

Samenvattingen Stralingshygiëne niveau 3 cursus

Bas Gobets 2008



Inhoud

Inhoud.....	3
Ten geleide.....	9
Hoofdstuk 1 : Radioactiviteit en straling	11
<i>Ioniserende straling.....</i>	<i>11</i>
<i>Activiteit.....</i>	<i>11</i>
<i>Vervalwet.....</i>	<i>11</i>
<i>Massieke Activiteit.....</i>	<i>11</i>
<i>Nuclidenkaart</i>	<i>12</i>
Soorten Radioactief verval.....	12
β verval.....	12
β^+ verval.....	12
Elektronvangst (EC, ϵ)	13
α -verval.....	13
Isomeer verval.....	13
Interne conversie	13
Spontane splijting.....	13
Vervolgprocessen	14
Moeder-Dochter relaties	14
Radiometrische grootheden:	14
Productie van activiteit, kernreacties en activering.	15
Soorten kernreacties.....	15
Activering	15
Hoofdstuk 2 : Stralingsbronnen.....	17
Radioactieve bronnen	17
Ingekapselde radioactieve bronnen.....	17
Open radioactieve bronnen.....	17
Ioniserende straling uitzendende bronnen	17
Röntgenapparatuur	17
Deeltjesversnellers	18
Kernreactoren.....	18
Hoofdstuk 3 : Wisselwerking van straling met materie	19
<i>Direct ioniserende straling.....</i>	<i>19</i>
<i>Indirect ioniserende straling</i>	<i>19</i>
<i>Werkzame doorsnede.....</i>	<i>19</i>
Wisselwerking van geladen deeltjes	19
Energieverliesmechanismen.....	19
p , α	19
e	20
Remstraling	20
Čerenkov-straling.....	20
Dracht.....	21
Dracht van elektronen.....	21
Dracht van α s en protonen.....	21
Lineïeke ionisatie.....	21

<i>Begrensde lineaire elektronenv verliezen</i>	21
Wisselwerking van elektromagnetische straling.....	22
<i>Fotoelektrisch effect</i>	22
<i>Compton effect</i>	23
<i>Paarvorming</i>	23
<i>Coherente of Rayleighverstrooiing</i>	24
<i>Kernfotoeffect</i>	24
<i>Relatief belang van de verschillende interacties</i>	24
<i>Verzwakking en absorptie van elektromagnetische straling</i>	24
<i>Samengestelde materialen</i>	25
Wisselwerking van neutronen.....	25
<i>Classificatie neutronen</i>	25
<i>Soorten wisselwerkingen</i>	26
<i>Energieafgifte van neutronen</i>	26
Hoofdstuk 4 : Dosimetrie I (fysische grootheden).....	29
<i>Geladen deeltjes evenwicht</i>	29
Dosimetrische grootheden.....	29
<i>Geabsorbeerde dosis</i>	29
<i>Kerma</i>	30
<i>Exposie</i>	30
Relaties tussen de dosimetrische grootheden.....	31
<i>Relatie tussen geabsorbeerde dosis en exposie</i>	31
<i>Geabsorbeerde dosis in andere materialen dan lucht</i>	31
<i>Relatie tussen geabsorbeerde dosis en kerma</i>	31
Grensvlakdosimetrie.....	32
Meting van dosimetrische grootheden.....	32
Gammadodosimetrie van puntbronnen.....	33
β -dosimetrie.....	33
neutronendosimetrie.....	33
Hoofdstuk 5 : Biologische gevolgen van straling.....	35
Effecten op moleculair en cellulair niveau.....	35
<i>Opbouw en functie van DNA</i>	35
<i>Moleculaire effecten</i>	35
<i>Herstelmechanismen</i>	35
<i>Effecten op de cel</i>	35
<i>Modificerende factoren</i>	36
<i>Kwantificering van cellulaire effecten</i>	36
Classificatie van biologische effecten.....	36
<i>Kenmerken van deterministische effecten</i>	36
<i>Kenmerken van stochastische effecten</i>	37
Deterministische effecten.....	37
<i>Acute effecten bij betraling van het hele lichaam</i>	37
<i>Partiële bestraling</i>	38
<i>Late deterministische effecten</i>	38
Somatische Stochastische effecten.....	38
<i>Risicoschattingen</i>	38
Genetische effecten.....	39
<i>Bepaling genetisch risico</i>	39
Kwantificering van stochastische effecten t.b.v. stralingsbescherming.....	39

<i>DDREF</i>	39
<i>Weefselweegfactoren</i>	40
<i>Detriment coëfficiënten voor stochastische effecten</i>	40
Effecten van prenatale bestraling (teratogene effecten)	40
Epidemiologische gegevens en risicogetallen	40
Hoofdstuk 6 : Dosimetrie II (stralingsbeschermingsgrootheden)	43
Limiterende Grootheden	43
<i>Equivalente Dosis</i>	43
<i>Stralingsweegfactor, kwaliteitsfactor en RBE</i>	43
<i>Dosisequivalent</i>	44
<i>Effectieve dosis E</i>	44
<i>Effectief dosisequivalent H_E</i>	44
Operationele Grootheden	44
<i>Fantomen</i>	44
<i>Bestralingsgeometriën</i>	44
<i>Omgevings/richtingsdosisequivalent</i>	45
<i>Persoonsdosisequivalent</i>	45
Dosisconversieconstanten voor externe blootstelling	45
<i>Conversiecoëfficiënten voor fotonen</i>	45
<i>Conversiecoëfficiënten voor neutronen</i>	46
Onderlinge relaties tussen grootheden	46
<i>Overzicht grootheden:</i>	46
Overige stralingsbeschermingsgrootheden	47
<i>Volgdosis</i>	47
<i>Collectieve dosis</i>	47
Hoofdstuk 7 : Achtergrondstraling veroorzaakt door natuurlijke bronnen en menselijke activiteiten	49
Straling van natuurlijke oorsprong	49
<i>Kosmische straling</i>	49
<i>Kosmogene radionucleïden</i>	49
<i>Terrestische straling</i>	49
Totale dosis ten gevolge van natuurlijke stralingsbronnen	50
Doses veroorzaakt door menselijk handelen	50
<i>Technologisch verhoogde natuurlijke straling</i>	50
<i>Straling van kunstmatige bronnen</i>	50
Totale stralingsbelasting van de gemiddelde Nederlander	51
Hoofdstuk 8 : Het beschermingskader van de ICRP	53
Grondslagen van de iCRP systematiek	53
<i>Uitgangspunten voor de bescherming bij bestaande en voorgenomen handelingen</i>	53
<i>Uitgangspunten voor de bescherming bij interventie</i>	53
<i>Werkingsfeer, toepassingsgebieden</i>	54
ICRP publicatie 60 (1990)	54
<i>Risicolimieten en dosislimieten</i>	54
Hoofdstuk 9 : Inwendige besmetting	55
<i>Equivalente en effectieve volgdosis</i>	55
<i>Modelmatige aanpak</i>	55
<i>Bepaling equivalente volgdosis</i>	57

<i>Berekening $SEE(T \leftarrow S)_i$</i>	57
<i>ALI/DAC</i>	58
Specifieke orgaanmodellen	58
<i>Longmodel</i>	58
<i>Het maag-darm kanaal</i>	59
<i>Beenweefsel</i>	59
<i>Submersie</i>	60
Monitoring	60
<i>Luchtbemonstering</i>	60
<i>Excretieanalyse ("bio-assay")</i>	60
<i>Totale lichaamstelling</i>	60
Hoofdstuk 10 Meetmethoden voor ioniserende straling	61
<i>Statistiek van radioactief verval en metingen</i>	61
<i>Het teltempo</i>	61
<i>Achtergrondcorrectie</i>	62
<i>Meettijdverdeling</i>	62
<i>Minimaal te detecteren aantal</i>	62
<i>Maximaal te detecteren aantal</i>	62
<i>Rendement</i>	62
<i>Energieresolutie</i>	63
Stralingssensoren	63
<i>Gasgevulde stralingssensoren</i>	63
Vaste-stofsensoren	64
<i>Scintillatiesensoren</i>	64
<i>Thermoluminescentiedetectoren</i>	65
<i>Halfgeleidersensoren</i>	65
<i>Fotografische detectie</i>	65
<i>Activeringsfolies</i>	65
Vloeistofsensoren	65
<i>Vloeibare scintillatoren</i>	65
<i>Oververhitte vloeistofdruppels</i>	66
Detectie neutronen	66
<i>Besmettingsmetingen</i>	66
<i>Luchtactiviteitsmetingen</i>	66
<i>Persoonsdosimetrie</i>	66
Hoofdstuk 11 Bescherming tegen uitwendige bestraling	67
Afscherming van direct ioniserende straling	67
<i>Zware geladen deeltjes (p, α, enz)</i>	67
<i>Electronen</i>	67
Afscherming van elektromagnetische straling	67
<i>Verzwakkingcoëfficiënt en halveringsdikte; opbouwfactor voor brede bundels</i> ...	67
<i>Röntgenstraling uit toestellen</i>	68
<i>Remstraling van β-bronnen</i>	69
Afscherming van neutronen	69
Praktische uitvoering van afschermingen	70
Hoofdstuk 12 Bescherming tegen inwendige bestraling	73
Het begrip radiotoxiciteit	73

Karakterisering van het verspreidings- en incorporatierisico bij werkzaamheden met niet-geïncapseld radioactief materiaal	73
Begrenzing van de werkhoeveelheden verspreidbare activiteit.....	73
<i>De verspreidingsparameter p</i>	74
<i>De beschermingsparameter van het laboratorium q</i>	74
<i>De parameter voor de lokale ventilatievoorziening r</i>	74
<i>Opslag van radioactief materiaal</i>	75
<i>De belastingsfactor van een laboratorium</i>	75
Risico van oppervlaktebesmettingen	75
Radionuclidenlaboratoria.....	75
Hoofdstuk 13 Wet en regelgeving betreffende stralingsbescherming.....	77
Internationale regelgeving	77
<i>De basishnormen van 1996</i>	77
Ioniserende straling binnen de arbeids- en milieuwetgeving.....	78
<i>Arbeidswetgeving</i>	78
<i>Milieuwetgeving</i>	78
<i>Algemene Wet bestuursrecht</i>	78
De kernenergiewet	78
Besluit stralingsbescherming (KeW)	79
<i>Rechtvaardiging en optimalisatie</i>	79
<i>Dosislimieten, categorie-indeling van personen</i>	79
<i>Interventie</i>	80
<i>Dosiscontrole en toezicht</i>	80
<i>Classificatie van werkplekken</i>	80
<i>Stralingshygiënisch toezicht</i>	81
Meldingen en vergunningen	81
<i>Meldingen</i>	81
<i>Vergunningen</i>	81
Secundair Niveau, Mr-AGIS	82
<i>Berekening lozing in lucht</i>	83
<i>Berekening lozing in water</i> :	83
Aanvragen en procedures.....	84
Het vervoeren van radioactieve stoffen	84
<i>Verpakkingstypes</i>	84
<i>Stralingsniveau</i>	84
<i>Besmettingsniveau</i>	85
Mr-HABIS	85

Ten geleide

Deze samenvatting is in eerste instantie gebaseerd op het boek “inleiding tot de stralingshygiëne” van A.J.J. Bos.

De samenvatting is daarna inhoudelijk aangevuld aan de hand van de handouts die gedurende de colleges zijn uitgedeeld.

Ook zijn de formules en vuistregels die in de handouts in een kader stonden, en derhalve tot de parate kennis dienen te behoren in deze samenvatting in een grijs blok weergegeven.

Benadrukt moet worden dat niet alle docenten even consequent de kaders hebben gebruikt (sommigen geheel niet, en sommigen wel erg kwistig).

Als in een formule $\equiv$ staat in plaats van $=$ dan betreft het een definitie.

De nummering van de formules komt overeen met de nummering in het boek van Bos, met dien verstande dat niet alle formules zijn overgenomen in de samenvatting.

Een enkele keer is er een eigen interpretatie van de auteur opgenomen.

In hoofdstuk 6 is een extra (kort) overzicht van de stralingsbeschermingsgrootheden opgenomen.

Van hoofdstuk 14 is geen aparte samenvatting gemaakt. Behandelde onderdelen zijn opgenomen bij hoofdstuk 12 en 13.

Hoofdstuk 1 : Radioactiviteit en straling

Ioniserende straling

- 1) Geladen deeltjes (e, p, kernen) met voldoende kinetische energie om door botsingen ionisaties te veroorzaken
- 2) Ongeladen deeltjes (n, fotonen) die de deeltjes genoemd onder 1) kunnen vrijmaken of transformaties van atoomkernen kunnen initiëren.

Volgens Europese richtlijn is sprake van ioniserende straling als $\lambda < 100 \text{ nm}$ ($E > 12.4 \text{ eV}$).

“soorten fotonen”:

- Röntgen (remstraling) - door interactie met elektronenwolk
- Röntgen (karakteristiek) (m.n. uit k of l schil) - recombinatie straling na verwijderen elektron
- Gamma (γ) - uitgezonden door kern
- Annihilatiestraling - bij recombinatie e^+ en e^-
-

Notatie atoom: ${}^A_Z X^C$ (A=massagetal (n+p), Z=atoomnummer (p), C = lading (p-e), m = metastabiel.

Isotopen: gelijke Z

Isobaren: gelijke A

Isomeren: metastabiel / grondtoestand

Activiteit

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad (1.2)$$

A is het aantal spontane kernmutaties per seconde

1 Bq [Becquerel] = 1 s^{-1} (1 desintegratie /s)

Dpm = desintegrations per minute

1 Ci [Curie] = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq (activiteit van 1 gram zuiver radium)

Vervalwet

$$A = \lambda N \quad (1.4)$$

Dus in combinatie met (1.2)

$$N = N(0)e^{-\lambda t} \quad (1.6)$$

en

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.7)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.7}{\lambda} \quad (1.8)$$

Massieke Activiteit

Massieke activiteit is de activiteit per gram stof.

Voor een zuiver radionuclide geldt:

$$A_s = \lambda \frac{N_A}{M} [\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}] \quad (1.10)$$

in geval het een mengsel betreft moet dit met de atoomfractie vermenigvuldigd worden. In het geval het moleculen betreft moet met de multipliciteit (aantal keer dat het radioactieve element per verbinding voorkomt) worden vermenigvuldigd.

$$A_s = n f_{\text{atoom}} \lambda \frac{N_A}{M} [\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}] \quad (1.11)$$

Voor de activiteit van een mengsel geldt:

$$A(t) = \sum_i A_i(t)$$

Nuclidenkaart

Horizontaal: aantal neutronen, N

Vertikaal: aantal protonen, Z

Voor $Z < 20$: $N/Z \approx 1$, voor hoge Z: $N/Z \approx 1.5$

Soorten Radioactief verval

Primordials zijn isotopen met een halveringstijd in de orde van de leeftijd van de aarde.

A = massagetal (aantal protonen + neutronen in de kern)

Z = atoomnummer (aantal protonen in de kern)

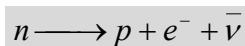
In de nuclide kaart staat het aantal protonen (atoomnummer, Z) uit op de y-as en het aantal neutronen (A-Z) op de x-as.

Kernen met een even aantal protonen of neutronen zijn vaker stabiel.

Voor $Z < 20$ zijn het aantal neutronen en protonen in de kern ongeveer gelijk,

Voor $Z > 90$ geldt dat $(A-Z) \approx 1.6Z$

β^- verval



(zwakke wisselwerking)

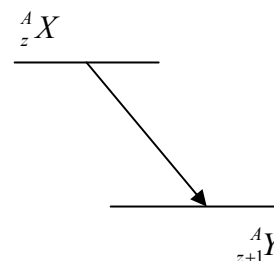
Is een isobaar proces, wat wil zeggen $A=A'$

Voor de gemiddelde β^- energie geldt:

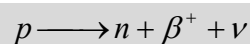
$$\bar{E}_{\beta^-} \approx \frac{1}{3} E_{\beta^-, \text{max}}$$

Vervolgstraling:

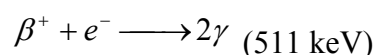
mogelijk interne remstraling



β^+ verval



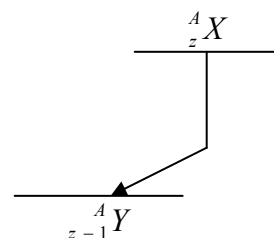
Het β^+ deeltje (een positon) remt af door botsingen in de omgeving en annihileert vervolgens in de buurt met een elektron onder uitzending van twee fotonen van 511 keV (annihilatiestraling):



Voor de gemiddelde β^+ energie geldt:

$$\bar{E}_{\beta^+} \approx 0.4 E_{\beta^+, \text{max}}$$

De drempel voor β^+ verval is 1022 keV (511 keV voor productie β^+ en nogmaals 511 keV omdat voor het energieverval uitgegaan wordt van atoommassa's, hetgeen de kernmassa is

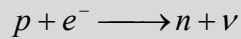


plus Z elektronmassa's. Aangezien Z één afneemt komt er nog een extra elektronmassa bij kijken.)

Vervolgstraling:

Annihilatiestraling

Elektronvangst (EC, ϵ)



Waarbij het elektron i.h.a. wordt ingevangen uit de k of l schil.

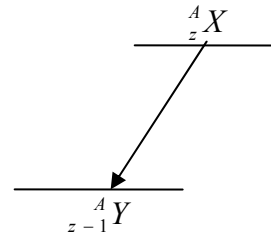
Elektronvangst kan voor elk energieverschil optreden en moet met β^+ verval concurreren voor energieën $> 1022\text{keV}$

De kans op elektronvangst neemt toe met Z

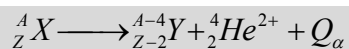
Vervolgstraling:

Karakteristieke straling

Auger elektronen



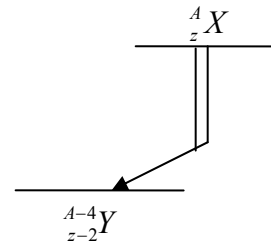
α -verval



$$m_{\text{moeder}} > m_{\text{dochter}} + m_\alpha$$

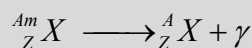
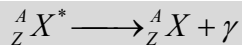
De terugstootenergie atoomkern bedraagt:

$$\frac{m_\alpha}{A + m_\alpha} \times Q_\alpha \approx \frac{4}{A} \times Q_\alpha$$



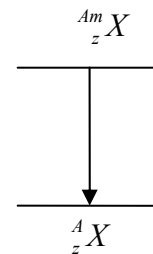
De energie van het uitgezonden α -deeltje bedraagt i.h.a. 4-8 MeV (maximaal 12 MeV)

Isomeer verval

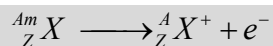


Waarbij * een kortlevende aangeslagen kerntoestand inhoudt, en 'm' staat voor metastabiel (d.w.z. met meetbare levensduur). Beide zijn kernisomeren.

γ heeft een energie van 10keV tot 7 MeV en is monoenergetisch!



Interne conversie

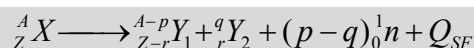


Overtollige energie van de kern wordt overgedragen aan een baanelektron (meestal uit een van de binnenste schillen).

Het uitgezonden conversie elektron is monoenergetisch ($E = Q - E_{\text{binding}}$)

Interne conversie concurreert met isomeer verval. De conversiefactor is gedefinieerd als #conversie-elektronen/#uitgezonden γ .

Spontane splijting



De ontstane fragmenten hebben een neutronenoverschot dus zijn β^- stralers.

Vervolgprocessen

- Karakteristieke straling: Monoenergetisch
 - Auger-elektronen: Monoenergetisch
- Energie die vrijkomt bij opvulling van de vacature wordt gebruikt om een ander baanelektron uit zijn schil te stoten.
- De kans dat een vacature in schil i wordt opgevuld onder uitzending van een foton is ω_i (fluorescentie opbrengst (yield)). ω_i neemt toe met Z, en naar mate de schil zich dichter bij de kern bevindt. Voor lage Z hoge opbrengst Auger-elektronen.

Moeder-Dochter relaties

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (1.14)$$

$$A_1(t) = A_1(0)e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1(0)(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + A_2(0)e^{-\lambda_2 t} \quad (1.15)$$

$\lambda_1 > \lambda_2$	geen evenwicht
$\lambda_1 < \lambda_2$	glijdend evenwicht
$\lambda_1 \ll \lambda_2$	absoluut (seculier) evenwicht

De ingroeitijd (tijd die het duurt voordat de dochter de maximale activiteit bereikt heeft) is:

$$t_{\max} = \frac{1}{\lambda_D - \lambda_M} \ln \left(\frac{\lambda_D}{\lambda_M} \right)$$

Radiometrische grootheden:

fluentie:	$\Phi = \frac{dN}{da} [\text{m}^{-2}]$	(1.17)
-----------	--	--------

indien het oppervlak een bol is om een homogeen stralende puntbron:

$$\Phi = \frac{N}{4\pi r^2} [\text{m}^{-2}] \quad (1.18)$$

de energiefluentie is in dit geval:

$$\Psi = \frac{NE}{4\pi r^2} [\text{Jm}^{-2}] \quad (1.19)$$

fluentie voor een evenwijdige bundel met loodrechte doorsnede S

$$\Phi = \frac{N}{S} [\text{m}^{-2}] \quad (1.20)$$

de fluxdichtheid/het fluentietempo

$$\phi = \frac{d\Phi}{dt} [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (1.21)$$

en de energieflexdichtheid/energiefluentietempo:

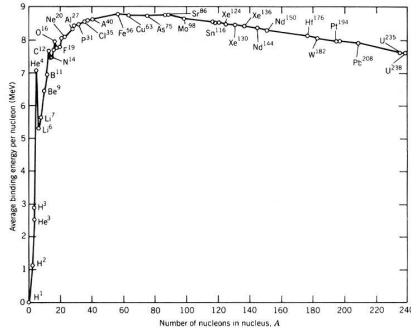
$$\psi = \frac{d\Psi}{dt} [\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (1.21)$$

Vuistregel kwadratenwet voor bronnen: toepasbaar als de afstand tot het massamiddelpunt van de bron groter is dan 5 maal de grootste afmeting van de bron.

