som overlever. En kan gjennomføre et eksperiment ved å bestråle cellene og deretter inkubere de ved 37 °C slik at de får mulighet til å dele seg. En registrerer hvor mange av de opprinnelige cellene som har overlevd – for eksempel ved at de danner nye **kolonier**. Jo større stråledosen er, desto færre har dannet kolonier. Slike eksperimenter gir grunnlag for **overlevelseskurver** – som vist i figur 22.

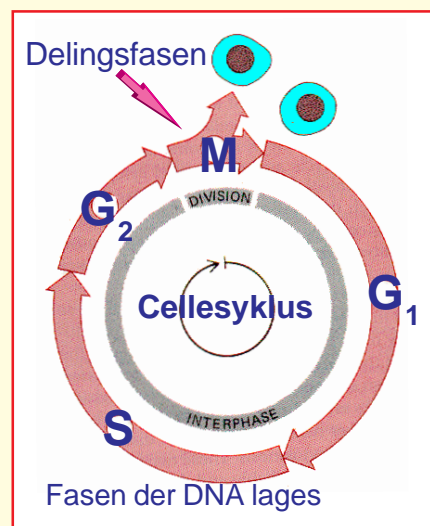
### Tolking av overlevelseskurver

I figur 22 er vist en overlevelseskurve. Ser vi bort fra startområdet (dose under ca. 1 Gy) følger denne kurven og andre tilsvarende stort sett en **eksponensialfunksjon** (skalaen langs y-aksen er logaritmisk – da er eksponensialfunksjonen en rett linje).

Som mål for cellenes strålefølsomhet kan vi bruke **D<sub>37</sub>-dosen**. Det er den dosen der 37 % av cellene overlever. Slike eksperimenter har vist at strålefølsomheten varierer fra en celletype til en annen. De viser også at kreftceller dør raskere enn normale celler – noe som gir grunnlag for strålebehandling av kreft.

### Cellesyklus

Vi vet at cellene har en livssyklus – de går gjennom ulike faser fra de dannes og til de igjen deler seg. Vi kaller disse fasene for **G<sub>1</sub>, S, G<sub>2</sub> og M**



(delingsfasen). Vi har metoder til å synkronisere cellene og således studere hvordan strålefølsomheten varierer gjennom cellesyklus. Det viser seg at de fleste celletyper er mest strålefølsomme i delingsfasen – mitosen.

### Nyere forskning

Forskning de siste 10 – 15 årene med cellekulturer har vist nye og spennende resultater. Vi har mange parametre vi kan endre – vi kan bestråle med røntgen, med partikkelstråling, radioaktive kilder – og vi kan endog til la cellene vokse i et miljø med radioaktivitet. Dette har gitt mange og overraskende resultater.

Vi kan ikke gå inn på den molekylære strålebiologi, men må dvele litt ved de resultater som er vist i figur 22. Ved de minste dosene – mindre enn ca. 0,5 Gy – er det en del celler som dør. Vi sier at vi har **hypersensitivitet**. Det viser seg at det er en rekke celletyper som viser hypersensitivitet. Det ser ut til at en liten stråledose trigger forsvarsmekanismene hos de fleste og de tåler mer stråling. Hos en del celler trigger en liten dose det innebygde selvmordssystemet apoptose og cellene dør. Dette vil vi si litt mer om.

### Apoptose

Apoptose er  
«The Dance of Cell Death»  
«For every cell, there is a time to live and a time to die»

Apoptose kalles også for «programmert celledød». Dette er en mekanisme som beskytter oss – fordi den fører til at hardt belastede celler ganske enkelt dør. Det er en fordel for en organisme om celler (som kanskje står på terskelen til å bli transformert til en kreftcelle) tas ut av systemet.

Apoptose ble oppdaget i 1972 av Andrew Wyllie og medarbeidere ved Universitetet i Edinburgh. Denne

celledødmekanismen forble relativt ukjent i hele 20 år. Det var først på begynnelsen av 1990-årene at forskningen omkring apoptose virkelig skjøt fart.

Apoptose er motstykket til mitose (celledeling) Når prosessen starter, danner cellen en kule – celledødmembranen bukler seg og danner blemmer. Enzymer (endonukleaser) klipper opp DNA-molekylet i mindre biter – biter på 180 trappetrinn.

Når cellen brytes ned i biter, vil tilstrekkelig membran dekke de toksiske (giftige) produktene og hindrer dermed inflammasjon (betennelse).

Vi mener at det finnes kontrollposter i cellesyklus som kontrollerer om cellen er skadefri eller ei. Hvis den er skadet vil den bli stoppet og få mulighet til å bli reparert. Men er skadene tilstrekkelig store, vil det være bedre for organismen om celledød programmet settes igang.

### Kontrollposter – p53

Cellenes mest elegante forsvarssjef er et gen som kalles p53 (eller Tp53). Genet lager et protein som kalles p53 fordi molekylvekten er 53 000 atomvektenheter. En frisk normal celle har et lite antall slike p53-proteiner – som til enhver tid er ute på kontroll.

Når det oppstår skader på DNA, vil p53-proteinet binde seg til en bestemt del av DNA-molekylet og stoppe cellen i sin livssyklus slik at den blir reparert. Men hvis skadene er store, vil vaktposten aktivere «selvmordsprogrammet» (apoptose).

Hvis vaktposten p53 ikke er på plass – eller hvis den er skadet – vil cellen kunne slippe forbi og derved føre til en mutasjon.

Proteinet p53 ble oppdaget i 1979 av David Lane i Skotland og Arnold Levine i USA. Tre år senere isolerte

en gen et som inneholder informasjonen til å lage p53. I 1989 oppdaget en at gen et var en *tumor killer*. Det førte til at et par tusen forskere kastet seg over studiet av dette molekylet som i 1993 ble kalt «*Molecule of the Year*». Mange tusen forskningsrapporter er til nå publisert om p53 og flere vil komme.

Hos mennesker er p53-genet knyttet til kromosom nr. 17. Genet er en DNA-bit som består av 2362 trappetrinn. Vi vet nå at i mer enn 60 prosent av krefttilfellene er det oppstått mutasjoner i p53-genet.

For å avslutte dette kan vi si at det er data som tyder på at den hypersensitivitet som er vist i figur 22 skyldes en p53-avhengig apoptose.

Mekanismer som hjelper oss:

1. Reparasjon
2. Apoptose
3. Adaptiv respons



## Adaptiv respons

Celleforskningen har flere overraskelser – og en av de er adaptiv respons. Det er vist at både reparasjonsprosesser og apoptose kan stimuleres av små stråledoser. Det betyr at cellenes forsvarsmekanismer mobiliseres.

I 1984 studerte G. Olivieri, J. Bodycote og S. Wolff i San Francisco lymfocytter (hvite blodlegemer) som ble dyrket i et medium der det var radioaktivitet. Den radioaktive isotopen tritium ble bygd inn i DNA-molekylet – noe som innebar at disse cellene levde med en kronisk ekstra bestråling. Cellene ble så bestrålt med en stor dose røntgenstråling (1,5 Gy) og mengden av kromosomskader ble bestemt.

Resultatet var overraskende og helt motsatt det en forventet. Antall kromosomskader var nemlig mindre der cellene ble utsatt for den kroniske bestrålingen først – sammenlignet med der de bare fikk den store røntgenstråledosen. Konklusjonen var at små stråledoser kan forberede cellene – det vil si stimulere forsvarsmekanismene.

Vi har etterhvert fått betydelige kunnskaper om adaptiv respons. Det er flere typer av biologisk effekt som kan påvirkes – for eksempel:

- Celledød
- Kromosomendringer
- Mutasjoner
- Transformasjon av en celle til en kreftcelle

Antall kromosomskader i lymfocytter kan reduseres med opp til 50 prosent. For å oppnå maksimal effekt må «den stimulerende stråledosen» (det kan være både UV-stråling og radioaktiv stråling) gis fire til seks timer før cellene utsettes for et «angrep» (for eksempel er stor stråledose).

Vi mener at den lille forhåndsdosen «trigger» dannelsen av enzymer som deltar i reparasjonsprosessene. Forskning har vist at små stråledoser kan stimulere immunsystemet hos mus og kan trigge dannelsen av proteiner som er viktige for å lage antistoffer.

Et meget interessant eksperiment ble gjort i 1998 av amerikanerne J.L. Redpath og R.G. Antoniono. De viste at små røntgenstråledoser kan hindre risikoceller (som vokser i kultur) i å bli transformert til kreftceller. Strålingen stimulerte apoptose og celledød fremfor å transformere cellene.

## Stråling og helse

La oss med en gang slå fast at helseeffekten av stråling er svært avhengig av **stråledosen**.

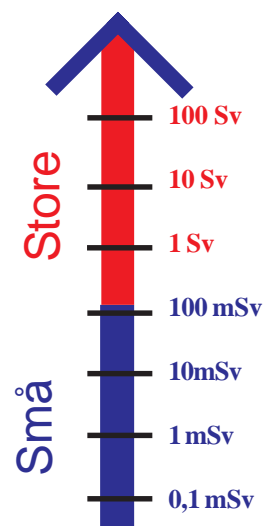
Store stråledoser (ca. 2 Gy pr. dag i 4 – 6 uker) brukes i medisin for å drepe kreftceller. Er de ennå større kan de gi akutt sykdom og død.

Det er meget tvilsomt om en kan påvise negative helseeffekter av små doser – slike som vi utsettes for i dagliglivet eller ved røntgendiagnostikk. Dette skal vi se nærmere på .

Stråledosen er alfa og omega !



Se om stråledoser på side 10, og hvordan sammenhengen er mellom doser i Gy og i Sv.



# Store stråledoser og helse

Det er svært sjelden at mennesker blir utsatt for store stråledoser. Det kan skje ved ulykker, som i Tsjernobyl der 28 mennesker døde etter en akutt stråledose. Vi har hatt ett strålingsdødsfall i Norge etter en ulykke med en sterk Co-60 kilde. Da var kroppsdosen ca. 22 Sv.

Store doser brukes i strålebehandling av kreft. Men da er det bare en svært begrenset del av kroppen (omkring kreftsvulsten) som bestråles, så dette er ikke livstruende.

Hvilke stråledoser kan et menneske overleve? Dette vet vi ikke nøyaktig. Dyreeksperimenter kan imidlertid gi en pekepinn. Man har utsatt dyr, f.eks. rotter, for store stråledoser og sett hvor mange som overlevde et visst antall dager etter bestrålingen. Det viser seg at ulike dyrearter har ulik strålefølsomhet. Som mål for følsomheten brukes ofte **LD<sub>50</sub>-dosen** (LD står for "lethal dose", dvs dødelig dose).

