

# Radioaktivitet og stråling - becquerel og sievert

PER HEDEMANN JENSEN

I 1895 opdagede Wilhelm Conrad Röntgen den stråling, der senere skulle få hans navn, røntgenstråling. Året efter opdagede den franske fysiker Antoine-Henri Becquerel den naturlige radioaktivitet. Skønt de radioaktive stoffer først blev opdaget for kun godt et århundrede siden, har de og den stråling, de udsender, eksisteret siden Jordens skabelse. I begyndelsen af forrige århundrede blev det klarlagt, at stråling fra radioaktive stoffer udsendes som følge af spontane omdannelser af ustabile atomkerner. Vi lever således i en radioaktiv verden hvor mennesket konstant udsættes for stråling fra naturligt forekommende radioaktive stoffer og stråling fra verdensrummet.

Studiet af stråling og radioaktive stoffers egenskaber har ført til forståelse af stofs inderste væsen og til omfattende fremskridt i medicinsk diagnostik og behandling. Endvidere har det ført til udviklingen af en lang række af tekniske fremskridt inden for industri, landbrug og forskning. Men det har også ført til udviklingen af kernevåben. Opdagelsen af radioaktivitet og stråling har derfor som så mange andre opdagelser enorme muligheder for at blive anvendt til gavn for menneskeheden men også muligheden for at blive misbrugt.

Ved de fortsatte epidemiologiske studier af de overlevende fra atombombesprængningerne over Hiroshima og Nagasaki i august 1945 har man de seneste 15 - 20 år fået en forøget viden om strålingens skadelige virkninger. Man har endvidere indført en række nye begreber og enheder inden for strålingsbeskyttelsen. Dette er temaet for denne artikel, som endvidere indeholder oplysninger om radioaktivitets- og strålingsniveauet i Danmark.

## Radioaktive isotoper

I dag kender man 112 grundstoffer. Af disse er 90 fundet i naturen. Hvert grundstof består af en eller flere isotoper. Af de naturligt forekommende isotoper er omkring et halvt hundrede radioaktive. Der findes endvidere flere tusinde kunstigt fremstillede radioaktive isotoper, hovedparten frembragt ved bestråling med neutroner. Radioaktive isotopers atom-

kerner er ustabile og omdannes spontant under udsendelse af alfa- eller beta-/gamma-stråling. Atomkernerne i en enhver radioaktiv isotop har en ganske bestemt sandsynlighed for, at omdannelsen sker inden for en given tid. Denne sandsynlighed bestemmer halveringstiden for den radioaktive isotop. Halveringstiden er den tid, der forløber, før halvdelen af en givet antal atomer er omdannet. Eksempelvis har isotopene cobolt-60 og cæsium-137 en halveringstid på henholdsvis 5 år og 30 år.

Aktiviteten (aktivitetsmængden) af en radioaktiv isotop defineres som det antal atomer i materialet, der spontant omdannes pr. tidsenhed. Enheden for aktivitet er becquerel (Bq), som defineres som:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ atomkerneomdannelse pr. s}$$

I en stofmængde, der indeholder 1 Bq, omdannes et radioaktivt atom pr. sekund. Samtidigt udsendes stråling, der kan være alfa- eller beta-stråling, ofte med ledsagende gamma-stråling.

## Strålingsdoser

Når det menneskelige legeme bestråles, sker der en vekselvirkning mellem strålingen og legemet, idet strålingen afsætter sin energi i kroppens væv. Det er denne energiafsættelse, som kan forårsage forskellige former for biologisk skadevirkning. Til at beskrive strålingens energiafsættelse anvendes den fysiske størrelse absorberet dosis, der angiver den afsatte energi pr. masseenhed. Enheden for absorberet dosis er gray (Gy):

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule pr. kg}$$

Strålingsskader i mennesker afhænger ikke alene af den absorberede dosis, men også af typen og energien af strålingen. Nogle strålingstyper som eksempelvis alfa- og neutronstråling har en større biologisk sandsynlighed (effektivitet) pr. absorberet dosisenhed til at forårsage senskader (kræftsygdomme og genetisk betingede sygdomme). Derfor har man indført begrebet effektiv dosis, som tager hensyn til *både* forskel i biologisk effektivitet af for-

skellige strålingstyper og til forskellig følsomhed af kroppens væv mht. senskader. Enheden for effektiv dosis er sievert (Sv):

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ joule pr. kg}$$

Effektive strålingsdoser er derfor - i modsætning til absorberede doser - additive, når man skal vurdere risikoen for en senskade. Den effektive dosis er kun defineret for lave doser.

