

Kursus i helsefysik

**Per Hedemann Jensen, Bente Lauridsen
Jens Søgaard-Hansen, Lisbeth Warming**

Kursus i helsefysik

**Per Hedemann Jensen, Bente Lauridsen
Jens Søgaard-Hansen, Lisbeth Warming**

**Forskningscenter Risø, Roskilde
Januar 2001**

Resumé Denne rapport giver en kortfattet gennemgang af de grundlæggende principper og begreber inden for strålingsbeskyttelsen.

I begyndelsen af forrige århundrede blev det klarlagt, at stråling fra radioaktive stoffer udsendes som følge af spontane omdannelser af ustabile atomkerner. Rapporten gennemgår atomets opbygning og fysik, radioaktivitet og udsendelse af ioniserende stråling fra ustabile atomkerners henfald samt strålingens vekselvirkning med stof. Til at beskrive strålingens energiafsættelse anvendes en række dosisbegreber, og baggrunden for disse gennemgås med udgangspunkt i ioniserende strålings vekselvirkning med stof.

Strålingens energiafsættelse i mennesket kan forårsage forskellige former for biologisk skadevirkning, som beskrives i rapporten. FN's videnskabelige komité for virkningerne af ioniserende stråling, UNSCEAR, har i sine seneste vurderinger angivet størrelsen af de risici, som er forbundet med en strålingsudsættelse, og disse vurderinger er beskrevet i rapporten.

Principperne for strålingsbeskyttelse både i normalsituationer og ved uheld som anbefalet af den internationale strålingsbeskyttelseskommision, ICRP, gennemgås i rapporten sammen med metoder til praktisk strålingsbeskyttelse, herunder måling af strålingsdoser og aktivitet.

Endelig beskrives menneskets strålingsmiljø, både det naturlige og det menneskeskabte, og der gives en detaljeret gennemgang af strålingsdoserne i disse miljøer.

Denne rapport forhandles af:
Akademisk Boghandel
Blegdamsvej 3
2200 København N

ISBN 87-550-2848-9
ISSN 0106-2840

Print: Pitney Bowes Management Services Denmark A/S , 2008

Indhold

Forord	5
1 Radioaktivitet og ioniserende stråling	7
1.1	Atomets opbygning 7
1.2	Grundstoffer, isotoper og nuklider 8
1.3	Nuklidkortet 8
1.4	Radioaktivitet 9
1.5	Ioniserende stråling 10
1.5.1	α -stråling 10
1.5.2	β -stråling 11
1.5.3	Ledsagende γ -stråling 12
1.5.4	Neutronstråling 12
1.6	Ioniserende strålings vekselvirkning med stof 13
1.6.1	Ladete partikler (α - og β -stråling) 13
1.6.2	Elektromagnetisk stråling (γ - og røntgenstråling) 15
1.6.3	Neutronstråling 16
2 Strålingsdoser – begreber og enheder	19
2.1	Energiafsættelse i stof 19
2.2	Absorberet dosis 20
2.3	Ækvivalent dosis 20
2.4	Effektiv dosis 22
2.5	Kollektiv dosis 23
2.6	Eksterne doser 24
2.6.1	Delkropsbestråling 24
2.6.2	Helkropsbestråling 24
2.6.3	Bestemmelse af eksterne doser 25
2.7	Interne doser 26
2.7.1	Optag og udskillelse 26
2.7.2	Committet ækvivalent dosis til organer 26
2.7.3	Committet effektiv dosis 27
2.7.4	Bestemmelse af interne doser 28
3 Målemetoder	31
3.1	Måling af dosishastighed 31
3.1.1	Ionkammer 31
3.1.2	GM (Geiger-Müller)-detektor 32
3.1.3	Scintillationsdetektor 33
3.2	Måling af kontamination 34
3.2.1	Proportionaldetektor 35
3.2.2	GM-detektor 36
3.3	Nuklid- og aktivitetsbestemmelse 36
3.3.1	Halvlederdetektor 37
3.3.2	Scintillationsdetektor 38
3.3.3	Helkropsmåling 38
3.3.4	Urinprøver 38
3.4	Dosisbestemmelse 39
3.4.1	Film 39
3.4.2	Termoluminescens-piller (TL-piller) 39
3.4.3	Elektronisk lommedosimeter 40

4	Strålingsbiologi	43
4.1	Cellebiologi og strålingsskader	43
4.1.1	Cellebiologi	43
4.1.2	Strålingsskader på celleniveau	44
4.2	Deterministiske skader	45
4.3	Stokastiske skader	49
4.3.1	Kræftskader	50
4.3.2	Genetiske skader	52
5	Strålingsbeskyttelsesnormer	55
5.1	Systemet for strålingsbeskyttelse	55
5.2	Praksis (normale situationer)	55
5.2.1	Retfærdiggørelse	56
5.2.2	Optimering	56
5.2.3	Dosisgrænser	57
5.2.4	Sekundære grænseværdier (ALI)	58
5.2.5	Afledt luftkoncentration (DAC)	59
5.2.5.1	DAC for partikelbåret aktivitet	59
5.2.5.2	DAC for radioaktive gasser	59
5.2.5.3	Praktisk anvendelse af DAC	60
5.2.6	Doser fra overfladekontamination	60
5.2.6.1	Ekstern bestråling fra kontaminerede overflader	60
5.2.6.2	Intern bestråling fra kontaminerede overflader	61
5.3	Indgreb ('de facto' situationer)	62
5.3.1	Erhvervsmæssigt strålingsudsatte	63
5.3.2	Befolkningen	63
6	Praktisk strålingsbeskyttelse	65
6.1	Risøs regelsystem	65
6.1.1	Klassifikation af områder	65
6.1.2	Ophævelse af klassifikation for områder	66
6.1.3	Arbejde i klassificerede områder	67
6.1.4	Radioaktivt affald	67
6.2	Praktiske metoder til begrænsning af doser	67
6.2.1	Beskyttelse mod ekstern stråling	68
6.2.2	Beskyttelse mod intern bestråling	75
6.3	Arbejdshygiejne	75
6.3.1	Laboratorieindretning	76
6.3.2	Planlægning	76
6.3.3	Påklædning	76
6.3.4	Helsefysisk instrumentering	76
6.3.5	Omhu	77
6.3.6	Oprydning	77
7	Menneskets strålingsmiljø	79
7.1	Det naturlige strålingsmiljø	79
7.1.1	Kosmisk stråling	79
7.1.2	Terrestriske radionuklider	80
7.2	Medicinsk bestråling	83
7.2.1	Diagnostik	83
7.2.2	Terapi	85
7.3	Erhvervsmæssig bestråling	85
7.4	Forbrugerprodukter	87
7.5	Samlet årlig effektiv dosis til danskere	87

Forord

Denne rapport danner grundlaget for Risøs **Kursus i helsefysik**. Den gennemgår i korte træk begreberne radioaktivitet og ioniserende stråling og de strålingsdoser, der bliver resultatet af en udsættelse for ioniserende stråling.

Risøs kursus i helsefysik henvender sig primært til de medarbejdere, der skal arbejde i områder på Risøs nukleare anlæg og laboratorier, hvor der findes radioaktive stoffer og ioniserende stråling. Medarbejderne skal have nødvendig helsefysisk baggrund for at kunne arbejde sikkerhedsmæssigt forsvarligt. Kurset kan også med fordel følges af personer uden for Risø, som skal arbejde med radioaktive stoffer.

Kurset giver en indføring i de fysiske forhold vedrørende radioaktivitet, ioniserende stråling og strålingsdoser, samt i den biologiske virkning af strålingsdoser til mennesker. Kurset behandler endvidere metoder til måling af strålingsdoser og aktivitet og metoder til beskyttelse mod udsættelse for stråling. Endelig behandler kurset menneskets strålingsmiljø og normer for strålingsudsættelse.

FN's videnskabelige komité for virkningerne af udsættelse for ioniserende stråling, UNSCEAR, har på baggrund af de seneste vurderinger fra Hiroshima- og Nagasaki-undersøgelsen angivet risikoen for strålingsbetingede skader. Virkningerne er beskrevet i rapporten, både for deterministiske og stokastiske skader.

Den internationale strålingsbeskyttelseskommision, ICRP, har i 1991 udsendt sine seneste anbefalinger vedrørende strålingsbeskyttelse, både for normalsituationer og for uheldssituationer (1990). ICRP's anbefalinger og nye dosisgrænser, som er blevet nedsat i lyset af UNSCEAR's seneste risikovurderinger, gennemgås i rapporten.

I kurset er der indlagt to halve dages praktiske øvelser i måleteknik og beskyttelsesforanstaltninger. Øvelserne er beskrevet i rapporten Risø-R-678(DA).

Risø, 2. april 1993

I denne reviderede udgave af rapporten er der foretaget en række ændringer, primært i kapitlet om strålingsnormer. Det drejer sig her hovedsageligt om de dosisgrænser, som er fastsat i Sundhedsstyrelsens bekendtgørelse nr. 823 af 31. oktober 1997.

Risø, 2. januar 2001

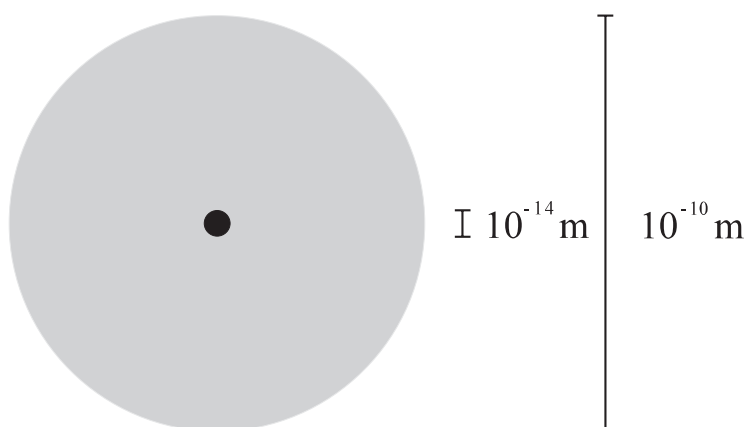
*PER HEDEMANN JENSEN
BENTE LAURIDSEN
JENS SØGAARD-HANSEN
LISBETH WARMING*

1 Radioaktivitet og ioniserende stråling

I 1896 opdagede Henri Becquerel, at når han pakkede mineralprøver indeholdende grundstoffet uran ind i en fotografisk film, blev filmen sværtet. Ud fra sine forsøg konkluderede han, at sværtningen måtte skyldes stråling udsendt af mineralprøverne ved en ukendt fysisk proces. Fænomenet kaldte Marie Curie nogle år efter for **radioaktivitet** ud fra det latinske ord 'radius', der betyder stråle. Det blev senere på baggrund af undersøgelser af Rutherford m.fl. i begyndelsen af dette århundrede klarlagt, at strålingen blev udsendt som følge af spontane omdannelser af atomkerner. Stråling, der udsendes ved atomkerneomdannelser, er meget energirig og i stand til at løsrive elektroner fra atomer (ionisere). Den bliver derfor betegnet som **ioniserende stråling**.

1.1 Atomets opbygning

Alt stof i vores dagligdag, inklusive mennesket selv, er opbygget af meget små bestanddele, som kaldes **atomer**. Atomerne findes i forskellige udgaver, men er alle opbygget efter det samme mønster. Opbygningen er skitseret på figur 1. I atomets indre findes **atomkernen**, og uden om denne kerne findes en "sky" af elektroner. Elektronerne er negativt elektrisk ladede og har hver en ladning på -1 elementarladning. Kernen har en ekstrem lille udstrækning, ca. 10^{-14} m. Kernen består af protoner, der hver har en elektrisk ladning på $+1$ elementarladning, og neutroner, der er elektrisk neutrale partikler. **Elektronskyen** har en udstrækning på ca. 10^{-10} m, dvs. ca. 10000 gange større end udstrækningen af atomkernen. Der er ligeså mange elektroner i elektronskyen, som der er protoner i kernen. Atomet er derfor som helhed elektrisk neutralt. Massen af en proton er stort set lig med massen af en neutron, mens massen af en elektron er ca. $1/2000$ af protonmassen. Størstedelen af atomets masse befinder sig derfor i kernen.



Figur 1. Model af atomet. Inderst findes kernen, der er opbygget af protoner og neutroner. Omkring kernen befinder der sig en "sky" af elektroner.

1.2 Grundstoffer, isotoper og nuklider

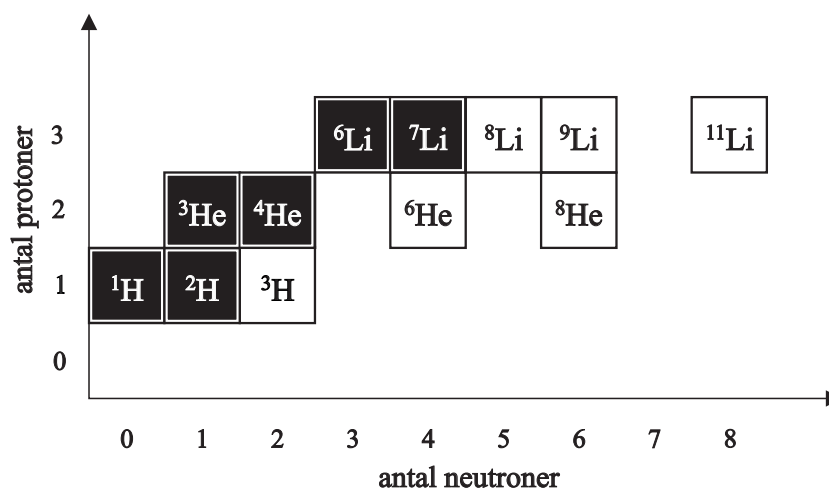
Et atoms kemiske egenskaber (måden, hvorpå det kan binde sig til andre atomer) er bestemt af antallet af elektroner i elektronskyen. Da dette er bestemt af antallet af protoner i kernen, opfører alle atomer med det samme protontal, Z , sig kemisk ens. Dette har medført en hovedopdeling af atomerne efter hvor mange protoner, de har i kernen. **Grundstof** nr. Z er således defineret som alle de atomer, der har Z protoner i kernen. Der kendes i dag 107 grundstoffer. Det letteste grundstof er brint (H), der kun har en proton i kernen. Grundstof nr. 2 er helium (He), der har to protoner i kernen. På nær technetium ($Z = 43$) og promethium ($Z = 61$) af grundstofferne op til uran ($Z = 92$) fundet i naturen.

Atomer, der tilhører det samme grundstof, kan have et forskelligt antal neutroner, N , i kernen. Dette påvirker ikke den kemiske egenskab, men massetallet, $A = Z + N$, bliver forskelligt. For at skelne mellem atomer med forskelligt massetal inden for det samme grundstof underinddeles grundstofferne i **isotoper**. En isotop af et grundstof har derfor både et bestemt antal protoner og et bestemt antal neutroner i kernen. De fleste af de naturligt forekommende grundstoffer har i naturen to eller flere isotoper; enkelte grundstoffer har mange såsom Sn (tin), der har ti isotoper, og enkelte har kun en isotop, f.eks. Na (natrium), Co (kobolt) og I (jod).

Den enkelte atomtype med et bestemt antal protoner og neutroner i kernen kaldes for en **nuklid**. En given nuklid angives ved at skrive grundstofsymbolet og i øverste venstre hjørne af dette at skrive nuklidens massetal. Atomnummeret kan eventuelt anføres i nederste venstre hjørne af grundstofsymbolet. Denne angivelse er selvfølgelig "overflødig", idet grundstofsymbolet entydigt definerer atomnummeret. Som eksempel skrives de tre naturligt forekommende uranisotoper som: $^{234}_{92}\text{U}$ ($^{234}_{92}\text{U}$), $^{235}_{92}\text{U}$ ($^{235}_{92}\text{U}$) og $^{238}_{92}\text{U}$ ($^{238}_{92}\text{U}$), hvor isotoperne alle har 92 protoner i kernen, men har henholdsvis 142, 143 og 146 neutroner i kernen.

1.3 Nuklidkortet

De sammensætninger af atomkerner, der er fundet i naturen, og de, der er fremstillet kunstigt i laboratorier, kan findes på et **nuklidkort**. Kortet er et koordinatsystem, hvor y -aksen repræsenterer protonantallet i kernen, dvs. grundstofnummeret, og x -aksen repræsenterer neutronantallet i kernen. De enkelte nuklider er på kortet angivet som kvadrater.



Figur 2. Skitse af det nederste venstre hjørne af nuklidkortet med isotoperne af de tre letteste grundstoffer brint (H), helium (He) og lithium (Li).

På figur 2 er vist en skitse af nuklidkortets nederste venstre hjørne, der indeholder isotoperne af de tre letteste grundstoffer. Nukliderne, der befinder sig i en vandret række, er isotoper af det samme grundstof. Nuklidkortet indeholder et væld af informationer, som f.eks. henfaldsmåde, energi af udsendt stråling og halveringstid. I de nedenstående afsnit vil der blive refereret til de farvekoder, der findes på nuklidkortet.

1.4 Radioaktivitet

Langt de fleste atomer tilhører nuklider, der har en uforanderlig opbygning af nukleoner (protoner og neutroner). Disse nuklider kaldes **stabile nuklider**. Nuklider med få protoner i kernen er normalt stabile, når neutronantallet er omtrent det samme som protonantallet. I de tungere stabile nuklider er neutronantallet dog væsentlig større end protonantallet. På nuklidkortet er de stabile nuklider sorte. De samler sig tilnærmet på en linie, der kaldes **stabilitetslinien**.

Foruden de stabile nuklider findes der også **ustabile nuklider**. Disse nuklider kan spontant ændre kernestruktur (henfalde) ved at omdanne sig til en anden nuklid. For den enkelte nuklids atomer er der en bestemt sandsynlighed, λ , for, at omdannelsen sker indenfor en given tidsenhed. Denne sandsynlighed bestemmer **halveringstiden**, $T_{1/2}$, der er defineret som den tid, det tager at omdanne halvdelen af et givent antal atomer. Der gælder, at $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$. Antallet af radioaktive atomer mindskes eksponentielt med tiden:

$$\begin{aligned} M(t) &= M(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \\ &= M(0) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \end{aligned} \quad (1)$$

hvor $M(0)$ er antallet af ustabile atomer til tiden $t = 0$, og $M(t)$ er antallet af ustabile atomer til tiden t . Denne sammenhæng kaldes for **henfaldsloven**. Middellevetiden, der er den gennemsnitlige levetid for en ustabil kerne, er givet ved $1/\lambda$. Omdannelsen af en kerne betegnes som et **radioaktivt henfald**, og en ustabil nuklid kaldes for en **radionuklid**. Den omdannede kerne (der betegnes som datterproduktet eller henfaldsproduktet) kan være stabil eller ustabil. Hvis den er ustabil, kan det føre til en kæde af henfald (**kædehenfald**), før der nås en kernesammensætning, der er stabil.

Aktiviteten af et materiale er defineret som det antal atomer i materialet, der henfalder pr. tidsenhed. Enheden for aktivitet i SI-systemet er s^{-1} (henfald/s), der i dette tilfælde benævnes becquerel og forkortes Bq. Der gælder derfor:

I en stofmængde, der indeholder en aktivitet på 1 Bq, henfalder der et atom pr. sekund

Aktiviteten Q kan beregnes ud fra antallet af radioaktive atomer, M , som:

$$Q = \lambda \cdot M \quad (2)$$

Henfaldsloven kan derfor også formuleres som:

$$\begin{aligned} Q(t) &= Q(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t} \\ &= Q(0) \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \end{aligned} \quad (3)$$

hvor $Q(t)$ er aktiviteten til tiden t , og $Q(0)$ er aktiviteten til tiden $t = 0$.

Ved angivelse af aktivitetsmængder, der indeholder brøkdele af en Bq eller mange Bq, er det praktisk at anvende præfikser. Et præfiks er et bogstav, der placeres foran betegnelsen for grundenheden. Dette bogstav repræsenterer et tal, der skal ganges på grundenheden, og herved dannes afledte enheder. Tabel 1 angiver de mest benyttede præfikser navn, symbol og talstørrelse.

Tabel 1. De mest benyttede præfikser navn, symbol og talstørrelse.

Navn	Symbol	Talstørrelse
peta	P	10^{15}
tera	T	10^{12}
giga	G	10^9
mega	M	10^6
kilo	k	10^3
milli	m	10^{-3}
mikro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}

Eksempel 1

Aktivitetsmængden 0,045 Bq ^{60}Co kan angives som 45 mBq ^{60}Co og aktivitetsmængden 450 000 Bq ^{137}Cs som 0,45 MBq ^{137}Cs eller 450 kBq ^{137}Cs .

1.5 Ioniserende stråling

Det radioaktive henfald skyldes, at den ustabile kerne er dannet med et stort energioverskud. Ved omdannelse nedbringes dette overskud. Kernen slipper af med energien ved at udsende stråling. Strålingen er partikelstråling, α - og β -**stråling** (alfa- og beta-stråling), og ofte med ledsagende elektromagnetisk stråling, γ -**stråling** (gammastråling). γ -stråling kan opfattes som partikelstråling, hvor den enkelte partikel (**foton**) er uden masse, men karakteriseres alene ved sit energi-indhold.

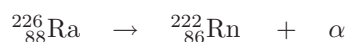
Energien af de udsendte partikler måles ofte i enheden elektronvolt (eV). 1 elektronvolt er lig med $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule (J), som er den energi, en elektron får tilført ved at bevæge sig gennem et spændingsfald på 1 volt (V). Typiske partikel-energier er i området 100 keV til 5 MeV, og strålingen kan derfor ionisere atomerne i det stof, den passerer. For at ionisere et vandmolekyle kræves der ca. 30 eV.

1.5.1 α -stråling

De nuklider, der henfalder ved α -**henfald**, er gule på nuklidkortet, og det er hovedsageligt de tunge ustabile nuklider, der henfalder på denne måde. Ved et α -henfald udsendes en α -**partikel** fra kernen. Denne partikel er opbygget af to protoner og to neutroner (svarende til en heliumatomkerne, $^4_2\text{He}^{++}$), og den er derfor en positivt elektrisk ladet partikel. Ved henfaldet bliver der således to protoner og to neutroner færre i kernen, og den omdannede atomkerne tilhører derfor et grundstof, der er to numre lavere, og som har en masse, der er 4 masseenheder lavere. På nuklidkortet findes den omdannede kerne ved at gå to pladser til venstre og to pladser ned.

Eksempel 2

^{226}Ra henfalder ved α -henfald til ^{222}Rn :



Langt de fleste α -partikler udsendes med energier i intervallet 3–10 MeV. Det gælder med nogle få undtagelser, at jo større sandsynligheden (pr. tidsenhed pr. atom) er, for at et α -henfald indtræder, dvs. jo mindre halveringstiden er, des højere energi udsendes α -partiklen med. For halveringstider af størrelsesordenen mikrosekunder er energien af α -partiklerne omkring 10 MeV. For halveringstider af størrelsesordenen år og derover er energien af α -partiklerne omkring 5 MeV. I tabel 2 er der givet nogle eksempler på nuklider, der omdannes ved α -henfald (α -emittere), deres halveringstid og α -energi. De udsendte α -partiklers energi angives i MeV på nuklidkortet.

Tabel 2. Eksempler på nuklider der omdannes ved α -henfald.

Nuklid	Halveringstid	Energi af α -partikel [MeV]
^{218}Ac	0,27 μs	9,21
^{219}Ac	7 μs	8,66
^{220}Ac	26 ms	7,85 og 7,61
^{213}Fr	34,6 s	6,75
^{218}Po	3,05 min	6,00
^{238}Pu	87,74 år	5,49
^{238}U	4,468 mia. år	4,196 og 4,149

1.5.2 β -stråling

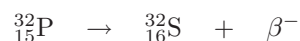
Nuklider, der ligger under stabilitetslinien og er blå på nuklidkortet, henfalder ved β^- -henfald. Ved denne type henfald omdannes en neutron i kernen til en proton og en elektron. Den dannede elektron udsendes straks fra kernen.

Nuklider, der ligger over stabilitetslinien og er røde, henfalder ved β^+ -henfald. Ved denne type henfald omdannes en proton i kernen til en neutron og en positron. Positronen er en partikel, der har en masse lig med elektrons masse, men har en ladning på +1. Den dannede positron udsendes straks fra kernen. De elektroner og positroner, der dannes ved β -henfald, kaldes under et for β -partikler og betegnes henholdsvis β^- og β^+ .

Den omdannede kerne har stadig den samme masse, men tilhører et andet grundstof. Ved β^- -henfald bliver der dannet en ekstra proton i kernen, mens der bliver en neutron mindre. Derved bliver protonantallet (grundstofnummeret) ændret med +1 og neutronantallet med -1. Den omdannede kerne kan derfor findes på nuklidkortet ved at gå en plads op og en plads til venstre. Ved β^+ -henfald bliver der dannet en ekstra neutron i kernen, mens der bliver en proton mindre. Derved bliver protonantallet (grundstofnummeret) ændret med -1 og neutronantallet med +1. Den omdannede kerne kan derfor findes på nuklidkortet ved at gå en plads ned og en plads til højre. Ved begge typer af β -henfald rykker kerne nærmere stabilitetslinien.

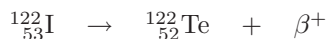
Eksempel 3

^{32}P henfalder ved β^- -henfald til ^{32}S under udsendelse af en elektron:



Eksempel 4

^{122}I henfalder ved β^+ -henfald til ^{122}Te under udsendelse af en positron:



β -partiklerne udsendes med energier mellem 0 og en maksimalenergi, $E_{\beta,max}$, der er karakteristisk for den enkelte nuklid. Maksimalenergier for udsendte β -partikler kan være fra 20 keV til ca. 20 MeV. Den mest energirige stråling udsendes fra nuklider med kort halveringstid. I tabel 3 er der givet nogle eksempler på nuklider, der omdannes ved β -henfald (β -emittere), deres halveringstid og maksimalenergi. På nuklidkortet er β -partiklernes maksimalenergi angivet i enheden MeV.

Tabel 3. Eksempler på nuklider der omdannes ved β -henfald.

Nuklid	Halveringstid	$E_{\beta,max}$ [MeV]
^{12}B	20 ms	13,4
^{25}Na	0,6 s	7,3
^{24}Na	14,96 h	1,4
^{82}Br	35,34 h	0,4
^{60}Co	5,27 år	0,3

1.5.3 Ledsagende γ -stråling

I forbindelse med α - og β -henfald udsendes der normalt ledsagende, energirig elektromagnetisk stråling, såkaldt γ -stråling. For en given nuklid er den udsendte γ -stråling helt særegen, idet de udsendte fotoner har helt bestemte energier (en eller flere) og helt bestemte hyppigheder (sandsynlighed pr. henfald). Typiske γ -energier er mellem 100 og 2000 keV. Tabel 4 giver en liste over energier og deres sandsynlighed ved henfald af de fire nuklider ^{60}Co (kobolt-60), ^{137}Cs (cæsium-137), ^{131}I (jod-131) og ^{241}Am (americium-241). På nuklidkortet er de hyppigste fotonenergier angivet i enheden keV.

1.5.4 Neutronstråling

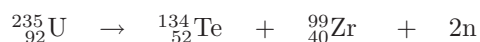
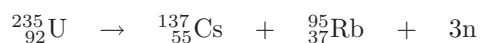
Nogle af de meget tunge nuklider, der er farvet grønne på nuklidkortet og har påskrevet et *sf* (f.eks. ^{235}U , ^{238}U og ^{242}Am), kan omdanne sig ved at spalte sig (spontant fissionere) i to nye kerner samtidigt med, at der udsendes 1 - 3 neutroner og γ -stråling fra kernen. De dannede kerner er mellem tunge og for størstedelens vedkommende β^- -aktive, idet de dannes med et forhold mellem antallet af protoner og antallet af neutroner, der er tilnærmelsesvis det samme som i den kerne, der fissionerer. De dannede, mellem tunge kerner er derfor under stabilitetslinien. For fission af en enkelt kerne gælder, at det samlede antal protoner og neutroner ikke ændres. Neutronerne, der udsendes ved fissionen, er energirige med energier op til flere MeV. I forbindelse med fissionen udsendes energirig γ -stråling.

Tabel 4. Energi og udbytte for fotoner udsendt ved henfald af ^{60}Co , ^{137}Cs (^{137}Ba), ^{131}I og ^{241}Am .

Nuklid	Energi [keV]	Udbytte [fotoner/henfald]
^{60}Co	1173,21	0,9990
	1332,47	0,9998
^{137}Cs (^{137}Ba)	661,65	0,8505
^{131}I	80,18	0,0262
	177,21	0,0026
	284,30	0,0606
	325,78	0,0025
	364,48	0,8120
	502,99	0,0036
	636,97	0,0727
	642,70	0,0022
	722,83	0,0018
^{241}Am	26,34	0,0240
	33,19	0,0012
	59,54	0,3570

Eksempel 5

To af de mange måder, en ^{235}U -kerne kan spaltes på, er givet ved reaktionsligningerne:



Nogle af de meget tunge nuklider, f.eks ^{235}U og ^{239}Pu , kan fissionere ved bestråling med neutroner, der har en passende energi. Dette udnyttes i **kædeprocessen** i atomreaktorer, hvor neutroner frigjort ved fission benyttes til at fissionere nye kerner osv. (se afsnit 1.6.3).

1.6 Ioniserende strålings vekselvirkning med stof

Ioniserende stråling vekselvirker med stof ved flere forskellige processer. Alle vekselvirkningerne medfører dog i sidste ende en energiafsættelse i det stof, hvori de foregår, og samtidigt svækkes strålingen. En del af den afsatte energi benyttes til at ionisere atomer i det stof, strålingen passerer.

1.6.1 Ladede partikler (α - og β -stråling)

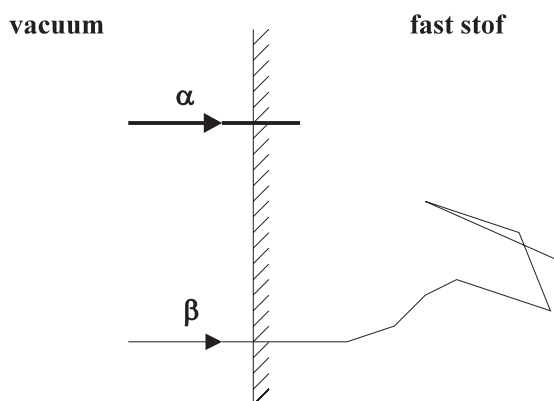
De elektrisk ladede α - og β -partikler vekselvirker kraftigt med stof. Denne vekselvirkning sker via elektriske kræfter med de elektroner, der befinder sig omkring stoffets atomkerner. Ved vekselvirkningen tilføres elektronerne energi. Ved små

energiooverførsler forøges elektronernes energi (excitation), men de forbliver omkring atomet. Ved store energioverførsler slås elektronerne løs fra atomet. Herved er atomet blevet ioniseret, og der er dannet en **sekundær elektronstråling**. Ved vekselvirkning mellem β -partikler og stoffets atomer, dannes desuden sekundær, elektromagnetisk stråling, kaldet **bremsestråling**.

En typisk α -partikel med en energi på 5 MeV vil i luft bremses ned på ca. 4 cm og i vand (væv) på ca. 0,04 mm (40 μm). Den korte nedbremsningslængde skyldes α -partiklens store ioniseringsevne. Tætheden af ionpar langs α -partiklens bane er stor (typiske tætheder er 5000 ionpar/ μm i væv). Da α -partiklen er tung i forhold til de elektroner, den vekselvirker med, ændrer den stort set ikke retning under nedbremsningen. De elektroner, α -partiklen slår løs, er så energirige, at de også er i stand til at ionisere.

β -partikler er meget lettere end α -partikler. Det medfører, at sandsynligheden for en vekselvirkning bliver relativt mindre, men til gengæld kan der ved den enkelte vekselvirkning overføres mere energi. β -partiklens nedbremsningsbane bliver meget buftet og meget længere end en α -partikels bane, der er en ret linie.

Figur 3 skitserer forskellen mellem α - og β -partiklers nedbremsning i stof.



Figur 3. Nedbremsning af en α - og en β -partikel i fast stof.

For β -partikler med energier i intervallet 0,1 - 1 MeV vil den maksimale rækkevidde i luft være fra 15 cm til 3 m. I væv vil de tilsvarende rækkevidder være fra 0,15 mm til 3 mm. Iontætheden i væv langs en β -partikels bane er af størrelsesordenen 100 ionpar/ μm .

Når en positron er helt eller delvist nedbremset, vil den, når den kommer tæt på en elektron, smelte sammen med denne, og omdannes til elektromagnetisk stråling i form af to fotoner, der hver har en energi på 511 keV. Denne proces kaldes for **annihilation**.

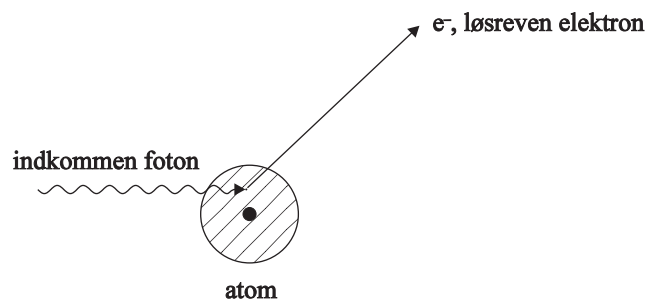
Under nedbremsning af β -partikler omdannes en del af partiklernes energi til bremsestråling, som er ioniserende, elektromagnetisk stråling af samme type som γ -stråling. Dannelsen af bremsestråling afhænger af β -partiklernes energi og det materiale, partiklerne bremses ned i. Jo større energien af β -partiklerne er, og jo tungere nedbremsningsmateriale er, des mere bremsestråling bliver der dannet. Ved nedbremsning af energirige β -partikler i bly omdannes flere procent af β -partikelenergien til bremsestråling.