Verband fluentietempo van stralingstype i, en activiteit (puntbron):

$$\varphi_i = \frac{y_i A}{4\pi r^2} \quad (1.22)$$

Productie van activiteit, kernreacties en activering.



Hoofdstuk 2 : Stralingsbronnen

Radioactieve bronnen

Ingekapselde radioactieve bronnen

Een ingekapselde bron is een bron van ioniserende straling die wordt gevormd door radioactieve stoffen welke:
zijn ingebed of gehecht aan vast, niet radioactief dragermateriaal, of
zijn omgeven door een omhulling van niet-radioactief materiaal,
met dien verstande dat het dragermateriaal/ de omhulling voldoende weerstand biedt om onder normale omstandigheden elke verspreiding van radioactieve stof te voorkomen

Neutronenbronnen bevatten een radioactieve nuclide dat neutronen levert via een directe weg (spontane splijting) of via een omzettingsreactie waarbij niet-radioactief materiaal is betrokken. (zie ook het eind van het volgende hoofdstuk)

Open radioactieve bronnen

Open radioactieve bronnen zijn alle bronnen die niet als ingekapseld kunnen worden beschouwd.

Ioniserende straling uitzendende bronnen

Röntgenapparatuur

Bij potentiaalverschillen boven de 15kV moet men bedacht zijn op remstraling.

De remstraling heeft een continu spectrum, met daarop gesuperponeerd de karakteristiek röntgen lijnen van het anodemateriaal.

De vorm van het röntgenspectrum wordt bepaald door V, de filtering, en de constructie en het materiaal van de anode, maar niet door de buisstroom.

$$P=V \times I$$

Met P het opgenomen vermogen, V de buisspanning en I de buisstroom (niet noodzakelijk gelijk aan de gloeistroom)

De hoeveelheid energie die omgezet wordt in remstraling is evenredig met het kwadraat van de versnelspanning, V.

Drie energiegebieden:

- Laag (<100 keV) (diagnostisch)
- Middel (100-300 keV)
- Hoog (> 300 keV)

De fractie opgewekte remstraling wordt gegeven door vgl 3.7, maar voor de hoge Z-waarden van het anode materiaal wordt een correctie van een factor 2 gebruikt dus:

$$g=12 \times 10^{-4} \times Z \times E$$

(E in MeV)

Bescherming

- Patiënt
 - Optimale instellingen instrument per onderzoek

- Beeldveld beperken
 - # opnames beperken
- Personeel
 - Afstand
 - Afscherming
 - Tijd

Deeltjesversnellers

Cyclotron, Lineaire versneller

Drie energiegebieden:

- Laag (<50 MeV)
- Middelhoog (50 MeV-1 GeV)
- Hoog (> 1 GeV)

Kernreactoren

Stralingssoorten:

- Neutronen
 - Prompte splijtings neutronen
 - Nakomende neutronen (uit verval splijtingsproducten)
 - Activeringsneutronen
- Fotonen
 - Prompte gammastraling bij splijting
 - Gammastraling van splijtingsproducten
 - Vangstgammastraling
 - Gammastraling van activeringsproducten

Hoofdstuk 3 : Wisselwerking van straling met materie

Direct ioniserende straling

e^- , α , p^+

- geven energie direct af aan elektronen/atoomkernen door veel kleine Coulombwisselwerkingen langs de baan van het deeltje
- Veel wisselwerkingen met kleine energieafgifte per wisselwerking
- laag doordringend vermogen

Indirect ioniserende straling

ongeladen deeltjes: fotonen, neutronen

- weinig wisselwerkingen met grote energieafgifte per wisselwerking
- hoog doordringend vermogen
- veroorzaken direct ioniserende straling

Werkzame doorsnede

$$\sigma = \frac{\text{kans op wisselwerking}}{\text{deeltjesfluentie}} [\text{m}^2]$$

ofwel de kans dat één willekeurige kern een interactie aangaat als één deeltje per m^2 passeert. Dat is dus effectief een oppervlakte.

Één barn = $10^{-28} \text{m}^2 \approx$ de doorsnede van een atoomkern met $A > 100$.

Wisselwerking van geladen deeltjes

Energieverliesmechanismen

wisselwerkingen met

- atoom (atomaire elektronen)
 - ionisatie en excitatie van atomen
 - belangrijke parameters:
 - lading van het deeltje
 - snelheid van het deeltje
 - elektronendichtheid van het bestraalde materiaal
- Coulombveld kern
 - remstraling (alleen van belang voor hoogenergetische elektronen omdat yield $\sim M^{-2}$).
- kern zelf
 - Nuclear stopping: alleen voor heel hoge energieën

p , α

- rechte sporen (straight ahead approximation)
- veel wisselwerkingen (voor MeV deeltjes is de energie afgifte per wisselwerking meestal $\ll 100 \text{eV}$)
(continuous slowing down approximation)

e

- geen rechte sporen
- energieafgifte per botsing veel groter dan bij p en α , en richtingsverandering

totale lineïeke energieverlies (total linear stopping power):

$$S = \frac{dE}{dl} [\text{Jm}^{-1}] \quad (3.3)$$

totale massieke energieverliesdoorsnede (total mass stopping power) is S/ρ :

$$S/\rho = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} [\text{Jm}^2\text{kg}^{-1}] \text{ of } [\text{MeVcm}^2\text{g}^{-1}] \quad (3.4)$$

S/ρ : vertoont een maximum voor energieën waarvoor de snelheid van het deeltje ongeveer overeenkomt met de baansnelheid van de elektronen van de atomen ($e \sim 10^{-4}$ MeV, $p \sim 0.2$ MeV, $\alpha \sim 0.8$ MeV).

Voor elektronen in weefsel (vuistregel):

$$S/\rho \sim 2 \text{ MeVcm}^2\text{g}^{-1} \\ (0.4 \text{ MeV} < E < 10 \text{ MeV})$$

$$\frac{S}{\rho} = \left(\frac{S}{\rho} \right)_{el} + \left(\frac{S}{\rho} \right)_{rad} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{el} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dl} \right)_{rad} \quad (3.5)$$

elektronen: $E < 1$ MeV $(S/\rho)_{el}$ dominant, daarboven ook $(S/\rho)_{rad}$.

Remstraling

bij benadering geldt:

$$\frac{\left(\frac{S}{\rho} \right)_{rad}}{\left(\frac{S}{\rho} \right)_{el}} \approx \frac{EZ}{800} \quad (3.6)$$

met E in MeV, en Z het atoomnummer

De fractie van de energie die wordt omgezet in remstraling tijdens het volledig afremmen van mono-energetische elektronen is voor lichte materialen en $E < 10$ MeV te benaderen met:

$$g \approx 6 \cdot 10^{-4} Z E_0 \quad (E_0 \text{ in MeV}) \quad (3.7)$$

voor β straling met maximale energie E_m geldt bij benadering:

$$g \approx 2 \cdot 10^{-4} Z E_m \quad (E_0 \text{ in MeV}) \quad (3.8)$$

Behalve deze “externe remstraling” wordt bij β^+ , β^- verval en elektronvangst ook “interne remstraling” geproduceerd als gevolg van de plotselinge verandering van de kernlading. Voor lichte kernen $\sim 50\%$, voor zwaardere kernen minder (Pb : 5%).

β -bronnen worden in het algemeen bewaard in een perspex omhulsel (afremmen zonder veel remstraling) omvat door een loodpot (absorptie γ s en remstraling uit perspex).

Čerenkov-straling

Blauwe, (ultra)violet straling die optreedt op als $(v/c)n > 1$. (Hoogenergetische elektronen) Speelt voor afremming nauwelijks een rol, en treedt op voor energieën boven 150-250 keV.

Dracht

De dracht (range, R) is de maximale indringdiepte in de richting van inval.

De gemiddelde dracht is de materiaaldikte waar de intensiteit gehalveerd is.

De geëxtrapoleerde dracht is de lineaire extrapolatie naar nul intensiteit vanuit het punt van gemiddelde dracht.

Meestal wordt met dracht de maximale dracht bedoeld, de (minimale) afstand in het materiaal tot waar geen geladen deeltjes meer doordringen.

Gereduceerde dracht : R_p .

Verband tussen dracht en lineiek energieverlies S:

$$R = \int_{E_0}^0 dl = \int_0^{E_0} \frac{1}{S} dE \quad (3.9)$$

Dracht van elektronen

Epidermis (oppervlakte) is 40-300 μm (typisch 70 μm).

Benadering gereduceerde dracht elektronen (voor $E > 1\text{MeV}$, daaronder overschatting):

$$R_p = 0.5E [\text{gcm}^{-2}] \quad (E \text{ in MeV}) \quad (3.12)$$

voor de meeste β -bronnen is een afscherming van 1gcm^{-2} voldoende.

Dracht van α s en protonen

meeste α : $E < 6\text{MeV}$; komen nauwelijks to epidermis heen. Voornaamste gevaar: inwendige besmetting.

Voor 4-15MeV is de dracht in lucht bij benadering:

$$R_L \approx 0.3E^{3/2} [\text{cm}] \quad (E \text{ in MeV}) \quad (3.14)$$

Voor andere media geldt:

$$R_A(\alpha) = 3.2 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{AR_L}}{\rho} [\text{cm}] \quad (3.15)$$

(ρ in gcm^{-3}) waarbij voor een mengsel geldt:

$$\sqrt{A_{\text{mengsel}}} = \sum_i f_i \sqrt{A_i} \quad (3.16)$$

protonen in lucht ($2 < E < 200\text{ MeV}$):

$$R_L(p) = 100 \left(\frac{E}{9.3} \right)^{1.8} = 1.8E^{1.8} [\text{cm}] \quad (E \text{ in MeV}) \quad (3.17)$$

Lineieke ionisatie

ion-elektronparen geproduceerd per eenheid ingedrongen diepte in het materiaal.

is gelijk aan S/W met S het totale lineieke energieverlies en W de gemiddelde afgegeven energie per ionisatie. Door de energie-afhankelijkheid van S ontstaat de zgn Bragg-piek.

Begrensd lineiek elektronenverlies

(restricted linear electronic stopping power)

$$L_\Delta = \frac{dE_\Delta}{dl} [\text{Jm}^{-1}] \quad (3.18)$$

totaal afgegeven energie per m aan energie minus de energie afgegeven aan elektronen met een kinetische energie $> \Delta$.

$$L_{\infty} = S_{el} \quad (3.19)$$

$L_{\infty} \equiv L \equiv LET$

L_0 = energie per m afgegeven in een vorm anders dan kinetische energie (bindingsenergie, excitaties, fotonen)

LET is gedefinieerd voor geladen deeltjes, maar wordt ook gebruikt voor ongeladen deeltjes: neutronenstraling is "hoge LET" straling vanwege het feit dat hoge LET deeltjes (protonen, α s) vrijgemaakt worden, fotonen worden lage LET straling genoemd omdat ze lage LET deeltjes (elektronen) vrijmaken.

Wisselwerking van elektromagnetische straling

Energieverliesmechanismes:

interacties met:

- Atomair elektron
 - Foto-electrisch effect $\Delta E = E_0$
 - Compton effect $0 < \Delta E < E_0$
 - Coherente of Rayleigh verstrooiing $\Delta E \approx 0$
- Kern
 - Kernfotoeffect $\Delta E = E_0$
- Elektrisch veld atoomkern
 - Paarvorming $\Delta E = E_0$

Fotoelektrisch effect

totale energie overgedragen aan atomair elektron, meestal uit de binnenste schil.

$$E_e = h\nu - E_b \quad (3.20)$$

drempel is bindingsenergie E_b , daarboven geldt voor de werkzame doorsnede per atoom, τ :

$$\tau \propto \frac{Z^{4.5}}{(h\nu)^3}$$

materialen met een hoge Z zijn dus goede afschermers voor lage energie fotonen.

Treedt met name op voor $E_\gamma \approx E_B$.

Vervolgstraling zijn karakteristieke Röntgen en Auger elektronen.

fractie energie uitgezonden karakteristieke straling:

$$\frac{\delta}{h\nu} = \sum_i \frac{\tau_i}{\tau} \frac{\bar{E}_i}{h\nu} \omega_i \quad (3.21)$$

waarbij de sommatie over alle relevante schillen is, τ_i de werkzame doorsnede in schil i , τ de totale werkzame doorsnede, $\bar{E}_i$ de gemiddelde energie die per geabsorbeerd foton wordt uitgezonden en ω_i de fluorescentie opbrengst voor schil i .

Gemiddelde fractie energie overgedragen aan geladen deeltjes is dan:

$$f_{\gamma,e} = 1 - \frac{\delta}{h\nu} \quad (3.22)$$

foto-effect-energie-overdrachtsdoorsnede τ_a :

$$\tau_a = f_{\gamma,e} \tau \quad (3.23)$$

en

$$\tau = \tau_a + \tau_s \quad (3.24)$$

met τ_s de energie-overdrachtsdoorsnede voor karakteristieke straling (“scattering”)

Compton effect

gedeeltelijk overdracht energie aan zwak gebonden of ongebonden elektron.
energie verdeeld volgens:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (\text{foton}) \quad (3.25)$$

en

$$E_e = \frac{\frac{(h\nu)^2}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (\text{elektron}) \quad (3.26)$$

De hoekverdeling van het verstrooide foton is hiernaast weergegeven.

Als $\bar{E}_e$ de gemiddeld aan het elektron overgedragen hoeveelheid energie is de gemiddelde fractie aan Compton elektronen overgedragen energie:

$$f_{\gamma, \gamma'e} = \frac{\bar{E}_e}{h\nu} = 1 - \frac{h\nu'}{h\nu} \quad (3.27)$$

en bedragen de

Comptonenergieoverdrachtsdoorsnede en
Comptonverstrooiingsdoorsnede respectievelijk:

$$\sigma_{Ca} = f_{\gamma, \gamma'e} \sigma_C \quad (3.28)$$

en

$$\sigma_{Cs} = (1 - f_{\gamma, \gamma'e}) \sigma_C \quad (3.29)$$

σ_C per elektron (of per kg) is onafhankelijk van Z , σ_C per atoom is evenredig met Z :

$$\sigma_{\gamma, \gamma'e} = \sigma_C \propto \frac{Z}{(h\nu)^{0.5}}$$

In termen van energieafhankelijkheid is σ_C redelijk constant tot ca 200keV en neemt daarboven af.

Paarvorming

Is het omgekeerde van annihilatie.

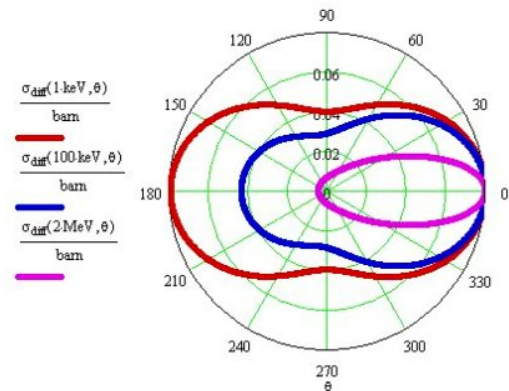
drempel: $h\nu > 1022\text{keV}$, kinetische energie van e^-e^+ paar is $E_k = 1022 - h\nu$ keV, d.w.z. dat de energieoverdracht volledig is.

Deeltjes bewegen sterk in voorwaartse richting.

κ is de werkzame doorsnede per atoom.

$$\kappa \sim E^{0.5} Z^2$$

fractie energie overgedragen aan e^-e^+ paar is



$$f_{\gamma, ee^+} = 1 - \frac{2m_0c^2}{h\nu} \quad (3.30)$$

en de paarvormingsenergie-overdrachtsdoorsnede kan geschreven worden als:

$$\kappa = \kappa_a + \kappa_s \quad (3.31)$$

Coherente of Rayleighverstrooiing

$$\sigma_{\text{coh}} \sim (h\nu)^2$$

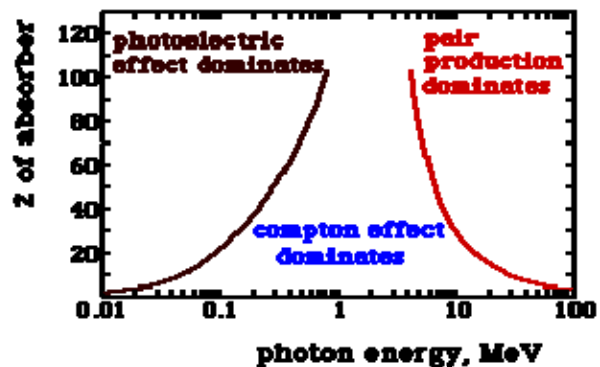
bijdrage klein, alleen voor zeer lage energieën significant

Kernfotoeffect

Door foton-straling veroorzaakte kernreacties. Meestal (γ, n) reacties. Drempelenergie is dan de bindingsenergie van het neutron (vanaf circa 1.7 MeV voor lichte kernen). Werkzame doorsnede gering.

Relatief belang van de verschillende interacties

voor 10keV tot 100MeV fotonen zijn het fotoelektrisch effect, het Compton effect en paarvorming de belangrijkste processen. Welk proces dominant is hangt af van E en Z zoals weergegeven in de “gordijntjesgrafiek” hiernaast.



	Energieafhankelijkheid	Z-afhankelijkheid	
		σ [cm^2/atoom]	σ [cm^2g^{-1}]
Foto effect	$E^{-3.5}$	$Z^4 \text{ à } Z^5$	$Z^3 \text{ à } Z^4$
Compton effect	$E^{-0.5} \text{ à } E^{-1}$	Z	vrijwel onafh.
Paarvorming	$E^{+1} \text{ à } \ln E$	Z^2	Z

Verzwakking en absorptie van elektromagnetische straling

Als je wilt meten hoeveel van je invallende fotonen een interactie zijn aangegaan met een absorber materiaal moet je een opstelling kiezen om de detectie van (Compton)verstrooide straling en secundaire straling (karakteristiek, annihilatie, rem) te onderdrukken: smalle bundelgeometrie: De verandering van de fluentie in een laagje dx bedraagt dan:

$$d\Phi = -\sigma\Phi N dx \quad (3.32)$$

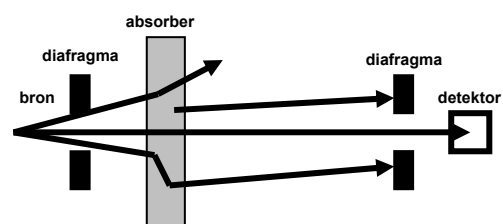
met σ de werkzame doorsnede per wisselwerkingscentrum, en N het aantal wisselwerkingscentra per volume-eenheid. Hieruit volgt:

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-N\sigma x} = \Phi_0 e^{-\mu x} \quad (3.33)$$

De lineaire verzwakkingscoëfficiënt (linear attenuation coefficient) is gedefinieerd als:

$$\mu \equiv N\sigma \quad (3.34)$$

daar



$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad (3.35)$$

(N_A = getal van avogadro, M =molmassa)

geldt voor de massieke verzwakkingsdoorsnede (mass attenuation coefficient) (μ/ρ):

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{M} \sigma \quad (3.36)$$

of

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{0.6}{M} \sigma \quad (3.37)$$

(met μ/ρ in cm^2g^{-1} en σ in barn)

De halveringsdikte, $d_{1/2}$ bedraagt:

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (3.39)$$

μ (en σ) zijn energie afhankelijk, dus ook $d_{1/2}$.

$$\mu/\rho = \tau/\rho + \sigma_c/\rho + \kappa/\rho \quad (3.40)$$

massieke doorsneden:

μ/ρ massieke verzwakkingsdoorsnede: heeft betrekking op totaal geabsorbeerde fractie energie per massa-eenheid per fluentie-eenheid

μ_a/ρ massieke absorptiedoorsnede: als bovenstaand, maar zonder de energie van verstrooide compton-fotonen mee te nemen

μ_{tr}/ρ massieke energieoverdrachtsdoorsnede: als hierboven, maar zonder de energie van annihilatie en karakteristieke straling

$$\mu_{tr}/\rho = \frac{N_A}{M} (f_{\gamma,e} \tau + f_{\gamma,\gamma'e} \sigma_c + f_{\gamma,e^-} \kappa) \quad (3.41)$$

$\mu_{en}/\rho = (1-g) \mu_{tr}/\rho$ (3.42) massieke energieabsorptiedoorsnede: bovenstaand maar met aftrek van de energie verloren aan remstraling.

Zie voor waarden appendix D

Voor lucht, water, compact bot en spierweefsel geldt voor $0.1\text{MeV} < E < 1.5\text{MeV}$ bij benadering:

$$\mu_{tr}/\rho \approx \mu_{en}/\rho \approx 0.03 \text{cm}^2\text{g}^{-1}$$

Samengestelde materialen:

$$(\mu/\rho)_{mix} = \sum_i w_i (\mu/\rho)_i \quad (3.43)$$

met w_i de massafractie van element i . Idem voor μ_{tr}/ρ maar niet voor μ_{en}/ρ !

Effectieve Z :

$$Z_{eff} = \sqrt[3]{\sum_i w_i Z_i^3} \quad (3.44)$$

Wisselwerking van neutronen

Hebben geen lading dus kunnen dicht bij/in de kern komen resulterend in botsingen en/of kernreacties/kernsplijtingen.

Buiten de kern vervalt het neutron in 10.6 minuten door β^- verval ($E_{max}=782 \text{ keV}$).

Classificatie neutronen

- 1) Langzame neutronen ($E < 0.5 \text{ eV}$). Interactie voornamelijk neutronvangst ($\sigma \sim E^{-1/2}$). Thermische neutronen hebben $\bar{E}$ van $2.5 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$.

