

---

# Praktische stralingshygiëne

Jos van den Eijnde

Lars Roobol

**Achtste, geheel gewijzigde druk, 2017  
Oplage 2019**

Syntax Media – Utrecht

---

---

# Woord vooraf

Evenals in de vorige drukken willen we met deze achtste druk systematisch inzicht geven in de gevaren van toepassing van ioniserende straling en in de methoden van de medewerker zelf om die gevaren te beheersen, zodat een aanvaardbaar risico ontstaat. In de hoofdstukken 9, 10 en 11 beschrijven we de maatregelen die de medewerker zelf kan treffen, bij respectievelijk de toepassing van ingekapselde bronnen en röntgentoestellen, in laboratoria en in een medische setting.

De hoofdstukken die daaraan voorafgaan geven achtereenvolgens de fysische achtergronden, de manier om de straling zelf te meten, de relevante grootheden en eenheden, de gevaren van ioniserende straling, de maatregelen die al door de overheid getroffen zijn en de formules waarmee een medewerker zelf zijn dosis kan inschatten.

De bijlagen bevatten enige wiskundige achtergrond en oefenvragen.

Door deze opzet is dit boek ook voor twee andere doelgroepen geschikt.

- Het bevat ook de onderwerpen die nodig zijn voor de Toezichthoudend medewerker stralingsbescherming verspreidbare radioactieve stoffen, Niveau D (TMS-VRS-D) en voor de Toezichthoudend medewerker stralingsbescherming medische toepassingen (TMS-MT).
- De hoofdstukken 1 tot en met 8, en voor zover van toepassing 9 en 10, kunnen gezien worden als een basis voor de zeven andere opleidingen voor Toezichthoudend medewerker stralingsbescherming.

De wijzigingen ten opzichte van de vorige druk betreffen het volgende.

In de hoofdstukken 1 en 3 hebben we de tekst over halveringstijd en halveringsdikte in tweeën geknipt: een deel zonder wiskundige formules en een deel met de precieze formules. Dit zal naar verwachting enerzijds het begrip van die tekst ten goede komen en zal er anderzijds voor zorgen dat deze belangrijke zaken van de stralingsbescherming ook begrijpelijk worden voor mensen zonder wiskundige achtergrondkennis.

Hoofdstuk 2, overzicht van toepassingen, bevat nu slechts een beknopt overzicht van de medische toepassingen; de uitgebreide beschrijving daarvan is nu opgenomen in hoofdstuk 11.

In hoofdstuk 4, over meetapparatuur, staat een extra paragraaf over het praktisch uitvoeren van metingen.

In hoofdstuk 5, over grootheden en eenheden, hebben we de nieuwe weefselweegfactoren beschreven.

Hoofdstuk 6, over effecten en risico's, is vrijwel niet veranderd.

Hoofdstuk 7, over regelgeving, is het meest gewijzigd. Het beschrijft de situatie zoals die zal zijn vanaf februari 2018, als het nieuwe 'Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming' van kracht is. We hebben een extra paragraaf over beveiliging opgenomen. De regelgeving over radioactief afval, die voorheen in het aparte hoofdstuk 11 over radioactief afval stond, is nu in dit hoofdstuk verwerkt. Ten slotte is een paragraaf over ethische aspecten van regelgeving opgenomen.

De vroegere hoofdstukken 8 en 9 zijn van plaats gewisseld.

In hoofdstuk 8, over zelf berekenen van de dosis, gebruiken we bij 'uitwendige bestraling' voor de paragraafvolgorde de gebruikelijke indeling 'tijd, afstand, afscherming'. In de formules gebruiken we nu de  $h(10)$ , de omgevingsdosistempo-constante. Om de formules ook voor niet-wiskundig onderlegden inzichtelijk te houden wordt gebruikgemaakt van de halveringstijd en de halveringsdiktes, en niet van de vervalconstante en de verzwakkingscoëfficiënt. De vuistregels voor  $\beta$ -straling zijn gewijzigd.

Hoofdstuk 9, over ingekapselde bronnen en röntgentoestellen en hoofdstuk 10 over open bronnen zijn vrijwel niet gewijzigd. Hoofdstuk 9 richt zich op toepassingen buiten de medische setting.

De inhoud van het vroegere hoofdstuk 11, over radioactief afval, is nu opgenomen in hoofdstuk 7 over regelgeving en in de hoofdstukken 10 (laboratoria) en 11 (medische toepassingen).

Het nieuwe hoofdstuk 11 beschrijft de praktische stralingshygiëne in een medische omgeving.

De oefenvragen zijn allemaal hetzelfde gebleven. De open vragen zijn vooral bedoeld voor de Toezichthoudend medewerkers stralingsbescherming.

Vanaf begin 2018 is een Engelstalige versie van deze druk verkrijgbaar.

*Drs. Jos van den Eijnde*, Stralingsdeskundige niveau 2 en veiligheidskundige, werkzaam bij de Arbodienst AMC, in Amsterdam

*Dr. Lars Roobol*, Stralingsdeskundige niveau 2, werkzaam als hoofd Afdeling meten en monitoring bij het RIVM, in Bilthoven

Leiderdorp, Stompvoren, september 2017

We willen collega's en oud-collega's bedanken voor het leveren van inhoudelijke input en commentaar, met name F. Bomert, J. Deeterink, T. van Dillen, R. de Goede, M. Huikeshoven, G. Streekstra, D. Valk en J.E. Wiersema. Ook willen we M. Twigt 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.