Et røntgenapparat er specielt bygget til at danne bremsestråling. I dette accelereres elektroner op i et kraftigt elektrisk felt (flere kV), hvorefter de stoppes i et tungt materiale som f.eks wolfram. Strålingen fra røntgenapparater kaldes for **røntgenstråling**.

1.6.2 Elektromagnetisk stråling (γ - og røntgenstråling)

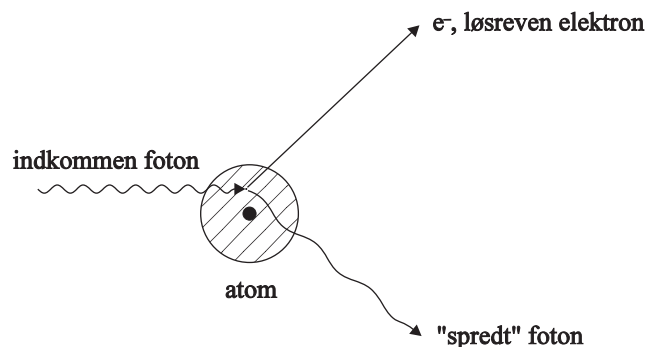
Ioniserende, elektromagnetisk stråling vekselvirker med stof ved flere processer, hvorved der afsættes energi i stoffet. De tre vigtigste er **den fotoelektriske effekt (fotoeffekten)**, **comptoneffekten** og **pardannelse**. Sandsynligheden for vekselvirkning ved en af de tre processer er stærkt afhængig af strålingens energi og det stof, strålingen vekselvirker med. Generelt bliver sandsynligheden for vekselvirkning større, jo større stoffets massefylde er. Vekselvirkningen kan betragtes som vekselvirkning mellem de enkelte fotoner og de enkelte atomer/elektroner.

Ved den fotoelektriske effekt afgiver fotonen hele sin energi til en af de "hårdt bundne" elektroner i elektronskyen omkring kernen, hvorved der afsættes energi. Elektronen løsriver sig fra atomet og får en energi, der bortset fra den energi, der går til at fjerne den fra atomet, er lig med fotonens energi. Elektronen vil herefter opføre sig som en β -partikel, der vekselvirker med stof. Processen er skitseret på figur 4. Vekselvirkning ved fotoeffekt er dominerende for γ -energier under 0,5 MeV.



Figur 4. Vekselvirkning ved fotoelektrisk effekt.

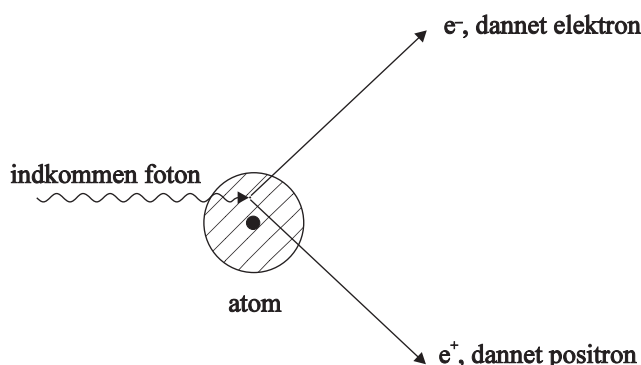
Ved comptoneffekten vekselvirker fotonen med en af de løsere bundne elektroner. Ved processen overføres en del af fotonens energi til elektronen, mens den resterende del bliver brugt til dannelse af en ny foton (**sekundær γ -stråling**). Processen er skitseret på figur 5. Processen kan opfattes som en spredning af den indkommende foton på elektronen. Både den løsrevne elektron og den dannede foton er i stand til at forårsage yderligere ioniseringer i stoffet. Comptoneffekten er dominerende for fotonenergier fra 0,5 - 5 MeV.



Figur 5. Vekselvirkning ved comptoneffekt.

Ved pardannelse bliver fotonen omdannet til en elektron og en positron. Denne proces kan kun foregå helt tæt på en atomkerne eller en elektron og kræver, at fotonens energi er mindst 1,02 MeV. Den del af fotonens energi, der ligger over 1,02 MeV, går til bevægelsesenergi til elektronen og positronen. Processen er skitseret

på figur 6. Pardannelse er den dominerende vekselvirkning ved energier over 5 MeV. Den dannede elektron og positron vil efter dannelsen opføre sig som β -partikler, og de nedbremses, samtidig med at de ioniserer. Efter nedbremsningen af positronen vil den annihilere med en elektron (se afsnit 1.6.1).



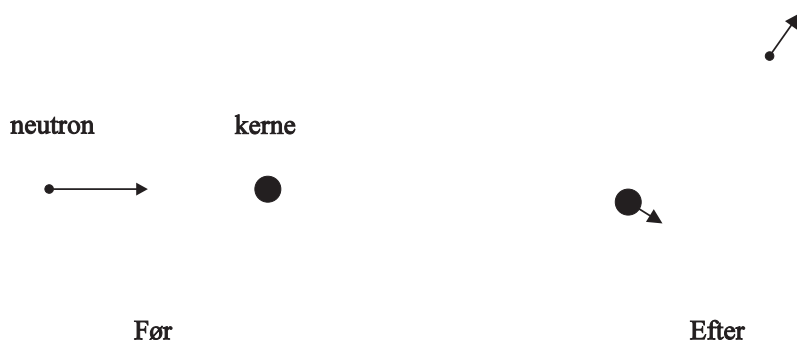
Figur 6. Vekselvirkning ved pardannelse.

1.6.3 Neutronstråling

Generelt vekselvirker neutroner med de enkelte atomkerner i stof ved **spredning** og **absorption**. Ved spredning ændres neutronernes bevægelsesretning, og de nedbremses. Ved absorption indfanges neutronerne i atomkerner. I nogle af de meget tunge kerner kan neutronerne endvidere forårsage fission. Sandsynligheden for hver af disse processer er stærkt afhængig af neutronernes energi. Det er derfor hensigtsmæssigt at opdele dem i tre klasser:

- **hurtige neutroner:** energi større end 0,01 MeV
- **intermediære neutroner:** energi fra 1 eV til 0,01 MeV
- **termiske neutroner:** energi mindre end 1 eV

De hurtige neutroner vekselvirker generelt svagt med stof. De har størst sandsynlighed for at vekselvirke ved spredning. Denne proces er illustreret på figur 7. Ved spredningen ændres neutronens bevægelsesretning og energi. Jo lettere de ramte atomer er, jo mere energi kan neutronen miste.



Figur 7. Vekselvirkning ved spredning mellem neutron og atomkerne.

Ved sammenstød med en brintkerne kan neutronen miste hele sin energi. Derimod ændrer et sammenstød med et blyatom stort set ikke neutronens energi, men sammenstødet kan dog ændre dens bane væsentligt. Ved sammenstød med lette

atomer kan disse løsriveres fra deres plads i stoffet. Ved løsrivelsen kan atomerne ioniseres, og de vil herefter under nedbremsning selv ionisere det stof, de passerer. Hurtige neutroner kan forårsage fission i nogle få typer af tungere atomkerner (bl.a. ^{238}U og ^{242}Pu).

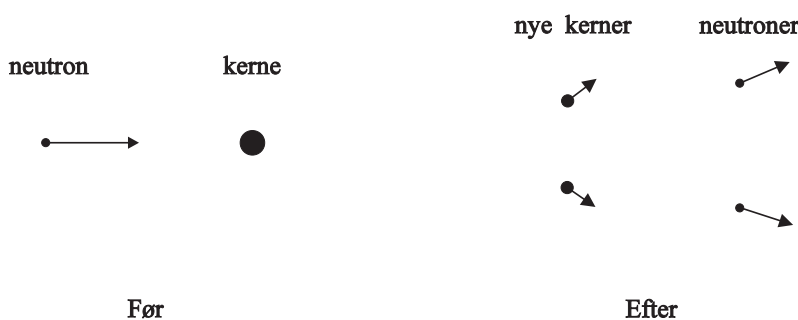
De intermediære neutroner fremkommer hovedsageligt ved nedbremsning af hurtige neutroner. De intermediære neutroner kan vekselvirke både ved spredning og ved absorption. Ved absorption indfanges neutronen i en atomkerne. Dette er illustreret på figur 8. Ved indfangningen tilføres kernen energi, som den skaffer sig af med under udsendelse af en eller flere partikler. Afhængig af neutronenergi og nedbremsningsmateriale kan dette være en eller flere neutroner, en proton, en α -partikel og/eller en eller flere fotoner. Absorptionsprocesserne medfører således sekundær stråling. Ofte er de dannede kerner radioaktive; der er sket en såkaldt **neutronaktivering**.



Figur 8. Absorption af neutron i en atomkerne.

Termiske neutroner er neutroner, der er nedbremset maksimalt, således at deres bevægelsesenergi er af samme størrelsesorden som atomernes varmesvingningsenergi.

De termiske neutroner vekselvirker ved absorption, hvorved der ofte sker neutronaktivering. I nogle få tungere kerner (bl.a. ^{235}U) kan termiske neutroner forårsage fission. Denne proces er illustreret på figur 9.



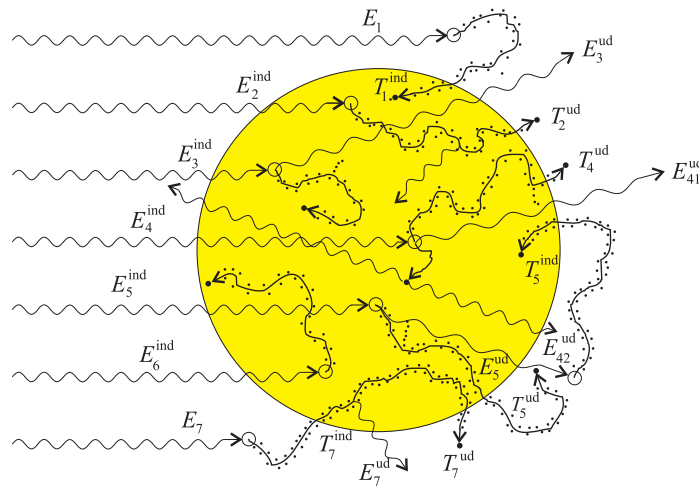
Figur 9. Neutron forårsager fission af en atomkerne. Ved processen deles atomkernen i to nye kerner, og der frigøres neutroner.

2 Strålingsdoser – begreber og enheder

Når mennesket udsættes for ioniserende stråling, enten i form af **ekstern bestråling** fra strålingskilder uden for legemet, eller i form af **intern bestråling** fra radioaktive stoffer i kroppen, sker der en vekselvirkning mellem strålingen og legemet. Herved afsættes der strålingsenergi i kroppens væv, og denne energiafsættelse kan forårsage forskellige former for biologisk skadevirkning på mennesket. Det er nødvendigt at kunne bestemme størrelsen af den afsatte strålingsenergi - strålingsdosis - ud fra målinger og beregninger for at sikre, at den modtagne dosis ikke overskrider acceptable niveauer, og for at kunne bestemme risikoen for biologisk skadevirkning som følge af strålingsudsættelsen.

2.1 Energifaftsættelse i stof

Resultatet af ioniserende strålings vekselvirkning med stof kan beskrives ved den fysiske størrelse **afsat energi**. Vekselvirkningen med atomerne i det stof, strålingen passerer, er illustreret på figur 10 for fotonstråling (γ - og røntgenstråling). Nogle af de indtrængende fotoner vekselvirker med atomerne i volumen, V , hvorved der løsriveres elektroner fra atomernes 'elektronskaller'. Disse elektroner vil under deres vej gennem materialet frembringe nye ionpar, og derved mister (afsætter) de deres energi.



Figur 10. Afsat energi til et volumen, V , fra et strålingsfelt bestående af fotoner.

Bevægelsesenergien af de elektroner, der frigøres ved fotonernes vekselvirkningsprocesser i og uden for V , kaldes her T^{ind} og T^{ud} for henholdsvis indgående og udgående elektroner. Den afsatte energi, ε_a , til volumen V defineres som summen af de indtrængende fotoners energi, E^{ind} , minus summen af de udgående fotoners energi, E^{ud} , plus summen af de indgående elektroners kinetiske energi, T^{ind} , minus summen af de udgående elektroners kinetiske energi, T^{ud} :

$$\varepsilon_a = \left(\text{sum af } E^{\text{ind}} - \text{sum af } E^{\text{ud}} \right) + \left(\text{sum af } T^{\text{ind}} - \text{sum af } T^{\text{ud}} \right) \quad (4)$$

SI-enheden for ε_a er joule (J).

2.2 Absorberet dosis

Den fysiske størrelse **absorberet dosis** defineres på grundlag af den afsatte energi, ε_a . Absorberet dosis er defineret for strålingsvekselvirkning i alle stoffer til forskel for de efterfølgende definerede størrelser **ækvivalent dosis** og **effektiv dosis**, der alene er defineret for strålingsvekselvirkning i mennesket.

Kaldes **middelværdien** af den afsatte energi til et uendeligt lille volumen med den uendeligt lille masse Δm for $\Delta \bar{\varepsilon}_a$, kan den absorberede dosis, D , udtrykkes som:

$$D = \frac{\Delta \bar{\varepsilon}_a}{\Delta m} \quad (5)$$

Bestråles et organ eller væv, T , der har massen, m_T , defineres den absorberede dosis, D_T , til organet eller vævet som:

$$D_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T} \quad (6)$$

hvor ε_T er den totale afsatte energi i organet eller vævet.

Den absorberede dosis D repræsenterer således den energi pr. masseenhed, som forbliver (absorberes) i stoffet, og som derfor kan forårsage en strålingseffekt her. Den absorberede dosis er derfor den vigtigste fysiske størrelse inden for strålingsbiologien. SI-enheden for absorberet dosis er joule (J) pr. kg. SI-enheden for absorberet dosis har fået navnet gray (Gy).

Den absorberede dosishastighed, $\dot{D}$, er defineret som modtaget absorberet dosis pr. tidsenhed, og den har enheden Gy pr. sekund.

2.3 Ækvivalent dosis

De tidlige regler vedrørende strålingsbeskyttelse omhandlede primært røntgen- og γ -stråling. Man antog, at disse strålingstyper havde den samme effektivitet pr. absorberet dosisenhed til at forårsage biologiske skader på mennesket. Det betød, at man alene kunne interessere sig for **kvantiteten** af den stråling, som en person modtog. Da andre typer af ioniserende stråling, som neutronstråling og stråling af tunge partikler, fik større udbredelse, blev det nødvendigt at tage hensyn til disse strålingstypers større biologiske effektivitet (skadevirkning) pr. absorberet dosisenhed. Dette kan beskrives ved begrebet **strålingskvalitet**, som afhænger af både arten og energien af strålingen.

Den internationale strålingsbeskyttelseskommision, ICRP, har defineret begrebet **strålingsvægtfaktor**, w_R , som udtrykker den højere effektivitet, en dosis af given strålingstype har i forhold til den samme dosis af γ -stråling. Strålingsvægtfaktorer er fastsat ud fra en gennemgang af den eksisterende strålingsbiologiske viden, og de bruges til at vægte den absorberede dosis, så risikoen for stokastiske skader (senskader) fra en dosisudsættelse af forskellige strålingstyper kan beskrives. Tabel 5 viser ICRP's anbefalede værdier af w_R for forskellige strålingstyper.

Den vægtede absorberede dosis kaldes **ækvivalent dosis**, der defineres som produktet af den absorberede dosis, $D_{T,R}$, til vævet T fra strålingstype R og strålingsvægtfaktoren w_R :

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R} \quad (7)$$

Tabel 5. ICRP's strålingsvægtfaktorer, w_R , for forskellige strålingstyper.

Strålingstype og energiområde	Strålingsvægtfaktor, w_R
Fotoner, alle energier	1
Elektroner, alle energier	1
Neutroner, energi < 10 keV	5
10 keV - 100 keV	10
100 keV - 2 MeV	20
2 MeV - 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protoner, energi > 2 MeV	5
α -partikler, fissionsfragmenter og tunge atomkerner	20

Når strålingsdoser angives som ækvivalent doser, er risikoen pr. dosisenhed den samme uafhængigt af strålingstypen. Ækvivalent doser fra en strålingsudsættelse med forskellige strålingstyper kan derfor adderes, når den samlede risiko skal vurderes. Det har imidlertid ikke nogen mening at addere absorberede doser fra forskellige strålingsarter, når den samlede risiko fra en strålingsudsættelse af forskellige strålingstyper skal bestemmes.

Det skal understreges, at begrebet ækvivalent dosis *kun* kan anvendes i lavdosisområdet og *ikke* ved store doser, hvor der kan optræde deterministiske skader som f.eks. strålingssyge og hudrødmen, fordi strålingsvægtfaktorerne er fastsat på grundlag af stokastiske skader ved lave doser.

Strålingsvægtfaktoren, w_R , er en dimensionsløs størrelse. SI-enheden for ækvivalent dosis bliver derfor den samme som for absorberet dosis, nemlig J pr. kg, men den har fået navnet sievert (Sv).

Enheden J pr. kg har altså det specielle navn gray (Gy), når der er tale om absorberet dosis, og et andet specielt navn sievert (Sv), når der er tale om ækvivalent dosis.

Eksempel 1

En person har modtaget en absorberet helkropsdosis på 2 mGy fra γ -stråling og en absorberet helkropsdosis på 2 mGy fra hurtige neutroner (20 keV). Hvor stor bliver personens samlede ækvivalent dosis?

De absorberede doser omregnes først til ækvivalent doser ved at gange med strålingsvægtfaktorerne fra tabel 5:

$$\begin{aligned}
 H_{T,\gamma} &= w_\gamma \cdot D_{T,\gamma} \\
 &= 1 \cdot (2 \text{ mGy}) \\
 &= 2 \text{ mSv}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{T,n} &= w_n \cdot D_{T,n} \\
 &= 10 \cdot (2 \text{ mGy}) \\
 &= 20 \text{ mSv}
 \end{aligned}$$

Derefter lægges ækvivalent doserne sammen:

$$\begin{aligned} H_{T,\text{total}} &= H_{T,\gamma} + H_{T,n} \\ &= 2 \text{ mSv} + 20 \text{ mSv} \\ &= \underline{22 \text{ mSv}} \end{aligned}$$

Denne ækvivalent dosis bruges til risikovurdering fra strålingsudsættelsen. Her kan man altså *ikke* benytte summen af de absorberede doser (i eksemplet $2 \text{ mGy} + 2 \text{ mGy}$).

2.4 Effektiv dosis

Kroppens organer har forskellig strålingsfølsomhed pr. ækvivalent dosisenhed m.h.t. udvikling af stokastiske skader i form af kræftsygdomme. Sandsynligheden for en senskadevirkning pr. ækvivalent dosisenhed kan beskrives ved de såkaldte *vævsvægtfaktorer*, w_T , for organer og andre væv, T (tissue). Vævsvægtfaktorerne w_T er defineret som forholdet mellem risikoen for en senskadevirkning i det enkelte organ, r_T , og summen af alle (hele kroppen) organers risiko for senskade, r_{helkrop} , begge pr. ækvivalent dosisenhed:

$$w_T = \frac{r_T}{r_{\text{helkrop}}} \quad (8)$$

Vævsvægtfaktorerne er vist i tabel 6.

Tabel 6. Vævsvægtfaktorer, w_T , fra ICRP for forskellige strålingstyper.

Organer/væv	w_T
Kønskirtler (gonader)	0,20
Knoglemarv (rød)	0,12
Tyktarm	0,12
Lunger	0,12
Mave	0,12
Blære	0,05
Bryst	0,05
Lever	0,05
Spiserør	0,05
Skjoldbruskkirtel	0,05
Hud	0,01
Knogleoverflade	0,01
Resten	0,05
Hele kroppen	1,00

Vævsvægtfaktorerne angiver således risikofordelingen mellem organerne, når kroppen udsættes for en ensartet (homogen) bestråling. Det betyder, at hvis en senskade viser sig en gang i fremtiden, er sandsynligheden for at den viser sig i organ 1 lig med w_1 , i organ 2 lig med w_2 osv.

Vævsvægtfaktorerne er blevet bestemt på grundlag af bl.a. overlevende fra atombombeangrebene på Hiroshima og Nagasaki og større patientgrupper, der har været i strålingsterapi. De afspejler organernes relative bidrag til den samlede

senskade, som inkluderer dødelig og ikke-dødelig kræft i de nævnte organer samt alvorlige genetiske skader.

Hvis bestrålingen af kroppen er homogen, som den i mange tilfælde vil være, når der er tale om ekstern γ - eller neutronstråling, kan risikoen for en stokastisk skade udtrykkes ved risikofaktoren pr. ækvivalent dosisenhed, r_{helkrop} (pr. Sv) ganget med ækvivalent dosis.

Hvis bestrålingen af kroppens organer imidlertid er inhomogen, som det er tilfældet ved de fleste interne bestrålinger fra indtagne radionuklider (og for visse eksterne bestrålinger), er det nødvendigt med yderligere en størrelse for at angive den samlede risiko. Til dette formål har ICRP defineret (regne)størrelsen **effektiv dosis**, E .

Den effektive dosis, E , er defineret som summen af ækvivalent doserne til de enkelte organer ganget (vægtet) med deres respektive vævsvægtfaktorer:

$$\begin{aligned} E &= H_1 \cdot w_1 + H_2 \cdot w_2 + H_3 \cdot w_3 + \dots \\ &= \sum_T H_T \cdot w_T \end{aligned} \quad (9)$$

En delkropsdosis bliver således omsat til en risikoækvivalent helkropsdosis. Derved kan den samlede risiko fra inhomogene strålingsudsættelser angives som $r_{\text{helkrop}} \cdot E$. I komprimeret form kan begrebet vævsvægtfaktor udtrykkes som :

Vævsvægtfaktoren w_T bruges ved inhomogen bestråling (både ekstern og intern) af kroppens organer til beregning af en effektiv dosis, E , som alene er en *regnestørrelse* til brug for bestemmelse af risikoen fra en inhomogen strålingsudsættelse. Hvis denne beregnede effektive dosis, E , blev givet som en faktisk helkropsdosis, H ($H = E$), ville den *samlede* risiko herfra være *identisk* med den *samlede* risiko fra den inhomogene bestråling. Risikofordelingen mellem de enkelte organer ville imidlertid være *forskellig* for de to situationer.

2.5 Kollektiv dosis

Den kollektive dosis, S , til en gruppe personer, N , er defineret som summen af alle personernes indviddoser (effektive doser), E_i . Den kan derfor udtrykkes på grundlag af den gennemsnitlige indviddosis, $\bar{E}$, for alle N personer som:

$$S = \sum_{i=1}^N E_i = \bar{E} \cdot N \quad (10)$$

Inden for strålingsbeskyttelsen antages det, at risikoen for kræftskader og genetiske skader fra en strålingsudsættelse er lineær og uden tærskelværdi. Det antages altså, at der er en risiko selv fra små doser, og at risikoforøgelsen ved en given dosisforøgelse er uafhængig af, om personen i forvejen har modtaget en strålingsdosis. Den kollektive dosis vil under disse forudsætninger være et mål for den samlede forventede skadevirkning i den betragtede gruppe.

Eksempel 2

Den gennemsnitlige effektive indviddosis i Danmark fra baggrundsstrålingen er ca. 3 mSv pr. år, inklusiv den effektive dosis fra radon i huse. Den årlige kollektive dosis i den danske befolkning kan da beregnes til:

$$\begin{aligned} S &= \bar{E} \cdot N \\ &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ personer} \\ &= \underline{15 \cdot 10^3 \text{ person} \cdot \text{Sv}} \end{aligned}$$

Enheden for kollektiv dosis er Sv, men for at gøre opmærksom på at der er tale om en dosis, der er fordelt på flere personer, angives den i enheden person·Sv (på engelsk man·Sv).

2.6 Eksterne doser

Når personer bestråles med ioniserende stråling fra strålingskilder, som befinder sig uden for legemet, udsættes personen for **ekstern bestråling**, og den resulterende strålingsdosis kaldes derfor for en **ekstern dosis**. Strålingskilden kan f.eks. være radioaktivt materiale, et røntgenanlæg, en reaktor etc., og strålingsarten kan f.eks. være α -, β -, γ -, røntgen- eller neutronstråling. Strålingsdosis kan, afhængig af omstændighederne, være en helkropsdosis eller en delkropsdosis.

2.6.1 Delkropsbestråling

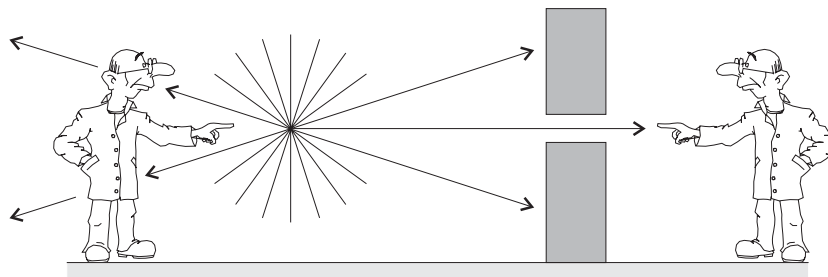
Hvis kroppen bestråles med β -stråling fra radioaktivt materiale, vil kun huden modtage en β -strålingsdosis som følge af β -strålings ringe rækkevidde i væv. Endvidere vil tøjet afskærme en stor del af strålingen, således at det kun er den udækkede del af huden, der får en β -dosis. Man taler her om en delkropsbestråling.

En delkropsbestråling kan også hidrøre fra γ - eller neutronstråling. Hvis strålingsfeltet er begrænset i udstrækning (f.eks. et snævert strålingsbeam fra en forsøgsreaktoropstilling eller et røntgenanlæg), eller hvis kroppen er delvis afskærmet, vil kun en del af kroppen blive bestrålet.

2.6.2 Helkropsbestråling

Helkropsbestråling er, som navnet siger, bestråling af hele legemet inklusive indre organer med gennemtrængende stråling, f.eks. γ -stråling. Ekstern bestråling med α - og β -stråling kan som følge af disse strålingsarters ringe gennemtrængningsevne i væv ikke forårsage helkropsdoser. Hvis hele kroppen udsættes for gennemtrængende stråling, vil der i hvert kg af kroppens væv (huden og indre organer) stort set absorberes den samme strålingsenergi. Den absorberede energi pr. kg kropsvæv er derfor et udtryk for helkropsdosis, jf. afsnit 2.2.

Figur 11 illustrerer forskellen mellem helkropsbestråling og delkropsbestråling fra en radioaktiv kilde, der udsender γ -stråling.



Figur 11. Ekstern helkrops- og delkropsbestråling fra en radioaktiv kilde, der udsender γ -stråling.

Gammadosishastigheden fra radioaktive stoffer kan beregnes, når aktiviteten er kendt. En velegnet størrelse til at beregne γ -dosishastigheden fra punktfornede kilder er den såkaldte *dosishastigheds-konstant*, Γ , der udtrykker dosishastigheden i en afstand på 1 meter fra en punktkilde på 1 Bq.

Hvis man har en aktivitetsmængde, Q , kan γ -dosishastigheden, $\dot{H}$, i afstanden a fra denne kilde, beregnes som:

$$\dot{H} = \Gamma \cdot \frac{Q}{a^2} \quad (11)$$

I tabel 7 er dosishastigheds-konstanten, Γ , vist for en række udvalgte radionuklider.

Tabel 7. Dosishastigheds-konstant for udvalgte radionuklider.

Radionuklid	Dosishastigheds-konstant, Γ	
	$\left[\frac{\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{Bq}} \right]$	$\left[\frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{MBq}} \right]$
^{24}Na	$1,19 \cdot 10^{-16}$	0,43
^{56}Mn	$5,60 \cdot 10^{-17}$	0,20
^{59}Fe	$4,07 \cdot 10^{-17}$	0,15
^{60}Co	$8,47 \cdot 10^{-17}$	0,31
^{65}Zn	$2,03 \cdot 10^{-17}$	0,073
^{82}Br	$9,49 \cdot 10^{-17}$	0,34
^{131}I	$1,41 \cdot 10^{-17}$	0,051
^{134}Cs	$5,75 \cdot 10^{-17}$	0,21
^{137}Cs	$2,10 \cdot 10^{-17}$	0,076
^{241}Am	$7,89 \cdot 10^{-19}$	0,0028

2.6.3 Bestemmelse af eksterne doser

Eksterne doser til personer kan bestemmes på forskellige måder. En måde er at måle dosishastigheden i luft, og på grundlag af opholdstiden at beregne den samlede dosis. Hvis eksempelvis ækvivalent γ -dosishastigheden i et homogent strålingsfelt fra en kilde måles til $\dot{H}$, kan ækvivalent dosis til hele kroppen, H_{helkrop} , ved ophold i strålingsfeltet i tidsrummet, T , beregnes af:

$$H_{\text{helkrop}} = \dot{H} \cdot T \quad (12)$$

Eksempel 3

En person opholder sig i en afstand på 2 meter fra en ^{60}Co kilde med en kildestyrke på 100 MBq. Hvor stor bliver dosis til denne person efter 8 timers ophold?

Ved hjælp af (11) beregnes først dosishastigheden, $\dot{H}$, i afstanden 2 meter:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= 8,47 \cdot 10^{-17} \frac{\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{s} \cdot \text{Bq}} \cdot \frac{10^8 \text{ Bq}}{2^2 \text{ m}^2} \\ &= 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/s} \end{aligned}$$

Den samlede helkropsdosis efter 8 timers ophold bliver:

$$\begin{aligned} H &= 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/s} \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot 8 \text{ h} \\ &= \underline{60 \mu\text{Sv}} \end{aligned}$$

En anden måde er at måle den akkumulerede dosis på et persondosimeter, jf. afsnit 3.4. For gennemtrængende stråling (γ - og neutronstråling) er denne dosis med god tilnærmelse et mål for helkropsdosis, forudsat at strålingsfeltet har været forholdsvist homogent.

De to metoder adskiller sig derved, at den første anvendes til at *forudsige* dosis fra et ophold i strålingsfeltet, hvorimod den anden metode giver den dosis, der allerede *er modtaget* ved et ophold i feltet.

2.7 Interne doser

Hvis en person har fået radioaktivt materiale ind i kroppen ved enten indånding eller spisning, udsættes personen for **intern bestråling**. Den resulterende dosis kaldes derfor en **intern dosis**. Da strålskilden altid vil være en radionuklid, er strålingsarten enten α -, β - og/eller γ -stråling. En intern dosis kan være meget inhomogen, dvs. afsættes i et enkelt organ (evt. flere organer) eller ret homogen, dvs. afsættes jævnt i alle kroppens organer og væv. Det afhænger i høj grad af grundstof og kemisk forbindelse af den indtagne aktivitet.

2.7.1 Optag og udskillelse

Optag af radioaktive stoffer i organismen sker hovedsageligt ved indånding af forurenede luft eller spisning af forurenede fødevarer. Optag kan også ske gennem huden eller via et åbent sår. Den dominerende indtagsvej ved arbejde med radioaktive stoffer er indånding af eventuelt forurenede luft, idet normal helsefysisk arbejdshygiejne vil hindre indtag via munden.

Efter indånding eller spisning af radioaktivt materiale vil det blive overført til kropsvæskerne og herfra til kroppens enkelte organer. Her vil det - afhængig af grundstof, kemisk forbindelse og fysisk halveringstid - forblive i kortere eller længere tid og derved bestråle de enkelte organer. Den biologiske udskillelse sker gennem urin, afføring, sved og udånding. Man kan her definere en biologisk halveringstid som den tid der forløber, indtil halvdelen af det indtagne materiale igen er udskilt fra kroppen.

Den biologiske transport og deponering i kroppens enkelte organer er primært afhængig af grundstof og kemisk forbindelse af det indtagne radioaktive materiale samt af indtagsmåden. Eksempelvis vil indånding af plutonium i en kemisk letopløselig form hovedsagelig koncentreres i knogler og lever ($\sim 90\%$). Indtages derimod en kemisk tungtopløselig forbindelse af plutonium ved spisning, vil kun en meget ringe del ($<0,001\%$) optages i knoglerne; resten vil hurtigt udskilles igen via mave-tarmkanalen. Et andet eksempel er jod, der altid er på en let opløselig form. Omkring 30% af den indåndede eller spiste mængde vil blive optaget i skjoldbruskkirtlen.

2.7.2 Committet ækvivalent dosis til organer

I den tid, det radioaktive materiale befinder sig i kroppens organer, vil det bestråle disse. For α - og β -stråling vil hele strålingsenergien afsættes i det organ, hvor aktiviteten sidder. En væsentlig del af γ -energien afsættes ligeledes i selve organet, men en del vil desuden afsættes i naboorganer, fordi γ -stråling er mere gennemtrængende end α - og β -stråling.

Ækvivalent dosishastigheden til organet vil efterhånden aftage i takt med, at aktiviteten henfalder og materialet udskilles fra kroppen. Den samlede (akkumulerede) ækvivalent dosis til organet vil blive afsat i den tid, hvor det aktive materiale er i kroppen.

Begrebet **committet ækvivalent dosis**, $H_T(50)$, er den akkumulerede ækvivalent dosis til et givet organ, T , over et tidsrum på 50 år efter indtaget. Dette tidsrum er valgt, fordi det nogenlunde svarer til et helt arbejdsliv. Den committede ækvivalent dosis kan imidlertid afsættes over et væsentligt kortere tidsrum. Som eksempel kan nævnes ^{131}I , som har en halveringstid på ca. 8 dage. Den committede ækvivalent dosis til skjoldbruskkirtlen vil her være afsat efter 30 - 40 dage. For langlivede 'knoglesøgere' som ^{90}Sr og ^{226}Ra vil den committede ækvivalent dosis afsættes over et meget langt tidsrum (større end 50 år).

