

Allan Jørgensen

ISOTEK

om isotopers tekniske anvendelse



Fysikforlaget

Allan Jørgensen

ISOTEK

om isotopers tekniske anvendelse

Fysikforlaget

ISOTEK
af Allan Jørgensen

© Fysikforlaget
Slotsgade 2³
2200 København N

Forsidebillede: Sporing af utætheder i rør
(Isotopcentralen)

Tegninger: Tove Asmussen

Tilrettelæggelse: Kai Gregersen

Trykt hos Budolfi Tryk, Aalborg

Mekanisk, fotografisk eller anden
gengivelse af denne bog eller dens
dele er ikke tilladt uden lovlig hjemmel.

ISBN 87-7792-001-5

1. udgave 1991.

Indhold

Forord	5
--------	---

Kapitel 1. Lidt om kerner

1 Opbygning	6
2 Henfald	8
3 Bevarelsessætninger	10
4 Kerneprocesser	10
5 Henfaldsdiagrammer	11
6 Opgaver	11

Kapitel 2. Kontrol- og tykkelsesmålinger

1 Lidt om anvendelser af radioaktive isotoper	12
2 Case 1 : Kontrol af fugemørtel	13
3 Lignende anvendelser	17
Ide: stråling ændres af stof	17
Andre eksempler	17
4 Statistiske egenskaber ved γ -kilden	19
En 'konstant' kilde	19
Undersøgelse #1	19
Usikkerhed på et tælleantal	19
5 Mekanismerne ved absorption af gammastråling	20
Fotoelektrisk effekt	20
Comptonspredning	20
Pardannelse	20
6 Materialetykkelsens betydning for absorptionen	21
Undersøgelse #2	21
Ekspontielt aftagende funktioner	23
Matematisk beskrivelse af absorptionen	26
En model for absorptionen	26
7 Densitetens betydning for absorptionen	26
Undersøgelse #3	27
8 Præcisionen ved tykkelsesmålinger	28
9 Opgaver	30

Kapitel 3. Målinger med sporstof

1 Case 2: Kontrol af Suorva-dæmningen	32
2 Lignende anvendelser	35
Ide : Stråling følger stof	35
Andre eksempler	35
3 En kildes ændring med tiden	37
Undersøgelse #4	37
Matematisk beskrivelse af henfaldet	38
Aktivitets tidsvariation	39
4 Case 3 : Datering af tungmetal-aflejringer i Østersøen	40
5 Opgaver	43

Kapitel 4. Stråling og sikkerhed

1 Vores strålingsmiljø	45
2 Strålingens betydning for helbreddet	46
Dosis	46
Dosisækvivalent	46
Akutte skader	47
Sene skader	47
3 Sikkerhedsforanstaltninger	48
4 Opgaver	50

Kapitel 5. Opfølgning

1 Virksomhedsbesøg	52
2 Tangenter	52

Appendix. Lidt om detektorer

Stikordsregister	56
------------------	----

Forord

Torben Sevel fra Isotopcentralen holdt på fysiklærernes efterårsmøde i 1987 et foredrag om radioaktive isotopers anvendelser i industrien og miljøkontrollen. Det har inspireret til dette hæfte, som i stor udstrækning er baseret på materiale fra Isotopcentralen. Jeg er meget taknemlig for denne hjælp så vel som den hjælp, jeg har fået fra mange kolleger. Især bør nævnes Bjørn Larsen, Torben Lenskjær, Claus Christensen, Kirsten Brink Lund og Eigil Dixen, som har været konstruktive pædagogiske konsulenter på hæftet.

Intensionen med hæftet er at konkretisere et tematisk forløb inden for stråling og helsefysik. Indfaldsvinklen er tekniske anvendelser af isotoper i industrien såvel som anvendelser inden for miljøkontrol. Men "fysikken" er ikke nedprioriteret. Jeg har forsøgt at få den integreret i det tematiske forløb.

Man kan næppe finde en bedre baggrund for et virksomhedsbesøg end anvendelser af radioaktivitet. Hæftet forsøger at give forudsætningerne for et fagligt virksomhedsbesøg, som ikke bare har karakter af "sodavandsbesøg", men er velplanlagt, så man "får noget med hjem".

Emnet er ideelt til et tværfagligt samarbejde med matematik. Det ville være synd og skam ikke at vise de flotte anvendelser af eksponentialfunktionen, som ligger gemt i absorption af stråling og henfald af kerner. Det tematiske forløb kan lægges parallelt med undervisningen i eksponentialfunktionen i matematik eller senere. En matematisk oversigt over eksponentielle funktioner er medtaget i hæftet.

Der er i hele hæftet kun en differentiation, nemlig i den matematiske oversigt. Det er naturligvis fint, hvis klassen har lært at differentiere. Men det er ikke nødvendigt. Differentiationen kan gemmes til en hurtig repetition, og det kan være motiverende for eleverne at vide, at en fornuftig matematisk behandling af den lineære absorptionskoefficient og sandsynligheden for henfald pr tidsenhed forud-

sætter anvendelsen af differentiation af funktioner.

Fysikforudsætningerne er ellers meget beskedne. Begreber som densitet og energi skal være velkendte. Men det er f. eks. ikke nødvendigt (eller hensigtsmæssigt) at læse noget-somhelst om kernefysik på forhånd. Det er muligvis en fordel, at klassen har lært lidt om bølger og om kvantisering af elektromagnetisk stråling.

Afsnittet om densitetens betydning for absorptionen kan overspringes. Det vil være velegnet som et 10 timers eksperimentelt emne. I afsnittet "tangenter" er der andre ideer, som både kan medtages i forløbet eller benyttes som 10 timers eksperimentelle emner.

Det er hensigtsmæssigt, hvis eleverne hver har et eksemplar af DATABOGEN fra F&K Forlaget. En del opgaver forudsætter opslagsmulighed heri.

Virum d. 1/5/1991.

Allan Jørgensen

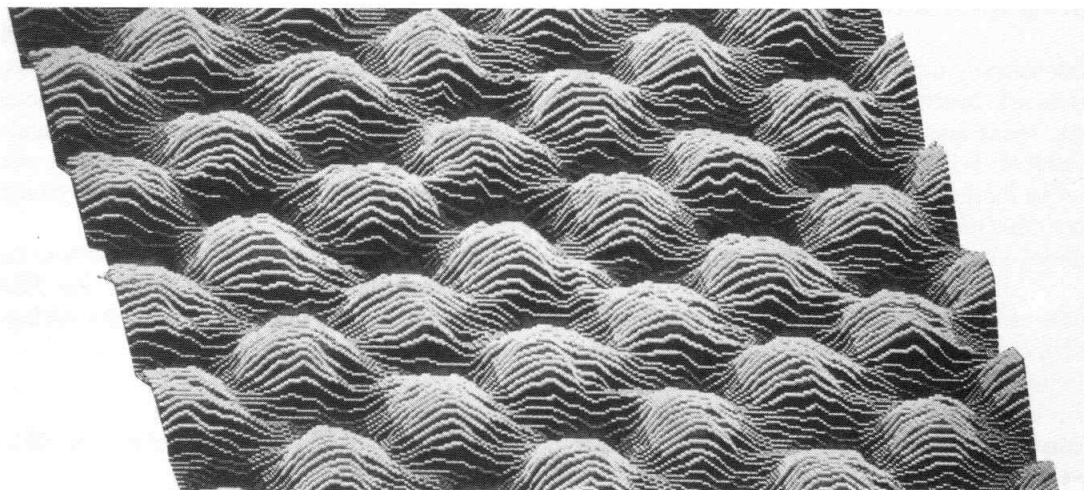
Kapitel 1

Lidt om kerner

Opbygning

Alt stof er opbygget af atomer. Atomernes diameter varierer fra ca. 100 pm til ca. 400 pm. De er så små, at man kun vanskeligt kan se dem. Med optiske mikroskoper er det umuligt. Men det er lykkedes med de såkaldte scanning tunneling mikroskoper.

ning. Neutronerne er elektrisk neutrale. Antallet af protoner og neutroner i kernen kaldes henholdsvis **Z** og **N**. En **nukleon** er en kernepartikel og bruges som fællesbetegnelse for protoner og neutroner.



Billede af atomerne i en grafitoverflade optaget med et scanning tunneling mikroskop.

Atomet består af en positiv kerne, der er ca. 100000 gange mindre i diameter end atomet. Den er omgivet af elektroner, hvis antal kan variere fra 1 til ca. 100. Elektronerne er negative. Ladningen er en egenskab ved elektronen og derfor den samme for alle elektroner. Ladningen er ligesom elektronen selv udelelig og den mindste portion ladning, der kan forekomme frit. Den kaldes derfor **elementarladningen**. Elektronerne kredser omkring kernen og afgrænser atomet. Næsten hele atomets masse er samlet i kernen. Antallet af elektroner afgør atomets kemiske egenskaber.

Atomernes kerner er opbygget af **protoner** og **neutroner**. De har næsten samme masse. Protonerne er positive med en **elementarlad-**

Antallet af nukleoner **A** er derfor

$$A = Z + N \quad [1]$$

Et atom er neutralt, fordi der er lige så mange protoner i kernen, som der er elektroner omkring kernen. Alle atomer med det samme antal protoner siges at tilhøre det samme grundstof. Antallet af protoner bruges som nummerering og kaldes grundstoffets **atomnummer**. **Z** er derfor stoffets atomnummer. $Z = 8$ svarer f.eks. til ilt.

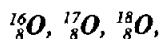
En kerne-type kaldes et **nuklid** og er bestemt ved værdien af **Z** og **N**. Et nuklid angives hyppigst ved **Z** og **A**, f. eks. på formen



hvor X står for grundstoffets kemiske symbol.
N kan så findes af formel 1.
Nuklider med samme Z men forskelligt N kaldes isotoper.

Eksempel

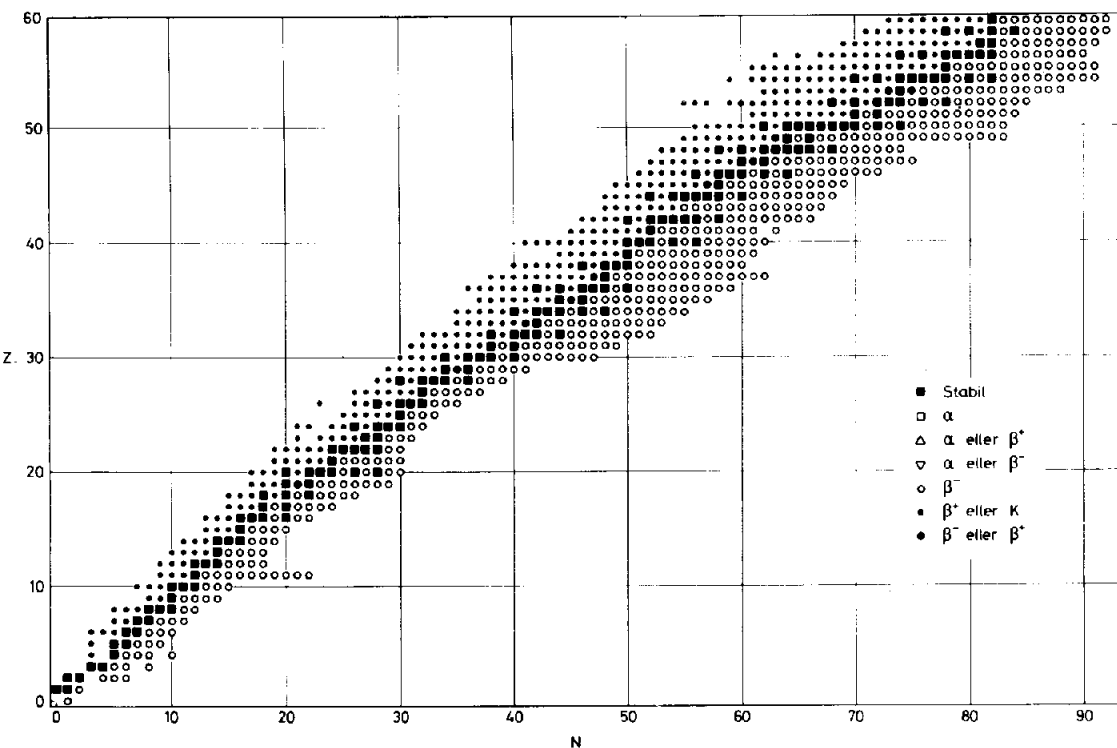
Hvis man ud fra nuklid-kortet fig 1 skal opskrive oxygens stabile isotoper, finder man N-koordinaten til de punkter, hvis Z-koordinat er 8. Der er tre med N-koordinaterne 8, 9 og 10. Af formel 1 fås for disse nuklider $A=16$, 17 og 18. De kan så skrives:



Hvis der i kernen kun virkede elektriske kræfter, ville den ikke kunne eksistere. De positive protoner frastøder jo hinanden. Tyngdekraften mellem nukleonerne er ca. 10^{-40} gange mindre end de elektriske kræfter. Der-

for må der være en anden kraft, der holder sammen på kernen. Den kaldes naturligt nok **den stærke vekselvirkning** eller **kernekræften**. Den virker over så korte afstande, at den er blevet sammenlignet med klister. Den er den samme for protoner og neutroner.

Den elektriske frastødning virker over større afstande. Den vinder over kernekræften, når kernerne når over en vis størrelse. Derfor findes der i naturen ikke kerner med mere end 92 protoner. Af samme grund er det kun de lette kerner, der indeholder lige mange protoner og neutroner. Jo tungere en kerne er, jo større er behovet for "klister" til at modvirke den stadigt mere dominerende elektriske frastødning. Det afspejler sig på nuklid-kortet figur 1. Mens de lette nuklider ligger tæt på linien $Z=N$, så samler de tungere nuklider sig omkring en kurve, der krummer stadigt mere ned mod N-aksen.



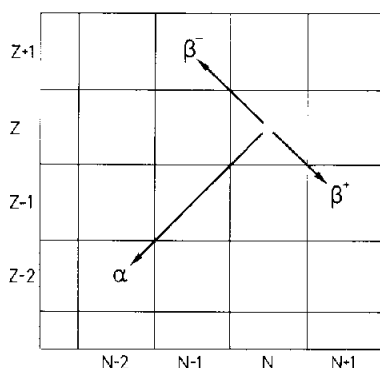
Figur 1. Nuklid-kort for nuklider med $Z < 60$. Kerner med samme talpar (N,Z) er ens. De tilhører samme nuklid. Derfor kan enhver kerne henføres til netop et punkt på et nuklid-kort. Databog i Fysik & Kemi, F&K forlaget.

Henfald

De fleste kerner er **stabile** og vil forblive uforandrede, hvis de blot indgår i kemiske og biologiske processer. Andre ændres af sig selv uden ydre påvirkning, dvs. **spontant**, under udsendelse af **ioniserende kernestråling**. Disse typer kaldes **radioaktive isotoper** (eller **radio-nuklider**). Når kernerne udsender stråling, afgives energi, og kernerne skifter som regel type. Man siger, at kernerne **henfalder**.

Der findes tre slags ioniserende kernestråling: α -, β -, γ -stråling.

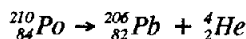
Alfastråling består af heliumkerner af typen ${}^4_2\text{He}$. Hver kerne mister 2 protoner. Det betyder, at der er indtruffet en **grundstofforvandling**. Det dannede grundstofs atomnummer er to mindre end atomnummeret for den oprindelige kerne. Der mistes også to neutroner. På fig 2 ses, at alfahenfaldet i nuklidkortet beskrives ved en pil: 2 ned og 2 til venstre.



Figur 2. Ved α - og β -henfald er den relative ændring af nuklidernes placering på nuklidkortet den samme for alle nuklider.

Eksempel

${}^{210}_{84}\text{Po}$ henfalder under udsendelse af alfastråling. Henfaldet kan skrives:



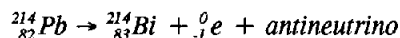
Alfastråling absorberes af et stykke papir. Da strålingen er positiv afbøjes den både af elek-

triske og magnetiske kræfter.

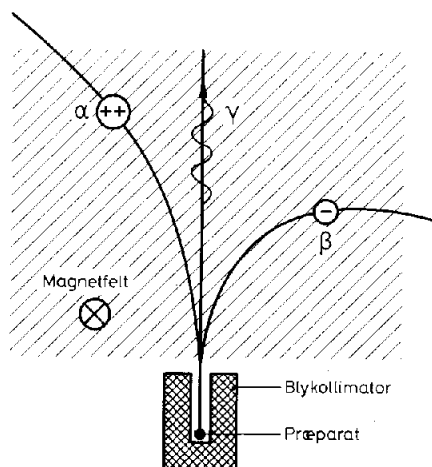
Betastråling β^- består af elektroner, der dannes og udsendes, når en neutron i kernen omdannes til en proton. På fig 2 ses, at β^- -henfaldet i nuklidkortet beskrives ved en pil: en op og en til venstre. Der er sket en grundstofforvandling. Det dannede grundstofs nummer er blevet en større end atomnummeret for den oprindelige kerne. Sammen med β^- -strålingen udsendes de såkaldte antineutrinoer.

Eksempel

${}^{214}_{82}\text{Pb}$ henfalder under udsendelse af β^- -stråling. Henfaldet kan skrives:



Betastråling β^+ består af positroner, der dannes og udsendes, når en proton i kernen omdannes til en neutron. En positron er en partikel med de samme egenskaber som en elektron bortset fra, at dens ladning er en **positiv** elementarladning. Af fig. 2 fremgår β^+ -henfaldets ændring af kernens sammensætning. Sammen med β^+ -strålingen udsendes en såkaldt neutrino.



Figur 3. Adskillelse af strålingstyper i et magnetfelt.

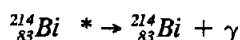
Der kendes mange naturligt forekommende radioaktive isotoper, der udsender β -stråling, medens β^+ -stråling kun optræder i forbindelse med kernereaktioner f.eks. i laboratorieforsøg. Når der i det følgende blot tales om betastråling, menes der derfor altid β -stråling.

Betastråling trænger igennem nogle stykker papir, men absorberes f. eks. af en tynd metalplade. Da strålingen er negativ afbøjes den i den modsatte retning af alfastrålingen, når den påvirkes af elektriske og magnetiske kræfter. Neutrinoer og antineutrinoerne har en enorm gennemtrængningsevne. Selv Jorden stopper kun ganske få. Næsten alle forsvinder ud i rummet. De spiller derfor ingen rolle for tekniske anvendelser og vil blive "glemt" her-efter.

Gammastråling består af elektromagnetisk stråling ligesom lys, men med langt kortere bølgelængde. Ved hvert gammahenfald udsendes den mindste portion stråling, der kan eksistere ved den pågældende bølgelængde, et **gammakvant**. Gammakvanter er det samme som lysets fotoner, men er langt mere energirige. Ved udsendelse af gammastråling forbliver antallet af protoner og neutroner uændret. Der sker kun en energifrigivelse og ikke nogen grundstofforvandling. Gammastrålingen følger ofte lige efter et α - eller β -henfald. De dannede kerner ved disse henfald har nemlig ofte et energioverskud (de siges at være i en **anslået tilstand**), som de slipper af med på denne måde. Det svarer til, at atomer afgiver et energioverskud ved udsendelse af lys.

Eksempel

Ved betahenfaldet i eksemplet ovenfor fås kun i 6% af alle henfald en bismuth-kerne i grundtilstanden. I de øvrige henfald fås en anslået bismuth-kerne, som bliver af med den overskydende energi ved udsendelse af gammastråling. I nogle af henfaldene fås en anslået tilstand med et energioverskud på 0,295 MeV og i andre henfald fås en anslået tilstand med et energioverskud på 0,352 MeV. γ -henfaldet kan i begge tilfælde skrives



Kasse 1

Energienhed

Som energienhed i kernefysikken anvendes ofte eV (elektronvolt). 1 eV er den energiforøgelse, en elektron får ved at gennemløbe en spændingsstigning på 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J. } 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

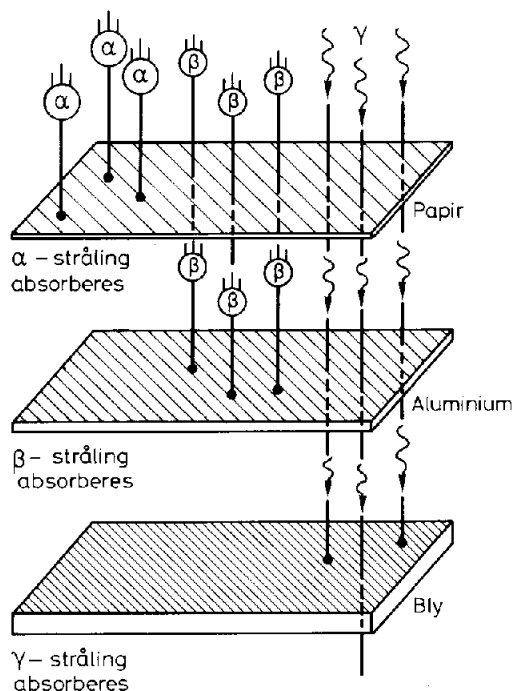
Masseenhed

Som masseenhed i kernefysikken anvendes ofte u (unit). 1 u er $\frac{1}{12}$ af massen af et neutral ${}^{12}_6\text{C}$ -atom.

$$1 \text{ u} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

Massen af en proton og en neutron er tilnærmelsesvis lig med 1 u.

Gammastrålingen er langt mere gennemtrængende end betastrålingen. En stor del af gammastrålingen passerer igennem tykke metalplader.



Figur 4. Illustration af α -, β - og γ -strålings gennemtrængningsevne.

Bevarelsessætninger

Bemærk, at ved alle tre typer af henfald gælder følgende bevarelsessætninger:

- 1) Ladningen er bevaret.
- 2) Antallet af nukleoner er bevaret

Det har vist sig, at disse bevarelsessætninger gælder ved alle kendte kerneprocesser. Desuden gælder

- 3) Energien er bevaret.

Sætning 3 er en grundlæggende sætning i fysikken. Energi kan antage mange former, som kan omdannes til hinanden. Men altid sådan, at den samlede energi er bevaret.

Energikilden ved de tre henfaldstyper er **masseenergi**. Denne energiform blev først erkendt af Albert Einstein. Han viste, at en masse m repræsenterer en energi af størrelsen mc^2 , hvor c er lysets hastighed.

Ved alfaudsendelsen i eksemplet ovenfor er massen af polonium-kernen større end massen af blykernen og alfapartiklen tilsammen. Forskellen i masse genfindes efter henfaldet som kinetisk energi af blykerne og α -partikel. Alfapartiklerne fra samme type henfald har derfor alle den samme energi.

