
Praktische stralingshygiëne

J. van den Eijnde

K. Huitema

L. Roobol

Negende druk, 2022

Syntax Media – Utrecht

© 2022, Syntax Media, Utrecht

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Voor zover het maken van reprografische veeveelvoudingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van Artikel 16h Auteurswet 1912 dient men de daarvoor verschuldigde vergoedingen te voldoen aan Stichting Reprorecht (www.reprorecht.nl). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) kan men zich wenden tot Stichting UvO (www.stichting-uvo.nl).

ISBN 9789491764523

Ontwerp omslag: Lapis Vivus grafisch ontwerp, Oosterbeek
Opmaak binnenwerk: AlphaZet prepress, Bodegraven
Tekstredactie: Redactie & zo, ir. Caroline van der Meulen

Illustratieverantwoording

Omslag K. Huitema, 1.3 K. Huitema, 1.6 L. van der Meulen, 2.1 Wiki commons (aangepast), 2.2 62727612 @Berkut34 Dreamstime.com, 2.4 K. Huitema, 2.5 17553571 @SerdarTibet, Dreamstime.com, 3.7 L. van der Meulen, 4.1 L. van der Meulen, 5.6 R. de Goede, 5.7 J. van den Eijnde en E. den Hollander, Stratec Services, 5.9 J. van den Eijnde, 5.10 E. den Hollander, Stratec Services, 5.11 K. Huitema, 5.12 R. Daniels, Mirion Technologies, 5.13 en 5.14 T. Meeuwse MetorX BV, 5.15 en 5.16 K. Huitema, 6.1 537299834 @Tomacco Isostock.com, 7.3 en 7.4 COVRA NV, 9.4 J. van den Eijnde, 9.5 184075904 @Berkut34 Dreamstime.com, 9.6 Encorus Group, 9.7 201965365 @Funtay Dreamstime.com, 10.1 K. Huitema, 10.2 BV Cyclotron VU, 10.4 147006053@Ryzhov Sergey Dreamstime.com, 10.5 72366199 @Denboma Dreamstime.com, 10.6 680846443 Shutterstock.com, 11.5 77914512 @Viktor Levi Dreamstime.com, 11.8 B. Kee, H11 andere afbeeldingen: J. van den Eijnde.

De uitgever heeft ernaar gestreefd de auteursrechten te regelen volgens de wettelijke bepalingen. Zij die desondanks rechten menen te kunnen doen gelden, kunnen zich alsnog tot de uitgever wenden.

Auteurs en uitgever verklaren dat deze publicatie met de grootst mogelijke zorgvuldigheid tot stand is gekomen. Zij staan echter niet in voor mogelijk (druk)fouten en/of onvolledigheid in de tekst of de afbeeldingen en aanvaarden derhalve geen enkele aansprakelijkheid voor schade, van welke aard dan ook, die uit het gebruik van de informatie uit deze publicatie zou kunnen voortvloeien.

Vragen en opmerkingen over deze uitgave kunt u richten aan:

Uitgeverij Syntax Media BV
e-mail: info@syntaxmedia.nl
www.syntaxmedia.nl

Woord vooraf

Deze herziene, negende druk van *Praktische stralingshygiëne* geeft systematisch inzicht in de gevaren van toepassing van ioniserende straling. Het boek speelt vooral in op de praktische methoden om die gevaren te beheersen, zodat een aanvaardbaar risico ontstaat.

Nieuw in deze druk is dat er naast de basiskennis ook verdiepende paragrafen zijn opgenomen. Ook is een uitgebreide literatuurlijst toegevoegd. Het boek is nu geheel in full colour uitgevoerd.

Het boek is bedoeld voor iedereen die te maken heeft met open bronnen, gesloten bronnen en röntgentoestellen:

- Nieuwe stralingswerkers kunnen eerste kennis opdoen over de maatregelen om het stralingsrisico te beheersen. Leidinggevendenden kunnen achtergronden lezen van wettelijke regelingen.
- Stralingsbeschermingsdeskundigen kunnen nadere kennis verwerven over de dagelijkse praktijk van het stralingswerk.
- Voor de betrokken toezichthoudend medewerkers stralingsbescherming wordt de stof behandeld die voorgeschreven is voor hun opleidingen.

Wijzigingen ten opzichte van de achtste druk

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de toepassingen van ioniserende straling in Nederland. Nieuw daarin is de behandeling van de vervalreeks van uranium en van radon. Hoofdstuk 4 over de relevante grootheden en eenheden is meer naar voren in het boek geplaatst. Nieuw daarin is de uitgebreide behandeling van de omgevingsdosisequivalenten en een update van de ‘RIVM-stralings-taart’: de verdeling van de verschillende bronnen van stralingsbelasting in Nederland.

In hoofdstuk 5 is de tekst over stralingsdetectie preciezer geformuleerd. Hoofdstuk 6 gaat wat dieper in op de niet-letale kankers en op de risicobeoordeling. In hoofdstuk 7 is meer aandacht voor de taakverdeling binnen de onderneming, en dan in het bijzonder de taken van de toezichthoudend medewerker stralingsbescherming. In hoofdstuk 8 over de dosisberekening is nu in de formules en in de vuistregels de omgevingsdosisequivalent gehanteerd en is de tekst over de huiddosis uitgebreid.

