

**Stralingshygiëne
voor medisch specialisten**

S. van Dullemen (red.)

Voorwoord

Deze syllabus omvat de leerstof voor de cursus Stralingshygiëne voor Medisch Specialisten en een deel van de leerstof voor de cursus Stralingshygiëne voor Radiologen en Radiotherapeuten. Deze syllabus wordt geregeld aangevuld respectievelijk geactualiseerd, mede aan de hand van opmerkingen van cursusdeelnemers. Voor de cursus Stralingshygiëne voor Medisch Specialisten geldt: het tevoren bestuderen van de syllabus samen met het volgen van de twee cursusdagen met bijbehorende presentaties, het bekijken/doorlopen van de digitale informatie (o.a. de e-learning radiobiologie) en het maken van de voortoets op de website www.boerhaavenascholing.nl is de noodzakelijke voorbereiding voor het af te leggen schriftelijke examen. De nieuwe stralingsbeschermingsregeling die in februari 2018 van kracht is geworden is deels als bijlage toegevoegd en verder verwerkt in de tekst.

*Drs. Simon van Dullemen
Leiden, mei 2020*

©LUMC

Alle rechten zijn voorbehouden aan het Leids Universitair Medisch Centrum (Boerhaave Nascholing).

Niets uit deze publicatie mag worden veelevoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of welke andere wijze ook zonder voorafgaande toestemming. De toestemming moet worden aangevraagd bij Boerhaave Nascholing, Postbus 9600, 2300 RC LEIDEN.

Inhoudsopgave

0.	<i>Introductie</i>	9
1.	<i>Stralingshygiëne voor medisch specialisten</i>	11
1.1	Inleiding	11
1.2	Bevoegdheid en bekwaamheid bij radiologische handelingen	14
1.3	Straling: soorten en blootstelling	19
1.3.1	ELF-velden	24
1.3.2	Radiofrequente straling	25
1.3.3	UV-straling	26
1.3.4	Ioniserende straling	27
1.3.5	Dosisbegrippen	29
1.4	Interactie van röntgenstraling met weefsel	36
1.5	Opwekken van röntgenstraling	39
1.5.1	Filters	41
1.6	Metten van straling	42
1.6.1	Operationele (meetbare) dosisgrootheden	42
1.7	Beeldvorming en beeldkwaliteit	43
1.8	Beïnvloeden van de beeldkwaliteit, dosis en dosistempo	46
1.8.1	Dikte van het doorstraalde gebied	47
1.8.2	De buisstroom (mA)	48
1.8.3	De buisspanning (kV)	48
1.8.4	De focus-huidafstand	49
1.8.5	De afstand tussen de patiënt en de beeldopnemer	50
1.8.6	Elektronenoptische vergroting	51
1.8.7	Strooistralenooster	52
1.8.8	Veldgrootte (diafragmeren)	53
1.8.9	Afscherming en positie ten opzichte van patiënt en apparatuur	54
1.8.10	De totale doorlichttijd	54
1.9	Afscherming van ruimten	55
1.10	Risico's en normstelling	56
1.10.1	Risicobeperking	56
1.10.2	Normstelling	61
1.10.3	Controle op naleving van de dosislimieten	62
1.10.4	Regelgeving voor ziekenhuizen	63
1.10.5	Kwaliteitsbewaking	64
1.10.6	Risico's en perceptie	65
2.	<i>De techniek van het doorlichten</i>	68
2.1	Inleiding	68
2.2	Doorlichten: toen, nu, straks	68
2.3	Componenten en werking van de beeldversterker	69
2.4	Diafragmeren	71
2.5	Last Image Hold	72
2.6	Vergroten	73
2.7	Gepulst doorlichten	74
2.8	Recursive filtering	75