Ved β -henfaldet ovenfor sker der også en masseformindskelse. Den dertil svarende energi overføres dels til bismuth-kernen dels til elektron og antineutrino. Dog ikke med fast fordeling. Så betapartiklernes energi varierer fra nul til en maximal værdi.

Ved gammahenfaldet sker der ligeledes en formindskelse af massen. Den frigjorte energi genfindes i gammakvantet og i den rekylende kernes kinetiske energi.

Kerneprocesser

De 3 henfaldstyper er eksempler på kerneprocesser, der forløber spontant. Men kerneprocesser kan også sættes igang ved et indgreb fra

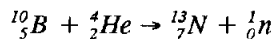
omgivelserne. Man kan f.eks. skyde en partikel ind i en stabil kerne. Partiklen kan være en proton, en neutron eller en atomkerne. Hvis partiklen er positiv, skal den have en betydelig kinetisk energi for at overvinde den elektriske frastødning og nå ind til kernen.

Kernen optager partiklen. Det betyder en tilførsel af energi og forøgelse af antallet af nukleoner. Der kan nu ske forskellige ting, f.eks.:

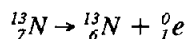
- 1) Vi får et nyt nuklid. Dette nuklid kan være ustabilt og henfalde ved et af de 3 omtalte henfald. Man taler om **kunstig radioaktivitet**.

Eksempel

Når bor bombarderes med α -partikler, dannes der kvælstof:



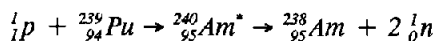
Men ${}^{13}_7\text{N}$ henfalder videre til kulstof under udsendelse af en positron:



- 2) Vi får dannet en såkaldt compound-kerne, dvs. en kerne, som eksisterer i meget kort tid ca. 10^{-16} s, hvor nukleonerne blandes godt. Den henfalder under udsendelse af en eller flere nukleoner.

Eksempel

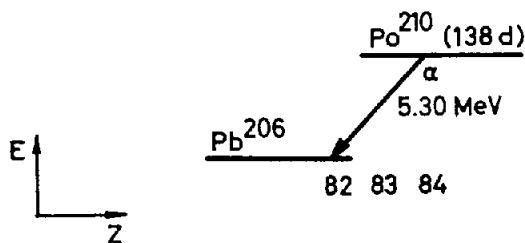
En proton skydes ind i en plutonium-kerne. Der dannes en compound-kerne, hvorfra der "fordamper" 2 neutroner:



- 3) Vi får dannet en compound-kerne, der spaltes i to store fragmenter og 2 eller 3 neutroner. Denne proces kaldes **induceret fission**. Tit konkurrerer flere henfald med hinanden. F.eks. konkurrerer fissionen med fordampningen af neutroner i eks 2.

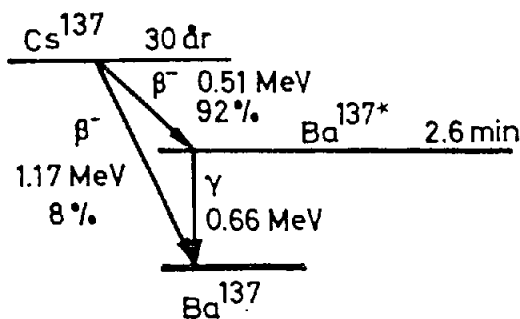
Henfaldsdiagrammer

Et henfaldsdiagram er en let overskuelig måde at fremstille et henfald på. Fig 5 viser α -henfaldet af $^{210}_{84}\text{Po}$. Et vandret liniestykke repræsenterer en nuklids tilstand. På figuren er tegnet et liniestykke for både $^{210}_{84}\text{Po}$ og henfaldsproduktet $^{206}_{82}\text{Pb}$. Højdeforskellen svarer til den kinetiske energi, der frigives ved henfaldet - her 5,3 MeV. Nuklidet med det største atomnummer er anbragt længst til højre.



Figur 5. Henfaldsdiagram for $^{210}_{84}\text{Po}$.

På fig. 6 er vist β -henfaldet af $^{137}_{55}\text{Cs}$. I 8% af alle henfaldene dannes $^{137}_{55}\text{Ba}$ i grundtilstanden og i 92% i en anslået tilstand, der henfalder til grundtilstanden ved udsendelse af γ stråling. Bemærk at pilene, der symboliserer β -henfaldene peger (nedad) mod højre, fordi Z vokser. Mens pilene der symboliserer γ -henfald er lodrette, da Z er uændret.



Figur 6. Henfaldsdiagram for $^{137}_{55}\text{Cs}$.

Opgaver

1. Find på nuklidkortet brints isotoper og angiv Z, N og A for hver af dem.
2. Find på nuklidkortet kaliums stabile isotoper og skriv dem på formen ^A_ZX . Find deres relative forekomst i DATABOGEN. Find også de naturligt forekommende isotop af kalium, der er radioaktiv. Hvad er dens relative forekomst i naturen?
3. Find i DATABOGEN det kemiske symbol og atomnummeret for iod. Angiv den stabile isotop på formen ^A_ZX . En kunstigt skabt isotop af iod indeholder 131 nukleoner. Skriv den på formen ^A_ZX . Hvor mange neutroner indeholder den? Find på nuklidkortet på hvilken måde, den henfalder.
4. $^{218}_{84}\text{Po}$ henfalder ved α -henfald til et nuklid, der henfalder videre ved udsendelse af β -stråling. Opskriv begge henfald. Find på et nuklidkort start- og slutnuklid for begge henfald.

Kapitel 2

Kontrol- og tykkelsesmålinger

Lidt om anvendelser af radioaktive isotoper

Isotopcentralen

Radioaktive isotoper anvendes i en lang række brancher til måling, kontrol og styring af produktionsprocesser. Isotopcentralen (IC) er en selvejende institution, der er tilknyttet Akademiet for de Tekniske Videnskaber. En del af driften dækkes af betaling for hjælp ydet til især danske virksomheder, en del dækkes af tilskud fra det offentlige. IC udsender over-

sigter over de anvendelsesmuligheder, der findes indenfor de forskellige erhvervsgrupper. De kaldes **brancheblade**. Af fig. 7 kan man se, at radioaktive isotoper anvendes af mange danske firmaer.

Fordele ved anvendelse af radioaktive isotoper fremgår af indledningen til brancheblade-ne, fig.8.

BRANCHEBLADE

Der er foreløbig udarbejdet 11 brancheblade for følgende erhvervsgrupper:

- BB1 Nærings- og nydelsesmiddelindustri
- BB2 Tekstil-, beklædnings- og læderindustri
- BB3 Træ- og møbelindustri
- BB4 Papir- og grafisk industri
- BB5.1 Kemisk industri - plastprodukter
- BB5.2 Kemisk industri - kul- og olieprodukter
- BB5.3 Kemisk industri - iøvrigt
- BB6 Sten, ler og glasindustri
- BB7 Jern- og metalindustri
- BB8 El-, gas-, varme- og vandforsyning
- BB9 Bygge- og anlægssektor

Figur 7. Fra indledningen til brancheblade. Brancher for hvilke der er udarbejdet brancheblade med forslag til anvendelse af isotoper.

BB0.0 1979, IC

MÅLEUDSTYR

De tekniske og økonomiske fordele ved anvendelse af radioaktive isotoper i måleudstyr er oftest umiddelbart indlysende. Teknisk set betyder de ikke-destruktive og berøringsfri måleprincipper samt anvendelsen af gennemtrængende stråling, at måling kan foretages f.eks. af

- kontinuert producerede materialer
- materialer, der bevæger sig med stor hastighed
- materialer ved høj temperatur
- materialer med færdigbehandlede overflader
- bløde eller deformerbare materialer
- materialer bag beholdervægge.

Økonomisk betyder anvendelsen af disse målemetoder oftest besparelser i råmaterialer og energi, øget produktkvalitet, produktivitet og proceseffektivitet samt reduktion af spild. Besparelser i arbejdskraft er mindre udtalt, da metoderne normalt finder anvendelse indenfor områder kendetegnet ved høj teknologi og forudgående delvis eller fuldstændig automatisering.

Figur 8. Fra indledningen til brancheblade. Tekniske og økonomiske fordele ved brug af isotoper.

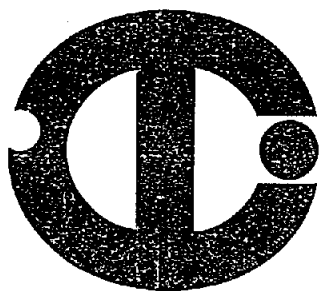
BB0.0 1979, IC.

Case 1

Kontrol af fugemørtel

Et brancheblad

Nedenfor følger en del af branchebladet for bygge og anlægsvirksomheder. Vi skal se nærmere på den omtalte kontrol af fugemørtel. I stedet for rumvægt benytter vi betegnelsen densitet. In situ betyder "på stedet", her "uden at fjerne mørtelen".



MÅLEUDSTYR

Komprimering -
Vandindhold

information

BYGGE- OG ANLÆGSVIRKSOMHED

ANVENDELSER AF RADIOAKTIVE ISOTOPER I MÅLEUDSTYR

Måleudstyr til kontrol af jordkomprimering og vandindhold i overfladelag baseret på måling af jordlagenes refleksion af neutron- og gammastråling anvendes ved anlæg af veje, luft-havne, dæmninger m.m., især i lande hvor denne kontrol ikke kræves udført efter en national standard som sandfyldnings-metoden. Måleudstyret kan anvendes på skråninger og lodrette flader og på materialer (sand, grus, asfalt m.m.), hvor den konventionelle metode ikke er anvendelig. Alene i U.S.A. er adskillige tusinde udstyr i rutinemæssig brug. Tilsvarende udstyr beregnet til nedsækning i føringsrør anvendes ved funderingsundersøgelser (kompression, vandindhold) af dybere liggende jordlag. Anvendelsesområder er f.eks. start- og landingsbaner, havneanlæg, dæmninger, diger og flodbredder.

Fladevægt - Rumvægt Fugt	Fladevægt og dermed rumvægt (ved kehdt tykkelse) kontrolleres med gammagennemstråling ved fremstilling af præfabrikerede <u>betonelementer</u> 10 - 40 cm, medens såvel gennemstråling som måling af reflekteret stråling anvendes til kontrol af rumvægt og homogenitet ved vibration af <u>beton</u> . Også rumvægt af <u>fugemørtel</u> kontrolleres in situ ved gammagennemstråling. In situ målinger af fugt og udtørring i bygningskonstruktioner baseres enten direkte på fugtighedsmåling med neutronstråling eller indirekte på måling af fladevægts- eller rumvægtsforskelle med gammastråling. Måleudstyr til kontrol af <u>cement</u> i beton er søgt udviklet, men rutinemæssige anvendelser er ikke rapporteret.
Armering	Til kontrol af antal, placering, dimension og omstøbning af <u>armeringsjern</u> i bygningskonstruktioner (f.eks. omstøbningskontrol i frankipåle) anvendes måleudstyr med radioaktive isotoper som supplement til kontrolmetoder baseret på ultralyd og radiografi.

Figur 9. Fra brancheblad for bygge- og anlægsvirksomhed.
Eksempler på anvendelse af isotoper.
BB9 1979, IC.

Problemstilling

Det er vigtigt løbende at kontrollere kvaliteten af moderne betonbyggeri. Mange eksempler på "byggesjusk" i dagspressen vidner om det. Ved elementbyggeri er det almindeligt at holde en afstand på nogle få centimeter mellem elementerne og mellem et element og cementgulvet. Det gøres ved hjælp af bolte. Den opståede revne udstoppes (fuges) med mørtel. Mørtelen skal være godt sammenpresset og uden hulrum. Det giver den største bæreevne. Hvis man i gamle dage ønskede at kontrollere en fuge, var man nød til at ødelægge den ved at tage en boreprøve. Så måtte man bagefter reparere fugen. Idag gøres det ikke-destruktivt med radioaktive isotoper. Man behøver ikke at begrænse sig til stikprøver, idet det er forholdsvis nemt at kontrollere alle fuger.

Målemetode

Ideen i metoden er, at gammastråling svækkes i ethvert materiale, også mørtel. Jo flere atomer i mørtelen strålen har passeret, jo svagere er den. Man anbringer en kilde på fugens ene side og måleudstyr på den anden. Se fig. 10. Hvis strålen bliver tilstrækkeligt svækket, er fugen god nok. Det handler altså om at finde ud af, hvor meget strålen bør svækkes. Det gøres ved at måle på nogle kendte mørtelblokke under identiske forhold: samme geometri, samme underlag osv. Sådan-

ne målinger kaldes en **kalibrering**. De kan foretages et andet sted end der, hvor kontrolmålingen foregår.

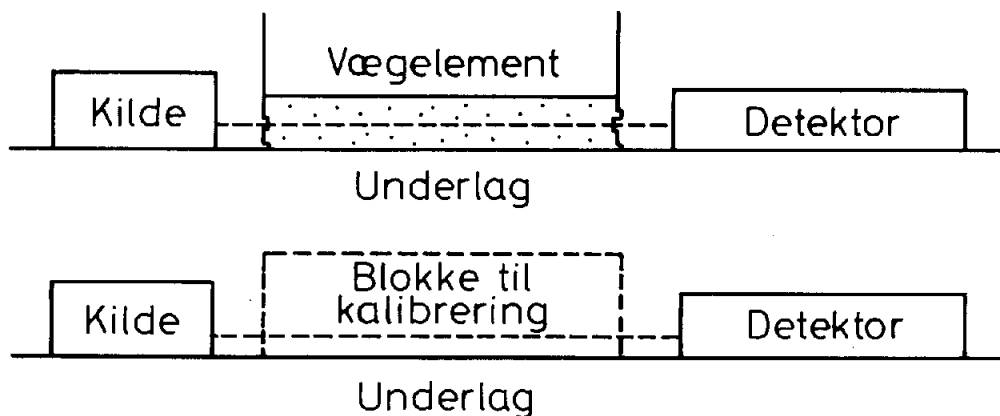
Kilden

Kilden består af en radioaktiv isotop, der udsender gammastråling. Denne stoppes ikke helt i mørtelen. Ellers ville der ikke være noget at måle på. Omvendt bliver den markant svækket. Det er nødvendigt, hvis der skal være målelige forskelle mellem en god og en dårlig fugning. Man benytter $^{137}_{55}\text{Cs}$. Hvert gammakvant har energien 0,66 MeV. Gammaaktiviteten er ca. 10^9 Bq.

Kasse 2

Ved en kildes gamma-aktivitet forstås antallet af γ -kvanter, den udsender pr. tidsenhed. Tidsenheden er ofte sekund. Enheden for γ -aktivitet er så Becquerel, der forkortes Bq. Den nævnte kilde udsender altså 10^9 γ -kvanter pr. sekund.

Kilden vejer ganske lidt og er i praksis punktformig. Den udsender gammakvanterne jævnt i alle retninger. Men man ønsker kun en stråle i en retning gennem mørtelen til måleudstyret. Det er afgørende for sikkerheden, at arbejderne er beskyttet mod stråling. Derfor er kilden anbragt i en blyklods med en lille åbning, så kun et snævert strålebundt slipper ud.

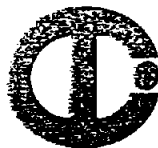


Figur 10. Øverst : kilde-detektor opstilling ved byggeelementet på byggepladsen. Nederst: Kalibreringsopstilling.

UNDERSTOPNINGSFUGER, RUMVÆGTSMÅLING

ISOTOPCENTRALEN

Skelbækgade 2
DK-1717 København V.
Telefon (01) 214131



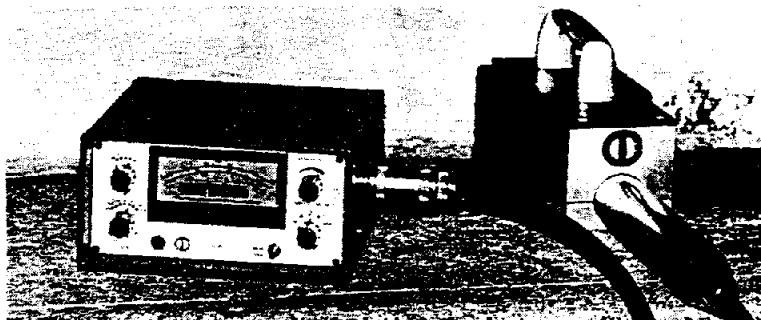
KVALITETSKONTROL -
mørtelunderstop-
ning i element-
byggeri

Undgå irriterende og dyre - eller
tidskrævende - efterreparationer
på understopningsfuger.

En kontrol af tæthed og komprime-
ring, der er de helt væsentlige
forhold for fugens styrke, kan op-

nås ved at måle rumvægt tværs gen-
nem fugen - middelrumvægten.

Isotopcentralen kan udføre sådan-
ne målinger, - eller vi kan til-
byde at levere det nødvendige ud-
styr incl. oplæring af mandskab
til betjening af apparaturet.



Figur 1. Kontrol af bærende fuge under betonelement. Detektoren i bil-
ledets højere side er anbragt ud for gammastrålekilden, som findes bag
fugen. Måleresultatet er et udtryk for fugens middelrumvægt ved måle-
stedet.

SPECIFIKATIONER hvad kan måles?

- Helt friske understopninger kan kontrolleres. Eventuelle efterreparationer er således lettere og hurtigere at udføre.
- Målingerne er ikke-destruktive.
- Usikkerheden er normalt mindre end $0,1 \text{ g/cm}^3$.
- Målingerne udføres uden strålingsrisiko. Det normale arbejde på arbejdspladsen kan foregå uhindret.
- Fuger med højde ned til 2 cm kan kontrolleres.
- Fugebredder indtil 60 cm kan måles.
- Måletiden for et kontrolpunkt er minimal. Ca. 2 minutter for en 18 cm vægunderstopning, eller ca. 10 minutter for en 60 cm søjleunderstopning.

ANDRE ANVENDELSER

Apparaturet er specielt udviklet til fugekontrol, men det kan også anvendes til at:

- Finde større hulrum i homogene materialer.

- Foretage tykkelsesmåling på homogene materialer.
- tykkelsen på to forskel-
lige materialer, f.eks. i
sandwichkonstruktioner, forud-
sat velspecificerede materia-
ler.

*Isotopcentralens beskrivelse af kontrollen af understopningsfuger.
Understopningsfuger, IC.*

Måleudstyr

Måleudstyret registrerer de gammakvanter, der passerer igennem mørtelen. Selve registreringen af gammakvantet foregår i en såkaldt **detektor**. Hver gang en gammakvant rammer detektoren, leverer den en elektrisk puls, som sendes til en **tæller**. Som navnet siger, sørger tælleren for at tælle antallet af elektriske pulser. Resultatet kaldes **tællertallet**. Divideres tællertallet med den tid, der er brugt på målingen, fås **tællehastigheden**. Enheden for tællehastighed er s^{-1} (ikke Bq). Detektoren er også afskærmet med bly. Kun stråling, der har bevæget sig i en ret linie fra kilden, bliver registreret.

Måling

Kilde og måleudstyr står så tæt som muligt på hver sin side af fugen. Denne afstand skal benyttes ved alle målinger - også ved kalibreringen. Tidsrummet, hvori man måler, er typisk 2 minutter, og er den samme for alle målinger. Man får et tællertal. Dernæst fjernes kilden. Selv uden kilde vil nogle γ -kvanter ramme detektoren. De kommer fra naturlige kilder i jord, byggematerialer og mennesker samt fra verdensrummet. Denne stråling kaldes **baggrundsstråling**. Baggrunden måles i samme tidsrum (2 minutter), og trækkes fra tællertallet fra før. Det korrigerede tællertal repræsenterer så gammakvanterne fra kilden.

Kalibrering

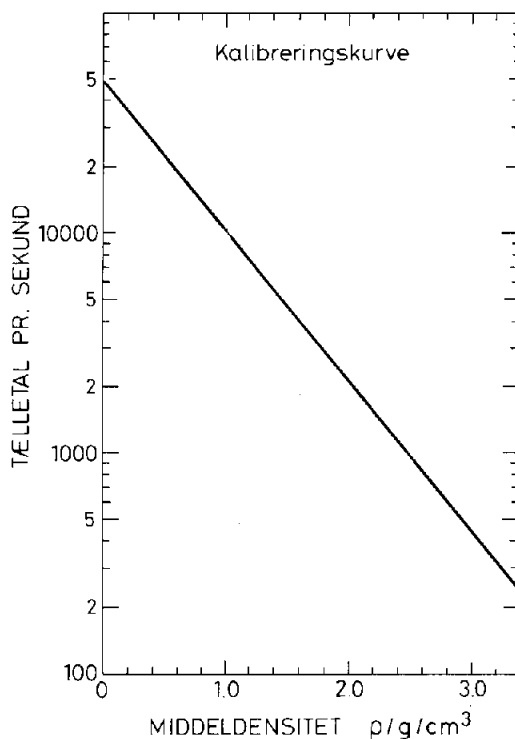
Samme kilde og samme måleudstyr anbringes i samme afstand og på samme slags underlag (cement). Man anbringer blokke af mørtel med samme bredde som fugen mellem kilde og måleudstyr. Nogle er tæt sammenpressede, andre mere løst. Graden af sammenpressethed måles lettest ved at bestemme blokkenes volumen og masse og finde densiteten. For hver blok registreres tællertallet i 2 minutter og baggrunden fratrækkes. Det korrigerede tællertal benyttes til at finde tællehastigheden.

På enkeltlogaritmisk papir afsættes nu ud ad den lineære akse densiteten og ud ad den logaritmiske afsættes tællehastigheden.

På denne graf kan man altså finde (gennemsnits)densiteten af en fuge, når tællehastigheden er fundet. Densiteten af en mørtelfuge skal være mindst 1.8 g/ml. På grafen kan man altså aflæse den størst tilladte tællehastighed. Grafen er en **kalibreringskurve**.

Kasse 3

Ved en kalibrering etablerer man en forbindelse mellem to fysiske størrelser. Her tællehastighed og densitet. Forbindelsen kan angives ved en funktion, kalibreringsfunktionen, eller en graf, kalibreringskurven.



Figur 11. Kalibreringskurve.