2.7.3 Committet effektiv dosis

I afsnit 2.4 blev den effektive dosis, E , defineret ved hjælp af vævsvægtfaktorerne, w_T , og de enkelte organers ækvivalentdoser, H_T . Når disse organdoser er committede organdoser, $H_T(50)$, defineres den **committede effektive dosis**, $E(50)$, som:

$$E(50) = \sum_T w_T \cdot H_T(50) \quad (13)$$

Den committede effektive dosis, $E(50)$, er ligesom den effektive dosis, E , en regnestørrelse. I tabel 8 er vist værdier af den committede effektive dosis pr. indtaget aktivitetseenhed, $e(50)$, for en række radionuklider.

Tabel 8. Committet effektiv dosis pr. indtaget aktivitetseenhed, $e(50)$, ved indånding og spisning af forskellige radionuklider.

Radionuklid	Committet, effektiv dosis, $e(50)$	
	[mSv/MBq]	
	Indånding	Spisning
^3H	0,02	0,02
^{32}P	1	2
^{35}S	1	0,2
^{60}Co	10	3
^{82}Br	0,4	0,5
^{90}Sr	20	30
^{106}Ru	10	7
^{131}I	8	20
^{137}Cs	5	10
^{226}Ra	3 000	300
^{238}U	500	40
^{239}Pu	50 000	300

Eksempel 4

En person spiser ugentligt 1 kg oksekød, der er forurenet med ^{137}Cs . Koncentrationen af aktivitet i kødet er 600 Bq/kg. Hvor stor bliver den committede effektive dosis fra et års kost?

Det samlede indtag, I , af ^{137}Cs beregnes fra 52 ugers kost til:

$$I = 52 \cdot 1 \text{ kg} \cdot 600 \text{ Bq/kg} = 31200 \text{ Bq}$$

Den committede effektive dosis, $E(50)$, bliver da:

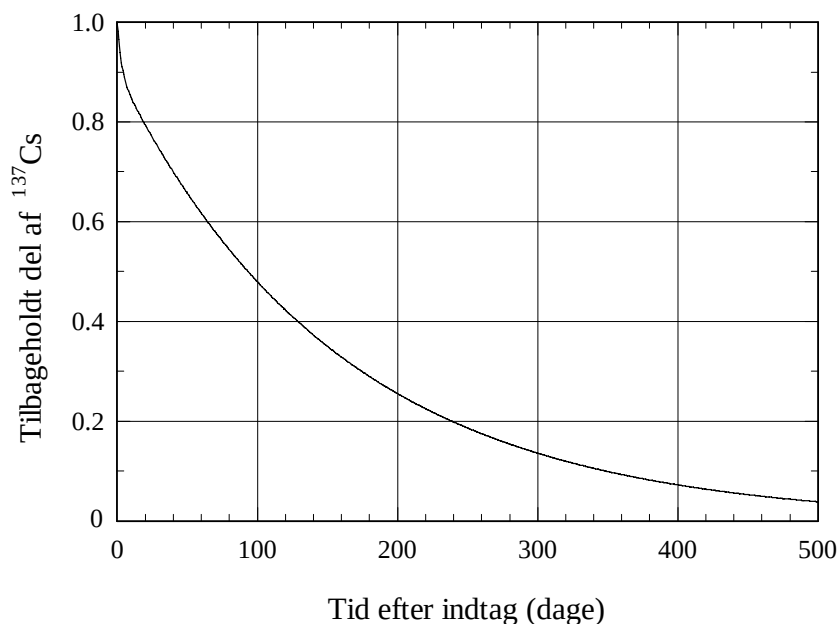
$$\begin{aligned} E(50) &= I \cdot e(50) \\ &= 31200 \text{ Bq} \cdot 10 \text{ mSv/MBq} \\ &\cong \underline{0,3 \text{ mSv}} \end{aligned}$$

Den committede effektive dosis vil være afsat efter 1 - 2 år, da den biologiske halveringstid for cæsium i mennesker er 80 - 100 dage.

2.7.4 Bestemmelse af interne doser

Hvis en person har indtaget en ukendt mængde af et radioaktivt stof, enten ved indånding eller spisning, kan den committede effektive dosis bestemmes på to forskellige måder.

Den første metode (tilbageholdelsesmetoden) kan kun anvendes for radionuklider, der udsender γ -stråling. Personen anbringes i en såkaldt helkropstæller, som er en afskærmet måleopstilling med enten en halvlederdetektor eller en scintillationsdetektor (se afsnit 3.3), der måler den *udsendte* γ -stråling fra aktiviteten i kroppen. Med kendskab til hvorledes en given radionuklid fordeles sig i kroppen, og hvor stor en brøkdel, der er tilbage i kroppen til forskellige tidspunkter efter indtag, kan indtagets størrelse beregnes. På figur 12 er vist, hvor stor en brøkdel af et indtag af ^{137}Cs , der er tilbage i kroppen efter indtagstidspunktet.



Figur 12. Tilbageholdt aktivitet af ^{137}Cs pr. indtaget aktivitetsmængde til forskellige tider efter indtaget.

Eksempel 5

En person har via kosten fået ^{137}Cs i kroppen. Personen måles i en helkropstæller 100 dage efter indtaget, og kropsindholdet bestemmes til 20 000 Bq. Hvor stor bliver den committede effektive dosis fra dette indtag?

Indtaget, I , af ^{137}Cs bestemmes ved hjælp af figur 12. Efter 100 dage er den tilbageholdte del af ^{137}Cs i kroppen ca. 0,5, og indtaget kan da beregnes til:

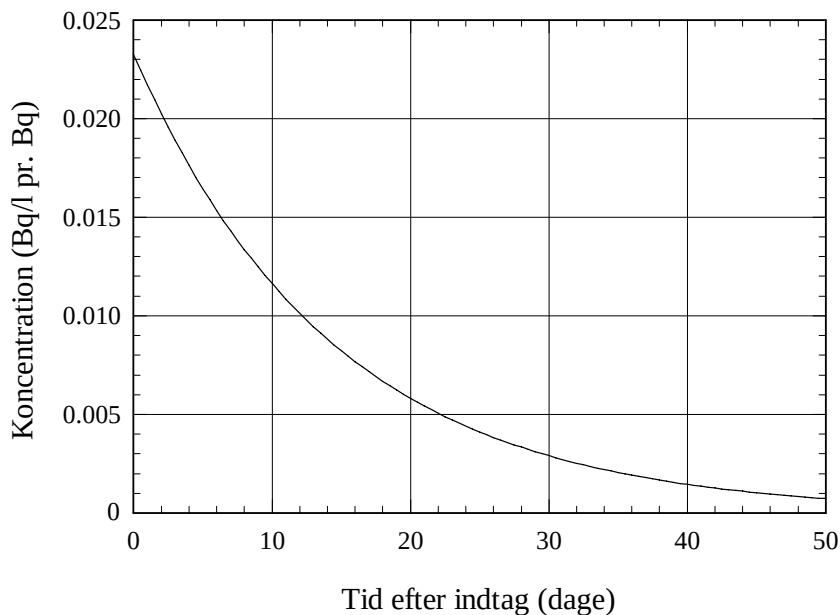
$$I = 20000 \text{ Bq} / 0,5 = 40000 \text{ Bq}$$

Den committede effektive dosis, $E(50)$, bliver da:

$$\begin{aligned} E(50) &= I \cdot e(50) \\ &= 40000 \text{ Bq} \cdot 10 \text{ mSv/MBq} \\ &\cong \underline{0,4 \text{ mSv}} \end{aligned}$$

Med den anden metode (udskillelsesmetoden) bestemmes udskillelshastigheden af den indtagne aktivitet ved at måle aktivitetskoncentrationen i eksempelvis urinsprøver afgivet til forskellige tider efter indtaget. Udskillelshastigheden og koncentrationen i urinen af en given radionuklid er proportional med indholdet af

aktivitet i kroppen. Derfor vil koncentrationen i urinen aftage i takt med, at kroppens indhold af aktivitet aftager. På figur 13 er vist, hvor stor en koncentration af tritium pr. indtaget aktivitetsmængde, der er i urinen efter indtagstidspunktet.



Figur 13. Koncentration af tritium i urin pr. indtaget aktivitetsmængde til forskellige tider efter indtaget.

Eksempel 6

En person har indåndet tritium som tritieret vand. En urinprøve afgivet 20 dage efter indåndingen analyseres for tritiumindhold, og der måles en tritiumkoncentration i urinen på 10 000 Bq/l. Hvor stor bliver den committede effektive dosis fra dette indtag?

Indtaget, I , af tritium bestemmes ved hjælp af figur 13. Efter 20 dage er koncentrationen af tritium i urinen pr. indtaget Bq lig med 0,006 Bq/l pr. Bq indtaget. Indtaget kan da beregnes til:

$$I = 10000 \text{ Bq/l} / 0,006 \text{ Bq/l pr. Bq} = 1\,670\,000 \text{ Bq}$$

Den committede effektive dosis, $E(50)$, bliver da:

$$\begin{aligned} E(50) &= I \cdot e(50) \\ &= 1\,670\,000 \text{ Bq} \cdot 0,02 \text{ mSv/MBq} \\ &\cong \underline{33 \mu\text{Sv}} \end{aligned}$$

3 Målemetoder

Et menneskes sanser kan ikke opfatte alle de påvirkninger, det udsættes for. Således kan man ikke opfatte, hvor stor en mængde tungmetaller, der eventuelt er i føden; man kan heller ikke opfatte magnetfelter eller felter af ioniserende stråling. Man er derfor henvist til at benytte instrumenter til at detektere og måle sådanne stoffer og felter.

Til måling af ioniserende stråling og bestemmelse af aktiviteten af radioaktive stoffer er der udviklet mange typer af instrumenter. Det grundlæggende krav til et sådant instrument er, at instrumentets visning (respons) er proportional med intensiteten af strålingen. Princippet i alle de forskellige typer af instrumenter baserer sig på, at ioniserende stråling vekselvirker med stof. En måling er en detektion af disse vekselvirkninger: enten af den frembragte ionisering eller af den absorberede energi i detektoren (instrument eller dosimeter). Målingen angiver for eksempel dosishastighed eller dosis til personer, som opholder sig i et strålingsfelt.

3.1 Måling af dosishastighed

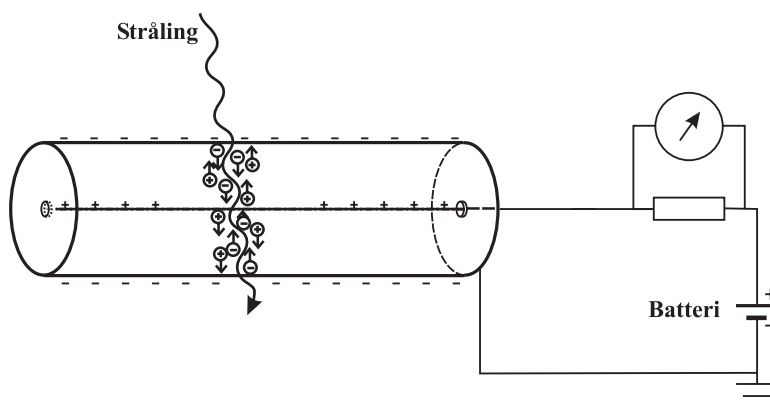
Til bestemmelse af γ -dosishastigheden i luft anvendes følgende instrumenter:

- ionkamre
- GM (Geiger-Müller)-detektorer
- scintillationsdetektorer

Fælles for disse instrumenter er, at de omsætter den ionisering, der sker i detektoren pr. tidsenhed, til en strøm, der kan omsættes til instrumentvisning. Instrumentets visning justeres ved en kalibrering, som er en måling i et kendt strålingsfelt.

3.1.1 Ionkammer

Et ionkammer er en gasfyldt detektor, hvor gassen normalt er atmosfærisk luft. Når stråling vekselvirker med stof, ioniseres dette (se afsnit 1.6). I de gasser, der anvendes i detektorer, vil de frembragte ionpar bestå af positive ioner og frie, negative elektroner. Disse er mobile og påvirkelige af et elektrisk felt, og dette kan udnyttes til at detektere strålingen.



Figur 14. Principskitse af en gasfyldt detektor. A: indtrængende stråling, B: midterelektrode, C: omgivende væg og ydre elektrode.

Mange ionkamre benytter en cylindrisk geometri som illustreret på figur 14. Den omgivende væg fungerer som en negativ elektrode, mens en metaltråd eller -stav, anbragt i midten af kammeret, udgør en positiv elektrode. Midterelektroden er forbundet til elektronikken gennem en isoleret gennemføring. Når stråling trænger ind i kammeret, vil den vekselvirke med molekylerne i gassen. Der vil derved dannes ionpar bestående af tunge, positivt ladede ioner og frie, negativt ladede elektroner.

Ved at påføre elektroderne en spændingsforskel dannes et elektrisk felt i kammeret. Feltet vil påvirke de ladede ioner og elektroner og trække dem mod henholdsvis væg og elektrode, hvorved der skabes en strøm. Strømmen omsættes af elektronikken til instrumentvisning.

I et ionkammer opsamles netop den ladning, som er skabt af ioniseringen. Hvis kammergassen udsættes for en konstant bestråling, vil dannelsen af ionpar pr. tidsenhed blive konstant. Den konstante strøm, der så skabes, vil være et præcist mål for ioniseringshastigheden i kammeret og dermed for dosishastigheden. Figur 15 viser et håndinstrument med ionkammer til måling af dosishastighed.



Figur 15. Ionkammer til måling af dosishastighed. På kassens underside er der en skærm af 5 mm aluminium, der dækker et tyndt folievindue; uden skærmen for vinduet vil også β -stråling blive detekteret. Skalaens visning kan indstilles med en omskifter. På det viste instrument svarer fuldt udslag i det mest følsomme område til $50 \mu\text{Sv/h}$.

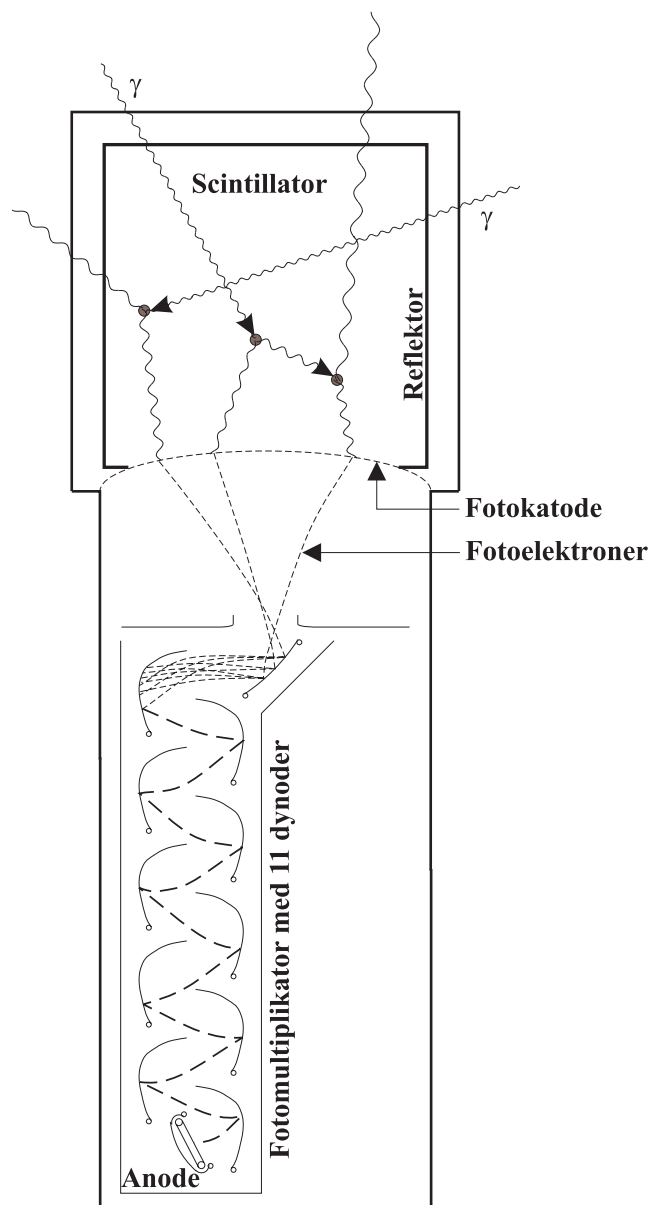
3.1.2 GM (Geiger-Müller)-detektor

Geiger-Müller-detektoren er den ældste monitortype (fra 1928), og princippet anvendes stadig. Dette skyldes blandt andet, at den er billig at fremstille.

En GM-detektor er en gasfyldt detektor, og hyppigt er den udformet som vist på figur 14. Den elektriske feltstyrke (spænding) er imidlertid så høj, at de elektroner, som den ioniserende stråling skaber ved passage af kammeret, også vil ionisere og skabe sekundære elektroner, der igen kan ionisere, osv. I alt skabes en ladningskaskade, der er så kraftig, at den fylder hele kammeret. Enhver strålingsvekselvirkning i kammeret vil således resultere i en samlet kaskade. Den samlede ladning, der skabes i kammeret, vil altid have samme størrelse, og den er derfor uafhængig af strålingsart og -energi. GM-detektorens følsomhed er væsentlig større end ionkammerets, og det gør den velegnet til måling af lave dosishastigheder.

3.1.3 Scintillationsdetektor

At scintillere betyder at funkle eller udsende lys. En scintillator fremstilles af et gennemsigtigt materiale, der udsender lys som følge af ioniserende strålings vekselvirkning med materialet. Det udsendte lys kan opsamles af en fotokatode og omdannes til en elektrisk impuls i en fotomultiplikator, og derfor kan en scintillator anvendes til detektering af ioniserende stråling. I de fleste håndinstrumenter med scintillatorer er det kun muligt at detektere γ -stråling, da kun denne kan trænge ind til selve scintillatoren.



Figur 16. Principskitse af en scintillator med fotomultiplikator. Øverst ses scintillatoren omgivet af lysskærm, der på indersiden har et reflekterende lag. Scintillatormaterialet udsender lys, når det ioniseres. Når lyset rammer fotokaten, løsriver der elektroner fra denne. Et elektrisk felt trækker elektronerne over til den første dynode. Når elektroner rammer en dynode, løsriver et antal (3 - 10) elektroner, og disse trækkes så af et elektrisk felt over til den næste dynode. Således kan en elektron fra fotokaten resultere i ca. 10^7 elektroner ved anoden, som er anbragt efter den sidste dynode.

En scintillator kan have mange forskellige udformninger, og den kan være en krystal, et plastmateriale, en gas eller en væske. Figur 16 viser et snit gennem en scintillationsdetektor til detektering af γ -stråling.

Når γ -stråling vekselvirker i scintillatoren overfører de indkommende fotoner deres energi helt eller delvist til elektroner (se afsnit 1.6). Den største energi-overførsel sker ved en fotoelektrisk proces, hvor hele fotonenergien overføres til en elektron, som bliver helt nedbremset i scintillatoren. Den løsrevne elektron vil lave et ioniseringsspor i materialet, og hvert ionpar vil ved nedbremsning resultere i udsendelse af lys. Den samlede lysmængde vil således være proportional med fotonens energi. Ved en Comptonspredning bliver kun en del af fotonens energi overført til en elektron.

Krystallen er omgivet af et lystæt folie, der er reflekterende på indersiden. Således vil alt det lys, der er dannet i krystallen nå frem til lysdetektoren (fotokatoden). I fotokatoden vil lyset forårsage løsrivelse af elektroner, som derfor kaldes fotoelektroner. En fotomultiplikator er opbygget af en række såkaldte dynoder. Elektronerne accelereres fra en dynode til den næste af et elektrisk felt. Fra fotokatoden accelereres de løsrevne elektroner over til den første dynode, hvor de hver løsriver 3 - 10 elektroner, og så videre igennem hele fotomultiplikatoren. I alt kan en fotomultiplikator forstærke elektronstrømmen ca. 10^7 gange. Elektronerne, der ankommer til anoden, vil give en strøm i den tilsluttede elektronik, og strømmen er et udtryk for dosishastigheden. En scintillationsdetektorer mere følsom overfor γ -stråling end en gasfyldt detektor, idet der er væsentlig større sandsynlighed for vekselvirkning i et fast eller flydende stof på grund af den større massetæthed.

3.2 Måling af kontamination

Kontamination er i helsefysisk henseende forurening med radioaktive stoffer. Kontamination kan forekomme på overflader f.eks. borde, gulve eller hud; den kan også forekomme i luft eller i materialer som f.eks. vand, biologisk væv eller mad.

Overfladekontamination

Til bestemmelse af eventuel kontamination på en overflade kan man dels anvende detektorer, der "ser" direkte på overfladen, og dels kan man tage en aftørningsprøve (smeartest), der så måles i laboratoriet. Ved begge metoder kan der anvendes følgende instrumenter:

- proportionaldetektorer (beskrevet i afsnit 3.2.1)
- GM-detektorer (beskrevet i afsnit 3.2.2)

For at kunne detektere små mængder af aktivitet på en overflade er det nødvendigt at anvende et instrument med høj følsomhed. For at få et mål for mængden af aktivitet, er det nødvendigt at registrere de enkelte henfald. Dette gøres ved at tælle antallet af partikler, der pr. tidsenhed vekselvirker i detektoren. Instrumenterne skal derfor være bygget til at registrere de enkelte partiklers ionisering i kammeret hver for sig pr. tidsenhed. Kontaminationsdetektorer kalibreres med kendte overfladekilder af α - og β -aktivitet.

Ved kontaminationsmålinger bestemmer man mængden af α - og/eller β -aktivitet pr. arealenhed, men man får ingen oplysning om hvilke radionuklider, der er tilstede.

Det er også muligt at bestemme en overfladekontamination ved hjælp af en aftørningsprøve (smeartest). En sådan prøve tages ved at aftørre et udmålt areal med et filterpapir, og derefter at bestemme den aktivitet, der er opsamlet på filterpapiret. Det er så muligt at beregne, hvor meget aktivitet der er fjernet pr.

arealenhed. Hvis man kender aftørringseffektiviteten kan man bestemme den oprindelige kontamination (aktivitet pr arealenhed). En aftørringsprøve kan måles i en α - eller β -tæller, og herved bestemmes α - eller β -aktiviteten uden nuklid-specifikation. Prøven kan også analyseres ved hjælp af et α - eller γ -spektrometer. Herved fås oplysning om hvilke radionuklider prøven indeholder, hvis nukliderne udsender α - eller γ -stråling.

Luft- og materialekontamination

Til bestemmelse af aktivitet i luft udtages prøver ved at suge luften gennem et filter, der tilbageholder partikler, herunder radioaktive partikler. Filteret måles herefter for indhold af α - og β -aktivitet med:

- proportionaldetektorer (se afsnit 3.2.1)
- GM-detektorer (se afsnit 3.2.2)

Til bestemmelse af indholdet specificeret på radionuklider i en luft- eller materialeprøve, anvendes normalt en opstilling med:

- halvlederdetektorer (se afsnit 3.3.1)
- scintillationsdetektorer (se afsnit 3.3.2)

3.2.1 Proportionaldetektor

En proportionaldetektor er en gasfyldt detektor, hvor det elektriske felt (spænding) er så stort, at de frie elektroner, som ioniserende stråling skaber i detektoren, bliver accelereret så meget, at de kan skabe nye ionpar. Den samlede ladning, der skabes, er større end, men proportional med den ladning, der blev dannet ved den primære ionisering. En ladningsforstærkning på 100 til 100 000 gange er almindelig. Til måling af lave kontaminationsniveauer af α - og β -aktiviteter, der kun skaber få primære ioner i detektoren, er en proportionaldetektor velegnet.

α -partikler vil skabe korte, høje ladningsimpulser, mens β -partikler vil skabe lange, flade ladningsimpulser. Instrumentet kan separere impulserne efter højde og man kan derfor skelne mellem α - og β -aktivitet.



Figur 17. Bordmonitor. Proben (proportionaldetektoren) ses fra vinduessiden, hvor vinduet er beskyttet med et trådnæt. Monitoren har to viserinstrumenter til visning af henholdsvis α - og β -aktivitet. Skalaerne angiver overfladekontaminationsniveauerne i Bq/m^2 .

Figur 17 viser en bordmonitor, hvor proportionalkammeret er indbygget i en flad probe; kammerets tynde vindue er beskyttet af et trådgitter. Monitoren har to viserinstrumenter til samtidig visning af henholdsvis α - og β -aktivitet. Skalaerne angiver kontaminationsniveauerne i Bq/m^2 .

3.2.2 GM-detektor

I en Geiger-Müller-detektor vil selv lave strålingsintensiteter blive registreret. GM-detektoren kan derfor anvendes som impulstæller til måling af β -aktivitet, herunder kontamination. For at få registreret α - og β -partikler er det nødvendigt, at de kan trænge ind i detektorvolumenet; dette kan man opnå med en detektor med et tyndt vindue. Måling af lavenergetiske β -partikler (ca. 20 keV) kræver f.eks., at tykkelsen af vinduet i GM-kammeret højst må være ca. 10 μm (om β -partiklers rækkevidde, se afsnit 1.6.1).

Figur 18 viser en GM-endevindueprobe med et viserinstrument (rate meter).



Figur 18. Kontaminationsmonitor. Proben med GM-detektoren ses fra vinduessiden, hvor vinduet er beskyttet med et trådnæt. Skalaen angiver "CPM" (counts per minute).

Figur 19 viser en opstilling til måling af prøver på filterpapir, som kan være aftørningsprøver, luftprøver eller en indampet vandprøve.



Figur 19. Opstilling til måling af aktivitet i aftørningsprøver, luftprøver eller inddampede prøver. Detektoren er en GM-detektor, som er afskærmet med jern. Filterpapiret anbringes i en skuffe nederst. Instrumentet (scaleren) til højre akkumulerer tællingerne, men kan også vise tællinger pr. tidsenhed.

3.3 Nuklid- og aktivitetsbestemmelse

De fleste radionuklider udsender γ -stråling ved henfald, og hver radionuklid har sine karakteristiske γ -energier (energispektrum). Ved at bestemme energierne af den udsendte γ -stråling fra en prøve, er det muligt at bestemme hvilke radionuklider, der er tilstede i prøven. Tilsvarende kan man analysere γ -energierne i et strålingsfelt og på grundlag heraf bestemme, hvilke radionuklider, der giver

strålingsfeltet. Også for α -aktive nuklider er α -energiene karakteristiske for de enkelte nuklider, og et α -spektrum kan tilsvarende give oplysning om tilstedeværende α -emittere. Tællehastigheden ved de enkelte karakteristiske energier er et mål for aktiviteten af den pågældende nuklid.

En prøve kan være en ballon fyldt med luft, et filterpapir (luft- eller aftørningsprøve), en beholder med væske, et stykke metal, der har været bestrålet i en reaktor, en person og meget andet.

Til bestemmelse af radionuklider og disses aktivitet anvendes følgende instrumenter:

- halvlederdetektorer
- scintillatorer

3.3.1 Halvlederdetektor

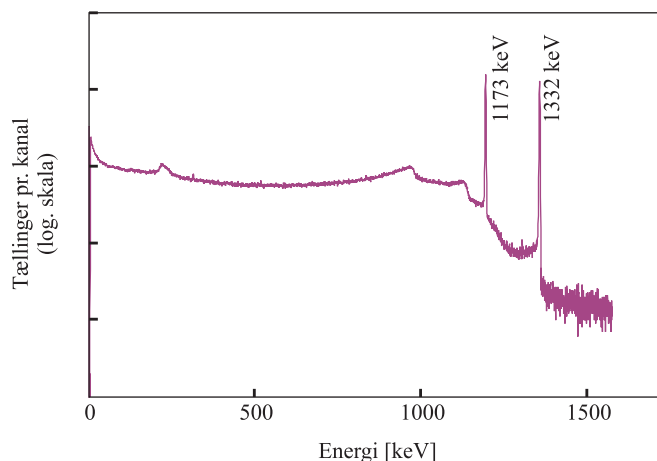
Halvlederdetektorer fremstilles normalt af silicium- eller germaniumkrystaller. De bruges hovedsagelig til α - og γ -spektrometri, især hvor der er brug for en god energiopløsning.

Halvlederdetektorers specielle egenskaber skyldes elektronenergiforholdene i halvlederkrystaller.

Germaniumdetektor og γ -spektrometri.

Germaniumdetektorer anvendes til γ -spektrometriske analyser. Højden af spændingsimpulserne, som er resultatet af fotonernes ionisering i detektoren, vil være proportional med fotonernes energi, og man kan derfor ved sortering efter højde finde ud af hvilke γ -energier, de detekterede fotoner har. For at opnå størst mulig følsomhed bruges så store krystaller, som det er fysisk (og økonomisk) muligt.

Tælling og sortering sker i en multikanalanalysator, hvor registrering af fotoner med en bestemt energi (impulshøjde) sker i en til denne energi svarende kanal. Kanals indhold bliver således lig med summen af registrerede impulser svarende til den givne energi. Da antallet af elektroner, der bidrager til en ladningsimpuls, har statistiske fluktuationer, vil registreringen af impulser fra fotoner med en given γ -energi blive delt på flere nabokanaler. For en germaniumdetektor er bredden af en γ -energitop typisk nogle få keV. Figur 20 viser et γ -spektrum af ^{60}Co optaget med en Ge-kryстал.



Figur 20. ^{60}Co -spektrum optaget med en germaniumdetektor. De to fototoppe fra γ -linierne på 1173 keV og 1332 keV ses tydeligt.

De enkelte toppes placering i spektret giver γ -energiene, og tælleintensiteten i toppene giver et mål for aktiviteten af de radionuklider, der er tilstede i prøven.

Siliciumdetektor og α -spektrometri.

Tynde siliciumdetektorer anvendes i udstrakt grad til α -spektrometri. α -partikler afsætter deres energi ved direkte ionisering, det vil sige, at partiklerne selv skaber et "ioniserings-spor" i detektoren. α -partikler udsendes ligesom fotoner med en vel-defineret energi, og man kan derfor analysere et α -spektrum på samme måde som et γ -spektrum og derved få oplysning om, hvilke α -aktive radionuklider prøven indeholder og disses aktivitet. Prøvetilberedning og måling er dog mere kompliceret end for γ -spektrometri.

3.3.2 Scintillationsdetektor

Ioniseringen i en scintillatorkrystal vil resultere i en spændingsimpuls (se afsnit 3.1.3), og spændingsimpulsernes højde kan måles og registreres i en multikanalanalysator. Da impulshøjden er proportional med lysmængden og dermed med de indkommende fotoners energi, kan man med en scintillator få et billede af γ -strålingens energifordeling (γ -spektrum). De enkelte toppes placering i spektret giver γ -energiene, og tælleintensiteten i toppene giver et mål for aktiviteten af de radionuklider, der er tilstede i prøven.

Scintillatorer kan udformes til enhver ønsket facon. Scintillatorer, specielt NaI-krystaller, har været meget brugt til røntgen- og γ -spektrometri, men de bliver mere og mere afløst af halvlederdetektorer af germanium på grund af disses bedre energiopløsning. I et γ -spektrum optaget med en NaI-scintillator er en energitop ca. 100 keV bred, og det kan derfor være svært at skelne de enkelte toppe fra hinanden. NaI-detektorer er dog stadig i brug, da de er billigere end germanium-detektorer og i modsætning til disse ikke kræver køling.

Til detektering af α -partikler og til α -spektroskopi anvendes zink-sulfid (ZnS)-scintillatorer eller væskescintillatorer. Til detektering af β -partikler kan anvendes plast- eller væskescintillatorer. I væskescintillatorer opløses prøven i scintillationsvæsken, og prøven bliver således "anbragt" i selve scintillatormaterialet.

3.3.3 Helkropsmåling

En helkropsmåling er en bestemmelse af aktiviteten i et menneske. Kendskab til hvilke radionuklider en person indeholder, og hvor stor aktiviteten af disse er, gør det muligt at beregne, hvor stor en intern dosis (committet effektiv dosis) personen vil få fra disse radionuklider.

Risø's "opstilling" til helkropsmålinger er anbragt i et gammelt kanontårn, der er gravet et par etager ned i jorden for at få lav baggrund. Personen, der skal måles, anbringes i en speciel stol, så positionen er veldefineret. Over personen placeres en germaniumdetektor eller en NaI-scintillator.

3.3.4 Urinprøver

Til bestemmelse af β -aktivitet i væsker anvendes

- β -tællere (GM-detektorer og NaI-scintillatorer)
- væskescintillatorer
- siliciumdetektorer

Personale, der arbejder i områder, hvor de kan få et indtag af radionuklider, afgiver regelmæssigt en urinprøve, som bliver målt for indhold af β -aktivitet. Det sker ved at inddampe urinprøven og måle den i en β -tæller. En anden metode er at opblande prøven i en scintillationsvæske, og derefter måle ioniseringen i væsken og dermed indholdet af β -aktivitet i prøven. Dette princip bruges også til at måle tritiumindholdet i forskellige systemer på DR 3.

3.4 Dosisbestemmelse

Til bestemmelse af eksterne persondoser anvendes et akkumulerende system, som kan være:

- film
- TL-piller
- GM-detektorer
- siliciumdetektorer

Nøjagtigheden af en persondosis, der er registreret af et dosimeter, afhænger bl.a. af, hvordan dosimeteret har siddet på personen og dennes placering i strålingsfeltet.