Hoofdstuk 9 over toestellen en ingekapselde bronnen is volledig herschreven en uitgebreid, om het boek voor industriële radiografie en meet- en regeltoepassingen te laten voldoen. In hoofdstuk 10 is paragraaf 10.5 herschreven.

Waar in het boek ‘hij’ wordt gebruikt, wordt ‘hij of zij’ bedoeld.

Dankwoord

We willen de volgende collega's en oud-collega's bedanken voor het leveren van inhoudelijke input en commentaar en met name: B. Godthelp, T. van Dillen, R. de Goede, M. Huikeshoven, K. van Kammen, E. Luijkx, W. Moerman en T. Meeuwsen.

Ook willen we C.M. van der Meulen bedanken voor haar redactionele werk.

De inhoud van dit boek is de verantwoordelijkheid van de auteurs en niet van de instellingen waar ze werken of van de collega's die commentaar hebben geleverd.

Auteurs

Dr. Jos van den Eijnde was in het werkzame leven stralingsdeskundige niveau 2 en veiligheidskundige, is nu gepensioneerd en als gastmedewerker verbonden aan de stralingsbeschermingseenheid van Amsterdam UMC.

Dr. Lars Roobol is stralingsdeskundige niveau 2, werkzaam als hoofd van de afdeling 'Stralingsonderzoek, kennis en beleid' bij het RIVM.

Dr. Klazien Huitema is stralingsdeskundige niveau 2, docent stralingsonderwijs aan de TU Delft.

Leiderdorp, Stompetoren, Dordrecht, juni 2022

Inhoud

Woord vooraf		V
1	Atoombouw en verval	1
1.1	De bouw van een atoom	1
1.2	Stabiliteit van atoomkernen	2
1.3	Radionucliden	3
1.4	Activiteit en specifieke activiteit	4
1.4.1	Activiteit	4
1.4.2	Specifieke activiteit	6
1.5	Activiteit als functie van tijd	6
1.5.1	Halveringstijd $T_{1/2}$	7
1.5.2	Schatting activiteit op bepaald tijdstip	7
1.5.3	Bepaling activiteit met behulp van halverings-tijd	8
1.5.4	Bepaling activiteit met behulp van verval-constante	9
1.6	Elektromagnetische straling	11
1.6.1	Het golfkarakter van elektromagnetische straling	11
1.6.2	Het deeltjeskarakter van elektromagnetische straling	12
1.6.3	De energie van elektromagnetische straling	12
1.7	De straling en deeltjes die kunnen vrijkomen	13
1.7.1	Inleiding	13
1.7.2	Overzicht van de processen	14
1.7.3	α -verval	15
1.7.4	β^- -verval	15
1.7.5	β^+ -verval: positron-emissie	16
1.7.6	Elektronvangst	17
1.7.7	γ -verval	17
1.7.8	Interne conversie	18
1.7.9	Vervolgprocessen: karakteristieke röntgen-straling en Auger-elektronen	18
1.8	Moeder-dochterrelaties	19
1.9	De tijdsvolgorde bij verval	20
2	Definities en overzicht van toepassingen	23
2.1	Inleiding	23
2.2	Definities	23
2.2.1	Bronnen van ioniserende straling	23
2.2.2	Radioactieve stoffen	23
2.2.3	Ingekapselde bronnen	24

2.2.4	Open bronnen	24
2.2.5	Toestellen	24
2.2.6	Splijtstoffen en ertsen	25
2.2.7	Natuurlijke en kunstmatige bronnen	25
2.3	Vervalreeksen en natuurlijke radioactieve stoffen	26
2.3.1	Vervalreeksen	26
2.3.2	Radon en thoron	28
2.4	Overzicht van toepassingen	29
2.5	Toepassingen van ingekapselde bronnen	30
2.6	Open bronnen	33
2.6.1	Overwegingen bij toepassingen	33
2.6.2	Toepassingen van open bronnen	34
2.7	Toestellen	35
2.7.1	Overwegingen bij toepassingen	35
2.7.2	Toepassingen van toestellen	36
2.8	Nucleaire installaties	38
2.8.1	Kernreactoren	38
2.8.2	Uraniumwinning en verrijgingsinstallaties	39
2.9	Naturally Occurring Radioactive Material (NORM)	40

3 Wisselwerking van straling met materie en afscherming van straling 43

3.1	Inleiding	43
3.2	Wisselwerking van α -straling	44
3.3	Wisselwerking van elektronen en β -straling	45
3.3.1	Overzicht van de wisselwerkingen	45
3.3.2	Dracht	48
3.4	Röntgenstraling: herhaling van het voorafgaande	48
3.5	Wisselwerkingsprocessen van röntgen- en γ -straling	48
3.5.1	Overzicht van de wisselwerkingen	48
3.5.2	Dominantie en relevantie van effecten	52
3.5.3	De geproduceerde elektronen die de schade veroorzaken	53
3.6	Afscherming van β -straling	54
3.6.1	Vuistregel voor afscherming van β -straling	54
3.6.2	Lineieke en massieke dracht	55
3.6.3	Verdere overwegingen bij afscherming van β -straling	56
3.7	Afscherming van een smalle bundel röntgen- en γ -straling	57
3.7.1	Opstelling met een smalle bundel	57
3.7.2	Schattingen met halveringsdiktes bij de smalle bundel	57
3.7.3	Berekeningen met de halveringsdikte bij de smalle bundel	58
3.7.4	Berekening met de lineieke verzwakkingscoëfficiënt	59
3.7.5	De massieke verzwakkingscoëfficiënt	60