Understopningsmåling

Lignende anvendelser

Ide

Ideen i vores case kan siges at være, at stof ændrer stråling. Ved at måle ændringen, kan man sige noget om stoffet - i vores case mørtelen. Der er i industrien en lang række anvendelser af denne ide. Hyppigst måles på den stråling, der passerer igennem stoffet. Undertiden måles der på den tilbagekastede (spredte) stråling. Man kan også bruge betastråling. Da den stoppes helt af en ret tynd metalplade, er den kun velegnet til meget tynde materialer. Vi skal se på nogle eksempler:

Cigaretter

Cigaretter produceres som en endeløs cigaret-cylinder før opskæring. Den kontrolleres for

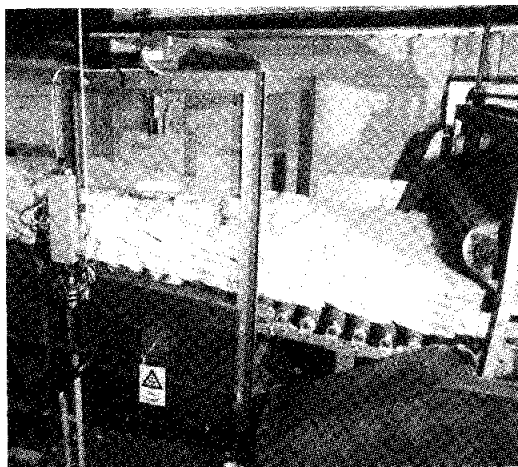
den rette fyldning ved gennemstråling på tværs, mens den bevæger sig afsted. Der kan benyttes både betastråling og svag gammastråling.

Stålplader

Stålvalseværket i Frederiksværk er den eneste producent af stålplader i Danmark. Stålpladerne kommer rødglødende ud fra valseværket. Hvis valsningen af en plade har været ujævn eller tykkelsen er forkert, skal den omsmeltes. For at spare energi skal det gøres, mens den stadig er rødglødende. Målingen blev tidligere foretaget af ansatte, som var tvunget til at opholde sig i en ulidelig varme fra pladerne. Nu benyttes en kilde af $^{60}_{27}\text{Co}$. Den udsender endnu mere gennemtrængende γ -kvanter end $^{137}_{55}\text{Cs}$, hvilket er nødvendigt på grund af de meget tykke stålplader. Man måler på den passerende stråling.

Rockwoolplader

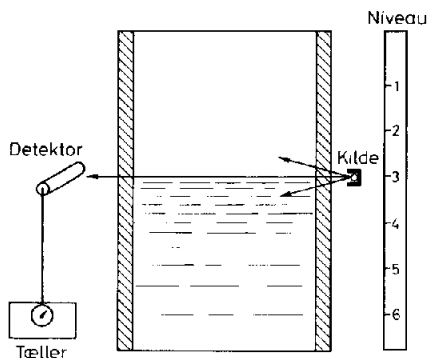
Danmark har en omfattende produktion af isoleringsmateriale. Rockwool har både en fabrik i Jylland og en på Sjælland. Inden udskæring har man også en endeløs isoleringsplade. Kvaliteten, dvs. massen pr arealenhed, kontrolleres ved at måle på de tilbagespredte γ -kvanter.



Fladevægtskontrol under produktion af Rockwool.

Øldåser

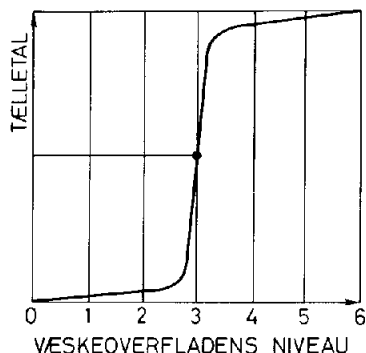
Det er ikke muligt at se, om en øldåse er fyldt rigtigt op. Her kan man i stedet benytte gennemstrålingsmetoden med γ -stråler. Metoden benyttes generelt, når væskestanden skal kontrolleres i beholdere, der er uigennemsigtige eller utilgængelige på grund af indholdets farlighed (kemikalier, varme væsker etc.). Se fig. 12.



Figur 12: Anordning til niveaumåling.

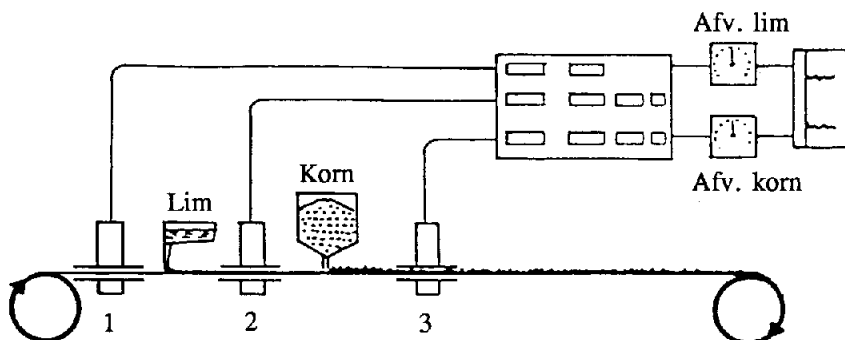
Tællertallet viser, hvorvidt væskefladen er over eller under det faste niveau, kilde og detektor befinder sig på. Bemærk niveauskalaen.

På grafen er det væskens niveau, der er afsat ud af 1. aksen.



Måleområder

Kilde	Max. g/m ²	Anvendelse
Kr 85	1.200	Cellulose, lim, plastfolie, tekstil
Sr 90	7.000	Metalfolie, slibekorn
Am 241	50.000	Finér, spån-, plast-, metal-, tyndplade



Figur 13. Anlæg til kontrol og dosering af lim og slibekorn ved fremstilling af snadpapi.

Dansk Smergelfabrik A/S i Maribo.

Tykkelses- og fladevægtsmåler, IC.

Statistiske egenskaber ved γ -kilden

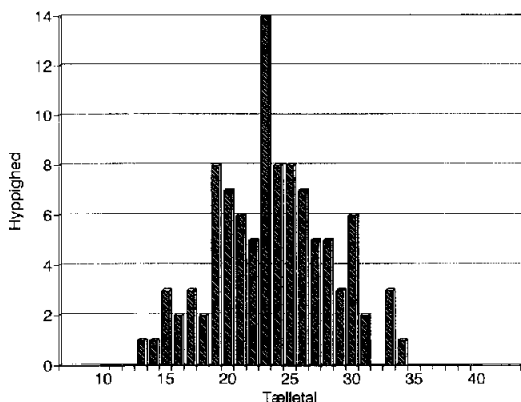
En 'konstant' kilde

Udsendelse af stråling er et statistisk fænomen. Det kan ikke forudsiges, hvornår en kerne henfalder. Men der er en **konstant sandsynlighed** for henfald pr sekund. Hvis kilden består af mange kerner, vil man næsten kunne forudsige, hvor mange der vil henfalde pr. sekund. Men ikke helt præcist. To ens kilder vil derfor ikke (nødvendigvis) i det samme tidsrum udsende lige mange γ -kvanter. Med den samme kilde får man derfor næsten aldrig det samme tælleantal i lige lange tidsrum, selv om kilden er uforandret i praksis.

Naturligvis vil alle kilder med tiden blive svagere. Når en kerne henfalder, er der jo færre tilbage, som kan henfalde. Dette forhold vender vi tilbage til senere. Men selv når kilden henfalder så langsomt, at den i praksis kan kaldes 'konstant', er γ -aktiviteten altså ikke helt konstant. Dette forhold skal vi undersøge nærmere.

Undersøgelse #1

Ved denne undersøgelse kan man bruge enhver type detektor til kernestråling, f.eks. et GM-rør. En γ -kilde anbringes i så stor en afstand fra detektoren, at der tælles ca. 25 γ -kvanter pr. sekund. Uden at ændre på opstillingen foretages så mindst 100 målinger på den samme kilde, hver i 1 sekund.



Figur 14. Histogram

Før målingerne påbegyndes laves en journal, hvori tallene fra 10 til 40 noteres på række med et tal i hvert felt. Efter hver måling sættes et kryds i et kvadrat ud for det pågældende tælleantal. Mens der måles, konstrueres altså et **histogram**.

Når målingerne er afsluttet, findes **middelværdien**, μ . Som et mål for usikkerheden på den fundne middelværdi benyttes tælle-tallenes **spredning**, σ , der (tilnærmet) kan findes som kvadratroden af middelværdien:

$$\sigma = \sqrt{\mu}$$

Beregn spredningen for målingerne. Undersøg, hvor mange procent, der ligger i intervallerne

$$I_1 = [\mu - \sigma, \mu + \sigma]$$

$$I_2 = [\mu - 2 \cdot \sigma, \mu + 2 \cdot \sigma]$$

$$I_3 = [\mu - 3 \cdot \sigma, \mu + 3 \cdot \sigma]$$

Når antallet af målinger ikke er for lille, tilhører ca. 68% af målingerne intervallet I_1 , ca. 95% I_2 og ca. 99,8% I_3 . Sammenlign disse procenttal med de fundne.

Usikkerhed på et tælleantal

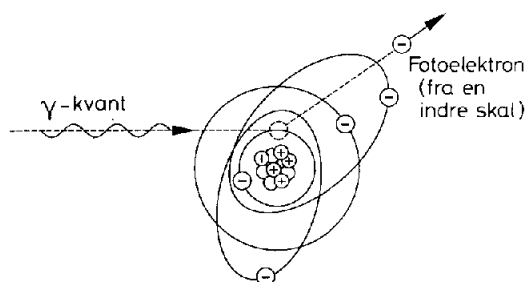
Kaldes et tælleantal fra en enkelt måling n , så er middelværdien n . Også i dette specielle tilfælde benyttes $\sqrt{n}$ som usikkerheden på målingen.

Eksempel

Ved en måling fås f.eks. $n = 200$. Usikkerheden er så ca. 14. Den relative usikkerhed er $14/200 = 7\%$. For en anden kilde fås f.eks. $n = 20000$. Usikkerheden fås til ca. 140 og den relative usikkerhed bliver 0,7%. Man ser, at med større tælleantal falder den relative usikkerhed på målingen. Men der er dog ifølge undersøgelse 1 en risiko på 32% for, at det registrerede tælleantal afviger med mere end usikkerheden fra den middelværdi, man ville få, hvis målingen blev gentaget mange gange.

Mekanismerne ved absorption af gammastråling

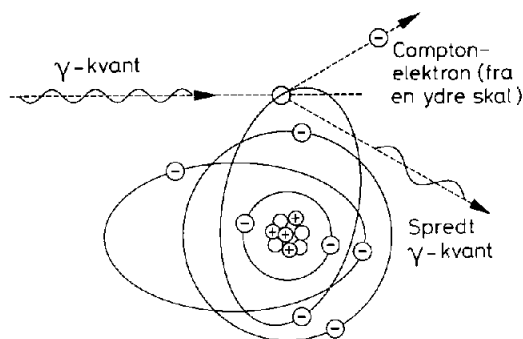
Dette afsnit handler om, hvordan strålen af γ -kvanter svækkes ved passage af stof. Det viser sig, at γ -kvanterne bevæger sig lige igennem stof uden at ændre energi og retning, med mindre der sker en af følgende tre processer:



Figur 15a. Fotoelektrisk effekt.

a. Fotoelektrisk effekt

γ -kvantet rammer en elektron, som får overført hele kvantets energi. Selv ophører γ -kvanter med at eksistere. Elektronen bevæger sig normalt i en helt anden retning end γ -kvanter, der slog den løs. Set i relation til strålen, siger man, at γ -kvanter er absorberet.

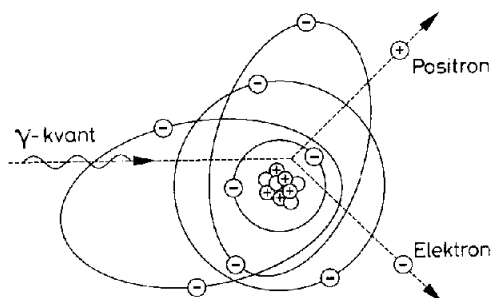


Figur 15b. Comptonspredning.

b. Comptonspredning

γ -kvanter afgiver noget af energien til en elektron og fortsætter selv med mindre energi (og større bølgelængde) i en anden retning. Elektronens bindingsenergi er meget lille i forhold til γ -kvanterets energi (elektronen er næsten "fri"). Hverken elektronen eller γ -

kvantet bliver i strålen. Også her siger man, at γ -kvanter er blevet absorberet.



Figur 15c. Pardannelse.

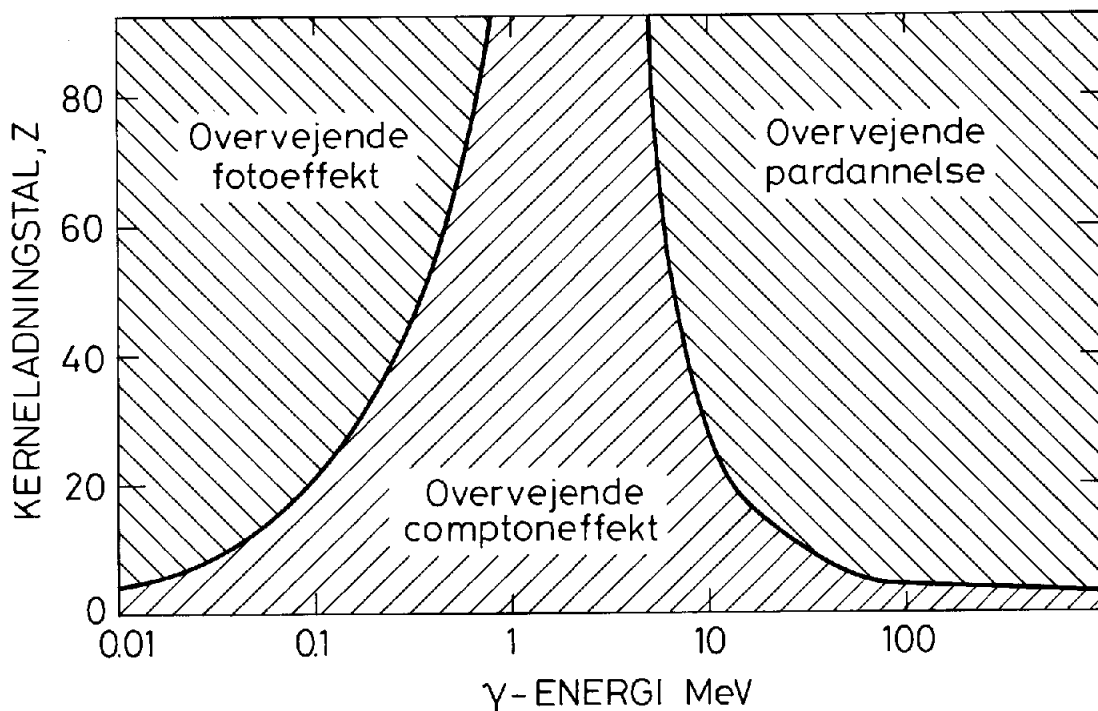
c. Pardannelse

Et γ -kvanter på væsentligt mere end 1 MeV passerer en atomkerne og omdannes til en elektron og en positron. De bevæger sig ikke i strålens retning. Efter opbremsning reagerer positronen med en tilfældig elektron i stoffet. De forsvinder under udsendelse af to γ -kvanter. Men disse bevæger sig også i en tilfældig retning i forhold til strålen og derfor (næsten) aldrig i dennes retning. Også her siges (lidt overfladisk), at γ -kvanter er absorberet.

Konklusion:

Uanset hvilken af de tre nævnte mekanismer, der er i funktion, absorberes γ -kvanter.

Det er ikke muligt at forudsige, om et γ -kvanter overhovedet absorberes, eller ved hvilken af de tre processer det i så fald vil ske. Men man kan angive sandsynligheden derfor. Den relative sandsynlighed for de tre processer afhænger både af kvantets energi og af stoffets atomnummer, Z . Kendes disse, kan man benytte fig. 16 til at finde den sandsynligste absorptionsmekanisme. Man ser, at den fotoelektriske effekt hyppigst forekommer ved små og pardannelsen ved store energier. Ved 1-5 MeV er Compton-spredningen den sandsynligste i alle stoffer. Det ses også, at Comptonspredningen spiller den største rolle i de lette grundstoffer.



Figur 16. Oversigt over absorptionsprocesser. Figuren viser hvilken absorptionsproces, der dominerer som funktion af energien og grundstofnummeret.

Materialetykkelsens betydning for absorptionen

Undersøgelse #2

Som kilde benyttes $^{137}_{55}\text{Cs}$. Man kan f. eks. undersøge absorptionen i tynde klinker eller fliser til badeværelset, f. eks. 10 stykker. Som detektor kan benyttes et GM-rør, men bedst er en scintillationsdetektor.

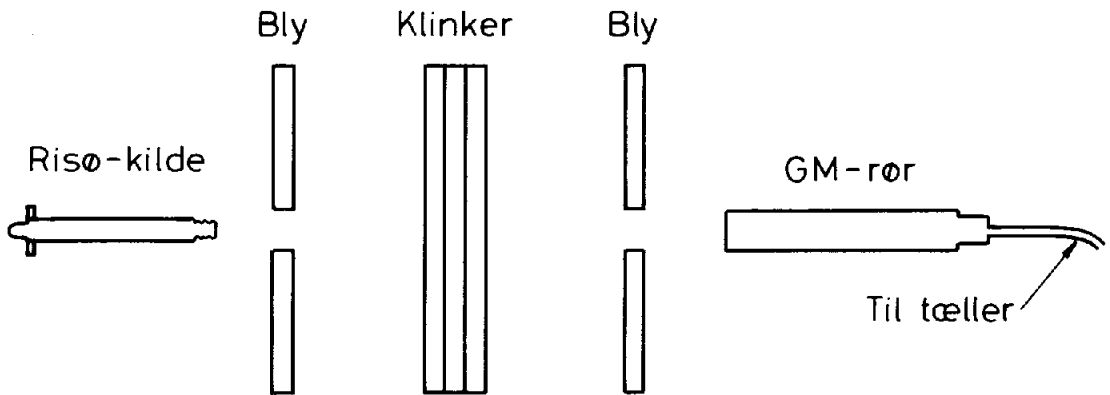
Scintillationsdetektor

Man behøver kun at bruge 10 sekunder til hver måling. Afskærmning er unødvendig, da man kan nøjes med at tælle de γ -kvanter, der har energi omkring 0,66 MeV.

GM-rør

Det er nødvendigt at afskærme et forholdsvist snævert strålebunt. Det kan gøres med to blyplader med en cirkelformet åbning. En på hver sin side af klinkerne. Ellers får man f. eks. dobbeltspredte γ -kvanter med, og ikke kun dem, der passerer lige igennem. Man skal måle på dem, der ikke udsættes for absorptionsprocesser for at få en simpel (og reproducerbar) sammenhæng frem. Hver måling skal vare ca. 10 minutter.

I begge tilfælde måles der først uden klinker, så med en, så to, ... op til 10. Naturligvis skal man også måle baggrunden og trække den fra tælle tallene for at få tælle tallene for strålen. De korrigerede tælle tal kaldes n_{kor} . Bestem endelig tykkelsen af kaklerne og dermed den vejlængde, strålen har passeret i byggematerialet. Man kan se helt bort fra absorptionen i luft.



Figur 17. Opstilling med afskærmning til måling af absorption i byggematerialer.

Måleresultater:

Baggrundsstråling $n_{\text{bag}} =$ _____ $\Delta n_{\text{bag}} =$ _____

Materialetykkelse/mm	$n_{\text{målt}}$	n_{kor}	Δn_{kor} *)
0			

*) $\Delta n_{\text{kor}} = \Delta n_{\text{målt}} + \Delta n_{\text{bag}}$

Usikkerhed

Naturligvis findes usikkerheden på alle tælleletal som kvadratrodden af tælle tallene, både på baggrundstrålingen og målingerne med kilde uanset om der er indskudt klinker eller ej. Usikkerheden på n_{kor} , Δn_{kor} findes som summen af usikkerhederne på selve målingen og baggrunden (Det er en lidt mere "pessimistisk" beregning end den mere korrekte, at

$$\Delta n_{kor} = \sqrt{n_{m\ddot{a}lt}^2 + n_{bag}^2} \quad)$$

Eksempel

Ved måling på 5 kakler i 10 minutter finder man måske et tælleletal på 711, mens baggrunden i samme tidsrum var på 230. De to usikkerheder bliver ca. 27 henholdsvis ca. 15. Usikkerheden på n_{kor} er da 42 og

$$n_{kor} = 481 \pm 42$$

Beregn på denne måde usikkerheden på hver tælling i undersøgelsen.

Skema

Baggrund, tælleletal og de korrigerede tælleletal indføres med usikkerheder i skemaet.

Graf

De korrigerede tælleletal afbildes på enkeltlogaritmisk papir som funktion af materialetykkelsen. Punkterne afsættes med en tynd men tydelig usikkerhedsstreg.

Eksempel

Er i eksemplet ovenfor hver kasse 8 mm tyk, afsættes det omtalte korrigerede tælleletal ud for $x = 40$ mm og $y = 481$ som

$$481 \rightarrow \left. \vphantom{481} \right\} 42$$

Der ses helt bort fra eventuel måleusikkerhed på materialets tykkelse.

Gennem de afsatte punkter skal der kunne tegnes en ret linie, sådan at ca. 2/3 (68%) af punkternes usikkerhedsintervaller skæres af linien. Tegn den mest sandsynlige linie.

Konklusion

De fundne korrigerede tælleletal ligger på en ret linie, når de afsættes som funktion af materialetykkelsen på enkeltlogaritmisk papir .

Kasse 4

Matematisk indskud om eksponentielt aftagende funktioner

Funktioner, hvis grafer er aftagende rette linier på enkeltlogaritmisk papir, kaldes **eksponentielt aftagende funktioner**.

For disse gælder, at hver gang x vokser med 1, **ganges** funktionsværdien med et bestemt tal, **fremskrivningsfaktoren** a . a er et positivt tal mindre end 1. **Funktionsforskriften** er

$$f(x) = b \cdot a^x \quad [2]$$

Her er b begyndelsesværdien, dvs.

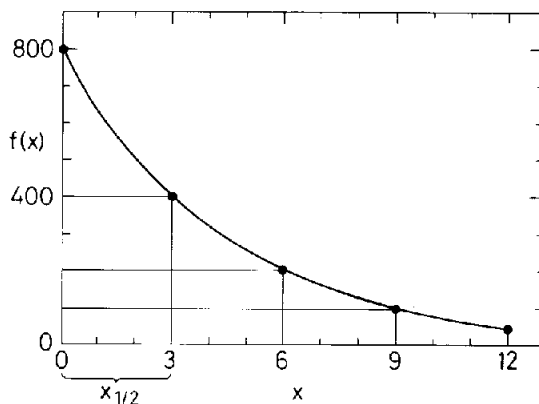
$$b = f(0)$$

En eksponentielt aftagende funktion kan altså fastlægges ved a . Men der er en anden mulighed, nemlig **halveringskonstanten** $x_{1/2}$.