- 2) Epithermische/middelsnelle neutronen ($0.5 \text{ eV} < E < 200 \text{ keV}$). Ontstaan na moderatie snelle neutronen. Betrekkelijk lage σ voor neutronvangst, maar soms resonanties.
- 3) Snelle neutronen ($200 \text{ keV} < E < 20 \text{ MeV}$). Interactie voornamelijk elastische botsingen, soms inelastisch (uitzending van γ s).
- 4) Relativistische neutronen ($E > 20 \text{ MeV}$). E groter dan bindingsenergie kernen, dus reacties kunnen optreden waarbij een kern uit elkaar valt (spallatie)

Soorten wisselwerkingen

Elastische botsing met atoomkern. De maximale fractie overgedragen energie bedraagt (frontale botsing):

$$\frac{E_n - E_{n'}}{E_n} = \frac{4m/M}{(1 + m/M)^2} \quad (3.45)$$

waarbij m en M de massa's van respectievelijk het neutron en de kern zijn.

Inelastische botsing. Kern wordt in een aangeslagen toestand gebracht door de botsing.

Moderatie is het afremmen van neutronen (door botsingen). Volgens (3.45) gaat dit het best met deeltjes die licht zijn. Moderatie gaat daarom goed in materialen waar veel waterstof in zit, zoals water, olie of polyethyleen.

Vangstreactie. Wordt gevolgd door uitzending van geladen deeltje of foton.

Voorbeelden:

- $^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$: $\sigma = 20600$ barn (abundantie 12.2%)
- $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$: $\sigma = 3840$ barn (abundantie 19.7%)
- $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$: $\sigma = 960$ barn (abundantie 7.4%)
- $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{D}$: $\sigma = 0.33$ barn (abundantie 99.99%)
- $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$: $\sigma = 1.7$ barn (abundantie 99.6%)

Activering (bijzondere versie van vangstreactie). Productietempo wordt gegeven door:

$$\dot{P} = \frac{mN_A}{M} \sigma \phi = N \sigma \phi \text{ [atomen/s]} \quad (3.46)$$

met m , en M respectievelijk het aantal gram en de molmassa van het target, N_A het getal van Avogadro, σ de werkzame doorsnede per atoom en ϕ de neutronenfluentie.

Vangstreactie gevolgd door splijting. Van bijvoorbeeld ^{235}U ($\sigma_f = 586$ barn) en ^{239}Pu ($\sigma_f = 752$ barn). Per splijting komt circa 200 MeV vrij.

Energieafgifte van neutronen

massieke verzwakkingsdoorsnede:

$$\mu/\rho = \frac{N_A}{M} \sigma \quad (3.47)$$

En de massieke energieoverdrachtsdoorsnede:

$$\mu/\rho = \frac{N_A \sigma}{M} \frac{\bar{E}_{tr}}{E_n} \quad (3.48)$$

Met $\bar{E}_{tr}$ de gemiddelde energie dat als kinetische energie wordt overgedragen aan geladen deeltjes door een neutron met energie E_n .

Classificatie van neutronen:

- | | | |
|---------------------------|--|---------------------------|
| • relativistisch | ($E > 20 \text{ MeV}$) | Uit bijv. de zon. |
| • snel | ($200 \text{ keV} < E < 20 \text{ MeV}$) | Uit kernreactoren |
| • epithermisch/middelsnel | ($0.5 \text{ eV} < E < 200 \text{ keV}$) | Na moderatie van snelle n |
| • thermisch | ($E < 0.5 \text{ eV}$) | Geschikt voor n-vangst |

σ is geen gladde functie van Z en E (resonanties)

Neutronenbronnen

- Mengbronnen: combinatie van α bron en bijv
- kernfoto-effect bronnen: combinatie van γ bron en kernfoto-effect.
- spontane splijtingsbronnen: ^{240}Pu , ^{252}Cf .

Hoofdstuk 4 : Dosimetrie I (fysische grootheden)

Overgedragen energie, E_{tr} :

de som van alle energie die door ongeladen deeltjes aan geladen deeltjes overgedragen in de vorm van aanvankelijke kinetische energie, in een materiaal met massa dm .

Dit is een intermediare dosimetrische grootheid

Energiedepositie (energy deposit) ε_i van een interactie i

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{uit} + Q \quad (4.1)$$

ε_{in} de energie van invallende deeltje (exclusief rustmassa-energie)

ε_{uit} de som van de energieën van alle uittredende deeltjes (exclusief rustmassa-energie)

Q verandering van rustmassa-energieën (positief = afname massa)

De energie afgifte (energy imparted) in een gegeven volume, ε is:

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i \quad (4.2)$$

waar de sommatie over alle interacties in dat volume is.

De gemiddelde energieafgifte in een gegeven volume is

$$\bar{\varepsilon} = R_{in} - R_{uit} + \sum Q \quad (4.3)$$

R_{in} Opvallende stralingsenergie (van alle invallende (geladen en ongeladen) ioniserende deeltjes), exclusief rustmassa-energie.

R_{uit} Uittredende stralingsenergie (van alle uittredende (geladen en ongeladen) ioniserende deeltjes), exclusief rustmassa-energie.

$\sum Q$ som van alle veranderingen in rustmassa die in het volume plaatsvinden.

Geladen deeltjes evenwicht

Stel een (klein) volume V , onderhevig aan fotonenfluentie, die niet noemenswaardig afvalt over de omgeving O van V .

4 'soorten' elektronen geven energie af in V : 1) Crossers, 2) Stoppers, 3) Starters en 4) insiders.

Electronenevenwicht: elk elektron dat V verlaat wordt gecompenseerd door een elektron met dezelfde eigenschappen (E , richting) dat V binnenkomt.

Algemeen: Geladen deeltjes evenwicht (GDE)

Dosimetrische grootheden

Geabsorbeerde dosis

D is de energie die per eenheid van massa wordt geabsorbeerd in (de omgeving van) een punt in een medium dat aan ioniserende straling is blootgesteld.

eenheid: $1 \text{ J/kg} \equiv 1 \text{ Gy} \equiv 100 \text{ rad}$. (4.10, 4.11)

De massieke energie afgifte (specific energy imparted), z , is stochastisch

$$z = \frac{\varepsilon}{m} \quad (4.12)$$

de geabsorbeerde dosis:

$$D \equiv \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \text{ ofwel } D \equiv \lim_{m \rightarrow 0} \bar{\varepsilon} \quad (4.13)$$

(met $\bar{\varepsilon}$ de gemiddelde energieafgifte uit 4.3)

het dosistempo is $dD/dt \equiv \dot{D}$

Voor een fotonen of neutronen fluentie Φ in aanwezigheid van geladen deeltjes evenwicht (GDE):

$$D \stackrel{GDE}{=} \Phi E \mu_{en} / \rho \quad (4.14)$$

Voor een geladen deeltjes fluentie Φ en $(S/\rho)_{el}$ die niet variëren over het volume dm , in aanwezigheid van geladen deeltjes evenwicht (GDE):

$$D \stackrel{GDE}{=} \Phi (S/\rho)_{el} \quad (4.16)$$

Opmerkingen:

D heeft alleen betekenis in een materiaal, dat vermeld dient te worden.

LD50, de voor 50% van de populatie lethale dosis, bedraagt 5Gy (full body) hetgeen overeenkomt met 0.0012 °C temperatuurstijging. De dosis door achtergrondstraling bedraagt 2mGy per jaar voor Nederlanders.

Kerma

Kinetic Energy Released per unit MAss. (Alleen voor indirect ioniserende straling dus)

$$K \equiv \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (4.18)$$

deze energie kan via botsingen afgegeven worden aan het materiaal, maar ook afgegeven worden in de vorm van remstraling.

$$K = K_{col} + K_{rad} \quad (4.19)$$

$$K = \Phi E \mu_{tr} / \rho \quad (4.20)$$

$E \mu_{tr} / \rho$ wordt ook wel de kermafactor of kermacoëfficient genoemd.

- 1) Geen eis van GDE
- 2) Zowel materiaal als medium dienen vermeld te worden. (Luchtkerma vrij-in-lucht)

Exposie

$$X \equiv \frac{dQ}{dm} \quad (4.21)$$

dQ is de absolute waarde van alle ionen van één teken die in lucht gevormd zijn door elektronen die door fotonen zijn vrijgemaakt uit het volume dm .

In geval van geladen deeltjes evenwicht is X gelijk aan de in dm vrijgemaakte aantal ionen van één teken per massa-eenheid.

eenheid: Ckg^{-1} of (oud) 1 röntgen $= 2.58 \cdot 10^{-4} Ckg^{-1}$

Exposietempo $= dX/dt = \dot{X}$

- 1) Ionisatie als gevolg van absorptie van remstraling is niet meegenomen in Q
- 2) X is alleen meetbaar voor $5keV < E < 3MeV$ fotonen
- 3) Exposie is uitsluitend voor fotonen in lucht gedefinieerd.

Relaties tussen de dosimetrische grootheden

Relatie tussen geabsorbeerde dosis en exposie

De gemiddelde energie, W , nodig om een elektron-ion paar te vormen in gas:

$$W = \frac{E}{N} \quad (4.23)$$

waarin E de aanvangsenergie van het inkomende geladen deeltje en N het gemiddeld aantal gevormde elektron-ion paren. W is tot zeer lage energieën constant.

Droge lucht: $W_{\text{lucht}} = 5.44 \cdot 10^{-18} \text{ J} = (33.97 \pm 0.06) \text{ eV}$ ofwel $W_{\text{lucht}}/e = (33.97 \pm 0.06) \text{ J/C}$

In geval van GDE:

$$D_{\text{lucht}} = \frac{^{GDE} W_{\text{lucht}}}{e} X \quad (4.24)$$

ofwel

$$X = \frac{^{GDE}}{\Phi E (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}} \frac{e}{W_{\text{lucht}}} \quad (4.26)$$

Geabsorbeerde dosis in andere materialen dan lucht

in geval van GDE:

$$D_m = \frac{^{GDE} (\mu_{\text{en}}/\rho)_m}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_l} D_l \quad (4.28)$$

Z_{eff} voor lucht is 7.77. Voor materialen met vergelijkbare Z_{eff} zal de fractie $(\mu_{\text{en}}/\rho)_m/(\mu_{\text{en}}/\rho)_l$ weinig van de energie afhangen. Indien Z_{eff} van het materiaal afwijkt van die voor lucht zullen afwijkingen in het laagenergetische gebied (Foto-elektrisch effect, $\sim Z^3$ à Z^4) en het hoogenergetische gebied (paarvorming $\sim Z$) optreden. Voor weefsel en water is de genoemde fractie 1, met een afwijking van ongeveer 12% over het gehele energiegebied 10keV tot 10MeV.

$$D_{\text{weefsel}}[\text{rad}] \approx X[\text{röntgen}] \quad (4.31)$$

Indien exposie gemeten, dan volgt uit 4.28 en 4.24:

$$D_m = \frac{^{GDE} (\mu_{\text{en}}/\rho)_m}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}} \frac{W_{\text{lucht}}}{e} X \quad (4.29)$$

bij benadering geldt:

In woorden: de geabsorbeerde dosis in weefsel uitgedrukt in rad heeft in het 100keV-10MeV interval dezelfde numerieke waarde als de exposie uitgedrukt in röntgen.

Relatie tussen geabsorbeerde dosis en kerma

$$K_{\text{lucht}} = \frac{^{GDE} (\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{lucht}}}{(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{lucht}}} \frac{W_{\text{lucht}}}{e} X = \frac{1}{1-g} \frac{W_{\text{lucht}}}{e} X \quad (4.32)$$

Luchtkerma is energie-equivalent van exposie gecorrigeerd voor remstraling in geval van geladen deeltjes evenwicht (dit laatste wordt niet vermeld in het boek)

$$K = \Phi E \mu_{\text{en}}/\rho + \Phi E (\mu_{\text{tr}}/\rho - \mu_{\text{en}}/\rho) \quad (4.33)$$

waarbij de eerste term als K_{col} en de tweede term als K_{rad} kan worden opgevat. hieruit volgt:

$$D = K_{\text{col}} \quad (4.34)$$

Dosis in materiaal m , uitgaande van K_{lucht} :

$$D_m^{GDE} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{tr}/\rho)_{lucht}} K_{lucht} \quad (4.35)$$

aangezien deze verhouding ongeveer 1 is (binnen 10%) voor weefsel en water geldt voor praktische stralingsbeschermingsdoeleinden:

$$D_{weefsel} \approx D_{water} \approx K_{lucht} \quad (4.36)$$

i.h.a. kerma: karakteriseert het stralingsveld, en D karakteriseert de wisselwerking tussen stralingsveld (Φ) en materie (μ_{en}/ρ).

Grensvlakdosimetrie

- Vacuum-materie overgang
 - Kerma hoogst aan oppervlak ($\Phi E \mu_{tr}/\rho$)
 - D is laag want GDE is nog niet opgebouwd
 - op diepte d ($D=K$) bestaat geladen deeltjes evenwicht, dieper is sprake van een glijdend evenwicht
- Overgang 2 media
 - op grensvlak discontinuïteit K, want discontinuïteit in μ_{tr}/ρ .
 - op grensvlak $K_1/K_2 = (\mu_{tr}/\rho)_1/(\mu_{tr}/\rho)_2$ en $D_1/D_2 = (S_{el}/\rho)_1/(S_{el}/\rho)_2$
- Weefsel-bot-weefsel overgangen (voorbeeld 175 keV fotonen)
 - $D_{bot,gde} > D_{weefsel,gde}$ want $(\mu_{en}/\rho)_{bot} > (\mu_{en}/\rho)_{weefsel}$ ($Z_{eff,bot} > Z_{eff,weefsel}$, dus meer fotoeffect)
 - Grensgebied $D_{bot} < D_{weefsel}$ want $(S_{el}/\rho)_{bot} < (S_{el}/\rho)_{weefsel}$, vanwege de lagere elektronendichtheid in bot (energie afgifte elektronen gaat via botsingen met elektronen)

Meting van dosimetrische grootheden

Bragg-Gray principe (cavity theorie):

- deeltjesevenwicht om V
- vervang V door holte. Als V klein: geen verandering van N, E, en richting van geproduceerde secundaire elektronen $\Phi_{holte} = \Phi_{medium}$

Er geldt dan voor de dosis in het medium D_m :

$$\frac{D_m}{D_g} = \frac{(S_{el}/\rho)_m}{(S_{el}/\rho)_g} \equiv s_{mg} \quad (4.37)$$

Met D_g de dosis in het gas.

$$D_g = \frac{Q}{m} \frac{W_g}{e} \quad (4.38)$$

met Q de in de holte vrijgemaakte lading, m de massa van het gas in de holte, W_g de gemiddelde energie afgegeven per ionisatie en e de elementaire lading.

Dus

$$D_m = s_{mg} \frac{Q}{m} \frac{W_g}{e} \quad (4.39)$$

dit is de Bragg-Gray relatie.

Het wandmateriaal van de detector dient dezelfde Z_{eff} te hebben als het medium (bijv. weefsel-equivalent of lucht-equivalent (exposimetring))

Meting exposie gebeurt in vrije-lucht (standaard) ionisatiekamer.

Alleen voor $E < 300\text{keV}$, want anders worden afmetingen detector te groot (ruimte om meetvolume dient $>$ maximale dracht van secundaire elektronen te zijn)

Gammadosismetrie van puntbronnen

Voor nuclide als isotrope puntbron geldt:

$$\dot{K} = \frac{A}{4\pi r^2} \sum_i E_i y_i (\mu_{tr}/\rho)_i$$

Met sommatie over alle gamma's die bij het verval vrijkomen en y_i de yield.

Voor het luchtkermatempo is de luchtkermatempoconstante gedefinieerd als:

$$\Gamma_\delta = \frac{1}{4\pi} \sum_i E_i y_i (\mu_{tr}/\rho)_{i,lucht} \quad (E_i > \delta)$$

zodat:

$$\dot{K} = \Gamma_\delta \frac{A}{r^2} \quad (4.40)$$

Vuistregel voor gamma's in weefsel (1 gamma per desintegratie)(aan de veilige kant):

$$1 \text{ MBq heeft } 1 \mu\text{Gy h}^{-1} \text{ op } 0.5 \text{ m} \quad (4.47)$$

Γ_δ wordt ook wel bronconstante genoemd, en is karakteristiek voor een nuclide.

Het subscript δ geeft de drempelwaarde van fotonen die in de berekening zijn meegenomen.

De waarde van δ wordt meestal op 10 of 20 keV gesteld.

Γ_δ omvat bijdragen van: gammastraling, interne remstraling en karakteristieke straling.

$$\Gamma_\delta = 45,9 \sum_i E_i y_i (\mu_{tr}/\rho)_{i,lucht} \quad [\text{in } \mu\text{Gy m}^2 \text{MBq}^{-1} \text{h}^{-1}] \quad (4.44)$$

Benadering voor puntbron die 1 gamma per desintegratie uitzendt ($E > 60 \text{ keV}$):

$$\Gamma = \frac{1}{8} E \quad [\text{in } \mu\text{Gy m}^2 \text{MBq}^{-1} \text{h}^{-1}] \quad (4.43)$$

Vroeger werd exposietempo gebruikt i.p.v. luchtkermatempo:

$$\dot{X} = \Gamma \frac{A}{r^2} \quad (4.45)$$

maar deze G (veelal gegeven in $\text{Rm}^2 \text{Cih}^{-1}$ (Röntgen, Curie) houdt geen rekening met karakteristieke straling t.g.v. IC en EC, en interne remstraling.

Bron van 1MBq die per desintegratie 1 gamma uitzendt:

$$D_{\text{weefsel}} (\mu\text{Gy h}^{-1}) = 45,9 \sum_i E (\text{MeV}) (\mu_{en}/\rho)_{\text{weefsel}} (m^2 \text{kg}^{-1}) \quad (4.46)$$

β -dosimetrie

$$\dot{D} = J_\beta(x) \frac{A}{r^2} \quad (4.49)$$

Soms wordt $J_\beta(x)$ benaderd als:

$$J_\beta(x) = c \frac{e^{-\nu x}}{(\nu x)^2} \quad (4.50)$$

met c een constante en n een absorptiecoëfficiënt [m^{-1}]. Alleen voor β -stralers met $\bar{E} < 0.2 \text{ MeV}$

$$\dot{D} = \varphi S_{\text{col}} / \rho \quad (4.51)$$

hetgeen de volgende vuistregel oplevert ($S_{\text{col}} \approx 0.2 \text{ MeV m}^2 \text{kg}^{-1}$)

$$\text{Vuistregel voor } \beta\text{'s in weefsel:} \\ 1 \text{ MBq geeft } 1 \text{ mGy h}^{-1} \text{ op } 0.1 \text{ m} \quad (4.52)$$

neutronendosismetrie

lijkt op fotonen-dosismetrie. Vrijgemaakte geladen deeltjes (protonen) hebben korte dracht en produceren weinig remstraling waardoor in goede benadering kan worden gesteld:

$$D \approx K = \Phi E \mu_{tr} / \rho \quad (4.53)$$

Hoofdstuk 5 : Biologische gevolgen van straling

Uitgangspunt is dat waarneembare effecten van ioniserende straling voornamelijk veroorzaakt worden door DNA schade.

Effecten op moleculair en cellulair niveau

Opbouw en functie van DNA

Celkern bevat verschillende chromosomen die ieder een gedeelte van het DNA bevatten.

DNA basen: Adenine(A)-Thymine(T) en Cytosine(C)-Guanine(G)

Iedere 3 base(paren) coderen voor één aminozuur.

Een gen is een gedeelte van het DNA dat voor 1 eiwit codeert. (1 mens = 100.000 genen)

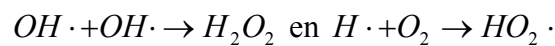
Moleculaire effecten

Ioniserende straling geeft energie af in de vorm van excitaties (~50%) en ionisaties (~50%), waarvan de laatste de meeste schade veroorzaken.

Directe effecten: schade door directe excitatie/ionisatie (van DNA), ~1/3 effect van ioniserende straling

Indirecte effecten: ionisaties/excitaties produceren radicalen die voor de waargenomen schade zorgen, ~2/3 effect van ioniserende straling (range is enkele nm)

Belangrijke radicalen door water: $H\cdot$ en $OH\cdot$. leveren reactieve verbindingen:



Kunnen reageren met organische verbindingen en voor cross-links zorgen.

Radicalen komen ook voor in de afwezigheid van ioniserende straling, en worden opgeruimd door anti-oxidanten.