*Waar in het boek 'hij' wordt gebruikt, wordt 'hij of zij' bedoeld.*

---

# Inhoud

|                     |   |           |
|---------------------|---|-----------|
| <b>Woord vooraf</b> |   | <b>V</b>  |
| <b>1</b>            | <b>Atoombouw en verval</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1                 | De bouw van een atoom   | 1         |
| 1.2                 | Stabiliteit van atoomkernen   | 2         |
| 1.3                 | Radionucliden   | 3         |
| 1.4                 | Activiteit van een nuclide  | 4         |
| 1.5                 | De activiteit als functie van de tijd   | 5         |
| 1.5.1               | De halveringstijd $T_{1/2}$   | 5         |
| 1.5.2               | De schatting van de activiteit op een bepaald tijdstip                            | 6         |
| 1.5.3               | De bepaling van de activiteit met behulp van de halveringstijd                    | 7         |
| 1.5.4               | De bepaling van de activiteit met behulp van de vervalconstante                   | 8         |
| 1.6                 | De straling en de deeltjes die bij verval vrijkomen                               | 10        |
| 1.6.1               | Inleiding   | 10        |
| 1.6.2               | $\alpha$ -verval  | 12        |
| 1.6.3               | Vervalwijze bij neutronenoverschot:<br>$\beta$ -verval                            | 12        |
| 1.6.4               | Vervalwijzen bij neutronentekort:<br>elektronvangst en positron-emissie           | 13        |
| 1.6.5               | Vervalwijzen bij een teveel aan energie:<br>$\gamma$ -verval en interne conversie | 14        |
| 1.6.6               | Vervalwijzen in atoomkern: röntgenstraling<br>en Auger-elektronen                 | 15        |
| 1.6.7               | Moeder-dochterrelaties  | 15        |
| 1.7                 | De tijdsvolgorde bij verval   | 16        |
| <b>2</b>            | <b>Toepassingen en vervalproducten</b>  | <b>19</b> |
| 2.1                 | Inleiding   | 19        |
| 2.2                 | Algemene definities   | 19        |
| 2.3                 | Ingekapselde bronnen  | 20        |
| 2.3.1               | Inleiding   | 20        |
| 2.3.2               | Toepassingen van ingekapselde bronnen   | 20        |
| 2.4                 | Open bronnen  | 23        |
| 2.4.1               | Inleiding   | 23        |
| 2.4.2               | Handelingen met open bronnen  | 23        |
| 2.5                 | Toestellen en versnellers   | 25        |
| 2.5.1               | Inleiding   | 25        |
| 2.5.2               | Toepassingen  | 25        |
| 2.5.3               | Opwekking van röntgenstraling   | 27        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.6      | Neutronen   | 29        |
| 2.6.1    | Voorkomen en eigenschappen  | 29        |
| 2.6.2    | Toepassingen van neutronenbronnen   | 30        |
| 2.6.3    | Veiligheidsmaatregelen  | 31        |
| 2.7      | Nucleaire installaties  | 32        |
| 2.7.1    | Kernreactoren   | 32        |
| 2.7.2    | Uraniumwinning en verrijkingsinstallaties                                 | 32        |
| 2.8      | Naturally Occuring Radioactive Material (NORM)                            | 34        |
| <b>3</b> | <b>Wisselwerking van straling met materie en afscherming van straling</b> | <b>37</b> |
| 3.1      | Inleiding   | 37        |
| 3.2      | Wisselwerking van $\alpha$ -straling                                      | 38        |
| 3.3      | Wisselwerking van $\beta$ -straling                                       | 38        |
| 3.4      | Wisselwerkingsprocessen van $\gamma$ - en röntgenstraling                 | 41        |
| 3.5      | Afscherming van $\beta$ -straling en fotonenstraling                      | 45        |
| 3.5.1    | Vuistregel voor afscherming van $\beta$ -straling                         | 45        |
| 3.5.2    | Lineieke en massieke dracht   | 46        |
| 3.5.3    | Verdere overwegingen bij afscherming van $\beta$ -straling                | 47        |
| 3.5.4    | Afscherming van een smalle bundel $\gamma$ -straling                      | 47        |
| 3.5.5    | Afscherming van de straling van een röntgentoestel                        | 49        |
| 3.5.6    | Het effect van verstrooiing: build-up                                     | 50        |
| 3.6      | Afschermingsgegevens  | 51        |
| <b>4</b> | <b>Detectie van straling</b>  | <b>53</b> |
| 4.1      | Inleiding   | 53        |
| 4.2      | Ionisatiedetectoren   | 53        |
| 4.2.1    | Gasgevulde detectoren   | 54        |
| 4.2.2    | Vaste-stofdetectoren  | 56        |
| 4.3      | Scintillatiedetectoren  | 57        |
| 4.3.1    | Inleiding   | 57        |
| 4.3.2    | Vaste-stofdetectoren  | 58        |
| 4.3.3    | Vloebare detectoren   | 59        |