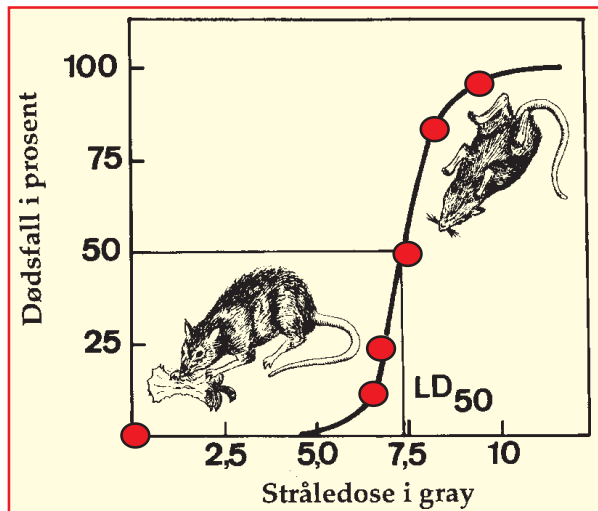
**LD<sub>50</sub>-dosen er den dosen som 50 % av de bestrålte individene overlever.**

LD<sub>50</sub>-doser for en rekke dyrearter er gitt i tabellen under. For mennesker antar man at LD<sub>50</sub>-verdien ligger mellom 3 og 5 Gy. Men undersøkelser av de som ryddet opp ved den ødelagte reaktoren i Tsjernobyl, kan tyde på at LD<sub>50</sub>-dosen er betydelig høyere (kanskje 6-8 Gy?). Det avhenger blant annet av dosehastigheten (hvor fort

## LD<sub>50</sub>-doser

### Dyreslag Dose i Gy

|           |       |
|-----------|-------|
| Hund      | 3,5   |
| Ape       | 6     |
| Rotte     | 7,5   |
| Frosk     | 7     |
| Hare      | 8     |
| Skilpadde | 15    |
| Gullfisk  | 23    |
| Menneske  | 3 - 5 |



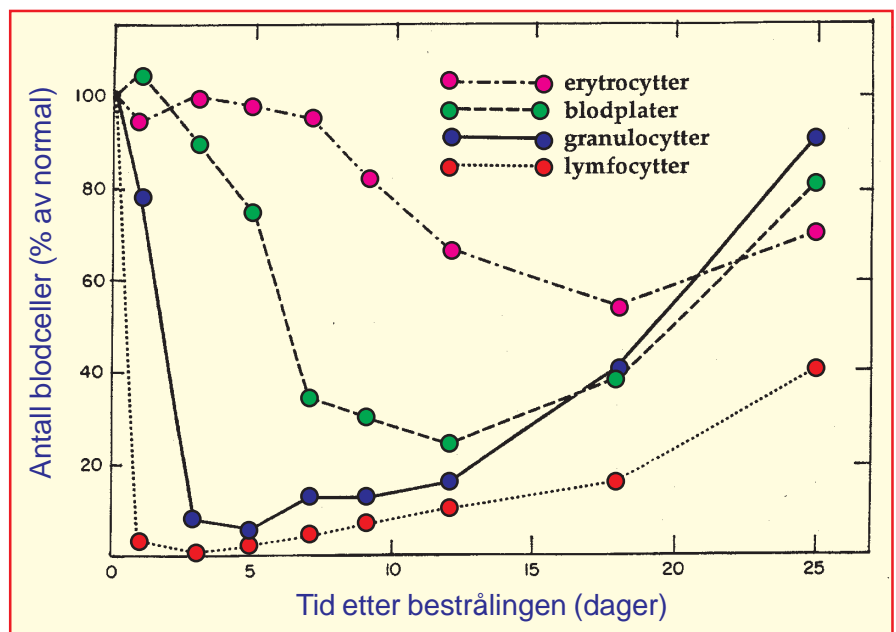
Figur 23. Her er vist et eksperiment for å bestemme LD<sub>50</sub>-dosen for rotter. Seks grupper med 15 rotter i hver ble bestrålt med dosene du ser i figuren. Etter 30 dager ble det undersøkt hvor mange som levde i hver gruppe. Prosent døde er gitt i figuren. Du ser at gruppen der 50 % døde, har fått en dose på 7,5 Gy.

dosen blir gitt). En del encellede organismer kan overleve stråledoser på flere tusen Gy.

Hva er det som gjør at en stråledose medfører døden? Ved store doser kan en stor andel av cellene i viktige organer dø, slik at organene ikke kan utføre sine normale oppgaver. **Beinmargen** reagerer først på en bestråling. Hvis mange av cellene i beinmargen dør, vil produksjonen av blodlegemer og blodplater synke, og immunsystemet svikter. Pasienten får

infeksjoner og blødninger. Er dosen mindre enn LD<sub>50</sub> (3-5 Gy), er det sjans for at beinmargen kan gjenoppta produksjonen av blodlegemer og pasienten kan overleve.

Ved svært store doser (10 - 100 Gy) har den bestrålte minimal sjans til å overleve. Cellene i **magen og tarmene** dør, og pasienten får oppkast og diaré. Er dosene over 100 Gy, skades celler og blodårer i hjernen, og pasienten dør etter få timer.



Figur 24. Her ser du et typisk eksempel på hvordan tallet på blodceller forandrer seg etter en akutt stråledose til hele kroppen. I eksperimentet er det brukt rotter som har fått en dose på 1,5 Gy. Her overlever rottene, og antall blodceller blir igjen normalt etter 3 - 4 uker.



# Små stråledoser og helse

Akutte stråleskader oppstår ved store doser. Skadene kommer av at mange celler dør, slik at det blir vanskelig for kroppen å opprettholde sine funksjoner. Det er ikke vanskelig å måle effektene av store doser. Vi kan gjøre eksperimenter på molekylnivå (DNA), med celler som vokser i kultur, eller med dyr.

Når stråledosene er mindre, vil også effektene bli mindre og vanskeligere å måle. Skader som mutasjoner og kreft kan forårsakes av en rekke påvirkninger i tillegg til stråling, og når stråledosene er små, drukner skadene som strålingen lager i et hav av skader som har andre årsaker.

Vi skal nå diskutere små stråledoser og helse, i første rekke kreft. En modell for hvordan vi tror kreft utvikler seg er vist på neste side. For å kunne si noe om kreftrisiko i forbindelse med stråling er den såkalte **dose-effekt-kurven** viktig. *Formen på dose-effekt-kurven er avgjørende for alle risikoberegninger.*

Bakgrunnstrålingen gjør at vi alle befinner oss et sted på dose-effekt-kurven. Hvis vi kjente kurveformen kunne vi straks se betydningen av en ekstradose.

## Hvordan få informasjon om dose-effekt-kurven?

### 1. Eksperimenter og observasjoner

Vi kan gjøre eksperimenter med dyr eller gjennomføre *epidemiologiske studier* – det betyr studier av helsen, spesielt kreftforekomst, til grupper av mennesker som er blitt utsatt for stråling.

### 2. Teoretiske modeller og forskning på mekanismer

Hvis vi antar at stråleindusert kreft skyldes en enkelt, tilfeldig begivenhet som f. eks. en ionisasjon, vil dose-effekt-kurven bli lineær og uten terskel (kurve 1-LNT i figur 26). Hvis derimot stråling kan trigge andre prosesser som er doseavhengige (stimulering av reparasjonsprosesser og apoptose), vil den lineære kurven *ikke* være korrekt.

Vi skal se litt på resultater fra studier av stråling og kreft med begge typer metoder.

## 1. Eksperimenter og observasjoner

### Dyreeksperimenter

Mye av det vi vet om stråling og kreft bygger på dyreforsøk, gjerne med rotter og mus. Dyrene bestråles med relativt store doser, og antall krefttilfeller som oppstår blir

1. En liten stråledose, slik vi alle utsettes for (2 - 50 mSv i løpet av et år), vil **aldri** gi akutte stråleskader.

2. Helsekadene det kan være snakk om etter moderate stråledoser, er **kreft**. Genetiske skader opptrer i langt mindre grad. Det oppstår **ikke** hjertesykdommer o.l. Derimot har vi sett etter Tsjernobyl at det har oppstått en rekke psykiske problemer som **ikke** er direkte forårsaket av strålingen, men av angst og usikkerhet i forbindelse med stråling.

3. For at det skal oppstå kreft må en celle transformeres fra en normal celle til en kreftcelle. Det betyr at det må skje en **mutasjon**.

4. En skadet celle kan unngå en transformasjon hvis skaden repareres eller cellen dør. **En død celle kan ikke utvikle seg til en kreftcelle.**

5. Det helt avgjørende for en analyse av helseeffekter er formen på dose-effekt-kurven.



registrert. Eksperimentene omfatter både helkroppsbestråling og lokal bestråling av bestemte organer.

Gir man dyrene mindre stråledoser, er det vanskelig å fange opp de "ekstra" tilfellene av kreft som skyldes strålingen. Dette kan til en viss grad kompenseres ved å øke antall forsøksdyr, men når en kommer ned til virkelig små doser (det vil si fra en årlig dose på noen få mGy til en akutt dose på ca. 50 mGy), må antallet økes så kraftig at eksperimenter blir umulig.



*Det har gått med mange mus i forskningens tjeneste. Det største enkeltforsøk vi kjenner til ble gjennomført i USA for å studere genetiske følger av stråling. Da ble det tilsammen brukt omkring 7 millioner mus.*

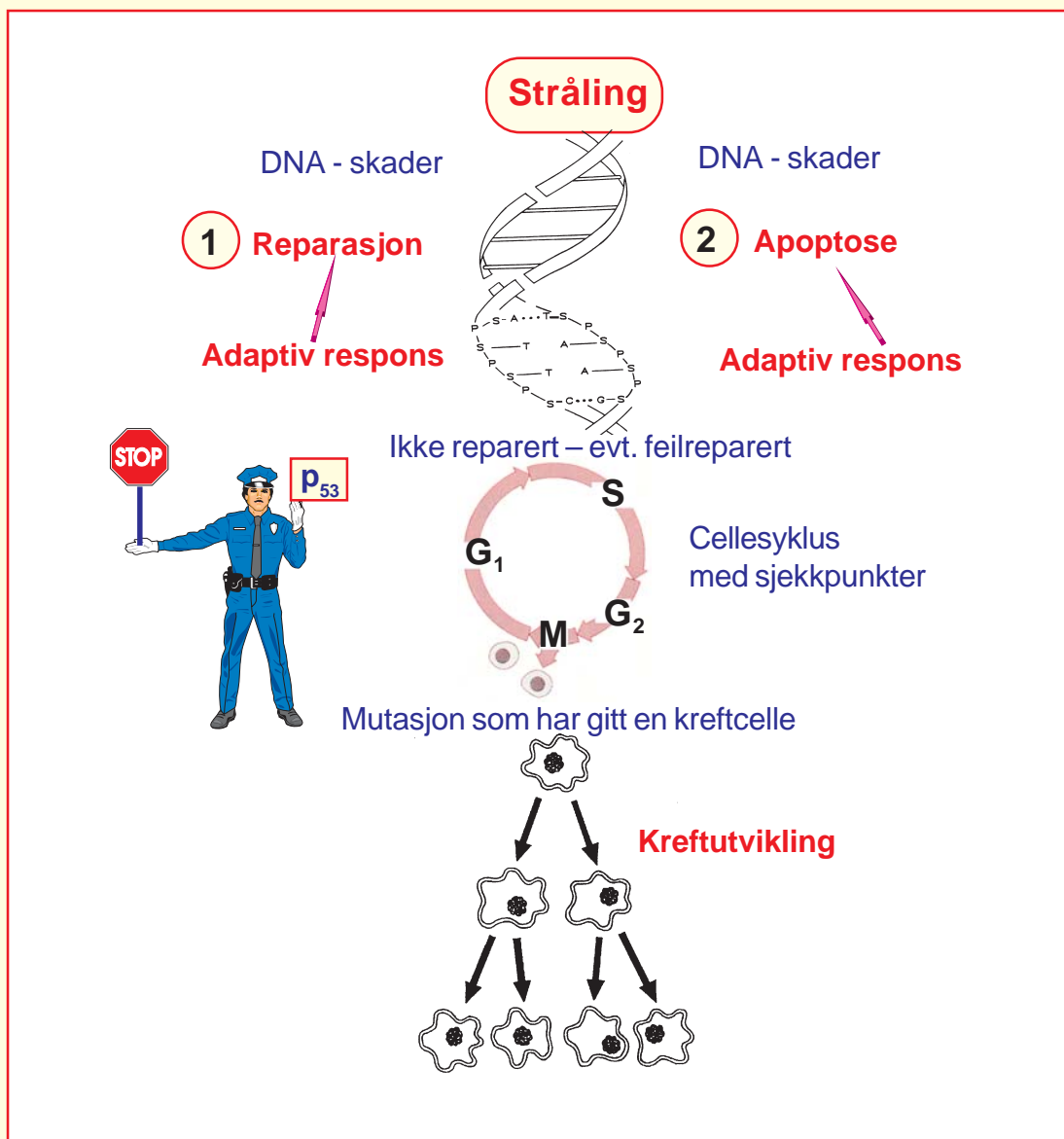
# Mekanismen for kreftutvikling

Mekanismene for utvikling av kreft er kompliserte og mangfoldige. Vi vet en del, men det gjenstår betydelig forskning før vi forstår hvordan kreft oppstår. Dette hindrer oss ikke fra å beskrive noen av hovedtrekkene i kreftutviklingen slik vi kjenner dem i dag.