### Biologiske virkninger af stråling

Når ioniserende stråling vekselvirker med menneskeligt væv, sker den resulterende energioversættelse i form af ionisering, der kan forårsage skader på de molekyler, der er biologisk vigtige for cellernes funktion. Hvis der opstår skade på DNA-molekylerne, og skaden ikke bliver "repareret", kan resultatet blive enten celledød eller fejlreparerede celler. Disse to skadetyper har væsentlig forskellig betydning for organismen som helhed, idet de kan føre til enten deterministiske skader (akutte skader) eller til stokastiske skader (senskader).

De fleste organer og væv kan fungere uforstyrret selv efter tab af en betydelig mængde celler. Hvis celletabet imidlertid bliver for stort, kan klinisk observerbare skader (deterministiske skader) optræde relativt hurtigt efter en bestråling (dage til måneder afhængig af dosis). Drejer det sig om helkropsbestråling, vil doser på omkring 3 gray (Gy) være dødelige for ca. halvdelen af en bestrålet befolkningsgruppe. Hvis helkropsdosis er større end omkring 6 Gy, vil næsten ingen overleve. Årsagen skyldes svigt af den bloddannende knoglemarv.

Stokastiske skader optræder tilfældigt, dvs. at de er af statistisk natur. De omfatter kræftskader og arvemæssigt overførte skader (genetiske skader). Risikoen for kræftskader er proportional med den effektive dosis, og risikoen for genetiske skader er proportional med dosis til kønskirtlerne. Risikofaktorerne fra en strålingsudsættelse er vist i tabel 1.

Tabel 1. Skønnede sandsynligheder for senskader som følge af strålingsudsættelse.

| Skadetype          | Befolkning         | Risiko pr. mSv |
|--------------------|--------------------|----------------|
| Dødelig cancer     | alle aldre         | 0,000044       |
| Alvorlig arveskade | 1. + 2. generation | 0,000005       |

Det fremgår af tabellen, at kræftskader dominerer sammenlignet med de genetisk overførte skader. En effektiv dosis på eksempelvis 10 mSv vil forøge den gennemsnitlige kræftrisiko med 0,044%. Den "naturlige" kræftrisiko for hver dansker på omkring 22% ville derved blive forøget til 22,044%.

### Strålingsudsættelse i Danmark

Mennesket bestråles af forskellige kilder, og bestrålingen kan inddeles i følgende hovedgrupper:

- naturligt forekommende stråling (baggrundsstråling) fra verdensrummet (kosmisk stråling) og fra naturligt forekommende radioaktive isotoper
- medicinsk bestråling
- erhvervs-mæssig bestråling

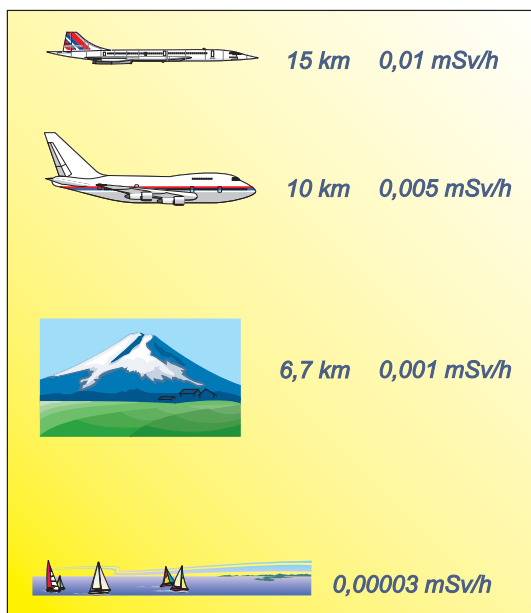
#### Baggrundsstråling

Baggrundsstråling er ioniserende stråling fra verdensrummet samt stråling fra radioaktive stoffer i jorden, i atmosfæren og i mennesket.