| 4.4      | Toepassingen van stralingsdetectie buiten de stralingsbescherming         | 61        |
| 4.5      | Toepassingsgebieden van detectieapparatuur in de stralingsbescherming     | 63        |
| 4.5.1    | Identificatie van een bron  | 63        |
| 4.5.2    | Bepalen van de activiteit   | 65        |
| 4.5.3    | Bepaling van het stralingsniveau  | 65        |
| 4.5.4    | Meting van radioactieve besmettingen                                      | 66        |
| 4.6      | Telfout en meetgevoeligheid   | 69        |
| 4.7      | Overzicht van detectoren en hun toepassingsgebieden                       | 71        |
| 4.8      | Aanbevelingen voor metingen in de praktijk                                | 71        |
| 4.8.1    | Vooraf, bij start op de afdeling  | 71        |
| 4.8.2    | Voorafgaand aan een meting  | 72        |
| 4.8.3    | Tijdens de meting   | 73        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>5</b> | <b>Grootheden en eenheden in de stralingsbescherming</b> | <b>75</b>  |
| 5.1      | Inleiding  | 75         |
| 5.2      | Definities van grootheden en eenheden                    | 75         |
|          | 5.2.1 Inleiding  | 75         |
|          | 5.2.2 Expositie  | 75         |
|          | 5.2.3 Dosis  | 76         |
|          | 5.2.4 Equivalente dosis                                  | 76         |
|          | 5.2.5 Effectieve dosis                                   | 77         |
|          | 5.2.6 Volgdosis  | 79         |
| 5.3      | Ordes van grootte van de effectieve dosis                | 79         |
| 5.4      | Oude grootheden en eenheden                              | 80         |
| <b>6</b> | <b>Effecten en risico's van straling</b>                 | <b>81</b>  |
| 6.1      | Inleiding  | 81         |
| 6.2      | Effecten op moleculair en cellulair niveau               | 81         |
| 6.3      | Effecten op de mens                                      | 82         |
| 6.4      | Schadelijke weefselreacties                              | 83         |
| 6.5      | Kansgebonden effecten                                    | 84         |
| 6.6      | Effecten op het nageslacht                               | 87         |
| 6.7      | Effecten op het ongeboren kind                           | 87         |
| 6.8      | Vergelijking met andere risico's                         | 88         |
| <b>7</b> | <b>De regelgeving</b>                                    | <b>91</b>  |
| 7.1      | Inleiding  | 91         |
| 7.2      | Terminologie   | 91         |
| 7.3      | Het systeem van de stralingsbescherming                  | 94         |
|          | 7.3.1 De algemene beginselen                             | 94         |
|          | 7.3.2 De rechtvaardiging                                 | 94         |
|          | 7.3.3 Optimalisering, ALARA                              | 94         |
|          | 7.3.4 Dosislimitering                                    | 96         |
| 7.4      | Organisatorische aspecten van de regelgeving             | 97         |
|          | 7.4.1 Internationale en nationale regelgeving            | 97         |
|          | 7.4.2 Het controlestelsel                                | 99         |
|          | 7.4.3 De deskundigen                                     | 102        |
| 7.5      | Regels voor op de werkplek                               | 105        |
| 7.6      | Regelgeving voor beveiliging                             | 109        |
| 7.7      | Regelgeving voor vervoer                                 | 111        |
| 7.8      | Regelgeving voor het milieu                              | 112        |
| 7.9      | Regels, perceptie en ethiek                              | 113        |
| <b>8</b> | <b>Dosisberekening in de praktijk</b>                    | <b>117</b> |
| 8.1      | Inleiding  | 117        |
| 8.2      | Uitwendige bestraling door een radioactieve bron         | 117        |
|          | 8.2.1 Inleiding  | 117        |
|          | 8.2.2 Tijdsduur  | 118        |
|          | 8.2.3 Afstand: kwadratenwet                              | 118        |
|          | 8.2.4 De fysische eigenschappen van de bron              | 119        |
|          | 8.2.5 Afscherming  | 120        |
|          | 8.2.6 Formule en vuistregel voor het dosistempo          | 121        |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 8.3 | Bestraling van de huid                           | 122 |
| 8.3 | Bestraling van de huid                           | 122 |
|     | 8.3.1 Uitwendige bestraling                      | 122 |
|     | 8.3.2 Uitwendige besmetting                      | 123 |
|     | 8.3.3 De effectieve dosis bij een huidbestraling | 123 |
| 8.4 | Uitwendige bestraling door een röntgentoestel    | 124 |
| 8.5 | Volgdosis door inwendige besmetting              | 124 |