Hovedveien når det gjelder kreftutvikling er vist i figur 25. Det oppstår skader i DNA som ikke blir reparert og/eller feilreparert. Kontrollmekanismene (her representert ved p53-posten) er satt ut av spill og en normal celle i kroppen transformeres til en kreftcelle (det er en somatisk mutasjon). Nå ligger veien åpen for en kreftutvikling. Den transformerte

cellen deler seg, og vi har to kreftceller. Videre utvikler det seg til 4 – 8 – 16 – osv. Etter 20 slike delinger vil det være ca. én million kreftceller. Samlet i en liten svulst er den så stor som en liten ert – og først da klarer vi å oppdage den. Hvis den får mulighet til å utvikle seg videre, vil den etter omkring 10 nye delinger være så stor at den medfører døden.

Et svært viktig trinn i utviklingen av mange kreftformer er når celler fra primærsvulsten river seg løs og fraktes til andre steder i kroppen (vi sier at den *metastaserer*). Da blir straks mulighetene til helbredelse atskillig dårligere.



Figur 25. Denne figuren kan vi ha for oss når vi diskuterer kreftutvikling etter ståling og kanskje også etter andre årsaker som kjemiske stoffer (karsinogener). Skissen er laget med hensyn til stråleindusert kreftutvikling. Den viser at DNA-skader er utgangspunktet. Vi har forsvarsmekanismer som reparasjon (merket 1), apoptose (merket 2) og ikke minst har vi adaptiv respons som kan trigge forsvarsmekanismene. Dosehastighet er viktig fordi store dosehastigheter kan lamme forsvarsmekanismene. Se tekst når det gjelder de forskjellige ord og mekanismer.

# Dose-effektkurve for stråleindusert kreft

Vi nevnte på side 39 at kunnskap om dose-effektkurven for stråleindusert kreft er avgjørende for alle risikoberegninger – og den er utgangspunktet for strålevern både her hjemme og internasjonalt. La oss se litt på forskning som kan gi informasjon om dose-effekt kurven.

## Epidemiologi

Innen epidemiologi studerer man en folkegruppe som er blitt bestrålt utover bakgrunnstrålingen og sammenligner kreftforekomst eller andre skader hos denne gruppen med forekomsten hos en tilsvarende gruppe som *ikke* har fått ekstradoser. En rekke mennesker har fått større stråledoser enn gjennomsnittet, enten gjennom sitt arbeid eller på annen måte. Det kan være gruvearbeidere, slike som har fått mange røntgendoser i forbindelse med tuberkulose (pasientene ble gjennomlyst regelmessig i årevis). Men den aller viktigste gruppen er de som ble bestrålt og som overlevde bombene i Hiroshima og Nagasaki i august 1945.

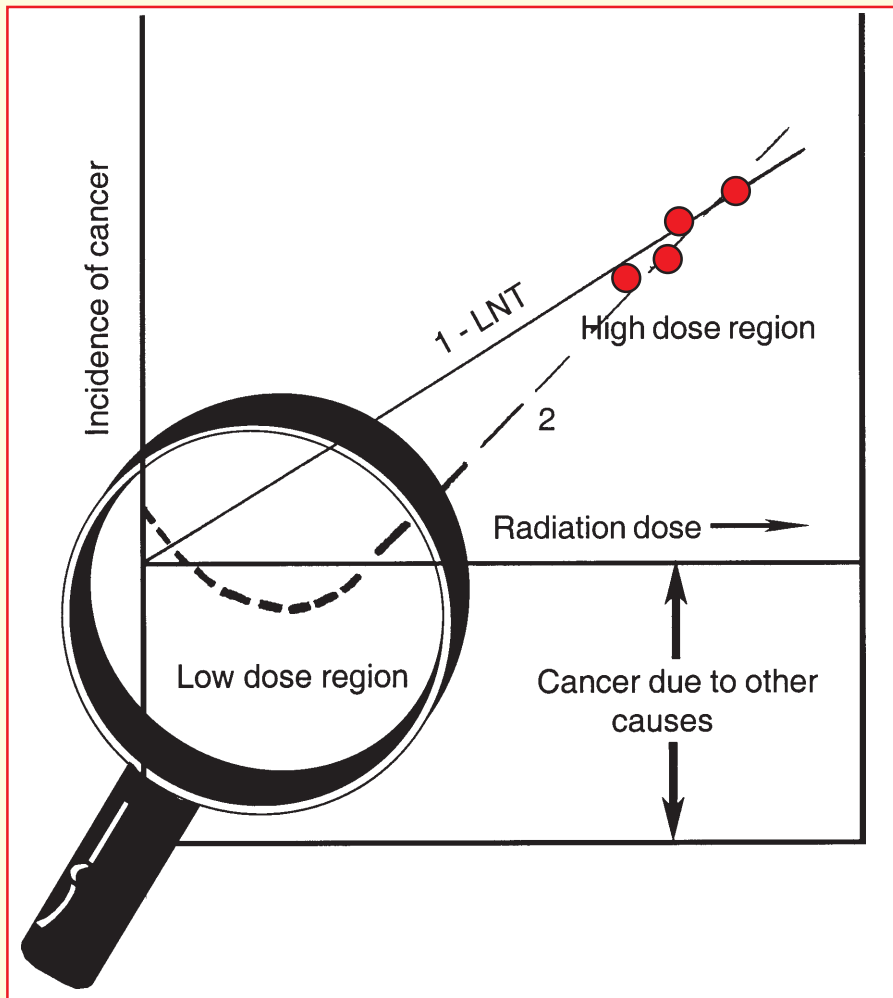
## Hiroshima and Nagasaki

En mener at det var ca. 429 000 mennesker som levde i de to byene i august 1945. Bombene drepte ca. 67 000 den første dagen og omtrent 36 000 de følgende 4 månedene. I 1950 var det ca. 283 000 mennesker som hevdet at de hadde blitt bestrålt på grunn av bombene. Middeldosen er beregnet til ca. 160 mSv og er en blanding av  $\gamma$ -stråling og nøytroner.

I perioden 1950 – 1978 døde 67 000 av disse. En fant at ca. 530 kreftdødsfall kunne tilbakeføres til stråling de fikk i 1945. Av disse var det 190 med leukemi og resten andre kreftformer (faste svulster). I senere studier øker forholdet mellom faste svulster og leukemi – noe som viser at "latenstiden" for faste svulster er større enn for leukemi.

## Doseberegninger

La oss se litt på alt det arbeid en har hatt med å bestemme stråledosene hver enkelt fikk fra bombene. La oss da si at vi har liten eller ingen informasjon om de doser disse bombeofrene har fått etter 1945. Den er i snitt omkring 200 mSv – og det er betydelig variasjon fra en person til den neste.



Figur 26. Dette er en figur som viser et par dose-effekt kurver for stråleindusert kreft. Vi må peke på at vi kun kan få eksperimentelt grunnlag for kurvens form ved store doser; det vil si akutte doser over 200 mSv. For mindre doser har vi ingen data som viser noen øking i kreftforekomst. Dette området ligger under lupen på figuren.

Kurven som er merket 1-LNT (det står for "Linear No Threshold") er rettlinjert og har ingen terskel (den begynner å stige ved nullpunktet). Kurve 2 er en annen mulighet (riktignok et ytterpunkt). Andre mulige kurver ligger mellom disse ytterpunktene. Hvis den U-formede kurven går under basislinjen sier vi at vi har en «hormetisk» effekt. Det ville bety at litt stråling er positivt. Punktene er tenkte eksperimentelle verdier og kurvene må være tilpasset disse i høydose-området.

Mange forskere har i mange år arbeidet med å bestemme doser til de som ble bestrålt. Dette blir stort sett beregninger, fordi en har ingen direkte målinger. Det er publisert doseberegninger i 1966, 1981 og 1986.

Arbeidet er vanskelig fordi det er en blanding av  $\gamma$ -stråling og nøytroner. Nøytroner absorberes av vann og luftfuktigheten spiller da en rolle.

## The life span study cohort

I doseberegninger og medisinsk konsentrerte en seg om en gruppe på ca. 85 000 som en har fulgt opp i alle år fra 1945 – og som en fortsatt vil følge frem til 2015 (en periode på 70 år).

Doser ble beregnet for alle i denne gruppen og de ble så delt inn i doseområder som; 0 –10 mSv, 10 – 20 mSv, osv til en gruppe med over 4 Sv. Mer enn halvparten ble plassert i gruppen 0 – 10 mSv og denne gruppen ble så brukt som referanseverdi med relativ risiko 1,0. En tok som nevnt ikke med bakgrunnstrålingen, hverken før eller etter bombene. Resultatet, slik det er på midten av 1990-tallet er vist i figur 27. Siden en ikke har med den akkumulerte bakgrunnsdose må en være svært forsiktig med doseområdet under 200 mSv.

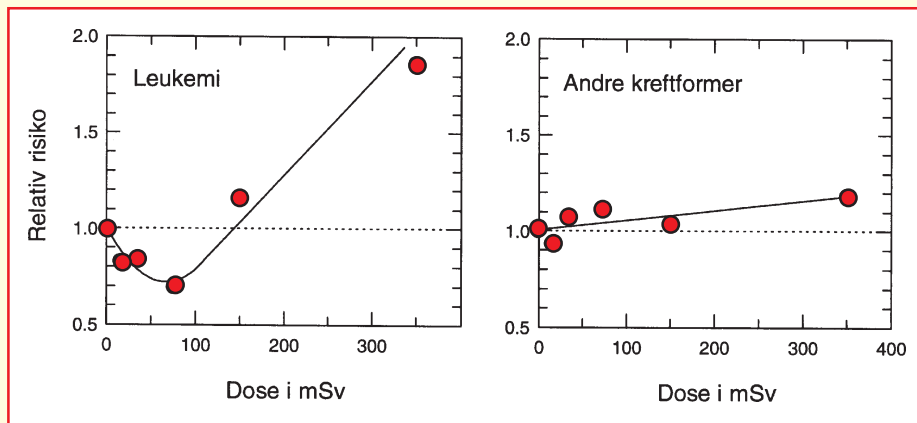
Som vi ser er kurven for leukemi U-formet – den viser sogar beskyttelse for et doseområde opp til 150 mSv. Kurven for faste svulster derimot er mer i tråd med en rett linje – som imidlertid ikke stemmer når vi inkluderer høydosedata.

Bombedata er sett på som selve grunnpilaren i alle risikoanalyser. For akutte doser over ca. 0,5 Sv kan de kanskje brukes, men for små doser (i størrelse lik de vi alle får og opp til 100 mSv akutt) er de ubrukelige.

Vi har også andre grupper som har fått større stråledoser enn andre. I Kina er det områder (Yangjiang-provinsen) der bakgrunnstrålingen er mer enn tre ganger så stor som i andre områder. Det viser seg at kreftrisikoen er minst i områder med størst bakgrunnstråling.

I tillegg til slike epidemiologiske studier har vi en rekke dyre-eksperimenter. Til tross for dette blir konklusjonen.

Epidemiologiske data og dyreforsøk har til nå ikke gitt oss tilstrekkelig informasjon om dose-effekt kurven ved små doser.



Figur 27. Figuren viser relativ risiko for stråleindusert kreftdød etter bombene i Japan i 1945. Doseberegningene er fra 1986 og gjelder "the life span study cohort". Dosen som er angitt er den **akutte** ekstradosen man antar at de fikk i 1945. Stråledoser før og senere er ikke tatt hensyn til. Det er bare lavdoseområdet – opp til 300 – 400 mSv som er vist. For høyere doser øker kurver for faste svulster mer enn det som vises her.

## Kan studier av mekanismer gi svaret ?

Vi har i figur 25 diskutert en mekanisme for kreftutvikling. Vi har også gått gjennom en del av den nyere forskningen på celler i kultur og omtalt en del av forsvarsverkene som vi rår over. Dette har gitt oss masse kunnskap om de basale prosesser ved kreftutvikling. Vi vet likevel ikke om det er noen terskelverdi og vi kjenner ikke formen på dose-effekt kurven for doser under ca. 100 mSv. Det vi kan si er at: *dose-effekt kurven for stråleindusert kreft er ikke lineær – det vil si en rett linje – fra høydoseområdet ned til de doser vi møter i dagliglivet.* Vi vet at både reparasjonsprosesser og apoptose stimuleres (trigges) av små stråledoser – noe som gjør at LNT-modellen ikke kan være riktig.