Belangrijkste vormen DNA-schade:

- Beschadiging stikstof basen
- cross-links (DNA-DNA en DNA-eiwit verbindingen)
- enkelstrengsbreuken
- dubbelstrengsbreuken (grootste probleem)

Herstelmechanismen

- DNA breuken (enkel/dubbelstrengs) (duurt minuten)
- Base-excisie herstel (knippen en plakken) (duurt 1 à 2 dagen)

Effecten op de cel

- optreden van processen vóór herstel DNA schade
- Het ontstaan van gemodificeerde celtypen
 - genmutaties (relatief kleine DNA veranderingen)
 - chromosoom-abberaties (grote beschadigingen chromosomen)
- Celdood (evt ná enkele delingen).
 - Necrose: cel kan niet meer delen en sterft af
 - Apoptose: cel beslist tot systematische afbraak

Voor DNA-synthese wordt een biomoleculaire controle uitgevoerd, en voor deling is er nog een checkpoint. indien schade wordt geconstateerd, wordt de deling uitgesteld voor repair en als repair niet mogelijk blijkt vindt apoptose

plaats (geprogrammeerde celdood) gevolgd door autolyse (“oplossen” van de cel)

○ Oorzaken:

- Lethale schade (dubbelstrengsbreuken)
- Sublethale schade (enkelstrengsbreuken dicht bij elkaar)

Modificerende factoren

- Totale dosis
- Aanwezigheid zuurstof in de cel versterkt indirecte effecten via radicaal vorming. Daarom alleen voor lage LET straling van belang. OER = Oxygen Enhancement Ratio kan 2-3 bedragen
- LET van de straling. Hoge ionisatie-dichtheid (α 's en n 's) geeft veel directe effecten.
- Cellen zijn gevoeliger naarmate ze een hogere delingsactiviteit vertonen en ze minder gedifferentieerd zijn.
- Dosistempo: een hoger dosistempo levert een grotere schade dan een laag dosistempo, doordat in het laatste geval herstel kan plaatsvinden. Dit is de basis voor fractionering in de radiotherapie
- Temperatuur ($> 42^\circ$) kan het effect van ioniserende straling verhogen (hyperthermie)

Kwantificering van cellulaire effecten

Bij benadering bedraagt de overlevende fractie S :

$$S = e^{-(\alpha S + \beta D^2)} \quad (5.1)$$

waarbij de lineaire term een dubbelstrengsbreuken door één voltreffer (lethale schade), en de kwadratische term door twee afzonderlijke treffers verrekent (sublethale schade).

Voor hoge LET schade is de kwadratische term verwaarloosbaar.

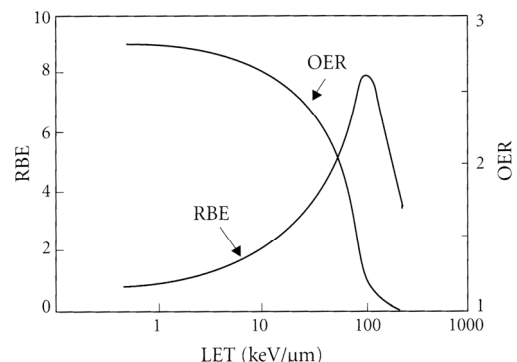
RBE is de Relative Biological Effectiveness:

$$RBE_{\text{stralingssoort } i, \text{ effect } j} = \frac{D_{\text{referentiestraling, effect } j}}{D_{\text{stralingssoort } i, \text{ effect } j}} \quad (5.2)$$

referentie straling bestaat uit 200 à 300keV fotonen.

De RBE neemt toe van ~1 voor een LET van 1 keV/ μ m tot ~8 voor een LET van 100 keV/ μ m (max) waarboven de RBE sterk daalt.

De OER neemt af van ~2.5 voor een LET van 1-10 keV/ μ m naar ~1 voor een LET van 100 keV/ μ m en hoger.



Classificatie van biologische effecten

- somatische (in bestraald persoon) versus genetische (in nageslacht) effecten
- vroege (tot maanden) versus late (jaren) effecten
- deterministische versus stochastische effecten

Kenmerken van deterministische effecten

- Er treedt celdood op
- Drempeldosis (typisch ~10tallen Gy), dosis waarbij verminderd functioneren in 1-5% van een bestraalde populatie klinisch waarneembaar is.

- Sigmoide curve: boven drempeldosis snelle toename tot 100% zichtbaar effect
- Ernst neemt toe met de dosis

Voornamelijk waarneembaar ná de gemiddelde levensduur van de betrokken cellen.

De cellulaire schade is weliswaar stochastisch van aard, maar door het grote aantal betrokken cellen is het klinisch effect deterministisch van karakter

Kenmerken van stochastische effecten

- Er treden mutaties op
- geen drempeldosis
- ernst onafhankelijk van de dosis
- De kans (incidentie I) volgt lineair-kwadratisch verloop met de dosis (D):

$$I = (I_o + \alpha_1 D + \alpha_2 D^2) e^{-(\alpha_1 S + \beta_2 D^2)} \quad (5.3)$$

Kwaadaardige tumoren en erfelijke aandoeningen in het nageslacht.

Inductie van tumoren door ioniserende straling:

hoog gevoelig: beenmerg, schildklier, borstklier

laag gevoelig: prostaat, uterus

Latentietijd is de tijd tussen de initiële gebeurtenis en een verhoogde incidentie.

Risicoperiode is de periode vanaf de minimale latentietijd tot de tijd waarin er geen verhoogde incidentie meer is.

Leukemie: minimale latentietijd ~2 jaar, piek 5-10 jaar, risicoperiode 20-25 jaar

Vaste tumoren: minimale latentietijd ~19 jaar, piek 20-30 jaar, risicoperiode 40 jaar

Ioniserende straling leidt tot

- DNA schade die
 - óf hersteld wordt
 - óf leidt tot celdood (deterministische effecten)
 - óf leidt tot mutaties (stochastische effecten)

Deterministische effecten

Deze hebben een drempeldosis die enkele tot 10-tallen Gy bedraagt.

Daarom alleen van toepassing bij ongevallen en radiotherapie, niet bij reguliere radiologische werkzaamheden.

De klinische tolerantiedosis (gebruikt in RT) is de dosis (gefractioneerd toegediend) die in een periode van 1-2 maanden bij minder dan 5% van de patienten tot ongewenste effecten leidt.

Acute effecten bij bestraling van het hele lichaam

- Verandering bloedbeeld (vanaf 0.25 Gy)
- Stralingziekte (drempeldosis >1 Gy op romp): hoofdpijn, misselijkheid, overgeven, diarree (stralingskater)
- Beenmergsyndroom (drempeldosis 3-10 Gy, maar vanaf 0.25 Gy al veranderingen in bloedbeeld): stamcellen in het beenmerg dood, waardoor geen aanmaak van bloedcellen. Afname afweer (witte bloedcellen), bloedarmoede (rode bloedcellen), optreden inwendige bloedingen (bloedplaatjes). Ook wel infectiedood genoemd.
- Maag-darmsyndroom (drempeldosis >10 Gy): stamcellen darmwand dood. Ernstige misselijkheid, overgeven, bloederige diarree, infecties. Prognose zonder behandeling: 2 weken.
- Centraal zenuwstelselsyndroom (drempeldosis >50 Gy, bestraling schedel voldoende). Zenuwcellen zijn afgestorven en/of beschadigd. Symptomen: braken,

misselijkheid, stuiptrekkingen, desoriëntatie, bewusteloosheid. Prognose 1 à 2 dagen.

- Huid en longschade kan bij ~10 Gy full body zodanig zijn dat sterfte optreedt.

Partieële bestraling

- Huid. Drempeldosis erytheem 3-8 Gy (acuut) tot 30 Gy (gefractioneerd/geprotaheerd) (lage LET straling). Tevens tijdelijke of permanenten ontharing.
- Oog. Cataract/staar. Drempeldosis 5-8 Gy (gefractioneerd, lage LET)
- Gonaden. Tijdelijke of permanente (Voor mannen, 0.15-1 Gy acuut en gefractioneerd, voor vrouwen 0.65-2 Gy acuut en 6-20 Gy gefractioneerd) steriliteit.
- Bot. Bij kinderen: vertraagde groei. Bij volwassenen op lange termijn: grotere gevoeligheid voor breuken
- Beenmerg (drempel 0.5 Gy)
- Klierweefsel. I.h.a. relatief ongevoelig door lage delingssnelheid
 - speekselklieren (droge mond, met tot gebitsschade tot gevolg)
 - schildklier (groeiachterstand)
 - Borstweefsel van jonge meisjes (verminderde melkklierfunctie op latere leeftijd)

Late deterministische effecten

- atrofie (afname weefselhoeveelheid)
- schade aan bloedvaatjes
- chronische ontstekingen (chronische longontsteking)
- fibrose (verbindweefseling) (bv longfibrose)
- sclerose (weefselverharding)
- necrose (weefselsterfte)
- specifieke veroudering

Somatische Stochastische effecten

Betreft tumorinductie en heeft geen drempeldosis

Tumorinductie is een meerstappenproces:

- 1) initiatie: optreden mutaties in genen betrokken bij celdeling, celdifferentiatie en herstel.
- 2) promotie: stimulatie celdeling en het ontstaan van meer mutaties
- 3) progressie: doorgroei tot potentiële kankercellen

Betrokken genen:

- oncogenen: stimuleren celgroei en overleving
- tumorsuppressorgenen: remmen celgroei, versterken apoptose en verzorgen differentiatie
- DNA herstel genen

Risicoschattingen

- Het is duidelijk aangetoond dat hoge doses straling (2-8Gy) leukemie en andere vormen van kanker kunnen veroorzaken.
- Verschillende soorten kanker zijn niet specifiek voor ioniserende straling en treden zonder direct aanwijsbare oorzaak op, ook bij “niet bestraalde personen”.

Modellen:

- Additief risicoprojectiemodel: gedurende risicoperiode ieder jaar constante extra kans op tumoren. (bruikbaar voor leukemie en botkanker)
- Multiplicatief risicoprojectiemodel: aantal tumoren is een constante fractie hoger dan de natuurlijke incidentie (bruikbaar voor vaste tumoren)

Risicogetal = kans op kanker per persoon per eenheid van dosis [Gy^{-1} of Sv^{-1}]

Berekeningsmethoden:

- 1) als ΔN de extra kans op kanker per jaar is tgv een collectieve dosis D voor een populatie van P personen en de risicoperiode y jaren bedraagt is het risicogetal $\Delta N \cdot y / D \cdot P$.
- 2) gebruik dosis-effect relatie (lineair: risicogetal is helling van de lijn)

ICRP60: Risicogetal is 0.1 Sv^{-1} ofwel 10% verhoging van de kans op fatale kanker per Sv voor uniforme lichaamsbestraling. Dit is op grond van hoge dosis data (lage LET straling)!

Genetische effecten

Zijn afwijkingen in het nageslacht (als gevolg van bestraling van de ouderlijke geslachtscellen)

relevante DNA schade:

- genmutaties
- chromosoomafwijkingen

Ernst schade in bananenvliegjes en muizen:

- letale schade
- zichtbaar nadelige schade
- niet zichtbare nadelige mutaties

Bepaling genetisch risico

Bijna alle erfelijke afwijkingen hebben een genetisch/erfelijke component en een omgevings component.

- Directe methode: Risico op genetische veranderingen per gonadendosis per generatie. Bedraagt 20-30 per 1000 000 per 10mGy voor bestraling gonaden man en 0-9 per 1000 000 10mGy voor bestraling gonaden van de vrouw
- Indirecte methode: verdubbelingsdosis, de hoeveelheid straling benodigd om 2 maal de natuurlijke incidentie van genetische effecten te krijgen. Deze dosis is $\sim 1 \text{ Gy}$ (voor laag dosistempo en lage LET) (Conservatief)

Risicogetal voor genetische effecten, uitgangspunten:

- Gonadendosis
- lineaire dosis-effect relatie zonder drempeldosis
- laag dosistempo
- lage LET straling
- alleen levendgeborenen
- mens heeft dezelfde stralingsgevoeligheid als de muis.

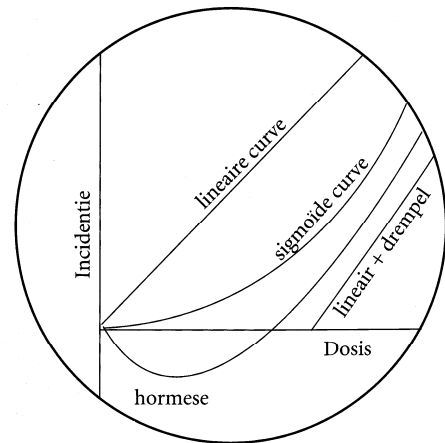
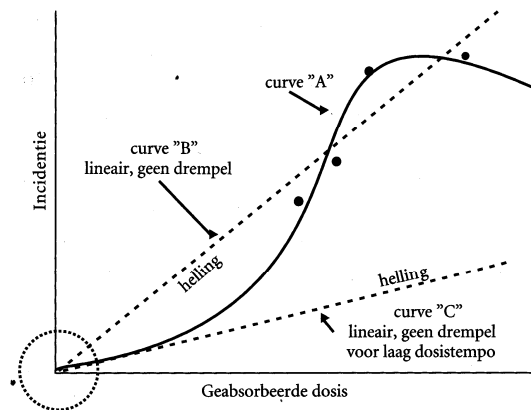
Zowel het volledig genetische als multifactoriële risicogetal bedraagt $0.5 \cdot 10^{-2} \text{ Gy}^{-1}$ zodat het totaal op $1 \cdot 10^{-2} \text{ Gy}^{-1}$ uitkomt (gonadendosis)

Kwantificering van stochastische effecten t.b.v. stralingsbescherming

DDREF

Dose and Dose-Rate Effectiveness Factor, is een correctie factor voor dosis-effect relaties die bepaald zijn in het hoge dosis gebied, als deze toegepast worden voor het lage-dosis gebied (zie figuur hieronder), en deze is gesteld op een factor 2.

Daarom is het in lage dosis gebied het risicogetal gesteld op 0.05 Sv^{-1} (kans op fatale kanker)
 In het algemeen wordt het linear-no-threshold model gebruikt voor dosis-effect relaties in het lage dosis gebied, omdat dit van de beschikbare modellen het hoogste effect geeft (liever over- dan onderschatting) (zie figuur hieronder)
 Hormese is het model dat voor het risico op (fatale) kanker een minimum vertoont bij een bepaalde (lage) dosis, en niet minimaal is voor géén dosis.



Weefselweegfactoren

De weefselweegfactoren bepalen voor ieder orgaan/weefsel de relatieve bijdrage aan het totale detriment (gezondheidsschade). De som van de weefselweegfactoren is daarom 1.
 In het detriment worden meegenomen

- De kans op kanker met fatale afloop
- De kans op kanker met niet-fatale afloop
- Aantal verloren levensjaren
- Ernstige genetische effecten

Detriment coëfficiënten voor stochastische effecten

Populatie	Detriment			
	Fatale Kanker	Niet Fatale Kanker	Ernstige erfelijke effecten	totaal
beroepsbevolking	4	0.8	0.8	5.6
gehele bevolking	5	1	1.3	7.3

Effecten van prenatale bestraling (teratogene effecten)

- 1^e 3 weken : dood of niet dood
- 3-8 weken : misvormingen (deterministisch met drempel 0.1 Gy)
- vanaf 4^e week : somatisch stochastisch (tumoren in 1^e 10 jaar) kans 2 à 3 maal die van bevolking.
- 8^e-25^e week : mentale retardatie (-30 IQ-punten/Gy)

Epidemiologische gegevens en risicogetallen

Extrapolatie van hoge naar lage dosisregime is alles behalve evident.

Epidemiologische gegevens voor stochastische effecten

- Hiroshima en Nagasaki
- Groepen bestraalde patienten (geselecteerde groep met partiële bestraling)

- Blootgestelde werkers
- Gegevens afkomstig uit blootstelling bevolking
- Vrouwen met baarmoederhalskanker

Hoofdstuk 6 : Dosimetrie II (stralingsbeschermingsgrootheden)

Stralingsrisico hangt af van:

- Stralingssoort (via w_R expliciet in H_T en E opgenomen)
- Dosistempo
- Orgaan/weefsel blootgesteld (via w_T in expliciet E opgenomen)
- Leeftijd
- Geslacht

Limiterende Grootheden

Equivalente Dosis

Orgaandosis voor orgaan T:

$$D_T \equiv \frac{\varepsilon_T}{\mu_T} \quad (6.1)$$

w_R is de stralingsweegfactor. Type straling gaat uit van het externe stralingsveld.

w_R	Soort straling
1	Fotonen, elektronen, muonen
5	p ($E > 2$ MeV), n ($E < 10$ keV, $E > 20$ MeV)
10	n (10-100 keV, 2-20 MeV)
20	n (100 keV-2 MeV), α , splijtingsfragmenten, zware deeltjes

Equivalente dosis wordt gedefinieerd in een orgaan als:

$$H_T \equiv \sum_R w_R D_{T,R} \quad (6.3)$$

D wordt gegeven in Gy, H_T in Sv, feitelijk dezelfde eenheid)

Equivalente doses t.g.v. verschillende soorten straling kunnen worden opgeteld.

H_T is alleen toepasbaar in de normale stralingshygiënische praktijk (lage dosis-regime)

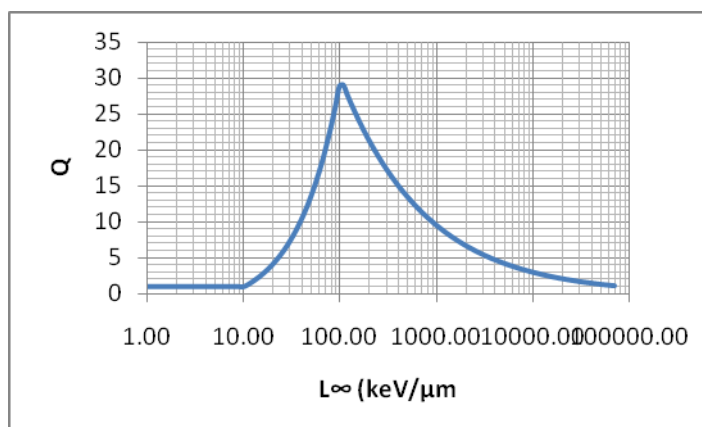
Stralingsweegfactor, kwaliteitsfactor en RBE

Vóór 1990 werd de kwaliteitsfactor $Q[L_\infty]$ gebruikt om de effectiviteit van straling te duiden.

L_∞ [in keV/ μ m]	Q
<10	1
10-100	$0.32 L_\infty^{-2.2}$
>100	$300(L_\infty)^{1/2}$

5 MeV e : $L_\infty = 0.2$ keV/ μ m

5 MeV α : $L_\infty = 91$ keV/ μ m



Ook voor Q geldt dat deze alleen toepasbaar is in de normale stralingshygiënische praktijk.

RBE alleen toepasbaar in laboratoriumomstandigheden, niet voor praktische stralingsbescherming.

WR(1990): bepaald door stralingsoort buiten het lichaam, en toegepast op de orgaandosis D_T .
 Q wordt bepaald door L_∞ in het interactiepunt en toegepast op de locale dosis D .

Dosisequivalent

$$H \equiv QD \quad (6.5)$$

Oude grootheid.

Eenheid is Sv of rem (röntgen equivalent man, 100 rem = 1 Sv).

Q wordt nog gebruikt in de definitie van operationele grootheden (zie verderop)

Effectieve dosis E

$$E \equiv \sum_R w_R \sum_T w_T D_{T,R} = \sum_R w_T \sum_T w_R D_{T,R} \quad (6.8)$$

De weefselweegfactor w_T verdisconteert de verschillen in gevoeligheid van verschillende weefsels en organen (zie hfst 5) (spieren zijn ongevoelig, beenmerg juist gevoelig)

In w_T is afgeleid uit de risicofactoren voor stochastische effecten.

Normering: $\sum_T w_T = 1$

E is additief. Ook E kan alleen toegepast worden in de normale stralingshygiënische praktijk ($D_T \approx < 0.1$ Gy)

Effectief dosisequivalent H_E

Effectief dosisequivalent (H_E in Sv) is volgens het boek

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad (6.9)$$

waarbij de waarden van w_T uit ICRP-26 (1977) genomen moeten worden, en H_T berekend moet worden als H gemiddeld over het orgaan (dus ipv w_R Q gebruiken). Dus feitelijk (eigen

interpretatie) $H_E = \sum_T w_{T,ICRP-26} \frac{1}{V_T} \sum_R Q_R \int_{V_T} D_R dV$

Operationele Grootheden

De limiterende grootheden E en H_T zijn in het lichaam gedefiniëerd, en dus niet eenvoudig meetbaar. Daarom worden operationele grootheden gedefiniëerd die wèl praktisch meetbaar zijn en een goede maat geven voor E of H_T .

- Zwak doordringende straling (α, β ($E < 2\text{MeV}$)): H_T van de huid is van bepalend.
- Sterk doordringende straling (n, γ ($E > 15\text{keV}$)): E is bepalend.
- Omgevingsdosimetrie (bepaling bewaakte, gecontroleerde en verboden zones)
- Persoonsdosimetrie

Fantomen

Voorzien in relatie tussen H_T en E enerzijds en Φ en K anderzijds.

- ICRU bol ($\varnothing 30$ cm, $\rho = 1 \text{ gcm}^{-3} \approx$ zacht weefsel)
- ICRU slab ($30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$, weefselequivalent materiaal)
- Antropomorfe fantomen

Bestralingsgeometriën

- AP, PA, LAT (LLAT, RLAT) : bij één enkele bron in een bepaalde oriëntatie

- ROT (rotatie om lange as) : persoon die zich in het stralingsveld beweegt
- ISO ($\Phi \neq f(\alpha)$) : immersie in een radioactief gas

Omgevings/richtingsdosisequivalent

Beiden gedefinieerd in de ICRU bol op diepte d [in mm]

- Uitgebreid stralingsveld: veld in gehele bol is gelijk aan veld ter plekke van het bestudeerde punt P.
- Uitgericht stralingsveld: beschouw veld alsof alle deeltjes uit één richting komen

Omgevingsdosisequivalent $H^*(d)$ in het punt P is het dosisequivalent dat zou worden geproduceerd door het corresponderende uitgebreide en uitgerichte veld in de ICRU bol op diepte d , op een straal tegenovergesteld aan de richting v.h. veld.

Voor de meting is een instrument met een isotrope responsie en dient het stralingsveld uniform te zijn over het volume van de detector.

- Sterk doordringende straling: $H^*(10)$.
- Zwak doordringende straling: $H^*(0.07)$ (huid) of $H^*(3)$ (ooglen).

Richtingsdosisequivalent $H'(d, \Omega)$, vergelijkbaar met $H^*(d)$, maar dan in het uitgebreide veld op een diepte d op een straal bepaald door de gegeven richting Ω .

Eenheid van $H^*(d)$ en $H'(d, \Omega)$ is Sv.