3.7.6	Het effect van verstrooiing: build-up	61
3.7.7	Bepaling van de afscherming in de praktijk	61
3.8	Gegevens van nucliden	61

4 Grootheden en eenheden in de stralingsbescherming 63

4.1	Inleiding	63
4.2	Fysische grootheden en eenheden	63
4.2.1	Aantal ionisaties	63
4.2.2	Exposie	63
4.2.3	Dosis	64
4.3	Grootheden en eenheden die het risico beschrijven	64
4.3.1	Ontwikkeling van grootheden en eenheden	64
4.3.2	Equivalente dosis	65
4.3.3	Effectieve dosis	65
4.3.4	Volgdosis	67
4.3.5	Ordes van grootte	68
4.3.6	Oude grootheden en eenheden voor het risico	69
4.4	Grootheden en eenheden bij metingen	70
4.4.1	Verskillende meetsituaties	70
4.4.2	De omgevingsdosisequivalenten $H^*(10)$ en $H^*(0,07)$	71
4.4.3	Het persoonsdosisequivalent $H_p(10)$	72

5 Detectie van straling 73

5.1	Inleiding	73
5.2	Materiaal van de detector	74
5.2.1	Absorptie in de wand van de detector	74
5.2.2	Energieafhankelijkheid van de absorptie in het meetvolume	74
5.3	Ionisatiedetectoren	75
5.3.1	Gasgevulde ionisatiedetectoren	75
5.3.2	Vaste-stof-ionisatiedetectoren; halfgeleiderdetectoren	78
5.4	Scintillatiedetectoren	78
5.4.1	De fotoversterkerbuis	79
5.4.2	Vaste-stofdetectoren	80
5.4.3	Vloeibare detectoren	81
5.5.1	Als vermaak	82
5.5.2	In de medische sector	82
5.5.3	In wetenschappelijk onderzoek	83
5.5.4	Bij toegangscontrole	83
5.5	Toepassingen van stralingsdetectie buiten de stralingsbescherming	82
5.6	Keuze van een geschikte detector	84
5.6.1	Identificatie van een bron	84
5.6.2	Bepaling van de activiteit	86
5.6.3	Bepaling van het dosistempo	86
5.6.4	Bepaling van een radioactieve besmetting	87

5.6.5	Samenvatting	90
5.7	Telfout, meetgevoeligheid en efficiëntie	90
5.7.1	Meetnauwkeurigheid	90
5.7.2	Meetgevoeligheid	91
5.7.3	Efficiëntie	92
5.8	Aanbevelingen voor metingen in de praktijk	93
5.8.1	Vooraf, bij start op de afdeling	93
5.8.2	Voorafgaand aan een specifieke meting	93
5.8.3	Tijdens de meting	94

6 Effecten en risico's van straling 95

6.1	Inleiding	95
6.2	Effecten op moleculair en cellulair niveau	95
6.3	Effecten op de mens	96
6.4	Schadelijke weefselreacties	97
6.4.1	Effecten en drempeldosis	97
6.4.2	Kans op optreden	98
6.5	Kansgebonden effecten	99
6.5.1	Epidemiologisch onderzoek naar de effecten van straling	99
6.5.2	Kanttekeningen bij ICRP-risicoschattingen	100
6.5.3	Latente periode	101
6.5.4	Het risico op letale kanker voor een gemiddeld lid van de bevolking	102
6.5.5	Het risico op letale kanker bij specifieke groepen	103
6.5.6	Niet-letale kankers	104
6.6	Effecten op de nakomelingen	106
6.7	Effecten op het ongeboren kind	106
6.8	Vergelijking met andere risico's	107
6.8.1	Vergelijking met andere beroepen	107
6.8.2	Vergelijking met risico's in de samenleving	108
6.8.3	Vergelijking met roken, vliegen en achtergrondstraling	109
6.8.4	Omgaan met risico's	110

7 Regelgeving en ethiek 111

7.1	Inleiding	111
7.2	Terminologie	111
7.3	Het systeem van stralingsbescherming	115
7.3.1	De algemene beginselen	115
7.3.2	Rechtvaardiging	115
7.3.3	Optimalisatie, ALARA	115
7.3.4	ALARA en kosten-batenaanpak	117
7.3.5	Dosislimitering	118
7.4	Structuur van de regelgeving	120
7.4.1	Internationale en nationale regelgeving	120
7.4.2	Het controlestelsel	122
7.4.3	Aparte groep: vliegtuigpersoneel	125