3.4.1 Film

Brugen af almindelige film til detektering af ioniserende stråling går helt tilbage til opdagelsen af røntgenstråling, og film har stadig stor udbredelse til persondosimetri. Ioniserende stråling påvirker en fotografisk film på samme måde som synligt lys. En film, der har været udsat for ioniserende stråling, vil være sværtet, og graden af sværtning svarer til den absorberede energi og dermed dosis. Der er en næsten lineær sammenhæng mellem dosis og sværtning.

Filmdosimetre har den fordel, at dosis ikke slettes ved udlæsning, således at man i en del år stadig kan aflæse dosis. En dosimeterfilm anbringes i en holder, som er en vigtig del af dosimetret, idet den indeholder filtre af forskellige materialer, som benyttes til at få oplysninger om energisammensætningen af den aktuelle γ -stråling. Ved hjælp af et hul i holderen (et såkaldt β -vindue) kan man vurdere hvor stor en del af en dosis, der skyldes β -stråling. En bestrålet film aflæses og bedømmes ved sammenligning med en film bestrålet med en kendt dosis (kalibrering). På figur 21 er vist et filmdosimeter til venstre.



Figur 21. Persondosimetre. Til venstre: et filmdosimeter, som det anvendes af SIS (Statens Institut for Strålehygiejne) og til højre: et TL-dosimeter, som det bruges på Risø.

3.4.2 Termoluminescens-piller (TL-piller)

I nogle uorganiske materialer vil den energi, som ioniserende stråling ved vekselvirkninger tilfører materialets elektroner, "løfte" elektronerne op i en energitilstand, hvor de bliver fanget i "fælder" i strukturen. Ved stuetemperatur er der kun ringe sandsynlighed for, at termiske svingninger kan løfte de fangne elektroner ud af fælderne igen. Ved kraftig varmepåvirkning kan elektronerne frigives, og de vil falde tilbage til deres normale tilstand under afgivelse af energi i form af lys.

TL-materialerne lagrer information om strålingsdosis ved akkumulering af fangne elektroner i takt med, at materialet bestråles. Den strålingsdosis, som TL-materialet (pillen) har været udsat for, resulterer i et antal fangne elektroner. Udlæsning af en TL-pille foregår ved at tilføre pillematerialet energi ved opvarmning, hvorved elektronerne løftes ud af fælden. Opvarmningen sker over et tidsrum på ca. 10 - 15 sekunder. Under opvarmningen detekteres det udsendte lys ved hjælp af en fotomultiplikator.

Den totale lysudsendelse er udtryk for et antal frigivne elektroner og er derfor proportional med strålingsdosis til pillen. Når pillen er udlæst, har den mistet informationen om alle tidligere eksponeringer. Nulstilling af en TL-pille foregår ved udglødning (annealing), der er en opvarmningsproces, i hvilken man sikrer sig, at alle fangne elektroner frigives.

TL-piller er uhyre velegnede til dosimetre, dels fordi de kan være meget små, og dels fordi de kan anvendes i et stort dosisinterval (10^{-5} - 10^4 Gy).

De fleste keramiske materialer virker som TL-materialer. Derfor kan man for eksempel datere gamle potteskår ved at udlæse den dosis, som potteskåret har modtaget fra baggrundsstrålingen, siden det blev brændt. Når man har udlæst dosissignalet, kan man ved hjælp af en kalibrering af materialet få en ret nøjagtig bestemmelse af dosis. Når intensiteten af baggrundsstrålingen er kendt, kan materialets alder udregnes. Ved de sidste revisioner af doserne til befolkningerne i Hiroshima og Nagasaki har man undersøgt de naturlige TL-materialer, der findes i bropiller og andre bestrålede bygningsdele, der stadig eksisterer.

Risø's TL-badges (se figur 21) indeholder fire piller. Dosimeterholderen er udformet som en flad æske bestående af en 1 mm tyk aluminiumsplade og omgivet af en 1 mm tyk plastikplade. I begge plader er der et hul uden filter ind til den pille, der skal registrere β - + γ -dosis. En anden pille skal registrere den gennemtrængende stråling (γ -stråling), og en tredje skal registrere dosis fra termiske neutroner. Følsomheden pr. dosisenhed for termiske neutroner er en faktor 100 højere end for γ -stråling. Den fjerde pille bruges som en reservepille, der kan udlæses, hvis der er problemer med udlæseudstyret under udlæsning af de andre piller. Den kan også bruges som kontrol, hvis der registreres en usædvanlig høj dosis på en af de andre piller, således at en sådan usædvanlig dosisregistrering bliver godt underbygget.

3.4.3 Elektronisk lommedosimeter

Der er udviklet flere dosimetre, der anvender små GM-rør eller små siliciumdetektorer, og som elektronisk akkumulerer informationen om ioniseringen. Figur 22 viser et af disse dosimetre.



Figur 22. Elektronisk lommedosimeter med digital udlæsning. Dosisregistreringen sker ved ionisering i et lille GM-rør. Det viste dosimeter har modtaget en dosis på 0,105 mSv

Dosimetrene kan alle registrere eksterne γ -doser, og nogle har en speciel tynd væg, der også tillader registrering af β -stråling. Dosimetrene har alle en visning af den akkumulerede dosis, således at bæreren hele tiden kan følge sin dosis. Ved endt brug af dosimetret udlæses det i en computerenhed.

Fordelen ved de elektroniske lommedosimetre er, at man kan følge persondoserne under arbejdsoperationer. Det er muligt at indstille et eller flere alarmniveauer, som udløser en hyletone. Nogle dosimetre har en hørbar angivelse af dosishastighed ved en pippelyd, hvor frekvensen af pippene er proportional med dosishastigheden.

4 Strålingsbiologi

Det gælder for ioniserende stråling, ligesom for andre såkaldte mutagene miljøgifte, at den biologiske virkning beror på en generel forstyrrelse af cellens fint afbalancerede biokemiske ligevægt.

Den skadelige virkning af ioniserende stråling på levende organismer skyldes stort set en af tre grundlæggende biologiske mekanismer:

1. celledød
2. multiplikation af skadede celler, der bliver utilstrækkeligt kontrolleret af de normale biologiske processer med cancerceller som resultat
3. multiplikation af skadede kønsceller, der kan medføre, at der fødes børn med arvelige sygdomme

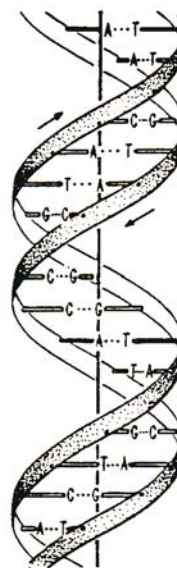
Skader som følge af 1 kaldes **deterministiske**, mens skader som følge af 2 og 3 kaldes **stokastiske**. Skader, der rammer det bestrålede individ, kaldes **somatiske** (1 og 2). Skader, der rammer efterkommere af det bestrålede individ, kaldes **genetiske** (3).

4.1 Cellebiologi og strålingsskader

4.1.1 Cellebiologi

Et menneske består af et meget stort antal celler, ca. 40 000 milliarder. Cellen styres fra cellekernen. Dette sker ved, at der fra cellekernen sendes en række **RNA-molekyler** til cellens "produktionsenheder". RNA-molekylerne er delvise kopier af kernens egne store **DNA-molekyler**. DNA-molekylerne, der udgør menneskets arvmasse, kopieres ved celledeling og går igen i begge datterceller efter en celledeling.

DNA-molekylerne består af en dobbeltspiral, hvor spiralerne består af fosfatgrupper + deoxyribose (kulhydrat) + fosfatgrupper + deoxyribose + osv., mens hvert "trappetrin" består af to organiske baser. Disse kan enten være **adenin** og **thymine** eller **guanin** og **cytosin**, og det er disse A-T-par og G-C-par, der danner trappetrinnene hele DNA-molekylet igennem. Et vist antal af disse trappetrin kan være bestemmende for en funktion (f. eks. øjenfarve), og en sådan del af spiralen kaldes et gen. På figur 23 er opbygningen af et DNA-molekyle vist.



Figur 23. En skematisk illustration af DNA-dobbeltspiralen. De to sukkerfosfat-skeletter snor sig på ydersiden, mens det indre opfyldes af basepar. Strukturen ligner en snoet trappestige, hvor baseparrene danner trinene.

4.1.2 Strålingsskader på celleniveau

Biologiske strålingsskader på organiske celler kan ske på to måder, som følge af en direkte eller en indirekte mekanisme.

Ved den **direkte** mekanisme vekselvirker strålingen ved ionisering eller excitering direkte med molekylerne, som ødelægges. Ved den **indirekte** mekanisme dannes frie radikaler (H og OH) og giftige kemiske forbindelser, der så kan ødelægge DNA-molekylerne. Ødelagte DNA-molekyler kan enten repareres fuldstændigt, fejlrepareres eller gå til grunde.

Når DNA-molekylet ødelægges, kan der være tale om et **enkelt-strengsbrud** eller et **dobbelt-strengsbrud**.

Ved et **enkelt-strengsbrud** er det kun den ene halvdel af trappetrinnet, der ødelægges, og da der altid vil sidde en guanin-base på samme trappetrin som en cytosin-base og en adenin-base på samme trappetrin som en thymin-base, kan DNA-molekylet forholdsvis let blive repareret. Cellen kan dog også dø.

Ved et **dobbelt-strengsbrud** vil hele trappetrinnet blive ødelagt, og man ved derfor ikke, om det er et guanin-cytosin-par eller et adenin-thymin-par, der er blevet ødelagt. I dette tilfælde kan DNA-molekylet ikke med sikkerhed repareres, så det er magen til molekylet før skaden. Her kan der ligeledes ske det, at cellen dør.

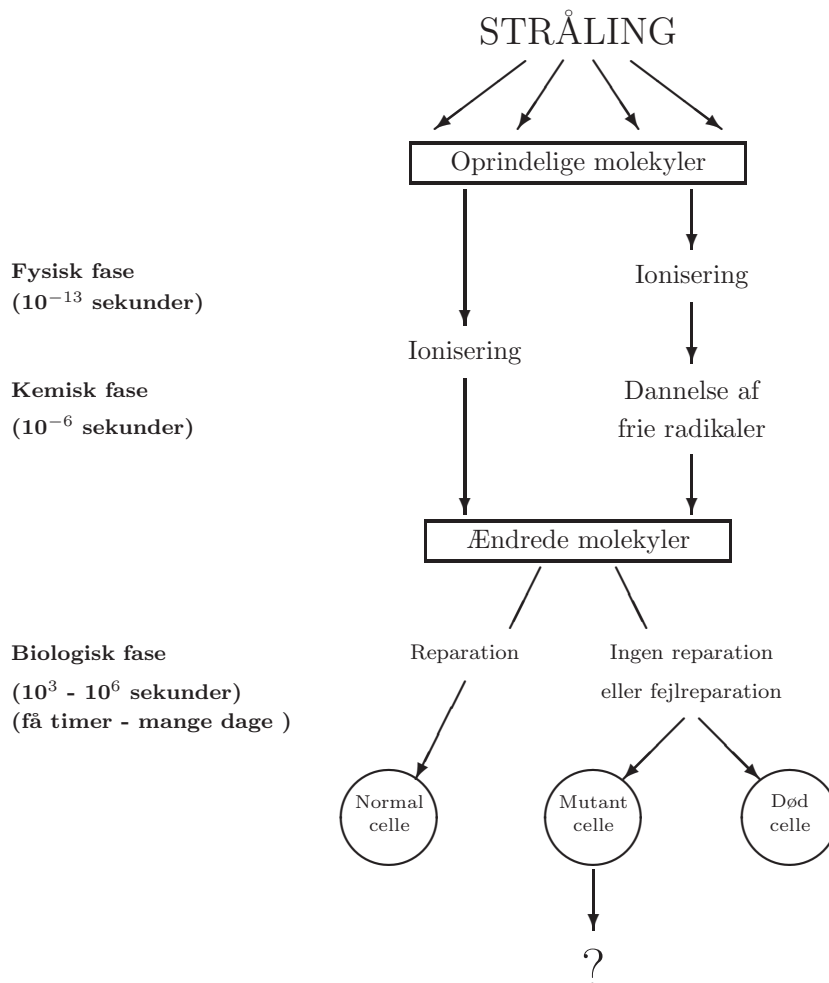
Sker der celledød i en betydelig mængde af cellerne i de bestrålede organer eller væv, således at en tilstrækkelig mængde datterceller ikke kan produceres, dør vævet. Er antallet af døde celler lille, kan de erstattes af nye celler, og vævet overlever.

De stokastiske skader i form af cancer eller arvelige skader er derimod resultatet af fejlreparerede brud i en eller ganske få celler. Disse celler overlever, men formerer sig med fejl i DNA-koden.

På figur 24 er tidsforløbet for en strålingsbeskadigelse af et af cellekernens DNA-molekyler vist. Den fysiske og den kemiske fase kommer meget hurtigt efter hinanden, mens den biologiske fase tager lang tid.

Øverst vekselvirker strålingen med det oprindelige molekyle. Det fører næsten

øjeblikkelig til en eller flere ioniseringer (fysiske fase). Den efterfølgende kemiske fase omfatter dannelsen af frie radikaler.



Figur 24. Tidsforløbet for en strålingsbeskadigelse på celleniveau.

Det er den biologiske fase, der er afgørende for forandringerne i den bestrålede celle. Bliver cellen repareret korrekt, eller dør cellen og erstattes af en rask celle, er der ingen skade sket. Er der for mange celler, der dør, kan det resultere i, at der ikke kan produceres nok erstatningsceller, og en del af vævet vil dø.

Hvis reparationen mislykkes, og cellen lever videre, vil fejlen overføres til dattercellerne, når cellen deler sig. Efter en række celledelinger vil der være mange "fejlceller", og disse kan resultere i en kræftsvulst.

4.2 Deterministiske skader

Deterministiske skader opstår som følge af, at så mange celler i kroppen dør af strålingen, at de ikke længere kan erstattes med raske celler. Det kan være dele af kroppens væv, der har været udsat for strålingen, eller det kan være hele kroppen.

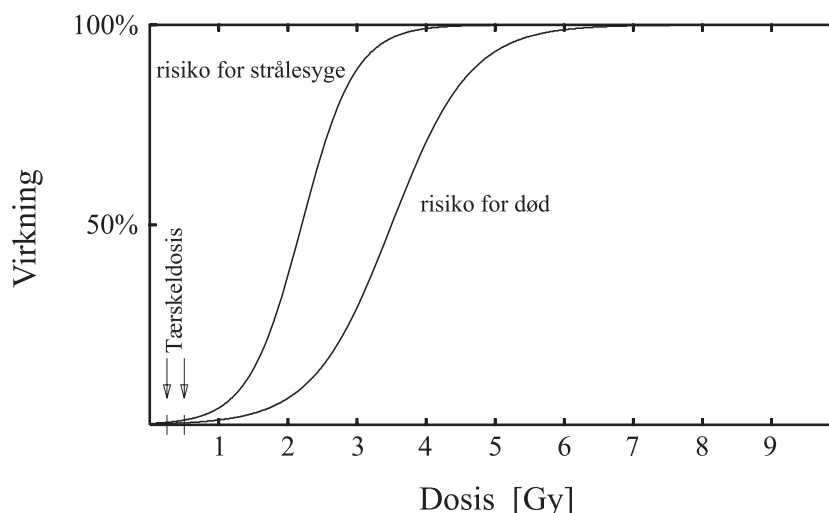
Det karakteristiske for de deterministiske skader er, at der findes en tærskelværdi under hvilken, der ikke opstår skader. Over tærskeldosis vil skadernes alvorlighed vokse med stigende dosis. Tærskeldosen er forskellig for de forskellige deterministiske skader. F.eks. er den ca. 3 Gy til huden for hudrødmen og ca. 0,5 Gy til hele kroppen for strålingssyge.

Er det kun en del af kroppen eller et enkelt organ, der har været udsat for strålingen, kan man få skader som vist på figur 25, hvor en hånd har fået en stor dosis. Skader af denne type, hvor kun huden har fået en stor β -dosis, kan nærmest sammenlignes med svære forbrændinger, og de kan i mange tilfælde heles igen.



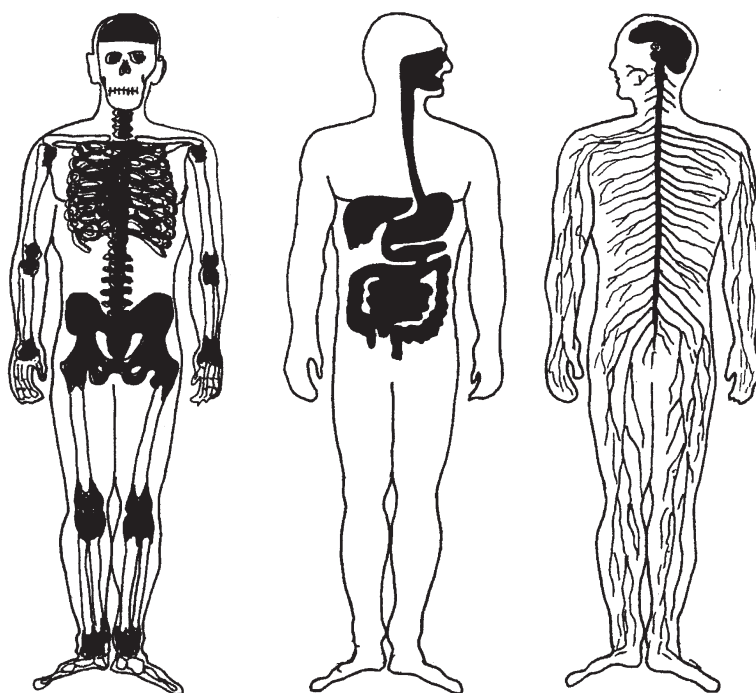
Figur 25. En strålingsbeskadiget hånd, der har været udsat for β -stråling.

Forholdet mellem dosis og virkning kan for helkropsdoser beskrives ved en kurve som på figur 26, hvor x -aksen viser dosis og y -aksen viser i hvor stor en procentdel af en stor befolkningsgruppe, den viste virkning vil vise sig. Op til cirka 0,5 Gy er der ingen, der vil vise tegn på strålingssyge. Mellem 0,5 og 1 Gy begynder man at få strålingssyge i form af opkastning og diarre, men oftest ingen varige men. Ved doser over 1 Gy vil svage individer kunne risikere at dø. Ved doser på 3 - 4 Gy vil omkring 50% dø. Er dosis over 7 - 8 Gy, vil næsten ingen kunne overleve. Hvis de bestrålede kommer under behandling i sterile omgivelser og får blodtransfusion og eventuelt knoglemarvstransfusion, kan en del af personerne reddes, dog såfremt dosis er mindre end 10 - 12 Gy. Det svarer til, at kurven for dødsfald på figur 26 rykker mod højre.



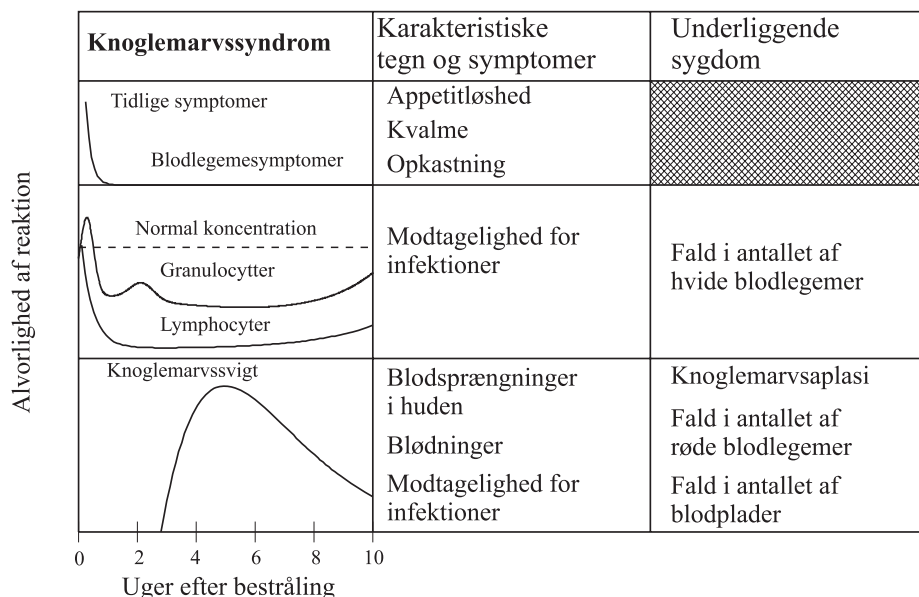
Figur 26. Forholdet mellem dosis og virkning for en stor gruppe mennesker.

På figur 27 ses de tre vigtigste organsystemer, når det drejer sig om dødsfald som følge af helkropsbestråling.



Figur 27. De tre vigtigste organsystemer, der indgår i den akutte strålingssyge. Fra venstre er det den røde knoglemarv, mave-tarmkanalen og centralnervesystemet.

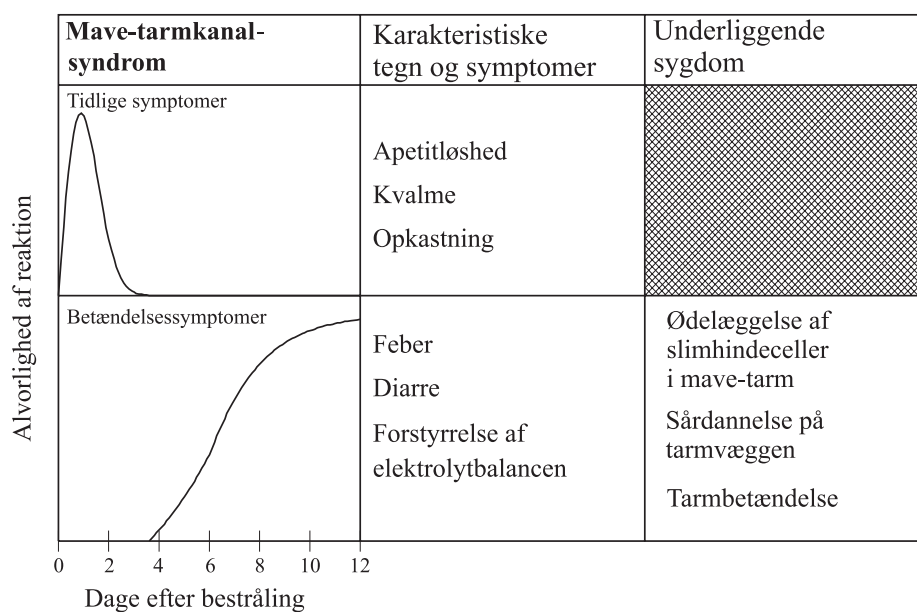
Det mest strålingsfølsomme organ er den røde knoglemarv. Den udgør en væsentlig del af de bloddannende organer, idet den danner alle de røde blodlegemer og nogle af de hvide. På figur 28 ses karakteristiske symptomer for **knoglemarvssyndromet** efter en helkropsdosis på mellem 1 og 10 Gy. Symptomerne optræder typisk flere uger efter en helkropsbestråling.



Figur 28. Karakteristiske symptomer for knoglemarvssyndromet efter helkropsdoser på mellem 1 og 10 Gy.

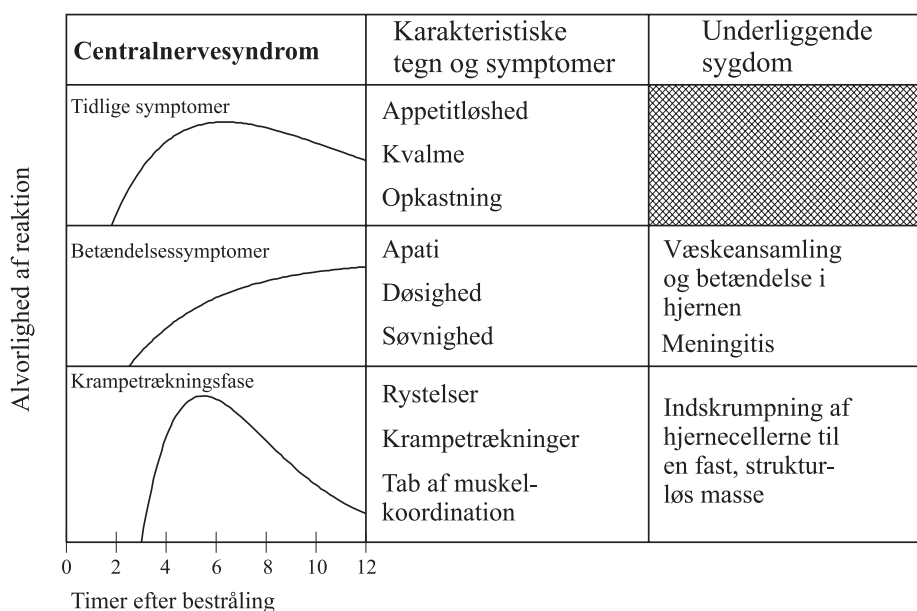
Mave-tarmkanalsystemet er det næstmest følsomme organsystem, og det er cellerne i tarmens slimhinde, der ødelægges. På figur 29 ses karakteristiske symptomer

for **mave-tarmkanalsyndromet**. Bemærk, at symptomerne optræder betydeligt hurtigere (dage) efter bestrålingen end for knoglemarvssyndromet.



Figur 29. Karakteristiske symptomer for mave-tarmkanalsyndromet efter helkrop-doser på mellem 10 og 50 Gy.

Centralnervesystemet er det mindst strålingsfølsomme organsystem af de tre nævnte. Det er svigt af hjernefunktionen, der giver symptomerne, og **centralnervesyndromet** kan derfor også indtræde, selv om kun hovedet er blevet bestrålet. På figur 30 ses karakteristiske symptomer for centralnervesyndromet. Det ses, at symptomerne viser sig meget hurtigt efter bestrålingen (timer).



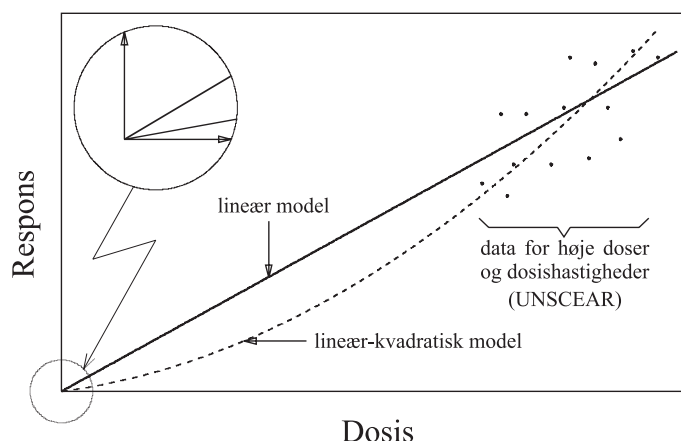
Figur 30. Karakteristiske symptomer for centralnervesyndromet efter helkrop-doser over 50 Gy.

4.3 Stokastiske skader

Stokastiske, somatiske skader er karakteriseret ved, at de først optræder lang tid efter bestrålingen (5 - 30 år), og at der ikke er nogen tærskeldosis, hvorunder de ikke kan optræde. Stokastiske, genetiske skader viser sig først hos afkommet af de bestrålede personer. Sandsynligheden for, at skaden overhovedet vil vise sig en gang i fremtiden, vokser med strålingsdosens størrelse, hvorimod alvorligheden af skaden (hvis den viser sig) er uafhængig af dosens størrelse. Forholdet kan sammenlignes med at spille i lotteriet. Sandsynligheden for gevinst ($\sim$ skaden) stiger med antallet af købte lodsedler ($\sim$ dosis), mens gevinstens størrelse ($\sim$ skadens alvorlighed) er uafhængigt af antallet af købte lodsedler.

Dosisrespons

Et af de centrale problemer i bestemmelsen af stokastiske skader er formen på dosisrespons-kurven. Problemet er vist for kræft i figur 31. Man kender forholdet mellem dosis og kræftskader (dog med en væsentlig usikkerhed) for høje doser og for høje dosishastigheder (doserne i Hiroshima/Nagasaki blev givet over meget kort tid). Derudover antager man, at kurven skal gå gennem (0,0), svarende til nul-virkning for nul-dosis. Gennem de fundne dosisrespons-punkter og nul-punktet kan der tegnes et utal af kurver, der alle kan være biologisk korrekte.



Figur 31. Ekstrapolation af dosisresponsen fra høje doser og dosishastigheder til lave doser og dosishastigheder. Cirklen illustrerer det dosisområde, der er relevant for erhvervsmæssigt strålingsudsatte.

Man har dog især set på to kurveformer, den lineær-kvadratiske model og den lineære model. Den lineær-kvadratiske model vil være i overensstemmelse med det faktum, at der sker en vis reparation i de beskadigede celler, når dosishastigheden og dosis ikke er for høj, og det er den model, der af de fleste strålingsbiologer anses for at være den mest korrekte. Det er imidlertid den lineære model (linearitetsprincippet), der anvendes "officielt". En af de vigtigste grunde hertil er, at den lineære model er praktisk at anvende inden for strålingsbeskyttelsen.

Den lineære model siger, at den biologiske virkning af en vis dosis vil være uafhængig af, hvor store doser den strålingsudsatte person har fået i forvejen. Ligeledes vil det forventede samlede antal kræfttilfælde være ens, hvad enten en million mennesker hver har fået 1 mSv eller ti tusinde mennesker hver har fået 100 mSv. I begge tilfælde taler man om en kollektiv dosis på 1000 person·Sv. Dette vil ikke være tilfældet for den lineær-kvadratiske model.

På det lille cirkeludsnit på figur 31 kan man se, at begge kurver kan betragtes som lineære for de doser, som erhvervsmæssigt beskæftigede får.

4.3.1 Kræftskader

Det er ikke muligt at konstatere, om et kræfttilfælde er forårsaget af ioniserende stråling, forkerte spisevaner, cigaretrykning, alkohol eller noget helt andet.

Epidemiologiske undersøgelser, hvor man følger store befolkningsgrupper, som har været udsat for kendte strålingsdoser, og hvor man over en lang årrække sammenligner kræfthypigheden hos denne gruppe med en tilsvarende ubestrålet kontrolgruppe, kan give oplysninger om strålings kræftrisiko.

Sådanne studier er udført for de ca. 100 000 overlevende fra atombombeangrebene på Hiroshima og Nagasaki.

Her så man forholdsvis hurtigt en forøgelse af leukæmidødsfald. Leukæmi er en meget sjælden sygdom, så selv en lille stigning i antallet af tilfælde ses forholdsvis let. I tabel 9 er antallet af leukæmitilfælde pr. 100 000 personer pr. år i Hiroshima og Nagasaki vist. Her ses tydeligt en sammenhæng mellem størrelsen af den modtagne dosis og antallet af leukæmitilfælde beregnet pr. 100 000 personer pr. år.

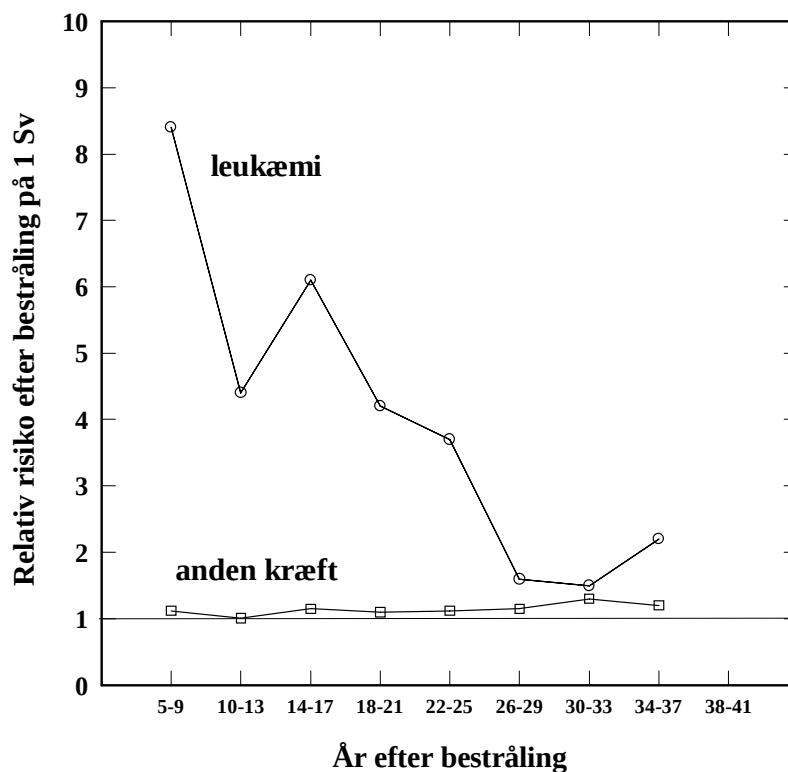
Tabel 9. Leukæmi-dødsfald i tidsrummet 1950 - 1970 blandt de overlevende fra atombombe-angrebene i 1945.

Dosis [Sv]	Antal udsatte	Dødsfald pr. 100 000 personer pr. år
Hiroshima		
3,63	1460	82
1,39	1677	33
0,70	2655	15
0,22	10707	9
0,04	13787	4
0	29943	
Nagasaki		
3,35	1310	62
1,46	1229	13
0,71	1231	0
0,21	3700	3
0,04	6705	5
0	4699	

På figur 32 ses både de japanske leukæmital i forhold til en kontrolgruppe og alle andre observerede kræfttilfælde ligeledes i forhold til en kontrolgruppe. Det ses, at der er forskel i den måde, de viser sig på. Leukæmi (og knoglekræft) følger en såkaldt **absolut risikomodel**. Efter en vis latenstid, hvor der ikke er nogen kræfttilfælde, opstår der et konstant antal kræfttilfælde ekstra hvert år (kurven falder, fordi nogle af dem, der er bestrålet, dør af andet end leukæmi). Den tid, der går fra bestrålingen til personen udvikler kræft kaldes latenstiden, og den er 5 - 10 år for leukæmi.