Persoonsdosisequivalent

$H_p(d)$ is het dosisequivalent op een diepte d [in mm] onder het gespecificeerde punt op het lichaam. Gangbaar: $d=10$ mm.

Detektor dient op het lichaam gedragen te worden en voorzien te zijn van een geschikte dikte weefselequivalent materiaal (10 mm).

$H_p(10)$ is in principe afhankelijk van de persoon en van de plaats van het specificerde punt.

Berekening geschiedt m.b.v. fantoom (antropomorf/bol/slab) $H_{p,sphere}$, $H_{p,slab}$.

$H_p(10)$ wordt geregistreerd in het Nationaal Dosis Registratie en Informatie Systeem (NDRIS).

Dosisconversieconstanten voor externe blootstelling

Fotonen (bijv): $H_p(10) = C(E, \alpha) K_a$ (6.11)

Met K_a het luchtkerma vrij in lucht en $C(E, \alpha)$ de dosisconversiecoëfficiënt voor energie E en hoek α .

Neutronen (bijv): $E = C_{AP}(E) \Phi$ (6.12)

Met Φ de neutronenfluentie.

Voor een puntvormige bron geldt:

$$\dot{H}^*(d) = h(d) \frac{A}{r} \quad (6.13)$$

Met $h(d)$ de omgevingsdosisequivalenttempoconstante (analoog aan luchtkermatempoconstante Γ , zie vgl 4.40).

Voor γ 's: $\dot{H}^*(10)$ en $h(10)$, voor β 's $\dot{H}^*(0.07)$ en $h(0.07)$

Conversiecoëfficiënten voor fotonen

$H^*(10)/K_a \approx 1.1 \text{ SvGy}^{-1}$ voor $E > 2 \text{ MeV}$ en maximaal 1.7 voor $E=60 \text{ keV}$ (zie fig 6.11)

Een dosimeter ontworpen om $H^*(10)$ te meten dient een energieresponsie te hebben van $H_{p,slab}(10,0^\circ)/K_a$, omdat dit de meest conservatieve schatting geeft van de effectieve dosis.

Conversiecoëfficiënten voor neutronen

Maken gebruik van een effectieve kwaliteitsfactor Q , vergelijkbaar met w_R . Q is maximaal voor $E=0.5$ MeV en bedraagt dan 20. Voor neutronen van onbekende energie wordt $Q=20$ gehanteerd.

Onderlinge relaties tussen grootheden

- Fysische grootheden (D , K_a , Φ)
- Limiterende grootheden (D_T , H_T , E) (gebruikt in wetgeving)
- Operationele grootheden (voor externe bestraling) $H'(d, \Omega)$, $H_p(d)$, kunnen gemeten worden met op juiste wijze gecalibreerde detectoren.

Stralingssoort	Limiterende grootheid	Operationele grootheid	
		omgevingsdosimetrie	persoonsdosimetrie
Doordringende straling	Effectieve Dosis	$H^*(10)$	$H_p(10)$
Zwak doordringende straling	Equivalentente huiddosis Equivalentente ooglensdosis	$H'(0.07, \Omega)$ $H'(3, \Omega)$	$H_p(0.07)$ $H_p(3)$

Overzicht grootheden:

- Orgaandosis (D_T in Gy) : gemiddelde afgegeven dosis in het orgaan T
- Stralingsweegfactor (w_R in $SvGy^{-1}$) : kwaliteitsfactor die afhankelijk is van het soort straling
- Equivalentente dosis (H_T in Sv) : $H_T \equiv \sum_R w_R D_{T,R}$ (dus dosis per orgaan gewogen met de stralingsweegfactor)
- Kwaliteitsfactor (Q in $SvGy^{-1}$) : oude stralingskwaliteitsfactor, gebaseerd op L_∞ .
- Dosisequivalent (H in Sv) $H=QD$ (gedefinieerd in een punt) : oude grootheid, nog gebruikt voor definiëren operationele grootheden. Oude eenheid rem (röntgen equivalent man) = 0.01 Sv
- Weefselweegfactor (w_T , geen eenheid) : geeft de relatieve stralingsgevoeligheden van de diverse organen weer. Som over alle organen is 1.
- Effectieve dosis (E in Sv) : $E \equiv \sum_R w_R \sum_T w_T D_{T,R}$ (sommatie mag omgedraaid worden) is dus de gewogen totale lichaamsdosis. (w_T uit ICRP-60, 1990)
- Effectief dosisequivalent (H_E in Sv) is volgens het boek $H_E = \sum_T w_T H_T$ waarbij de waarden van w_T uit ICRP-26 (1977) genomen moeten worden, en H_T berekend moet worden als H gemiddeld over het orgaan (dus ipv w_R Q gebruiken). Dus

$$H_E = \sum_T w_{T,ICRP-26} \frac{1}{V_T} \sum_R Q_R \int_{V_T} D_R dV$$
- Omgevingsdosisequivalent ($H^*(d)$ in Sv) is gedefinieerd in een punt als het dosisequivalent dat zou worden geproduceerd door het corresponderende uitgebreid en uitgericht veld in de ICRU bol op diepte d [in mm] op de straal in de richting tegenovergesteld aan het veld. $H^*(10)$ is voor sterk doordringende straling, $H^*(3)$ is voor de ooglens en $H^*(0.07)$ is voor de huid.

- Richtingsdosisequivalent ($H'(d, \Omega)$ in Sv) is gedefinieerd in een punt als het dosisequivalent dat zou worden geproduceerd door het corresponderende uitgebreid veld in de ICRU bol op een diepte d [in mm] en op een straal in de gespecificeerde richting Ω .
- Persoonsdosisequivalent ($H_p(d)$) is het dosisequivalent op een diepte d [in mm] onder het gespecificeerde punt op het lichaam. Gangbaar: $d=10$ mm.

Overige stralingsbeschermingsgrootheden

Volgdosis

Is de geaccumuleerde dosis door inwendige besmetting.
Maximale integratietijd: volwassenen 50 jr, kinderen 70 jr.
Orgaanvolgdosis:

$$H_{50,T} \equiv \int_{t_0}^{t_0+50} \dot{H}_T dt \quad (6.14)$$

En effectieve volgdosis

$$E_{50} = \sum_T w_T H_{50,T} \quad (6.15)$$

Administratief wordt de totale effectieve volgdosis opgeteld bij de effectieve dosis van het jaar van inname.

Collectieve dosis

Collectieve effectieve dosis:

$$S_E = \int_0^\infty E \frac{dN}{dE} dE \quad (6.16)$$

Hoofdstuk 7 : Achtergrondstraling veroorzaakt door natuurlijke bronnen en menselijke activiteiten

Straling van natuurlijke oorsprong

Verreweg de grootste bijdrage aan collectieve dosis

Kosmische straling

op aardoppervlak circa 0.27 mSv/jr

neemt toe met hoogte op aardoppervlak. Kan tot 1 orde hoger zijn daardoor.

- Galactisch (van buiten ons zonnestelsel)
 - 90% p, 10% He^{2+} , beetje zwaardere kernen.
 - $E = 10\text{--}10^{14}$ MeV
 - constant
- Solair (afkomstig van onze zon)
 - Protonen en electronen
 - niet sterk genoeg om aardoppervlak te bereiken, maar moduleert de galactische straling die het aardoppervlak bereikt via het aardmagnetisch veld.
 - Niet constant: Zon actief: minder galactische straling.
- Stralings gordels (van Allen gordels)
van belang voor ruimtevaart
 - 1^e : e, 1000-3000 km tussen 30°NB en 30°ZB
 - 2^e : p, 15000 km tussen 60°NB en 60°ZB

Kosmogene radionucliden

Verwaarloosbare bijdrage aan collectieve dosis

Hoofdzakelijk ontvangen via ingestie

- $^{14}\text{N}(n,p)$ levert ^{14}C

Terrestrische straling

grote geografische variatie

- terrestrische radionucliden
 - primordiale radionucliden en hun vervalproducten (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th en ^{40}K).
In absoluut evenwicht met korter levende vervalproducten, verstoord door migratie/uitgassen (^{222}Rn , ^{220}Rn)
 - Concentratie vertonen grote geografische verschillen. Stollingsgesteente (graniet) hoog, sedimentair laag
 - Radioactieve grondstoffen in bouwmaterialen
- Uitwendige bestraling
 - Dosistempo in lucht (praktisch gelijk aan luchtkermatempo) op 1m boven grondoppervlak in NL $44\text{nGyhr}^{-1} = 386\mu\text{Gy/jr}$. Mondiaal 44nGyhr^{-1}
 - In gebouwen factor 1.5 tot 2.0 hoger dan buiten (enerzijds afscherming door muren, anderzijds activiteit uit bouwmaterialen)
- Radon en Radondochternucliden in de lucht (^{222}Rn , ^{220}Rn)
 - Hoofdzakelijk α -straling van belang, uitgezonden door radondochters

- Activiteitsconcentraties in de lucht, binnenshuis: 40Bq/m^3 ^{222}Rn mondiaal, NL 22Bq/m^3 . Buitenshuis 2Bq/m^3 .
- Uitwendige en inwendige bestraling. Luchtfermatempo in openlucht door radonvervalproducten is circa 1 nGy/h
- Inwendige bestraling als gevolg van ingestie
 - Vooral ^{40}K , gemiddeld 55Bq/kg lichaamsgewicht. Hierdoor 0.17 mSv/jaar door β^- straling.

Totale dosis ten gevolge van natuurlijke stralingsbronnen

Bestrallingscomponent	Effectieve jaardosis [mSv]	
	Normaal	Verhoogd
Kosmische straling	0.38	2.0
Kosmogene radionucliden	0.01	0.01
Terrestische straling		
• extern	0.46	4.3
• intern (excl Rn)	0.23	0.6
• Rn en vervalproducten		
○ Inhalatie ^{222}Rn	1.2	10
○ Inhalatie ^{220}Rn	0.07	0.1
○ Ingestie ^{222}Rn	0.005	0.1
Totaal	2.4	-

Doses veroorzaakt door menselijk handelen

Technologisch verhoogde natuurlijke straling

- Vliegereizen
effectief dosistempo op 1.5 km verdubbeld, op 20 km bijna 1000
enkele reis A'dam- NY $\sim 40\mu\text{Sv}$
- Bouwmaterialen (NORM, Naturally Occurring Radioactive Materials)
- Verbranding fossiele energiedragers

Straling van kunstmatige bronnen

- Medisch (NL $\sim 0.5\text{ mSvjr}^{-1}$)
 - Radiodiagnostiek
 - Zeer laag ($E < 0.1\text{ Sv}$) Röntgenopname extremiteiten, thorax, gebit
 - Middel ($< 0.5\text{ mSv}$ $E < 2\text{ mSv}$) Röntgenopname wervelkolom, contrast-onderzoeken, CT hersenen
 - Zeer hoog ($E > 10\text{ mSv}$) CT abdomen, interventies
 - Nucleaire geneeskunde
 - PET scan
 - Radiotherapie
- Gebruiksgoederen (TV, gaskousjes, rookmelders, laselctroden, keramiek, starters TL-verlichting, verlichting aanwijsinstrumenten)
- Kernsplijting/fusie
 - fallout

Totale stralingsbelasting van de gemiddelde Nederlander

In Nederland bedraagt de totale dosis t.g.v. natuurlijke stralingsbronnen $\sim 2 \text{ mSvjr}^{-1}$, en die van kunstmatige stralingsbronnen (vrijwel uitsluitend t.g.v. medische toepassingen) 0.5 mSvjr^{-1} .

Hoofdstuk 8 : Het beschermingskader van de ICRP

ICRP = International Commission on Radiological Protection

Stelt aanbevelingen op die de basis vormen van wetgeving in vele landen.

In Europa: Stelt de EU krachtens het Euratom verdrag basisnormen op, gebaseerd op ICRP aanbevelingen. EU lidstaten zijn verplicht deze basisnormen binnen 4 jaar om te zetten in wetgeving.

Grondslagen van de iCRP systematiek

Het uitgangspunt is preventie en beheersing (en: Control)

Er wordt onderscheid gemaakt tussen

- Handelingen (en: practices) : bezigheden die een verhoging van de blootstelling tot gevolg hebben
- Interventies : Vermindering van de blootstelling door bestaande bronnen die niet of nauwelijks beheersbaar zijn.

Er worden drie categorieën van blootstellingen onderscheiden:

- Beroepsmatige blootstelling
- Medische blootstelling
- Blootstelling van leden van de bevolking

Niet alle blootstellingen vinden ook daadwerkelijk plaats : potentiële blootstellingen.

Uitgangspunten voor de bescherming bij bestaande en voorgenomen handelingen

- Rechtvaardiging: er moet voldoende voordeel verbonden zijn aan het gebruik van ioniserende straling. Stralingsdetriment wordt gecompenseerd door aantoonbare voordelen.
- Optimalisatie van de bescherming (As Low As Reasonably Achievable) (Economische en maatschappelijke factoren inbegrepen). Als maat voor het individuele detriment geldt de effectieve dosis, en voor het groepsdetriment de collectieve effectieve dosis
- Individuele dosis en risicolimieten: hebben betrekking op het totaal van de blootstellingen veroorzaakt door alle bronnen welke niet expliciet zijn uitgezonderd. De door de ICRP aanbevolen dosislimieten dienen uitsluitend te worden toegepast in het kader van de beheersing van handelingen (dus niet van potentiële blootstellingen of interventie)
Dosislimieten zijn uitgedrukt per blootstellingsjaar. De volg dosis wordt administratief toegeschreven aan het jaar van inname. Limiet op effectieve dosis is primair bedoeld om het detriment t.g.v. stochastische effecten te beperken. Daarnaast zijn er beperkingen voor de equivalente dosis op bepaalde organen. Door deze combinatie wordt gedurende een mensenleven de drempeldosis voor deterministische effecten niet bereikt.

Uitgangspunten voor de bescherming bij interventie

- Interventie moet meer goed dan kwaad doen

- Interventie moet worden geoptimaliseerd

Werkingssfeer, toepassingsgebieden

- Zwangere vrouwen: aparte dosislimiet
- Medische blootstellingen: geen expliciete dosislimiet
Doses die door eigen behandeling worden ontvangen tellen niet mee voor dosislimiet als werker/bevolkingslid
Natuurlijke achtergrondstraling en radon tellen ook niet mee voor dosislimiet als werker/bevolkingslid

ICRP publicatie 60 (1990)

Actualisering van ICRP-26 (1977), plus conceptuele evolutie.

- Gegevens van stochastische effecten bij overlevenden kernexplosies in Japan.
- Bijna alle stochastische somatische effecten: multiplicatief i.p.v. additief risicoprojectiemodel.
- Genetische effecten: alle generaties worden meegenomen i.p.v. alleen de eerste 2.
- Introductie nieuwe weefselweegfactoren en de begrippen Equivalente dosis (HT) en effectieve dosis (E).
- Totale detriment wordt meegenomen, niet uitsluitend de sterftekans

Risicolimieten en dosislimieten

Beroepsmatig blootgestelden:

- Referentie: toegevoegde sterftekans van 10^{-3} .
- Via multiplicatief risico model : $E < 20 \text{ mSv j}^{-1}$.

Limitering: $E \leq 20 \text{ mSv j}^{-1}$, gemiddeld over 5 aaneengesloten jaren, mits in geen enkel jaar een waarde van 50 mSv wordt overschreden

- Aanvullende limieten:
 - Ooglens : 150 mSv j^{-1}
 - Huid : 500 mSv j^{-1} (op diepte 7 mg cm^{-2} , gemiddeld over elke cm^2)
 - Handen en voeten: 500 mSv

Leden van de bevolking

- Referentie: toegevoegde sterftekans van 10^{-4} .

Limitering: $E \leq 1 \text{ mSv j}^{-1}$. In speciale omstandigheden kan een jaar een hogere E-waarde worden toegestaan mits het gemiddelde over 5 aaneengesloten jaren, niethoger is dan 1 mSv j^{-1} .

- Orgaandosislimieten voor ooglens en huid zijn een factor 10 lager dan voor beroepsmatig blootgestelden
- Voor mannen en vrouwen geldt een gelijke limiet
- Zwangerschap geconstateerd dan
 - Wordt het ongeborn kind beschouwd als een lid van de bevolking (ook als moeder beroepsmatig blootgesteld wordt)
 - Geldt voor de resterende duur van de zwangerschap een aanvullende limiet van 2mSv voor de equivalente dosis op het oppervlak van de onderbuik van de moeder.

Hoofdstuk 9 : Inwendige besmetting

Doel van dit hoofdstuk: effectieve volgdosis bepalen voor:

- Radiologische werkers die met open bronnen werken
- Leden van de bevolking blootgesteld aan emissies in het milieu
- Patiënten waarbij i.h.k.v. nucleaire geneeskunde activiteit wordt ingebracht vallen niet onder inwendige besmetting, en in het algemeen gelden de hier behandelde benadering uitsluitend voor gezonde werkers / leden van de bevolking en niet voor patienten.

Besmettingroutes:

- Inhalatie (neus, mond, luchtpijp, longen) (belangrijkst)
- Ingestie (mond, slokdarm, maag-darm kanaal)
- Absorptie (door de intakte huis heen)

Onderscheid moet worden gemaakt tussen:

- Inname: de totale activiteit die via inhalatie/ingestie het lichaam binnenkomt
- Opname: het gedeelte van de inname dat in de lichaamsvloeistoffen terecht komt

Sommige elementen hopen zich op in specifieke organen

- Jodium in de schildklier
- Strontium, barium en radium in het botweefsel

Niet expliciet vermeld in ICRP publicaties:

- Wondbesmetting
- Injectie (prikincident)
- Activering (neutronen)

Equivalente en effectieve volgdosis

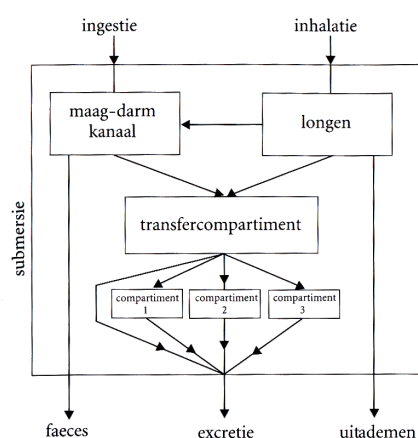
Equivalente volgdosis, $H_{50,T}$ en effectieve volgdosis, E_{50} , kunnen simpelweg opgeteld worden bij de H_T en E ten gevolge van uitwendige bestraling.

$H_{50,T}$ en E_{50} zijn volgdoses, en hebben betrekking op de totale dosis opgelopen ten gevolge van een inwendige besmetting, geïntegreerd over de standaardvolgtijd van 50 jaar. Voor inwendige besmettingen bij kinderen (jonger dan 20 jr) wordt een afwijkende volgtijd van 70 minus (leeftijd bij inname) jaar gehanteerd.

$$H_{50,T} = \int_{t_0}^{t_0+50} \dot{H}_T(t) dt \text{ en } E_{50} = \sum_T w_T H_{50,T} \quad (9.2)$$

Modelmatige aanpak

Voor de berekening van de volgdoses wordt gebruik gemaakt van modellen. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen bron- en doelorganen. Voor elke combinatie van een bron (S)- en een doelorgaan (T) wordt voor elke type straling (R) bepaald welke



Figuur 9.3: Schematische weergave van compartimenten en transportroutes in het lichaam

dosistempi $\dot{D}_{T,R,S}(t)$ de activiteit in het bronorgaan veroorzaakt in het doelorgaan. Sommatie van deze dosistempi over alle bronorganen, gewogen naar de respectievelijke stralingsweegfactoren w_R , geeft $\dot{H}_T(t)$.

Om het plaats- en tijdafhankelijke gedrag van radionucliden te beschrijven wordt gebruik gemaakt van een compartimentenmodel (fig 9.3).

Onder het transfercompartiment wordt het bloed en het lymfestelsel verstaan.

Het metabolisme van een element en zijn chemische verbinding wordt vertaald in

- Een parameter voor opname in het transfer compartiment t.g.v. ingestie
- Een opdeling in drie categorieën voor opname in het transfer compartiment t.g.v. inhalatie
- Een retentiefunctie die de activiteit in de compartimenten als functie van de tijd beschrijft.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende leeftijdsklassen.

In de modellering wordt gebruik gemaakt van een standaard “referentie mens”. De volwassen referentie mens weegt 70 kg, produceert 1.4 l urine per dag en ademt 1.2 m³ lucht per uur.

Uit de modelberekeningen volgen de zgn dosisconversiecoëfficiënten $e_{ing}(50)$ en $e_{inh}(50)$ in SvBq⁻¹. De effectieve volgdosis laat zich dan als volgt uitrekenen:

$$E_{50} = e(50) \times A_{in} \quad (9.3)$$

Waarbij A_{in} de ingenomen hoeveelheid activiteit is.