En eksponentiel aftagende funktion halveres ved den samme tilvækst i x uanset, hvilket x man starter fra. Det er denne tilvækst, der kaldes $x_{1/2}$.

(fortsættes)

Kasse 4 (fortsat)



Figur 18. Grafen for en eksponentielt aftagende funktion med halveringskonstanten 3.

Hvis vi starter fra $x = 0$ gælder

$$f(x_{1/2})/f(0) = 1/2$$

Benyttes [2] fås

$$a^{x_{1/2}} = 1/2$$

Ved at opløfte til potensen $1/x_{1/2}$ fås:

$$a = (1/2)^{1/x_{1/2}} \quad [3]$$

Tager man i stedet $\ln$ på begge sider fås:

$$x_{1/2} = \ln(1/2)/\ln(a) \quad [4]$$

Ved indsættelse af [3] i [2] fås :

$$f(x) = f(0) \cdot (1/2)^{x/x_{1/2}} \quad [5]$$

Eksempel

En eksponentielt aftagende funktion er givet ved $a = 0,95$ og $f(0) = 800$.

Derfor bliver

$$f(x) = 800 \cdot 0,95^x$$

Af [4] fås

$$x_{1/2} = 13.5$$

Af formel [5] fås

$$f(x) = 800 \cdot (1/2)^{x/13.5}$$

og

$$f(13.5) = 400 \text{ og } f(27) = 200$$

$df(x)/dx$ står for ændringen i f pr. enhed.

I differentialregningen i matematik kan man vise, at

$$df(x)/dx = b \cdot \ln(a) \cdot a^x$$

$-df(x)/dx$ er faldet i f pr. enhed, mens

$$k = - \frac{df(x)/dx}{f(x)}$$

er det relative fald i f pr. enhed. Vi får:

$$k = - \ln(a)$$

Heri indsættes $\ln(a)$ fra formel [4]:

$$k = \ln(2)/x_{1/2} \quad [6]$$

Eksempel

Efterprøvning af differentiation af $y = 1.4^x$ ved hjælp af DYMOS

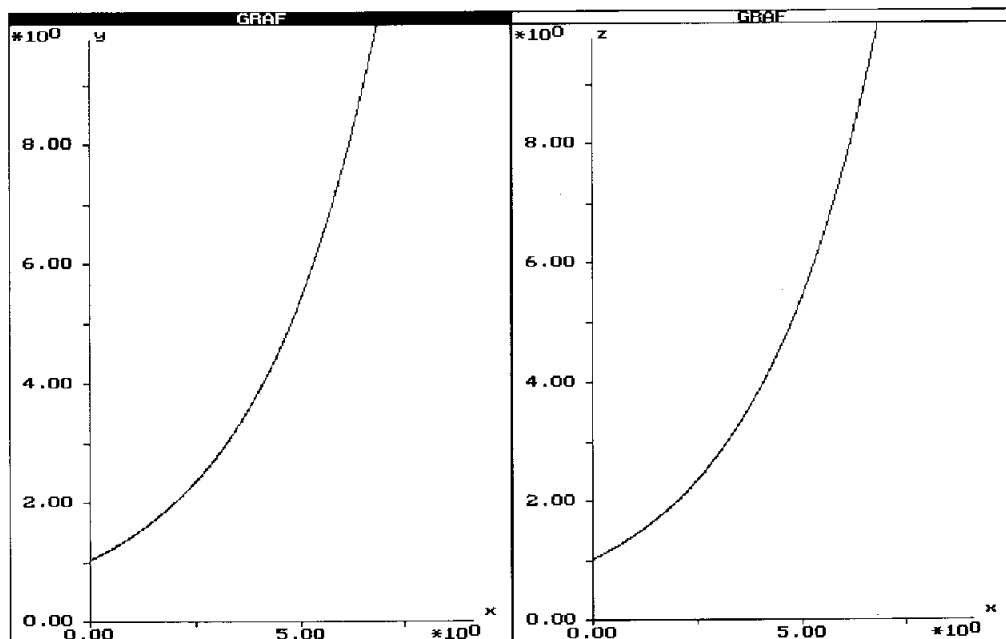
Ifølge foregående side gælder for eksponentialfunktionen $y = 1.4^x$, at

$$\begin{aligned} dy/dx &= \ln(1.4) \cdot 1.4^x \\ \Downarrow \\ dy &= \ln(1.4) \cdot 1.4^x \cdot dx \end{aligned}$$

Hvis dx fortolkes som en tilvækst i x og dy som den tilsvarende tilvækst i y på grafen for eksponentialfunktionen, vil ligningen gælde desto bedre, jo mindre dx og dermed dy er.

Små tilvækster i funktionen kan altså udregnes ved hjælp af denne ligning. Enhver funktionsværdi kan findes ved gentagende additioner af tilvækster ud fra $f(0)=1$. DYMOS er velegnet til en sådan regning. Resultaterne præsenteres som en graf. Denne graf skal så sammenlignes med grafen for $z = 1.4^x$, der i DYMOS udregnes som $\exp(\ln(1.4) \cdot x)$. Model og konstanter ses nedenfor sammen med graferne. Det ses, at de giver den samme graf. Prøv også, at tegne grafen for funktionen y som funktion af z .

MODEL	VÆRDIER
<pre>y := y+y*ln(1.4)*dx z := exp(x*ln(1.4)) x := x+dx</pre>	<pre>y := 1 x := 0 dx := 0.01</pre>



Matematisk beskrivelse af absorptionen

Resultatet af undersøgelse #2 var, at tælle-tallene lå på en aftagende ret linie, når de afsattes på enkeltlogaritmisk papir som funktion af materialetykkelsen. **Altså er tælle-tallet en eksponentielt aftagende funktion af tykkelsen.**

Når man beskriver teknik og fysik matematisk, glemmer man til dels den eksperimentelle basis. Man tænker idealiseret. Baggrunden eksisterer ikke rigtigt i denne verden, og n er bare tælle-tallet fra kilden. Så det matematiske f erstatter vi med n : Vi lader $n(x)$ stå for tælle-tallet, når klinkernes samlede tykkelse er x . Når klinkerne ikke er indskudt er $x = 0$, og begyndelsesværdien $b = n(0)$.

Den materialetykkelse, der halverer tælle-tallet, kaldes for **halveringstykkelsen** $x_{1/2}$ og er det samme som halveringskonstanten i matematikken. Af [5] fås ved oversættelse formelen:

$$n(x) = n(0) \cdot (1/2)^{x/x_{1/2}} \quad [7]$$

μ , den **lineære absorptionskoefficient**, defineres som den brøkdel af strålen, der absorberes pr længdeenhed i et meget tyndt lag. Denne størrelse kaldte vi i kasse 4 for k , det relative fald i n pr længdeenhed. Derfor kan vi direkte oversætte formel [6]:

$$\mu = \ln(2)/x_{1/2} \quad [8]$$

Find i tilknytning til undersøgelse #2 både $x_{1/2}$, μ og $n(x)$.

Eksempel:

I en opstilling sendes gammastråling gennem en mursten med tykkelsen 110 mm. Man finder på 10 minutter et korregeret måletal på 219. Uden mursten fås i samme tidsrum 1275. Find $x_{1/2}$ og μ .

Vi indsætter i [7]:

$$219 = 1275 \cdot (1/2)^{110\text{mm}/x_{1/2}} \Leftrightarrow x_{1/2} = 43,3 \text{ mm.}$$

Herefter findes μ af formel [8]:

$$\mu = 0,016 \text{ mm}^{-1}.$$

En model for absorption

Vi vil prøve at forklare, hvorfor n er en eksponentielt aftagende funktion af x .

Til det formål opstiller vi en model for absorptionen. Vi har i tankerne vores konklusion i afsnittet "Mekanismer for absorption af gammastråling":

Model:

1. Materialet er homogent.
2. Strålen indeholder ens kvanter, dvs. kvanter med samme energi.
3. Når et kvant absorberes kan man opfatte det som fjernet fra strålen, uanset hvilken mekanisme, det sker ved. Dvs. **at strålen består alle steder af de oprindelige kvanter. Der er blot færre og færre, jo længere strålen er nået ind i materialet.**

Argumentation:

Da alle kvanterne i strålen er ens, må de have den samme sandsynlighed for at passere en bestemt tykkelse l . Dvs. at i middel passerer en bestemt brøkdel et lag af tykkelsen l . Det er denne brøkdel, vi kalder a . Da

$$n(x+1) = a \cdot n(x)$$

er n en eksponentielt aftagende funktion ifølge kasse 4. Dermed har modellen så at sige forklaret resultatet i undersøgelse #2.

Densitetens betydning for absorptionen

Densitet og atomnummer

- 1 Byggematerialer består næsten udelukkende af lette grundstoffer. For dem gælder, at Z er ca. det samme som N eller $A/Z = 2$. I atomerne er der altså massen $2u$ for hver elektron (da protonens og neutronens masse tilnærmelsesvis er $1u$). Antallet af elektroner i et givet rumfang er så proportionalt med massen af materialet. Eller med andre ord: Hvis man sammenligner forskellige bygge-

materialer med samme rumfang, er antallet af elektroner proportionalt med densiteten.

- 2 γ -kvanterne fra $^{137}_{55}\text{Cs}$ med energien 0,66 MeV absorberes på den anden side næsten udelukkende ved Comptonspredning. Det kan ses på fig. 16. Så det er "frie" elektroner, der forårsager absorptionen. Derfor kunne man forvente, at absorptionen er proportional med antallet af elektroner..

Sammenfattende kan det forventes, at absorptionen er proportional med densiteten.

I den næste undersøgelse prøver vi eksperimentelt at bekræfte denne teoretiske overvejelse.

Undersøgelse #3

Der benyttes samme opstilling og måletider som i undersøgelse #2. Men nu indskydes byggematerialer med forskellige densiteter imellem kilde og detektor. Af byggematerialer kan vælges kakler, massive mursten, hule mursten, letbeton, gasbeton, havefliser eller lignende. Materialernes tykkelse kan variere fra 5-10 cm. Der foretages

- 1 en baggrundsmåling, inden opstillingen stilles op.
- 2 en måling med kilde uden byggematerialer.
- 3 en måling for hvert materiale.

Under del 2 og 3 skal kilde og detektor stå fast.

Tabel med omtrentlige densiteter:

Materiale	ρ densitet i g/ml
Kakler	2,8
Massiv mursten	2,0
Hulsten	1,35
Letbeton	0,77

Find heraf ved samme metode som i eksemplet μ for hvert materiale.

De fundne værdier for μ afbildes på almindeligt mm-papir som funktion af densiteten. Igennem de fundne punkter og (0,0) tegnes den bedste rette linie. Ligger punkterne pænt i forhold til linien? Hvad kan du konkludere? Stemmer vore forventninger?

Masseabsorptionskoefficienten μ_{masse} defineres ved

$$\mu_{\text{masse}} = \mu/\rho$$

Tabel over masseabsorptionskoefficienter:

Materiale	Masseabsorptionskoefficient (mm^2/g)
Luft	8,3
Beton	8,3
Aluminium	7,5
Bly	10,4

Find masseabsorptionskoefficienten for de byggematerialer, der blev undersøgt i #3 og sammenlign. Er det rimeligt at finde en fælles middelværdi? Det kan i så fald gøres ved at aflæse hældningskoefficienten til den tegnede linie.

Kommentar til case 1

Ved vores undersøgelse #2 fandt vi, at n aftog eksponentielt med x . Klinkerne var homogene, og strålen cylinderformet. Altså aftager n eksponentielt med antallet af elektroner, som strålen passerer. I case 1 var tykkelsen af mørtelen konstant, og vi så, at n aftog eksponentielt med densiteten. Men antallet af elektroner er proportionalt med densiteten, så det vi så var det samme: at n aftager eksponentielt med antallet af elektroner i det stofvolumen, strålen passerer.

Case 1 og undersøgelse #2 afspejler altså den samme lovmæssighed.

Præcisionen ved tykkelsesmålingen

Aktivitetens betydning

Vi har set, at der er en lang række fordele ved at foretage kontrol- og tykkelsesmålinger med gammastråler. Men desuden er metodens præcision afgørende for, om en virksomhed vælger den. Vi har set, at kilden ikke kan være helt konstant, og at selve måleprocessen også er statistisk. Men vi har også lært, at med stigende aktivitet bliver den relative usikkerhed mindre.

På den anden side skal man ikke benytte en kilde med større aktivitet end nødvendigt. Følgende eksempel viser, hvordan den nødvendige og tilstrækkelige aktivitet kan findes:

Eksempel:

Ved produktionen af 10 cm tykke plader af aluminium ønskes en nøjagtighed, der svarer til en relativ usikkerhed på 0,14% på tællertallet. Transportbåndet står stille 2 minutter, mens kontrolmålingen foretages. Kildens radioaktive isotop er $^{90}_{38}\text{Sr}$, hvis gammaenergi er 2,27 MeV. Ved denne energi er $x_{1/2}$ i aluminium ca. 6,9 cm. Opstillingens geometri betyder, at kun 0,03% af gammakvanterne rammer detektoren. Af disse registreres 20%. Vi ønsker at finde kildens aktivitet.

- 1 Vi finder først tællertallet med indskudt plade $n = n(10 \text{ cm})$ ved $\sqrt{n}/n = 0,0014 \Leftrightarrow \sqrt{n} = 1/0,0014 \Leftrightarrow n = 510204$.
- 2 Så findes tællertallet uden indskudt plade, $n(0)$, af formel [7]: $n(0) = 1393218$.
- 3 Antallet N af udsendte gammakvanter i tiden $t = 2 \text{ min.}$ bestemmes ved

$$0,0003 \cdot 0,20 \cdot N = 1393218$$

⇓

$$N = 2,3 \cdot 10^6$$

- 4 Til sidst findes aktiviteten

$$A = N/t = 2,3 \cdot 10^6 / 120 \text{ s} \\ \approx 1,9 \cdot 10^6 \text{ Bq.}$$

Halveringstykkelsens betydning

Hvis kildens halveringstykkelse er meget mindre end emnets tykkelse, betyder det, at strålen svækkes meget. Tællertallene bliver derfor små og den relative usikkerhed på tællertallet stor. Så er usikkerheden også stor på tykkelsen.

Hvis omvendt halveringstykkelsen er meget større end emnets tykkelse, betyder det, at strålen næsten ikke svækkes, så små ændringer i emnets tykkelse næsten ikke ændrer tællertallet. Det giver også en stor usikkerhed på tykkelsen.

Vi skal altså til en given materialetykkelse vælge en kilde, hvis halveringstykkelse i materialet er ca. lig med materialetykkelsen.

Det er ret vanskeligt præcist at udregne den optimale halveringstykkelse svarende til en bestemt pladetykkelse. Vi vil i stedet udregne usikkerheden ved bestemmelsen af tykkelsen af aluminiumplader på 10 cm ved brug af 4 almindelige gammakilder.

I DATABOGEN kan man ikke finde $x_{1/2}$ for aluminium, men derimod en graf, der angiver μ som funktion af gammaenergien. Derfor aflæses først μ , og $x_{1/2}$ udregnes med formel [8].

Resultaterne kan samles i et skema:

Gammakilde	Gammaenergi (MeV)	μ (cm ⁻¹)	$x_{1/2}$ (cm)
$^{226}_{88}\text{Ra}$	0,187	0,33	2,1
$^{137}_{55}\text{Cs}$	0,66	0,20	3,5
$^{60}_{27}\text{Co}$	1,33	0,13	5,3
$^{90}_{38}\text{Sr}$	2,27	0,10	6,9

Vi er nødt til at antage, (hvad der ikke er helt rigtigt), at det er den samme brøkdelen (20%) af de 4 forskellige gammakvanter, der registreres af detektoren. Så kan man antage, at tællertallet uden indskudt plade er det samme for alle 4 kilder, f.eks. 200000.

Eksempel: $^{90}_{38}\text{Sr}$.

Vi bruger formel [7] til at finde tællertallet med pladen inde:

$$n = 200000 \cdot 0,5^{10/6,9} = 73241.$$

Men tællertallet kan variere med den statistiske usikkerhed. Det mindste tællertal er:

$$n_{\min} = 73241 - \sqrt{73241} = 72970.$$

Hvis man fik dette tællertal, ville man tro at pladen var tykkere. Den maximale tykkelse, $x_{\max}$, kan findes af formel [7]:

$$\begin{aligned} x_{\max} &= x_{1/2} \cdot \ln(200000/n_{\min})/\ln(2) \\ &= 10,037 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Heraf fremgår, at usikkerheden på tykkelsen er 0,037 cm.

Resultaterne fra alle 4 kilder er opskrevet i nedenstående skema.

Ved den givne aluminium-pladetykkelse er derfor $^{137}_{55}\text{Cs}$ den mest nøjagtige.

Gammakilde	$^{226}_{88}\text{Ra}$	$^{137}_{55}\text{Cs}$	$^{60}_{27}\text{Co}$	$^{90}_{38}\text{Sr}$
Tællertal	7371	27602	54082	73241
$n_{\min}$	7285	27436	53849	72970
$n_{\max}$ (cm)	10,036	10,031	10,033	10,037
Usikkerhed (mm)	0,36	0,31	0,33	0,37

Opgaver

1 Afskærmning.

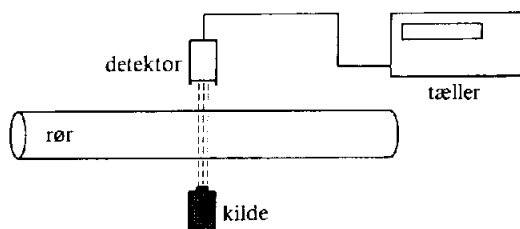
Find i DATABOGEN energierne af gamma-strålingen fra både $^{241}_{95}\text{Am}$ og $^{137}_{55}\text{Cs}$ ($^{137}_{55}\text{Ba}^m$).

Find de lineære absorptionskoefficienter i aluminium.

Udregn de tilsvarende halveringstykkelser.

Hvor meget svækkes strålingen fra de to kilder ved passage af 5 mm aluminium?

2 Densitetsmåling af væsker ved absorption af gammastråling.



En radioaktiv kilde udsender γ -stråling. En del af denne stråling passerer diametralt igennem et cylindrisk rør og rammer en detektor som vist på figuren. Når røret er tomt, registrerer der af tælleren $1,28 \cdot 10^4$ fotoner pr. sekund. Røret gennemstrømmes nu af vand. Vands lineære absorptionskoefficient for γ -stråling med den pågældende energi er $0,090 \text{ cm}^{-1}$. Rørets indre diameter er $10,0 \text{ cm}$.

- a) Beregn det antal fotoner pr. sekund, som tælleren registrerer i denne situation.

Røret gennemstrømmes nu af en anden væske, og tælleren registrerer $2,44 \cdot 10^3$ fotoner pr. sekund. Et stofs lineære absorptionskoefficient for γ -stråling er med god tilnærmelse proportional med stoffets densitet. Vands densitet er $1,00 \text{ g/cm}^3$.

- b) Bestem den anden væskes densitet.

3 Fugekontrol (fig. 11).

Kilden har gammaaktiviteten $3,7 \cdot 10^9 \text{ Bq}$. Kun en mindre del af gammakvanterne slipper ud af åbningen og kun en brøkdel heraf regi-

streres af detektoren.

Find ud fra fig. 11 tællehastigheden ved kalibreringen, inden kalibreringsblokkene indskydes mellem kilde og detektor.

Find den brøkdel af gammakvanterne, der registreres i denne situation.

0,03% af kildens gammakvanter rammer detektoren.

Hvilken brøkdel af disse registreres?

Densiteten af en mørtelfuge skal være mindst $1,8 \text{ g/ml}$ for at have den nødvendige bæreevne.

Find ud fra grafen den størst tilladte tællehastighed. Hvor meget svækkes strålingen i denne situation (i procent) ?

Find den middeldensitet, der halverer tællertallet.

Den laveste tællehastighed er 1150 pr. sek.

Find den største densitet, der forekommer.

4 Fugekontrol (fig. 11).

Der måles i 2 sekunder på en mørtelfuge. Tællertallet er 4000.

Find middeldensiteten.

Hvor stor er usikkerheden på tællertallet?

Find det usikkerhedsinterval, som middeldensiteten ligger i, og dermed usikkerheden på densiteten.

5 Fugekontrol.

I stedet for den kilde, der blev anvendt til fugekontrollen, anvendes en Risøkilde til skolebrug. Den har gammaaktiviteten 370000 Bq . Opstillingen i øvrigt er den samme, og man ønsker den samme nøjagtighed som i forrige opgave. Hvorlænge må man måle?

Hvad bliver usikkerheden på middeldensiteten, hvis man nøjes med 2 sekunder?

6 Masseabsorptionskoefficient.

I kapitel 2 afsnit 7 fandt vi, at masseabsorptionskoefficienten for en lang række stoffer ved energien $0,66 \text{ MeV}$ er den samme, ca. $8 \text{ mm}^2/\text{g}$.

Find derudfra den lineære absorptionskoefficient ved denne energi for vand og atmosfærisk luft. Sammenlign med DATABOGEN.

Denne metode kan bruges til en ret god bestemmelse af et stofs lineære absorptionskoefficient, blot man kender densiteten.

Find densiteten i DATABOGEN af følgende materialer og beregn den lineære absorptionskoefficient:

kalksten, sandsten, glaserede fliser, vinduesglas, linoleum og filt.

7 Beskyttelse mod gammastråling.

Et hus er bygget med 35 cm hulmur. Hulrummet er på 12,5 cm og fyldt op med granulat. Selve muren består af sandsten. Granulatets og sandstenens densitet findes i DATABOGEN.

Find de to materials lineære absorptionskoefficient. Se opgave 6.

Find de to materials halveringstykkelser.

Vi antager, at der efter et reaktoruheld i et nærliggende atomkraftværk er spredt store mængder $^{137}_{55}\text{Cs}$. Vi har lukket døre og vinduer og opholder os langt fra vinduerne.

Find hvor stor en brøkdel af gammastrålingen, der stoppes af muren.

8 Svækkelse af gammastråling.

Find gammaenergiene af $^{60}_{27}\text{Co}$.

Find de tilsvarende halveringstykkelser i bly.

Hvor meget svækkes de to komponenter af 10 mm bly?

Hvor stor del af den samlede stråling passerer?

Hvor meget svækkes de to komponenter af 100 mm bly?

Hvor stor en del af gammakvanterne passerer 100 mm bly?

Oftentimes betragter man gammakvanterne som ens med en energi lig middelenergien. Er det en god tilnærmelse?

Hvad er så halveringstykkelserne? Hvad er svækkelsen af strålen ved passage af 10 mm og 100 mm bly?