Vi lever i et hav av stråling. Middelerdien for verdens befolkningen er 2,5 mSv per år fra bakgrunnstrålingen. I tillegg kommer stråledosen fra medisinsk bruk. For Skandinavia er derfor gjennomsnittsdosen ca. 3,8 mSv i året. Det er mennesker som får ti ganger større stråledose, fordi de lever i områder med høy bakgrunnstråling eller fordi de får større doser i forbindelse med arbeid (gruvearbeidere, flypersonell, "radiation workers"). Mange har til nå vært bekymret for helseeffektene av disse små stråledosene. Kanskje burde vi istedet være glade for små stråledoser som kan trigge våre forsvarsmekanismer og fjerne celler som er belastet og som ellers kunne gi kreft.

Som vi vet svekkes immunforsvaret med alderen. Det gjør også andre forsvarssystemer. Det er derfor naturlig at kreft i første rekke er en sykdom for eldre.

## Forskning på Blindern

Stråleforskningen står i fokus på Blindern. Vi forsker på DNA-skader – og vi studerer stråleeffekter på celler i kultur.



# Stråling – risiko – strålevern

## LNT-modellen

Den internasjonale strålevernkomité ICRP (International Commission on Radiological Protection) ble etablert i forbindelse med en internasjonal kongress i Stockholm i 1928. ICRP gir retningslinjer for strålevern som i sin tur blir fulgt av de fleste land som har opprettet et strålevern. ICRP er – og skal også være – konservative med hensyn til sine anbefalinger.

ICRP har helt fra 1950-årene hevdet prinsippet om en LNT (linear with no threshold) dose-effekt kurve for å beregne helseeffekter. Argumentene for dette er: *Selv den minste dose kan gi skader som ikke blir reparert eller de blir feilreparert. Reparasjon av komplekse DNA-skader som kan forårsakes av stråling («clustered damage») er vanskeligere å reparere enn endogene skader.*

Gradvis har den opprinnelige hypotesen for noen blitt et dogme.

Argumentene imot LNT er følgende: *Reparasjonsprosessene avhenger av dose og dose-hastighet. For små doser vil en kombinasjon av reparasjon og apoptose eliminere de aller fleste, om ikke alle, skader. Videre vil adaptiv respons trigge forsvarsmekanismene og således gi muligheter for å eliminere skadde celler som ellers ville være en risiko for kreftutvikling. En død celle kan ikke gi kreft.*

Vi skal ikke fortsette dette, men kan slå fast at diskusjonen fortsatt er livlig – særlig når det gjelder en nedre terskel. I den sammenheng kan vi slå fast at vi har ingen data som tyder på noen øking i kreftrisiko for doser under 100 mSv. Dette burde kanskje gi oss holdepunkter for hvordan vi kan utøve strålevern for doser som vi utsettes for på grunn av bakgrunnstråling, medisinsk bruk av stråling og stråling i forbindelse med avfallsdeponier og ulykker som den i Tsjernobyl.

## Konsekvenser av LNT

ICRP og Statens strålevern har brukt LNT-hypotesen for å beregne helserisiko ved små stråledoser. Hvis du ser på den rette linjen i figur 26 ser du at hvis vi kan finne fram til et eneste punkt på kurven (f.eks. for en høy dose), så kan vi trekke en rett linje fra dette punktet gjennom origo. Dermed har vi fått en risikoverdi som kan brukes for alle doser, også de aller minste.



ICRP har flere ganger forsøkt å angi en risikoverdi for stråleindusert kreftdød. Den har variert fra  $6 \cdot 10^{-3}$  til  $50 \cdot 10^{-3}$  pr. Sv. Den høyeste verdien blir gjerne brukt.

## Kollektiv dose

Kollektiv dose er definert som summen av de individuelle doser til en gruppe mennesker. Det er det samme som gjennomsnittsdosen multiplisert med antall mennesker. *Begrepet kan kun brukes i risikoanalyser hvis dose-effekt-kurven virkelig er lineær og uten terskel (1-LNT).* Da vil det være det samme (målt i antall kreftdødsfall) om 20 mennesker hver får en dose på 1 Sv eller 2000 mennesker får en dose på 10 mSv. Den kollektive dose er 20 Sv i begge tilfeller. Anvender vi da ICRPs risikofaktor på  $50 \cdot 10^{-3}$  pr. Sv – gir det 1 kreftdødsfall til flokken – enten den består av 20 eller 2000 mennesker.

Et annet regnestykke som virker skremmende er følgende: På grunn av medisinsk bruk av stråling i Norge (røntgendiagnostikk og terapi) får vi en gjennomsnittlig årsdose på 0,6 mSv (nye beregninger tyder på ca. 1,0 mSv). For Norges befolkning på 4,4 millioner betyr det en kollektivdose på 2 640 Sv. Bruker vi risikofaktoren ovenfor, betyr det at 132 nordmenn mister livet hvert år på grunn av denne bruken av stråling!

La oss slå fast at dette er misforståtte regnekunster – som desverre er brukt i flere sammenhenger i forbindelse med radonforekomst i boliger og i forbindelse med Tsjernobyl-ulykken. De har sitt utgangspunkt i LNT-hypotesen med linearitet uten terskel. For alle andre og mer reelle kurveformer (figur 26) kan vi **ikke** bruke begrepet "kollektiv dose". Det er en forskjell i risiko for store og små doser – fordi dose-effekt kurven ikke er lineær over hele doseområdet. Hvis det i tillegg er en terskel eller eventuelt en hormetisk effekt blir slike regneøvelser verdiløse – forvillende og skremmende.

## Positiv helseeffekt ?

Vi kan ikke utelukke at små stråledoser kan ha en positiv helseeffekt. Hovedargumentet for det er adaptiv resons. Små stråledoser trigger våre forsvarsmekanismer. La oss kort nevne et eksempel som viser at små doser kan være positive.

En fransk gruppe som studerte veksten av "*Paramecium*" (det er encellede dyr som lever i vann – også kjent som "tøffeldyr"). De fant følgende:

1. Celleveksten ble *reduisert* når tøffeldyrene vokste i et blykammer med 5 til 10 cm tykke vegger som reduserte bakgrunnstrålingen langt under normalnivå.
2. Neste trinn i eksperimentet var å føre en radioaktiv kilde inn i blykammeret slik at strålenivået ble likt bakgrunnstrålingen. Resultatet var at veksten økte og ble normal igjen.

## ALARA

I strålevernarbeid har man et prinsipp med hensyn til tiltak mot uønskede stråledoser – det såkalte ALARA-prinsippet. Det sier at stråledosen skal være så liten som praktisk mulig, "*As Low As Reasonably Achievable*". Ordet "reasonably" er en nøkkel i alle "kost-nytte" analyser ved bruk av stråling. Det kan bety at vi skal holde stråledosene så lave som mulig, men ikke for enhver pris. Det er således ikke "reasonable" å sette inn tiltak etter Tsjernobyl til en pris av over 500 millioner kroner for å redusere en stråledose som akkumulert over 50 år er ca. 2 mSv for en gjennomsnittsnordmann. Slike tiltak har ført til en redsel for stråling som er en enda større belastning for befolkningen enn den økonomiske.

## Stråling og genetiske effekter

Mutasjoner i kjønnscellene hos et individ kan gi endrede egenskaper hos avkommet. Slike **genetiske effekter** var tidligere blant de mest fryktede konsekvensene av stråling. I dag vet vi mer og har et mer nøkternt syn på stråleinduserte genetiske effekter.

Mutasjoner i kjønnscellene kan studeres på molekylplan, f.eks. ved å se etter endringer i basesekvensen i DNA. I dag finnes det en rekke avanserte forskningsmetoder for å studere baserekkefølgen i DNA. Men i jakten på mutasjoner kan vi også studere hele organismer og undersøke om eventuelle genetiske mutasjoner har ført til endrede egenskaper i neste generasjon.

Man har utført slike forsøk på dyr - bl.a. mus og bananfluer - og fått en del nyttig informasjon om strålingens evne til å danne mutasjoner. Det var *Herman J. Müller* som i 1927 viste at røntgenstråling kunne gi genetiske forandringer i bananfluer (*Drosophila melanogaster*). De endringer han observerte var slike han kunne se direkte, som øyefarge, krøllete vinger etc. Du kan se en slik forandring til høyre.

I forsøkene med mus viste det seg bl. a. at hannmus var mer følsomme enn

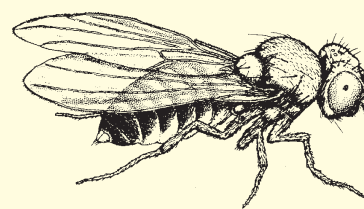
hunnmus. Videre fant man at hvis det gikk en del tid mellom bestråling og parring, ble det observert langt færre mutasjoner hos avkommet. Dyreforsøkene har gitt informasjon om hvordan stråling kan øke mutasjonsfrekvensen. Et forskningsmål har vært å finne dosen som skal til for å øke mutasjonsfrekvensen til det dobbelte. En trodde tidligere at denne dosen var omkring 200 mSv, men idag mener vi den er omkring 2 til 4 Sv. Vi kan derfor ikke forvente å finne noen genetiske effekter hos større befolkningsgrupper etter atomulykker som Tsjernobyl, der ekstradosene var i mSv-området. Man har heller ikke registrert noen genetiske mutasjoner hos dem som ble utsatt for stråling fra atombombene over Japan i 1945.

Selv om vi ikke har observert genetiske effekter hos mennesker, viser dyreforsøk med store doser at stråleinduserte mutasjoner forekommer. Med bedre metoder og større materiale (flere eksponerte mennesker) kunne vi kanskje observere slike effekter.

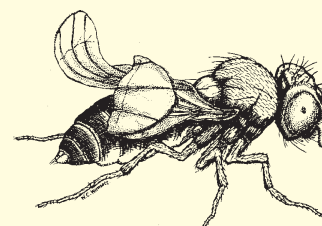
**Genetiske effekter er hittil ikke påvist hos mennesker. Dyreforsøk tyder på at dosene må være betydelige for at slike effekter skal kunne påvises.**



Herman J. Müller



*Bananfluene er små, og man må bruke lupe for å se detaljene på hver enkelt flue. Her ser du øverst en normal bananflue og nedenfor en med krøllete vinger.*



# Energi i atomkjernen

I midten av 30-åra var det flere forskere som studerte hva som skjedde når de bombarderte atomkjerner med nøytroner eller alfapartikler. I 1934 oppdaget Irene og Frederic Joliot-Curie at de på denne måten kunne lage radioaktive isotoper: Ved å bombardere Al-27 med alfapartikler lages isotopen P-30 pluss et nøytron.



P-30 er radioaktiv med en halveringstid på ca. 3 minutter.

Det skjer tilsvarende reaksjoner i naturen, f.eks. når nitrogenatomer i atmosfæren treffes av nøytroner fra den kosmiske strålingen og det dannes C-14 (s. 17).

I 1938 gjorde tyskerne Otto Hahn og Fritz Strassmann noen eksperimenter der de lot et nøytron treffe en urankjerne. Da ble det dannet noe som lignet på barium - men hvordan kunne det skje? Lise Meitner og hennes nevø Otto Frisch fant at urankjernen ble splittet i to nesten like store deler! Det ble dannet barium i denne prosessen. I reaksjonen ble det frigjort store mengder energi. Med ett forelå muligheten både til kjernekraftverk og atombomber.

I et kjernekraftverk skjer spaltingen kontrollert, og energien som frigjøres lagres elektrisitet.

I en atombombe er spaltingen ukontrollert, og resultatet er en eksplosjon.

## Bindingsenergi

Hvordan er det mulig å få ut energi ved å spalte en atomkjerne? Tenk deg at du skal plukke fra hverandre en

atomkjerne, ett proton og/eller ett nøytron av gangen. Det kreves arbeid fordi partiklene er bundet sammen av sterke kjernekrefter. Arbeidet du må gjøre tilsvarer kjernens totale bindingsenergi.

**Bindingsenergien pr. kjernepartikkel** er interessant når det gjelder stabiliteten til kjerner. Det er det som er vist i figur 28. Her ser vi hvordan bindingsenergien varierer med massen til atomkjernen. Bindingsenergien pr. kjernepartikkel er størst for kjerner med masse omkring 40 - 80 atomvektenheter.

*Hva kommer dette av?*

I små kjerner er de fleste partiklene nær overflaten av kjernen, dvs. de er ikke omgitt på alle kanter av kjernepartikler. De har en "snarvei" ut av kjernen, og følgelig mindre bindingsenergi.