Fra rummet rammes Jorden af kosmisk stråling, der består af atomkernepartikler. I Jordens atmosfære vekselvirker de kosmiske partikler med atmosfærens molekyler, og partiklernes intensitet falder derfor ned gennem atmosfæren. Ved vekselvirkningerne dannes sekundær stråling og radioaktive stoffer, der kan nå ned til jordoverfladen. Den effektive dosishastighed fra den kosmiske stråling som funktion af højden over havniveau er vist på nedenstående figur 1.

Radioaktive stoffer har været på Jorden siden dens dannelse, og de findes i undergrunden, i vand, i luft, i byggematerialer, i føde-midler og i mennesker. Det er radioaktive stoffer med en meget lang halveringstid (op til flere milliarder år). Det drejer sig om kalium-40, uran-238, thorium-232 m.fl. samt deres radioaktive henfaldsprodukter. Den strålingsmæssigt mest betydningsfulde af de naturligt forekommende radioaktive stoffer er radon, der er en luftart, som kan trænge ind i huse fra undergrunden og fra byggematerialer. De

radioaktive stoffer i vores omgivelser vil via indånding og føden optages i mennesker og give anledning til indre strålingsdoser.



Figur 1. Effektiv dosishastighed fra kosmisk stråling som funktion af højden over jorden.

Mængden af naturligt forekommende radioaktive stoffer i danskere er vist i tabel 2. De årlige effektive doser fra baggrundstrålingen er vist i tabel 3 for både ydre og indre stråling.

Tabel 2. Indhold af naturligt forekommende radioaktive stoffer i voksne danskere fra indånding og indtag via føde.

| Radioaktiv isotop           | Aktivitet [Bq]  |
|-----------------------------|-----------------|
| <b>Fra kosmisk stråling</b> |                 |
| tritium                     | 50 <sup>1</sup> |
| beryllium-7                 | 15              |
| kulstof-14                  | 4000            |
| natrium-22                  | 2               |
| <b>Jordiske isotoper</b>    |                 |
| kalium-40                   | 4200            |
| rubidium-87                 | 600             |
| uran-238                    | 1               |
| thorium-230                 | 0,5             |
| radium-226                  | 3               |
| bly-210                     | 30              |
| polonium-210                | 30              |

Tabel 3. Årlig effektiv dosis til gennemsnitsdanskere fra naturligt forekommende strålingskilder.

| Strålingskilde   | Ydre dosis [mSv/år] | Indre dosis [mSv/år] |
|--|---------------------|----------------------|
| <b>Kosmisk stråling</b>  | 0,30                | 0,02                 |
| <b>Radioaktive stoffer</b>   |                     |                      |
| kalium-40  | 0,15                | 0,18                 |
| rubidium-87  | -                   | 0,005                |
| uran-238 serien og thorium-230 serier (excl. radon-220 og radon 222) | 0,26                | 0,15                 |
| radon-220 + radon-222  | -                   | 2,2                  |
| <b>Total</b>   | <b>0,7</b>          | <b>2,5</b>           |
|  | <b>3,2</b>          |                      |

### Medicinsk bestråling

Røntgenstråling anvendes i stor udstrækning ved medicinske undersøgelser af knoglebrud, kræftsvulster mv. I Danmark tages der i gennemsnit et billede pr. indbygger pr. år. Den effektive dosis pr. undersøgelse varierer afhængig af typen af undersøgelse som vist i tabel 4.

Med den eksisterende hyppighed af de forskellige undersøgelser kan man beregne, at den gennemsnitlige effektive dosis pr. dansker er omkring 0,7 mSv/år. Fra nuklearmedicinske undersøgelser er den gennemsnitlige effektive dosis pr. dansker omkring 0,08 mSv/år.

<sup>1</sup>Omkring halvdelen skyldes fallout fra kernevåbenforsøg i 50'erne og 60'erne.