7.4.4	Betrokken overheidsinstanties	125
7.5	Taakverdeling binnen de onderneming	126
7.5.1	Hoogste bestuurder	126
7.5.2	Taakafbakening met andere betrokkenen	126
7.5.3	Taken TMS'er	127
7.5.4	Taken van de stralingsbeschermingsdeskundige	129
7.5.5	Stralingsbeschermingseenheid (SBE)	130
7.6	Regels voor op de werkplek	131
7.7	Regelgeving voor beveiliging	134
7.8	Regelgeving voor vervoer	135
7.9	Regelgeving voor het milieu	136
7.10	Omgaan met risico's en ethiek	140
8	Dosisberekening in de praktijk	143
8.1	Inleiding	143
8.2	De omgevingsdosisequivalenten	143
8.3	Uitwendige bestraling door een radioactieve bron die röntgen of γ -straling uitzendt	144
8.3.1	Tijdsduur	144
8.3.2	Afstand: kwadratenwet	144
8.3.3	Fysische eigenschappen van de bron	146
8.3.4	Afscherming	146
8.3.5	Formule en vuistregel voor het omgevingsdosisequivalenttempo	147
8.3.6	Bepaling van het omgevingsdosisequivalenttempo bij gebruik van afscherming	148
8.4	Bestraling van de huid	149
8.4.1	Noodzaak van een aparte operationele grootheid	149
8.4.2	Vuistregel voor uitwendige bestraling door β -straling	150
8.4.3	Vuistregel voor uitwendige besmetting door β -straling	150
8.4.4	Effectieve dosis bij een huidbestraling	150
8.5	Uitwendige bestraling door een röntgentoestel	151
8.6	Volgdosis door inwendige besmetting	152
9	Ingekapselde bronnen en röntgentoestellen voor niet-medische toepassingen	155
9.1	Inleiding	155
9.2	Definities	156
9.3	Ingekapselde bronnen bij industriële radiografie en bij meet- en regeltoepassingen	157
9.3.1	Keuze van de bron	157
9.3.2	Afscherming van de bron	158
9.3.3	Controle op lek raken	158
9.4	Röntgenstraling bij industriële radiografie en bij meet- en regeltoepassingen	159

9.4.1	Soorten röntgenstraling	159
9.4.2	Röntgenstraling uit een röntgenbuis	159
9.4.3	Dosis ten gevolge van röntgenstraling	161
9.4.4	Afscherming van röntgenstraling uit een röntg toestel	164
9.5	Regelgeving bij industriële radiografie en meet- en regeltoepassingen	164
9.5.1	Uitwerking van de organisatorische regels	165
9.5.2	Uitwerking van de wettelijke regels voor op de werkplek	165
9.5.3	Algemene uitwerking van de optimalisatie/ALARA-verplichting op de werkplek	167
9.6	Toepassingen en maatregelen specifiek bij industriële radiografie	168
9.6.1	HAS-bronnen	169
9.6.2	Beveiliging bij HAS-bronnen	170
9.6.3	Toepassing bij industriële radiografie van bronnen: foto's van lasnaden	170
9.6.4	Speciale toepassingen bij industriële radiografie van hoogactieve bronnen	173
9.6.5	Toepassingen bij industriële radiografie met toestellen	173
9.7	Meet- en regeltoepassingen	174
9.7.1	Neutronenstraling	174
9.7.2	Nucleaire vochtgehalte- en dichtheidsmeter	175
9.7.3	Röntgenfluorescentiescanner (XRF)	177
9.7.4	Vast opgestelde röntgendiffractiebuizen	180
9.7.5	Toepassingen met een ^{63}Ni -bron	181
9.7.6	Ionisatierookmelders	182
9.7.7	Toestellen	183

10 Veiligheidsmaatregelen bij open bronnen 185

10.1	Inleiding	185
10.2	Uitwerking van de wettelijk voorgeschreven regels	187
10.3	Verminderen van de hoeveelheid	188
10.4	Insluiten van de bron: containment	188
10.5	Verwijderen van luchtactiviteit	191
10.5.1	Zuurkast	191
10.5.2	Biohazardkast	192
10.5.3	Handschoenenkast	193
10.5.4	Niet-adequate lokale afzuiging	194
10.6	Individuele bescherming	194
10.7	Controle en decontaminatie	196
10.8	Radioactief afval	197
10.8.1	Inzamelen van radioactief afval	197
10.8.2	Vast radioactief afval	198
10.8.3	Vloeibaar afval	198
10.8.4	Telpotjes en telmatjes	198
10.8.5	Beperking van afval	199

10.9	Specifieke onderwerpen	199
10.9.1	Radionuclidenlaboratoria	199
10.9.2	Jodium	202
10.9.3	Tritium	202
10.9.4	Gelabelde eiwitten	203
10.9.5	Uitwendige bestraling (^{32}P en $^{99\text{m}}\text{Tc}$)	204