Alle andre former for kræft følger en såkaldt **relativ risikomodel**, der siger, at kræftrisikoen bliver lig med den "naturlige" kræfthypighed ganget med en dosisafhængig faktor. For den relative risikomodel gælder, at tidspunktet for kræftsvulstens fremkomst er afhængig af den bestråledes alder. Latenstiden er derfor

aldersafhængig, længst for yngre og kortest for ældre mennesker. Afhængig af kræfttypen vil latenstiden typisk være 10 - 30 år.



Figur 32. Relativ risiko for kræft i den japanske befolkning, der blev bestrålet ved atombombeeksplosionerne i 1945, i forhold til en ubestrålet japansk befolkning (kontrolgruppe).

Risikofaktorer

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) har ud fra de epidemiologiske undersøgelser af de overlevende fra Hiroshima/Nagasaki, og af grupper, der har været udsat for medicinsk bestråling, angivet risikofaktorer for en befolkning og for en voksen erhvervsbefolkning. Det har ikke været nemt, da virkningen faktisk er ret lille. UNSCEAR kommer frem til, at for en befolkning af normal sammensætning (0 - 70 år) er livstidsrisikoen, r , fra udsættelse for en stor helkropsdosis, D , af γ -stråling givet med høj dosishastighed:

$$r = 0,04 - 0,11 \text{ Gy}^{-1}$$

og for en voksen erhvervsbefolkning (18 - 65 år):

$$r = 0,04 - 0,08 \text{ Gy}^{-1}$$

Intervaller angiver forskellen i de beregnede risikofaktorer for henholdsvis den absolutte og den relative risikomodel. Tager man hensyn til, at det er lave doser og dosishastigheder, der er relevante for erhvervsmæssigt strålingsudsatte, skal de ovennævnte risikofaktorer ifølge UNSCEAR reduceres med en faktor 2 - 10. ICRP har anbefalet en faktor 2 og risikofaktorerne bliver da:

$$r = 0,02 - 0,05 \text{ Gy}^{-1} \quad \text{samlet befolkning}$$

$$r = 0,02 - 0,04 \text{ Gy}^{-1} \quad \text{erhvervsbefolkning}$$

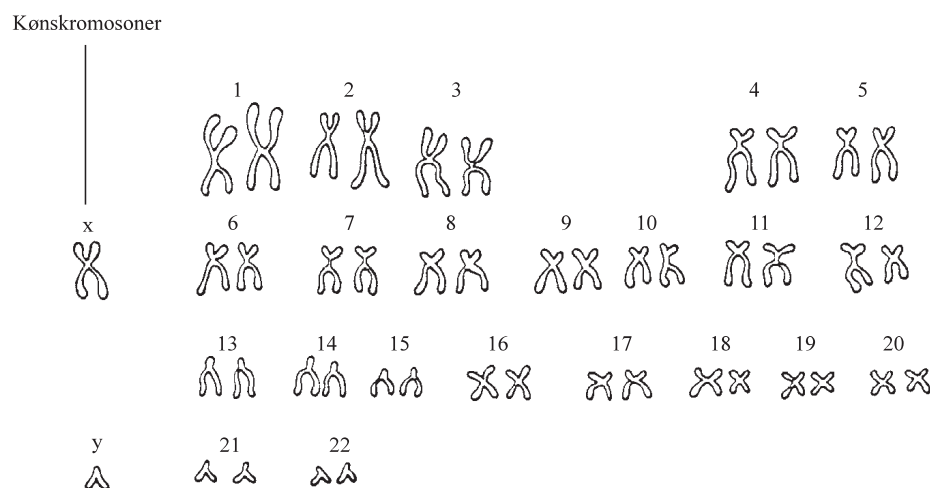
Til sammenligning kan nævnes, at ICRP's seneste anbefalinger fra 1991 angiver en risiko på 0,05 pr. Sv for en samlet befolkning, og en risiko på 0,04 pr. Sv for en erhvervsbefolkning, hvilket svarer til de højeste værdier i de angivne intervaller.

4.3.2 Genetiske skader

Både for strålingens kræftfremkaldende virkning og for dens arveskadelige virkning gælder, at de er en følge af skader på kromosomernes DNA-molekyler. Det er imidlertid kun skader på kønscellernes DNA, der kan medføre arvelige skader, og disse skader kaldes derfor **genetiske skader**.

Et nyt individs dannelse begynder, når en sædcelle forenes med en ægcelle. Æg- og sædcellen indeholder hos mennesket 23 kromosomer hver. Ved befrugtningen bliver det genetiske materiale forenet; et befrugtet æg vil således indeholde 23 kromosom-par, ialt 46 kromosomer.

På figur 33 ses, hvordan de 23 kromosompar normalt ser ud. På figuren er de sat pænt op i rækker, og det ses tydeligt, at parrene er dannet med et kromosom fra hver af forældrene.



Figur 33. Menneskets 23 kromosompar.

Kromosomerne er delt op i mange tusinde gener. Ved celledelingen er generne i stand til at kopiere sig selv, men hvis der sker en fejl, vil det nydannede gen ikke helt ligne originalen. En sådan ufuldstændig kopiering kaldes en **gen-mutation**.

En genetisk betinget sygdom siges at være dominant, når den viser sig i afkommet, selv om kun en af forældrene har skadede kønsceller. Tilsvarende kaldes en skade vigende, når den kun viser sig i afkommet af forældre, der begge har samme skadetype i kønscellerne. Som eksempel på en dominant genmutationssygdom kan nævnes blødersygdom, mens døvhed er et eksempel på en vigende genmutationsygdom.

Stråling kan også bevirke, at de enkelte kromosomer beskadiges og derefter sættes forkert sammen. Ved næste deling har man så to “forkerte” kromosomer, og dette kaldes en **kromosom-mutation**. Som eksempel på en kromosom-mutation kan nævnes mongolisme. På figur 34 er kromosom-mutationer og gen-mutationer illustreret.

Disse skader kan også ske spontant og kan også forårsages af andre påvirkninger end ioniserende stråling; skadelige mutationer i kønscellerne forårsaget af ioniserende stråling er altså ikke forskellige fra skadelige mutationer forårsaget af andre påvirkninger. Det er således, som for kræftforekomst, ikke muligt at sætte mærke på en genetisk skade: “forårsaget af ioniserende stråling”. Man må igen se på store persongrupper, der har været udsat for ioniserende stråling, og man har undersøgt befolkningen i Hiroshima/Nagasaki. **Man har ikke kunnet påvise flere arveskader hos bombeofrene i Hiroshima/Nagasaki end i en ubestrålet befolkning.** Det betyder ikke, at der ikke har været strålingsbetingede arveska-

[illegible]

Risikofaktorer for genetiske skader i mennesker er derfor baseret på dyreeksperimenter, hovedsageligt fra bestråling af mus.

Tabel 10. Risiko for genetiske sygdomme pr. 1 million levende-fødte, der bliver udsat for en genetisk dosis pr. generation på 0,01 Gy ved lav dosishastighed. Der antages en fordoblingsdosis på 1 Gy.

Sygdomstype	Naturlig hyppighed pr. 10 ⁶ levende-fødte	Virkning af 0,01 Gy pr. generation pr. 10 ⁶ levende-fødte		
		1. generation	2. generation	Alle generationer (ligevægt)
Dominante genmutation sygdomme	10000	15	13	100
Vigende genmutation sygdomme	2500	0	0	15
Kromosom- mutation sygdomme	400	2,4	1	4
Total	13000	18	14	119

Risikofaktorer

Tallene i tabel 10 kan anvendes til at beregne ligevægtsrisikoen for en befolkning. Den dosis, der betyder noget genetisk, **den genetisk betydende dosis**, er mindre end livstidsdosis, idet skadede kønsceller hos personer, der er ude over den reproduktive alder, ikke udgør nogen genetisk risiko. Dette skyldes, at eventuelle skadede kønsceller ikke overføres til efterfølgende generationer. Hvis det antages, at alderen for personer, der får børn, er 30 år ved barnets fødsel, og at den forventede levetid er 70 - 75 år, bliver den genetisk betydende dosis lig med $30/75 \cdot \text{livstidsdosis} = 0,4 \cdot \text{livstidsdosis}$. Ligevægtsrisikoen kan da beregnes til:

$$r = \frac{0,4 \cdot 119}{0,01 \text{ Gy}} \cdot 10^{-6} = 0,005 \text{ Gy}^{-1}$$

Risikoen for de to første generationer kan beregnes til:

$$r = \frac{0,4 \cdot (18 + 14)}{0,01 \text{ Gy}} \cdot 10^{-6} = 0,001 \text{ Gy}^{-1}$$

Sammenlignes de genetiske risikofaktorer med risikofaktorerne for kræft, ses det, at den genetiske risiko for de to første generationer er omkring 25 gange mindre end risikoen for kræft. Medtages alle generationer (ligevægt), er risikoen for genetiske skader omkring 5 gange mindre end risikoen for kræft.

5 Strålingsbeskyttelsesnormer

Den internationale strålingsbeskyttelseskommision ICRP (International Commission on Radiological Protection) udarbejder grundlæggende principper for strålingsbeskyttelse. ICRP's anbefalinger danner grundlaget for de fleste nationale myndigheders lovgivning på strålingsbeskyttelsesområdet. Den danske lovgivning udarbejdes af Statens Institut for Strålehygiejne (SIS) under Sundhedsstyrelsen på grundlag af EU-direktiver, der tager udgangspunkt i ICRP's anbefalinger.

5.1 Systemet for strålingsbeskyttelse

Systemet for strålingsbeskyttelse omfatter principper for beskyttelse af personer og deres efterkommere mod ioniserende stråling fra ønskede strålingskilder (praksis) eller fra uønskede strålingskilder (indgreb).

Praksis

En praksis kan beskrives som indførelsen af en samfundsmæssig aktivitet (virksomhed), der involverer brugen af radioaktive stoffer og ioniserende stråling. Formålet er at opnå en gavnlig virkning for samfundet, selv om dens indførelse vil forårsage bestråling af personer og dermed medføre doser oven i de strålingsdoser, som disse personer i forvejen modtager fra alle andre kilder. Der er her tale om et overlagt valg (kernekræftværker, røntgenafdelinger, industriel anvendelse af stråling etc.) med det formål at opnå samfundsmæssige fordele (ønskede kilder).

Indgreb

I modsætning hertil kan det være nødvendigt at reducere allerede eksisterende strålingseksponeringer ved indgreb. Der kan f.eks. være tale om at ændre eksponeringsvejene mellem kilde og eksponerede personer eller at flytte eksponerede personer væk fra kilden for herved at undgå en strålingsdosis. Indgreb, der er rettet mod allerede eksisterende eksponeringer, der ikke er resultatet af et overlagt valg (radon i huse, radioaktive stoffer i omgivelserne forårsaget af uheld etc.), kaldes under et for intervention (uønskede kilder).

5.2 Praksis (normale situationer)

De skadelige virkninger af ioniserende stråling omfatter **stokastiske** og **deterministiske** skader. For stokastiske skader gælder, at det alene er sandsynligheden (risikoen) for, at skaden indtræder, der afhænger af strålingsdosisens størrelse, men ikke skadens alvorlighed. For deterministiske skader gælder, at det er skadens alvorlighed, som afhænger af strålingsdosisens størrelse, og at der er en nedre dosis (tærskeldosis), hvorunder der ikke sker nogen skade.

Det overordnede mål for strålingsbeskyttelsen er at **forhindre** deterministiske skader og at **begrænse sandsynligheden** for stokastiske skader til et acceptabelt niveau. Dette mål søges nået gennem ICRP's anbefalinger, som for en praksis omfatter tre grundregler:

- retfærdiggørelse af praksis
- optimering af beskyttelsesforanstaltninger
- holde indviddoser under fastsatte dosisgrænser

De tre grundregler (grundlove) er behandlet i de følgende afsnit.

5.2.1 Retfærdiggørelse

Den 1. grundregel i ICRP's strålingsbeskyttelsessystem kan udtrykkes på følgende måde:

Ingen praksis (virksomhed, arbejde, operation etc.) må accepteres, med mindre dens udførelse resulterer i en nettogevinst

eller udtrykt på en anden måde:

Ved enhver anvendelse af ioniserende stråling skal fordelene opveje eventuelle risikomomenter

Nettogevinsten af en praksis, som involverer strålingsudsættelse, kan udtrykkes som forskellen mellem dens bruttogevinst og omkostningerne.

Omkostningerne kan inddeles i tre komponenter: "produktionsomkostninger", P , beskyttelsesomkostninger, X , og omkostningen, Y , af den forventede skadevirkning af de samlede individuelle doser (kollektiv dosis). Operationen er retfærdiggjort, når nettogevinsten er positiv.

Omkostningen, Y , af den forventede skadevirkning af den kollektive dosis, S , kan beregnes som:

$$Y = \alpha \cdot S \quad (14)$$

hvor α er den ækvivalente, pengemæssige værdi af en sparet kollektiv dosisenhed. Fastsettelsen af værdien for α er ikke uden problemer, idet det er den samfundsmæssige værdi af et undgået **statistisk** kræfttilfælde, der skal "prisfastsættes". Derfor vil politiske og subjektive betragtninger ofte blive indblandet. Til de fleste praktiske formål kan α -værdien sættes til 350 000 - 1 500 000 kr. pr. undgået person-sievert. α -værdien svarer stort set til hvad samfundet betaler for at undgå et tabt leveår. De nordiske strålingsbeskyttelsesmyndigheder har anbefalet en værdi af α på mindst 100 000 US dollars pr. undgået person-sievert.

Princippet for retfærdiggørelse skal anvendes på en given situation med dennes specifikke gevinst og omkostninger. Er der flere alternative beskyttelsesforanstaltninger, der har en positiv nettogevinst, er disse alternativer **alle** retfærdiggjorte set fra et strålingsbeskyttelsessynspunkt. Det optimale beskyttelsesniveau skal findes ved optimering (se afsnit 5.2.2).

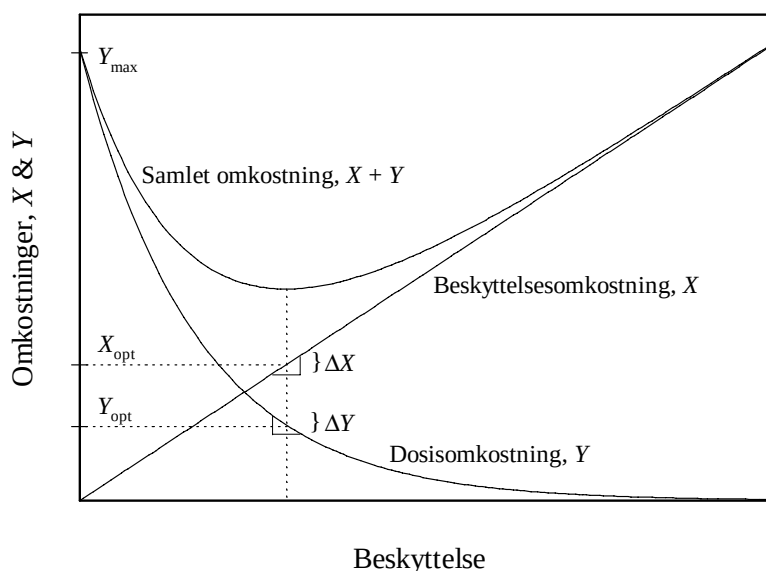
5.2.2 Optimering

Den 2. grundregel i ICRP's strålingsbeskyttelsessystem kan udtrykkes som:

Alle retfærdiggjorte strålingsdoser skal holdes så lave som det med rimelighed kan opnås under hensyntagen til økonomiske og samfundsmæssige forhold

Denne regel er den vigtigste af ICRP's grundregler vedrørende dosisbegrænsning. Nøgleordet er her "med rimelighed", og betydningen er, at der i en given situation hverken skal bruges for mange eller for få midler til strålingsbeskyttelsesforanstaltninger. Der kan f.eks. være tale om opbygningen af en strålingsafskærmning omkring en γ -kilde, der i uafskærmet tilstand ville kunne bestråle et vist antal personer med betragtelige doser. I en sådan situation vil det være i strid med optimeringsprincippet at bruge så mange midler til beskyttelse, at de resulterende γ -doser ville blive nul. Ligeledes ville det være forkert ikke at anvende nogen form for afskærmning overhovedet.

Bestemmelsen af den "optimale" beskyttelse i en given situation omfatter bl.a. prisen, X , på beskyttelsesforanstaltningerne, der eksempelvis kan være afskærmning, indeslutning, ventilation etc. Den optimale beskyttelse vil desuden afhænge af størrelsen af den samlede kollektive dosis, S . Der findes forskellige optimeringsmetoder, hvoraf **differentiel omkostning-nytte analyse** er en hyppigt anvendt metode. Metoden giver et minimum for de samlede omkostninger, $X + Y$, som illustreret på figur 35.



Figur 35. Dosisomkostning, Y , og beskyttelsesomkostning, X , som funktion af beskyttelse ved en given praksis. Den optimale beskyttelse opnås, når $\Delta X = \Delta Y$, idet de samlede omkostninger her er mindst.

Af figuren ses, at uden beskyttelse (beskyttelsesomkostninger, $X = 0$) er dosisomkostningen størst ($Y_{\max}$). Med voksende beskyttelse (og dermed voksende beskyttelsesomkostninger, X) falder doserne og dermed dosisomkostningen, Y . De samlede omkostninger, $X + Y$, vil ved en given beskyttelsesomkostning udvise et minimum, der hvor en lille forøgelse af beskyttelsesomkostningerne, ΔX , netop bliver lig med det resulterende fald af dosisomkostningen, ΔY . Dette er den optimale beskyttelse med en optimal beskyttelsesomkostning, X_{opt} , og en tilsvarende optimal kollektiv dosis, $S_{\text{opt}} = Y_{\text{opt}}/\alpha$.

5.2.3 Dosisgrænser

Den 3. grundregel i ICRP's system for strålingsbeskyttelse lyder:

Summen af eksterne effektive doser og committede (50-års) effektive doser fra praksis i en given periode må ikke overskride fastsatte dosisgrænser

Dosisgrænser anvendes kun for praksis, hvor bestråling kan forudses, og hvor strålingskilden er under kontrol. Dosisgrænserne omfatter ikke medicinsk bestråling og bestråling fra naturligt forekommende kilder. Dosisgrænser skal **ikke** opfattes som en skillelinie mellem sikkerhed og fare. Hvis en dosisgrænse kun er blevet overskredet lidt, har det større betydning, at der åbenbart har været en fejl i dosiskontrollen og -overvågningen (som naturligvis skal rettes), end at en eller flere personer har overskredet dosisgrænsen.

SIS har i sin *Bekendtgørelse om dosisgrænser for ioniserende stråling* nr. 823 af 31. oktober 1997 fastsat regler for arbejde med ioniserende stråling, herunder dosisgrænser for arbejdstagere, personer under uddannelse og enkeltpersoner i befolkningen. Bekendtgørelsen er baseret på EU's basisdirektiv for strålingsbeskyttelse fra maj 1996, og bekendtgørelsens dosisgrænser er gengivet i tabel 11.

Tabel 11. Danske dosisgrænser til erhvervsmæssigt strålingsudsatte og til befolkningen gældende for en praksis som fastsat i Sundhedsstyrelsens bekendtgørelse nr. 823 af 31. oktober 1997.

Kategori	Grænse for effektiv dosis [mSv/år]	Grænse for ækvivalent dosis [mSv/år]		
		Øjelinser	Huden ^{a)}	Ekstr. ^{b)}
Arbejdstagere > 18 år	20	150	500	500
Arbejdstagere < 18 år ^{c)}	1	15	50	- ^{d)}
Personer under uddannelse > 18 år	20	150	500	500
Personer under uddannelse < 18 år ^{c)}	6	50	150	150
Andre under uddannelse	1	15	50	- ^{d)}
Befolkningen	1	15	50	- ^{d)}

- a) Dosisgrænsen for huden gælder for enhver overflade på 1 cm²; midling over større hudområder er således ikke tilladt ved sammenligning med dosisgrænsen.
- b) Ekstremiteter omfatter hænder, underarme, fødder og ankler.
- c) Arbejdstagere under 18 år må ikke udføre arbejde i områder, hvor der anvendes strålingskilder, for hvilke der gælder krav til arbejdet i henhold til en af Sundhedsstyrelsen udstedt bekendtgørelse om en bestemt type anlæg eller kilde.
- d) Ingen dosisgrænse. Beskyttelse er baseret på begrænsningen af effektiv dosis.
- e) Dosisgrænserne for personer under uddannelse mellem 16 og 18 år vil fortsat være gældende for arbejdstagere under 18 år efter uddannelsens afslutning i det omfang strålingsudsættelsen er nødvendig for personens beskæftigelse i faget.

I særlige tilfælde kan der for arbejdstagere over 18 år efter forudgående skriftlig godkendelse fra Sundhedsstyrelsen tillades en effektiv dosis på 100 mSv over en sammenhængende periode på fem år med en maksimal effektiv dosis på 50 mSv i det enkelte år.

Der er i bekendtgørelsen også fastsat en dosisgrænse for gravide, der udsættes for erhvervsmæssig bestråling. Når en kvinde har meddelt arbejdsgiveren, at hun er gravid, skal beskyttelsen af det ufødte barn svare til beskyttelsen af enkeltpersoner i befolkningen. Den gravides arbejdsforhold skal derfor være således, at ækvivalent dosis til det ufødte barn bliver så lav, som det med rimelighed er muligt, og at det vil være usandsynligt, at denne dosis som følge af arbejdet overstiger 1 mSv i løbet af resten af graviditeten.

5.2.4 Sekundære grænseværdier (ALI)

Når radioaktive stoffer indtages i organismen enten via indånding eller via munden, vil det give anledning til doser i kroppens organer. På grundlag af de primære dosisgrænser, som er omtalt i afsnit 5.2.3, kan man fastsætte sekundære grænseværdier for indtag af forskellige radionuklider i kroppen, således at de committede doser ikke overskrider dosisgrænserne. Grænsen for årligt indtag, ALI (**A**nnual **L**imit on **I**ntake), af en given radionuklid enten fra indånding eller spisning er en sådan sekundær grænseværdi. ALI fastsættes som det årlige indtag, der giver en committed effektiv dosis på 20 mSv:

$$ALI = \frac{20 \text{ mSv}}{e(50)} \quad (15)$$

hvor $e(50)$ den committede effektive dosis fra et indtag på 1 Bq via den givne indtagsmåde. $e(50)$ afhænger af både radionuklid og indtagsmåde (indånding eller indtag via munden) (se kapitel 2). I tabel 12 er vist ALI-værdier for henholdsvis indånding og spisning for en række udvalgte radionuklider.

Tabel 12. ALI for indånding og spisning af forskellige radionuklider.

Radionuklid	Grænse for årligt indtag, ALI [Bq]	
	Indånding	Spisning
^3H	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$
^{32}P	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
^{35}S	$2 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
^{60}Co	$2 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^6$
^{82}Br	$5 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$
^{90}Sr	$1 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^5$
^{106}Ru	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$
^{131}I	$3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$
^{137}Cs	$4 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
^{226}Ra	$7 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^4$
^{238}U	$4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^5$
^{239}Pu	$4 \cdot 10^2$	$7 \cdot 10^4$

5.2.5 Afledt luftkoncentration (DAC)

På grundlag af ALI-værdien kan man beregne en luftkoncentration, DAC (Derived Air Concentration), der netop ville medføre en effektiv dosis på 20 mSv, hvis man arbejdede et helt arbejdsår på 2000 timer (≈ 50 uger á 40 timer/uge) i denne koncentration. DAC-værdien er en “hygiejnisk grænseværdi”, der sikrer, at det tilladelige årlige indtag (ALI) ikke overskrides, når den årlige eksponering begrænses til $2000 \text{ h} \times \text{DAC}$ (se afsnit 5.2.5.3).

5.2.5.1 DAC for partikelbåret aktivitet. DAC-værdien for partikelbåret aktivitet beregnes som den luftkoncentration, der ved ophold i et helt arbejdsår ville medføre et samlet indtag ved indånding, der er lig med ALI-værdien for den givne radionuklid. DAC-værdien beregnes ud fra ALI-værdien som:

$$\text{DAC} = \frac{\text{ALI}}{L} \quad (16)$$

hvor L er den samlede indåndede luftmængde på et arbejdsår.

En person, som ikke udfører hårdt fysisk arbejde, vil i arbejdstiden indånde ca. 20 liter luft pr. minut. Den samlede indåndede luftmængde, L , i løbet af et arbejdsår på 2000 timer udgør 2400 m^3 .

5.2.5.2 DAC for radioaktive gasser. Radioaktive ædelgasser optages ikke i organismen. DAC-værdien for disse radionuklider er derfor bestemt på grundlag af eksterne β - og γ -strålingsdoser til huden, øjelinserne og hele kroppen. γ -dosis fra ophold i kontamineret luft afhænger både af nuklidkoncentrationen og opholdsrummets størrelse (jo større rum, desto større dosis), hvilket skyldes γ -strålingens lange rækkevidde i luft. β -dosis til hud og øjelinser er derimod kun afhængig af koncentrationen, fordi rækkevidden for β -partikler i luft kun er nogle få meter. DAC-værdier for ophold i små rum bestemmes derfor ud fra ekstern ($\beta + \gamma$)-dosis

til hud og øjelinser, hvorimod DAC-værdier for ophold i store rum bestemmes på grundlag af ekstern γ -dosis til hele kroppen.

5.2.5.3 Praktisk anvendelse af DAC. Som nævnt er DAC-værdien ikke nogen grænseværdi. Eksempelvis vil dosisgrænserne ikke overskrides, hvis man opholder sig i en luftkoncentration af en given radionuklid på:

$$\begin{aligned} 1 &\times \text{DAC i } 2000 \text{ h/år} \\ 2 &\times \text{DAC i } 1000 - \\ 5 &\times \text{DAC i } 400 - \\ 100 &\times \text{DAC i } 20 - \end{aligned}$$

For at sikre, at dosisgrænsen ikke overskrides, skal følgende relation mellem opholdstid, T , og luftkoncentration, C , overholdes:

$$T \leq 2000 \text{ h}\cdot\text{år}^{-1} \cdot \frac{\text{DAC}}{C} \quad (17)$$

En luftkoncentration lig med DAC er relativ høj og ikke acceptabel for normale arbejdsituationer over lang tid. Ved arbejdsoperationer, som ikke kan undgå at forårsage luftkontamination, skal der eventuelt anvendes beskyttelsesforanstaltninger (afsugning etc.). Arten og omfanget af disse foranstaltninger skal bestemmes på grundlag af optimeringsprincippet (se afsnit 5.2.2). I tabel 13 er vist DAC-værdier for en række udvalgte nuklider.

Tabel 13. DAC-værdier for forskellige radionuklider.

Radionuklid	Afledt luftkoncentration, DAC [Bq/m ³]
³ H	4·10 ⁵
³² P	8·10 ³
³⁵ S	8·10 ³
⁶⁰ Co	8·10 ²
⁸² Br	2·10 ⁴
⁹⁰ Sr	2·10 ²
¹⁰⁶ Ru	4·10 ²
¹³¹ I	1·10 ³
¹³⁷ Cs	2·10 ³
²²⁶ Ra	3·10 ⁰
²³⁸ U	2·10 ¹
²³⁹ Pu	2·10 ⁻¹

5.2.6 Doser fra overfladekontamination

Der er ikke nogen simpel sammenhæng mellem overfladekontamination og doser til personer, som arbejder i forurenede områder. Det er derfor ikke muligt at fastsætte en direkte sammenhæng mellem overfladekontamination og dosisgrænser. Fastsættelsen af afledte grænseværdier af overfladekontamination er derfor baseret på erfaringsgrundlag og af forenkede, men samtidig pessimistiske antagelser.

Strålingsdoser til personer, der arbejder i kontaminerede områder, hidrører fra direkte stråling (β - og γ -stråling) fra radioaktive stoffer på de forskellige overflader og indånding af aktivitet, som hvirvles op i luften (resuspension) fra disse overflader. En normal arbejdshygiejne vil hindre indtag via munden.

5.2.6.1 Ekstern bestråling fra kontaminerede overflader. Hvis en person opholder sig i et lokale, hvor vægge og gulve er kontaminerede, vil personen blive udsat for ekstern stråling fra den deponerede aktivitet på de enkelte overflader. Den eksterne γ -dosishastighed til hele kroppen 1 meter fra en overflade (gulv, væg o. lign.) på 100 - 200 m² vil for radionuklider med nogenlunde de samme γ -strålingsforhold som for ¹³⁷Cs være af størrelsesordenen:

$$\dot{E}_{\text{flade},\gamma} \simeq 1 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}}{\text{MBq} \cdot \text{m}^{-2}}$$

For β -emittere med en maksimal energi på 1 MeV vil β -dosishastigheden til huden være af samme størrelsesorden:

$$\dot{H}_{\text{flade},\beta} \simeq 1 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}}{\text{MBq} \cdot \text{m}^{-2}}$$

Over et helt arbejdsår på 2000 timer ville en konstant overfladekontamination på **25 MBq/m²** give anledning til en γ -helkropsdosis på 50 mSv/år. Tilsvarende ville en overfladekontamination på **250 MBq/m²** medføre en β -huddosis på 500 mSv/år.

Hvis huden er kontamineret med en radionuklid, der udsender både β - og γ -stråling, vil β -dosis til huden normalt være meget større end den tilsvarende γ -dosis (flere hundrede gange større). For et bredt β -energiområde vil β -dosishastigheden til det følsomme hudlag fra en hudkontamination være:

$$\dot{H}_{\text{hud},\beta} \simeq 250 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}}{\text{MBq} \cdot \text{m}^{-2}}$$

altså 250 gange større end β -huddosishastigheden fra omkringliggende flader med samme overfladekontamination. En hudkontamination på **1 MBq/m²** i arbejdstiden ville derfor medføre en årlig β -huddosis på 500 mSv under forudsætning af, at kontaminationen vaskes bort ved arbejdstids ophør.

5.2.6.2 Intern bestråling fra kontaminerede overflader. Doser fra indånding af resuspenderet (ophvirvlet) materiale vil afhænge både af radionukliden, idet hver nuklid har sin specifikke værdi af $e(50)$, og af sammenhængen mellem løstsiddende overfladekontamination og luftkoncentration. Denne sammenhæng er bestemt af både overfladens beskaffenhed, formen af overfladeforureningen (partikelstørrelse etc.) og dens fordeling på overfladen samt måden, på hvilken overfladen påvirkes.

Sammenhængen mellem luftkoncentration og overfladekoncentration kan beskrives ved den såkaldte **resuspensionsfaktor**, F_R . Hovedparten af eksperimentelt bestemte indendørs resuspensionsfaktorer ligger i intervallet 10^{-6} - 10^{-4} m⁻¹ (Bq/m³ pr. Bq/m²). I de fleste tilfælde vil en repræsentativ resuspensionsfaktor på 10^{-5} m⁻¹ være tilstrækkelig konservativ under forudsætning af, at overfladerne ikke er meget støvede og store i forhold til rumstørrelsen. Sammenhængen mellem luftkoncentration, C , og overfladeforureningen, A , bliver da:

$$\begin{aligned} C &= F_R \cdot A \\ &= 10^{-5} \text{ m}^{-1} \cdot A \end{aligned} \quad (18)$$

Luftkoncentrationen, C , angivet i Bq/m³ bliver altså 1/100 000 af overfladekoncentrationen angivet i Bq/m².

For α -emittere vil DAC-værdierne typisk ligge i intervallet **0,1 - 10 Bq/m³**, medens de for β -emittere vil ligge i intervallet **100 - 1000 Bq/m³**. En overfladekontamination med α -emittere i intervallet **0,01 - 1 MBq/m²** vil således ved resuspension kunne give en α -luftkoncentration på 1 DAC i det nævnte interval. Tilsvarende vil en overfladekontamination med β -emittere i intervallet **10 - 100 MBq/m²** kunne give en β -luftkoncentration på 1 DAC.

Eksempel 1

I et arbejdslokale er gulve og vægge forurenede med ²⁴¹Am. Overfladekoncentrationen, A , er 100 kBq/m². Hvis det antages, at resuspensionsfaktoren, F_R , for gulv- og vægoverfladerne kan sættes til 10⁻⁵ m⁻¹, hvor længe kan man da arbejde i lokalet, inden dosisgrænsen overskrides? Luftkoncentrationen, C_α , beregnes af:

$$\begin{aligned} C_\alpha &= F_R \cdot A \\ &= 10^{-5} \text{ m}^{-1} \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ Bq/m}^2 \\ &= \underline{1 \text{ Bq/m}^3} \end{aligned}$$

For ikke at overskride dosisgrænsen, skal følgende opfyldes, jf. afsnit 5.2.5.3:

$$T \leq \frac{2000 \text{ h} \cdot \text{år}^{-1} \cdot \text{DAC}}{C_\alpha}$$

For ²⁴¹Am er DAC = 0,13 Bq/m³. Dosisgrænsen overskrides derfor, hvis arbejdstiden overskrider:

$$\begin{aligned} T &= \frac{2000 \text{ h} \cdot 1/\text{år} \cdot 0,13 \text{ Bq/m}^3}{1 \text{ Bq/m}^3} \\ &= \underline{260 \text{ h/år}} \end{aligned}$$

5.3 Indgreb ('de facto' situationer)

I uheldssituationer og andre 'de facto' situationer, f.eks. radon i boliger, kan strålingsbeskyttelsessystemet for en praksis **ikke** anvendes, fordi strålingskilden allerede **er** til stede, når beslutningen om indførelse af beskyttelsesforanstaltninger, intervention (indgreb), skal træffes.