I store kjerner er mange av partiklene omgitt av andre partikler på alle kanter, og bare noen få befinner seg på

overflaten (nær "snarveien"). Men vi har også en annen effekt. Alle protonene er positive og vil frastøte hverandre. Frastøtningen blir større jo flere protoner det er, og dette *senker* bindingsenergien i de store kjernene.

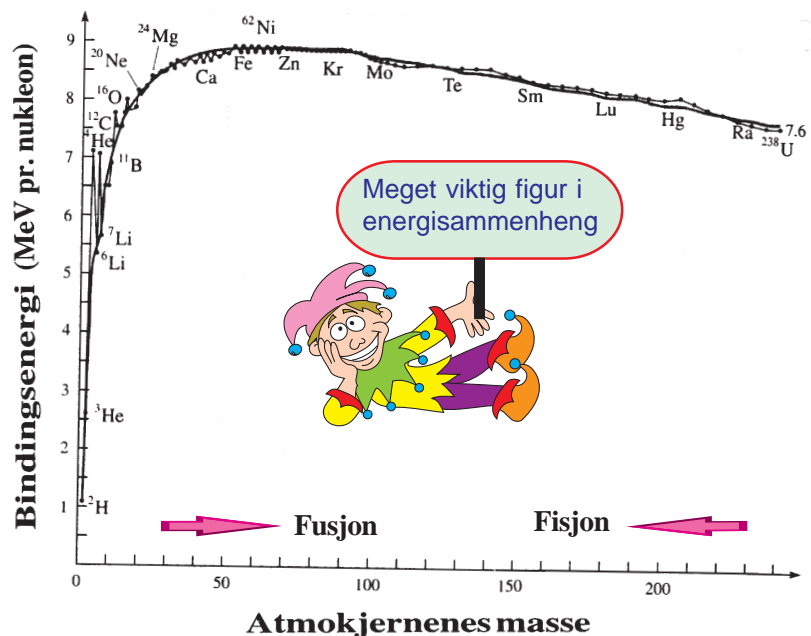
De to effektene som er nevnt gjør at kjerner med massetall mellom 40 - 80 har størst bindingsenergi.

## Fisjon og fusjon

Figur 28 viser at ved å **smelte sammen** to lette kjerner til én, eller ved å **spalte** en tyngre kjerne til to mindre, kan vi vinne energi. Energi-gevinsten er lik samlet forskjell i bindingsenergi mellom startkjerne(e) og sluttkjernen(e).

**Fisjon** er spalting av en atomkjerne.

**Fusjon** er sammensmelting av to kjerner.



Figur 28. Figuren viser hvordan bindingsenergien varierer fra de lette til de tunge atomkjernene. Vi **vinner** energi når vi går fra kjerner med liten bindingsenergi til kjerner med større bindingsenergi. Det kan skje på to måter: Sammensmelting av små kjerner (fusjon) eller spalting av store kjerner (fisjon).

## Hvordan starter det ?

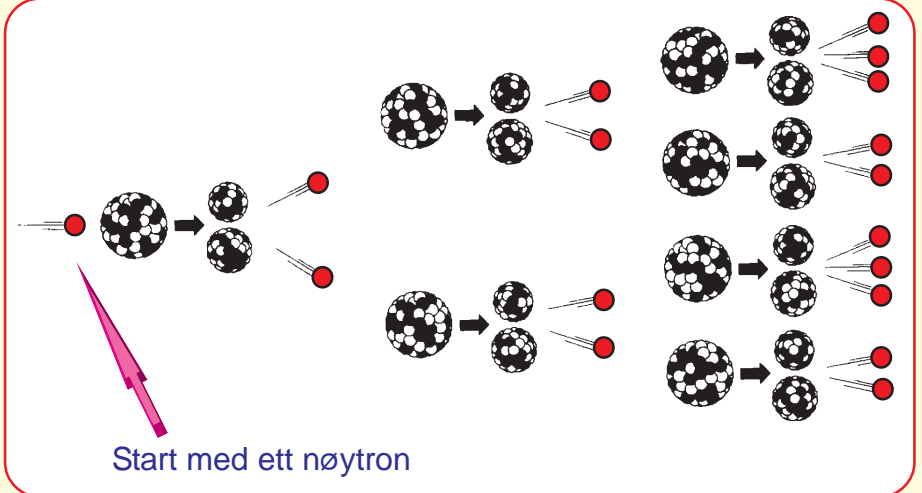
Både fisjon og fusjon krever en *aktiveringsenergi* for å komme igang; de trenger et "spark", så å si. Fisjon av uran, f.eks., kommer igang når et nøytron trenger inn i en urankjerne (se figur 29). Urankjernen blir delt i to lettere kjerner, og det blir frigjort nøytroner. Fisjonsproduktene (de to lette kjernene) er ikke de samme hver gang, men det blir alltid en litt lettere kerne med masse omkring 90 og en noe tynne kerne med masse omkring 140. Disse fisjonsproduktene er gjerne radioaktive, og de viktigste fra et miljøsynspunkt er Sr-90, Cs-137 og I-131.

Naturlig uran består av 99,28 % U-238 og 0,72 % U-235. Det er U-235 som lar seg spalte og som brukes i kjernekraftverk.

Uranet blir **anriket** til en høyere konsentrasjon av U-235 for å kunne brukes i et kjernekraftverk.

Ved spaltningen av U-235 frigis det flere nøytroner (2 eller 3, avhengig av hvilke fisjonsprodukter som dannes). Disse vil treffe nye U-235-kjerner, som igjen spaltes og dermed gir nye nøytroner. Vi kan altså få en **kjedereaksjon**: Det første nøytronet setter i gang en prosess som kan drive seg selv videre (illustrert i figur 29).

Nøytrontallet er viktig. Hvis **mindre enn ett nøytron** fra hver spaltning går videre og reagerer, får vi ingen kjedereaksjon, og prosessen dør ut av seg selv.



Figur 29. Fisjon av en U-235-kjerne kan starte en kjedereaksjon. I et kjernekraftverk skal dette kontrolleres slik at nøytrontallet ikke vokser ut over alle grenser som i figuren her.

## Energi i fred eller bombe!

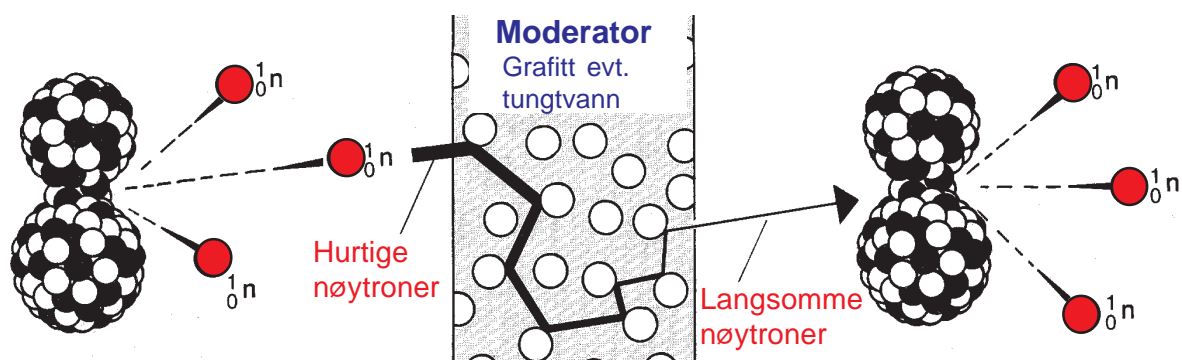
Det som avgjør om fisjonsprosessen er «fredelig» eller det blir en bombe er nøytronregnskapet.

1. Hvis gjennomsnittlig **ett nøytron** fra hver spaltning treffer en ny U-235-kjerne og spaltes denne, vil reaksjonen fortsette med uforandret styrke og gi en jevn energiproduksjon. Det er dette som skjer i en kjernereaktor. **Prosessen kan styres.**

2. Hvis **mer enn ett nøytron** går videre og spaltes U-235, får vi en eksplosjon med stor energiutløsning i løpet av kort tid. Det er dette som skjer i en atombombe.



Det ligger store energimengder i atomkjernen. Dette kan utnyttes til *fredelige formål* eller til *farlige våpen*. Det er viktig at vi holder disse to alternativene fra hverandre og at vi har en bevisst holdning til om og hvordan vi vil at energien i atomkjernen skal brukes. La oss først se på hvordan et kjernekraftverk fungerer.



Figur 30. Moderatoren sørger for effektiv bremsing av hurtige nøytroner.



# Kjernekraft

Det finnes ulike typer kjernereaktorer, men de samme hovedprinsippene går igjen i de fleste reaktortypene. Brenselet i reaktoren er U-235 (evt. plutonium).

For at kjedereaksjonen skal gå videre, må nøytronene som dannes ved en fisjon, *bremses ned*. Grunnen til dette er at når nøytronene dannes har de stor energi (vi sier at de er hurtige) – og de nøytroner som er mest effektive til å trenge inn i en ny urankjerne og spalte denne må være langsomme (de har liten energi). Dette er årsaken til at en må ha et stoff som kan bremse ned nøytronene.

Et stoff som bremser nøytroner, kalles en **moderator** (se figur 30). Grafit og tungtvann er begge gode moderatormaterialer. Vanlig vann er nok mer effektivt til nedbremsing – men samtidig *absorberer* vanlig vann nøytroner – noe som er av betydning for nøytronregnskapet.

I en reaktor plasserer en **brenselselementer** (de inneholder gjerne anriket uran – U-235) i en tank med moderatormateriale. Inn i kjernen kan man skyve **kontrollstaver** av kadmium eller et annet stoff som effektivt absorberer nøytroner. På denne måten er det mulig å kontrollere tallet på nøytroner og dermed kjedereaksjonen. Skyves stavene helt inn, stopper fisjonsprosessen.

Energien som avgis i kjernereaksjonen, brukes til å varme opp vann slik at det produseres damp. Dampen kan drive en generator som produserer elektrisk energi.

Etter å ha passert turbinen må dampen avkjøles og kondenseres til vann igjen. Dette kan skje med kjølevann fra en elv eller ved luftavkjøling i store kjøletårn. Vann som sirkulerer gjennom selve reaktortanken (som inneholder radioaktive stoffer) kommer aldri i direkte kontakt med omgivelsene.

Av sikkerhetsgrunner bør selve reaktoren være omgitt av en solid betongskjerm som hindrer stråling og radioaktive stoffer fra å slippe ut av reaktoren. I Tsjernobyl manglet denne skjermen, og de radioaktive stoffene hadde fri passasje ut i lufta. Det var årsaken til at utslippet etter ulykken ble så stort.

## Energi fra kjernekraft

Den første menneskeskapte reaktor ble startet 2. desember 1942 i Chicago. Etter krigen (1940 – 1945) ble det startet bygging av kjernekraftreaktorer i mange land. Idag er det mer enn 400

kjernekraftverk i drift rundt om i verden. Disse sørger for omkring 17 % av verdens totale produksjon av elektrisk energi. I Frankrike står kjernekraft for ca. 70% av elektrisitetsforsyningen, i Sverige 50% og i Tyskland 40%. Merk at tallene ikke gjelder det totale energiforbruket – bare forbruket av elektrisk energi. Det totale energiforbruk inkluderer oppvarming og transport, som for en stor del drives av kull, olje og gass. I Norge har vi to små forskningsreaktorer; – en i Halden og en på Kjeller utenfor Lillestrøm. Her forskes det bl.a. på hvordan sikkerheten kan økes.

## En naturlig reaktor – Oklofenomenet

Da Fermi startet den første menneskelagde reaktoren i 1942, trodde alle at det var den aller første uranreaktor. Men omtrent 30 år senere fant franske fysikere at naturen selv hadde slått Fermi med ca. 2 milliarder år. De fant at i Oklo i Gabon i Afrika var det rester etter en naturlig reaktor som hadde gitt energi i flere tusen år!

### Hvordan er dette mulig ?

Oppdagelsen som satte en på sporet var målinger av forholdet mellom U-238 og U-235. I Oklo var mengden av U-235 mindre enn normalt (0,71 %). Grunnen til dette trodde de var at U-235 var «*brent opp*» på samme måte som i en vanlig fisjonsreaktor.