Kapitel 3

Målinger med sporstof

Case 2

Undersøgelse af Suorva-dæmningen.

Suorva-dæmningen ligger i Nordsverige og er 700 m lang. Der er opdæmmet ca. 6 km³ vand. Reservoirets største dybde er 50 m. En profil af dæmningen er vist i den efterfølgende avisartikel. Flere steder på dæmningen opstod der revner. Samtidigt opdagede man en mudderstrøm på ca. 3 m³ pr. minut ved dæmningsens fod i strømmens retning. Man havde mistanke om, at en lækage var opstået i et lille område i dæmningsens midte. Man frygtede, at det strømmende vand ville underminere en stor del af dæmningen, og at dæmningen så ville bryde sammen. Der blev gjort alt for at lokalisere det svage punkt, så det kunne blive fyldt op igen så hurtigt som muligt.

Der blev boret lodrette huller i dæmningsens kerne på opstrøms-siden med 2 meters mellemrum. Ideen var så at hælde en radioaktiv isotop, der indgik i en vandopløselig kemisk forbindelse, ned i hullerne et for et. Ved mudderstrømmens udløb anbragte man udstyr til måling af gammastråling. Hvis det hul, man netop havde hældt den radioaktive isotop ned i, havde forbindelse til det svage sted i dæmningsens kerne, kunne man forvente en forøget tællehastighed efter nogen tid. Man siger, at isotopen er blevet anvendt som **sporstof**. Man bruger dog også tit det engelske ord **tracer**. Metoden kaldes en sporstof-metode. Kun ved indsprøjtning (injektion) af isotopen i nogle få



Nordsvensk dæmning med lækage.

nabohuller fik man en tællebælsforøgelse. De registrerede tællehastigheder er for 4 af disse huller vist på figur 18 over ca. 5 timer. Da tællehastigheden er proportional med koncentrationen, har man skrevet koncentration på 2.-aksen. De snævre toppe på figuren svarer til huller ved lækagen. Her er gennemstrøm

ningen hurtigst overstået. Her registreredes også den indsprøjtede isotop næsten 100%. Lidt i udkanten af lækagen er gennemstrømningstiden større og toppen er bredere. Det tog en uge at finde det svage sted. Det viste sig at ligge ca. 10 m nede. Opfyldning stoppede gennemstrømningen.

Isotopcentralen på katastrofeudrykning

Fandt lækage i Suorvadæmningen ved Sveriges største vandreservoir

De sover med tøjlet på. Sådan skrev de svenske aviser i sidste måned om de familier, der bor langs Luleelven i Nordsverige. En same havde opdaget en læk i Suorvadæmningen, der holder Sveriges største vandreservoir i skak, og frygten for »det værste tænkelige uheld« begyndte at brede sig.

Vandreservoaret kan rumme 6-7 milliarder kubikmeter vand eller 6-7 kubikmeter. Det svarer til 2/3

af vandmængden i Sveriges største sø Vänern.

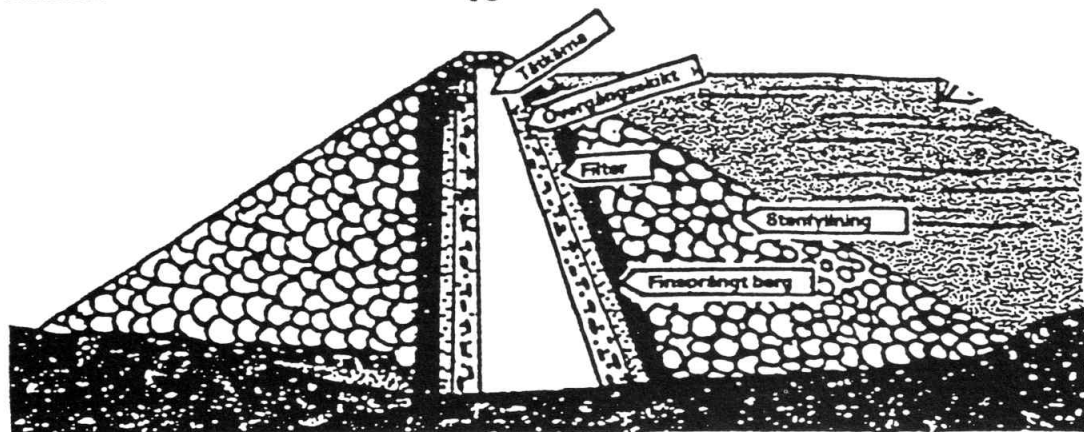
Eller hvis man forestiller sig vandet fordelt ligeligt over Danmarks 43.000 kvadratkilometer, vil vandet stå i 15 centimeters højde. Derfor så store vandmasser var det ikke uden grund beboerne blev ængstelige.

Besked om at flytte sig

Danske teknikere fra Isotopcentralen fik en uventet ekstraopgave. De havde i al

fredsommelighed været ved at efterspore en lækage i en lille dæmning ved Luleelvens nedre løb. Men den 6. oktober fik de pludseligt besked på at flytte deres måleinstrumenter og boregrej. For øverst oppe var man begyndt at lukke vand ud af Suorvareservoaret for at aflaste trykket på dæmningen.

Til gengæld fik de besked på omgående at deltage i arbejdet med at spore lækagen i den store dæmning, og til-



Suorvadæmningen er 720 meter bred og 50 meter høj. Vandet sivede lodret ned igennem den tætte kerne.

ladelse til at anvende radioaktive isotoper blev givet med det samme.

Vandstanden i reservoiret havde aldrig været så høj som i år. Dæmningen - egentlig et system af tre dæmninger - var opført i 1972. Lækagen var konstateret i den største dæmning, der er 720 meter lang og 50 meter i højden. Den har en tæt kerne af moræne, og uden på er der sand, grus og mere eller mindre grove materialer fra fjeldene. En lækage i en sådan konstruktion vil normalt udvikle sig langsommere end i en betondæmning.

Fyldt op for første gang

Hver eneste kubikmeter vand i reservoiret kan rundt regnet levere en kilowatt-time. De store nedbørsmængder samt muligheden for at købe billig strøm fra Norge - 1 à 2 øre pr. kilowatt-time - havde bevirket, at bassinet for første gang var fyldt op. Nu måtte man til gengæld lede vandet ud til ingen nytte - 1000 kubikmeter vand i sekundet eller 80 millioner kubikmeter i døgnet. Det fik vandstanden til at falde med beskedne 15 centimeter i døgnet. Et svensk borefirma gik i gang med at bore ned i dæmningen på reservoarsiden. Isotopcentralens teknikere injicerede dernæst radioaktive isotoper, og på den anden side af dæmningen giver målinger



Boreudstyret på toppen af dæmningen.

af radioaktivitet et billede af hvor lækagen befinder sig. Til målingerne bruger man en Indium-isotop - In-113m.

In-113m er meget velegnet til sporing over kortere afstande fortæller civilingeniør Erik Mørch fra Isotopcentralen. Den har en halveringstid på 100 minutter, og den kan fremstilles på stedet ved hjælp af en lille handy isotopgenerator. Som udgangsmateriale for fremstilling af indiumisotopen anvendes en radioaktiv tinisotop Sn-113 med en halveringstid på 119 døgn.

Problemet løst

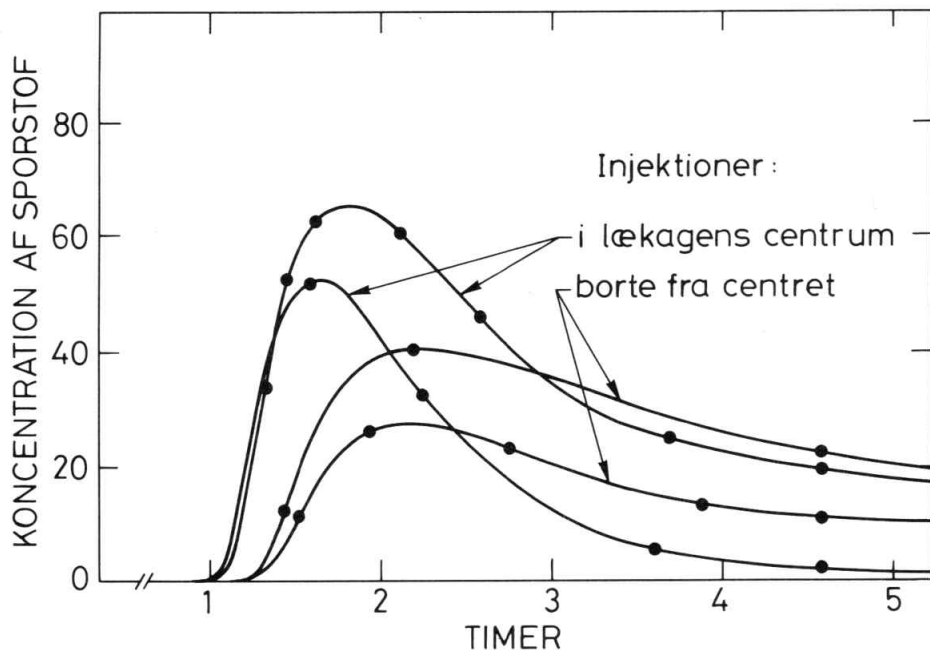
Det lykkedes ret hurtigt at indkredse lækagen. Til at begynde med blev der foretaget borer med 2 meters

mellemrum, dernæst med 1 meters mellemrum, og det afslørede en lækage i dæmningsens inderste tætte del. Den var ca. ½ meter i diameter, og det viste sig løjerligt nok, at den løb lodret ned igennem kernen. Søndag den 15. oktober kunne svenskerne så gå i gang med at injicere cement og andre materialer af forskellig kornstørrelse for at standse gennemsvivningen.

Problemet var løst. De danske teknikere kunne vende tilbage til undersøgelserne af den lille dæmning ved elvens nedre løb. Her er arbejdet til gengæld ikke afsluttet endnu. Det er nu engang lettere at finde de store lækager end de små.

m.

Artikel fra "Ingeniøren" nr. 47, 1983.



Figur 19. Fra Suorva-dæmningen. De registrerede koncentrationskurver ved udsivningsstedet. (fra Leak tracing on dams by use of radioisotopes, Isotopcentralen).

Lignende anvendelser

Ide

Ideen, som blev anvendt ved lækagesøgningen i Sverige, kan benyttes i en lang række andre tilfælde. Den kan formuleres sådan: stråling følger stof. Eller: stoffer bevæger sig, mens strålingen udsendes. En anden pointe er, at forskellige stoffer, der er opløst i en væske strømmer med samme hastighed som væsken. Ideen er også anvendelig, når det drejer sig om luftarter, hvor der tilsættes et luftformigt sporstof. Vi vil nævne nogle eksempler:

Lækager i skjulte rør

I mange etplanshuse fra 60'erne og 70'erne blev vandrør, f. eks. varmtvandsrør til radiatorerne, indstøbt i husets fundament. Det hindrer dem ikke i ligesom synlige rør at tære. En tæring fører på et tidspunkt til en læk, som må repareres. Lækken konstateres ved, at vandstanden i varmtvandssystemet falder hurtigt. For lav vandstand kan skade fyret. Derfor må skaden repareres. Vanskeligheden

består i at finde stedet. Det er sjældent, man ser fugt eller andre tegn oppe i huset.

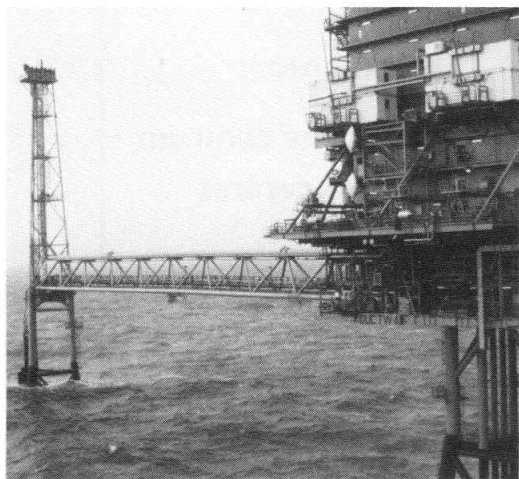
Man benytter sporstofmetoden. Sporstoffet opløses i vand, der pumpes igennem rørsystemet. Derefter tømmes rørene og derved bliver sporstoffet også fjernet. Men ikke det sporstof, der er sivet ud ved lækagen. Dermed er lækagestedet blevet radioaktivt. En lille handy gammadetektor føres hen over gulvene, og lækagen er sporet.

Fordel: Man behøver kun at bryde fundamentet op på et meget begrænset område.

Passagetidsmålinger

Strømningshastigheden i uigennemsigtige rør kan være svær at bestemme. Men den er interessant, hvis væsken er kostbar. Gassens eller oliens strømningshastighed i rør fra borefelter eller på et raffinaderi kan bestemmes ved hurtigt at tilsætte strømmen sporstof. Et stykke nede langs røret sidder i nogen afstand to gammadetektorer, der registrerer passagen af sporstoffet. Man får en smal koncentrationstop for begge detektorer. Tidsforskellen mellem de to toppe, t , og afstanden

s måles. Strømningshastigheden kan derefter findes af $v = s/t$.

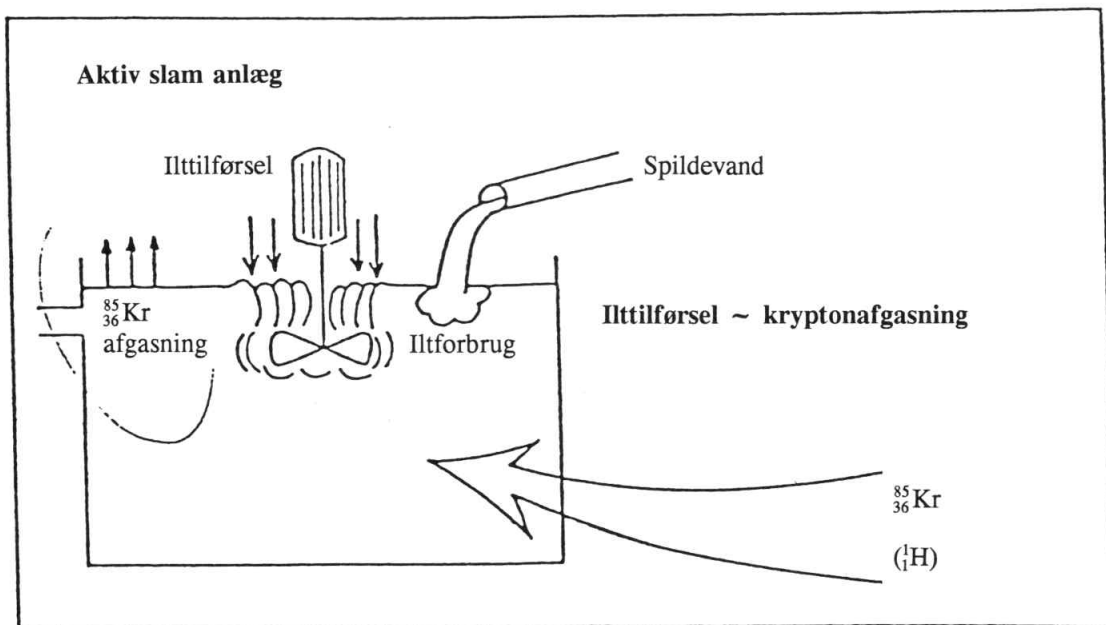


Flowmåling med passagetidsmetoden på offshore flare.

Aktiv slam anlæg

Et aktivslamanlæg er et biologisk rensningsanlæg, hvor bakterier lever af affaldet, som derved nedbrydes. Bakterierne skal have ilt. Jo mere ilt, jo større nedbrydning. Iltten tilføres med **beluftere**. Det kan enten være skovhjul i overfladen, der pisker iltlen ned i slammet. Eller luften kan pumpes gennem porøs keramik på bunden af bassinet. Herved dannes mange små luftbobler, der overfører ilt til slammet, mens de bobler op.

Man ønsker at måle de mange forskellige belufteres **beluftningskapacitet**, dvs. den mængde ilt, slammet optager i timen. Hvis man kender tempoet for afgangning af en hvilken som helst gas, kan man let beregne tempoet for tilførselen af ilt. Man tilfører hurtigt lidt $^{85}_{36}\text{Kr}$, som er radioaktiv. Med detektoren ved slamoverfladen kan aktivitetens udvikling og herved den tilbageværende kryptonmængde følges (den er eksponentielt aftagende). Beluftningskapaciteten kan bestemmes ved nogle lidt komplicerede beregninger.



Figur 20. Aktiv slam anlæg. Mens anlægget er i drift knuses en beholder med $^{85}_{36}\text{Kr}$ i bassinet. Koncentrationen af krypton følges med detektorer ved overfladen.
(fra Aktiv slam anlæg: Krypton-85-metoden, Isotopcentralen).

En kildes ændring med tiden.

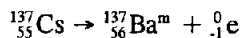
Problemstilling

Vi antager, at vi måler på strålingen fra en kilde, der består af en radioaktiv isotop, som henfalder til et stabilt nuklid. Ved hvert henfald reduceres antallet af de radioaktive kerner med en. Da der bliver færre og færre radioaktive kerner, må kildens aktivitet falde. For nogle radioaktive isotoper går det så langsomt, at kilden i praksis er konstant over lang tid (selvom strålingen fra kilden af statistiske grunde ikke er helt konstant, se afsnit 4 i kapitel 2). Det er en vigtig egenskab, hvis kilden skal bruges til kontrol af fuger eller emners tykkelse. Det var forudsætningen i case 1 og de tilsvarende anvendelser, vi omtalte tidligere. Ved undersøgelsen af Suorvadæmningen var man også interesseret i, at sporstoffet ikke henfaldt (alt sammen) på vej gennem dæmningen. På den anden side må man tage hensyn til miljøet. En 'konstant' kilde vil spredes i naturen og forårsage radioaktiv forurening til gene og fare for dyr og mennesker.

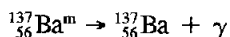
Til sporstofmålingen på Suorvadæmningen benytter man derfor en radioaktiv isotop, der stadig har en betragtelig aktivitet tilbage efter 2-5 timer, hvor den strømmer ud med muddret. På den anden side er den helt væk (henfaldet) efter et døgn. Nuklidet er $^{113}_{49}\text{In}^m$ og den dannes i en beholder (isotopgenerator), medbragt af folkene fra Isotopcentralen, ved henfald af $^{113}_{50}\text{Sn}$. Den udskilles kemisk fra beholderen, uden at $^{113}_{50}\text{Sn}$ følger med. *m* betyder, at nuklidet er dannet i en **metastabil** tilstand. Det henfalder videre under udsendelse af γ -stråling. Betegnelse metastabil bruges, fordi kerner, der henfalder ved udsendelse af γ -stråling, normalt gør det omgående ved dannelsen, hvorimod $^{113}_{50}\text{In}$ er forholdsvis "stabil".

Vi vil nu undersøge en kildes ændring med tiden. Nogle få skoler har en miniudgave af den omtalte isotop-generator, en såkaldt **minigenerator**. De fleste skoler har en anden minigenerator, som indeholder $^{137}_{55}\text{Cs}$. Den udsender betastråling og bliver til en metastabil

tilstand i $^{137}_{56}\text{Ba}$:

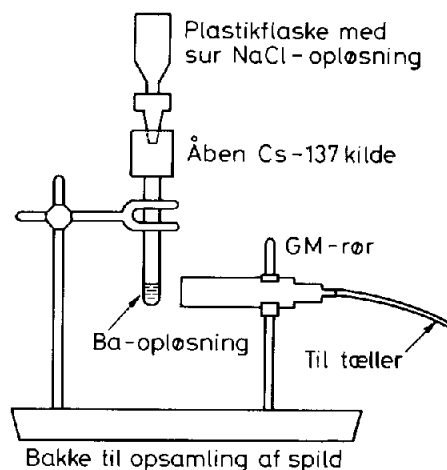


Den metastabile tilstand af barium henfalder under udsendelse af gammakvanter (γ) med energien 0,66 MeV:



(Ja, ja; det er på tide at indrømme, at det var disse gammakvanter, der blev brugt til fugekontrollen i case 1. Strengt taget var det forkert at skrive, at de kom fra henfaldet af cæsium, da de kommer fra den metastabile tilstand i barium. Men denne stammer altså selv fra cæsium.)

Barium kan udtrækkes kemisk fra kilden ved gennemskylning med ca. 5 ml fortyndet saltsyre (0,04 M), hvori der er opløst ca. 1 % NaCl.



Figur 21. Opstilling til brug i undersøgelse #4

Undersøgelse #4

Formålet med undersøgelsen er at følge henfaldet $^{137}_{56}\text{Ba}^m$. Man kan benytte såvel en scintillationsdetektor som et GM-rør. Et reagensglas anbringes i et stativ foran detektoren som vist på figuren. Først måles baggrundsstrålingen i 30 s, n_{bag} . Derpå anbringes minigeneratoren over reagensglasset og den sure NaCl-opløsning presses ved hjælp af en plastikflaske mod

topåbningen langsomt igennem. Der skal helst dryppe 2-3 dråber barium-opløsning ned i reagensglasset pr sekund. Når væsken er presset igennem, flyttes minigeneratoren så langt væk, at detektoren ikke rammes af stråling fra kilden.

Hvis man benytter GM-rør bør afstanden mellem røret og reagensglasset være så lille som mulig, så man opnår nogenlunde store tælleletal. Denne afstand må ikke ændres i løbet af målingen.

Nu startes tælleren, og der tælles i perioder på 30 sekunder. Hvis det ikke er muligt at udlæse hvert 30. s, men f. eks. hvert 10. s, må tælle-tallene adderes op 3 af gangen. I tabellen angiver t tidspunktet for begyndelsen af en tælleperiode. n er tælle-tallet i en periode og n_{kor} det for baggrunden korrigerede tælleletal: $n_{kor} = n - n_{bag}$. Usikkerheden findes som sædvanligt.

Tabel til resultater:

$$n_{bag} = \quad \Delta n_{bag} =$$

t	n	n_{kor}	Δn_{kor}
sekund			
0			
30			
60			
90			
120			
150			
180			
210			
240			
270			
300			

De fundne korrigerede tælleletal afbildes på enkeltlogaritmisk papir som funktion af tællingens starttidspunkt. Alle punkter afsættes med usikkerhedsstreger over og under punkterne som vist tidligere. Gennem disse usikkerhedsstreger tegnes den bedste rette linie. Ligger ca. 68% af stregerne på linien? Hvilken funktion drejer det sig om?

Matematisk beskrivelse af henfaldet

Resultatet af undersøgelse #4 var, at de korrigerede tælleletal, n_{kor} , lå på en aftagende ret linie, når de blev afsat på enkeltlogaritmisk papir som funktion af tiden.