Iværksættelse af beredskabsforanstaltninger med det formål at reducere eller undgå strålingsdoser bør kun ske, hvis omkostningerne og risikoen ved deres indførelse er mindre end omkostningerne og risikoen ved de doser, som **undgås** ved indgrebet (retfærdiggørelse af indgrebet). Form, omfang og varighed af indgrebet vil afhænge af den aktuelle situation. Fastsættelse af indgrebsniveauer skal ifølge ICRP ske, således at indgrebet gør mest muligt gavn (optimering af indgrebet).

Sundhedsstyrelsen har fastsat regler for begrænsning af doser til personer, der er involveret i uheldsbekæmpelse, og begrænsning af doserne til enkeltpersoner i befolkningen som følge af et nukleært eller radiologisk uheld.

5.3.1 Erhvervsmæssigt strålingsudsatte

De ansvarlige for medarbejdernes sikkerhed, dvs. ledelsen på nukleare anlæg o.lign., skal have udarbejdet en beredskabsplan, som bl.a. indeholder dosisniveauer, over hvilke indgreb bør overvejes. Ingen arbejdstager eller anden person, der i en ulykkessituation deltager i gennemførelsen af beredskabsforanstaltninger, må udsættes for doser, der overstiger dosisgrænserne for erhvervsmæssigt strålingsudsatte, med mindre der er tale om:

- (1) at hjælpe personer i livsfare eller forhindre alvorlig personskade, eller
- (2) at søge at undgå en væsentlig bestråling af enkeltpersoner i befolkningen, eller
- (3) at forhindre at en katastrofal situation opstår eller udvikler sig

Gennemføres der beredskabsforanstaltninger under sådanne omstændigheder, skal doserne holdes så lave som rimeligt muligt, og den effektive dosis må, så vidt det er muligt, ikke overstige 100 mSv. Undtaget herfra er livsreddende arbejde, hvor der dog skal gøres alle mulige bestræbelser for at holde den effektive dosis under 500 mSv for at undgå deterministiske skader. Arbejdet må kun udføres af frivillige, der er nøje instrueret om arbejdet og om den fare, der er forbundet hermed.

Arbejdstagere, der har deltaget i gennemførelse af beredskabsforanstaltninger, kan fortsætte deres sædvanlige beskæftigelse. Betingelserne for yderligere personbestråling skal dog godkendes af Sundhedsstyrelsen (SIS).

For arbejdstagere, der i sen- og oprydningsfasen af en ulykkessituation deltager i reparations-, oprydnings- og oprensningsarbejder, gælder reglerne for begrænsning af doser og dosisgrænserne for erhvervsmæssigt strålingsudsatte arbejdstagere.

5.3.2 Befolkningen

Efter et nukleart uheld, hvor radioaktive stoffer er blevet spredt i omgivelserne (Tjernobyl etc.), eller hvor aktiviteten allerede er tilstede som følge af naturlige årsager (radon i boliger) eller tidligere tiders drift, er strålingsbeskyttelse kun mulig ved indgreb såsom fraflytning af befolkningsgrupper, kassation af forurenede fødemidler, installation af ventilation i boliger etc. **Undgåede doser** er den **eneste** relevante dosisstørrelse til vurdering af, om indgrebet kan retfærdiggøres.

ICRP har fastlagt to grundlæggende principper for fastsættelse af indgrebsniveauer til beskyttelse af befolkningen:

- a) indgrebet skal være **retfærdiggjort**, således at det aktuelle indgreb vil gøre mere gavn end skade, dvs. omkostninger og risiko ved indgrebet skal være mindre end omkostninger og risiko fra de doser, der **undgås** ved indgrebet
- b) indgrebets form, omfang og varighed skal fastsættes således, at beskyttelsen **optimeres**, dvs. fortsættes indtil et niveau, hvor yderligere indgreb bliver dyrere end de herved yderligere undgåede doser

ad. a

Til forskel fra strålingsbeskyttelsessystemet for normalsituationer, hvor det er den givne praksis, der skal retfærdiggøres, er det her beskyttelsesforanstaltningen (interventionen), der skal retfærdiggøres.

ad. b

Princippet er det samme som for normalsituationer, dvs. niveauet af beskyttelsesforanstaltningerne skal optimeres. **Hver** foranstaltning skal optimeres separat, uafhængig af om andre indgreb er indført. Det betyder f. eks., at det optimale niveau for kassation af én type af forurenede fødevarer skal fastsættes **uafhængig** af det optimale kassationsniveau for andre typer af fødevarer.

Så vidt muligt skal indgreb foretages for at undgå doser, der kan medføre deterministiske skader.

Der findes ikke nogen officielle danske indgrebsniveauer til beskyttelse af befolkningen efter et nukleart eller radiologisk uheld. På grundlag af anbefalingerne i EU's basisdirektiv og de internationale anbefalinger fra ICRP og IAEA er der imidlertid udarbejdet et sæt vejledende indgrebsniveauer, som gengivet i tabel 14. De er udtrykt som de doser, der mindst skal undgås ved forskellige typer af indgreb.

Tabel 14. Vejledende danske indgrebsniveauer for den akutte og den længerevarende fase efter et nukleart uheld med forurening af omgivelserne.

Indgrebstype	Indgrebsniveau (doser der kan undgås)
Gå inden døre (< 2 døgn)	0,5 mSv pr. time
Jodprofylakse	100 mSv (ækvivalent dosis)
Evakuering (< 1 uge)	10 mSv pr. døgn
Fraflytning af befolkning	10 mSv pr. måned for befolkningen
Lukning af industri	50 mSv pr. måned for ansatte

Efter et iværksat indgreb, eller hvor indgreb har været overvejet men ikke iværksat, fordi de ikke kan retfærdiggøres, er de resterende individdoser til de berørte personer ikke længere omfattet ICRP's beskyttelsessystem. Er der eksempelvis tale om forurenede landområder efter et nukleart uheld, hvor fraflytning ikke har kunnet retfærdiggøres, skal de forhøjede dosisniveauer betragtes som 'det nye baggrunds niveau', også for en eventuelt fremtidig praksis.

6 Praktisk strålingsbeskyttelse

Arbejde med radioaktive stoffer kan medføre en vis strålingsdosis og dermed også en vis risiko. Den internationale strålingsbeskyttelsesorganisation, ICRP, har opstillet 3 grundregler for arbejde med radioaktive stoffer, som skal minimere risikoen ved arbejdets udførelse. De tre grundregler er:

- enhver praksis skal retfærdiggøres
- doser skal holdes så lave, som det med rimelighed kan opnås
- doser må ikke overstige fastsatte dosisgrænser

6.1 Risøs regelsystem

EU har uddybet ICRP's anbefalinger i et direktiv, som er mindstekrav for lovgivningen på dette område i medlemslandene. I Danmark har Statens Institut for Strålehygiejne, SIS, på grundlag af EU-direktivet udarbejdet en række love og bekendtgørelser. I Risøs regelsystem har EU-direktivet og SIS's bekendtgørelser resulteret i en række instrukser, bl.a.:

DRS-4.1: Arbejde med radioaktive stoffer og ioniserende stråling

DRS-4.2: Dosisgrænser og afledte grænseværdier

DRS-4.3: Røntgenanlæg

DRS-5.1: Persondosimetri

DRS-12.1: Rekvirering af radioaktive isotoper

DRS-13.1: Emballering og transport af radioaktivt affald på Risø

DRS-20.1: Brug af det aktive afløbssystem

I nedenstående er nogle af disse regler beskrevet nøjere.

6.1.1 Klassifikation af områder

På Risø klassificeres de områder, hvor der kan være stråling eller kontamination. De klassificeres i røde, blå eller hvide strålingsområder, og røde, blå eller hvide kontaminationsområder.

For de tre **strålingsområder** kan den effektive dosishastighed, $\dot{E}$, antage følgende værdier:

Hvidt strålingsområde: $\dot{E} < 2,5 \mu\text{Sv/h}$

Blåt strålingsområde: $2,5 \mu\text{Sv/h} \leq \dot{E} \leq 25 \mu\text{Sv/h}$

Rødt strålingsområde: $\dot{E} > 25 \mu\text{Sv/h}$

For de tre **kontaminationsområder** kan kontaminationsniveauet, A , antage følgende værdier:

Hvidt kontaminationsområde:

$$\begin{aligned} A &< 10^4 \text{ Bq/m}^2 & \alpha\text{-aktivitet} \\ A &< 10^5 \text{ Bq/m}^2 & \beta\text{-aktivitet} \end{aligned}$$

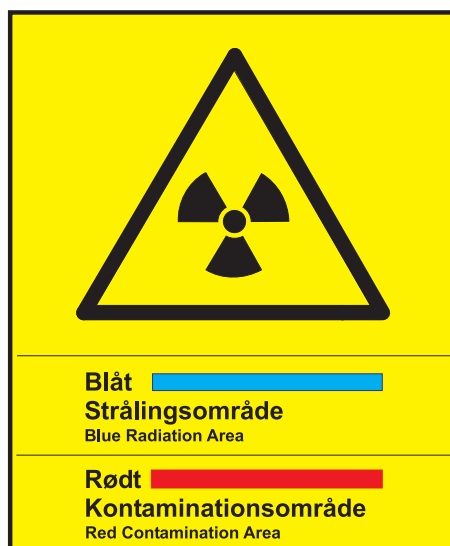
Blåt kontaminationsområde :

$$\begin{aligned} 10^4 \text{ Bq/m}^2 &\leq A \leq 10^5 \text{ Bq/m}^2 & \alpha\text{-aktivitet} \\ 10^5 \text{ Bq/m}^2 &\leq A \leq 10^6 \text{ Bq/m}^2 & \beta\text{-aktivitet} \end{aligned}$$

Rødt kontaminationsområde :

$$\begin{aligned} A &> 10^5 \text{ Bq/m}^2 & \alpha\text{-aktivitet} \\ A &> 10^6 \text{ Bq/m}^2 & \beta\text{-aktivitet} \end{aligned}$$

Blå og røde områder skal mærkes med skilte, således at man tydeligt kan se, hvorledes området er klassificeret. Ved indgangen til blå og røde kontaminationsområder er der som regel opstillet skoskranker, hvor man skal tage overtrækssko på. På figur 36 ses et eksempel på et skilt ved indgangen til et område, der er klassificeret som rødt kontaminationsområde og blåt strålingsområde. Her ved man altså, at strålingsniveauet altid er mindre end $25 \mu\text{Sv/h}$, men at der ikke er nogen øvre grænse for kontaminationsniveauet.



Figur 36. Eksempel på skilt ved indgangen til et klassificeret område.

6.1.2 Ophævelse af klassifikation for områder

Hvis man ikke mere ønsker at arbejde med radioaktive stoffer i et område, kan området deklassificeres og frigives som et helsefysisk ikke klassificeret område, hvis følgende betingelser for strålingsniveau, $\dot{X}$, og kontaminationsniveau, A , på overflader kan opfyldes:

$$\begin{aligned} \dot{X} &< 0,2 \mu\text{Sv pr. time} \\ A &< 20 \text{ Bq/m}^2 & \alpha\text{-aktivitet} \\ A &< 200 \text{ Bq/m}^2 & \beta\text{-aktivitet} \end{aligned}$$

6.1.3 Arbejde i klassificerede områder

Påklædning

I blå kontaminationsområder skal der anvendes “blå” overtrækssko og kittel i overensstemmelse med lokale regler for området.

I røde kontaminationsområder skal der anvendes “røde” overtrækssko, som kun må anvendes i området. Endvidere skal “rød” kittel eller overall anvendes i overensstemmelse med lokale regler for området.

Disse to regler søger at sikre, at man ikke kontaminerer sit eget tøj eller sine egne sko.

Kontrol når området forlades

Når et blåt eller rødt kontaminationsområde forlades, skal man checke sig for kontamination ved hjælp af en kontaminationsmonitor (hånd- og tøjmonitor eller bordmonitor).

Konstateres kontamination på overtrækssko og kittel, skal dette placeres i dertil indrettede sække/kasser for kontamineret tøj.

Konstateres kontamination på ansigt, hænder eller på andre steder af kroppen, skal aktiviteten fjernes ved afvaskning inden området forlades. Kan dette ikke lade sig gøre tilkaldes helsefysisk assistance.

Genstande, som føres ud af et blåt eller rødt kontaminationsområde, skal ligeledes checkes for kontamination og/eller induceret aktivitet.

Disse regler søger at sikre, at man ikke fører kontamination eller radioaktive stoffer ud i ikke-klassificerede områder.

Spisning og rygning

I blå kontaminationsområder er spisning og rygning kun tilladt efter nærmere bestemmelser, der er fastsat af den ansvarlige for det pågældende område. Spisning og rygning er forbudt i røde kontaminationsområder, og det er forbudt at føre mad, drikke, cigaretter, piber, læbestifter etc. ind i disse områder.

Disse regler skal hjælpe til med at sikre mod indtag af radioaktive stoffer.

6.1.4 Radioaktivt affald

Behandling af radioaktivt affald på Risø foretages af Behandlingsstationen, som afhenter affald med lav aktivitet. Før afhentning skal affaldet mærkes med en mærkeseddel, som kan rekvireres hos den stedlige repræsentant fra Anlæghelsefysiksektionen. Fra Behandlingsstationen kan man mod intern rekvisition få leveret følgende standardbeholdere til lavaktivt affald:

- polyethylenposer
- grønne PVC-sække
- galvaniserede bøtter
- beholdere til flydende affald

6.2 Praktiske metoder til begrænsning af doser

Når man arbejder med radioaktive kilder, kan man mindske dosis ved at tage visse forholdsregler, der kan være afhængige af, om man arbejder med **lukkede kilder** eller med **åbne kilder**. Ved lukkede kilder forstås kilder, der er indkapslede, således at der ikke er risiko for kontamination af luft eller overflader. Arbejdes der med åbne kilder, er der risiko for at få interne doser via indånding eller munden. I

begge situationer er der mulighed for eksterne doser, og fra begge kildetyper kan der komme både α -, β -, γ - og neutronstråling.

6.2.1 Beskyttelse mod ekstern stråling

Arbejder man med kilder, der giver mulighed for ekstern bestråling, er der tre forhold, som man især skal være opmærksom på:

- tid
- afstand
- afskærmning

6.2.1.1 Tid. For alle fire strålingsarter (α -, β -, γ - og neutronstråling) gælder det, at man får mindre dosis jo kortere tid, man opholder sig i strålingsfeltet. En halvering af den tid, man arbejder med kilderne, giver en halvering af dosis. Det kan derfor ofte være formålstjenligt, at man øver sig i det arbejde, man skal udføre, men uden den radioaktive kilde. Det gælder især, hvis man skal indøve en ny procedure; det kan også være nyttigt, at man en gang imellem tager arbejdsmetoderne op til revision og eventuelt udtænker en hurtigere måde at udføre arbejdet på. Her skal man dog være opmærksom på, at det ikke på andre måder går ud over sikkerheden (f.eks. at man med en hurtigere arbejdsmetode lettere spilder, at væsker koger over, at man taber de radioaktive kilder etc.).

Da radioaktive kilder henfalder, kan man ofte med fordel vente med at behandle eksempelvis prøver, der er blevet bestrålet, hvis der er uønsket følgeaktivitet med kort halveringstid i prøverne. Efter henfald af den kortlivede følgeaktivitet er strålingsniveauerne ofte reduceret væsentligt.

6.2.1.2 Afstand. Strålingsniveauet fra en radioaktiv kilde bliver mindre, jo længere man fjerner sig fra kilden, men afstandsafhængigheden er forskellig for α -, β - og γ -stråling.

α -stråling

α -stråling vekselvirker kraftigt med stof og har en bestemt **rækkevidde**, d.v.s. at α -stråling kun når ud i en vis afstand fra kilden. Rækkevidden er afhængig af stoffets massefylde og α -strålingens energi. Rækkevidden bliver større, jo højere energi α -partiklerne har, og den bliver mindre i stoffer med høj massefylde. Rækkevidden i væv er dog så lille, at det yderste døde hudlag på 0,07 - 0,1 mm tykkelse er tilstrækkeligt til at standse strålingen helt. En α -kilde frembyder derfor ingen helbeseftysiske problemer, når den befinder sig uden for kroppen. I luft er rækkevidden af α -partikler 3 - 10 cm.

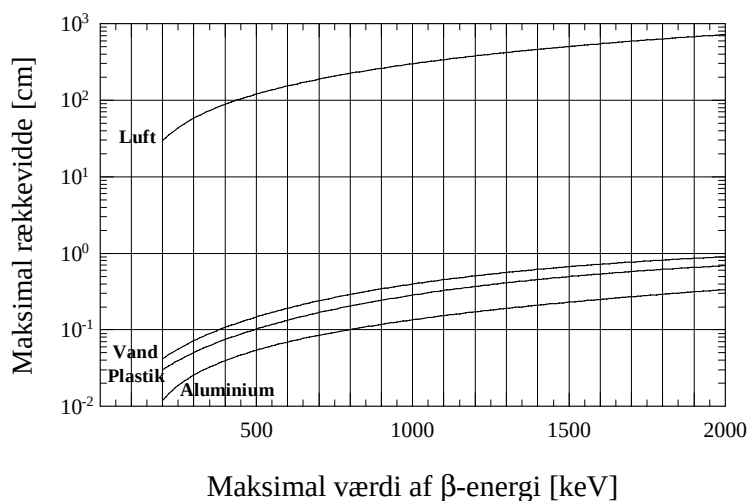
β -stråling

β -stråling har ligesom α -stråling en bestemt maksimal rækkevidde i stof. Denne er bestemt af stoffets massefylde og β -partiklernes energi. På figur 37 er rækkevidden vist som funktion af β -energien for en række forskellige stoffer. For en nuklid skal man naturligvis anvende den maksimale β -energi, $E_{\beta max}$, som er den β -energi, der står på nuklidkortet. Det ses af figuren, at rækkevidden for β -partikler i luft ligger mellem 10 cm og 10 meter.

β -dosishastigheden aftager med afstanden fra kilden og bliver 0, når afstanden er lig med eller større end rækkevidden. β -dosishastigheden, $\dot{D}_{\beta}$, i luft i afstanden x fra en punktformig β -kilde med kildestyrken Q kan beregnes af:

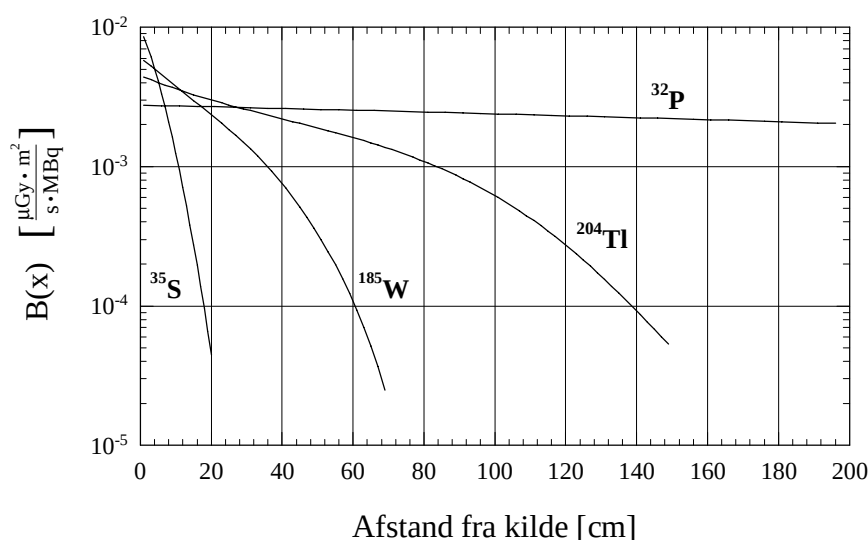
$$\dot{D}_{\beta}(x) = B(x) \cdot \frac{Q}{x^2} \quad (19)$$

hvor $B(x)$ aftager med afstanden.



Figur 37. Rækkevidde for β -partikler som funktion af β -energien for forskellige materialer.

På figur 38 er $B(x)$ for luft angivet som funktion af afstanden for nukliderne ^{35}S med $E_{\beta\max} = 0,2$ MeV, ^{185}W med $E_{\beta\max} = 0,4$ MeV, ^{204}Tl med $E_{\beta\max} = 0,8$ MeV og ^{32}P med $E_{\beta\max} = 1,7$ MeV.



Figur 38. $B(x)$ som funktion af afstanden, x , for forskellige nuklider.

I tabel 15 er dosishastigheden i luft i forskellige afstande angivet for forskellige nuklider, der kun udsender β -stråling.

β -dosishastigheden aftager hurtigere end med kvadratet på afstanden. Som det fremgår af figur 38 har dette i laboratoriet især betydning for nuklider, der udsender β -stråling med maksimale energier under 0,5 MeV. F.eks er $B(x)$ ca. 2 gange mindre ved 20 cm end ved 10 cm for ^{185}W , og $B(x)$ kan derfor blive mindre, hvis afstanden til arbejdsstedet øges. Arbejder man med ^{35}S , vil en pincet på 20 cm i stedet for en på 10 cm mindske dosishastigheden til hændernes hud med ca. en faktor 150, idet $B(x)$ bliver ca. 40 gange mindre. Dosishastigheden mindskes kun med en faktor 4, hvis man arbejder med ^{32}P , fordi dosishastigheden fra denne nuklid aftager med kvadratet på afstanden ud til flere meter fra kilden.

Tabel 15. β -dosishastigheden i luft fra ^{35}S , ^{185}W , ^{204}Tl og ^{32}P i 10, 15, 20, 50 og 100 cm's afstand.

Afstand til kilde [cm]	$\dot{D}_\beta(x)$ $\left[\frac{\mu\text{Gy}}{\text{h}\cdot\text{MBq}} \right]$			
	^{35}S	^{185}W	^{204}Tl	^{32}P
10	490	1400	1300	970
15	51	500	530	430
20	3,7	220	270	240
50	~ 0	4,6	27	37
100	~ 0	~ 0	2,2	8,6

γ -stråling

Sammenhængen mellem aktivitet og γ -dosishastighed angives ved **dosishastigheds-konstanten** Γ , der angiver dosishastigheden i en meters afstand fra en punktkilde med en kildestyrke på 1 Bq. Dosishastigheden $\dot{H}(x)$ i afstanden x fra en punktkilde med kildestyrken Q , kan beregnes af:

$$\dot{H}(x) = \Gamma \cdot \frac{Q}{x^2} \quad (20)$$

Bemærk, at dosishastigheden aftager med kvadratet på afstanden, og det betyder, at hvis man kan forøge afstanden til arbejdsstedet med en faktor 2, reduceres dosishastigheden med en faktor 4. I tabel 16 er dosishastigheds-konstanten angivet for en række radionuklider.

Tabel 16. Dosishastigheds-konstanten, Γ , for en række radionuklider.

Nuklid	Γ $\left[\frac{\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2}{\text{h}\cdot\text{MBq}} \right]$
^{24}Na	0,428
^{28}Al	0,197
^{41}Ar	0,155
^{59}Fe	0,147
^{60}Co	0,305
^{82}Br	0,342
^{85}Kr	0,00031
^{131}I	0,051
^{137}Cs	0,076
^{198}Au	0,054
$^{226}\text{Ra}+\text{døtre}$	0,206
^{241}Am	0,0028

Eksempel 1

En person opholder sig 2 meter fra en punktformet ^{60}Co -kilde med kildestyrken 2 GBq og bliver derved bestrålet på hele kroppen.

- Hvor stor en dosis har personen fået efter 8 timers ophold på dette sted ?
- Hvor stor en dosis får personen, hvis afstanden øges til 4 meter ?

ad a.

Dosishastigheden på opholdsstedet bliver, idet Γ aflæses fra tabel 16:

$$\begin{aligned}\dot{H} &= 0,305 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{MBq}} \cdot \frac{2 \cdot 10^3 \text{ MBq}}{2^2 \text{ m}^2} \\ &= 153 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}\end{aligned}$$

Dosis efter 8 timers bestråling bliver:

$$\begin{aligned}H &= 153 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot 8 \text{ h} \\ &= \underline{1,2 \text{ mSv}}\end{aligned}$$

ad b.

Dosishastigheden på opholdsstedet bliver, idet Γ aflæses fra tabel 16:

$$\begin{aligned}\dot{H} &= 0,305 \frac{\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{MBq}} \cdot \frac{2 \cdot 10^3 \text{ MBq}}{4^2 \text{ m}^2} \\ &= 38 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}\end{aligned}$$

Dosis efter 8 timers bestråling bliver:

$$\begin{aligned}H &= 38 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot 8 \text{ h} \\ &= \underline{0,3 \text{ mSv}}\end{aligned}$$

Dosishastigheden bliver altså 4 gange mindre, hvis man gør afstanden til kilden 2 gange større.

6.2.1.3 Afskærmning. Er den kilde, man arbejder med, så kraftig, at man ikke kan reducere dosishastigheden tilstrækkeligt ved at bruge pincet eller "pensionats-arm", kan det være nødvendigt at afskærme kilden. Kilder, der har en kildestyrke på mindre end 10 kBq, er det normalt ikke nødvendigt at afskærme. Man skal være opmærksom på, at de fleste radioaktive kilder udsender γ -stråling.

α -stråling

Da det yderste følsomme hudlag er nok til at standse α -partikler, behøver man aldrig at afskærme for α -stråling.

β -stråling

β -stråling har en væsentlig større rækkevidde end α -stråling. Det kan derfor være nødvendigt at sørge for at afskærme kilder, der udsender β -stråling.

En brøkdel af β -partiklernes energi omsættes ved nedbremsningen i afskærmningsmaterialet til bremsestråling. Jo større massefylde af afskærmningsmaterialet, jo større er procentdelen, der omdannes til bremsestråling.

Det er derfor bedst at vælge et let materiale som f. eks. plexiglas til afskærmning af β -partikler. Dette materiale har desuden den store fordel, at det er gennemsigtigt. En afskærmningstykkelse på 10 mm vil være tilstrækkelig til helt at standse strålingen, hvis maksimalenergien af β -partiklerne er mindre end 2,5 MeV. Anvendes aluminium til afskærmning, vil 5 mm være tilstrækkeligt.

Briller og gummihandsker er også et udmærket supplement til afskærmning mod β -stråling.

γ -stråling

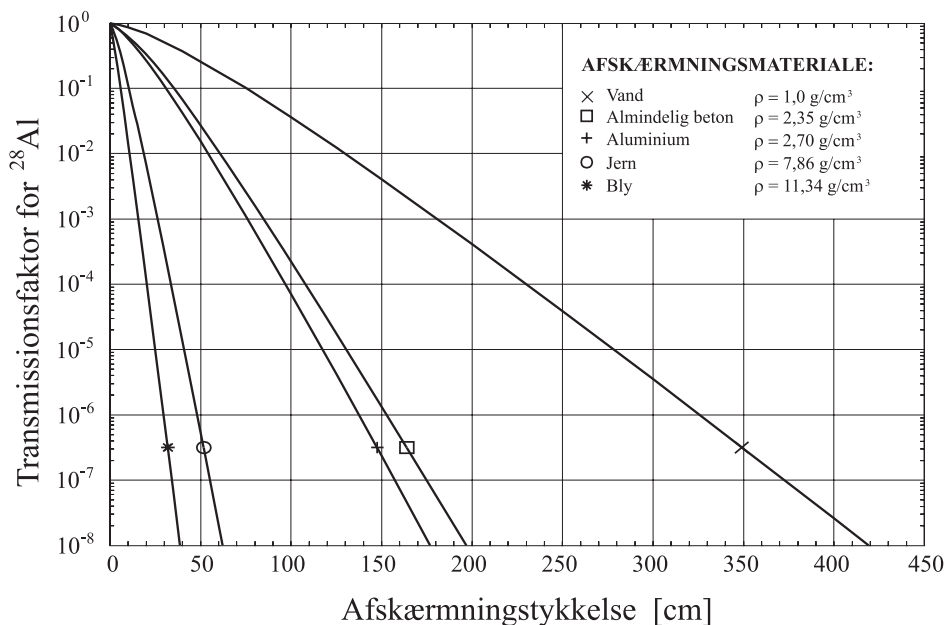
Modsat α -stråling og β -stråling har γ -stråling ikke en endelig rækkevidde i det materiale, den gennemtrænger. I princippet kan man ikke standse γ -stråling helt med en afskærmning, men man kan reducere den så meget, at den bliver betydningsløs.

Materialers afskærmningsevne for γ -stråling afhænger af materialets massefylde, ρ , og af γ -strålingens energi. Tunge stoffer har bedre afskærmningsegenskaber end lette, f.eks. er bly et bedre afskærmningsmateriale end aluminium. Energirig γ -stråling som strålingen fra ^{60}Co har større gennemtrængningsevne end strålingen fra ^{137}Cs .

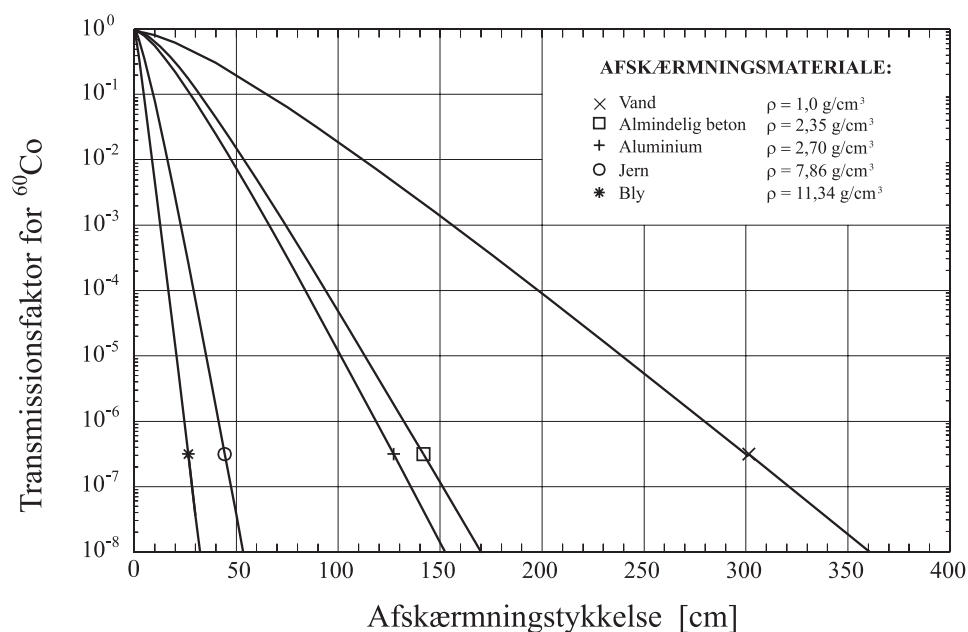
Et materiales afskærmningsevne er karakteriseret ved en **transmissionsfaktor**, T , der er defineret som:

$$T = \frac{\text{dosishastighed med afskærmning}}{\text{dosishastighed uden afskærmning}} \quad (21)$$

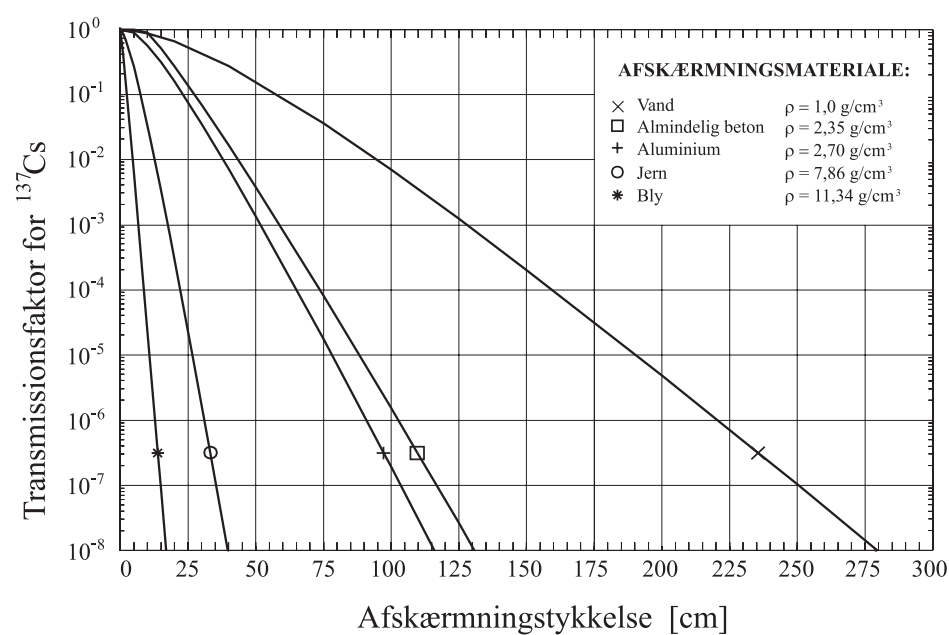
Enhver radionuklid har karakteristiske transmissionsfaktorer for forskellige materialer på grund af nuklidens energispektrum. På figur 39, 40 og 41 er transmissionsfaktorerne for punktformede kilder af ^{28}Al , ^{60}Co og ^{137}Cs vist.



Figur 39. Transmissionsfaktorer for ^{28}Al .



Figur 40. Transmissionsfaktorer for ^{60}Co .



Figur 41. Transmissionsfaktorer for ^{137}Cs .