Tabel 4. Typiske effektive doser pr. undersøgelse ved forskellige røntgenundersøgelser af voksne i Danmark.

| Undersøgelse        | Dosis [mSv] |
|---------------------|-------------|
| Tænder              | 0,005       |
| Arme/ben            | 0,01        |
| Lunger              | 0,1         |
| Ryg                 | 0,5         |
| Mave-tarmkanal      | 2           |
| Hoved (CT-scanning) | 2           |
| Krop (CT-scanning)  | 15          |

I behandlingen af kræftsygdomme anvendes strålingsterapi, hvor kræftceller dræbes ved bestråling med høje doser på 10 - 100 Gy, som alene gives til det syge væv, ofte i flere fraktioner.

#### Erhvervsmæssig bestråling

Radioaktive stoffer og ioniserende stråling anvendes i industrien, på hospitaler og inden for forskningen. De ansatte inden for disse områder bliver derfor udsat for bestråling i deres daglige arbejde. I Danmark er der omkring 9000 personer, der i deres arbejdsmiljø udsættes for ioniserende stråling. Det drejer sig bl.a. om industriel radiografi, hvor de største doser er omkring 10 mSv/år og medicinsk anvendelse, hvor de største doser er omkring 5 mSv/år. Den gennemsnitlige dosis til alle erhvervsmæssigt strålingsudsatte i Danmark er omkring 0,1 mSv/år. Da de nukleare anlæg var i drift på Forskningscenter Risø, var den gennemsnitlige strålingsdosis til strålingsudsatte medarbejdere et par mSv/år, og enkelte fik doser på op til 10 mSv/år.

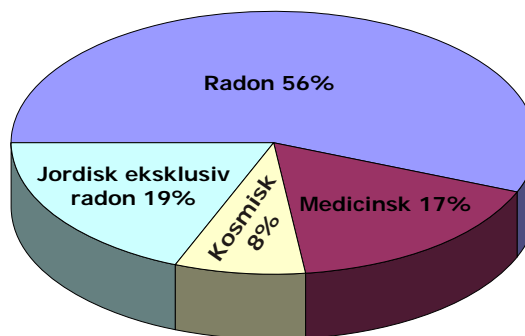
#### Andre menneskeskabte strålingskilder

Foruden den medicinske og erhvervsmæssige bestråling er der en række andre strålingskilder i vort daglige miljø. Det drejer sig om forbrugerprodukter som fjernsyn, selvlysede ure og måleinstrumenter, røgdetektorer mv. Den gennemsnitlige årlige effektive dosis fra forbrugerprodukter er mindre end 0,001 mSv/år. Kernevåbenforsøgene i atmosfæren i 50'erne

og 60'erne medførte spredning af betydelige mængder af radioaktive stoffer på den nordlige halvkugle. Det tilbageværende falloutniveau af cæsium-137 i Danmark var omkring 3000 Bq/m<sup>2</sup> i midten af 80'erne, og de årlige doser herfra udgjorde ca. 0,002 mSv. Tjernoby-ulykken i 1986 medførte et falloutniveau af cæsium-137 i Danmark på omkring 1000 Bq/m<sup>2</sup>. Doserne i Danmark fra Tjernoby-ulykken er nu helt forsvindende.

#### Samlet dosis til danskere

Det skønnes, at de årlige effektive doser i Danmark fra alle kilder ligger i intervallet 2 - 20 mSv/år. Den største variation findes i doserne fra radon i huse. Den samlede årlige gennemsnitlige effektive dosis til danskerne er omkring 4 mSv/år fra alle kilder (3,2 mSv/år fra naturligt forekommende kilder og 0,7 mSv/år fra medicinsk bestråling). Den procentvise fordeling er vist på figur 2.



Figur 2. Procentvis sammensætning af den samlede årlige effektive dosis på omkring 4 mSv til gennemsnitsdanskere fra forskellige strålingskilder.

I andre lande kan de årlige strålingsdoser fra naturligt forekommende radioaktive stoffer være væsentligt større end i Danmark. I Finland er den gennemsnitlige effektive dosis ca. dobbelt så stor som i Danmark som følge af meget højere radonkoncentrationer i Finland. I den indiske stat Tamil Nadu kan den ydre dosis nå op på 30 mSv/år pga. thoriumholdigt monazitsand i jorden. I staten Pennsylvania i USA er der målt radonkoncentrationer i huse på 100000 Bq/m<sup>3</sup> svarende til en effektiv dosis på 3500 mSv/år.