## **9 Ingekapselde bronnen en röntgentoestellen voor niet-medische toepassingen 127**

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 9.1 | Inleiding   | 127 |
| 9.2 | Veiligheidsmaatregelen bij ingekapselde bronnen                                 | 128 |
|     | 9.2.1 Organisatorische maatregelen  | 128 |
|     | 9.2.2 Maatregelen op de werkplek  | 130 |
|     | 9.2.3 Specifieke toepassingen: industriële radiografie                          | 132 |
|     | 9.2.4 Specifieke toepassingen: gaschromatografie met een $^{63}\text{Ni}$ -bron | 133 |
|     | 9.2.5 Specifieke toepassingen: bronnen met een hoge activiteit                  | 134 |
| 9.3 | Veiligheidsmaatregelen bij röntgentoestellen en bestralingsapparatuur           | 134 |
|     | 9.3.1 Organisatorische maatregelen  | 134 |
|     | 9.3.2 Maatregelen op de werkplek  | 134 |
|     | 9.3.3 Maatregelen bij specifieke toepassingen: Röntgendiffractie-apparatuur     | 137 |

## **10 Veiligheidsmaatregelen bij open bronnen 139**

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 10.1 | Inleiding  | 139 |
| 10.2 | Organisatorische maatregelen   | 139 |
| 10.3 | Verminderen van de hoeveelheid   | 140 |
| 10.4 | Insluiten van de bron: containment   | 140 |
| 10.5 | Verwijderen van luchtactiviteit  | 142 |
| 10.6 | Individuele bescherming  | 144 |
| 10.7 | Controle en decontaminatie   | 145 |
| 10.8 | Radioactief afval  | 146 |
|      | 10.8.1 Inzamelen van radioactief afval   | 146 |
|      | 10.8.2 Vast radioactief afval  | 147 |
|      | 10.8.3 Vloeibaar afval   | 147 |
|      | 10.8.4 Telpotjes en telmatjes  | 148 |
|      | 10.8.5 Beperking van het afval   | 148 |
| 10.9 | Specifieke onderwerpen   | 148 |
|      | 10.9.1 Radionuclidenlaboratoria  | 148 |
|      | 10.9.2 Jodium  | 151 |
|      | 10.9.3 Tritium   | 152 |
|      | 10.9.4 Gelabelde eiwitten  | 152 |
|      | 10.9.5 Uitwendige bestraling (onder andere $^{32}\text{P}$ en $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) | 152 |



|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>1 1</b> | <b>Stralingsbescherming bij medische toepassingen</b>                                   | <b>155</b> |
|            | Inleiding   | 155        |
| A          | Algemeen  | 156        |
| A.1        | De patiënt: effecten, doses en risico's   | 156        |
|            | A.1.1 Effecten: weefselreacties   | 156        |
|            | A.1.2 Kansgebonden effecten en de ontvangen doses                                       | 157        |
|            | A.1.3 Het risico voor de patiënt  | 158        |
| A.2        | De medewerkers: effecten, doses en risico's   | 160        |
|            | A.2.1 Effecten: schadelijke weefselreacties   | 160        |
|            | A.2.2 Kansgebonden effecten en de ontvangen doses                                       | 160        |
|            | A.2.3 Het risico voor de medewerker   | 162        |
| A.3        | Wet- en regelgeving   | 162        |
|            | A.3.1 Inleiding   | 162        |
|            | A.3.2 Het systeem van dosisbeperking  | 162        |
|            | A.3.3 Rechtvaardiging   | 163        |
|            | A.3.4 Proefpersonen   | 163        |
|            | A.3.5 Optimalisatie en ALARA  | 163        |
|            | A.3.6 Optimalisatie: diagnostische referentieniveaus                                    | 164        |
|            | A.3.7 Optimalisatie: dosisbeperkingen   | 164        |
|            | A.3.8 Dosislimieten   | 165        |
|            | A.3.9 De diverse niveaus van de regelgeving   | 165        |
|            | A.3.10 De deskundigen   | 166        |
|            | A.3.11 Enkele voorschriften uit de besluiten, regelingen, verordeningen en vergunningen | 169        |
| B          | De afdeling Nucleaire geneeskunde   | 170        |
| B.1        | Toepassingen bij Nucleaire geneeskunde  | 170        |
|            | B.1.1 Inleiding   | 170        |
|            | B.1.2 Diagnostiek   | 171        |
|            | B.1.3 Therapie  | 173        |
|            | B.1.4 Ondersteuning   | 174        |
| B.2        | Van toepassing naar dosis bij Nucleaire geneeskunde                                     | 174        |
|            | B.2.1 Inleiding   | 174        |
|            | B.2.2 Inwendige besmetting  | 175        |
|            | B.2.3 Prikaccident  | 176        |
|            | B.2.4 Uitwendige bestraling van het lichaam   | 176        |
|            | B.2.5 Bestraling van de huid  | 178        |
| B.3        | Voorzieningen en maatregelen bij Nucleaire geneeskunde                                  | 179        |
|            | B.3.1 Bouwkundige voorzieningen   | 179        |
|            | B.3.2 Maatregelen bij het afval   | 180        |
| B.4        | Maatregelen bij Nucleaire geneeskunde die je zelf kunt treffen                          | 180        |
|            | B.4.1 Inleiding   | 180        |
|            | B.4.2 Vooraf bij nieuw soort werk   | 181        |
|            | B.4.3 Tijdens de handelingen met open bronnen: VIVI                                     | 181        |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| C   | De afdeling radiotherapie  | 182 |
| C.1 | Toepassingen bij Radiotherapie   | 182 |
|     | C.1.1 Toepassingen bij ingekapselde bronnen  | 182 |
|     | C.1.2 Toepassingen bij versnellers   | 183 |
| C.2 | Van toepassing naar dosis bij ingekapselde bronnen en versnellers  | 185 |
| C.3 | Voorzoningen en maatregelen bij ingekapselde bronnen en versnellers  | 186 |
|     | C.3.1 Ingekapselde bronnen   | 186 |
|     | C.3.2 Versnellers  | 186 |
| C.4 | Maatregelen die je zelf kunt treffen bij ingekapselde bronnen en versnellers   | 187 |
| D   | De afdeling radiologie   | 187 |
| D.1 | Toepassingen van toestellen bij de afdeling Radiologie   | 187 |
| D.2 | Van toepassing naar dosis bij de afdeling Radiologie   | 190 |
|     | D.2.1 De patiënt   | 190 |
|     | D.2.2 De medewerker  | 192 |
| D.3 | Voorzoningen en maatregelen bij de afdeling Radiologie   | 192 |
|     | D.3.1 De dosimeters  | 192 |
|     | D.3.2 Afscherming  | 192 |
| D.4 | Maatregelen die je zelf kunt treffen bij de afdeling Radiologie  | 193 |
|     | D.4.1 Inleiding  | 193 |
|     | D.4.2 Algemeen, door de medisch specialist   | 193 |
|     | D.4.3 Rechtvaardiging vooraf bij een specifieke toepassing, zowel door de verwijzende persoon als door de medisch specialist | 194 |
|     | D.4.4 Tijdens het onderzoek bij de bediening van het toestel door de medisch specialist                                      | 194 |
|     | D.4.5 Tijdens het onderzoek, door medisch specialist en laboranten   | 194 |