Dosishastigheden fra en afskærmet kilde, der udsender γ -stråling kan beregnes af:

$$\dot{H} = T \cdot \Gamma \cdot \frac{Q}{x^2} \quad (22)$$

hvor T er transmissionsfaktoren for det pågældende afskærmningsmateriale og den pågældende radionuklid.

Eksempel 2

Hvor stor en betonafskærmning skal der til for at reducere strålingsniveauet fra en ^{137}Cs -kilde fra 33 mSv/h til 4 $\mu\text{Sv/h}$?

Først beregnes transmissionsfaktoren:

$$\begin{aligned} T &= \frac{\text{dosishastighed med afskærmning}}{\text{dosishastighed uden afskærmning}} \\ &= \frac{4 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/h}}{33 \cdot 10^{-3} \text{ Sv/h}} \\ &= 1,2 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

På figur 41 aflæses, at en betontykkelse på ca. 70 cm giver den ønskede reduktion i strålingsniveauet.

I tabel 17 er den afskærmning, der vil give en transmissionsfaktor på 0,001 for en punktkilde, vist for forskellige radionuklider og forskellige afskærningsmaterialer. ρ angiver massefylden, og radionukliderne er tabelleret med stigende γ -energi.

Tabel 17. Afskærmningstykkelser, der giver en transmissionsfaktor på 10^{-3} for en punktkilde for forskellige materialer og radionuklider.

Nuklid	Afskærmningstykkelse [cm]			
	Afskærningsmateriale			
	vand $\rho = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	beton $\rho = 2,4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	bly $\rho = 11,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	uran $\rho = 19,1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
^{198}Au	115	53	5	2,1
^{131}I	115	51	5	2,4
^{137}Cs	135	60	7	3,4
^{82}Br	143	67	11	5,9
^{59}Fe	155	75	12	6,6
^{60}Co	153	75	13	6,9
^{28}Al	180	85	16	8,8
^{24}Na	205	95	17	9,2
^{16}N	310	135	17	9,4

Af tabellen ses, at materialer med stor massefylde afskærmer væsentlig bedre end materialer med lille massefylde. Man ser også af tabellen, at jo større energien af den udsendte γ -stråling er, jo mere afskærningsmateriale skal der til for at opnå den samme afskærmning (transmissionsfaktor). Der skal således anvendes ca. dobbelt så meget bly, hvis dosishastigheden skal reduceres til $\frac{1}{1000}$, når kilden er ^{60}Co i forhold til, hvis kilden er ^{137}Cs .

For β -kilder, der udsender γ -stråling, gælder det sædvanligvis, at der afskærmet tilstrækkeligt for den eksterne bestråling fra den udsendte γ -stråling, er afskærmningen også tilstrækkelig til at afskærme for eksterne bestråling fra den udsendte β -stråling.

Neutroner

Hurtige neutroner indfanges ikke så let som termiske neutroner. De skal derfor først nedbremses, og vand, beton eller jern er velegnet hertil. Når neutronerne er

blevet termiske, kan de absorberes i f. eks. cadmium. Efter passage af en 1 mm cadmiumplade vil kun ca. en hundredetusindedel af de termiske neutroner være tilbage. Ved absorption i cadmium udsendes der imidlertid γ -stråling, som man som regel skal afskærme for. Bor (^{10}B) er også velegnet til absorption af termiske neutroner, og der udsendes kun α -stråling i forbindelse med indfangningsprocessen.

Til afskærmning af neutroner anvendes derfor ofte en sandwich-blanding af forskellige materialer, f. eks. vand-jern-beton eller vand-bly-beton som i DR 3.

6.2.2 Beskyttelse mod intern bestråling

Den vigtigste beskyttelsesforanstaltning mod bestråling fra radioaktive stoffer i kroppen, er **at forhindre, at de radioaktive stoffer kommer ind i organismen**. Afstanden mellem kilde og organer er reduceret til nul og lader sig ikke ændre, og det er heller ikke muligt at etablere en afskærmning. De radioaktive stoffer udskilles fra kroppen via urin, afføring, udåndingsluft eller sved. Udskillelsen er bestemt af kroppens biologiske systemer, og det er vanskeligt at ændre udskillelseshastigheden væsentlig og dermed den tid, de radioaktive stoffer opholder sig i organismen. Radioaktive stoffer kan komme ind i organismen via:

- næsen
- munden
- huden
- sår

Det er vigtigt, at arbejdspladsen er indrettet således, at man undgår indtag. Før en arbejdsproces påbegyndes, skal man overveje, om der er risiko for, at radioaktive materialer kan frigives til luften i større mængder. Hvis der er stor sandsynlighed herfor, skal man overveje, om man skal udføre arbejdet i et **stinkskab**. Dette er ikke altid muligt, og man kan så iføre sig en eller anden form for **åndedrætsværn**, eventuelt en maske med glasfiberfilter og/eller kulfilter.

Det kan også være nødvendigt at iføre sig en særlig beskyttelsesdragt, en såkaldt **heldragt**, hvortil der er koblet en friskluftforsyning. Dette er nødvendigt, hvor der er en stor løstsiddende overfladekontamination og/eller en stor luftkoncentration af radioaktive stoffer. Det kan også være nødvendigt, hvis man arbejder i områder med "gasformig" luftkontamination, f. eks. tritieret vanddamp på DR 3.

Til kontrol af om det er nødvendigt at anvende masker eller heldragter, kan man monitorere luftens indhold af radionuklider med en CAM (**C**ontinuous **A**ir **M**onitor) eller en tritiummonitor. Man kan også overvåge arbejdsprocessen med en personlig luftmonitor.

Det er meget vigtigt, at man bærer handsker, når der arbejdes med radioaktive stoffer, der kan forårsage overfladekontamination, således at de radioaktive stoffer ikke sætter sig på hænderne. Det er nemlig meget ofte, man får materialer ført fra hænderne til andre dele af kroppen, især ind i munden. Man er heller ikke så tilbøjelig til at klø sig i håret, nakken eller næsen, hvis man har handsker på.

6.3 Arbejdshygiejne

En god arbejdshygiejne er med til sikre, at doserne holdes på et lavt niveau. Til god arbejdshygiejne hører:

- indretning af laboratorium
- ordentlig planlægning
- rigtig påklædning, herunder dosimetre

- rigtig helsefysisk instrumentering
- omhu i udførelsen af arbejdet
- oprydning

6.3.1 Laboratorieindretning

Ved indretning af isotoplaboratorier, hvor der skal arbejdes med åbne radioaktive kilder, skal der lægges vægt på at forebygge kontamination af personer, overflader og luft. Der skal endvidere lægges vægt på, at det skal være let at fjerne kontamination. Overflader skal derfor være glatte, uden revner, ikke-porøse, ikke fugtsugende, kemisk og fysisk inaktive, modstandsdygtige over for korrosion og varme samt være let tilgængelige for afvaskning. De steder, som let kan blive kontaminerede, skal kunne tåle hyppige afvaskninger. Ventilation skal kunne ventilere laboratoriet godt og holde et svagt undertryk i forhold til de omgivende lokaler. Arbejdet med de radioaktive kilder skal sædvanligvis foregå i stinkskaab evt. handskeboks. Der skal være gode muligheder for at rengøre personer og udstyr. Der skal være rigelig med arbejdsplads og lagerplads, og kontamineret udstyr skal kunne holdes adskilt fra ikke kontamineret udstyr. Ovenstående råd med hensyn til indretning af laboratorier adskiller sig ikke fra råd til indretning af almindelige laboratorier, hvor der håndteres kemiske stoffer, der kan være sundhedsskadelige for mennesker. Udover ovenstående skal der på isotoplaboratorier være udstyr til at måle kontamination og eventuelt ekstern stråling. Hvis det er nødvendigt, skal der endvidere være mulighed for at opbygge afskærmning.

6.3.2 Planlægning

Når et specielt arbejde skal udføres, skal arbejdsproceduren først fastlægges. Dernæst anslås eksterne dosisniveauer, og hvad der eventuelt kan komme af overflade- og luftkontamination. Ud fra dette kan det så bestemmes hvilke beskyttelsesforanstaltninger, der skal anvendes. Disse forhold afklares i samarbejde med helsefysisk personale. Beskyttelsesforanstaltningerne kan bl.a. være afdækning af arbejdsområdet med plastik, udsugning og/eller afskærmning.

Skal man arbejde med meget kraftige kilder, er det en god ide at udføre nogle "dummy-forsøg, hvor arbejdsprocessen gennemføres uden den radioaktive kilde, således at alle medvirkende er helt sikre på, hvordan arbejdet skal udføres.

6.3.3 Påklædning

Det kan være nødvendigt at iføre sig en hel- eller halvdragt under en operation. Det er dog i de fleste tilfælde nok at tage en kittel (eventuelt en kedeldragt) og et par handsker på og huske at holde kitlen knappet og ikke lade den flagre. Til påklædningen hører også de relevante dosimetre. Det vil sige det almindelige persondosimeter, der altid skal bæres i klassificerede områder. Dertil kommer et digitalt dosimeter, der skal bæres i visse områder samt specielle dosimetre på fingre, håndled og pande afhængigt af de operationer, der skal udføres.

6.3.4 Helsefysisk instrumentering

Det er vigtigt at vide hvilke helsefysiske instrumenter, der kan benyttes under arbejdet. Det kan ikke nytte noget, at man anvender et ionkammer til måling af overfladekontamination, eller anvender et ionkammer med højeste måleområde på 50 $\mu\text{Sv/h}$ til måling af strålingsniveauer på flere mSv/h . Specielle dosimetre, f. eks. håndleds- eller pandedosimetre er vigtige, når man skal udføre et arbejde, der kan give store lokale doser. Det er som regel helseassistenten fra Anlæghelsefysik, der sørger for disse ting, men det er vigtigt, at den, der udfører arbejdet, har en vis fornemmelse af hvilke instrumenter, der kan måle hvad.

6.3.5 Omhu

Når man arbejder med radioaktive kilder, skal man være opmærksom på risikoen for indtag. Det gælder bl.a. egne vaner: hvor tit klør man sig i håret, hvor tit tygger man på sin blyant, o.s.v. Man må så prøve at ændre på sine uvaner. Det er også vigtigt at huske på at **al indtag af leverpostejmadder, kager, kaffe o.s.v. normalt er forbudt i klassificerede kontaminationsområder.**

Det er heller ikke nogen god ide at påbegynde et arbejde, når man ikke har god tid til at udføre det; det er ofte, når man skal skynde sig, at der sker uheld. Det er altså ikke nogen god ide, at starte på et arbejde sent om eftermiddagen, når man både skal nå at hente børn i børnehaven og at købe ind.

6.3.6 Oprydning

Af hensyn til personer, der skal anvende arbejdspladsen bagefter, er det meget vigtigt, at man rydder op, når man er færdig med at arbejde med radioaktive stoffer. Der vil meget ofte være bordplader, glas, pincetter eller lignende, der er kontamineret, og dette skal rengøres, således at efterfølgeren - eller en tilfældig forbipasserende - ikke kan blive kontamineret og således uforvarende kan sprede radioaktive stoffer i området. Det skal specielt huskes at **alt**, hvad der forlader et kontaminationsområde, både personer og genstande, skal checkes for kontamination.

7 Menneskets strålingsmiljø

Menneskets strålingsmiljø kan deles op i følgende hovedområder:

- **det naturlige strålingsmiljø**, der skabes af kosmisk stråling fra verdensrummet og fra de naturligt forekommende radionuklider
- **medicinsk bestråling**, der sker ved medicinsk diagnostik og terapi
- **erhvervsmæssig bestråling**, der sker i erhverv, hvor der forekommer ioniserende stråling

Foruden de naturskabte nuklider er naturen “forurennet” med radionuklider skabt af menneskelig aktivitet. Disse nuklider medfører meget små strålingsdoser, og de vigtigste bidrag er medtaget under det sidste afsnit i dette kapitel.

7.1 Det naturlige strålingsmiljø

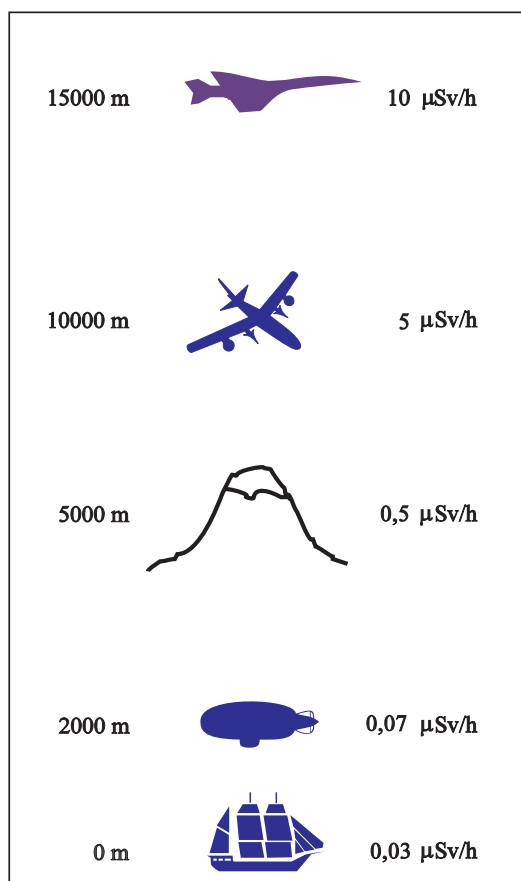
Det største bidrag til menneskets strålingsmiljø kommer fra naturlige strålingskilder, dvs. kilder skabt af naturen. De terrestriske radionuklider er naturligt forekommende nuklider på Jorden, mens den kosmiske stråling kommer fra verdensrummet. Både de terrestriske radionuklider og den kosmiske stråling medfører interne og eksterne strålingsdoser.

7.1.1 Kosmisk stråling

Fra rummet bestråles jordkloden med ladede partikler, hvoraf ca. 90 % er protoner og ca. 10 % er heliumkerner. Disse partikler er meget energirige med energier på op til flere GeV, og de udgør den **primære** kosmiske stråling. Jordens atmosfære samt dens magnetfelt gør, at den primære kosmiske stråling ikke når ned til jordoverfladen. Istedet vekselvirker den med atomerne i atmosfæren. Disse vekselvirkninger er så voldsomme, at de atomer, der rammes, spaltes i flere dele (spallation). Ved spallationen dannes lette nuklider og en **sekundær stråling** af bl.a. neutroner og protoner.

En del af de dannede nuklider er radioaktive og kaldes for **kosmogene**, som f.eks. ^3H , ^7Be og ^{14}C . De dannede nuklider når efter en tid ned til jorden. Her indgår de i forskellige biologiske og fysiske systemer; således kan ^3H og ^{14}C indbygges i ^3HHO og $^{14}\text{CO}_2$ og herefter indgå i vand- og kuldioxidkredsløbene. Via drikkevand og fødevarer modtager mennesket interne doser fra disse nuklider. I gennemsnit er denne dosis ca. $15 \mu\text{Sv}/\text{år}$. De eksterne doser fra kosmogene nuklider er betydningsløse.

Den sekundære kosmiske stråling medfører ekstern bestråling. Strålingen kan opdeles i en elektrisk ladet komponent af elektroner m.m. og en uladet bestående af neutroner. Størrelsen af disse komponenter og deres relative bidrag er afhængig af højden over havniveau. På figur 42 er den samlede dosishastighed givet som funktion af højden over havniveau.



Figur 42. Dosishastighed fra kosmisk stråling som funktion af højden over havniveau.

7.1.2 Terrestriske radionuklider

De terrestriske nuklider er de radionuklider, der findes på Jorden (undtaget de kosmogene nuklider). Disse kan inddeles i de meget langlivede nuklider, der har været på Jorden siden dens dannelse samt mere kortlivede nuklider, der dannes ved henfald af langlivede nuklider. De langlivede terrestriske nuklider er givet i tabel 18. De tre sidste nuklider i tabel 18 er de første led i lange henfaldskæder.

Tabel 18. De langlivede terrestriske nuklider og deres halveringstid.

Nuklid	Halveringstid [år]
^{40}K	$1,3 \cdot 10^9$
^{87}Rb	$4,8 \cdot 10^{10}$
^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10}$
^{235}U	$7,0 \cdot 10^8$
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$

Henfaldskæden for ^{238}U er vist i tabel 19. Den kan findes ved at følge de enkelte nuklidens henfald på nuklidkortet.

Tabel 19. Henfaldskæden for ^{238}U .

Nuklid	Udsendt stråling	Halveringstid
^{238}U	α, γ	$4,5 \cdot 10^9 \text{ y}$
↓ ^{234}Th	β^-, γ	24,1 d
↓ $^{234\text{m}}\text{Pa}$	β^-, γ	1,18 m
↓ ^{234}U	α, γ	$2,5 \cdot 10^5 \text{ y}$
↓ ^{230}Th	α	$8 \cdot 10^4 \text{ y}$
↓ ^{226}Ra	α, γ	1600 y
↓ ^{222}Rn	α, γ	3,82 d
↓ ^{218}Po	α	3,05 m
↓ ^{214}Pb	β^-, γ	26,8 m
↓ ^{214}Bi	β^-, γ	19,8 m
↓ ^{214}Po	α	$1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$
↓ ^{210}Pb	β^-	21,3 y
↓ ^{210}Bi	β^-	5,01 d
↓ ^{210}Po	α, γ	138,4 d
↓ ^{206}Pb	stabil	

De terrestriske radionuklider findes overalt på Jorden: i undergrunden, i vand, i luft, i byggematerialer, i fødemidler, i mennesker m.m. De giver derfor både interne og eksterne strålingsdoser. Gennem madvarer modtager en gennemsnitsdanske en intern dosis på ca. $350 \mu\text{Sv}/\text{år}$. Den gennemsnitlige eksterne udendørs γ -dosishastighed fra terrestriske radionuklider i jordoverfladen er i Danmark bestemt til $0,04 \mu\text{Sv}/\text{h}$. Indendørs er den bestemt til $0,05 \mu\text{Sv}/\text{h}$. På Bornholm er den gennemsnitlige eksterne γ -dosishastighed indendørs $0,07 \mu\text{Sv}/\text{h}$. Fra terrestriske radionuklider i jord og i byggematerialer modtager en gennemsnitsdanske en ekstern dosis på ca. $320 \mu\text{Sv}/\text{år}$.

Der er områder på Jorden, hvor den eksterne dosishastighed fra terrestriske nuklider er relativ høj. I kystområderne i den indiske stat Tamil Nadu kan γ -dosishastigheden pga. thoriumholdigt monazitsand nå op på $4,2 \mu\text{Sv}/\text{h}$ (svarende til $37 \text{ mSv}/\text{år}$).

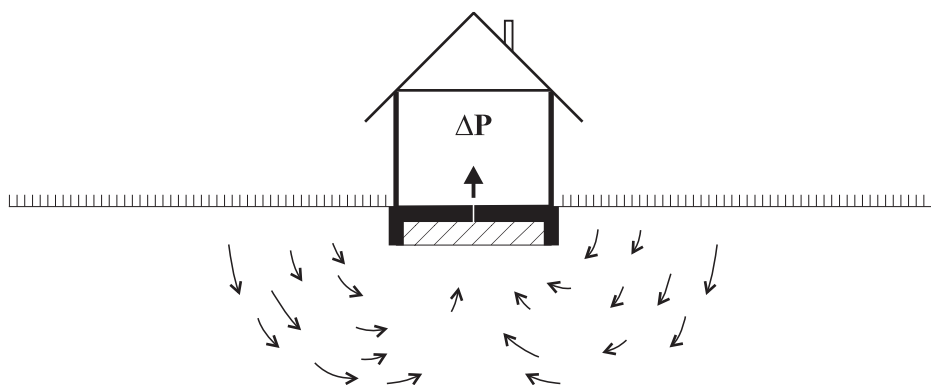
Den helsefysisk mest betydningsfulde terrestriske radionuklid er ^{222}Rn (radon). Det har vist sig, at radon og dens henfaldsprodukter (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi og ^{214}Po)

kan opkoncentreres i indendørsluften i boliger og her give anledning til interne strålingsdoser via indånding.

Radon i indendørsluften er dannet i den jord, der ligger under boligen samt i boligens byggematerialer. For enfamiliehuse er indtrængning fra jorden normalt dominerende.

I jorden produceres radon ved henfald af ^{226}Ra , der findes i jordpartiklerne, da den er et led i ^{238}U -henfaldskæden. En del af den dannede radon kan trænge ud i de porer, der er i jorden. Radonkoncentrationen i jordluft er relativ høj og ligger normalt i området 5000-100 000 Bq/m³. Radon er en såkaldt inaktiv gas, dvs. den reagerer stort set ikke med andre stoffer. Den binder sig derfor ikke til jordpartikler og kan bevæge sig langt, hvis den ved dannelsen kommer ud i jordens porer.

Fra jorden kan radon trænge ind i et hus gennem porer, sprækker og rørgennemføringer i husets fundament. Transporten kan ske ved almindelig "sivning", men store mængder radon kan også suges ind, når der pga. opvarmning, ventilation, vindpåvirkninger og lufttrykændringer dannes undertryk i huset i forhold til luften i den omgivende jord. Dette er illustreret på figur 43



Figur 43. Undertrykket i huset, ΔP , forårsager en transport af radonholdig luft fra jorden ind i huset.

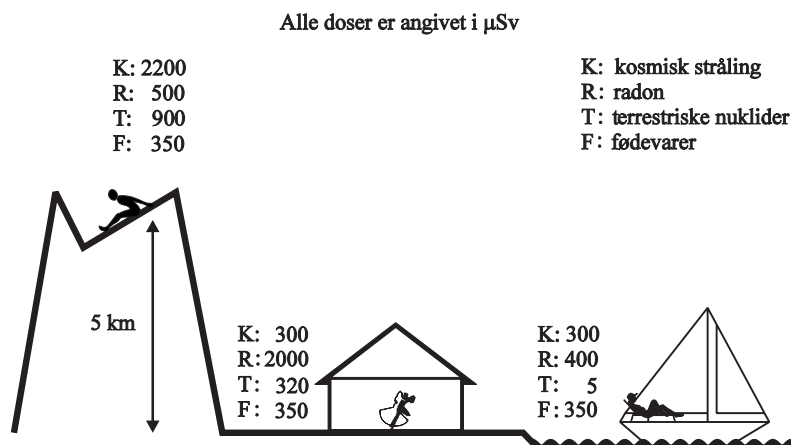
I et hus fortyndes jordluften ved blanding med udendørsluft, der trænger ind i huset. Radonkoncentrationen i udendørsluften er ca. 10 Bq/m³.

I en landsdækkende undersøgelse, foretaget af Statens Institut for Strålehygiejne og Risø, er radonkoncentrationen blevet bestemt i 3000 danske boliger. Der blev målt koncentrationer på mellem 0 og 600 Bq/m³. Ud fra målingerne kan der beregnes en middelværdi for danske boliger på 59 Bq/m³. Dette er den middelsoncentration en gennemsnitsdansker har i sin bolig. Radon kan beregnes at give gennemsnitsdanskere en årlig effektiv dosis på ca. 2000 μSv .

I Danmark er der ikke fundet områder eller enkelte boliger med meget høje koncentrationer, som det er sket i udlandet. Nogle af de højeste niveauer er målt i Pennsylvania i USA. Her er der fundet huse med koncentrationer på 100 000 Bq/m³ svarende til årsdoser på 3500 mSv! Sådanne høje radonkoncentrationer er også fundet i underjordiske grotter.

I ^{232}Th -henfaldskæden dannes radonisotopen ^{220}Rn . Fra thorium i jord vil der foruden ^{222}Rn derfor også trænge ^{220}Rn i vores boliger. Koncentrationen af denne isotop er dog meget mindre end ^{222}Rn på grund af en meget kortere halveringstid (56 s).

På figur 44 er størrelsen af årlige dosisbidrag fra kosmisk stråling, indånding af radon, ekstern stråling fra terrestriske nuklider samt fra radioaktive stoffer i kroppen givet for ophold i 5 km's højde, ophold indendørs på jordoverfladen og ophold på havet.



Figur 44. Årlige dosisbidrag ved ophold forskellige steder fra kosmisk stråling, indånding af radon, ekstern stråling fra terrestriske nuklider samt fra indtag af radioaktive stoffer via fødevarer.

7.2 Medicinsk bestråling

Ioniserende stråling og radioaktive stoffer benyttes meget inden for det medicinske fagområde. Stråling anvendes ved patientundersøgelser (**diagnostik**) og ved sygdomsbehandling (**terapi**). Udover den direkte anvendelse i patientbehandling bruges ioniserende stråling og radioaktive stoffer ved undersøgelser af patientprøver og i medicinsk forskning.

7.2.1 Diagnostik

Røntgenstråling anvendes i stor udstrækning ved undersøgelser for og af vævsforandringer i kroppen. Dette kan være knoglebrud, kræftsvulster, vævsbetændelse m.m. De fleste optagelser foretages med traditionelle røntgenapparater, men mere avancerede teknikker som CT-scanning benyttes i større og større udstrækning.

I højtudviklede lande som Danmark tages der i gennemsnit knapt et billede pr. indbygger pr. år i forbindelse med medicinsk diagnostik, hertil kommer i gennemsnit 0,25 billede hos tandlægen. I tabel 20 er den gennemsnitlige hyppighed (pr. person i højtudviklede lande) af forskellige undersøgelser vist sammen med den gennemsnitlige effektive strålingsdosis pr. undersøgelse og den gennemsnitlige effektive strålingsdosis pr. person pr. år. Tallene dækker over en skæv aldersfordeling hos de undersøgte personer; således undersøges flest i alderen fra 40 til 60 år.

Tabel 20. Hyppighed og effektive strålingsdoser ved forskellige røntgenundersøgelser.

Undersøgelse	Antal pr. år pr. 1000 personer	Strålingsdosis pr. undersøgelse [mSv]	Strålingsdosis pr. år pr. person [mSv]
Brystkasse	328	0,23	0,0075
Lemmer/led	166	0,06	0,0010
Lændehvirvel	48	1,8	0,0864
Brysthvirvel	13	1,4	0,0182
Halshvirvel	32	0,27	0,0864
Hofte/bækken	35	0,83	0,0291
Hoved	59	0,10	0,0059
Bug	41	0,50	0,0205
Spiserør	42	3,6	0,1512
Mave/tarm	8,7	6,4	0,0557
Galdeblære	3,1	2,0	0,0062
Urinveje	12	3,7	0,0444
Mammografi	25	0,5	0,0125
CT-scanning	57	8,8	0,5016
Hjerte	7,6	12	0,0912
Interventionsradio.	3	20	0,0600
Dental	310	0,02	0,0062
Total:	1190	–	~ 1

Foruden røntgenstråling anvendes der også radionuklider til diagnostik (nuklear-medicinsk diagnostik). Disse benyttes ved undersøgelser af kropsfunktioner. Ved sådanne undersøgelser indgives et radioaktivt stof, og dets transport i kroppen følges ved at detektere den udsendte γ -stråling. Til mange undersøgelser anvendes ^{99m}Tc , men også nuklider som ^{131}I , ^{123}I , ^{198}Au og ^{201}Tl anvendes. ^{99m}Tc er en velegnet nuklid, fordi den er let at fremstille, kan indbygges i mange kemiske forbindelser og er helsefysisk set forholdsvis uproblematisk.

Tabel 21 viser hyppigheden af forskellige nuklear-medicinske undersøgelser, de effektive strålingsdoser ved disse undersøgelser og den gennemsnitlige strålingsdosis pr. person pr. år for indbyggere i højtudviklede lande. I gennemsnit får hvert individ ca. 0,08 mSv pr. år fra nuklear-medicinske undersøgelser.

Tabel 21. Hyppighed og effektive strålingsdoser ved forskellige nuklear-medicinske undersøgelser.

Undersøgt organ	Antal pr. år pr. 1000 personer	Strålingsdosis pr. undersøgelse [mSv]	Strålingsdosis pr. år pr. person [mSv]
Knogler	4,5	4,5	0,0203
Hjertekredsløb	2,7	8	0,0216
Lungeperfusion	1,8	1,5	0,0027
Lungeventilation	0,34	1	0,0003
Skjoldbruskkirtel (scan)	4,1	2	0,0082
Skjoldbruskkirtel (optag)	0,92	15	0,0138
Nyrer	0,89	1,5	0,0013
Lever/milt	2,1	1,7	0,0035
Hjerne	1,3	6	0,0078
Total:	18,7	–	~ 0,08

7.2.2 Terapi

I dag anvendes strålingsterapi kun ved alvorlige sygdomme. Det drejer sig hovedsageligt om behandling af kræftsygdomme, hvor kræftceller dræbes ved bestråling med store strålingsdoser (10 - 100 Gy) i de angrebne områder. Strålingsterapien suppleres normalt med behandling med kemiske cellegifte og/eller kirurgiske indgreb.

Hvor det er muligt, benyttes ekstern bestråling. Behandlingen foretages f.eks. med røntgenstråling (50 - 300 keV), γ -stråling (^{60}Co , ^{137}Cs) eller elektronstråling fra accelerators (5 - 30 MeV). Strålingsterapi består sædvanligvis af flere bestrålinger, og behandlingen kan strække sig over flere uger.

Ud over ekstern bestråling udføres kræftbehandling ved, at radioaktive kilder føres ind i kroppen. Førhen var dette en meget anvendt metode. Den mest anvendte strålingskilde var ^{226}Ra , og derfor blev terapiafdelinger kaldt radiumstationer, en betegnelse der stadig benyttes. I dag benyttes også andre kilder f.eks. ^{137}Cs og ^{192}Ir .

Hovedparten af kræftbehandlingerne med radionuklider udføres med lukkede kilder, der udtages af patienten efter behandlingen. I få tilfælde indsprøjtes en radionuklid f.eks. ^{90}Y , ^{131}I eller ^{32}P i kroppen.

Ioniserende stråling benyttes til behandling af enkelte andre sygdomme end kræft. En forøget hormonproduktion i skjoldbruskkirtlen kan f.eks. behandles med ^{131}I , der efter indsprøjtning i blodbanen netop koncentrerer i skjoldbruskkirtlen og her afsætter en betydelig β -dosis.

I industrilande er hyppigheden af strålingsterapi af størrelsesordenen 3 pr. tusind personer pr. år, hvoraf 85 % foretages ved ekstern bestråling og 15 % ved intern bestråling.

7.3 Erhvervsmæssig bestråling

Omkring 11000 mennesker er i Danmark kategoriseret som erhvervsmæssigt eksponerede og monitoreres derfor. Tabel 22 viser en dosisstatistik fra Statens Institut for Strålehygiejne for 2003 for erhvervsmæssigt eksponerede i Danmark.

Tabel 22. Antal personer, kollektiv effektiv dosis og maksimal effektiv dosis i de forskellige grupper af erhvervsmæssigt eksponerede personer i 2003 i Danmark.

Gruppe	Antal	Maksimal effektiv dosis [mSv]	Kollektiv effektiv dosis [mSv]
Røntgendiagnostikafdelinger	2950	1-5	170
Anden røntgendiagnostik	1751	> 20	275
Dyrlæger	1319	1-5	21
Strålingsterapi	1103	> 20	56
Nuklearmedicinske afdelinger	647	1-5	457
Radioaktivitetslaboratorier	1966	1-5	31
Industriel radiografi	318	10-20	308
Anden industriel anvendelse	174	1-5	25
Servicefirmaer	310	5-10	43
Røntgenanalyse	147	1-5	1
Risø	389	5-10	31
Diverse	18	0,1-0,5	1
Total:	11 142	–	1419

Det ses af tabel 22, at de fleste personer er beskæftiget indenfor det medicinske område. Ansatte på radioaktivitetslaboratorier udgør den næststørste gruppe. Generelt er de gennemsnitlige effektive doser til erhvervsmæssigt eksponerede under 1 mSv/år. Indenfor områderne nuklearmedicin, radiografi, servicevirksomheder og på Risø kan enkeltpersoner få effektive doser, der er en væsentlig brøkdel af dosisgrænsen. I 2003 har to personer overskredet dosisgrænsen, hvilket sker sjældent.

Udnyttelsen af kernekraft medfører doser til de ansatte i hele brændselskredsløbet dvs. uranudvinding, brændselsfremstilling, reaktordrift og oparbejdning af brugt reaktorbrændsel. Typiske gennemsnitlige årlige effektive doser til dem, der får de største doser, er 5 - 10 mSv. Enkelte arbejdere kommer op i nærheden af 20 mSv i enkelt år.

Store aktivitetsmængder og høje strålingsniveauer findes på bestrålingsanlæg, hvor den dræbende virkning af meget store strålingsdoser benyttes til at slå bakterier og svampesporer ihjel på f.eks. instrumenter, der skal anvendes til operationer. Disse anlæg er afskærmede og forsynet med vidtgående sikkerhedsforanstaltninger. Dette bevirker, at personalet ikke får nogen strålingsdoser. I udlandet er der på bestrålingsanlæg sket uheld med dødelig udgang, fordi personalet groft har overtrådt sikkerhedsreglerne.

I mange sammenhænge benyttes ioniserende stråling som et "analyseværktøj", f.eks. til radiografi (gennemlysning af materialer), densitetsmålinger, fugtighedsmålinger og lækagesporing.

Industrielle processer, som involverer materiale fra undergrunden med et aktivitetsindhold over gennemsnittet, kan give anledning til en forøget bestråling. Energifremstilling ved hjælp af kul er en sådan proces. Kul indeholder spormængder af ^{40}K , ^{238}U (og datterprodukter) m.m., som ved forbrænding spredes i miljøet via røggasserne og ved anvendelse af askeprodukterne. Fremstilling af energi fra olie og naturgas spreder også radionuklider i miljøet.