2.9 Opnamen	76
2.10 Artefacten van de beeldversterker.....	76
2.11 Flat-panel detectoren.....	77
2.12 Samenvatting.....	78
3. <i>Klinische blootstelling van patiënten</i>	79
3.1 Inleiding.....	79
3.2 Effectieve dosiswaarden patiëntblootstelling	81
3.3 Blootstelling van de ongeboren vrucht bij een zwangere patiënt.	81
3.4 Blootstelling van patiënten en vrijwilligers voor wetenschappelijk onderzoek.....	81
4. <i>Klinische patiëntdosimetrie</i>	84
4.1 Patiëntdosis: dosis-oppervlakteproduct	84
4.2 Orgaan- en weefseldosis, effectieve dosis	84
4.3 Dosis op de ongeboren vrucht	85
4.4 Persoonsdosimetrie	85
4.5 Vingerdosimetrie	87
4.6 Ooglensdosimetrie	87
5. <i>Bescherming van werkers</i>	88
5.1 Inleiding.....	88
5.2 Persoonlijke beschermingsmiddelen	88
5.2.1 Loodschort.....	88
5.2.2 Kwaliteitsbewaking loodschort.....	89
5.2.3 Schildklierbeschermer.....	90
5.2.4 Loodglasbril.....	90
5.2.5 Gelaatscherm	91
5.2.6 Loodmuts.....	91
5.2.7 Loodhandschoenen.....	91
5.3 Beschermingsmiddelen in de werkruimte	92
5.3.1 Loodglas aan plafond.....	92
5.3.2 Verrijdbaar scherm	92
5.3.3 Loodlamellen	92
5.3.4 Cabine.....	92
5.3.5 Loodcape aan statief.....	92
5.3.6 Afscherming op de patiënt.....	92
6. <i>Biologische effecten van ioniserende straling</i>	94
6.1 Inleiding.....	94
6.1.1 De cel	94
6.1.2 Celdelingscyclus	96
6.2 Basisbegrippen radiobiologie.....	97
6.2.1 Interactie van ioniserende straling met biologisch materiaal 97	
6.2.2 Radicaalvorming	98
6.2.3 Relatieve Biologische Effectiviteit (RBE)	98
6.2.4 Zuurstofeffect (OER)	100
6.3 (Sub)cellulaire stralingseffecten.....	100
6.3.1 DNA-schade.....	100
6.3.2 Herstel van DNA-schade.....	101

6.3.3	Celschade.....	102
6.4	Effecten van dosis, fractionering en dosistempo	102
6.5	Effecten van straling op de mens	104
6.6	Stochastische (kansgebonden) effecten.....	105
6.6.1	Inleiding carcinogenese	105
6.6.2	Epidemiologische gegevens over tumorinductie.....	105
6.6.3	Latente- en risicoperiode.....	106
6.6.4	Absoluut en relatief risicomodel.....	107
6.7	Weefselreacties	108
6.7.1	Inleiding.....	108
6.7.2	Acute en late stralingsreacties.....	109
6.7.3	Huid	109
6.7.4	Long	110
6.7.5	Ooglens	111
6.7.6	Totale-lichaamsbestraling.....	112
6.8	Genetische effecten.....	113
6.8.1	Inleiding.....	113
6.8.2	Chromosoomafwijkingen.....	113
6.8.3	Genetische afwijkingen	114
6.8.4	Stadia van de geslachtsceelvorming.....	115
6.8.5	Verdubbelingsdosis	117
6.9	Effecten van ioniserende straling op het ongeboren kind	118
6.9.1	Inleiding.....	118
6.9.2	Weefselreacties.....	119
6.9.3	Stochastische effecten	121
6.9.4	Risico's voor zwangere patiënten	121
6.9.5	Richtlijn ICRP	121
6.10	Referenties	122
6.11	Begrippenlijst	123
7	<i>Actuele ontwikkelingen</i>	129
8	<i>Bijlagen</i>	133
	Bijlage 8.1: Hoofdstuk VII Medische blootstellingen uit de EU- Richtlijn	133
	Bijlage 8.2: Medische Stralingsbelasting.....	141
	Bijlage 8.3: Dosistrends röntgendiagnostiek in Nederland	142
	Bijlage 8.4: Voorbeeld van een Inspectieproject	144
	Bijlage 8.5: Overeenkomsten en verschillen tussen gray en sievert..	147
	Bijlage 8.6: Sentinel Node Procedures	148
	Bijlage 8.7: Dosisconversiecoëfficiënten: DOP naar effectieve dosis	150
	Bijlage 8.8: Cine Mode incident in een Nederlands ziekenhuis	152
	Bijlage 8.9: Support LNT-model	154
	Bijlage 8.10: Wettelijke Eindtermen.....	155
	Bijlage 8.11: Rechtvaardiging medische blootstelling	158
	Bijlage 8.12: Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (selectie).....	160