Voor de bepaling van E_{50} dient men te weten

- Welk nuclide het betreft
- In welke verbinding / fysische vorm het nuclide zich bevindt
 - Ingestie: f_1 = fractie die vanuit het maag-darmkanaal wordt opgenomen in het bloed (zie verderop)
 - Inhalatie
 - Gas of damp : oplosbaarheids/reactiviteits klassen (Solubility, Reactivity)
 - SR-0: onoplosbaar en niet reactief. Wordt eigenlijk niet opgenomen: er is in dit geval sprake submersie en $e(50)$ wordt gegeven in Sv d⁻¹(Bq m⁻³)⁻¹ (edelgassen)
 - SR-1: oplosbaar en/of reactief. Wordt gedeeltelijk opgenomen. (30% ET, 30% BB/bb, 40% AI)
 - SR-2: zeer goed oplosbaar of reactief. Complete en instantane opname. (Alleen in ET₂)
 - Aerosolen
 - Activiteitsmediane aerodynamische diameter (AMAD)
 - 1 (geringere totale depositie, maar wel dieper doordringend, waardoor grotere depositie in longblaasjes)
 - of 5 μm (hogere totale depositie, maar minder diep doordringend, waardoor geringere depositie in longblaasjes) (default ICRP parameter)
 - En longabsorptietype (alleen betrekking op opname in het bloed, niet op deeltjestransport)
 - V(ery fast) : 100% instantaan in bloed opgenomen
 - F(ast) : 100% in 10 min
 - M(oderate) : 10% in 10 min, 90% in 140 dagen

- S(low) : 0.1% in 10 min, 99.9% in 7000 dagen
- Hoe de inname plaatsvindt (ingestie of inhalatie)
- Hoeveelheid ingenomen activiteit (A_{in})

Bepaling equivalente volgdosis

$$H_{50,T} = \sum_S H_{50}(T \leftarrow S) \quad (9.4)$$

Voor stralingssoort i:

$$H_{50}(T \leftarrow S)_i = U_S \times SEE(T \leftarrow S)_i \quad (9.5)$$

Met

$H_{50}(T \leftarrow S)_i$ de equivalente volgdosis in T door stralingstype i in S [in Sv]

U_S het totaal aantal desintegraties in S van het radionuclide dat stralingssoort i uitzendt, gedurende 50 jaar na inname [Bqs]

$SEE(T \leftarrow S)_i$ De specifieke effectieve energie: de equivalente dosis in T veroorzaakt door stralingstype i, t.g.v. iedere desintegratie in S [Sv(Bqs)⁻¹] (de stralingsweegfactor zit hierin dus verwerkt)

Berekening $SEE(T \leftarrow S)_i$

$$SEE(T \leftarrow S)_i = \frac{Y_i E_i A F(T \leftarrow S)_i w_R}{m_T} \quad (9.9)$$

Met

Y_i emissiewaarschijnlijkheid van stralingstype i

E_i (gemiddelde) energie van stralingssoort i

$A F(T \leftarrow S)_i$ in T geabsorbeerde fractie van energie van stralingssoort i, per desintegratie in S uitgezonden

w_R stralingsweegfactor voor stralingstype i

m_T massa van het doelorgaan

voor α straling en elektronen wordt er vanuit gegaan dat de straling het bronorgaan niet verlaat.

Tenzij anders aangegeven wordt aangenomen dat de halveringstijd van de in het transfercompartiment aanwezige activiteit $T_{1/2, \text{biol}} = 0.25$ dag.

Éénmalige toevoer P_0 [in Bq] aan een compartiment op $t=0$:

$$\frac{dA_{\text{comp}}}{dt} = -(\lambda_f + \lambda_{\text{afvoer}}) A_{\text{comp}} \equiv -\lambda_{\text{eff}} A_{\text{comp}} \quad (9.10)$$

Met

A_{comp} de activiteit in het betreffende compartiment

λ_f de fysische vervalconstante

λ_{afvoer} totale verwijderingsconstante t.g.v. andere processen

oplossing van (9.10) levert de retentiefunctie (inconsistentie boek: voor retentiefunctie moet $P_0=1$ gelden):

$$A_{\text{comp}}(t) = P_0 e^{-\lambda_{\text{eff}} t} \quad (9.14)$$

Constance productie $\dot{P}$ [in Bqs⁻¹] aan een compartiment

$$\frac{dA_{comp}}{dt} = P - \lambda_{eff} A_{comp} \quad (9.15)$$

hetgeen als oplossing heeft (randvoorwaarde $A_{comp}(0) = 0$)

$$A_{comp}(t) = \frac{P}{\lambda_{eff}} (1 - e^{-\lambda_{eff} t}) \quad (9.16)$$

Retentiefunctie:

$$R(t) = \sum_{i=1}^n f_i e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2, biol, i}} t} \quad (9.21)$$

met de sommatie over alle compartimenten en f_i de fractie activiteit die vanuit het transfercompartiment naar orgaancompartiment i gaat. Het verval betreft uitsluitend het biologisch verval, niet het fysisch verval.

Dus voor de activiteit op tijdstip t geldt:

$$A_{comp, tot} = A_{comp, tot}(0) R(t) e^{-\lambda_f t} \quad (9.22)$$

ALI/DAC

ALI = Annual Limit on Intake

$$ALI = \frac{E_{50, liniet}}{e(50)} = \frac{20 mSv}{e(50)} [Bq] \quad (9.32)$$

DAC = Derived Air Concentration

$$DAC = \frac{ALI}{2000 \times 1.2} [Bq m^{-3}] \quad (9.33)$$

$1.2 m^3 h^{-1}$ is ademtempo 2000 h is het aantal werkuren per jaar.

Specifieke orgaanmodellen

Longmodel

Voor radiologische werkers en alle leden van de bevolking (met verschillende leeftijdsklassen).

Inhalatie is i.h.a. de belangrijkste besmettingsroute voor inwendige besmetting.

Compartimenten:

- Extrathoracal (ET)
 - ET_1 : neus
 - ET_2 : neus- en keelholte (pharynx) en strottenhoofd (larynx)
 - LN_{ET} : lymfeweefsel behorend bij ET
- Luchtwegen in de thorax (TH)
 - BB: luchtpijp (generatie 0) en bronchiën, vertakkingsgeneraties 1-8
 - bb : bronchiën, vertakkingsgeneraties 9-15
 - AI: longblaasjes (waar gasuitwisseling plaatsvindt)
 - LN_{TH} : lymfeweefsel behorend bij TH

Verdere onderverdeling van compartimenten wordt gebruikt om snel en langzaam opgenomen fracties te onderscheiden en de aanwezigheid van deeltjes in de wand van de betreffende organen.

Longzuivering:

ET_1 : zuivering alleen extern (neus snuiten), niet naar transfer compartiment)

Overige compartimenten: zuivering door deeltjes transport (verwijderingsconstante m) en absorptie in het bloed (s).

Totale verwijderingsconstante van een compartiment i , $\lambda_i = m_i + s_i$.

Het maag-darm kanaal

Compartimenten:

- ST: maag (toevoer door ingestie en deeltjetransport uit ademhalingswegen)
- SI : dunne darm (enige compartiment met uitwisseling met het transfercompartiment met transfercoëfficiënt λ_B)
- ULI : bovenste deel dikke darm
- LLI: onderste deel dikke darm (afvoer d.m.v. excretie)

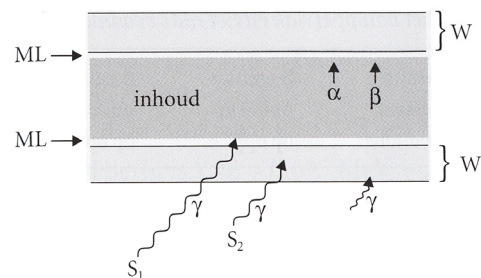
De absorptiefractie, of “oplosbaarheid” f_1 is gedefinieerd als:

$$f_1 = \frac{\lambda_B}{\lambda_{SI} + \lambda_B} \quad (9.36)$$

met λ_{SI} de transfercoëfficiënt van compartiment SI naar ULI.

In het dosimetrische model van maag-darmkanaal wordt de volgende onderverdeling gemaakt:

- Mucose Laag (ML)
 - Cells at risk (α, β, γ)
- Wand (W)
 - (γ)
- Inhoud
 - Bevat de radioactieve stoffen



Bovenstaand model is in 2007 vervangen door het Human Alimentary Tract (HAT) model

- Revisie dosimetrisch model
- Voor kinderen én volwassenen onder alle omstandigheden
- Absorptie in mond, maag en dikke darm ingebouwd
- Berekening dosis gevoelige cellen in diverse regio's
- Handmatige berekening niet meer uitvoerbaar

Beenweefsel

Cells at risk (doelorganen):

- Rode beenmerg (1.5 kg)
- Beenweefseloppervlak (Botvlies) ($12m^2$, 0.12kg, equivalente dosis wordt berekend in laag van $10\mu m$)

Bronorganen:

- compact bot (4 kg)
- sponsachtig bot (1 kg)

Aanvullingen

- apart biokinetisch model voor Am, Pu en Np
- aparte biokinetische gegevens voor Sr, Ra en U

Submersie

- Externe straling (bepalend voor Ar (niet 37), Kr, Xe)
- interne straling van gas geabsorbeerd in lichaamsvloeistoffen, organen en weefsels
- interne straling van het in de longen aanwezige ingeademde gas. (bepalend voor T₂, HT, ³⁷Ar)

Voor alle modellen geldt dat wordt aangenomen dat dochternucliden die in het lichaam geproduceerd worden hetzelfde metabole gedrag vertonen als de moeder, en dat dochternucliden gevormd buiten het lichaam als zelfstandige inwendige besmetting moeten worden beschouwd.

Monitoring

- Werkplek/ruimte monitoring
 - Externe/ uitwendige straling
 - Luchtbesmetting
 - Oppervlaktebesmetting
- Individuele monitoring
 - Blootstelling aan externe/ uitwendige straling
 - Inwendige besmetting
 - Huidbesmetting

Bepaling dosis inwendige besmetting:

- Uitvoeren van individuele monitoring of omgevingsmetingen
- bepaling inname (A_{inh} , A_{ing}) uit deze metingen
- vaststellen dosis m.b.v. dosisconversiefactoren (reeds behandeld)

Luchtbemonstering

Geeft activiteitsconcentratie $C(t)$ in de lucht en als het ademvolumetempo $B(t)$ van de (referentie)mens bekend is volgt de ingeademde activiteit A_{inh} uit:

$$A_{inh} = \int_0^T C(t)B(t)dt \quad (9.41)$$

Excretieanalyse (“bio-assay”)

- urine $X_u(t)$
 - fractionele uitscheidingsparameter f_u .
- Fecaliën $X_f(t)$
 - fractionele uitscheidingsparameter f_f .
- neussnuitsel (via depositiefracties in ET₁ (afhankelijk van AMAD)).
- Andere lichaamsmaterialen

Excretie functie voor i (urine, fecaliën), $X_i(t)$ is het activiteitsuitscheidingstempo per opgenomen Bq:

$$X_i(t) = f_i \frac{dR(t)}{dt} \quad (9.43, 9.44)$$

met $R(t)$ de retentiefunctie en f_i de fractionele uitscheidingsparameter.

Systemische activiteit A_S is opgenomen activiteit in het transfercompartiment.

Totale lichaamstelling

Alleen voor γ 's

Hoofdstuk 10 Meetmethoden voor ioniserende straling

Statistiek van radioactief verval en metingen

Als p de kans is dat één kern binnen een bepaald tijdinterval vervalst dan is voor n kernen de kans $P(k)$ op k vervallen kernen in dat tijdinterval (binomiaalverdeling):

$$P(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k} \quad (10.1)$$

Met verwachtingswaarde $\mu=np$ en spreiding $\sigma = \sqrt{np(1-p)}$

Als $n \rightarrow \infty$ en $p \rightarrow 0$, en $np=\lambda$ gaat dit over in de Poisson verdeling:

$$P(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (10.2)$$

Met verwachtingswaarde $\mu = \lambda$ en spreiding $\sigma = \sqrt{\lambda}$

Als μ groot is gaat dit over in de normale (Gaussische) verdeling:

$$P(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\lambda}} e^{-\frac{(k-\lambda)^2}{2\lambda}} \quad (10.3)$$

Eveneens met verwachtingswaarde $\mu = \lambda$ en spreiding $\sigma = \sqrt{\lambda}$

De algemene definitie van de standaarddeviatie is:

$$\sigma_{m-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (N_i - \bar{N})^2}{m-1}} \quad (10.4)$$

Als in één enkel telexperiment een aantal N geteld is, en bovengenoemde verdelingen van toepassing zijn, dan zijn de schaters voor de verwachtingswaarde en de standaarddeviatie:

$$\bar{x} = N \quad (10.6)$$

$$s = \sqrt{N} \quad (10.7)$$

Dus schatter voor de relatieve standaarddeviatie:

$$\frac{s}{\mu} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

De kans dat het ware gemiddelde μ zich tussen $\bar{x} \pm s$ bevindt is 68%, tussen $\bar{x} \pm 2s$ 95%, en tussen $\bar{x} \pm 3s$ 99.7%

Rekenregels voor stochastische variabelen

• $z = x \pm y$	$\rightarrow$	$s_z = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}$
• $z = c \times x$	$\rightarrow$	$s_z = c \times s_x$
• $z = x \times y$ of x/y	$\rightarrow$	$\frac{s_z}{z} = \sqrt{\left(\frac{s_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{s_y}{y}\right)^2}$

Het teltempo

$$R = \frac{N}{t} \quad (10.8)$$

Dus

$$s_R = \frac{1}{t} s_N = \frac{\sqrt{N}}{t} = \sqrt{\frac{R}{t}} \quad (10.9)$$

Achtergrondcorrectie

$$R_n = R_b - R_a \quad (10.10)$$

Dus

$$s_n = \sqrt{s_b^2 + s_a^2} = \sqrt{\frac{R_b}{t_b} + \frac{R_a}{t_a}} \quad (10.11)$$

Meettijdverdeling

Indien een beperkte tijd beschikbaar is dan wordt het meest optimale resultaat bereikt (S_n minimaal) als

$$\frac{t_b}{t_a} = \sqrt{\frac{R_b}{R_a}} \quad (10.13)$$

Minimaal te detecteren aantal

Het minimaal te detecteren teltempo wordt meestal gedefinieerd als $N_{\min} = 3\sigma_a$ netto boven de achtergrond. Dus

$$R_{\min} = \frac{N_{\min}}{t} = 3 \frac{\sigma_A}{t} = 3 \sqrt{\frac{R_A}{t}} \quad (10.15)$$

En de minimaal te detecteren activiteit (als het detektierendement η is):

$$A_{\min} = \frac{3}{\eta} \sqrt{\frac{R_A}{t}} \quad (10.16)$$

Maximaal te detecteren aantal

Detektoren kennen een dode tijd, τ .

Twee gevallen:

- Niet paralyseerbare detector: detekteert niet gedurende vaste tijd τ , maar daarna weer wel. Het juiste teltempo R_0 hangt als volgt van het gemeten teltempo R af:

$$R_0 = \frac{R}{1 - R\tau} \quad (10.17)$$

- Paralyseerbare detector: dode tijd wordt verlengd met τ als gedurende de dode tijd weer een interactie plaatsvindt.

$$R = R_0 e^{-R_0 \tau} \quad (10.18)$$

Rendement

Het totale of absolute rendement is gedefinieerd als:

$$\eta = \frac{\text{signaal}}{\text{emissie}} \leq 1 \quad (10.19)$$

Bijdragen aan η :

- Het bronrendement η_s : interacties in het materiaal en de omhulling van de bron (zelfabsorptie, (zelf)terugstrooiing)
- η_m : interacties in het medium tussen bron en detector
- geometrisch rendement: η_g

- Het detectierendement η_d : niet alle deeltjes/fotonen die de detector bereiken gaan daadwerkelijk een interactie aan die signaal levert
- Het registratierendement: η_r

$$\eta = \eta_s \times \eta_m \times \eta_g \times \eta_d \times \eta_r \quad (10.20)$$

Intrinsiek rendement: omvat alle factoren die betrekking hebben op de detector.

Bij het meten van β -preparaten moet rekening gehouden worden met terugverstrooiing aan de preparaatdrager. Deze fractie neemt toe met de energie van de β -deeltjes en de Z en dikte van het dragermateriaal.

Energieresolutie

In sommige detectoren is de pulshoogte afhankelijk van de energie van het gedetekteerde stralingsdeeltje, wat het mogelijk maakt een energie-spectrum van de gedetekteerde straling te maken.

Als n het aantal vrijgemaakte “informatiedragers” per eenheid van geabsorbeerde energie is, dan is het totaal aantal “informatiedragers” bij absorptie van een stralingsdeeltje met energie E, nE, en zou op grond van de eerder besproken statistiek de relatieve meetfout $\Delta E/E$ gelijk zijn aan $\sqrt{1/nE}$ of in geval van FHHM $2.35\sqrt{1/nE}$. In de praktijk geldt echter:

$$R(E) = \frac{FWHM}{E} = \frac{\Delta E}{E} = 2.35\sqrt{\frac{F}{nE}} \quad (10.23)$$

Waarin F de Fano-factor is die voor scintillatoren ~ 1 is, voor gassen ~ 0.15 , en halfgeleiders ~ 0.05 . In het laatste geval is de energieresolutie dus aanmerkelijk hoger dan verwacht zou worden op statistische gronden.

Stralingssensoren

Soorten detectoren:

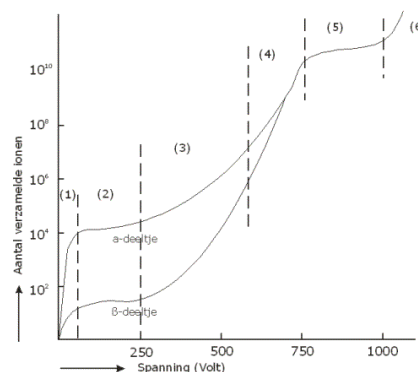
Effect	Detectormateriaal	Type Instrument
Elektrische lading	Gas	Gasgevulde detector
	Vaste stof	Halfgeleider detector
Chemische reacties	Fotografische emulsie	Filmdosismeter
	Vaste stof of vloeistof	Chemische dosismeter
Luminiscentie	Vaste stof of vloeistof	Scintillatieteller
		Cerenkovteller
	Vaste stof	Thermoluminiscentie dosismeter
Warmte	Vaste stof of vloeistof	Calorimeter
Activering	Vaste stof	Activeringsdosismeter

Gasgevulde stralingssensoren

De interactie van ioniserende straling met gas en detectorwand vormt electron-ionparen, die onder invloed van een elektrisch veld naar elektroden toebewegen. Het gemiddelde aantal primaire electron-ionparen per interactie bedraagt:

$$N = \frac{E}{W}$$

Afhankelijk van het elektrisch veld zijn verschillende werkings regimes te onderscheiden, die voor α en β straling



zijn weergegeven in onderstaande figuur (voor andere straling gelden soortgelijke grafieken)

- 1) Recombinatiegebied, niet geschikt voor detector
- 2) Ionisatiekamer (verzadigde ionenstroom). (Lage pulshoogte)
- 3) Lawinevorming/gasversterking: proportionele telbuis. Lading is evenredig met afgestane hoeveelheid energie
- 4) Begrensde proportionaliteit (niet geschikt voor detector)
- 5) Geiger-Müller telbuis
- 6) Continue ontlading

Ionisatiekamer

- Gasvolume met 2 elektroden
- Standaardionisatiekamer ('free air chamber') voor absolute metingen van exposie(tempo) is groot. Bij kleinere ionisatiekamers: ionisatie door elektronen vrijgemaakt uit het wandmateriaal
- Wanddikte dient aan Bragg-gray principe te voldoen
- Meest geschikt voor straling met hoge energieafgifte of hoge intensiteit.
- Meestal in "current mode" gebruikt, en niet in "pulse mode"
- In pulse mode geldt voor de puls hoogte H (F=Fano Factor, W is gemiddelde energie per ionisatie):

$$\frac{\sigma_H}{H} = \sqrt{\frac{FW}{E}}$$

Proportionele tellers

- Cilinder met centrale teldraad of platte doos met anodedraden in het centrale vlak
- Grotere en snelle pulsen (1-10µs) dan ionisatiekamer
- Vrijwel altijd in "pulse mode" gebruikt
- In pulse mode geldt voor de puls hoogte H (b is de Polya verdelingsfactor 0.4-0.7):

$$\frac{\sigma_H}{H} = \sqrt{\frac{(F+b)W}{E}}$$

Geiger-Müller telbuis

- Pulshoogte/vorm onafhankelijk van de energie van gedetekteerde straling
- Dode tijd ~0.1 ms
- Kan "dichtslaan" bij hoge interactiefrequenties
- Voor geladen deeltjes: intrinsiek rendement vrijwel volledig bepaald door transmissie buisomhulling
- Verhoging gevoeligheid door fotoelektronen uit kathodemateriaal
- Gevoeligheid voor fotonen typisch ~1%
- Geen energie oplossend vermogen

Vaste-stofsensoren

Halfgeleiders of isolatoren, geen geleiders

Scintillatiesensoren

Exitaties veroorzaken lichtflitsjes (fluorescentie), die met een lichtdetector (fotomultiplier buis) geregistreerd kunnen worden.

- Pulshoogte evenredig met de energie
- Dode tijd : 0.1-5µs waardoor hoge teltempi mogelijk

- Lichtdichte en inwendig reflecterende omhulling
- Voor lage energie γ 's: intreevenster dun, van Be of Al (lage Z, weinig foto elektrisch effect)
- Hoge gevoeligheid
- Energie spectroscopie
- Voor γ 's: thallium gedoteerde NaI kristallen (hygroscopisch, breekbaar)
- Plastic scintillatoren: minder kwetsbaar (voor neutronen: vanwege hoge H-gehalte)
- Er zijn ook scintillator materialen voor α 's, β 's, protonen en neutronen

Thermoluminiscentiedetectoren

- Electron-hole paren worden metastabiel getrapped.
- Energie komt vrij in de vorm van licht bij verwarming.
- Geïntegreerde licht-emissie is een maat voor de geaccumuleerde dosis

Halfgeleidersensoren

- Si en Ge
- Gekoeld om nulstroom door thermische excitatie te verlagen
- Pulslengete 0.01-1 μ s.

Fotografische detectie

- Röntgenfoto's worden voornamelijk belicht door het scintillatiemateriaal waartussen het fotografisch materiaal geklemd is, en niet direkt door röntgen.