### **Bijlage A Toelichting op machten, logaritmen en grafieken 198**

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Machten en logaritmen | 198 |
| Grafieken             | 199 |

### **Bijlage B Meten en meetfouten 201**

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| De statistische fout            | 201 |
| Combineren van fouten           | 202 |
| Fout in een verschil of som     | 202 |
| Fout in een quotiënt of product | 204 |

### **Bijlage C Oefenvragen 206**

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| Open vragen                | 206 |
| Meerkeuzevragen            | 211 |
| Antwoorden open vragen     | 217 |
| Antwoorden meerkeuzevragen | 218 |

### **Register 219**

groter is dan de telfout in de achtergrond. De fout in dit verschil, de netto telling, is dan wel relatief groot. Om die fout te berekenen is de foutenvoortplantingswet nodig. Voor zover daaraan behoefte bestaat is een uitgebreidere beschouwing te vinden in bijlage B.

Het begrip gevoeligheid kan gedefinieerd worden als de minimaal detecteerbare activiteit. Uit het voorgaande volgt dat deze gevoeligheid afhangt van de relatieve fout in de telling. Lang tellen en ook het verlagen van de achtergrond verbeteren dus de gevoeligheid.

#### Voorbeeld 1

Een teller heeft een gemiddelde achtergrond van 36 pulsen per minuut. Volgens het bovenstaande moeten er ten minste  $\sqrt{36} = 6$  pulsen in 1 minuut meer geteld worden wil er sprake zijn van meetbare activiteit. Tellen we echter 10 minuten, dan moeten er  $\sqrt{360} = 19$  pulsen meer geteld worden. Per minuut uitgedrukt zijn dat echter nog geen 2 pulsen, dus een ongeveer driemaal zo kleine activiteit wordt dan meetbaar. Dit is logisch, de tijd is immers tienmaal zo groot en de meting is dus  $\sqrt{10} = 3,2$  keer zo gevoelig.

Door een betere afscherming van de genoemde teller wordt de achtergrond beperkt tot 9 pulsen per minuut. De minimale verhoging, vereist om vast te stellen dat er activiteit aanwezig is (als er 10 minuten wordt geteld), is dan  $\sqrt{90} = 9,5$  pulsen. Dit is dus ongeveer 1 puls per minuut. Door de achtergrond met een factor 4 te verlagen wordt de gevoeligheid met een factor 2 ( $= \sqrt{4}$ ) verbeterd.

De gevoeligheid van een meting wordt dus verbeterd door de achtergrond te verlagen en langer tellen verbetert zowel de telnaauwkeurigheid als de gevoeligheid.

Bij een monitor met wijzeraanduiding is de slingering van de wijzer bij de achtergrondmeting de bepalende factor voor de gevoeligheid. Pas als de aanwijzing op een plaats waar je activiteit zou kunnen verwachten duidelijk groter is dan de gemiddelde uitslag van de wijzer bij de achtergrondmeting plus de slingering, is er sprake van activiteit, bijvoorbeeld een besmetting.

#### Voorbeeld 2

Een besmettingsmonitor wijst boven een schoon oppervlak gemiddeld 8 pulsen per seconde (cps = counts per second) aan, met een slingering van de wijzer rond die waarde van  $\pm 3$  cps. Er is dus sprake van een besmetting als er gemiddeld ten minste 11 cps wordt aangewezen. Als nu bijvoorbeeld voor  $^{125}\text{I}$  op de meter vermeld staat dat 1 cps overeenkomt met een oppervlaktesbesmetting van  $0,3 \text{ Bq/cm}^2$ , dan is dus de minimaal detecteerbare oppervlaktesbesmetting  $3 \cdot 0,3 \approx 1 \text{ Bq/cm}^2$ .