0. *Introductie*

S. van Dullemen

Blootstelling van personen aan ioniserende straling kan gezondheidsschade veroorzaken. Een belangrijk onderscheid hierbij is het blootstellingsniveau: bij een lage blootstelling bestaat de eventuele gezondheidsschade uit een geringe kans op het latere ontstaan van tumoren, dit zijn de zogenoemde **stochastische effecten** van straling. Hiervoor wordt aangenomen, dat er geen drempeldosis is (de zogenoemde LNT-hypothese: *linear-non-threshold*). Boven bepaalde dosisdrempelwaarden kunnen er tevens zogenoemde **weefselreacties** optreden (ook wel deterministische effecten genoemd). Blijkens o.a. recente lage-dosisstudies¹ ² zijn de door de *International Commission on Radiological Protection (ICRP)* gegeven risicoschattingen voor blootstelling aan lage doses ioniserende straling (stochastische effecten) volgens de LNT-hypothese – die door de regelgevende instanties worden toegepast – waarschijnlijk consistent met de geëxtrapoleerde epidemiologische bevindingen vanuit hogedosisstudies.

Vanwege technologische vooruitgang en goede stralingshygiënische zorg in Nederland door goed opgeleide professionals, is het feitelijke gezondheidsrisico van blootstelling aan ioniserende straling voor zowel een lid van de bevolking als werknemers in het algemeen relatief laag te noemen. Wanneer zich desondanks situaties van “non-compliance” voordoen, liggen de bedrijfsrisico’s dan ook eerder in de sfeer van reputatieschade/imagoverlies, mogelijk verstoorde verhoudingen in- en extern of zijn ze financieel nadelig vanwege door de Inspectie opgelegde boetes of tijdelijke stillegging van het primaire proces. Dit alles geldt ook voor het merendeel van de medische blootstellingen, maar ook wanneer het risico hiervan niet meer laag is te noemen, is de blootstelling aan ioniserende straling gerechtvaardigd in het kader van het totale gezondheidsrisico van de patiënt (risico’s van het (onbehandeld) ziektebeeld, risico’s van de medische behandeling en risico’s vanwege de ontvangen effectieve dosis). Zodra op de werkvloer, bij een medische behandeling of in een andere maatschappelijke context (media-aandacht, incidenten, rampen) een situatie ontstaat waar mensen zich zorgen maken over hun – al dan niet vermeende – stralingsblootstelling, moeten stralingsdeskundigen en me-

¹ John D Mathews et al. Cancer risk in 680 000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. *BMJ* 2013; doi: 10.1136/bmj.f2360

² Hong JY, Han K, Jung JH, Kim JS. Association of Exposure to Diagnostic Low-Dose Ionizing Radiation With Risk of Cancer Among Youths in South Korea. *JAMA Netw Open*. 2019 Sep 4; 2(9): e1910584. Doi: 10.1001/jamanetwork.open.2019.10584.

dici (met name betreffende de rechtvaardiging) als professional naast hun gebruikelijke kennis en vaardigheden de onderwerpen risicoperceptie en risicocommunicatie activeren.

1. *Stralingshygiëne voor medisch specialisten*

S. van Dullemen (deels gebaseerd op eerder werk van J. Weeda)

Bij diagnostiek en interventie met röntgenstraling worden patiënten, medewerkers en derden blootgesteld aan ioniserende straling. Het is bekend dat deze blootstellingen schadelijke effecten kunnen veroorzaken. Deze cursus is specifiek gericht op medici van de niet-radiologische specialismen die gebruik maken van röntgenapparatuur (zie bijlage 8.8 voor de wettelijke eindtermen). De praktische handvatten en onderbouwing die in deze cursus worden aangereikt stellen de specialist in staat om gezondheidsrisico's van straling in te schatten en te vertalen in een optimale werkwijze. De specialist zal na het volgen van deze cursus in staat zijn om op zinvolle wijze over de toepassing van stralingshygiënische voorzieningen, maatregelen en werkwijzen in zijn/ haar werksituatie te communiceren met collega's, stralingsdeskundigen, klinisch fysici, medewerkers, patiënten en de overheid.

1.1 *Inleiding*

Onderzoek en interventie onder doorlichting nemen binnen de niet-radiologische³ specialismen een belangrijke plaats in, terwijl binnen deze specialismen slechts in beperkte mate röntgenopnames worden gemaakt. Deze verhouding reflecteert zich dan ook in de leerdoelen van deze cursus, waarin stralingsbescherming bij doorlichtingstechnieken een belangrijke plaats inneemt. In het algemeen zal het toepassen van de in deze cursus aanbevolen praktische richtlijnen doorgaans leiden tot een lagere stralingsbelasting van zowel de patiënt als de werker.