11 Stralingsbescherming bij medische toepassingen **205**

	Inleiding	205
A	Algemeen	206
A.1	De patiënt: effecten en doses	206
A.1.1	Schadelijke weefselreacties	206
A.1.2	Kansgebonden effecten	207
A.2	Medewerkers en leden van de bevolking: effecten en doses	209
A.2.1	Schadelijke weefselreacties bij medewerkers	209
A.2.2	Kansgebonden effecten bij medewerkers	210
A.2.3	Doses bij een lid van de bevolking	211
A.3	Wet- en regelgeving	212
A.3.1	Het systeem van dosisbeperking	212
A.3.2	Rechtvaardiging	212
A.3.3	Rechtvaardiging bij proefpersonen	212
A.3.4	Optimalisatie en ALARA	213
A.3.5	Optimalisatie: diagnostische referentieniveaus	213
A.3.6	Optimalisatie: dosisbeperkingen	214
A.3.7	Dosislimieten	214
A.3.8	Wettelijke regelgeving en regelgeving door de beroepsgroepen	215
A.3.9	De deskundigen	216
A.3.10	Enkele voorschriften uit de besluiten, regelingen, verordeningen en vergunningen	218
B	Afdeling nucleaire geneeskunde	219
B.1	Toepassingen bij nucleaire geneeskunde	219
B.1.1	Hoge activiteit en korte halveringstijd	219
B.1.2	Diagnostiek	219
B.1.3	Therapie	222
B.1.4	Ondersteuning	223
B.2	Van toepassing naar dosis bij nucleaire geneeskunde	223
B.2.1	Hoogte van de dosis	223
B.2.2	Inwendige besmetting	223
B.2.3	Prikaccident	224
B.2.4	Uitwendige bestraling van het lichaam	225
B.2.5	Bestraling van de huid	227
B.3	Voorzieningen en maatregelen bij nucleaire geneeskunde	228
B.3.1	Bouwkundige voorzieningen	228
B.3.2	Maatregelen bij het afval	229

B.4	Maatregelen bij nucleaire geneeskunde die je zelf kunt treffen	229
B.4.1	Brongerichte strategie	229
B.4.2	Vooraf bij nieuw soort werk	229
B.4.3	Tijdens handelingen met open bronnen: VIVI	230
C	Afdeling radiotherapie	231
C.1	Toepassingen bij radiotherapie	231
C.1.1	Toepassingen bij ingekapselde bronnen	231
C.1.2	Toepassingen bij versnellers	232
C.2	Van toepassing naar dosis bij ingekapselde bronnen en versnellers	233
C.3	Voorzieningen en maatregelen bij ingekapselde bronnen en versnellers	234
C.3.1	Ingekapselde bronnen	234
C.3.2	Versnellers	234
C.4	Maatregelen die je zelf kunt treffen bij ingekapselde bronnen en versnellers	235
D	Afdeling radiologie	235
D.1	Toepassingen van toestellen bij radiologie	235
D.2	Van toepassing naar dosis bij radiologie	238
D.2.1	Ontvangen doses	238
D.2.2	Parameters die de dosis bepalen bij de patiënt	239
D.2.3	Doses van de medewerker	241
D.3	Voorzieningen en maatregelen bij radiologie	241
D.3.1	Dosimeters	241
D.3.2	Afscherming	241
D.4	Maatregelen die je zelf kunt treffen bij radiologie	242
D.4.1	Algemeen, door medisch specialist	242
D.4.2	Rechtvaardiging vooraf bij specifieke toepassing, zowel door verwijzende persoon als door medisch specialist	243
D.4.3	Tijdens onderzoek bij bediening toestel door medisch specialist	243
D.4.4	Tijdens onderzoek, door medisch specialist en laboranten	243

Oefenvragen en antwoorden	245
----------------------------------	------------

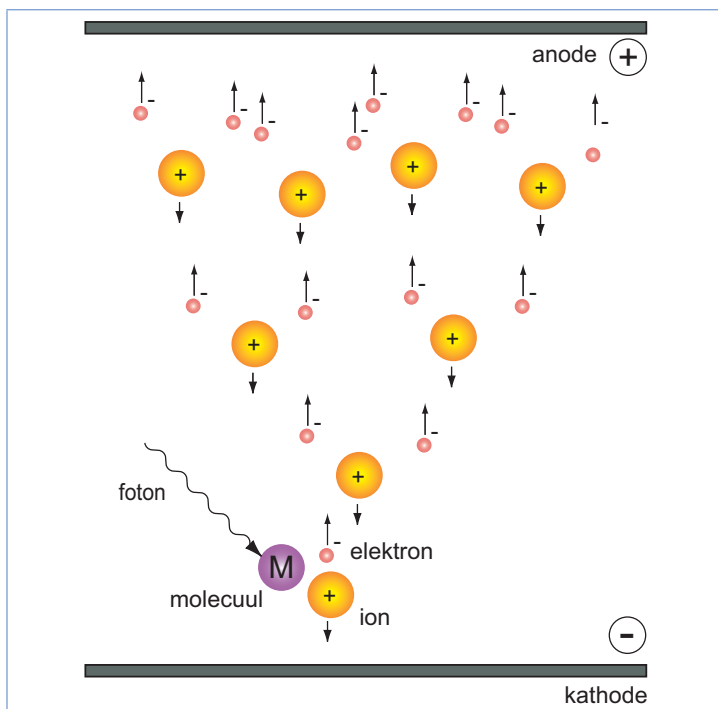
Literatuur	259
-------------------	------------

Trefwoordenregister	261
----------------------------	------------

Zolang de spanning niet te hoog is, is er proportionele versterking: de grootte van de puls is nog steeds evenredig met de energie die door het ingevangen deeltje wordt afgegeven. De *proportionele telbuis* werkt volgens dit principe.

Om α - en β -deeltjes te kunnen detecteren, wordt het venster zo dun gemaakt dat deze straling vrijwel niet door dit venster wordt geabsorbeerd.