## 4.7 Overzicht van detectoren en hun toepassingsgebieden

Monitoren dient men steeds in overleg met de stralingsdeskundige te gebruiken. Een onjuiste keuze kan tot een schijnbare veiligheid leiden, omdat je door het gebruik van de verkeerde detector (onterecht) geen activiteit meet.

Tabel 4.1  
Detectoren en hun toepassingen

|   | meten van $\beta$ -straling | meten van fotonenstraling  |
|---|-----------------------------|--|
| <b>Ionisatiedetectoren</b>  |                             |  |
| GM-buis (dun venster)   | besmetting*                 | dosistempo   |
| GM-buis (dik venster)   | dosistempo                  | dosistempo   |
| proportionele telbuis (dun venster, xenon vulling) (HP)Ge, Ge(Li) | besmetting*                 | besmetting bij laagenergetische $\gamma$ 's zoals $^{125}\text{I}$ |
|   | –                           | spectrum (complex)<br>identificatie nuclide                        |
| <b>Scintillatiedetectoren</b>                                     |                             |  |
| NaI(Tl)   | –                           | besmetting<br>spectrum (eenvoudig)                                 |
| antracene of ZnS  | besmetting*                 |  |
| TLD   | persoonsdosismeter          | persoonsdosismeter   |
| <b>Scintillatievloeistof</b>                                      | besmetting*                 | zachte $\gamma$ -straling  |

\*) ook  $\alpha$ -straling

## 4.8 Aanbevelingen voor metingen in de praktijk

### 4.8.1 Vooraf, bij start op de afdeling

- 1 Laat je bij de introductie op de werkplek informeren welke meters er zijn en voor welke toepassingen ze bedoeld zijn.
- 2 Laat je ook goed informeren waarvoor ze *niet* bedoeld zijn, met name of ze ook laagenergetische straling van bijvoorbeeld 20 keV gevoelig genoeg kunnen meten. Sommige meters meten in dat gebied slechts met een gevoeligheid van een paar procent. Aangezien de strooi straling van een 40kV-röntgen-diffractiebus voor een groot deel uit 20keV-straling zal bestaan en aangezien sommige radionucliden juist in dat gebied de belangrijkste straling uitzenden, zal je de belangrijkste component van de straling dan niet meten.
- 3 Oefen bij meters met een keuzemenu de diverse instellingen; in de meeste menu's zal je zonder enige oefening snel verdwalen.

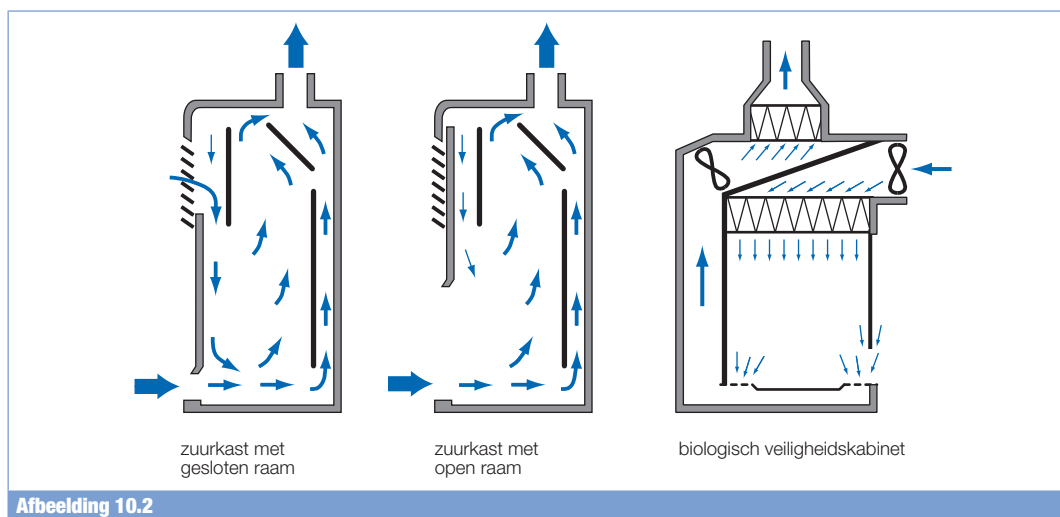
Als je buiten de bewaakte of gecontroleerde zone met activiteit gaat werken, moet je waarschuwingsborden ‘Radioactief’ op de betreffende apparatuur zetten. Controleer deze apparatuur na afloop op besmetting.

Indien je apparatuur ter reparatie buiten de werkruimte moet brengen, moet dat in het algemeen in overleg met de stralingsdeskundige gebeuren. Je zal de apparatuur natuurlijk altijd eerst op besmetting moeten controleren en zo nodig decontamineren.

### 10.5 Verwijderen van luchtactiviteit

Bij het werken met open bronnen kan zich activiteit in de lucht verspreiden.

Het is het beste om de activiteit te verwijderen, voordat deze in de ruimte kan komen. Daarvoor heb je *lokale afzuiging*.