Derfor er n_{kor} en eksponentielt aftagende funktion af tiden.

Da en bestemt brøkdel af kernerne henfalder pr. tidsenhed, er der proportionalitet mellem n_{kor} og N, antallet af kerner i kilden.

("Dobbelt så mange kerner giver dobbelt så mange henfald, der igen giver et dobbelt så stort korrigeret tælleletal"). Vi ser bort fra den statistiske usikkerhed, der knytter sig til udsendelse og registrering af stråling. Derfor er N også en eksponentielt aftagende funktion af tiden, t.

Kasse 4 kan nu komme i anvendelse igen. Funktionen f kaldes nu N. Den uafhængige variabel x bliver til tiden t. Så halveringskonstanten bliver til halveringstiden, $T_{1/2}$.

k, som var det relative fald i f pr. enhed, bliver til det relative fald i N pr. tidsenhed. Eller den brøkdel, der henfalder pr tidsenhed. Eller hvis man ønsker at formulere det statistisk: k er sandsynligheden for, at en kerne henfalder pr tidsenhed.

Tidsenheden er normalt 1 sekund. Så bliver enheden for k s^{-1} .

Da aktiviteten A er defineret som antallet af henfald pr sekund, får vi også:

$$k = A/N \Leftrightarrow A = k \cdot N \quad [9]$$

Ligeledes fås ved simpel indsættelse i formel [5] og [6]:

$$N(t) = N(0) \cdot (1/2)^{t/T_{1/2}} \quad [10]$$

$$k = \ln(2)/T_{1/2} \quad [11]$$

Eksempel.

For $^{137}_{55}\text{Cs}$ er $T_{1/2} = 30 \text{ år} = 9,467 \cdot 10^8 \text{ s}$. Benyttes [9] fås $k = 7,3 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. Altså ca. en milliardedel pr. sekund. Hvert sekund henfalder ca. en milliardedel af de resterende kerner.

Ved udslippet af radioaktivitet fra Tjernobyl faldt ca. 1 kg $^{137}_{55}\text{Cs}$ ned over Sverige. Lad os udregne den samlede aktivitet, det afstedkom. Groft sagt er molarmassen 137 g/mol. 1 kg indeholder derfor $1000/137 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 4,38 \cdot 10^{24}$ kerner.

Aktiviteten findes af [9]:

$$A = k \cdot N = 7,3 \cdot 10^{-10} \cdot 4,38 \cdot 10^{24} \\ = 3,2 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

Eksempel

Da minigeneratorens aktivitet er ca. 333 kBq, må den indeholde ca. $10^{-7} \text{ g } ^{137}_{55}\text{Cs}$.

Aktivitetsens tidsvariation

Af [9] og [10] fås:

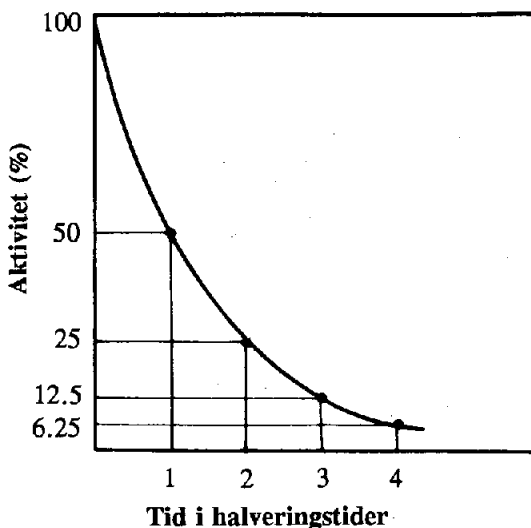
$$A(t) = k \cdot N(0) \cdot (0,5)^{t/T_{1/2}} \\ \Downarrow \\ A(t) = A(0) \cdot (0,5)^{t/T_{1/2}} \quad [12]$$

Også aktiviteten er altså en eksponentielt aftagende funktion af tiden. Bemærk, at halveringstiden både kan defineres som den tid, der går med en halvering af antallet af kerner, og den tid, der går, inden aktiviteten er halveret.

En model for henfaldet

k er en konstant. Alle kerner af den samme radioaktive isotop har til enhver tid den samme sandsynlighed for at henfalde, uanset hvor længe de har eksisteret. De er så at sige uden alder. Kernerne henfalder uafhængigt af hinanden, dvs. et henfald påvirker ikke de resterende

de kerner. Kemiske og biologiske processer heller ikke. Man kan altså ikke fremskynde henfaldet.



Figur 22. Strålingen fra en radioaktiv kilde aftager som vist på figuren. Tiden er afsat som halveringstider langs 1. akse. Strålingen aftager på samme måde for alle radioaktive kilder.

Resume:

Vi har set, at ved valget af isotop til forskellige anvendelser skal man ikke kun tage hensyn til halveringstykkelser af gammastrålingen, men også til halveringstiden. Forskellige anvendelser kræver forskellige egenskaber ved isotopen. I DATABOGEN findes en tabel over de mest almindelige isotoper, deres halveringstider og gammaenergier. Bogen indeholder desuden grafer for enkelte stoffer over halveringstykkelserns afhængighed af gamma-energien.

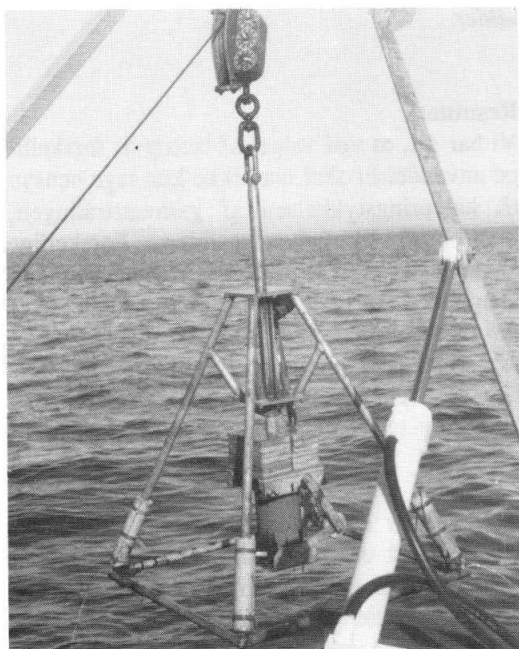
Isotoper har mange anvendelser i industrien. Der er også en del situationer, hvor de med fordel bruges til undersøgelser og kontrol af miljøet, specielt i vandløb, søer og havområder. Case 3 er en sådan anvendelse.

Case 3

Datering af tungmetallaflejringer i Østersøen.

Problemstilling

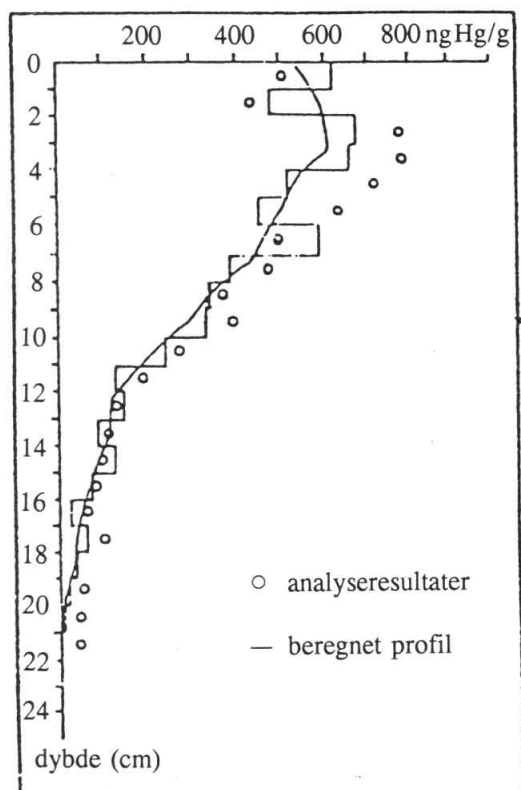
Tungmetaller som bly, zink, kviksølv og cadmium er usunde for såvel dyr og mennesker. Men bly sendes ud i udstødningen fra biler, og mange fabrikker udleder spildevand med tungmetallforurening. Bilernes forurening begrænses ved overgang til blyfrit benzin, og der lovgives om udledning af spildevand. Men lovgivningen er ikke så meget værd, hvis der ikke anvises metoder til kontrol af det udledte spildevand. En del af forureningen ender i planter og fisk, og man kan få en del viden om forureningen ved at analysere dem. Men de bevæger sig trods alt meget omkring. Det er sikrere at måle på den betragtelige del, der udskilles i havbunden omkring virksomheden ved **sedimentation**. Sedimentprøven kan analyseres kemisk for indholdet af tungmetaller, eller ved hjælp af lavenergetiske gamma-kvanter med en metode, der benytter røntgenfluorescens.



Optagning af sedimentprøver fra havbunden til datering.

Men for at analysen kan bruges til noget, skal man kende tidspunktet for udskillelsen af de forskellige lag. En sådan tidsbestemmelse kaldes en **datering**.

Vi skal se nærmere på en metode, der benytter isotopen $^{210}_{82}\text{Pb}$. Men vi vil ikke se på målinger på forureningen fra en konkret virksomhed, men i stedet benytte metoden på den generelle forurening af havbunden, som man kan konstatere midt ude i Østersøen fra de omkringliggende lande. F. eks. forureningen med kviksølv, som er vist på figur 22 i forskellige dybder. Det ses, at 20 cm nede er der ingen forurening. Derefter vokser koncentrationen af kviksølv stadig voldsommere for at toppe i ca. 3 cm's dybde. Herefter er den svagt faldende. Det gælder nu om at aldersbestemme de forskellige lag.

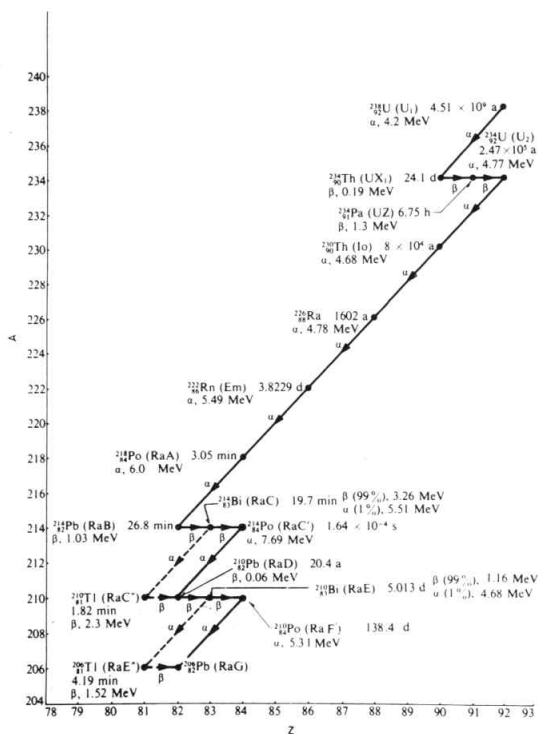


Figur 23. Kviksølvprofil i sedimenter i Østersøen.
(fra Økologi, Isotopcentralen).

Uranfamilien

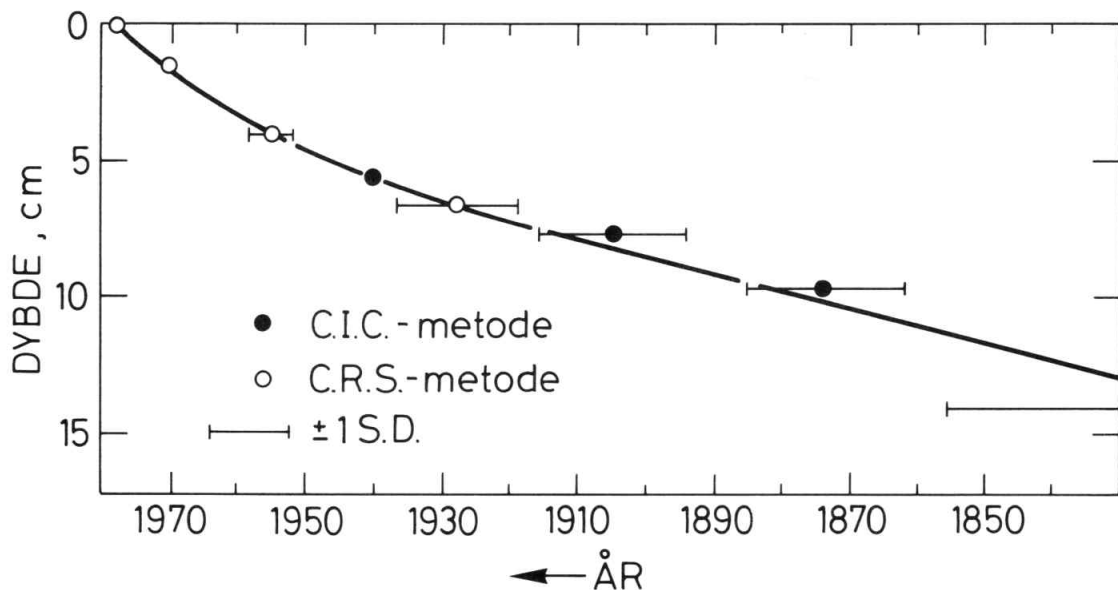
$^{238}_{92}\text{U}$ findes overalt på jorden, såvel i klippe som i jordbund, dog i varierende koncentration. Halveringstiden er 4,5 milliarder år, dvs. ca. som jordens alder. Så næsten halvdelen er tilbage fra jordens skabelse. $^{238}_{92}\text{U}$ henfalder til en anden isotop, der igen henfalder til en ny isotop. Først efter 14 henfald nås en stabil isotop, $^{206}_{82}\text{Pb}$. De 13 radioaktive isotoper, der følger efter uran-isotopen, har alle så korte halveringstider, at de ikke kan stamme tilbage fra jordens skabelse. De skyldes $^{238}_{92}\text{U}$ deres tilstedeværelse på jorden idag. Derfor kaldes de **urandøtre** (jorden er hunkøn) og samlet **uranfamilien**. De er vist med angivelse af henfaldstype på figur 24. Hver isotop er fastlagt ved Z (som er afsat ud ad x-aksen) og A (som er afsat ud ad y-aksen). Så ved α -henfald går pilen 4 ned og 2 til venstre. Ved β -henfald et skridt til højre.

Uran-familien $A = 4 \cdot N + 2$
(i parentes gamle symboler)

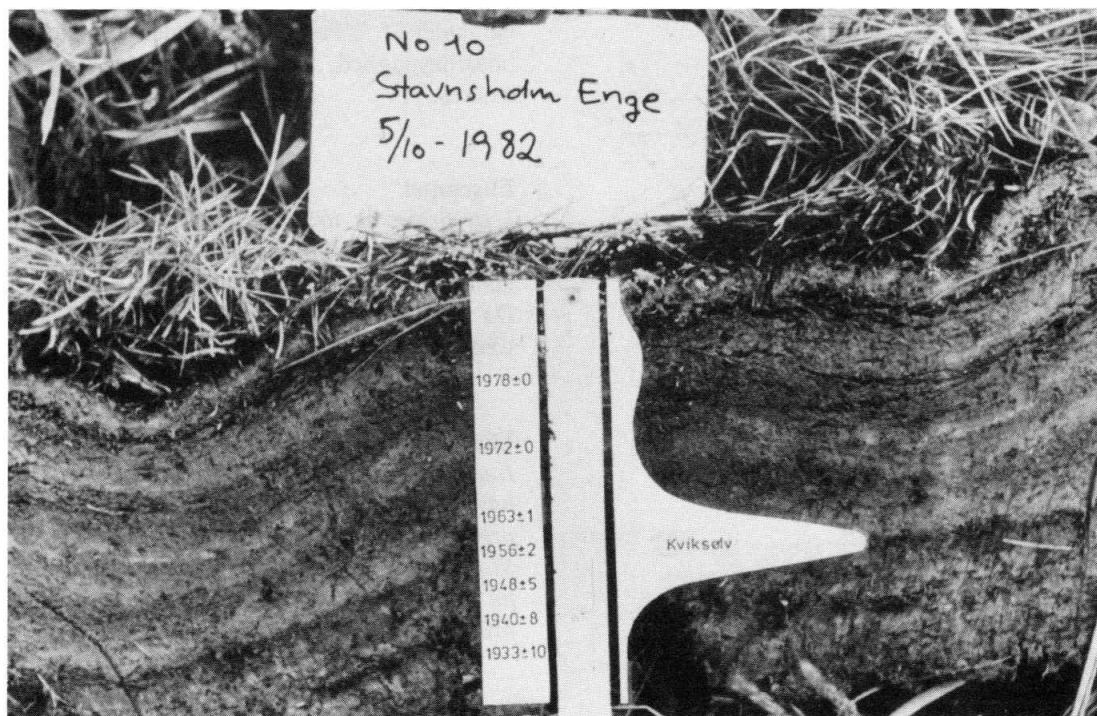


Dateringen er vist på fig. 25. F.eks. ses, at aflejringerne i 1890 ligger i en dybde af ca. 9 cm.

Går vi tilbage til fig. 23 ses, at forureningen allerede var betragtelig for 100 år siden.



Figur 25. Datering ved $^{210}_{82}\text{Pb}$ -metoden af sedimenter et sted midt i Østersøen.



Strandeng i Nissum Bredning. Datering af kviksølv ved Cheminova ved brug af $^{210}_{82}\text{Pb}$ -metoden.

Opgaver

1 Suorva.

Find i avisartiklen halveringstiden for $^{113}_{49}\text{In}$.
Hvor stor en brøkdel er tilbage efter 2, 5 og 24 timer?

Hvor stor er aktiviteten til disse tidspunkter, hvis begyndelsesaktiviteten er 10^9 Bq ?

Hvor mange kerner og hvor mange gram skal der være fra start?

2 Fugekontrol.

Udregn antallet af kerner i kilden.

Hvad er massen af cæsium-kernerne?

3 Tjernobyl.

I gennemsnit gav Tjernobylnedfaldet en specifik aktivitet i Danmark på 1000 Bq/m^2 fra $^{137}_{55}\text{Cs}$.

Find den samlede aktivitet i Danmark.

Hvor mange kerner faldt ned over Danmark?

Hvor mange gram?

Cæsium bindes stærkt i jordens overflade.

Hvor meget er der tilbage idag?

4 Datering.

Find de nuklider, der følger efter $^{210}_{82}\text{Pb}$ i uran-familien.

Hvilke halveringstider har de?

Begrund, hvorfor aktiviteten af den første og anden datter i et sedimentlag, der har ligget 10 år på Østersøens bund, er den samme som for $^{210}_{82}\text{Pb}$.

Brug eventuelt DYMOS til at følge udviklingen i 10 år efter $^{210}_{82}\text{Pb}$'s bundfældelse.

(Den anden datter er let at udskille kemisk fra en stikprøve i sediment-optaget. Den udskilles på en lille plade. Den er α -aktiv. Så aktiviteten er let at måle!)

5 Datering.

Find årstallet (tilnærmet) fra fig. 25 for sedimentationen af det lag, der ligger i 12 cm's dybde.

Hvor stor en brøkdel af $^{210}_{82}\text{Pb}$ er henfaldet?

Et andet sted i Østersøen er aktivitetsfaldet i 12 cm's dybde på 99%. Hvad er alderen her?

6 Suorva.

I avisartiklen angives hvor hurtigt vandstanden falder, når vandet lukkes ud. Find heraf reservoirets overfladeareal.

Beregn en middelværdi af reservoirets vandstand.

Hvor højt er ifølge artiklen vandet opdæmmet? Find den potentielle energi af 1 m^3 vand i denne højde.

Sammenlign med artiklens påstand om, at 1 m^3 vand rundt regnet kan levere en kilowatttime elektrisk energi. Kan det passe?

Hvor mange penge gik tabt pr. døgn ved at lukke vandet ud? (anslå selv størrelsen af nyttevirkningen og prisen pr. kWh).

7. Sporing af utæthed i rør.

Br-82 (brom) er et beta-radioaktivt nuklid, der anvendes til sporing af utætheder i rørsystemer. Halveringstiden er 36,3 timer.

Et præparat indeholder Br-82. Beta-henfaldet sker med aktiviteten 370 MBq.

a) Hvor stor er aktiviteten af beta-henfaldene 49 timer senere?

Et rørsystem undersøges ved tilsætning af en vis mængde Br-82. Aktiviteten af beta-henfaldene i den tilsatte mængde Br-82 er 210 MBq, og rørsystemet indeholder i alt 250 liter vand. Et sted på et gulv registrerer en tæller radioaktivitet. Dette tyder på, at der her er strømmet vand med Br-82 ud gennem en utæthed.

Efter hvert beta-henfald udsendes der straks tre fotoner. Tælleren registrerer 0,050% af de udsendte fotoner. Ved en måling tre timer efter tilsætningen af Br-82 registrerer tælleren 410 fotoner pr. sekund.

b) Hvor mange Br-82 kerner indeholder vandet ved utætheden?

c) Hvor stort er rumfanget af den mængde vand, der strømmede ud gennem utætheden i de tre timer?



Billede til opgave 7.

Boligopvarmning sker ofte ved at varmt vand cirkulerer i et lukket rørsystem og undervejs passerer gennem radiatorer og enten en kedel eller en varmeveksler. Det kan være vanskeligt og dyrt at finde en utæthed i rørsystemet, fordi rørene tit er støbt ned i gulvet. Ved anvendelse af et radioaktivt sporstof er det imidlertid muligt at finde det sted, hvor et rør er utæt, uden at bryde gulvet op. Sporingen foregår på den måde, at man tilsætter det cirkulerende vand en vis mængde radioaktivt stof, f.eks. nuklidet Br-82. Efter et stykke tid skyller man systemet rent for det radioaktive stof, og fylder det med rent vand igen. Derefter findes det radioaktive stof kun på det sted, hvor det er sivet ud af det utætte rør. Utætheden kan så spores ved simpelthen at undersøge gulve og vægge for radioaktiv stråling.

Kapitel 4

Stråling og sikkerhed

Vort strålingsmiljø.