Om röntgen- en laagenergetische γ -straling gevoelig te kunnen detecteren, wordt de telbuis gevuld met een gas met hoge Z . De hoge Z , in combinatie met de lage fotonenergie, zorgt ervoor dat het foto-elektrisch effect kan optreden. Daardoor ontstaan er relatief veel ionisaties en wordt de stroompuls relatief groot.

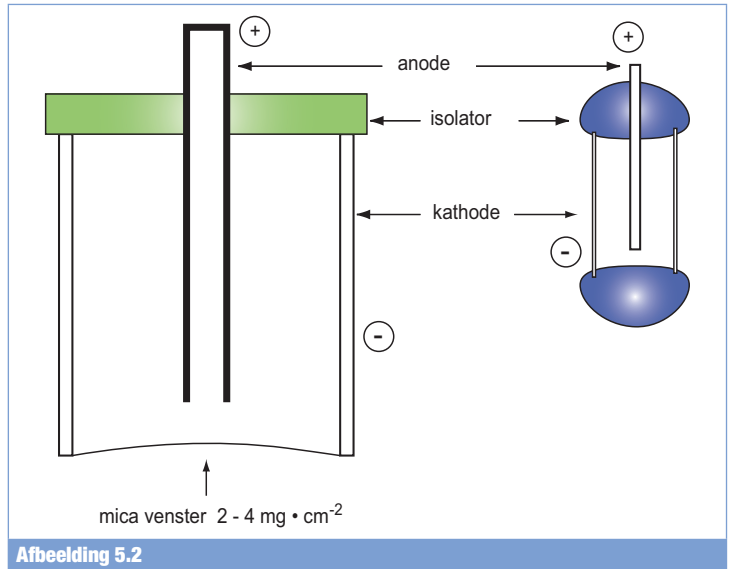


Afbeelding 5.1

Proportionele telbuis: na een eerste ionisatie van het molecuul M door een invallend foton veroorzaken de versnelde elektronen verdere ionisaties.

De GM-buis

De *GM-buis* maakt gebruik van een hogere spanning dan de proportionele telbuis. In de GM-buis gaat het niet om een vermenigvuldiging van ontstane individuele ionisaties, maar veroorzaakt elk binnenvallend deeltje direct een lawine aan ionenparen: in de orde van 10^8 (honderd miljoen). Of het invallende deeltje veel of weinig energie heeft, maakt niet uit; de meting geeft geen informatie over de energie van het binnenkomende deeltje. Voordeel is dat het signaal groot en gemakkelijk te registreren is.



Afbeelding 5.2

Een dun-eindvenster GM-buis van een besmettingsmonitor en een kleine GM-buis, zoals toegepast in dosistempometers.

Als de telbuis via een versterker aan een luidspreker wordt gekoppeld, is elke lawine hoorbaar als een tik (telling, of *count*). Veel van die lawines samen vormen het kenmerkende ‘tikken’ dat je wel eens op de televisie hoort als iemand zo’n telbuis bij een radioactieve bron houdt. In het display van het apparaat is dan het aantal cps (*counts per second*) af te lezen.

De GM-buis heeft altijd een klein formaat, omdat je bij een groot formaat niet het benodigde sterke elektrische veld kunt genereren. Voor het meten van een grootoppervlakte-besmetting is de GM-buis dus niet zo bruikbaar; daarvoor is een proportionele telbuis of een scintillatiedetector geschikter. Maar voor besmettingen met een kleinere oppervlakte kan de GM-buis prima worden ingezet.

Als het doel is dat er een besmetting met relatief zwakke β -straling wordt gedetecteerd, wordt, net als bij de proportionele teller, ook bij de GM-buis een venster zo dun gemaakt dat deze straling vrijwel niet door dit venster wordt geabsorbeerd (linkerdeel van afbeelding 5.2).

Specifiek voor het detecteren van besmettingen met röntgen- en γ -straling wordt gebruikgemaakt van gas met een hoge Z .

De GM-buis kan – in een heel andere uitvoering – ook heel goed worden ingezet voor dosistempometingen van γ -straling. De GM-buis zal dan robuust zijn; er is namelijk geen kwetsbaar venster nodig, en de behuizing kan stevig zijn, want de γ -straling gaat er dan toch nog wel doorheen (rechterdeel van afbeelding 5.2). De GM-buis is door zijn eenvoud relatief goedkoop, maar reageert trager en is minder gevoelig dan de scintillatieteller.

een mutatie in een van de BRCA-1- en BRCA-2-genen. Deze genen werken mee bij het repareren van beschadigd DNA en gaan zo het ontstaan van tumoren tegen. Personen met afwijkende BRCA-genen hebben een grotere kans om borstkanker, eierstok- of prostaatkanker te ontwikkelen.

Personen met het syndroom van Li-Fraumeni hebben een afwijkend p53-gen. Dat gen onderdrukt bij gezonde mensen effectief de ongeremde celdeling die tot het ontstaan van tumoren leidt. Een beschadiging door een bestraling zal bij mensen met het syndroom van Li-Fraumeni vaker tot een ongeremde celdeling leiden.

Daarnaast zal ook het leefgedrag van invloed zijn op de gevoeligheid: het gecombineerde risico op longkanker door roken en straling samen is veel hoger dan op basis van een simpele optelling van risico's verwacht zou worden.