Activeringsfolies

- Worden gebruikt voor neutronen detectie

Vloeistofsensoren

Vloeibare scintillatoren

- Telvloeistoffen (Liquid Scintillation Counter (LSC))
 - Bij korte dracht (α 's en β 's van ^3H , ^{14}C)
 - Lage activiteit
- Grootte puls evenredig met β energie
- Aantal pulsen evenredig met activiteit
- Rekening houden met chemische en optische doving
 - Verschuiving naar lagere energie in het spectrum
 - α 's 90% quenching daardoor bij 10 $\times$ lagere energie in het spectrum
 - Correcties
 - Interne standaard:
 - Monster meten
 - Bekende activiteit (zelfde isotoop) toevoegen
 - Monster nog eens meten
 - Correctie voor rendement, niet voor energie
 - Quench Indicating Parameter (1% spill-over punt)
 - Bekend isotoop
 - Correctie voor rendement, niet voor energie
 - Externe standaard

- γ -bron bij het telmonster
- Čerenkov-metingen

Oververhitte vloeistofdruppels

- Bellenvaten (Bubble chambers)
- Voor detectie neutronen

Detectie neutronen

- Thermische neutronen
 - Vangstreactions + detectie vangstproducten
 - Activering + detectie van radioactiviteit
- Snelle neutronen
 - Knock-on botsingen met waterstof waardoor scintillatie
 - Drempelvangst met detectie vangstproducten
 - Drempelactivering met detectie radioactiviteit
 - Moderatie tot thermisch waarna detectie als boven

Besmettingsmetingen

- Meestal geen gevaar door externe bestraling, maar voor interne besmetting.
- GM-buis wordt vooral gebruikt voor β 's. Niet gevoelig genoeg voor γ 's.
- Gammastraling met NaI-scintillator
- Grootoppervlak-detectors meestal proportionele detector met dradenkamer
- Gevoeliger: veegproeven. (tot 0.1 Bqcm^{-1}) Veegrendement $\sim 10\%$.
- Voor zachte β 's : vloeistofscintillatie

Luchtactiviteitsmetingen

- Lucht door open ionisatievat leiden
- Absorptie in filters of vloeistof
- Personal air samplers

Persoonsdosimetrie

- Gecalibreerd op persoonsdodisequivalent $H_p(10)$
- Nederland: meest TLD's

Hoofdstuk 11 Bescherming tegen uitwendige bestraling

Gebaseerd op drietal principes

- Beperking tijdsduur blootstelling
- Handhaving van zo groot mogelijke afstand tot de bron
- Gebruik van afscherming

Belangrijke factoren:

- Eigenschappen bron
- Afstand tussen bron en de te beschermen persoon
- Te verwachten blootstellingsduur van de te beschermen persoon
- Normstelling voor toelaatbare blootstelling van de te beschermen persoon
- Verzwakking door afschermingsmateriaal
- Ruimtelijke factoren, met name verstrooiende oppervlakken

Afscherming van direct ioniserende straling

Zware geladen deeltjes (p, α, enz)

- In het algemeen geen probleem
- Bij hoogenergetische deeltjes rekening houden met secundaire straling

Electronen

- Gereduceerde dracht vrijwel materiaalafhankelijk
- Remstraling productie evenredig met ZE^2 .
- i.h.a. 1 gcm^{-2} afscherming voldoende
- positonstralers: rekening houden met annihilatiestraling

Afscherming van elektromagnetische straling

Verzwakkingcoëfficiënt en halveringsdikte; opbouwfactor voor brede bundels

Smalle bundel geometrie:

- Secundaire straling verwaarloosd
- Voor elke energie, i geldt dat de transmissie $T = e^{-\mu(i)d}$.
- Afschermingsdikte μd is (μ/ρ) in $\text{cm}^2\text{g}^{-1} \times (\rho d)$ in gcm^{-2} .
- μ en μ/ρ sterk afhankelijk van energie en materiaal
 - laagenergetische fotonen: gebruik hoge Z materiaal voor hoog fotoeffect
 - in het Compton gebied is μ/ρ vrijwel onafhankelijk van het type afschermingsmateriaal

- halveringsdikte, decimeringsdikte en relaxatielengte:

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} \approx \frac{0.693}{\mu} \quad d_{1/10} = \frac{\ln 10}{\mu} \approx \frac{2.3}{\mu} \quad \text{relaxatielengte} = \frac{1}{\mu} \quad (11.1, 11.2)$$

- Indien de straling niet monoenergetisch: 1° , 2° etc halveringsdikte, vanwege opharding bundel.

Brede bundel geometrie

- Meestal meer van toepassing bij afscherming

- Bijdrage van verstrooide fotonen, verdisconteerd in opbouw of build-up factor B.
- Buildupfactor is afhankelijk van:
 - Geometrie van de bron en de afscherming
 - De afschermingsdikte μd
 - De materiaalsoort van de afscherming (Z_{eff})
 - De stralingsenergie
- Opbouwfactoren zijn vaak bepaald voor de exposie, maar kunnen in benadering ook worden gebruikt voor het luchtkerma en andere dosisgrootheden

Voor het luchtkermatempo op een afstand r van een puntvormige gammastraler geldt (dit is een modificatie van 4.40):

$$\dot{K} = \Gamma_{\delta} \frac{A}{r^2} B e^{-\mu d} \quad (11.3)$$

In geval de puntbronbenadering gerechtvaardigd is kan dezelfde afschermingsfactor gebruikt worden voor andere dosisgrootheden zoals $\dot{X}$, $\dot{D}$, $\dot{E}$, en $\dot{H}^*$ (10).

Opbouwfactoren voor enkele materialen staan in tabel 11.1 op blz 268.

Opbouwfactoren zijn hoog bij lage Z en E : Het Compton effect domineert dan, en de verstrooide straling is niet erg naar voren gericht.

Combinaties van opbouwmaterialen:

- $Z_1 < Z_2$: $B(\mu_1 d_1, \mu_2 d_2) \approx B_2(\mu_1 d_1 + \mu_2 d_2)$
- $Z_1 > Z_2$: $B(\mu_1 d_1, \mu_2 d_2) \approx B_1(\mu_1 d_1) \times B_2(\mu_2 d_2)$

Drie categorieën afschermingsproblemen:

- Bij gegeven bron en afscherming het stralingsniveau berekenen
- Bij gegeven bron en eis voor stralingsniveau de (dikte van de) afscherming berekenen
- Bij gegeven afscherming en eis voor het stralingsniveau de maximale bronsterkte bepalen

Röntgenstraling uit toestellen

- Spectrum bestaat uit remstralingspectrum met karakteristieke lijnen daarop gesuperponeerd
- E_{max} bepaald door de versnelspanning
- Dosistempo evenredig met buisstroom en kwadraat van de versnelspanning
- Straling bestaat uit:
 - Nuttige bundel
 - Lekstraling
- Opbrengst aan primaire röntgenstraling (dosistempo in lucht) wordt opgegeven in mGy/min per mA buisstroom op een bepaalde afstand van het focus, en is afhankelijk van de versnelspanning
- Homogeïteitscoëfficiënt (HC) = $(1^\circ \text{ hvd}) / (2^\circ \text{ hvd})$
- Diagnostiek: lage energie fotonen wegfilteren daar deze alleen aan de patient-dosis, en niet aan de beeldvorming bijdragen.

ICRP-33: berekeningsmethodiek voor maximaal toelaatbare transmissie β van de afscherming van de primaire röntgenstraling:

$$\beta = \frac{P d^2}{WUT} [\text{mGy}(\text{mAmin})^{-1} \text{ op } 1 \text{ m}] \quad (11.4)$$

Met

P	de toelaatbare weekdosis [mGy/week]
W	de gemiddelde belasting van het toestel (workload) in mAmin/week
U	richtingsfactor
T	bezettingsgraad, fractie van de werkweek dat er personen op de beschouwde plaats verblijven
d	afstand van de beschouwde plaats tot het focus [m]

Voor de verstrooide straling geldt:

$$\beta = 100P \cdot d_s^2 \frac{d^2}{WST} [\text{mGy}(\text{mAmin})^{-1} \text{ op } 1 \text{ m}] \quad (11.5)$$

Met

d_s	de afstand van de beschouwde plaats tot het verstrooiende oppervlak
d	de afstand van het focus tot het verstrooiende oppervlak
S	het percentage van de primaire straling aan het oppervlak dat op 1 m daarvan als verstrooide straling kan worden teruggevonden. S wordt gegeven in % per 100cm ² verstrooiend oppervlak

Gebruik voor de afscherming van strooistraling gegevens die betrekking hebben op de (lagere) energie van deze straling. Indien dit niet voorhanden (ICRP-33):

- Belangrijkste component is de onder 90° verstrooide straling
- Verzwakkingseigenschappen worden bepaald door versnelspanning V_0 :
 - $V_0 < 0.5 \text{ MV}$ gebruik gegevens voor $V = V_0$
 - $0.5 \text{ MV} < V_0 \leq 3 \text{ MV}$ gebruik gegevens voor $V = 0.5 \text{ MV}$
 - $V_0 > 3 \text{ MV}$ gebruik gegevens voor $V = 1 \text{ MV}$
- Uitbreiding naar γ -straling door als V [in MV] het dubbele te nemen van de γ -foton energie in MeV

Remstraling van β -bronnen

Ernergiespectrum overwegend laag-energetische fotonen, maar harde component kan een aanzienlijk doordringend vermogen hebben.

Afscherming van neutronen

- Houd ook rekening met primaire γ -straling die door veel neutronenbronnen wordt uitgezonden
 - Principe: moderatie gevolgd door verwijdering middels vangstreactie
 - Moderatie door
 - Inelastische botsingen (drempelenergie $> 1 \text{ MeV}$ in zware materialen, uitzending γ -straling)
 - Elastische botsingen (neemt toe bij lagere energie)
- $$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E_n} = \frac{2A}{(1+A)^2} \text{ en } \frac{\Delta E_{\max}}{E_n} = \frac{4A}{(1+A)^2}$$
- Vangstreactie
 - Vermijd dat de afscherming geen sterke γ -bron wordt
 - Neutronen afscherming is altijd gekoppeld aan fotonenafscherming
 -

Voor een puntvormige neutronenbron:

$$\dot{H} = \frac{P}{4\pi r^2 \varphi_H} B e^{-\Sigma_r d} \quad (11.6)$$

Met

$\dot{H}$	het dosisequivalenttempo achter de afscherming [Sv/h]
P	Sterkte bron [neutronen/s]
ϕ_H	fluentietempo [$m^{-2}s^{-1}$] dat 1 Sv/h geeft voor het initiële energiespectrum
B	dosisopbouwfactor voor het dosisequivalent
d	dikte van de afscherming
r	afstand tot de bron
Σ_r	verzwakkingscoëfficiënt (verwijderingsdoorsnede voor het dosisequivalent)

Het verwijderingsdoorsnede-concept (11.6) kan alleen worden toegepast als:

- 1) de afscherming bestaat uit een combinatie van zware elementen (ijzer, lood) en een waterstofhoudend materiaal waarbij er tenminste 5 gcm^{-2} waterstof aanwezig moet zijn.
- 2) Het product $\Sigma_r d$ kleiner is dan 5

(Zware elementen zorgen voor inelastische botsingen, het waterstof voor de elastische)

Het verband tussen Σ_r en de atomaire verwijderingsdoorsnede σ_r :

$$\Sigma_r / \rho = 0.602 \sigma_r / M [\text{cm}^2 \text{g}^{-1}] \quad (11.7)$$

[σ_r in barn en ρ in gcm^{-3}]

Voor een verbinding of mengsel van materialen:

$$\Sigma_r = (\Sigma_r / \rho)_1 \rho_1 + (\Sigma_r / \rho)_2 \rho_2 + \dots \quad (11.8)$$

- Bij niet al te hoge energie zijn botsingen met waterstofkernen de meest praktische methode om de neutronen-energie te reduceren
- Paraffine en polyethyleen zijn zeer werkzaam, maar niet goed als constructiemateriaal
- Omvangrijke afschermingen: Beton, beperste bitumen en water.
- Pas op met ijzer i.v.m. activering
- Voor de vangst van “gethermaliseerde neutronen”:
 - ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ (beiden zenden geen harde γ 's uit) of ${}^{113}\text{Cd}$

Veel voorkomend: Afscherming van monoenergetische neutronen van 14 MeV, afkomstig van d-T reactie.

$$H(d) = H_0 B(d) e^{-d/\Lambda} \quad (11.9)$$

Met

$H(d)$, H_0	dosisequivalent met en zonder afscherming
d	dikte afscherming
$B(d)$	opbouwfactor voor het dosisequivalent
Λ	relaxatielengte

Praktische uitvoering van afschermingen

Volgorde:

- Eerst nadenken over ontwerp
- Daarna over materiaalkeuze en details

Verder:

- Denk aan verstrooide straling (skyshine)
- Doorvoeringen, deuren
- Bouwkundige aspecten
- Materiaalkeuze

Optimalisatie is een afweging tussen

- Gewicht van de afscherming
- Volume van de afscherming
- Kosten van de afscherming

Hoofdstuk 12 Bescherming tegen inwendige bestraling

Beschermingsmaatregelen ten aanzien van niet-geïncapselde bronnen dienen primair te zijn gericht op het voorkomen van verspreiding van radioactief materiaal.

- Goede omhulling van de bronnen
- Beperking van het aantal (gecompliceerde) bewerkingen
- Het werken met materiaal in een moeilijk verspreidbare vorm
- Het werken met zo gering mogelijk activiteit
- Gebruik maken van persoonlijke beschermingsmiddelen

Het begrip radiotoxiciteit

Onder radiotoxiciteit wordt verstaan de toxiciteit, toe te schrijven aan de ioniserende straling van een in het lichaam opgenomen radionuclide en de vervalproducten daarvan.

Belangrijkste: verspreiding door lucht, gevolgd door inhalatie

Goede maat: ALI (Annual Limit on Intake) voor inhalatie (verouderd?). Hoe kleiner de ALI des te hoger de radiotoxiciteit.

Beter nog: $e(50)$. Hoe hoger $e(50)$ hoe hoger de radiotoxiciteit.

$$ALI[Bq] = E_{50, \text{limiet}}[Sv] / e(50)[SvBq^{-1}] \quad (12.1)$$

Karakterisering van het verspreidings- en incorporatierisico bij werkzaamheden met niet-geïncapseld radioactief materiaal

Karakterisering gebeurt m.b.v. transferfracties:

- TFW transferfractie voor door werkers geïncorporeerde activiteit
- TFM transferfractie voor activiteit die naar het milieu uitwijkt

Afhankelijk van:

- Fysische/chemische eigenschappen van de stof
- Aard van de bewerking
- Ventilatie (zuurkast)
- Filters in luchtafvoer (milieu)

Begrenzing van de werkhoeveelheden verspreidbare activiteit

Radionuclidenlaboratoria zijn geïnclassificeerd van A tot D in volgorde van afnemende bescherming.

Uitgangspunt voor structureel langdurige situaties: Een werker mag tijdens de werkzaamheden in reguliere omstandigheden op jaarbasis niet meer dan 10% ontvangen van de dosislimiet voor blootgestelde werknemers voor elk der twee blootstellingswegen (uitwendige bestraling en inwendige bestraling) afzonderlijk (dus 10% van 20mSv/jaar).

Drie parameters:

- De verspreidingsparameter p (≤ -1): hoe negatiever, hoe hoger de verspreiding
- De parameter voor de lokale ventilatievoorziening, r (≥ 0), hoe hoger hoe beter de bescherming

- De beschermingsparameter van het laboratorium, q (≥ 0), hoe hoger hoe beter de bescherming

$A_{\max,i}$ is de maximale activiteit die per keer mag worden gehanteerd:

$$A_{\max,i} = ALI_i \times 10^{p+q+r} [\text{Bq}] \quad (12.3)$$

Een Re (Radiotoxiciteits equivalent) is de activiteit [Bq] van een radionuclide (i), die bij volledige directe inname een effectieve dosis van 1 Sv veroorzaakt. Dus

$$1[\text{Re}] = 1/e(50)_i \text{ Bq van radionuclide } i \quad (12.4)$$

Er wordt onderscheid gemaakt tussen Re_{inh} en Re_{ing} .

Dus aantal Re = $A_i[\text{Bq}] \times e(50)_i [\text{SvBq}^{-1}]$.

Regelgeving is voor besmetting via inhalatie

Maximale aantal toxiciteitsequivalenten $X_{\max,j}$ voor inhalatie dat mag worden gebruikt tijdens een bewerking (j):

$$e(50)_{\text{inh},i} \times A_{\max,j,i} \equiv X_{\max,j} = 0.02 \times 10^{p+q+r} [\text{Re}_{\text{inh}}] \quad (12.5, 12.6)$$

De verspreidingsparameter p

Toepassing	p
Eenvoudige bewerking met gassen Hanteren poeders in open systeem (malen, mengen) Vloeistof met temperatuur tegen het kookpunt Sterk spattende bewerking	-4
Labeling vluchtig nuclide (bijv I) Koken van vloeistoffen in een “gesloten” systeem Centrifugeren, mengen op vortex Eenvoudige bewerking van poeders in “gesloten” systemen Opslag van edelgas in toediensysteem	-3
Labeling niet-vluchtig nuclide Eenvoudige chemische bepaling met tracers (bijvoorbeeld RIA)	-2
Kortdurend eenvoudig nat werk, zoals pipetteren van een klein volume van een niet-vluchtige verbinding uit een voorraadoplossing Eenvoudige werkzaamheden in “gesloten systemen zoals: - Elutie Tc-generator - Optrekken en spuiten - Labeling in gesloten systemen - Kalibratie I-131 capsule Metingen aan stoffen in moeilijk verspreidbare vorm (bijvoorbeeld in ampul) Opslag van radioactief afval in werkruimte	-1

De beschermingsparameter van het laboratorium q

ruimtecategorie	q
werkruimte buiten laboratoriumbeheer	0
D-laboratorium, nevenruimte bij laboratorium	1
C-laboratorium	2
B-laboratorium	3

De parameter voor de lokale ventilatievoorziening r

omschrijving	r
Werkzaamheden buiten zuurkast zonder aanvullende verntilatievoorzieningen	0
Afzuiging of zuurkast die niet getest is volgens de nieuwe DIN-norm maar waarvan	1

vaststaat dat minder dan 10% van de stof die vrijkomt in de zuurkast in de werkruimte komt	
Zuurkast die aan DIN-12923 voldoet, zuurkast waaruit minder dan 1% van de stof die vrijkomt in de zuurkast in de werkruimte komt	2
Gesloten werkkast (Klasse III cabinet voor biologische veiligheid, of gesloten laminar flow Isolator)	3

De waarde van r kan nooit hoger genomen worden dan de waarde van q

$X_{j,i}$'s [Re] van verschillende radionucliden kunnen bij elkaar worden opgeteld om te bepalen of aan de normstelling $X_{\max,j}$ wordt voldaan.

Opslag van radioactief materiaal

Voor opslag in een speciale bergplaats is $X[\text{Re}_{\text{inh}}]$ $10 \times$ de hoeveelheid die maximaal voor gegeven r,q en p=-1 volgt uit vgl 12.5. (Voorraad en afval gesommeerd)

De belastingsfactor van een laboratorium

$$B_w = \sum_{j=1}^n \frac{t_j}{40} \times \frac{X_j}{X_{\max,j}} \leq 1 \quad (12.10)$$

Met:

- B_w de belastingsfactor voor de werkruimte
- n het aantal handelingen/situaties(j) die in de werkruimte plaatsvinden en waarover gesommeerd moet worden.
- T_j het aantal uren per week dat een bepaalde handeling (j) wordt uitgevoerd of situatie(j) zich voordoet
- X_j het aantal toegepaste Re's bij handeling (j)
- $X_{\max,j}$ het maximaal toegestane aantal Re's voor handeling (j)

Dit is ook te schrijven als:

$$B_w = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{t_j}{40} \times \frac{A_{j,i}}{A_{\max,j,i}} \leq 1 \quad (12.11)$$

Met:

- m het aantal radionucliden (i) dat per handeling telijk wordt toegepast en waarover moet worden gesommeerd
- $A_{j,i}$ Hoeveelheid activiteit van een radionuclide (i) die wordt toegepast bij de handeling j
- $A_{\max,j,i}$ Waarde voor maximaal toe te passen activiteit voor de handeling j van radionuclide (i)

Risico van oppervlaktebesmettingen

Maximaal toelaatbare afwrijfbare oppervlakte besmetting in een radiologische ruimte is

- 0.4 Bqcm^{-2} voor α -stralers
- 4 Bqcm^{-2} voor β en γ -stralers

Radionuclidenlaboratoria

- C-lab: Goed geoutilleerd chemisch lab met specifieke aanpassingen, geschikt voor beperkte hoeveelheden activiteit
- B-lab: Als C-lab maar met extra voorzieningen voor grotere hoeveelheden activiteit
- D-lab: Eenvoudiger dan C-lab. Geen zuurkast vereist

- A-lab: speciaal “hot” lab

Opzet en indeling:

- Activiteitsniveau naar binnen toenemend (D→C→B)
- Onderdruk naar binnen toenemend
- Bewaakte/gecontroleerde gebieden
- Routes tussen laag-actief niet via hoog-actief

Ruimteventilatie

- Onderdruk ter voorkoming van verspreiding van activiteit buiten het lab
- Ventilatievoud $\lambda_v[h^{-1}]$: tenminste 8-voudig per uur

Hoofdstuk 13 Wet en regelgeving betreffende stralingsbescherming

Internationale regelgeving

Regelgevers:

- IAEA: International Atomic Energy Agency (UN)
 - Basic Safety standards
 - Regels voor transport van radioactief materiaal
 - Inspecties splijtstof-installaties
 - Technische informatie
 - Rapporten van experts
 - Aanvullende eisen voor vergunningen
- WHO: World Health Organisation (UN)
- ILO: International Labour Organisation (UN)
- NEA: Nuclear Energy Agency (Onderdeel van de OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development)
 - Gebruik radioactieve stoffen in gebruiksvoorwerpen
- Euratom
 - Ontwikkeling van kernenergie voor vreedzame doeleinden binnen de EU bevorderen
 - Stelt basisnormen op die lidstaten binnen een bepaalde tijd in hun wetgeving dienen te implementeren

Verwante organisaties:

- UNSCEAR (United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation)
 - houdt zich bezig met verzamelen van gegevens
 - niet met regelgeving.
- ICRP (International Commission on Radiological Protection)
 - doet aanbevelingen die door alle instanties als basis dient voor regelgeving op stralingshygiënisch gebied.
- ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements)
 - Onafhankelijke non-profit/non-governmental organization
 - Meettechnieken en standaardisatie

Hierarchie:

ICRP Aanbevelingen → Euratom richtlijnen → Nederlandse wetgeving (Besluit stralingsbescherming)

De basisnormen van 1996

Vernieuwde Euratom richtlijn, aansluitend op ICRP-60

Is van toepassing op alle handelingen die een risico met zich kunnen meebrengen ten gevolge van ioniserende straling van hetzij een kunstmatige stralingsbron, hetzij een natuurlijk stralingsbron indien de natuurlijke radionucliden worden of zijn bewerkt wegens hun radioactieve, splijt, of kweek-eigenschappen, namelijk

- De productie, de bewerking, hetgebruik, het voorhanden hebben, het opslaan, het vervoer, de invoer en de uitvoer uit de gemeenschap en de verwijdering van radioactieve stoffen

- Het gebruik van enig elektrisch toestel dat ioniserende straling uitzendt en componenten bevat die bij een potentiaalverschil van meer dan 5kV werken
- Elke andere door de lidstaat aangewezen handeling

Daarnaast is zij van toepassing op werkzaamheden waarbij natuurlijke stralingsbronnen aanwezig zijn en op elke interventie in een radiologische noodsituatie of een vroegere of reeds bestaande handeling of werkzaamheid.