På grunn av ulike halveringstider var mengden av U-235 ca. 3 % for 2 milliarder år siden. Det betyr at blandingen av uran i gruvene var omtrent slik den er i dagens anrikede reaktorer.

For at fisjonen skal gå, må reaktoren inneholde en moderator som kan bremse nøytronene. I Oklo var det vann – bundet til mineraler.



En fant at det var tre «lommer» i gruvene der forholdene for en jevn fisjon var mulig. Energien som ble dannet var liten. Det var nærmest som en forsøksreaktor.

Det ble selvsagt dannet radioaktive fisjonsprodukter – men den radioaktiviteten er borte for lenge siden. Derimot finner en de stabile sluttproduktene etter fisjonsprosessen.

Det er interessant å slå fast at fisjonsproduktene som ble dannet, **ikke** har spredd seg i løpet av 2 milliarder år.

Det ble også dannet plutonium (Pu-239) – som igjen ble omdannet til U-235 – og som da gikk inn i brenselsyklusen. Siden mengden av U-235 nå bare er 0,71 %, vil det aldri oppstå noen ny Oklo-reaktor.

## Kjernekraft og sikkerhet

Ved normal drift er et kjernekraftverk en svært liten belastning på miljøet. Kun ørsmå mengder radioaktivitet slipper ut av reaktoren.

Ved ulykker kan radioaktive stoffer frigjøres og spres med vinden over store områder, slik som ved Tsjernobyl-ulykken i 1986.

En fare i alle kjernekraftverk er at kjølingen av reaktoren på en eller annen måte skal bli blokkert og temperaturen bli så høy at brensel-elementene og hele reaktoren smelter. For å hindre slike ulykker er alle moderne reaktorer utstyrt med flere nødkjølesystemer som skal fungere uavhengig av hverandre. Et kjernekraftverk er underlagt grundige kontroller, både under bygging og med jevne mellomrom under drift. Sikkerhetsmessig er det viktig med en solid reaktorinneslutning som kan hindre spredning av radioaktive stoffer ved en eventuell ulykke.

## Avfall

Et problem med kjernereaktorer er det radioaktive avfallet. Når de fleste U-235-kjernene i brensel-elementene er spaltet, kan ikke kjedereaksjonen gå lenger, og elementene må skiftes ut. De brukte brensel-elementene inneholder radioaktive stoffer, og må derfor lagres et sted hvor strålingen ikke kan skade mennesker, planter eller dyr og hvor de radioaktive stoffene ikke kan sive ut og forurense omgivelsene.

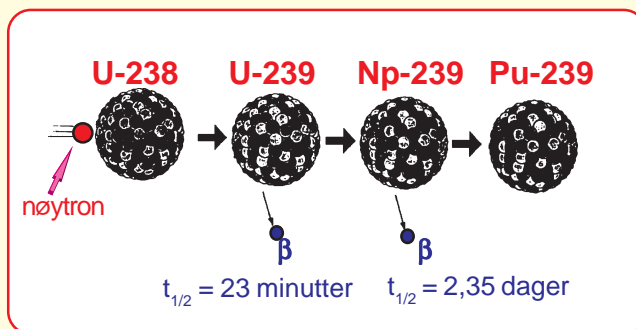
De viktigste fisjonsfragmentene, **Cs-137** og **Sr-90**, har halveringstid omkring 30 år. Det betyr at etter 600 år er aktiviteten redusert til én milliondel. Da er den omtrent som aktiviteten i uranmalm som finnes i naturen.

I stedet for å lagre brensel-elementene direkte kan man la dem gå til et **gjenvinningsanlegg**. Her skiller man ut stoffer som kan brukes til å produsere nye brensel-elementer for kjernekraftproduksjon. Resten overføres til en vannløselig form, støpes inn i tette beholdere og lagres i dype

sjakter i berggrunnen. Lagringsplasser velges i områder der de geologiske forholdene gjør det svært lite sannsynlig at de radioaktive stoffene skal slippe ut i naturen.

## Plutonium

Det dannes plutonium (isotopen Pu-239) i en reaktor. Det skjer ved at hurtige nøytroner trenger inn i den vanlige uranisotopen (U-238) slik at den omdannes i flere ledd til Pu-239. Reaksjonsrekkefølgen er som vist under.



Pu-239 er radioaktiv med halveringstid på 24 400 år. Når den desintegrerer sender den ut en  $\alpha$ -partikkel. Dermed dannes igjen uran – men nå er det isotopen U-235. Det dannes alltid noe plutonium i en reaktor og det dannes plutonium i en fisjonsbombe. Det betyr at vi hadde nedfall av Pu-239 i 1960-årene – etter bombeprøvene – og at det var forurensning av plutonium etter Tsjernobylulykken. Siden plutonium er så tungt er denne forurensingen konsentrert til områdene rundt reaktoren.

Vi kan bruke plutonium som brensel i et kjernekraftverk (i stedet for eller i tillegg til uran). Vi kan ha en reaktor med en kjerne som består av anriket uran (15 – 20 % anriking) og en kappe av U-238. Da kan hurtige nøytroner danne Pu-239. Hvis det dannes mer fisjonsmateriale enn det forbrukes kalles det en «**breeder-reaktor**». Det ansees for å være fremtidens reaktor der alt uran kan nyttiggjøres.

Plutonium kan brukes til atomvåpen. Det er derfor nødvendig med svært strenge sikkerhetsrutiner ved kjernekraftverkene for å hindre at plutonium kommer i gale hender.



Svensk kjernekraft

## Kjernekraft

Brukt som alternativ til energi fra kull, olje og gass er et kjernekraftverk "miljøvennlig". Det slipper ikke ut CO<sub>2</sub> – eller andre gasser som kan gi sur nedbør og øke drivhuseffekten!

Det er et paradoks at miljøorganisasjoner ikke ønsker denne energikilden.



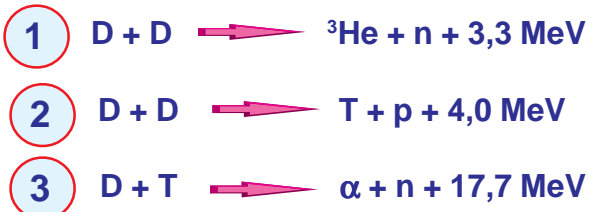
## Fusjonsreaktoren

Vi kan ikke forlate dette kjernekraftområdet uten å nevne fusjon og fusjonsreaktoren. Det har i mange år vært forsket for å kunne utnytte fusjonsenergien til fredelige formål. Ja, fusjonsreaktoren betraktes av mange som muligheten for å få en energikilde som kan ta over når dagens energikilder kull, olje og gass er brukt opp. Men så langt har vi ikke lyktes i å lage en fusjonsreaktor.

La oss se litt på de muligheter vi har.

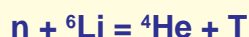
Som du ser av figur 28, kan man vinne energi ved å smelte sammen lette atomkjerener. Det er slik sola får sin energi, og hvis vi klarte å lage slike reaktorer, ville vi være på god vei mot å løse alle våre energiproblemer.

Brenselet i en fusjonsreaktor er hydrogenisotopene, nærmere bestemt de tunge hydrogenisotopene, som H-2 og H-3. Det er 3 reaksjoner en kan forsøke utnytte for å få energi. «Råstoffet» døyterium (H-2 eller D) er det store mengder av i naturen, mens tritium (H-3 eller T) finns bare i små mengder. De reaksjonene en kan studere er følgende:

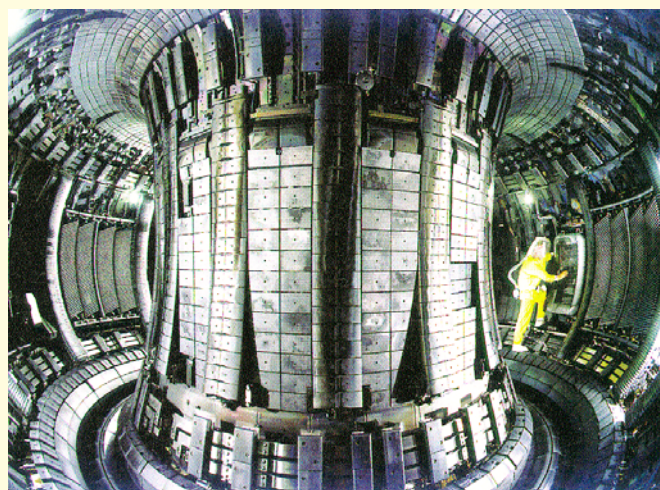


For å få reaksjon 3 til å gå, trengs en starttemperatur på ca. 40 millioner grader, mens reaksjon 1 og 2 har en starttemperatur på hele 100 millioner grader. Når det gjelder «råstoffer» er det store mengder av døyterium og ytterst små mengder av tritium. I vann er det ett døyterium-atom for hver 6500 vanlige H-atomer. Det betyr at hvis en kunne få til en kontrollert D - D reaksjon ville våre energiproblemer være løst for millioner av år.

Vi må imidlertid satse på reaksjon 3 og trenger tritium som råstoff. Vi kunne ha fått det fra reaksjon 2, men det er også mulig å lage tritium i en vanlig fisjonsreaktor ved reaksjon mellom nøytroner og den lette litiumisotopen Li-6:



Den lette Li-6 isotopen utgjør 6,5 % av all litium. Det betyr at den vil kunne være en energiressurs i flere tusen år.



Bildet er en illustrasjon som viser innviden av en forsøksreaktor for fusjon. Vi kaller det for en tokamak.

### Hvordan lage en reaktor ?

Det foregår forskning for å lage en fusjonsreaktor. Til nå har en ikke lyktes, og utsiktene er moderate. Grunnen er i første rekke de enorme temperaturer som skal til for å sette igang fusjonen. I solas indre hvor det foregår fusjon av hydrogen er trykket enormt og temperaturen ca. 15 millioner grader. Ingen reaktorbeholder på jorda ville tåle slike temperaturer. Ved de temperaturer som er nødvendig, vil atomene ha tapt sine elektroner og den blandingen en har av ioner og elektroner, kalles et «*plasma*». For at reaksjonen skal gå, må tettheten av partikler i plasma og den tid partiklene holdes samlet overskride visse terskler. En må holde plasmaet isolert fra alle vegger i reaktoren med magnetfelt – og så må en øke temperaturen. Det har en gjort ved hjelp av lasere. Når tetthet og temperatur er store nok, vil fusjonen gå. En reaktortype som det er arbeidet med, har form som en «smultring» (det kalles en «*Tokamak*») og er vist i illustrasjonen over.

### Miljø

En fusjonsreaktor vil ikke gi fra seg klimagasser slik som fossilt brensel. Det vil heller ikke dannes langlivede radioaktive stoffer. Det materiale reaktoren er dannet av, vil bli radioaktivt (p.g.a nøytroner), men det vil ikke være av betydning for miljøet omkring reaktoren.

# Atomvåpen

Det store skrekkscenario er atomvåpen. En kan og en har brukt både fisjon og fusjon i bomber. Vi håper jo alle at det aldri mer vil bli brukt. La oss likevel se nærmere på fysikken i dette.

Vi nevnte tidligere at en fisjon krever en isotop som er «fissil» – det vil si den kan spaltes i to omtrent like store deler. De isotoper som er praktisk mulige er U-235 og Pu-239. I hver fisjon frigjøres to til tre nøytroner som kan brukes til å spalte nye atomer. Nøytronregnskapet var svært viktig – og hvis det var større enn én ville det bli en eksplosjon.

Vi kjenner alle til at det ble utviklet atomvåpen under den 2. verdenskrig. Første og eneste gang slike våpen er brukt mot mennesker var i de japanske byene Hiroshima og Nagasaki, henholdsvis den 6. og den 9. august 1945.

Ca. 67 000 mennesker ble drept momentant av bombene. De døde *ikke* på grunn av stråling, men av sjokkbølgen fra eksplosjonen og av den intense heten som ble utviklet. I de etterfølgende 4 månedene døde ca. 36 000 mennesker av skader (ikke stråleskader) de var blitt påført under bombingene.

Over 300 000 mennesker overlevde bombingene. En del fikk stråledoser som senere har ført til kreft. Totalt mener man at omkring 800 kreftdødsfall kan tilbakeføres til bombene (se side 41 – 42).