Ook bij vrouwen, kinderen en werknemers geldt dat de risicogedaten alleen zijn bedoeld voor de gemiddelde referentiepersonen en niet gebruikt kunnen worden om het risico voor een specifiek persoon te berekenen. De getallen zijn bedoeld om na te gaan of er algemene beschermingsmaatregelen nodig zijn.

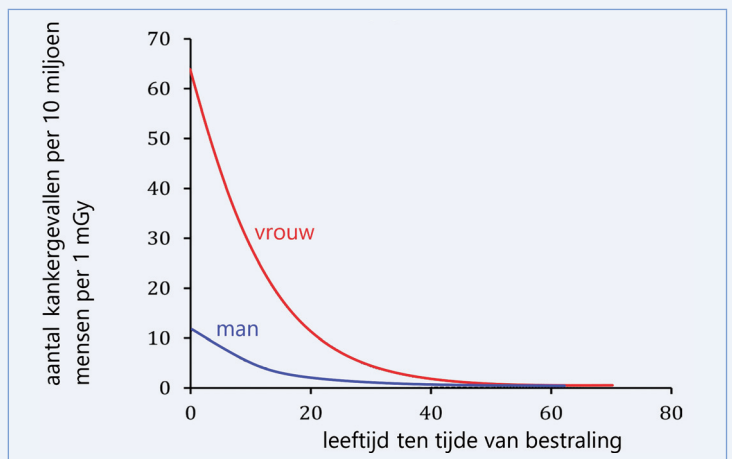
VERDIEPING

6.5.6 Niet-letale kankers

De kans op een *niet-letale kanker* in een orgaan is meestal qua orde van grootte gelijk aan de kans op letale kanker. Er treedt dus geen wezenlijke fout op door bij de bepaling van de weegfactoren uit te gaan van de kans op letale kanker. De uitzonderingen betreffen de *schildklier* en de *huid*.

Bij de *schildklier* is de kans op niet-letale kanker 16 maal groter dan de kans op letale kanker. Voor de schildklier geldt bovendien dat kinderen en vrouwen extra gevoelig voor schildklierkanker zijn (afbeelding 6.6). Dit hoge incidentierisico verklaart dat de weegfactor van de schildklier hoger is (namelijk 0,04) dan je puur op basis van het sterfterisico zou verwachten; dan zou je eerder aan 0,01 denken.

Bij de *huid* is de kans op niet-letale kanker qua orde van grootte 500 maal groter dan de kans op letale kanker. De ICRP geeft aan dat deze niet-letale kanker goed herkenbaar en geneesbaar is, en in het algemeen de kwaliteit van het leven niet sterk aantast. Daarom wordt bij de bepaling van de weegfactor van de huid alleen uitgegaan van het risico van de letale huidkankers. Dat risico is laag, waardoor de weegfactor voor de huid ook laag wordt (0,01).



Afbeelding 6.6

Kans op stralingsgeïnduceerde schildklierkanker als functie van leeftijd, voor mannen en vrouwen [9].

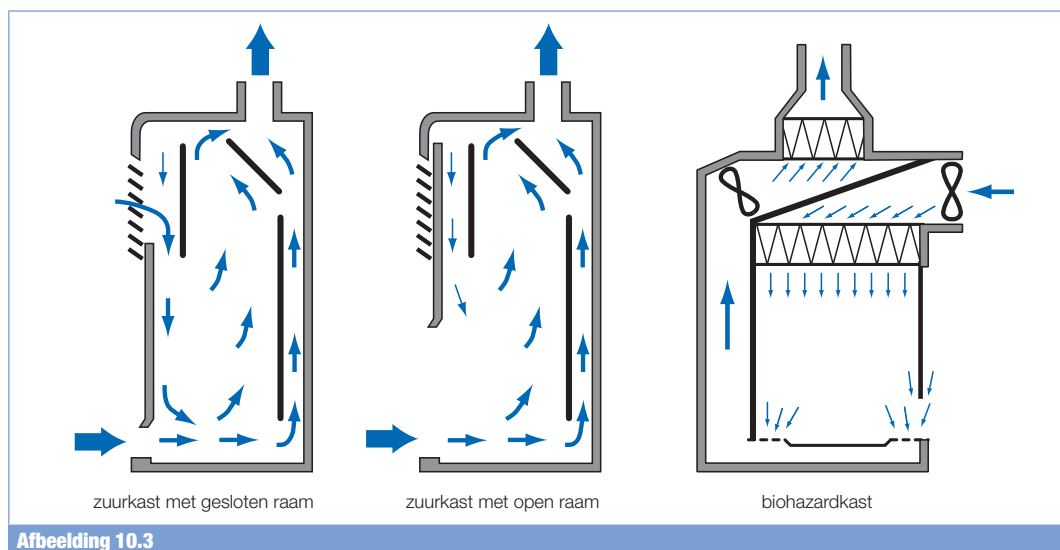
Voor de huid zijn er nog twee andere overwegingen.