Lokale ventilatievoorziening.

De *zuurkast* is de meest gebruikte vorm van lokale afzuiging. Controleer voorafgaand aan het werk of de lucht vanuit de ruimte de zuurkast in wordt gezogen, bijvoorbeeld door een strookje papier aan de opening van het zuurkastraam te hangen. De ventilatie in de werkruimte waar de zuurkast staat, is immers een tamelijk kwetsbaar systeem; als de afzuiging van de ruimte niet plaatsvindt via de zuurkasten, maar met aparte afzuigkanalen, is het bij overdimensionering van die afzuiging mogelijk dat er lucht uit de zuurkast het laboratorium in gezogen wordt. Ook als de ventilator van het zuurkastkanaal defect of in verband met onderhoud uitgeschakeld is, of verkeerd om is gemonteerd, zal vanuit de zuurkast lucht de ruimte in komen.

Met zo'n strookje kun je bovendien nagaan of er inderdaad sprake is van een zuurkast. Dat is nodig, want er staan met name in een medische omgeving en bij biotechnologisch onderzoek ook veel kasten die qua uiterlijk sterk lijken op zuurkasten, maar die zijn ontworpen om de luchtstroom op het werkvlak steriel te laten zijn (laminaire flowkasten). De lucht wordt dan binnen de kast eerst door een filter geleid, vervolgens over het werkblad en daarna, via de raamopening, de werkruimte in. Het zal duidelijk zijn dat een dergelijke 'flowkast' geen bescherming biedt aan de werker.

*Biohazardkasten* zijn ook een vorm van lokale afzuiging: ze geven zowel bescherming aan de werker als aan het product. Dit zijn laminaire flowkasten, waarbij de lucht niet via het raam wordt uitgeblazen, maar wordt afgezogen in een afzuigspleet aan de voorkant; die afzuigspleet is aangesloten op een apart kanaal. Dat aparte kanaal kan afblazen in de laboratoriumruimte zelf. Als dat het geval is, mag een biohazardkast in het algemeen niet gebruikt worden voor stralingswerk.

*Handschoenenkasten* zijn de meest effectieve vorm van lokale afzuiging: de ruimte in de kast is van de buitenwereld afgesloten. 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 kan je dan de materialen op het werkvlak manipuleren.

Ten slotte is belangrijk op te merken dat de afzuigkappen die boven het experiment hangen (puntafzuigingen) wel vaak voorkomen, maar in de praktijk meestal niet functioneren. Lucht kan immers niet gericht worden aangezogen, net zomin als het mogelijk is een lucifer 'uit' te zuigen.

Gebruik de zuurkast op een juiste wijze.

- Plaats de opstelling zover mogelijk naar achter in de kast. Als vuistregel geldt, dat het voorste deel (15 tot 20 cm) van het werkblad ongebruikt blijft.
- Zorg dat de luchtstroom niet belemmerd wordt. Plaats de zuurkast dus niet te vol, let erop dat de afzuigspleten aan de achterkant niet worden geblokkeerd en zet grote opstellingen die de luchtstroom belemmeren op een vlonder of op blokjes, zodat de luchtstroom er ook onderdoor kan.
- Maak geen heftige bewegingen in of voor de zuurkast; loop niet vlak langs een zuurkast waarin wordt gewerkt.
- Houd het raam zover mogelijk gesloten. Een vrijwel dicht raam is immers minder gevoelig voor verstoringen van de luchtstroom door langslopen dan een open raam.
- Laat geen agressieve stoffen in de zuurkast verdampen, om schade aan de afvoerfilters en kanalen te voorkomen.

Een zuurkast dient niet naast een toegangsdeur te staan; helaas is dat vaak wel het geval. In dat geval zullen mensen die langskomen, vooral als ze de deur open- en dichtdoen, veel turbulentie

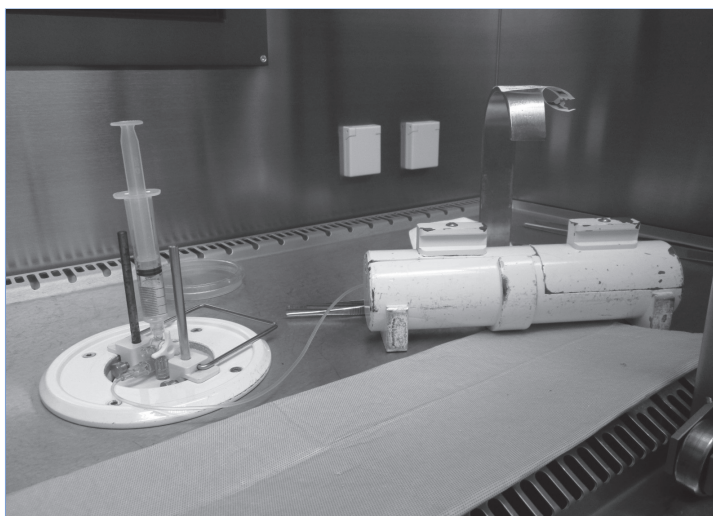
veel grotere fractie die in de lucht komt is uitgegaan, en er later op de berekeningen van de Gezondheidsraad nog een veiligheidsmarge is toegepast.