Naturlig radioaktivitet

Som det fremgik af forrige kapitel findes der radioaktivitet overalt omkring os. I klipper og derfor også i jord og byggematerialer. I luften og derfor også (i meget små mængder) i vandet. I den føde, vi indtager, og derfor også i os selv. Størstedelen af strålingen klassificeres som **naturlig radioaktivitet**, fordi de radioaktive isotoper stammer fra stjerneprocesser i verdensrummet i en fjern fortid og blev brugt som byggesten ved jordens skabelse for 4,5 milliarder år siden, eller er døtre af sådanne isotoper. Næsten al naturlig radioaktivitet på jorden kan henføres til enten $^{238}_{92}\text{U}$ - eller $^{232}_{90}\text{Th}$ -familierne, som begge har et stort antal familimedlemmer. Helt for sig selv står desuden $^{40}_{19}\text{K}$ med en halveringstid på 1,3 milliarder år. $^{40}_{19}\text{K}$ henfalder til den stabile ædelgas argon. Henfaldet forklarer den store (1%) tilstedeværelse af argon i den atmosfæriske luft. $^{40}_{19}\text{K}$ udgør 0,012% af alt kalium på jorden. Mennesker skal have en vis mængde kalium i musklerne, hvorfor kroppen uundgåeligt vil være lidt radioaktiv. Vi er alle radioaktive kilder med en aktivitet på ca. 5000 Bq. Drengene er lidt mere (20%) radioaktive end piger og unge mænd lidt mere end ældre. Den naturlige radioaktivitet er sandsynligvis årsag til de genetiske forandringer, der er en forudsætning for den biologiske evolution fra den encellede organisme til mennesket. Men den er samtidigt både i dyr og mennesker årsag til strålingsskader, der fører til cancer. Den indeholder i sig både livet og døden.

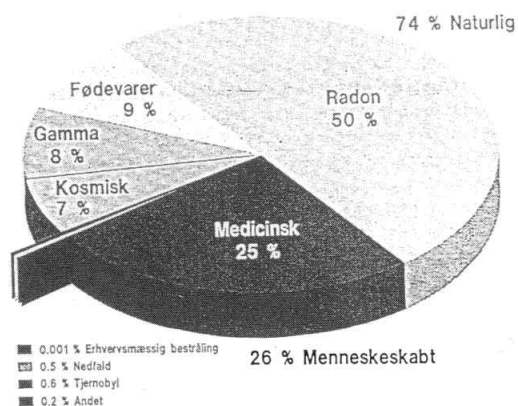
Menneskeskabt stråling

Der findes også radioaktivitet, der er menneskeskabt. I Danmark tænker man især på Tjernobyl og resterne af 60'ernes nedfald fra de

store brintbombeforsøg. Enkelte grupper er udsat for små mængder i deres arbejde. Af størst betydning er dog den medicinske bestråling. Her medtager man al **ioniserende stråling**, og ud over kernestrålingen er der her især tale om røntgenstråling. Begge typer benyttes både til undersøgelser og behandling. Det er en vanskelig opgave at udregne, hvor store konsekvenser strålingsmiljøet har for vores helbred. På fig. 26 er i lagkageform vist den relative betydning af de forskellige strålingskilder i vores miljø, som vi mener at kunne vurdere dem i dag. Fremtidige undersøgelser kan sagtens betyde ændringer.

Lagkagen

På lagkagen kan man se, at 74% af **gennemsnitsdanskerens strålebelastning** skyldes naturlig radioaktivitet.



Figur 26. Den relative betydning af de forskellige komponenter i vort strålingsmiljø. (fra Stråling i danske boliger, Sundhedsstyrelsen 1987).

Radon. Det falder i øjnene, at 50% af belastningen stammer fra radon. Radon er, som vi så i forrige afsnit, tilstede i luften overalt. Men i indendørsluft er koncentrationen særlig stor, ca. 10 gange større end udendørsluften, hvis vi ser på danske forhold. Størst i tætsolerede huse med lille ventilation og i gamle huse med revnede kældergulve. Radon kan ligefrem suges ind ved den såkaldte **skorstens-effekt**, hvor vinteropvarmningen skaber undertryk i husene. I middel er den specifikke aktivitet 50 Bq/m^3 i danske boliger.

Radon selv er i virkeligheden ikke skadelig. Den udsender ganske vist alfastråling, som er meget farlig, hvis kilden er i kroppen. Men radon er en ædelgas. Dens koncentration i lungerne er derfor kun den samme som i den omgivende luft. Radon udåndes igen. En lunge på 1 liter udsættes for $0,050 \text{ Bq}$.

Radondøtrene er derimod kemisk aktive. De svæver rundt i luften nogen tid efter dannelsen. Ved indånding sætter de sig øverst i lungerne, hvor de derfor opkoncentreres. To af radondøtrene, $^{218}_{84}\text{Po}$ og $^{214}_{84}\text{Po}$ udsender alfastråling. På grund af den store koncentration repræsenterer det en reel risiko for lungecancer, nemlig 50% af al strålingsfremkaldt cancer.

Fødevarer. Der er her især tale om strålingen fra $^{40}_{19}\text{K}$.

Gamma. Gammastråling fra jord og bygninger. På grund af gammakvanternes store halveringstykkelser vil man i stuen også være udsat for gammastråling fra kælderen.

Kosmisk stråling. Strålingen fra verdensrummet, men især fra solen, rammer atmosfæren, hvorved der dannes en kaskade af stråling. Atmosfæren virker beskyttende. Den kosmiske stråling i en flyvemaskine er flere gange større end ved jorden. Baggrundsstrålingen, som vi blandt andet omtalte i forbindelse med fugekontrollen, stammer dels fra gammastrålingen, dels fra den kosmiske stråling.

Medicinsk stråling. Det er nok overraskende for mange, at denne stråling er ansvarlig for 25% af vores strålingsbelastning, mens den øvrige menneskeskabte belastning i Danmark kun er på ca. 1%.

Strålingens betydning for helbredet

Dosis

Det er ved absorptionen i kroppen, at strålingen gør skade. Derfor er den absorberede energi interessant, når man skal tage stilling til strålingsbelastningen. Den absorberede energi i kroppen pr. masseenhed kaldes **den absorberede dosis, D**. Den anvendte masseenhed er kg, og den anvendte energienhed er joule. Enheden for dosis er gray, forkortet Gy. Altså:

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

Normalt arbejder man med **kropsdosis**, men undertiden, hvor kun et organ i kroppen er involveret, taler man om **organdosis**.

Dosisækvivalent

Den skade, strålingen forårsager, afhænger af strålingstypen. Alfastrålingen opbremses på meget korte strækninger og afsætter energien meget koncentreret. Det betyder, at alfastrålingen er ca. 20 gange farligere end beta- og gammastrålingen for samme dosis. Man indfører en såkaldt **kvalitetsfaktor, Q**, der er 20 for α - og 1 for β - og γ -stråling. Man indfører også:

$$H = Q \cdot D$$

H er **den ækvivalente dosis**, der er meget anvendt til angivelse af sygdomsrisikoen ved bestråling. H udregnes som regel på årsbasis og er så den ækvivalente årsdosis. Enheden kaldes sievert, der forkortes Sv.

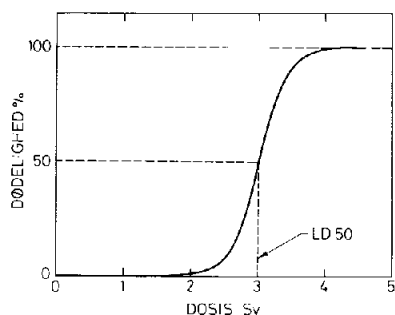
I middel er den ækvivalente årsdosis i Danmark 4 mSv ifølge Sundhedsstyrelsens rapport om radon i danske boliger fra 1987.

Danmarks befolkning er på ca. 5 millioner. Tilsammen er danskernes ækvivalente årsdosis derfor 20000 Sv . For at understrege, at vi taler om en kollektiv dosis benyttes enheden **mandesievert, manSv**. Den kollektive dosis er så 20000 manSv .

Akutte skader

Akut strålesyge opstår ved en kortvarig og stor ækvivalentdosis på 1 Sv over hele kroppen. Det er især de bloddannende organer og tarmenes slimhinder, der skades. Efter få timer bliver den ramte dårlig med kvalme og opkastninger. Dagen efter føler han sig igen rask, men bliver syg igen efter 2-3 uger. Antallet af blodlegemer er faldet stærkt, og kroppens modstandskraft mod infektioner er nedsat.

Ved 1 Sv bliver personen rask igen efter nogen tid. Ved 3 Sv dør halvdelen efter yderligere et par uger. Man siger, at **LD50** = 3 Sv. Her betyder LD50 dødelig (lethal) dosis for 50%. Ved 5 Sv dør næsten alle. Skaderne bliver mindre, hvis dosis fås over længere tid.



Figur 27. Dødelighed som funktion af den absorberede kropsdosis.

Generelt kan organer klare en større dosis end hele kroppen (pr kg!). Men i nogle tilfælde er det især enkeltorganer, der rammes. Som eksempel kan nævnes skjoldbruskkirtlen, som kan optage radioaktivt iod ved udslip fra kernekraftværker. Ved doser over 10 Sv skades organet. Ved at spise tabletter med iod, kan man begrænse indtaget af den radioaktive isotop.

Celler, der deler sig meget, er særligt følsomme over for stråling. Det gælder først og fremmest fostre. Mere end 0,1 Sv betyder alvorlig risiko for udviklingsskader.

Sene skader

Alle strålingstyper bryder kemiske bånd og løsriver elektroner. Derved dannes bl. a. de meget farlige **radikaler**. Kroppen består især af vand. De hyppigst dannede radikaler ved

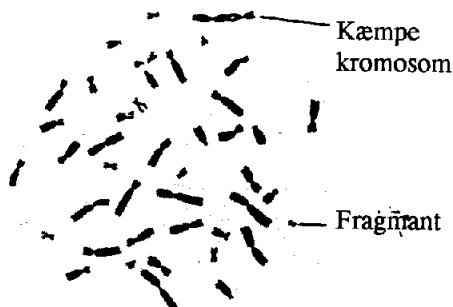
bestråling er $H\cdot$ og $OH\cdot$. De reagerer hidsigt med alt, de er i nærheden af. Hvis det går ud over et DNA-molekyle, kan det blive alvorligt. Informationen om cellens funktioner findes i kopi (undtagen i kønsceller), idet hver side af molekylet har de samme informationer. Hvis det ødelægges i den ene side vil det normalt være mulig for enzymerne i cellen at udbedre skaden. Hvis skaden sker i begge sider på samme tid, er det ikke muligt at reparere skaden. Skaden kan være uden betydning i 20 år, men ligger **latent** i cellen. På et tidspunkt kan den betyde, at cellen mister kontrollen over celledelingen. Hvis den tager fat, vokser der en cancer-svulst frem, som kan sprede sig til hele kroppen med døden til følge.

Hvis skaden rammer en kønscelle, fås en **arvelig eller genetisk** skade, idet skaden først konstateres i afkommet.

Ved høje doser er der proportionalitet mellem ækvivalentdosis og risikoen for cancer. Man antager, at det også er tilfældet ved lave doser. Man regner med, at hvis en befolkning får en dosis på 50 manSv, vil det med tiden føre til et cancer-dødsfald. I Danmark er der altså $20000/50 = 400$ årlige dødsfald af strålingsfremkaldt cancer. Det er ikke meget, når man tænker på, at 30% af befolkningen dør af cancer fremkaldt på anden måde!

Eksempel.

Antag, at en person udsættes for en ækvivalentdosis på 4 Sv. Sandsynligvis dør han. Men hvis han ikke dør akut, er hans risiko "kun" $4/50 = 8\%$ for at dø af cancer.



Figur 28. Kromosomer, der har været udsat for radioaktiv stråling. (fra Vort strålingsmiljø, Risø 1987).

Sikkerhedsforanstaltninger

Regler for arbejde med radioaktive stoffer

I 1950 blev der etableret en international kommission, ICRP, der arbejder med alle spørgsmål i forbindelse med beskyttelse mod stråling. Den udsender jævnligt publikationer og anbefalinger, der danner grundlag for de enkelte landes lovgivning på området.

De overordnede anbefalinger kan sammenfattes i følgende:

- 1 Enhver anvendelse af radioaktivitet skal være velbegrunderet.
- 2 Persondoser skal holdes så lave som rimeligt opnåeligt under hensyntagen til økonomiske og andre samfundsmæssige forhold.
- 3 Dosis til enkeltpersoner må ikke overstige de af ICRP anbefalede doser, som for befolkningen som helhed er 5 mSv pr år.
Dog 50 mSv for erhvervsmæssigt strålingsudsatte personer.

De danske regler er baseret på en lov fra 1953 og en bekendtgørelse fra 1975. Sundhedsstyrelsen tager sig af den direkte udformning af reglerne. Statens Institut for strålehygiejne, SIS, har som opgave den løbende administration af love og bekendtgørelser samt varetægtelse af det primære tilsyn med overholdelse af reglerne.

Enkelte regler omtales i næste afsnit.

Strålingsbeskyttelse

Man skelner mellem to bestrålingssituationer:

- 1 **Ydre stråling**, hvor strålekilden befinder sig uden for kroppen.
- 2 **Indre stråling**, hvor strålekilden optages i kroppen.

Ydre stråling

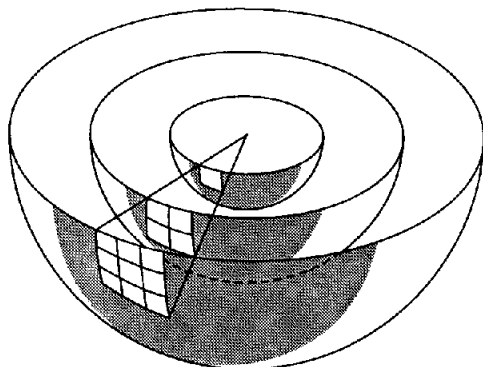
Nøgleordene for beskyttelse mod ydre stråling er **afstand, tid og afskærmning**. De 3 ords første bogstaver giver navn til **ATA-reglen**.

1 Afstand.

En kilde består af en meget lille stofmængde af en radioaktiv isotop. Udstrækningen er derfor meget lille, og kilden er ikke meget større end et punkt. Man siger, at den er

punktformet. Strålingen udsendes jævnt i alle retninger. Forestiller man sig to kugler med centrum i kilden og med radius r og $2r$, vil den største kugles overfladeareal være 4 gange større end den mindste kugles, da overfladearealet af en kugle med radius r er:

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$



Figur 29. Strålingen aftager omvendt proportionalt med kvadratet på afstanden.

Tællehastigheden i afstanden $2r$ må så være 4 gange mindre end i afstanden r . I afstanden $10r$ er den 100 gange mindre.

Strålingen aftager omvendt proportionalt med kvadratet på afstanden.

Omvendt vokser den meget ved berøring.

Eksempel:

En kilde med $^{137}_{55}\text{Cs}$ til fugekontrol har en aktivitet på 10^9 Bq. Hvis kilden anbringes i baglommen (eller i hånden tæt på kroppen), vil ca. halvdelen af gammakvanterne ramme kroppen. Af disse vil næsten alle stoppes i kroppen og kun få forlade den igen. Det skyldes, at halveringstykkelsen i kroppen er meget mindre end kroppens tykkelse, bredde eller højde. Den er ca. den samme som i vand (hvorfor det?). Vands halveringstykkelse kan findes i DATABOGEN. Ved energien 0,66 MeV aflæses $x_{1/2} = 85$ mm. Hvis strålingens vej gennem kroppen er på 17 cm, vil 3/4 af strålingen blive absorberet (hvorfor?). Brøkdelen vil være større for den del, der bevæger sig længere - enten skråt op eller ned. Alt i alt vil tæt på al den stråling, der træffer kroppen,

dvs. halvdelen, absorberes. Vi kan nu let udregne den absorberede kropsdosis i en krop på 60 kg på f.eks. en time:

$$D = 0,5 \cdot 10^9 \cdot 3600 \cdot 0,66 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/60kg} = 100 \text{ mGy.}$$

Den ækvivalente dosis bliver så, da $Q = 1$ for gammastråling:

$H = 100 \text{ mSv}$. Det er det dobbelte af den tilladte årsdosis for folk, der arbejder med radioaktivitet.

Den væsentligste lære at udlede fra afstandsloven er derfor:

Berør aldrig radioaktive kilder direkte.

Kilden til fugekontrol er afskærmet, når den ikke bruges, sådan at nærkontakt kun er mulig, hvis kilden skilles ad. Ved brug skal man holde afstand.

2 Tid. Den modtagne dosis er proportional med opholdstiden i strålingen.

3 Afskærmning. α - og β -stråling afskærmes let med tynde metalplader. γ -strålings halveringstykkelser afhænger stærkt af energien. En messingplade på 5 mm dæmper γ -strålingen fra ^{241}Am på 0,060 MeV med en faktor 1000, mens strålingen fra ^{137}Cs kun dæmpes ca. 20%.

Indre stråling.

Nøgleordet for beskyttelse mod indre stråling er **forebyggelse**. Man skal undgå at indånde radioaktive luftarter, og man skal holde sig fra radioaktive fødevarer. Er det radioaktive materiale først inde i kroppen, er der ikke længere hjælp at hente i afstand, forkortelse af tid eller afskærmning. Man udsættes for strålingen, indtil der sker en biologisk udskillelse eller indtil alle kernerne er henfaldet.

Den biologiske udskillelse foregår sådan, at den tilbageværende mængde i kroppen aftager eksponentielt! (Kan du forklare det? Lav en model som modellerne for absorption eller radioaktivt henfald.) Derfor kan man tale om **biologisk halveringstid**. Den er knap 60 døgn for cæsium.

Hvis det er muligt, benyttes kun **lukkede** kilder, dvs. at det radioaktive stof er indkapslet. Det er naturligvis ikke muligt, når isotoper skal anvendes som sporstoffer. Men alle andre kilder, vi har omtalt, er lukkede. De kilder, der udsender **blød** (dvs. ikke gennemtrængende) stråling, kan ikke indkapsles helt sikkert, da det indkapslende stof skal være tyndt. Man skal derfor lade være med at spise noget som helst eller ryge i et lokale, hvor der er radioaktive stoffer. Man ved aldrig, om man ved et uheld har fået lidt på fingrene eller cigaretten.

Eksempel.

I Norge og Sverige gav Tjernobyl-ulykken et betragteligt nedfald af $^{137}_{55}\text{Cs}$ (og mindre mængder $^{134}_{55}\text{Cs}$). Rensdyrene i disse lande fik cæsium i kroppen via den lav, de spiste. Cæsium ligner rent kemisk kalium så meget, at kroppen ikke kan skelne dem fra hinanden. De to stoffer optages i kroppens muskler. I Norge er det tilladt at sælge rensdyr med den specifikke aktivitet (aktivitet pr vægtenhed) 6000 Bq/kg. Vi vil lave en tilnærmet udregning af den dosis, man får ved at spise en bøf på 200 g:

Bøffens aktivitet er 1200 Bq. Vi antager det værst tænkelige, at cæsium optages i menneskekroppen 100%. I kroppen fås så også en aktivitet på 1200 Bq. Af formel [9] kan antallet af cæsium-kerner findes:

$$N = A/k = 1200 \text{ Bq} / (7,3 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}) = 1,6 \cdot 10^{12}$$

På et år er cæsiummængden i praksis væk på grund af den korte biologiske halveringstid. Kroppen modtager altså praktisk taget hele dosen på et år.

Ifølge formel [11] er antallet af henfald omvendt proportionalt med halveringstiden, såvel i det biologiske "henfald" som i det radioaktive. Men den radioaktive halveringstid er 180 gange større end den biologiske. Så i et givet tidsrum vil antallet af biologisk udskilte kerner være ca. 180 gange større end antallet, der henfalder.

Derfor henfalder ca.

$$\frac{1}{180} \cdot 1,6 \cdot 10^{12} = 0,9 \cdot 10^{10}$$

kerner i kroppen. De fleste af de udsendte gammakvanter absorberes i kroppen. Vi regner med alle. Dosis kan så findes:

$$H = 0,9 \cdot 10^{10} \cdot 0,66 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/60 kg} \\ = 0,0016 \text{ mSv.}$$

Vi har overvurderet dosen lidt. Mere præcise regninger giver en værdi, der er ca. 0,0015 mSv. Dette er langt under den tilladte dosis på 5 mSv, men man bør ikke spise rensdyr hver dag. Det var også den norske regerings begrundelse for at hæve grænsen fra 600 til 6000 Bq/kg. Hvis man ikke gjorde det kunne renerne nemlig ikke sælges, lapperne ikke tjene penge og købe fødevarer. Så de ville leve af rensdyr hver dag. Måske endda af kød med meget større aktivitet, og det ville være en trussel mod lappekulturen.

Vi kan nu også udregne grænsen for den samlede aktivitet ^{137}Cs , man kan indtage gennem maden, inden man når op på den maksimalt tilladte samlede dosis på 5 mSv. Vi får:

$$1200 \text{ Bq} \cdot \frac{5}{0,0015} = 400000 \text{ Bq}$$

Denne værdi kaldes ALI-værdien (annual limit of intake).

Opgaver

1 Dosis.

En person på 80 kg udsættes for γ -stråling. Der afsættes energien 160 J i hele kroppen. Hvor stor en kropsdosis/dosisækvivalent modtager personen? Hvor stor er risikoen for, at han udvikler en dødbringende cancer?

2 Dosis.

Hvor stor en procentdel udgør isotopen $^{40}_{19}\text{K}$ af naturligt forekommende kalium?

Kalium er nødvendigt for musklerne. Der er ca. 150 g i en gymnasieelev.

Hvormange kerner af isotopen $^{40}_{19}\text{K}$ findes i en gennemsnitselev?

Hvad er en elevs $^{40}_{19}\text{K}$ -aktivitet?

Hvad er den specifikke aktivitet (aktiviteten pr. masseenhed)?

Udregn den årlige ækvivalente dosis.

Sammenlign kaliumaktiviteten med den højest tilladte cæsiumaktivitet i kød, der sælges i Danmark (600 Bq/kg).

3 Dosis.

En patient gennemlyses forfra ved hjælp af 100 keV røntgenstråling. Strålingens intensitet er 60 W/m². Vi antager, at patientens brystkasse kan betragtes som en 20 cm tyk plade med samme massefylde som vand.

Halveringstykkelserne skal findes i DATABOGEN (brug værdien for γ -stråling). Det antages, at al spredt stråling absorberes i legemet. Find forholdet mellem den dosis, huden på ryggen modtager, og den dosis, som huden på brystet modtager.

Find den totale dosis, en patient modtager, hvis gennemlysningen varer 0,125 sekunder.

4 Ydre kilde.

En flad α -kilde lægges direkte mod huden. Kilden har en udstrækning på 0,5 cm² og en aktivitet på 10⁸ Bq. Hver α -partikel har energien 8 MeV.

Beregn den effekt, som afgives i huden.

Det antages, at α -strålingen stoppes på 0,1 mm. Massefylden af hudlaget er 1 g/ml.

Beregn den ækvivalente dosis, som huden modtager på et minut.