Det er gjort utallige doseberegninger i forbindelse med spredning av atombomber. Det er også gjort målinger i forbindelse med prøvespenninger. Vi kan derfor hevde at hvis en er så nær en spredning at stråledosen er 5 – 10 Sv (det ville gi akutt strålesyndrom), ville en dø av sprevirkningen (som for en vanlig bombe).

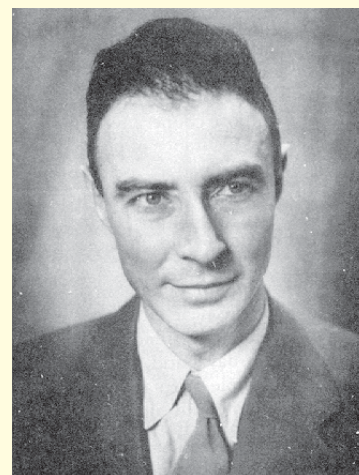
## En fisjonsbombe

Vi kan se litt nærmere på den første fisjonsbomben som ble sluppet over Hiroshima. En kalte den «*Little boy*» og er vist i figur 31. I den bomben var fisjonsmaterialet uran – isotopen U-235, mens i Nagasakibomben var det Pu-239.

For at kjedereaksjonen skal bli eksplosiv, må mer enn ett nøytron fra hver spaltning gå videre og spalte nye atomer. Dette krever at det er en viss mengde uran- eller plutoniumatomer til stede. Mengden som må til kaller en den **kritiske massen**.

Har man en kritisk masse med uran eller plutonium, vil et tilfeldig nøytron fra den kosmiske strålingen være nok til at bomben går av. Man må derfor holde sprengstoffet – det vil si U-235 – adskilt i flere deler inntil bomben skal gå av. Da skytes delene mot hverandre slik at den samlede massen blir kritisk (se fig. 31).

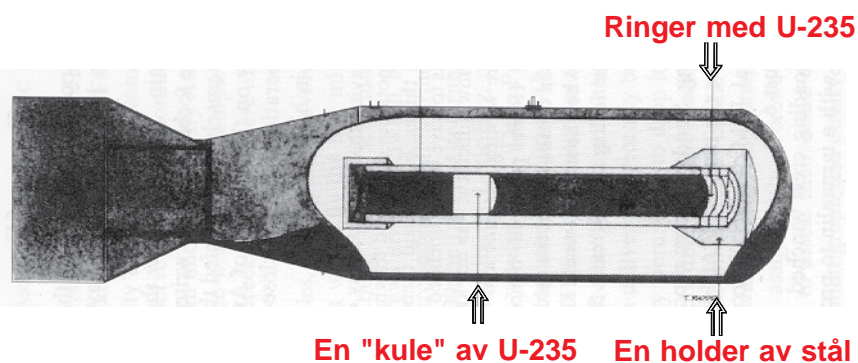
Under eksplosjonen danner nøytronene radioaktive stoffer. Det er først fisjonsmaterialer der vi kjenner til at Cs-137, Sr-90 og I-131 er de viktigste. Men det frigjøres også en mengde nøytroner som vil treffe luften omkring



**Robert Oppenheimer** var 39 år gammel (som på bildet her) da han ble valgt til å lede utviklingen av verdens første atombombe. Den aller første atomprøvesprengningen fant sted nær Almagordo i New Mexico i juli 1945.

Oppenheimer engasjerte seg senere sterkt i kampen for atomvåpenkontroll og var motstander av utviklingen av hydrogenbommen.

bomben og det materialet som omgir uranbitene. Det dannes da aktiveringsprodukter og disse er gjerne radioaktive. Det blir spredt i atmosfæren og vil etterhvert falle ned på bakken.

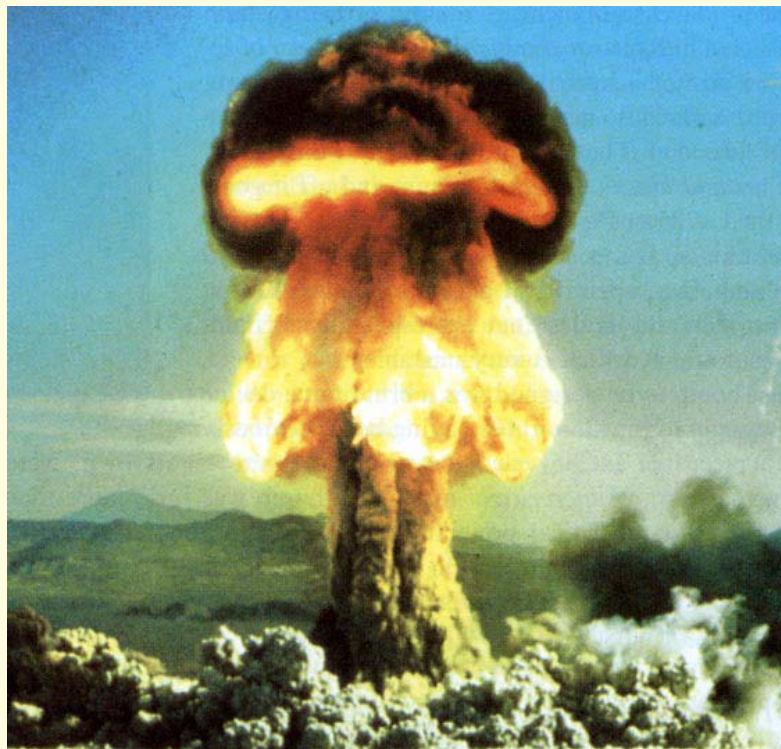


Figur 31. I Hiroshimabomben var U-235 fordelt på to steder. På begge steder var mengden mindre enn den «kritiske». Bomben ble utløst ved at den ene delen av U-235 ble skutt inn i den andre. Når massen er kritisk, er ett nøytron (f.eks. fra den kosmiske strålingen) nok til å utløse bomben.

Hvis bomben springer nær bakken, vil en betydelig mengde jord, stein, vann etc. bli suget opp i «ildkulen» som dannes, og det fører til store mengder av aktiveringsprodukter. Det skjedde ved noen bombetester ved Bikini i 1954.

I en **fusjonsbombe** (hydrogenbombe) eksploderer først en fisjonsladning. Bomben har et skall av H-2 (døtyerium), og den enorme temperaturen som skapes av fisjonen, starter da en eksplosiv fusjonsreaksjon (se side 49).

En rekke land har utviklet atomvåpen. Fra omkring 1950 til omkring 1990 hersket «den kalde krigen». Da ble det bygd opp store lagre av atomvåpen. Det er senere undertegnet avtaler om nedrustning og antall atomvåpen har nok minnet noe. Samtidig har nye land utviklet atomvåpen og en er stadig redd for at noen kan komme til å ta slike våpen i bruk på nytt.



*Ved en atomspngning oppstår en stor, sopplignende ildkule. Hvis den dannes høyt oppe i atmosfæren, vil det være lite materiale med i kulen, og mengden av aktiveringsprodukter er liten. Hvis den derimot eksploderer den nær bakken, vil jord og løst materiale suges opp, og det vil dannes store mengder av aktiveringsprodukter. Fisjonsprodukter og aktiveringsprodukter kan nå stratosfæren (over 10 – 13 km) og bli der i lang tid – det vil si i flere år.*

## Radioaktivitet i nordlige havområder

I 1989 sank den sovjetiske, atomdrevne ubåten *Komsomolets* utenfor Bjørnøya og i 2000 sank *Kursk*. Begge inneholdt radioaktivitet. I tillegg har det tidligere Sovjetunionen dumpet fast og flytende, radioaktivt avfall med en samlet aktivitet på mellom 50 000 og 100 000 TBq i Barents- og Karahavet. Vi har også betydelige utslipp fra gjenvinningsanlegg – for eksempel Sellafield.

### *Er dette en trussel for miljø eller helse?*

Havet inneholder både salt og en rekke andre stoffer i små mengder, og noen av disse er radioaktive. I tabellen til høyre, viser at den naturlige isotopen K-40 står for 96 % av aktiviteten i havet alene. Mengden av naturlige radioaktive isotoper varierer mellom ulike havområder. I Dødehavet er K-40-konsentrasjonen flere hundre gan-

ger høyere enn i Barentshavet. Det er også mye aktivitet i Middelhavet og den Persisk Gulf.

I tillegg til de naturlig forekommende isotopene inneholder havvann også radioaktivitet fra bombeprøvene på 1950- og 60-tallet, fra franske og en-

gelske gjenvinningsanlegg og fra sunkne ubåter og virksomhet i nordområdene.

De viktigste isotopene er H-3, C-14, Cs-137, Sr-90 og Pu-239. I senere tid har Tc-99 fra Sellafield i England fått stor oppmerksomhet. Våpenprøvene

| NATURAL ISOTOPES |                     |                             | ARTIFICIAL ISOTOPES |                                     |
|------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Isotope          | Bq/liter            | In percent of tot. activity | Isotope             | Bq/liter                            |
| <b>K-40</b>      | $1.2 \cdot 10^4$    | 96.0                        | <b>H-3</b>          | $10^{-2} - 2.7$                     |
| <b>Rb-87</b>     | $1.1 \cdot 10^{-1}$ | 0.9                         | <b>C-14</b>         | $0 - 1.5 \cdot 10^{-3}$             |
| <b>U-234</b>     | $4.7 \cdot 10^{-2}$ | 0.4                         | <b>Cs-137</b>       | $7 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-1}$ |
| <b>U-238</b>     | $4.1 \cdot 10^{-2}$ | 0.3                         | <b>Sr-90</b>        | $4 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-1}$ |
| <b>Pb-210</b>    | $5.0 \cdot 10^{-3}$ | 0.04                        | <b>Pu-239</b>       | $7 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-4}$ |
| <b>Po-210</b>    | $3.7 \cdot 10^{-3}$ | 0.03                        |                     |                                     |
| <b>Ra-226</b>    | $3.6 \cdot 10^{-3}$ | 0.03                        |                     |                                     |
| <b>U-235</b>     | $1.9 \cdot 10^{-3}$ | 0.02                        |                     |                                     |

Vi har blitt enige om at havet ikke skal være søppelplass for radioaktivitet!

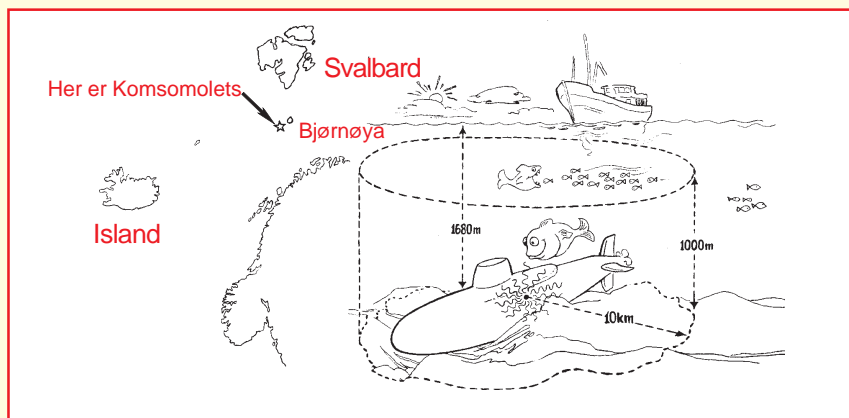
har ført til en gjennomsnittlig aktivitetsøkning på ca. 8 % i forhold til den naturlige aktiviteten i havet.

Det har vært stor medieoppmerksomhet omkring ubåtene *Komsomolets* og *Kursk*. En kan gjøre miljøanalyser og forsøke å se på konsekvensene hvis reaktorer og beholdere med aktivitet ruster opp og det radioaktive materialet ble blottlagt? To forhold spiller inn:

**1. Direkte stråling** fra radioaktive stoffer i vann er sjelden noe problem, siden strålingen stoppes svært raskt i vann (f.eks. vil 10 cm vann stoppe all  $\beta$  og halvere  $\gamma$ -strålingen fra Cs-137).

**2. Utslipp av radioaktive stoffer** vil skje når reaktorstavene til slutt løser seg opp i vannet. En reaktor med omkring et halvt tonn uran vil trenge omkring 1000 år for å løse seg opp i havet.