### B.2.3 Prikaccident

Voor de bepaling van de dosis ten gevolge van een *prikaccident* is het gebruikelijk om aan te nemen dat de werker dan een fractie van  $10^{-3}$  van de toegediende activiteit binnenkrijgt. Een schatting van de dosis door die inname met de gegevens van tabel 8.2 is echter niet goed mogelijk, want de  $\epsilon(50)$ -waarden van tabel 8.2 zijn hier niet toepasbaar; die waarden betreffen een zuiver radio-isotoop en bij de toediening aan een patiënt betreft het meestal een gelabeld eiwit dat zich heel anders over het lichaam verdeelt dan het zuivere radio-isotoop. Wel kan gesteld worden dat de dosis voor de medewerker  $10^{-3}$  bedraagt van de dosis voor de patiënt. Dat houdt in dat bij een prikaccident met een spuit die bedoeld is voor een therapiepatiënt de dosis voor de betrokken medewerker ten gevolge van inwendige besmetting in de orde van millisieverts zal liggen.

### B.2.4 Uitwendige bestraling van het lichaam

Voor een schatting van het belang van de maatregelen ter beheersing van de uitwendige bestraling is het zinvol de aandacht te richten op de toediening van  $^{18}\text{F}$ , wegens zijn relatief hoge  $h(10)$  van  $0,17 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  per MBq op 1 meter afstand (zie tabel 8.1), de relatief hoge activiteit die per keer wordt toegediend (400 MBq) en de vele handelingen die er jaarlijks mee uitgevoerd worden (in onderstaand voorbeeld gaan wij uit van duizend toedieningen per jaar).



Afbeelding 11.4

Klaarmaken van de  $^{18}\text{F}$ -spuit.

We gaan ervan uit dat een optreksysteem wordt gebruikt om de spuit met  $^{18}\text{F}$  veilig te vullen. In afbeelding 11.4 is dat systeem weergegeven. De spuit bevindt zich oorspronkelijk leeg in de loden cilinder, de radioactieve voorraad onder de tafel in een loden afscherming. De vloeistof wordt de spuit ingetrokken en de medewerker wordt alleen zonder afscherming blootgesteld tijdens het korte moment dat de vloeistof door de zichtbare plastic tube gaat. Na afloop wordt die tube schoongespoten met niet radioactieve vloeistof die in de zichtbare verticale spuit zit.

Uit de berekening (zie onder) blijkt dat de collectieve effectieve dosis door uitwendige bestraling bij reguliere toepassingen voor een afdeling in de orde van grootte van 13 millisievert per jaar kan liggen. Dit is qua orde van grootte ook de collectieve dosis zoals die geregistreerd wordt op de TLD-badges op een afdeling Nucleaire geneeskunde.

Ook gezien de hoogte van de collectieve dosis worden de diverse handelingen niet door één persoon, maar door verschillende personen uitgevoerd.

Voor de afstand van de bron tot het lichaam ga je uit van 0,5 m, dus de dosis op het lichaam is (volgens de kwadratenwet) een factor 4 hoger dan de dosis die geldt op een afstand van 1 meter (dat is de afstand die hoort bij de waarde van de  $h(10)$ ).

Het gereedmaken en vervoer van de injectiespuit en het gereedmaken voor toedienen duurt samen 15 minuten (1/4 uur). Aangenomen wordt dat de afscherming dan 5 halveringsdiktes is (30 mm lood); er is dus een afscherming van een factor 32.

De bijdrage aan de collectieve jaardosis van gereedmaken, vervoer en gereedmaken voor toediening is dan:  $1000$  (toedieningen per jaar)  $\cdot$   $400$  (MBq)  $\cdot$   $4$  (afstand)  $\cdot$   $0,17$  (constante)  $\cdot$   $1/4$  (tijd)  $\cdot$   $1/32$  (afscherming)  $\mu\text{Sv} = 2032 \mu\text{Sv}$ . De infuusverwijdering, de positionering en het ontslag van de patiënt zal 6 minuten bedragen, dus  $1/10^{\text{de}}$  uur. Je kunt aannemen dat de activiteit in de tussentijd is afgenomen naar 300 MBq. De activiteit bevindt zich in de patiënt en die schermt de straling enigszins af. Dat wordt in rekening gebracht door voor  $h(10)$  niet de waarde 0,17, maar  $0,09 \mu\text{Sv/h}$  te hanteren. Er is bij deze handelingen geen sprake van een afgeschermd spuit.

De collectieve jaardosis op het lichaam is dan  $1000 \cdot 300 \cdot 4 \cdot 0,09 \cdot 1/10 \mu\text{Sv} = 10.800 \mu\text{Sv}$ .

De totale collectieve jaardosis zal dus ongeveer  $2032 + 10800 \mu\text{Sv} = 13 \text{ mSv}$  bedragen.

De berekende waarden uit bovenstaand voorbeeld moet je niet als waarden voor het risico zien, maar als schattingen om de noodzaak van de diverse getroffen maatregelen beter te begrijpen en om te begrijpen waar je zelf nog nadere maatregelen kunt treffen om de dosis te verlagen.