5 Indre kilde.

Ved et uheld kommer en person til at indånde 0,0001 mg ^{239}Pu . Denne isotop er α -aktiv, og α -partiklerne har energien 5,1 MeV. Halveringstiden er 24000 år.

Hvad er aktiviteten af den indåndede mængde Pu?

Lungernes masse er 500 g. Vi antager, at α -strålingen absorberes helt i lungevævet.

Hvor stor en dosis modtager det bestrålede område pr. minut?

Den biologiske halveringstid er 1 år. Hvor stor en ækvivalent organsdosis får lungerne på et år?

6 Indre kilde.

En patient skal have bestrålet skjoldbruskkirtlen med ^{131}I , der har halveringstiden 8 døgn og henfalder under udsendelse af β -stråling med middelen energien 0,185 MeV. Vi antager, at halvdelen af energien afsættes i skjoldbruskkirtlen, som vejer 30 g.

Hvor stor en aktivitet, skal iod-pillerne have, for at ækvivalentdosen bliver 10 Sv på 4 dage? (Hjælp: Find eventuelt først det antal kerner, der er omdannet på 4 døgn, hvis aktiviteten er 10^8 Bq.)

7 Radon.

Radon er en radioaktiv luftart, der i små mængder siver ud fra overfladen af mange byggematerialer.

En prøve, der er udtaget af luften i et kælder-rum, har en aktivitet på 180 Bq, der skyldes henfald af prøvens indhold af radonisotopen ^{222}Rn . Halveringstiden for ^{222}Rn er 3,82 d.

Hvad er prøvens aktivitet efter 1 døgn forløb? Aktiviteten fra radon i kælderen må af sundhedsmæssige grunde højst være 100 Bq/m^3 . Atommassen for ^{222}Rn kan sættes til 222 u.

Bestem massen af den mængde ^{222}Rn , der højst må være i $1,0 \text{ m}^3$ af luften i rummet.

I et lukket kælderrum, hvis rumfang er 125 m^3 , og hvis vægge, gulv og loft har en samlet betonoverflade på 175 m^2 , vil der efter nogen tid indstille sig en ligevægt mellem radon-udsivningen og henfaldet af radon i luften. Man kan regne med, at udsivningen af ^{222}Rn er 150 kerner pr. sekund pr. kvadratmeter.

Bestem aktiviteten fra den mængde ^{222}Rn , der

findes i $1,0 \text{ m}^3$ af luften i rummet, når ligevægten er indtrådt.

Nu installeres et ventilationssystem i kælder-rummet, således at der pr. time udskiftes $4,0 \text{ m}^3$ af luften i rummet med radonfri luft. Efter nogen tid indstiller der sig en ny ligevægt.

Bestem den brøkdel af ^{222}Rn -kernerne, der fjernes pr. sekund på grund af ventilationen. (Bemærk analogien til det andet eksempel i kapitel 4 afsnit 3. Man kunne også definere en "ventilationshalveringstid" ligesom vi definerede en biologisk halveringstid, og man kan benytte den samme fremgangsmåde).

Bestem endvidere aktiviteten fra den mængde ^{222}Rn , som befinder sig i $1,0 \text{ m}^3$ af luften i rummet, når den nye ligevægtstilstand er indtrådt.

Kapitel 5

Opfølgning

Virksomhedsbesøg.

Mange danske virksomheder benytter metoder, der svarer til case 1, når de kontrollerer tykkelser, fladetæthed og massefylder. Derfor er emnet velegnet til et virksomhedsbesøg.

Dansk Arbejdsgiverforening, DA, har ønsket at støtte samarbejdet mellem virksomheder og gymnasier. De har sammen med 4 virksomheder, 4 fysiklærere i gymnasiet og Fysiklærerforeningen udarbejdet en rapport, der blev udsendt til alle medlemmer af foreningen, og som viser 4 eksempler på virksomhedsbesøg med et godt fagligt indhold. Titlen er "Se, så er der noget ved at lave fysikrapport". Ingen af disse eksempler handler om radioaktivitet. Men de erfaringer, der er gjort, kan let overføres, når man kommer med et veldefineret ønske.

Kontakt med en virksomhed kan man få gennem de DA-kontaktpersoner, som er angivet amt for amt i rapporten. Ideer kan man få ved at kikke på figur 7. Jeg vil her nævne nogle få virksomheder, der benytter radioaktivitet til kontrol og styring:

- 1 Rockwool i Hedehusene, Vamdrup og Øster Doense ved Randers.
- 2 Aalborg Portland.
- 3 Phønix Tagpap i Vejen.
- 4 Dansk Smergelfabrik i Maribo.
- 5 Esbjerg Thermoplast.
- 6 Dronningborg Maskinfabrik i Randers.
- 7 I.C. Møller i Fredericia.
- 8 Nucktronics i Måløv.
- 9 Weston Tæppefabrik i Hørning.

Det faglige indhold.

Man bør kende kilden, hvilken radioaktiv isotop, den indeholder, energien af strålingen og både halveringstykkelser og -tid. Hvorfor er kilden velegnet? Man kan interessere sig for relevante dimensioner og hvor stor en brøkdelen, der registreres. Hvilken præcision er man

interessert i? Dette bør der regnes på. Er der en alarm, eller er der en automatisk regulering i produktionsprocessen, når der registreres for store afvigelser fra det ønskede? Hvilke sikkerhedsforanstaltninger er der truffet?

Man kan også tage stilling til de tekniske og økonomiske fordele, der knytter sig til anvendelsen af radioaktive isotoper. Se fig. 8. Er der besparelser i råmaterialer eller energi? Øget proceseffektivitet eller øget produktkvalitet? Forbedringer i arbejdsmiljø? Besparelser i arbejdskraft?

Tangenter

1 Sporstofideen kan benyttes til fortyndingsmålinger. Åbne kilder er ikke så velegnede til undervisningsformål; men naturen leverer selv sporstof i flere tilfælde. Da alt kalium indeholder $^{40}_{19}\text{K}$, kan man specielt måle indholdet af kalium i kemiske forbindelser eller i blandinger af kemiske forbindelser. F. eks.: Hvor meget kalium er der i NPK-gødning? Eller hvor stor en del udgør KCl af sundhedssalt? Læs side 8 og 9 i "Radiokemi er også fysik", Gymnasieafdelingen 1989.

2 Med GM-rør er det muligt at måle koncentrationen af radon i luften. Læs side 15 i "Radiokemi er også fysik", udgivet 1989 af Gymnasieafdelingen. Eller med scintillationsdetektor. Læs side 4-8 i "Radonmålinger", Gymnasieafdelingen 1989.

3 Med en scintillationsdetektor kan man identificere de radioaktive isotoper i luften både på energi og (i nogle tilfælde) på halveringstid. Eller man kan eftervise henfaldsloven (undersøgelse #4) ved at opsamle $^{214}_{82}\text{Pb}$ i stedet for at benytte en minigenerator. Ved støvsugning - især i kældre - gennem mikrofilter fås en god

kilde at måle på. Læs side 8 og 9 i "Radonmålinger", Gymnasieafdelingen 1989.

4 I forlængelse af kapitel 2 afsnit 7 kan man bestemme densiteten af væsker ved at bestemme den lineære absorptionskoefficient ud fra målinger af den γ -stråling, der passerer gennem den samme beholder med og uden væske. Ideen er taget fra opgave 1 i studentereksamenssættet maj 1986. Hvordan kan denne ide benyttes til løbende at kontrollere kvaliteten af et olieprodukt på et raffinaderi, mens det strømmer igennem et stålrør?

5 Man kan undersøge Comptonspredningen fra forskellige materialer med en scintillationsdetektor og vise ideen i Rockwools kontrol af fladetætheden af isolationsmåtter.

6 Det er let at lave en kalibreringskurve til niveaumåling som i kapitel 2 afsnit 3. Benyt vand og en uigennemsigtig beholder (Man kan i Tyskland købe den store Faxefad på dåse. Den er god til det).

7 Med scintillationsdetektor kan man måle indholdet af $^{137}_{55}\text{Cs}$ og $^{134}_{55}\text{Cs}$ fra Tjernobyl i f. eks. dansk hjortekød og danske kantareller. I elg, ren eller svampe fra Norge og Sverige er indholdet naturligvis større. Indholdet af $^{40}_{19}\text{K}$ i kød er sværere at måle. Enten kræves ekstra blyafskræmning eller også må man lave et udkog, dvs. en opkoncentrering af kalium. Til gengæld får man en brilliant start på helsefysikken. Når man kender aktiviteten i kroppen (den specifikke aktivitet i dyr og mennesker er næsten den samme), har man en norm, som kan bruges til sammenligning af konsekvensen af at spise rensdyrkød.

8 Når halveringstiden er oppe i milliarder af år, er det svært at registrere et fald i aktiviteten inden for et overkommeligt tidsrum. Det er alligevel meget simpelt at bestemme halveringstiden. Ideen er, at $T_{1/2}$ kan findes ud fra k , og $k = A/N$. N kan let udregnes ud fra massen, og A kan bestemmes med detektor. Lad os måle $T_{1/2}$ for $^{40}_{19}\text{K}$.

1) GM-rør: Røret anbringes lodret med

vinduet opad. 0,10 g KCl drysses forsigtigt ned i GM-rørets vindue. Det er rimeligt at formode at 50% af β -partiklerne registreres, idet mængden er så beskedent, at der ikke er nogen selvabsorption. Find forbindelsen mellem aktivitet og β -aktivitet. Find en passende måletid. Beregn A ud fra målingen. Find N , k og $T_{1/2}$.

2) Scintillationsdetektor: Her skal der måles på γ -kvanterne. Med en vandig opløsning af en radioaktiv isotop (f.eks. $^{152}_{63}\text{Eu}$), hvis aktivitet er kendt, bestemmes hvor stor en brøkdel af γ -kvanterne, der registreres i detektoren ved forskellige energier. Der tegnes en graf over denne brøkdels afhængighed af energien. Herpå kan aflæses den brøkdel af strålingen ved 1,46 MeV, der registreres. Lav en opløsning af KCl i vand i en lille plastikdåse med samme dimensioner som dåsen med $^{152}_{63}\text{Eu}$ og anbring den på samme måde i forhold til detektoren. Ud fra tællehastigheden kan aktiviteten, A , af beholderen beregnes. Ud fra massen af den opløste KCl kan kaliumindholdet beregnes. Heraf udgør $^{40}_{19}\text{K}$ 0,0118%, så antallet, N , af radioaktive kerner kan findes. Find så k og $T_{1/2}$.

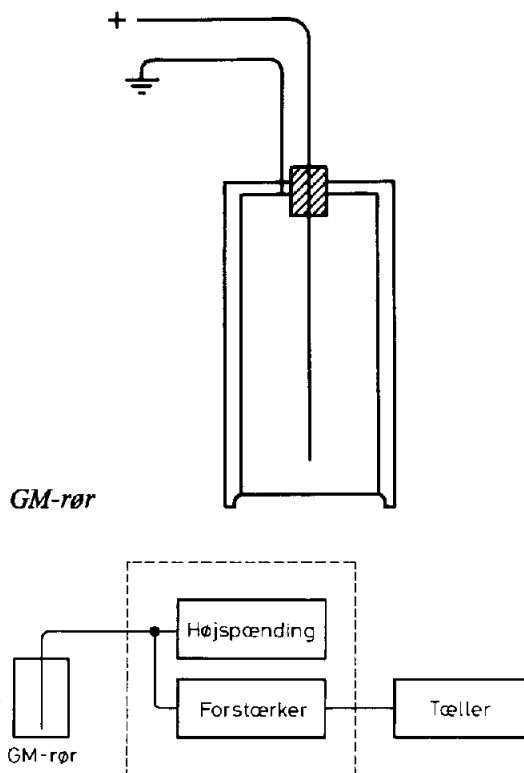
Der er flere ideer at hente i

- 1) "Radiokemi er også fysik" og "Radonmålinger", Gymnasieafdelingen 1989.
- 2) Manual til GDM10 fra Gammadata, Uppsala.
- 3) "Experiments in Nucleonics", som er udgivet af Union Carbide, der også producerer minigeneratoren.
- 4) "Naturlig stråling i danske boliger", Sundhedsstyrelsen 1987.

Lidt om detektorer

Geiger-Müller-rør

Et GM-rør består af en metalcylinder med en isoleret metaltråd i midten. Den indeholder en blanding af argon og alkoholdampe. Når strålingen trænger ind i beholderen, ioniseres gassen. Ionerne accelereres op af de elektriske kræfter, der opstår ved at lægge en spændingsforskel på 500-1000 volt mellem tråd(+) og cylinder(0). Ionerne stødioniserer nu andre atomer eller molekyler, og antallet af ioner vokser som en lavine, inden de negative rammer tråden og de positive cylinderen. Mellem tråd og cylinder fås et lille spændingsfald, en **spændingspuls**. Den forstærkes og registreres i en tæller. Se figur 29.



Figur 30. GM-rør og GM-opstilling. Forstærker og højspændingsdel er gerne sammenbygget i en GM-forsats.

GM-røret er bedst egnet til registrering af β -stråling. Skal røret være følsomt over for α -stråling, må det være forsynet med et tyndt vindue. γ -stråling ioniserer næsten ikke luften direkte, da halveringstykkelsen for γ -kvanter (normalt) er meget større end rørets dimensioner. Men elektroner, der dannes ved absorptionen i cylindervæggen, kan registreres.

Scintillationsdetektor

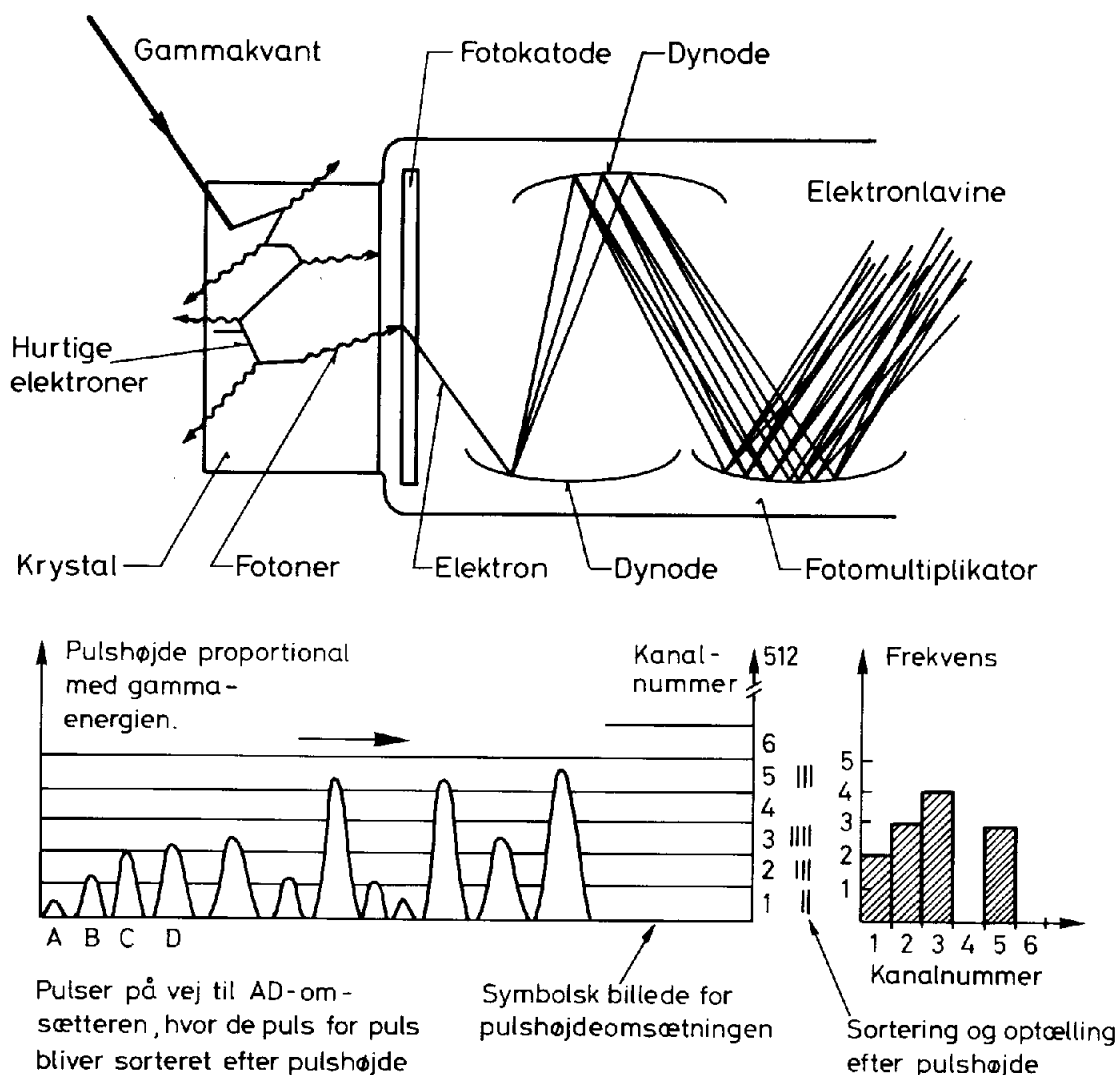
Ordet scintillation betyder lysglimt. Den energi, den ioniserende stråling afsætter i detektorens krystal, omdannes nemlig til lysglimt. Disse rammer fotokatoden i et fotomultiplikatorrør og slår elektroner løs. I røret er der op til 10 metalplader, **dynoder**, som fordeler et spændingsfald på måske 1000 volt. Mellem hvert par af dynoder accelereres de løsrevne elektroner op til så stor en hastighed, at de hver især ved sammenstød med den næste dynode river adskillige nye elektroner løs. Man får en lavineeffekt. Ud af røret kommer en lille negativ puls, som forstærkes op og tælles eller sorteres efter størrelse.

Da signalhøjden er proportional med elektronantallet i lavinen, der igen er proportional med lysmængden, der igen er proportional med den afsatte energi, vil signalhøjde og afsat energi være proportionale. Der kan dog rent elektronisk ske en nulpunktsforskydning, så afhænger energien lineært af signalhøjden. Sortering efter højde er altså det samme som sortering efter energi.

Til sorteringen benyttes en **MCA**, en **mangekanalanalysator**. Eller meget billigere : en AD-omsætter, et printkort og en datamat. Ideen i sorteringen er den samme som ved sortering af æbler efter størrelse: et skråplan med huller, der bliver større og større. Igennem de små huller falder de små æbler, igennem de store de store æbler. Nedenunder er der sække til opsamling. I datamater eller

MCA'er kaldes sækkene for **kanaler**. Der er typisk 256, 512 og 1024 kanaler til rådighed. Fordelingen af "æbler" (pulser) kaldes et **spektrum**. Hvis bare man kender 2 kanalers energi, kan kanalaksen erstattes af en energi-akse. Spektret er blevet energi-kalibreret. Man taler så om et **energisppektrum**. Hvis kilden f. eks. er ^{137}Cs , vil alle de gammakvanter, som

afsætter al energien i krystallen (fotoeffekt) ende i kanalerne omkring 0,66 MeV. Der er naturligvis en statistisk spredning, så vi får en top med en vis bredde (fototop). Længere nede i spektret fås mindre energirige "æbler". Det er baggrund eller pulser fra gammaer, der er Comptonspredt i krystallen. Det er udelukkende fototoppen, man bruger i undersøgelse #2 og #3.



Figur 31. Øverst vises, hvordan et γ -kvant, der absorberes ved fotoelektrisk effekt, omsættes til en byge af elektroner. Nederst forklares pulshøjdeanalysen.

Stikordsregister

A (antal nukleoner)	6	Geiger-Müller-rør (GM-rør)	54	organdosis	46
A (aktivitet)	38	gray	46	pardannelse	20
absorbere	20	grundstofforvandling	8	passagetid	35
absorberet dosis	46	Gy	46	protoner	6
absorption (model)	26	H	46	punktformet	48
absorptionskoefficient	26	halveringskonstant	23	Q	46
AD-omsætter	54	halveringstid	38	radikaler	47
afskærmning	49	halveringstykkelse	26	radio-nuklider	8
afstand	48	henfald	8	radon	46
afstandsloven	48	histogram	19	relativ usikkerhed på tælltal	19
aktiv slam anlæg	36	IC	12	relative fald pr. enhed	24
aktivitet	38	ICRP	48	Rockwool	17
akutte skader	47	in situ	13	sandpapir	18
alfastråling	8	indre stråling	49	scintillationsdetektor	54
arvelig skade	47	ioniserende stråling	45	sedimentation	40
ATA-reglen	48	ioniserende kernestråling	8	sene skader	47
atomnummer	6	Isotopcentralen	12	sievert	46
baggrundsstråling	16	isotoper	7	SIS	48
becquerel	14	isotopgenerator	37	skjulte rør	35
belufter	36	k	24	skorstenseffekt	46
beluftningskapacitet	36	k	38	sortering af pulser	54
betastråling	8	kalibrering	16	spektrum	55
bevaringssætninger	10	kalibreringskurve	16	spontan henfald	8
biologisk halveringstid	49	kanal	55	sporstof	32
blød stråling	49	kilde	14	spredning (statistisk)	19
Bq	14	kosmisk stråling	46	spredning (Compton-)	20
brancheblad	12	kropsdosis	46	spredt stråling	17
cigaretter	17	kvalitetsfaktor	46	spændingspuls	54
D	46	latent skade	47	stabil	8
Dansk Arbejdsgiverforening (DA)	52	LD50	47	Statens Institut for Strålehygiejne	48
datering	40	lineære absorptionskoefficient	26	strålebelastning	45
densitet	16	lukket kilde	49	stålplader	17
detektor	14	mandesievert	46	Suorva	32
DNA-molekyler	47	mangekanalanalysator	54	Sv	46
dosis	46	manSv	46	tracer	32
dosisækvivalent	46	masseabsorptionskoefficient	27	tællehastighed	16
dynode	55	MCA	54	tæller	16
eksponentielle funktioner	23 - 25	medicinsk stråling	46	tælltal	16
elementarladning	6	menneskeskabt radioaktivitet	45	unit (u)	9
elektronvolt (eV)	9	metastabil	37	uranfamilien	41
energispektrum	55	middelværdi	19	usikkerhed på tælltal	19
fotoelektrisk effekt	20	minigenerator	37	ydre stråling	48
fotomultiplikatorrør	55	N (antal neutroner)	6	Z (antal protoner, atomnummer)	6
fremskrivningsfaktor	23	N (antal kerner i kilde)	38	ækvivalente dosis	46
fugemørtel	15	naturlig radioaktivitet	45	ældaser	18
gamma-aktivitet	16	neutroner	6		
gammakvant	9	nukleon	6		
gammastråling	9	nuklid	6		
genetiske skade	47	nuklidkort	7		