Ten eerste wordt meestal slechts een deel van de huid bestraald. Bij de bepaling van de effectieve dosis moet daar nog voor gecorrigeerd worden. Als maar 10 cm^2 wordt bestraald, en niet het totale 17.000 cm^2 huidoppervlak, dan moet de equivalente dosis ook nog vermenigvuldigd worden met $10 / 17.000$ om tot de waarde van de effectieve dosis te komen. Daarmee wordt de effectieve dosis voor de huid in de praktijk verwaarloosbaar klein. De limietstelling voor de huid (paragraaf 7.3.5) is daarom gebaseerd op het voorkomen van een schadelijke weefselreactie.

Ten tweede is niet elk deel van de huid even stralingsgevoelig. De laatste jaren is duidelijk geworden dat het deel van de huid dat aan zonlicht (uv-licht) wordt blootgesteld waarschijnlijk veel stralingsgevoeliger is dan de andere delen. Het deel dat aan zonlicht wordt blootgesteld, is ongeveer 3000 cm^2 . De consequentie hiervan is nog niet geheel duidelijk: moet bij het fractie-effect door 3000 gedeeld worden in plaats van door 17.000, of is bij de bepaling van het kankerrisico dat uv-aspect niet voldoende meegenomen, en is de factor 0,01 niet terecht?

Al met al is de conclusie dat bij bestraling of besmetting van een deel van de huid de effectieve dosis niet zo'n goed beeld geeft van het risico. De effectieve dosis zal vrijwel altijd heel laag zijn, maar er is ook altijd nog een kans op optreden van niet-letale kanker. Ter voorkoming van niet-letale kanker geldt daarom ook voor de huid dat de equivalente dosis op de huid zo laag als redelijkerwijs mogelijk moet zijn.

- Maak geen heftige bewegingen in of voor de zuurkast; loop niet vlak langs een zuurkast waarin wordt gewerkt. Controleer voorafgaand aan het werk of de lucht inderdaad vanuit de ruimte de zuurkast in wordt gezogen. De afzuigventilator van de zuurkast kan namelijk uitgevallen zijn, in verband met onderhoud uitgeschakeld zijn, of na een reparatie op een verkeerde manier teruggemonteerd zijn. De controle kun je bijvoorbeeld doen met een strookje papier dat bij de raamopening vastgeplakt is. Dit strookje papier moet de zuurkast in bewegen.
- Laat geen agressieve stoffen zoals zuren in de zuurkast verdampen. Zo voorkom je schade aan afvoerfilters en kanalen.
- Als de zuurkast naast een toegangsdeur staat (wat helaas voorkomt), zullen mensen die langslipen wervelingen veroorzaken, vooral als ze de deur open- en dichtdoen. Een dergelijke zuurkast zal niet goed als veiligheidsvoorziening functioneren en zelfs een risico kunnen opleveren, omdat hij een vals gevoel van veiligheid geeft. Een gebruikelijke oplossing in deze situatie is om de betreffende deur zo af te sluiten dat hij alleen als nooduitgang is te gebruiken.



Afbeelding 10.3

Lokale ventilatievoorziening.

10.5.2 Biohazardkast

In het rechterdeel van afbeelding 10.3 is een *biologisch veiligheidskabinet klasse II* weergegeven, kortweg *biohazardkast* genoemd. Ook dit is een vorm van lokale afzuiging. Zo'n kast geeft zowel bescherming aan de werker als aan het product. Doel van de biohazardkast is dat het materiaal op het werkvlak niet biologisch besmet raakt. Dat wordt bereikt doordat de lucht die aan de voorkant wordt binnengezogen, direct bij een spleet aan de voorkant weer wordt afgezogen. De lucht bereikt dus het werk-

vlak binnen de biohazardkast niet. De lucht die het werkvlak wel bereikt, komt van boven en is via een aantal filters zo behandeld dat hij 'biologisch schoon' is. Door deze constructie is de medewerker beschermd tegen radioactieve stoffen en het materiaal tegen biologische besmetting. De biohazardkast zorgt net als de zuurkast bij juist gebruik voor een goede bescherming. De opmerkingen voor veilig werken bij de zuurkast gelden ook voor de biohazardkast.

De afvoerlucht van de biohazardkast (de lucht die boven uit de pijp komt) is een punt van aandacht. Als die pijp niet op het centrale afzuigstelsel is aangesloten, komt alle activiteit die in de biohazardkast is toegepast weer in het radionuclidenlaboratorium terecht. Dat kan gezien worden als een vorm van recirculatie, en dat is verboden in een radionuclidenlaboratorium. Raadpleeg hierover de stralingsdeskundige.

10.5.3 Handschoenenkast

Handschoenenkasten zijn de meest effectieve vorm van lokale afzuiging: de ruimte in de kast is volledig van de buitenwereld afgesloten (afbeelding 10.4).



Afbeelding 10.4

De handschoenenkast.

De kast staat op onderdruk; aan de voorkant zijn (handschoen) manchetten aanwezig die door de onderdruk de kastruimte in steken. Door je handen in de manchetten te steken, kun je de materialen op het werkvlak manipuleren. Handschoenenkasten komen weinig voor, omdat het lastig is te werken met die handschoenen. Ze worden gebruikt als een hoge bescherming nodig is: bij het werken met hoog radiotoxische poeders, en bij een combinatie van radioactiviteit en hoogtoxische stoffen. Bij deze handelingen is het niet ongebruikelijk dat er een alarmknop aanwezig is, die bij calamiteiten met een knie bediend kan worden.