Det har vært beregnet at hvis 200 atomubåter sank i Barents- og Karahavet, ville uranet fra disse utgjøre en promille av det uranet som naturlig finnes i dette havområdet.



Siden 1992 har det vært gjennomført flere tokt til nordlige havområder der norske og russiske forskere har målt radioaktiviteten i vann, i fisk og i sedimentene på havbunnen. Målingene viser at radioaktiviteten i disse havområdene er meget liten. Det betyr at både Barentshavet og fisken derfra, er blant de **minst** forurensede på den nordlige halvkule.

## Radioaktivitet på Kola

På Kolahalvøya og i de nordlige områdene av Russland finnes atomdrevne fartøyer og betydelig avfall av radioaktivt materiale. Det er til

sammen ca. 200 kjernereaktorer til drift av sivile og militære fartøyer med base på Kolahalvøya. I tillegg finnes det ca. 150 kjernereaktorer i ubåter som er tatt ut av drift. 120 reaktorer fra skip er lagret på land eller i lagringskip ved Kola. Ikke alt dette er sikret eller lagret på en tilfredsstillende måte.

Kjernerkraftverket på Kolahalvøya, som ligger nær grensen til Norge, er heller ikke tilfredsstillende sikret etter vestlig standard. Statens strålevern i Norge samarbeider med russiske myndigheter om å øke sikkerheten ved anleggene.

## Avslutning

Vi håper at du som har lest dette heftet har lært en del om stråling, stråledoser og biologiske virkninger av stråling. Du har sett at vi lever i et "hav" av stråling og at det er naturen selv som gir oss de største stråledosene. Dosene fra naturlig bakgrunnsstråling varierer voldsomt fra ett sted til et annet. I gjennomsnitt vil vi i Norge få en dose pr. år på ca. 4 mSv, men det varierer for den enkelte fra godt og vel 1 mSv og opp til omkring 100 mSv.

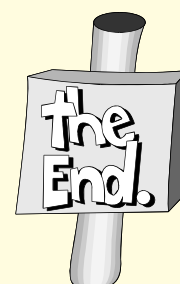
Vi har sett at atomulykker som Tsjernobyl og bombepøver på 1960-tallet har gitt oss ekstradoser. De er små, ikke større enn dosene mange av oss får på grunn av fly-

reiser. Det er sannsynlig at det i fremtiden vil oppstå situasjoner der vi får lekkasjer med spredning av radioaktivitet. Når vi skal vurdere hvilke tiltak som er nødvendige, vil det være viktig å beregne hvilke doser vi kan bli utsatt for. Dosene må sees i relasjon til de naturlige stråledoser og variasjonen i disse.

Det viktigste tiltaket ved eksponering for ioniserende stråling er kanskje **informasjon**. Det må være et mål at så mange som mulig har kunnskap nok til å vurdere faren ved ulike typer utslipp og til å ta fornuftige forholdsregler i en risikosituasjon. Kunnskap er også viktig for å unngå panikk og unødig angst i situasjoner som **ikke** er kri-

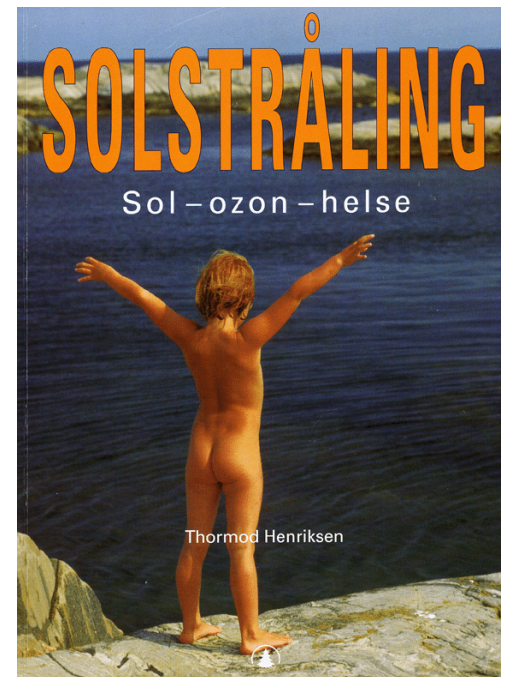
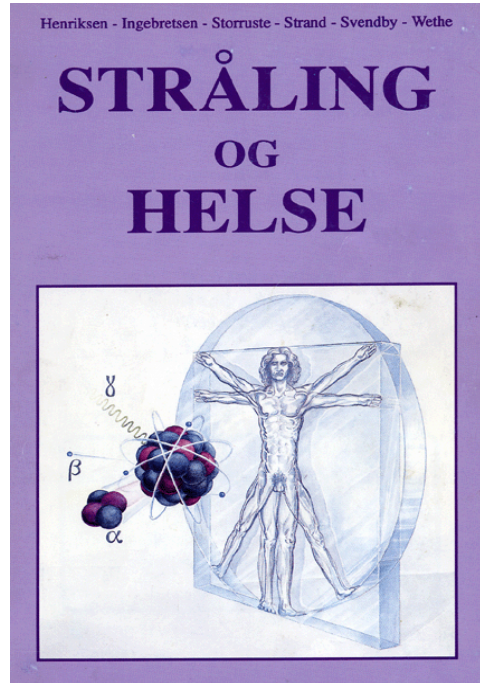
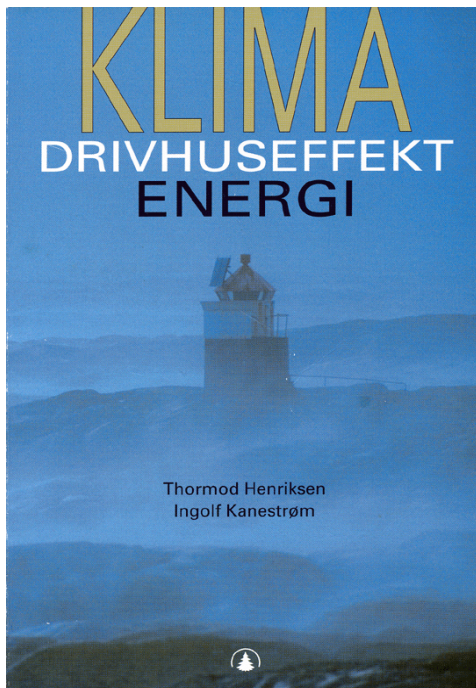
tiske. Hvis du selv kan foreta enkle doseoverslag, har du grunnlag for å anslå risikoen ved strålingseksponering.

Du kan finne ut mer om miljøfysikk i heftene og bøkene som er omtalt på omslaget til dette heftet. En god del av dette materialet kan du også finne på internett.



# MILJØFAG

Forskere ved Fysisk institutt på Universitetet i Oslo har gitt ut tre temahefter i forbindelse med miljøutstillingen «*Vår strålende verden*» på Norsk Teknisk Museum. Disse heftene er nå oppdatert og legges ut på Internet. Vi har også laget bøker om disse emnene som gir mer omfattende informasjon om stråling – ozon – klima og energi.



**KLIMA – Drivhuseffekt – Energi** gir informasjon om den naturlige drivhuseffekt. CO<sub>2</sub>-utslipp til atmosfæren, kan øke drivhuseffekten. Ved hjelp av modeller kan en vurdere virkningene av en slik forsterkning. Boka gir også informasjon om fornybare og ikke fornybare energikilder.

2001 ISBN 82-417-1217-0

**Stråling og Helse** gir informasjon om radioaktivitet og røntgen-stråling og den bruk i medisin industri og forskning. Stråling og miljø diskuteres med basis i kjernekraft, ulykker og radioaktiv forurensning. Boka finner en også på Internett – og på engelsk.

**Radiation and Health**

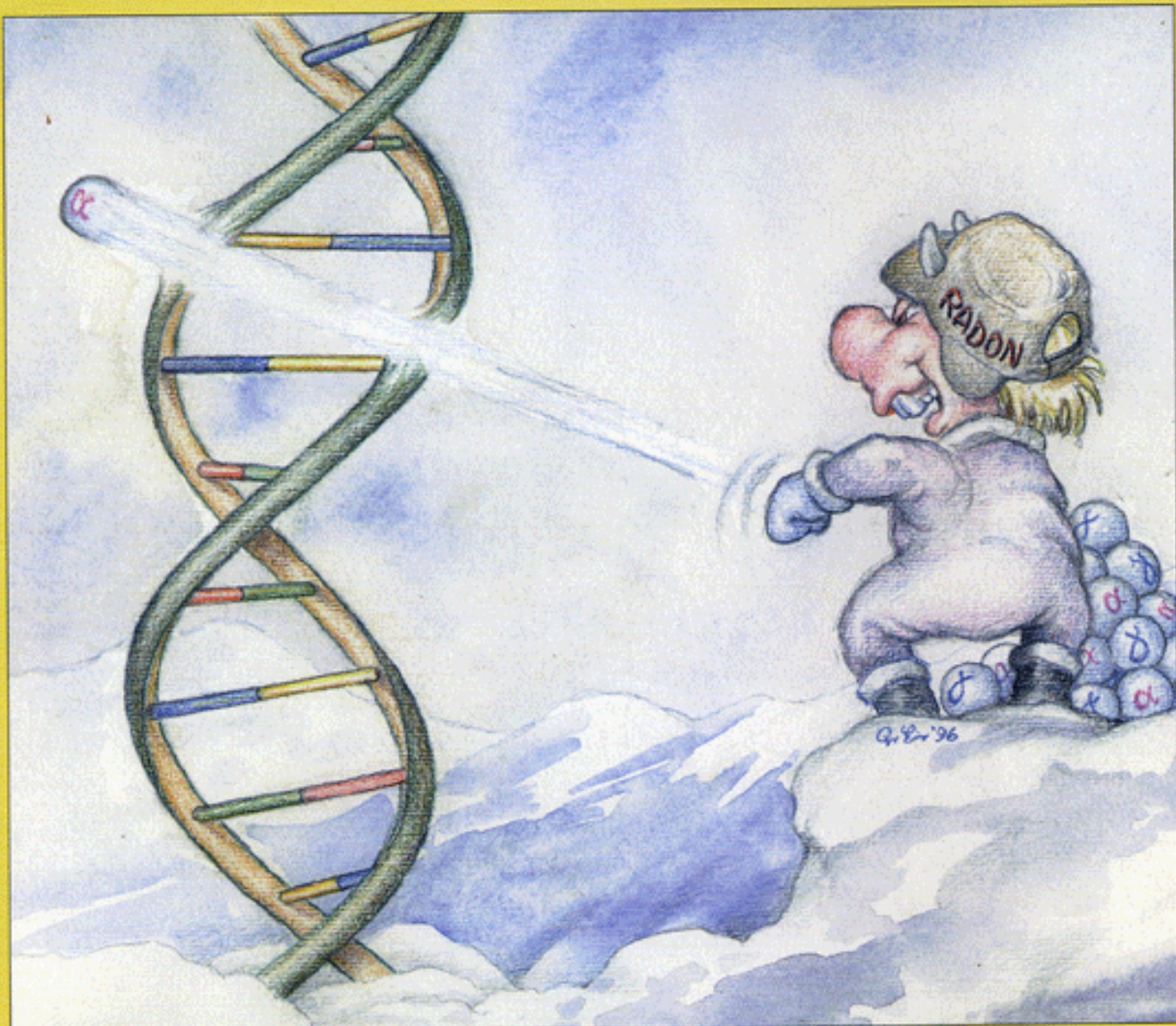
1995 ISBN 82-992073-2-0

2002 ISBN 0-415-27161-4

**SOLSTRÅLING. Sol – ozon – helse** gir informasjon om ozonlaget og UV-strålingens positive og negative helseeffekter. Vi viser hvordan det dannes D-vitamin og hvordan du blir brun. Vi diskuterer også stråleskader på DNA-molekylet som i sin tur kan gi hudkreft.

2002 ISBN 82-05-30406-8

1997 ISBN 82-992073-9-8



*Stråling fra den radioaktive gassen radon  
kan skade DNA-molekyler i kroppen.*

Dette heftet er utarbeidet ved Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, i forbindelse med «Vår strålende Verden», en utstilling om stråling og miljø på Norsk Teknisk Museum.



ISBN 82-992073-6-3