Nogle fosfatforekomster indeholder relativt store mængder ^{238}U (og datterpro-

duktion). Udvinning af dette fosfat til brug i gødningsprodukter, til fosforsyre-fremstilling o.a. betyder en spredning af radionuklider. Denne spredning er uden helsefysisk betydning.

7.4 Forbrugerprodukter

Fra forskellige forbrugerprodukter modtages ubetydelige strålingsdoser. De mest anvendte af sådanne produkter er fjernsyn og selvlysende ure. I et fjernsyn frembringes skærbilledet af elektronstråler, der er dannet ved acceleration i et højspændingsfelt. Der dannes derfor røntgenstråling ved nedbremsning af elektronerne, og denne bremsestråling kan trænge ud fra fjernsynet og bestråle seerne. De effektive strålingsdoser fra tv-apparater er under $1 \mu\text{Sv}/\text{år}$. For at gøre viserne på ure selvlysende påsmøres de et scintillationsmateriale blandet med en radionuklid. Bærerne af sådanne ure modtager en lille ekstern dosis hovedsageligt til det område, hvor uret er placeret og eventuelt en intern dosis fra aktivitet, der lækker ud af uret. I tabel 23 er givet eksempler på produkter, der indeholder radioaktive stoffer, samt det typiske aktivitetsindhold.

Tabel 23. Indhold af radioaktive stoffer i forbrugerprodukter.

Produkt	Radionuklid	Typiske aktivitetsmængder [Bq]
Selvlysende ting:		
armbåndsure	^3H	$10^7\text{--}10^9$
	^{147}Pm	$10^6\text{--}10^7$
kompasser	^3H	$10^8\text{--}10^9$
	^{147}Pm	10^6
flyinstrumenter	^3H	$< 10^{12}$
	^{147}Pm	$< 10^{10}$
	^{226}Ra	$< 10^6$
maritime instrumenter	^3H	$10^{10}\text{--}10^{11}$
nødudgangsskilte o.l.	^3H	$< 10^{12}$
Røgdetektorer	^{241}Am	$10^4\text{--}10^6$
	^{226}Ra	$10^2\text{--}10^6$
	^{85}Kr	10^8
Keramisk glasur	naturligt uran	2500 Bq/g

7.5 Samlet årlig effektiv dosis til danskere

Ud fra størrelsen af de strålingskilder, der er omtalt i de forrige afsnit, kan det skønnes, hvor stor den samlede årlige effektive dosis bliver til en dansker. I tabel 24 er de skønnede værdier fra de naturlige strålingskilder anført. De eksterne strålingsdoser er helkropsdoser, mens det største bidrag til de interne doser er en delkropsbestråling af lungerne fra ^{222}Rn og dennes datterprodukter. De interne doser, der ikke skyldes radonisotoper, stammer hovedsageligt fra indtag af radionuklider via fødevarer.

Tabel 24. Skønnet årlig effektiv dosis til gennemsnitsdanskeren fra naturlige strålingskilder.

Strålingskilde	Ekstern strålingsdosis [μSv]	Intern strålingsdosis [μSv]
Kosmisk stråling:		
ioniserende komponent	220	
neutron komponent	50	
Kosmogene nuklider:		15
Terrestriske nuklider:		
^{40}K	115	180
^{87}Rb		5
^{238}U -serien (excl. ^{222}Rn - ^{214}Po)	80	140
^{222}Rn +datterprodukter		1800
^{232}Th -serien (excl. ^{220}Rn - ^{208}Tl)	125	15
^{220}Rn +datterprodukter		160
Total:	~ 600	~ 2300
Ialt:	~ 3000	

De beregnede effektive doser, der er givet i tabel 24, er gennemsnitstal, som dækker over individuelle variationer. Den største variation findes i bidraget fra radon.

Det skønnes, at den årlige effektive dosis fra naturlige kilder i Danmark ligger i intervallet 1,8 til 15 mSv

De årlige effektive strålingsdoser til gennemsnitsdanskeren fra menneskeskabte kilder er givet i tabel 25.

Tabel 25. Skønnet årlig effektiv dosis til gennemsnitsdanskeren fra menneskeskabte strålingskilder.

Strålingskilde	Effektiv strålingsdosis [μSv]
Medicinsk bestråling	1000
Fall-out aktivitet (1989)	2
Tjernobyl (1989)	3
Øvrige	10
Total:	~ 1000

Det fremgår heraf, at den medicinske bestråling dominerer den effektive strålingsdosis fra menneskeskabte strålingskilder. For den enkelte person kan bidraget variere meget, men vil i gennemsnit over et livsforløb være omkring 1 mSv/år. Personer, der får foretaget nuklear-medicinske undersøgelser, vil i nogle år kunne få en

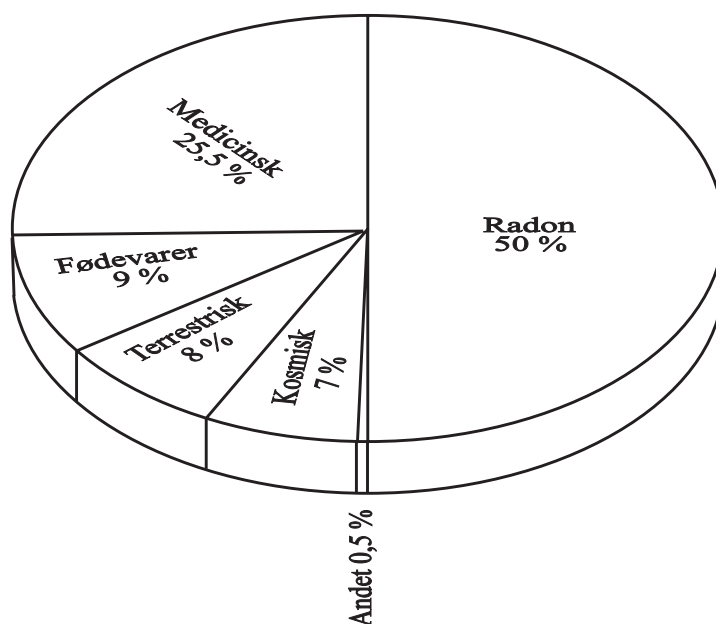
effektiv dosis på flere mSv. Ligeledes vil personer, der modtager strålingsterapi, i enkelte år kunne få en effektiv dosis på flere hundrede mSv. Bidraget fra fall-out aktivitet fra atomprøvesprængninger og som følge af Tjernobyl-ulykken er i tabel 25 beregnet for året 1989. Da aktiviteten fra disse kilder efterhånden forsvinder, bliver bidragene mindre år for år. Bidraget fra fall-out aktivitet var maksimalt i midten af 1960'erne. Den årlige effektive strålingsdosis var dengang omkring 90 μ Sv. Bidraget fra Tjernobyl var maksimalt i det første år efter ulykken, hvor det var omkring 20 μ Sv. Efter 1993 vil Tjernobyl-bidraget være helt forsvindende.

Øvrige bidrag skyldes udslip af radioaktive stoffer fra nukleare anlæg og laboratorier, der arbejder med radioaktive stoffer (f.eks. hospitaler) m.m.

Sammenlagt bliver den gennemsnitlige årlige effektive strålingsdosis til hver dansker ca. **4 mSv**.

Figur 45 angiver den relative (procentvise) sammensætning af dosisbidragene fra de forskellige strålskilder til den samlede effektive dosis.

Strålingsudsatte arbejdstagere modtager udover denne baggrundsdosis en strålingsdosis i kraft af deres arbejde. Denne er for langt de flestes vedkommende mindre end 5 mSv/år, og kun et fåtal får doser tæt på dosisgrænsen (20 mSv pr. år).



Figur 45. Den procentvise sammensætning af dosisbidragene fra forskellige strålskilder til den samlede effektive dosis.

Indeks

α

- aktivitet, 34, 66
- emitter, 11, 37
- energi, 11, 37
- henfald, 10, 11
- partikel, 10, 14, 38, 68, 71
- spektrometer, 35
- spektrometri, 37, **38**
- spektrum, 37, 38
- stråling, 10, 24, 35, 68, 71
- tæller, 35

β

- aktivitet, 34, 38, 66
- dosis, 24, **40**
- dosishastighed, 68, 69
- emitter, **12**
- henfald, 12
- maksimalenergi, $E_{\beta, max}$, **12**
- partikel, 11, 14, 38, 68, 72
- stråling, 11, 24, 35, 39, 41, 68, 72
- tæller, 35, 38
- vindue, 39

β^+ -henfald, 11, 12

β^- -henfald, 11, 12

γ

- dosis, **40**
- dosishastighed, **25, 31**
- energi, 37, 38
- spektrum, **37**
- spektrometer, 35
- spektrometri, **37, 38**
- spektrum, **37**
- stråling, 12, 24, 34, 37, 39, 40, 70, 72
- sekundær, **15**

λ , henfaldskonstant, **9**

absorberet

- dosis, 19, **20**
- energi, 31

absorption, 75

- neutron-, **16**

adenin, **43, 44**

affald

- flydende, 67
- radioaktivt, 65, **67**

afføring, **26, 75**

afledt luftkoncentration, DAC, **59**

afsat energi, **19**

afskærmning, 68, **71, 75**

beton-, 74

afskærmnings

- evne, 72
- materiale
- massefylde, 72

afstand, 68, **68**

aftørrings

- effektivitet, 35
- prøve, 34

aktivering, neutron-, **17**

aktivitet, **9**

- α -, 66
- β -, 66
- fall-out, **89**
- følge-, 68
- induceret, 67
- partikelbåret, **59**

aktivitets

- bestemmelse, 31, **36**
- mængde, 25

ALI, **58**

alkohol, 50

aluminium, 72

americium, ^{241}Am , 12, **12**

annealing, **40**

annihilation, 14, 15

arbejds

- hygiejne, **75**
- operation, 41
- proces, 75, 76

arveskade, **53**

atom, **7**

- bombe, 23, 50
- kerne, **7**
- nummer, **8**

badge, TL-, **40**

baggrundsstråling, 40

befolkning, 63

bekendtgørelse, SIS-, 65

beredskabsforanstaltning, **62**

beskadigelse, celle-, 49

beskyttelse, strålings-, **65**

beskyttelse, strålings-, 49

beskyttelsesforanstaltninger, 76

bestemmelse, aktivitets-, 31

bestråling

delkrops-, 24, **24**
 ekstern, **19**, 24, 61
 erhvervsmæssig, **85**
 helkrops-, 24, **24**, 46
 intern, **19**, 26, 61, 75
 medicinsk, 51, **83**
 bestrålingsanlæg, **86**
 beton, 75
 -afskærmning, 74
 biokemisk ligevægt, 43
 biokinetisk transport, **26**
 biologisk
 fase, 44
 halveringstid, **26**
 strålingsskade, 44
 udskillelse, **26**
 virkning, 43, 49
 blodtransfusion, 46
 bly, 72, 74
 blødersygdom, 52
 blåt
 kontaminationsområde, 66
 strålingsområde, 65
 bor, ^{10}B , 75
 bordmonitor, 35, **35**
 Bq becquerel, **9**
 bremsestråling, 14, **14**, 72
 briller, 72
 bropiller, 40
 brændsels
 -fremstilling, **86**
 -kredsløb, **86**
 bygningsdele, 40

 cadmium, 75
 cancer se kræft, 43
 celle
 -beskadigelse, 49
 -biologi, **43**
 -deling, 52
 -død, 43, 44
 centralnervesyndrom, **48**
 cigaretrygning, 50
 committet
 effektiv dosis, **27**
 ækvivalent dosis, **26**
 compton
 -effekt, 15, **15**
 -spredning, **34**
 cytosin, **43**, 44
 cæsium, ^{137}Cs , 12, **12**

 DAC, **59**
 datterprodukt, **9**

 de facto situation, **62**
 delkrops
 -bestråling, 24, **24**
 -dosis, **24**
 deoxyribose, 43
 detektion, **31**
 detektor, **31**
 gasfyldt, 31, 32
 Geiger-Müller-, **32**, 36, 38
 germanium, Ge, **37**
 halvleder-, 28, **37**
 kontaminations-, **34**
 proportional-, **35**
 scintillations-, 28, **34**, 38
 silicium, Si, **38**, 41
 deterministisk
 skade, 21, **43**, 45, 55
 diagnostik
 medicinsk, **83**
 nuklear-medicinsk, **84**
 direktiv, EU-, **57**
 DNA-molekyler, 43, 44, 52
 dobbelt-strengsbrud, **44**
 dobbeltspiral, 43
 dominant
 genetisk skade, 52
 dosimeter
 -film, 39
 -holder, **40**
 elektronisk, **40**
 film-, **39**
 håndleds-, 76
 lomme-, **40**
 pande-, 76
 person-, 25, 76
 dosimetri
 person-, **39**, 65
 dosis, 31
 β -, 24, **40**
 γ -, **40**
 -akkumulering, **39**
 -bestemmelse, **39**
 -grænse, **57**, 65
 -hastighed, **20**, 25, **31**, 41, 71
 β -, 68, 69
 γ -, **25**, **31**
 høj, 49
 -hastigheds
 -konstant, Γ , **25**, **70**
 -måling, **31**
 -registrering, **40**
 -respons, **49**
 absorberet, 19, **20**
 committet

effektiv, **27**
 ækvivalent, **26**
 delkrops-, **24**
 effektiv, 22, **22**
 ekstern, **24**
 genetisk betydende, 54
 helkrops-, 21, **24**
 individ-, **24**
 intern, **26**, 68
 kollektiv, **23**, 49, 56
 nuklear-medicinsk
 undersøgelses-, **85**
 og kræftskader, 49
 person-, **39**
 røntgenundersøgelses-, **84**
 strålings-, **19**, 40
 undgået, 63
 ækvivalent, 20, **20**
 dummy-forsøg, 76
 dynode, 34
 dyreeksperiment, 53
 dødelig kræft, 23
 døvhed, 52
 effekt
 compton-, 15, **15**
 fotoelektrisk, **15**
 effektiv dosis, 22, **22**
 committet, **27**
 til dansker, 87–89
 eksponeringsvej, **60**
 ekstern
 bestråling, **19**, 24, 61
 dosis, **24**
 stråling, 68
 elektrode
 negativ, 31
 positiv, 31
 elektron, 19
 -fælder, **39**
 -sky, **7**
 -stråling, sekundær, **14**
 sekundær, 32
 elektronvolt, eV, **10**
 endevindueprobe, **36**
 energi
 α -, **11**
 β -maksimal, $E_{\beta,max}$, **12**
 γ -, 37
 -opløsning, **38**
 -overførsel, 34
 -spektrum, **37**
 absorberet, 31
 afsat, **19**
 foton-, **34**
 kinetisk, **19**
 strålings-, 24, 26
 enkelt-strengsbrud, **44**
 epidemiologisk
 undersøgelse, **50**, 51
 erhvervsmæssig
 bestråling, **85**
 erhvervsmæssigt
 beskæftiget, 49
 strålingsudsat, 51, 63
 EU-direktiv, **57**
 eV, elektronvolt, **10**
 excitation, **14**
 faktor
 resuspensions-, 61
 risiko-, 22
 transmissions-, **72**, 73, 74
 fall-out aktivitet, **89**
 fase
 biologisk, 44
 fysisk, 44
 kemisk, 44
 felt, strålings-, **24**, 25
 film, **39**
 -dosimeter, **39**
 fotografisk, 39
 filter
 -papir, 35
 glasfiber-, 75
 kul-, 75
 fission, **12**, 17
 fjernsyn, **87**
 flydende affald, 67
 foranstaltning
 beredskabs-, **62**
 forbrugerprodukt, 87, **87**
 fordoblingsdosis, **53**
 forstærkning, ladnings-, 35
 fosfatgrupper, 43
 foto
 -elektrisk
 effekt, **15**
 proces, 34
 -elektroner, **34**
 -katode, **34**
 -multiplikator, **34**, 40
 foton, **10**, 12, 19
 -energi, **34**
 frie radikaler, 44, 45
 friskluftforsyning, 75
 frivillig, 63
 fysisk fase, 44

fælder, elektron-, **39**
 følgeaktivitet, **68**
 følsomt hudlag, **61**

 gas, radioaktiv, **59**
 gasfyldt detektor, **31, 32**
 Geiger-Müller GM
 -detektor, **32, 36, 38**
 -probe, **41**
 -rør, **41**
 gen, **43, 52**
 -mutation, **52**
 genetisk
 betydende dosis, **54**
 skade, **23, 43, 52, 52**
 strålingsskade, **53**
 gennemtrængende stråling, **40**
 gennemtrængningsevne, **72**
 germanium, Ge
 -detektor, **37**
 -krystal, **37**
 glasfiberfilter, **75**
 GM se Geiger-Müller, **32**
 gray, Gy, **20**
 grundstof, **8**
 -symbol, **8**
 grænse
 -værdi, **65**
 sekundær, **58**
 dosis-, **57, 65**
 grøn PVC-sæk, **67**
 guanin, **43, 44**
 gummihandske, **72**
 Gy, gray, **20**

 halvdragt, **76**
 halveringstid, **9, 68**
 biologisk, **26**
 halvleder
 -detektor, **28, 37**
 -krystal, **37**
 handske, **72, 75**
 hastighed
 dosis-, **20, 25**
 udskillelser-, **29**
 heldragt, **75**
 helkrops
 -bestråling, **24, 24, 46**
 -dosis, **21, 24**
 -måling, **38**
 -tæller, **28**
 helsefysisk instrumentering, **75**
 henfald
 α -, **10, 11**
 β -, **12**
 β^+ -, **11, 12**
 β^- -, **11, 12**
 radioaktivt, **9**
 henfalds
 -konstant, λ , **9**
 -kæde, **9**
 -lov, **9**
 -produkt, **9**
 Hiroshima, **23, 40, 50, 51**
 hud, **75**
 hudlag, følsomt, **61**
 hurtig neutron, **16, 75**
 hvidt
 kontaminationsområde, **66**
 strålingsområde, **65**
 håndledsdosimeter, **76**

 ICRP, **51, 55, 65**
 ikke-dødelig
 kræft, **23**
 impuls
 -højde, **37**
 ladnings-, **37**
 spændings-, **37**
 indfangningsproces, **75**
 indgreb, **62**
 indviddosis, **24**
 indretning
 -laboratorie, **76**
 indtag, **67, 75**
 se også optag, **26**
 induceret aktivitet, **67**
 indånding, **26, 59**
 instrument, **31**
 -visning, **31**
 instrumentering
 helsefysisk, **75**
 intermediær neutron, **16**
 intern
 bestråling, **19, 26, 61, 75**
 dosis, **26, 68**
 intervention, **62**
 ioniserende
 stråling, **10, 19, 31, 43, 50**
 ionisering, **14, 31, 45**
 ioniserings
 -hastighed, **32**
 -spor, **34, 38**
 ionkammer, **31**
 ionpar, **19, 31**
 isotop, **8, 65**

 jern, **75**

jod, ^{131}I , 12, **12**

kalibrering, 39, 40

kalium, ^{40}K , **80**, 88

kammer, proportional-, **35**

kanontårn, **38**

kaskade, ladnings-, **32**

kemisk fase, 44

keramisk materiale, **40**

kilde

- lukket, 68
- åben, 68

kilo, k, 9

kinetisk energi, **19**

klassifikation, område-, **65**

knoglekræft, 50

knoglemarvssyndrom, **47**

knoglesøger, **26**

kobolt, ^{60}Co , 12, **12**, 37

kollektiv dosis, **23**, 49, 56

koncentration

- radon-, ^{222}Rn , **82**

konstant

- dosishastigheds-, Γ , **70**

kontamination, 34, 67

- luft-, **35**, 76
- materiale-, **35**
- overflade-, 34, **60**, 75, 76

kontaminations

- detektor, **34**
- monitor, **36**, 67
- måling, **34**
- område, 65, **65**
 - blåt, 66
 - hvidt, 66
 - rødt, 66

kontrolgruppe, 50

kontrolpille, **40**

kosmisk stråling, 79, 80, 83, 88

kosmogen nuklid, **79**, 88

kromosom, 52

- mutation, **53**

krystal

- germanium-, 37
- halvleder-, 37
- NaI-, **38**
- silicium-, 37

kræft

- celle, 43
- skade, **50**
- skade og dosis, 49
- svulst, 45
- dødelig, 23
- ikke-dødelig, 23

kulfilter, 75

kvalitet, strålings-, **20**

kæde

- henfald, **9**
- proces, **13**

kønscelle, 43, 52

- skadet, 54

laboratorie

- indretning, 76

ladning, 32

ladnings

- forstærkning, 35
- impuls, **37**
- kaskade, **32**

latenstid, **50**

leukæmi, 50, **50**

- dødsfald, 50

linearitetsprincip, 49

lineær-kvadratisk model, **49**

lineær model, **49**

livstidsrisiko, 51

lokalregel, 67

lommedosimeter, **40**

luft

- koncentration, 75
- afledt, DAC, **59**
- kontamination, **35**, 76

lukket kilde, 68

lysdetektor, 34

lækagesporing, **86**

maksimal rækkevidde, **14**

massefylde, 68, 74

- afskærmningsmateriale, 72

massetal, **8**

materiale

- kontamination, **35**
- keramisk, **40**
- TL-, **40**

mave-tarmkanalsyndrom, **48**

medicinsk

- bestråling, 51, **83**
- diagnostik, **83**

mega, M, 9

metode

- tilbageholdelse-, **28**
- udskillelses-, **29**

middellevetid, **9**

mikro, μ , 9

milli, m, 9

mongolisme, 53

monitor, 32

- bord-, **35**

kontaminations-, **36**, 67
 multikanalanalysator, **37**
 mund, 75
 mutation
 gen-, **52**
 kromosom-, **53**
 skadelig, 52
 målemetode, **31**
 måling
 dosishastigheds-, **31**
 kontaminations-, **34**
 Nagasaki, 23, 40, **50**, 51
 NaI
 -krystal, **38**
 -scintillator, **38**
 natrium-jodid se NaI, 38
 naturlig strålingskilde, **79**
 naturligt strålingsmiljø, **79**
 nedbremsnings
 -bane, **14**
 -længde, **14**
 neutron, **7**, 21, 75
 -absorption, **16**
 -aktivering, **17**
 -spredning, **16**
 -stråling, **12**, **16**, 24
 hurtig, **16**, 75
 intermediær, **16**
 termisk, **16**, 17, 40, 75
 normal situation, **55**
 normer
 strålingsbeskyttelses-, **55**
 nuklear-medicinsk
 diagnostik, **84**
 undersøgelse, 89
 undersøgelses dosis, **85**
 nuklid, **8**
 -bestemmelse, **36**
 -kort, **9**
 kosmogen, **79**, 88
 radio-, 27, 28, 35, 59
 stabil, **9**
 terrestrisk, 80, **80**, 83, 88
 ustabil, **9**
 næse, 75
 oksekød, 27
 omhu, 76
 område
 -klassifikation, **65**
 kontaminations-, 65, **65**
 strålings-, **65**
 oparbejdning, **86**

oprydning, 75
 optag, **26**, 75
 optagsvej, **26**
 optimering, **56**, 63
 organ, 22, **22**, 75
 overfladekontamination, 34, **60**, 75,
 76
 overtrækssko, 66
 påklædning, 76
 pandedosimeter, 76
 pardannelse, **15**
 partikel
 α -, **10**, 14, 38, 68, 71
 β -, **11**, 14, 38, 68, 72
 partikelbåret aktivitet, **59**
 pensionatsarm, 71
 person
 -dosimeter, 25, 76
 -dosimetri, **39**, 65
 -dosis, **39**
 person-Sv, **24**
 pille, TL-, **39**
 pincet, 69
 pippelyd, 41
 planlægning, 75
 plastscintillator, **38**
 plexiglas, 72
 potteskår, **40**
 praksis, **55**
 primær kosmisk stråling, 79
 probe
 endevindues-, **36**
 Geiger-Müller-, 41
 proces
 arbejds-, 75
 indfangnings-, 75
 vekselvirknings-, 19
 proportional
 -detektor, **35**
 -kammer, **35**
 proton, **7**
 præfix, **9**
 prøve
 aftørrings-, 34
 urin-, **38**
 påklædning, **67**, 75
 radio
 -nuklid, **9**, 25–28, 35, 59
 radioaktiv gas, **59**
 radioaktivitet, **9**
 radioaktivt
 affald, 65, **67**

henfald, **9**
 radiografi, **86**
 radium, ²²⁶Ra, **81**, **82**
 -station, **85**
 radon, ²²²Rn, **81**, **82**, **83**, **87**, **88**
 koncentration, **82**
 rate meter, **36**
 reaktordrift, **86**
 regel
 -system, Risø-, **65**
 lokal-, **67**
 registrering, dosis-, **40**
 resuspension, **60**
 resuspensionsfaktor, **61**
 retfærdiggørelse, **56**, **65**
 risiko
 -faktor, **22**, **51**, **51**, **53**
 genetisk, **54**
 -model
 absolut, **50**, **51**
 relativ, **50**, **51**
 Risø regelsystem, **65**
 RNA-molekyler, **43**
 rubidium, ⁸⁷Rb, **80**, **88**
 rygning, **67**
 rækkevidde, **24**, **68**
 maksimal, **14**
 rødt
 kontaminationsområde, **66**
 strålingsområde, **65**
 røntgen
 -anlæg, **65**
 -apparat, **14**, **83**
 -spektrometri, **38**
 -stråling, **14**, **39**, **83**
 -undersøgelses dosis, **84**
 scintillations
 -detektor, **28**, **34**, **38**
 scintillator, **34**
 NaI-, **38**
 plast, **38**
 væske, **38**
 zink-sulfid ZnS, **38**
 sekundær
 γ -stråling, **15**
 elektronstråling, **14**
 grænseværdi, **58**
 kosmisk stråling, **79**
 senskade, **20**
 sievert, Sv, **21**
 silicium, Si
 -detektor, **38**, **41**
 -krystal, **37**
 SIS, **55**, **65**
 -bekendtgørelse, **65**
 situation
 de facto, **62**
 normal, **55**
 skade
 -strålings, **44**
 deterministisk, **21**, **43**, **55**
 genetisk, **23**, **43**, **52**, **52**
 dominant, **52**
 vigende, **52**
 somatiske, **43**
 stokastisk, **20**, **22**, **43**, **44**, **55**
 genetisk, **49**
 somatisk, **49**
 skadelig mutation, **52**
 skadet kønscelle, **54**
 skjoldbruskkirtel, **26**
 skoskranke, **66**
 smeartest, **34**
 somatisk skade, **43**
 spallation, **79**
 spektrometer
 α -, **35**
 γ -, **35**
 spektrometri, **38**
 α -, **38**
 γ -, **37**
 røntgen-, **38**
 spektrum
 α -, **38**
 γ -, **37**
 spisevane, forkert, **50**
 spisning, **26**, **59**, **67**
 spor, ioniserings-, **38**
 spredning
 compton-, **34**
 neutron-, **16**
 spændingsimpuls, **37**
 stabilitetslinie, **9**
 sterile omgivelser, **46**
 stinkskab, **75**
 stokastisk
 genetisk skade, **49**
 skade, **20**, **22**, **43**, **44**, **55**
 somatisk skade, **49**
 stråling
 α -, **10**, **24**, **68**, **71**
 β -, **11**, **24**, **39**, **41**, **68**, **72**
 γ -, **12**, **24**, **39**, **40**, **70**, **72**
 baggrunds-, **40**
 bremse-, **14**, **14**, **72**
 ekstern, **68**
 gennemtrængende, **40**

ioniserende, **10**, 19, 31, 50
 kosmisk, 79, 80, 83, 88
 neutron-, **16**, 24
 primær kosmisk, 79
 røntgen-, **14**, 39, 83
 sekundær kosmisk, 79
 strålings
 -beskyttelse, 49, **65**
 -beskyttelsesnormer, **55**
 -dosis, **19**, 40
 -energi, 24, 26
 -felt, **24**, 25, 31
 -kilde, naturlig, **79**, 88
 -kilder
 uønskede, **55**
 ønskede, **55**
 -kvalitet, **20**
 -miljø, naturligt, **79**
 -område, **65**
 blåt, 65
 hvidt, 65
 rødt, 65
 -skade, **44**
 biologisk, 44
 genetisk, 53
 -syge, 46
 -terapi, 85, **85**
 -type, 20, 21
 -udsat
 arbejder, 86, 89
 erhvervsmæssigt, 51, 63
 -vægtfaktor, w_S , **20**
 -vekselvirkning, 32
 Sv, sievert, **21**
 person-, **24**
 sved, **26**, 75
 syndrom
 centralnerve-, **48**
 knoglemarvs-, **47**
 mave-tarmkanal-, **48**
 sædcelle, 52
 sæk, grøn PVC-, 67
 sår, 75
 teknecium, ^{99m}Tc , **84**
 terapi
 -afdeling, **85**
 strålings-, 85, **85**
 termisk neutron, **16**, 17, 40, 75
 termoluminescens se TL, 39
 terrestrisk nuklid, 80, **80**, 83, 88
 thorium, ^{232}Th , **80**, 82, 88
 thymin, **43**, 44
 tid, 68, **68**
 tilbageholdelsesmetode, **28**
 Tjernobyl, **88**
 TL, **39**
 -badge, **40**
 -materiale, **40**
 -pille, **39**
 transmissionsfaktor, **72**, 73, 74
 transport, biokinetisk, **26**
 tritium, T (^3H), **29**, **38**
 -vanddamp, 75
 tæller
 α -, 35
 β -, 35
 helkrops-, 28
 tærskel
 -dosis, 45, 49
 -værdi, 23, 45
 udglødning, **40**
 udskillelse, **26**
 biologisk, **26**
 udskillelser
 -hastighed, **29**
 -metode, **29**
 udånding, **26**
 udåndingsluft, 75
 undersøgelse
 epidemiologisk, **50**, 51
 nuklear-medicinsk, 89
 undgået dosis, 63
 UNSCEAR, 51
 ur, selvlysende, 87, **87**
 uran
 ^{235}U , **8**, 12, 80
 ^{238}U , **8**, 12, 80, 81, 88
 -udvinding, **86**
 naturligt, 87
 urin, **26**, 75
 urinprøve, **38**
 vand, 75
 vekselvirkning, **13**, 31
 strålings-, 32
 vekselvirknings
 -proces, 19
 vigende genetisk skade, 52
 vindue, β -, 39
 virkning, biologisk, 49
 vægtfaktor, strålings-, w_S , **20**
 vægtfaktor, vævs-, w_T , 22, **22**
 væskescintillator, **38**
 væv, **22**
 vævsvægtfaktor, w_T , 22, **22**
 zink-sulfid, ZnS, scintillator, **38**

ædelgas, **59**
ægcelle, 52
ækvivalent dosis, 20, **20**
 committet, **26**
åben kilde, 68
åndedrætsværn, 75

Title and author(s)

Course in Health Physics

Per Hedemann Jensen, Bente Lauridsen, Jens Søggaard-Hansen, Lisbeth Warming

ISBN

87-550-2848-9

ISSN

0106-2840

Dept. or group

Applied Health Physics, Nuclear Safety Research Department

Date

January 2001

Groups own reg. number(s)

NUK-2001-459

Project/contract No.

1470140

Pages

95

Tables

25

Illustrations

45

References

Abstract (Max. 2000 char.)

This report gives a short description of the basic radiation protection principles and quantities.

The structure of the atomic nucleus and the physics of radioactivity and emission of ionising radiation from the decay of unstable radionuclides is presented in the report. The interaction of radiation with matter and the resulting energy deposition forms the basis for the different dose quantities, which all are being elaborated in the report.

The harmful effects of radiation exposure to man caused by the energy deposition in organs and tissue are described in the report for both early and late health effects. The latest publication from the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR, includes quantitative estimates of the risks from radiation exposure of man and these risk factors are described in the report.

The basic radiation protection principles for practices and interventions as recommended by the International Commission on Radiological Protection, ICRP, are summarised in the report. Methods of practical radiation protection and measurements of radiation and radioactivity are also presented.

Finally, the natural and artificial radiation environment and the resulting doses to man from the different sources within this environment are elaborated in detail in the report.

Descriptors INIS/EDB

BACKGROUND RADIATION; BIOLOGICAL RADIATION EFFECTS;
IONIZING RADIATION; RADIATION DOSES; RADIATION EFFECTS;
RADIATION PROTECTION; RADIOACTIVITY; RECOMMENDATIONS



Forskningscenter Risø udfører naturvidenskabelig og teknisk-videnskabelig forskning, der tilfører det danske samfund nye teknologiske udviklingsmuligheder, styrker erhvervslivets konkurrenceevne og bidrager til at industri-, energi- og jordbrugssektoren kan reducere deres miljøbelastninger.

Risø rådgiver myndighederne om nukleare forhold.

Forskningen indgår i nationale og internationale forskningsprogrammer og lignende samarbejder. Tyngden ligger på grundlæggende forskning, strategisk forskningssamarbejde og markedsstyrede opgaver.

Forskningen sker inden for programområderne:

- Industrielle materialer
- Nye funktionelle materialer
- Optik og sensorsystemer
- Planteproduktion og stofkredsløb
- Systemanalyse
- Vindenergi og atmosfæriske processer
- Nuklear sikkerhed

Universiteter, forskningsinstitutioner, teknologiske institutter og erhvervsvirksomheder er vigtige samarbejdspartnere for Risø.

Ph.d.-uddannelse af unge forskere og post doc-programmer er en central del af Risøs virksomhed.

ISBN 87-550-2848-9

ISSN 0106-2840

Rekvireres fra

Forskningscenter Risø
Afdelingen for Informationsservice
Postboks 49
4000 Roskilde
Telefon 4677 4004
risoe@risoe.dk
Fax 4677 4013
Website risoe.dk