Ioniserende straling binnen de arbeids- en milieuwetgeving

Veilige toepassing van bronnen van ioniserende straling i.h.k. van arbeids-, volksgezondheids- en milieuwetgeving wordt geregeld via de Kernenergiewet (Kew). Kew werkt met een vergunningstelsel.

De arbeids-, volksgezondheids- en milieuwetgeving is gebaseerd op zogenoemde raam- of kaderwetten: dit zijn globale regels die nader worden uitgewerkt in algemene maatregelen van bestuur en ministeriële beschikkingen en regelingen.

Arbeidswetgeving

Arbowet: toezicht op naleving: de Arbeidsinspectie

Arbowet bevat geen specifieke regels m.b.t. ioniserende straling. Dit is in de Kew geregeld. Risico's dienen wel te worden meegenomen in de in het kader van de Arbowet verplichte risico-inventarisatie en –evaluatie.

Milieuwetgeving

Integrale milieuwet: de Wet milieubeheer (Wm). Maakt gebruik van vergunningenstelsel.

Algemene Wet bestuursrecht

Aanvraag vergunning:

- 1) Indiening van de aanvraag
- 2) Binnen 2 maanden beslissing over niet-ontvankelijk verklaring
- 3) Binnen 3 maanden ter inzage legging van de ontwerpbeschikking
- 4) Gedurende één maand gelegenheid voor eenieder om bezwaren in te dienen
- 5) Bekendmaking van de definitieve beschikking binnen zes maanden na ontvangst van de aanvraag

De kernenergiewet

Regelingen voor

- 1) Splijtstoffen, ertsen en kerninstallaties
- 2) Radioactieve stoffen
- 3) Ioniserende straling uitzendende toestellen

KeW is een integrale wet, en het beleidsterrein wordt derhalve door tenminste een vijftal ministeries bestreken.

Vergunningensysteem: verboden tenzij...

Belangrijk binnen KeW:

- Besluit stralingsbescherming (BS)
- Besluit kerninstallatie, splijtstoffen en ertsen (Bkse)
- Besluit vervoer splijtstoffen, ertsen en radioactieve stoffen (vervoersbesluit)
- Besluit detectie radioactief schroot

Besluit stralingsbescherming (KeW)

- Handelingen verwijzen naar het gebruik van radioactieve bronnen vanwege hun radioactieve karakter.
- Werkzaamheden verwijzen naar het gebruik van radioactieve bronnen niet wegens hun radioactieve karakter.
- Gecontroleerde zone: toegang gecontroleerd
- Bewaakte zone: onderworpen aan passend toezicht (minder zwaar dan gecontroleerd)
- Blootgestelde werknemer: werknemer die gedurende zijn werktijd meer dan 1mSv/jr zou kunnen oplopen
- A-werknemer: blootgestelde werknemer, leerling of studerende die een effectieve dosis kan ontvangen die groter is dan 6mSv in een kalenderjaar, of een equivalente dosis die groter is dan $0.3 \times$ de orgaandosislimieten voor blootgestelde werknemers.
- B-werknemer: : blootgestelde werknemer, niet zijnde A-werknemer.

Rechtvaardiging en optimalisatie

- Voorkomen zinloze toepassingen
- Is er een gelijkwaardig of beter alternatief
- Meer nut dan nadeel
- ALARA – As Low As Reasonably Achievable

Personen buiten een plaats of ruimte waar handelingen worden verricht mogen niet meer dan 1mSv per kalenderjaar oplopen.

Echter als dit de grens van de locatie betreft is die limiet 0.1 mSv/jr

Dosislimieten, categorie-indeling van personen

Limitering: voorkomen van deterministische effecten, beperken stochastische effecten

Boven limiet niet toegestaan (Uitgezonderd patiënten), onder limiet: ALARA.

1	categorie W	blootgestelde werknemers van 18 jaar en ouder
2	categorie S	blootgestelde leerlingen en studerende van 16 tot 18 jaar
3	categorie P	alle overage personen binnen de locatie (werknemers en/of andere leden van de bevolking)
4	categorie M	leden van de bevolking buiten de locatie

Werknemers jonger dan 18 jaar mogen geen werk doen waardoor zij als blootgestelde werknemer worden aangemerkt (leerlingen en studenten zijn uitzondering)

Dosislimieten in mSv/jaar (voor een locatie):

Orgaan/categorie	W	S	P	M
Effectieve dosis	20	6	1	0.1
Ooglens	150	150	15	-
Huid (gem over enig blootgesteld huidoppervlak van 1cm^2)	500	150	50	-
Handen, onderarmen, voeten en enkels	500	150	50	-

Zwangere vrouwen: vanaf het moment van melding zo laag mogelijke dosis als redelijkerwijs mogelijk is, en er voor zorgen dat het onwaarschijnlijk is dat de dosis gedurende het restant van de zwangerschap meer dan 1mSv bedraagt.

Borstvoeding: vrijstelling van handelingen met een meer dan gering risico op radioactieve besmetting van het lichaam.

Er wordt geen vergunning verleend indien tengevolge van die handeling voor een lid van de bevolking buiten de locatie een effectieve dosis van 1 mSv met inachtneming van een equivalente dosis van 50mSv over enig blootgesteld huidoppervlak van 1cm² wordt overschreden.

In uitzonderlijke omstandigheden, niet zijnde radiologische noodsituaties kan een A werknemer (geen leerling, studerende of zwangere) op basis van vrijwilligheid een effectieve dosis tot 100mSv en die dubbele limiet voor de orgaandoses worden toegestaan.

Interventie

- Interventie in geval van een radiologische noodsituatie
- Interventie in een bestaande situatie die leidt tot een langdurige blootstelling als gevolg van een radiologische noodsituatie of van een vroegere handeling of werkzaamheid

Limieten op effectieve dosis:

Levensreddend werk	750mSv
Redden van belangrijke materiële belangen	250mSv
Ondersteuning of uitvoering van metingen, evacuatie, jodiumprofylaxe, openbare orde en veiligheid	100mSv

De betrokken werknemer of hulpverlener is geïnformeerd over de risico's en handelt op vrijwillige basis.

Dosiscontrole en toezicht

- Limietwaarden voor blootgestelde werknemers gelden voor de te verwachten dosis tijdens normale bedrijfsvoering, dus niet bij calamiteiten.
- A-werknemers werken onder medisch toezicht van een stralingsarts.
- A en B werknemers dienen persoonsdosimeters te dragen
- NDRIS (National Dosisregistratie- en informatiesysteem bewaart alle uitslagen van individuele monitoring
- Jaarlijkse rapportage aan abonneemethouder en arbeidsinspectie
- Waarschuwing bij overschrijding dosislimiet en/of overschrijding 1.0 mSv op 1 badge

Classificatie van werkplekken

- Gecontroleerde zone
 - Daar waar het mogelijk is dat een werknemer een dosis ontvangt, hoger dan 3/10 van de dosislimieten voor blootgestelde werknemers (kolom "W" in tabel hierboven), of
 - Er een mogelijkheid is van verspreiding van radioactieve stoffen vanuit de ruimte zodanig dat personen een dosis hoger dan de limiet voor niet-blootgestelde werknemers (kolom "P" in tabel hierboven) kunnen ontvangen.
- Bewaakte zone
 - Indien de mogelijk door een werknemer te ontvangen effectieve dosis zicht tussen 1 en 6 mSv bevindt
- Dosisschattingen gaan uit van het potentiële risico bij de uitvoering van reguliere werkzaamheden.

Stralingshygiënisch toezicht

- De (stralings)deskundige
 - Niveau 5: deskundigheid met gering risico
 - Niveau 4: deskundigheid met matig risico
 - Niveau 3: deskundigheid op nationaal niveau in C-lab
 - Niveau 2: grotere deskundigheid
 - Niveau 1: deskundigheid op internationaal niveau
- Stralingsbeschermingseenheid (SBE)
- Medisch toezicht
 - A medewerkers: toezicht door stralingsarts verplicht

Meldingen en vergunningen

Meldingen

- Kennisgeving van het voornemen om een handeling c.q. werkzaamheid te verrichten.
- Meldingsplicht geldt voor
 - Handelingen met toestellen, behalve
 - Vergunningsplichtige toestellen
 - Elektronenstraalbuis voor visuele beeldweergave
 - Toestel met buisspanning <30kV, dat op 0.1 m geen hoger dosistempo veroorzaakt dan 1μSv per uur
 - Andere toestellen die op 0.1 m geen hoger dosistempo veroorzaken dan 1μSv per uur, behorend tot een goedgekeurd type
 - Werkzaamheden met bepaalde hoeveelheden (niet functionele) natuurlijke radionucliden (niet lozing) indien
 - De totale activiteit hoger is dan de in het BS vermelde limiet
 - De activiteitsconcentratie hoger is dan de in het BS vermelde limiet
 - NIET handelingen met radioactieve stoffen, al kunnen dezen wel vergunningsplichtig zijn.

Vergunningen

verplicht voor:

- Handelingen met toestellen te weten
 - Röntgentoestellen met buisspanning > 5kV voor
 - Industriële radiografie
 - Bewerking van producten
 - Wetenschappelijk onderzoek
 - Onderwijsdoeleinden
 - Blootstellen van personen en dieren voor therapeutische doeleinden
 - Andere röntgentoestellen met een maximale buisspanning ≥ 100kV
 - Een toestel dat deeltjes versnelt en ioniserende straling kan uitzenden met een energie van meer dan 1MeV
Electronenmicroscopen zijn niet vergunningsplichtig, maar in het algemeen wel meldingsplichtig.
- Handelingen met radioactieve stoffen te weten (zonder ondergrens):
 - Toediening van radioactieve stoffen aan mensen en dieren (voor zover het de bescherming van mensen tegen ioniserende straling betreft) voor:
 - Medische of veterinaire diagnoses

- Medische of veterinaire therapie of onderzoek
 - Toevoegen van radioactieve stoffen aan producten bestemd voor gebruik op of in de directe nabijheid van personen
 - Handelingen met radioactieve stoffen met een hogere activiteit (concentratie) dan gesteld in het BS voor:
 - Industriële radiografie
 - Bewerking van producten
 - Onderwijsdoeleinden en wetenschappelijk onderzoek
- Andere handelingen als bepaalde ondergrenzen worden overschreden (Exemption levels (EL), maximale individuele jaardosis <10μSv, of maximale effectieve volgdosis van circa 1mSv per behandelingsjaar)
 - “gewone handelingen”
 - Lozingen van radioactieve stoffen
 - Zich ontdoen, anders dan door lozing van radioactieve stoffen
 - Ingekapselde bronnen zijn niet vergunningsplichtig indien
 - Deze van een door onze ministers goedgekeurd type is
 - Deze onder normale bedrijfsomstandigheden op 0.1 m geen hoger effectief dosistempo kan geven dan 1 μSv per uur
- Werkzaamheden met natuurlijke bronnen
 - Met totale activiteit ≥ 1 EL
 - activiteitsconcentratie ≥ 10 EL
- Lozingen en radioactief afval boven ondergrenzen:
 - Lozingen in lucht: 1 gewogen (R_L) radiotoxiciteits equivalent (Re) voor inhalatie
 - In water via openbaar riool: 10 gewogen (R_W) radiotoxiciteits equivalent (Re) voor ingestie
 - Direct op oppervlaktewater: 0.1 gewogen (R_W) radiotoxiciteits equivalent (Re) voor ingestie

Corr.	$T_{1/2, fys}$					
	<5d	$\leq 7.5d$	$\leq 15d$	$\leq 25j$	$\geq 25j$	$\geq 250j$
R_L	1	1	1	1	10	100
R_W	1/1000	1/100	1/10	1	10	100

Secundair Niveau, Mr-AGIS

Locatielimiet is 0.1 mSv per kalenderjaar aan de terreingrens, maar in de regel staat er een lagere limiet in de vergunning, op grond van het ALARA principe.

De ALARA verplichting wordt door de overheid niet meer noodzakelijk geacht onder het secundair niveau (SN), dat bestaat uit:

Lozingen <1 μSv/jr
Externe straling <10 μSv/jr

De methodiek van de bepaling van het individuele risico en de toetsing aan het SN zijn aangegeven in de Ministeriële regeling Analyse Gevolgen Ioniserende Straling (Mr-AGIS)

- Globale toetsing met ruwe bepaling van maximaal theoretische emissies
 - Levert de maximale theoretisch mogelijke lozingen in lucht (MLL) en water (MLW), uitgedrukt in gewogen radiotoxiciteitsequivalenten (gebruik R_L , R)
 - MLL wordt getoetst aan een toetsingsniveau L_{SN} (in Re_{inh}), dat afhankelijk is van de afstand r van het lozingspunt van de terreingrens om te bepalen of aan het SN voldaan is

- Voor waterlozingen op het riool wordt MLW getoetst aan het niveau WSN, dat $100Re_{ing}$ bedraagt.
- Levert de maximaal theoretisch mogelijke externe blootstelling (MED) aan de terreingrens
 - Wordt vergeleken met een toestingsniveau $E_{SN}=10\mu Sv$
 - Een wooncorrectie van 0.25 wordt toegepast voor verblijf in huis gedurende het grootste deel van het etmaal ($MED < 40\mu Sv$)
- Indien individuele blootstellingspaden binnen deze limieten blijven, wordt geacht aan het SN te zijn voldoen, anders uitgebreide en meer complexe risicoanalyse.

Berekening lozing in lucht:

$$A_{L,i} = CR_L \times A_{inkoop} \times 10^{-p-s-4} [Bq]$$

Met

$A_{L,i}$ Maximale theoretische lozing van isotoop (i) in lucht

CR_L Wegingsfactor voor lozing in lucht

A_{inkoop} De jaarlijks ingekochte activiteit in Bq

p verspreidingskansparameter

s filterparameter

en

$$MLL = \sum_i A_{L,i} / Re_{inh,i} = \sum_i A_{L,i} e(50)_{inh,i}$$

Afstand lozingspunt-terreingrens (m)	Toestingsniveau voor lozingen in lucht L_{SN}
≤ 50	1
≤ 150	10
> 50	100

Berekening lozing in water:

$$A_{W,i} = CR_W \times A_{inkoop} \times V \times Z \times W \times 10^{-s} [Bq]$$

Met

$A_{W,i}$ Maximale theoretische lozing van isotoop (i) in water

CR_L Wegingsfactor voor lozing in water

A_{inkoop} De jaarlijks ingekochte activiteit in Bq

V lozingskansparameter

Z/W uitscheidingsfracties voor patiënt en proefdier

s filter/tankparameter

en

$$MLW = \sum_i A_{w,i} / Re_{ing,i} = \sum_i A_{w,i} e(50)_{ing,i}$$

Met als toetsingsniveau $W_{SN}=100$

Multifunctionele individuele dosis

$$MID = ID \times WC\text{-factor}$$

Actuele individuele dosis

$$AID = ID \times ABC\text{-factor}$$

WC-factor Wooncorrectiefactor (0.25 voor externe bestraling)

ABC-factor Actuele Blootstellingen Correctiefactoren (afhankelijk van gebruik terrein)

Aanvragen en procedures

Meldingen, vergunningaanvragen, en meldingen betreffende het beëindigen van handelingen zenden naar Senter Novem

Soorten vergunningen

- Enkelvoudige vergunning
 - Één of enkele toepassingen. Wijzigingen in de situatie: wijziging vergunning
 - Deskundige toezichthouder
- Verzamelvergunning
 - Meerdere vergelijkbare stralingsbronnen (meer dan ~10). Wijziging kan d/m/v/ melding aan de overheid
 - Coördinerend deskundige en lokaal deskundigen
 - Systeem van interne toestemmingen
 - Rapportage door coördinerend deskundige aan ondernemer
- Complexvergunning
 - Bij omvangrijke locaties in complexe situaties
 - Vergunninghouder extra vrijheid om zelfstandig handelingen met bronnen te starten, wijzigen of beëindigen
 - Vergunninghouder verleent mandaat aan de algemeen coördinerend stralingsdeskundige (N2), welke ondersteund wordt door een stralingsbeschermingsorganisatie (SBE).

Het vervoeren van radioactieve stoffen

- Nationale wetgeving geregeld in Kew via het Besluit vervoer van splijtstoffen, ertsen en radioactieve stoffen (kortweg Vervoersbesluit)
- Hier beperken wij ons tot het vervoer over de weg.
Dit is geregeld in het VLG-ADR (Vervoer over Land van Gevaarlijke stoffen – Accord Européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par voie de Route)
- Gevarenklasse 7 betreft radioactieve stoffen.
- Opgedeeld in 13 groepen, ieder met een eigen voorschriftenblad
- Er zijn vrijstellingsgrenzen vastgesteld als fractie van A_1 en A_2 (zie hieronder)

Verpakkingstypes

- Vrijgesteld collo
- Industrieel collo
- Collo type A: bij normaal gebruik geen verlies of verspreiding van radioactieve stoffen
 - Maximale activiteit aangegeven met kengetal
 - A_1 (radioactieve stoffen in speciale toestand (capsule, niet verspreidbaar)
 - A_2 overige radioactieve stoffen
- Collo type B: als Collo type A, maar ook bestand tegen ongevallen, voor activiteiten groter dan A_1 of A_2
- Collo type C: vervoer door de lucht

Stralingsniveau

Grenswaarden:

- 2mSv/uur aan het oppervlak (200 mrem/uur)
- 0.1 mSv/uur op 1 meter afstand (10 mrem/uur)
- Voor vrijgestelde colli 5μSv/h op een willekeurige plaats aan het oppervlak van het collo

De transportindex (TI) is 100x de stralingsintensiteit op 1 meter uitgedrukt in mSv/h (oorspronkelijk mrem/h), naar boven afgerond op 1 decimaal

Besmettingsniveau

Grenswaarden (afwrijfbare besmetting op buitenzijde verpakking):

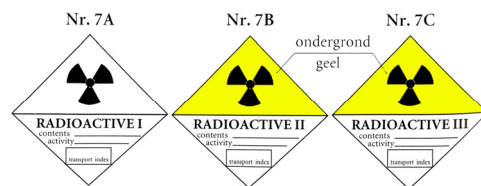
- 4 Bqcm⁻² voor β en γ emitters en α stralers met geringe radiotoxiciteit
- 0.4 Bqcm⁻² voor overige α stralers
- Voor vrijgestelde colli zijn de grenswaarden een factor 10 lager
- Bepaling dient te geschieden over een oppervlak van 300cm²

Overige limieten voertuig:

- Bestuurdersplaats < 20μSv/uur
- Buitenkant < 2mSv/uur op het oppervlak
- Buitenkant < 0.1mSv/uur op 2 meter afstand
- Totale transportindex < 50

Aanduiding op collo:

- I-WIT (7A) minder dan 5μSv/h aan het oppervlak
- II-GEEL (7B) minder dan 500 μSv/h aan het oppervlak én TI ≤ 1.0
- III-GEEL (7C) minder dan 2 mSv/h aan het oppervlak én TI ≤ 10



Op voertuig, bord vergelijkbaar met 7B, zonder II en vermelding activiteit

Mr-HABIS

Ministeriële regeling Hoog Actieve Bronnen Ioniserende Straling

- Doel: het aantal “weesbronnen” en incidenten terugdringen
- Binnen EU raken ~70 bronnen buiten de controle
- Hoogactief: meer dan 1/100 van de A₁ waarde voor vervoer.
- Eens een hoogactieve bron, altijd een hoogactieve bron
- Taken/ verplichtingen ondernemer
 - Melding overheid
 - Jaarlijks in week 1,2
 - Bij wijziging of afvoer
 - Identificatie en markering
 - Uniek nummer
 - Kleurenfoto
 - Bergplaats
 - Controle op
 - Aanwezigheid
 - Integriteit (lektest)
 - Financiële zekerstelling

- Opleiding/instructie
 - Tweejaarlijks mondelinge instructie
 - Schriftelijke documentatie over dit onderricht
 - Instructie voor beveiliging, noodprocedures, brand
- Taken/ verplichtingen fabrikant
 - Unieke code graveren op bron, of broncontainer
 - Schriftelijke informatie bij de bron
 - Kleurenfoto meegeven