Het gebruik van röntgenstraling bij patiënten is tot op zeker hoogte vergelijkbaar met de toediening van geneesmiddelen. De verantwoordelijkheden en verplichtingen van de medicus hiervoor zijn vergelijkbaar. Lage doses röntgenstraling kunnen - net als bij toediening van geneesmiddelen - tot gezondheidsschade leiden, doorgaans met een kleine kans van optreden, maar als het voorkomt is het wel ernstig. Bij blootstelling aan hoge(re) doses ioniserende straling kunnen weefselreacties optreden, zoals huidschade. Daarom is directe en bedoelde blootstelling van individuen aan ioniserende straling uitsluitend wettelijk toegestaan voor medische doeleinden⁴. Medische toepassingen vormen een belangrijke bijdrage aan

³ Als radiologische specialismen definiëren we: radiologie, radiotherapie en nucleaire geneeskunde.

⁴ Een uitzondering hierop is blootstelling (met zeer lage effectieve dosis) vanwege veiligheidsscreening op vliegvelden enz. De rechtvaardiging hiervoor is op collectieve basis door de overheid gedaan.

de totale stralingsbelasting van de bevolking. Dit gegeven legt de verantwoordelijkheid bij de medische professie om stralingsbundels en radioactieve stoffen veilig, effectief, “evidence based” en gerechtvaardigd toe te passen.

Terwijl het medisch nut van diagnostiek en interventie met gebruikmaking van röntgenbundels zelden ter discussie staat, worden de potentiële gevaren ervan soms onderschat en soms overschat. Velen zijn van mening dat de gevallen van erytheem na blootstelling aan röntgenstraling onlosmakelijk zijn verbonden met de beginfase van de radiologie. In feite zijn juist bij de toename van het aantal interventieprocedures en de toenemende complexiteit en doorlichtduur daarvan verscheidene gevallen van huidschade (erytheem, tijdelijke epilatie) bij patiënten na interventieprocedures gerapporteerd, ook in Nederland. Acute gezondheidseffecten kunnen optreden indien een zekere dosis-drempelwaarde wordt overschreden. Verder geldt dat elke blootstelling aan ioniserende straling in principe carcinogeen is. Late schade (zowel stochastische schade als weefselreacties) na een radiotherapiebehandeling met hoge doses ioniserende straling is een bekend fenomeen⁵, waar de Stichting Kinderoncologie Nederland (SKION) een projectgroep lange-termijneffecten na kinderkanker voor heeft ingesteld en waarvoor in Nederland speciale poliklinieken beschikbaar zijn⁶. Blootstelling aan een lage dosis ioniserende straling geeft een gering risico op de inductie van tumoren. Ioniserende straling dient daarom zodanig te worden toegepast dat de risico's voor patiënten, werkers en leden van de bevolking aanvaardbaar blijven.

Beperken van stralingsdoses voor patiënt en werkers

ENKELE PRAKTISCHE RICHTLIJNEN

Indicatiestelling (justificatie, rechtvaardiging):

- ga na of er aan verwijscriteria in standaarden of protocollen wordt voldaan;
- houd rekening met sensitiviteit en specificiteit van het onderzoek en de risico's van straling;
- maak zoveel mogelijk gebruik van eerder verkregen opnamen en patiëntengegevens;
- overweeg, vooral bij kinderen, alternatieven zoals echo en MRI.

⁵ R. Calandrino et al. Evaluation of Second Cancer Induction Risk by CT Follow-up in oncological long-surviving patients. *Health Physics*, 104(1): 1-8; 2013.

⁶ <http://later.skion.nl>

Dosisbeperking tijdens onderzoek en interventie (ALARA):

- beperk het aantal opnamen per standaardonderzoek tot een zorgvuldig afgewogen minimum;
- gebruik een zo hoog mogelijk kV en additionele bundelfiltratie indien de vereiste beeldkwaliteit dit toelaat;
- beperk de dikte van het doorstraalde volume (compressie, keuze projectierichting); de dosis is bij dikkere patiënten aanzienlijk hoger;
- houd de afstand tussen de buis en de patiënt maximaal en breng de beeldversterker zo dicht mogelijk bij de patiënt;
- voorkom overbodig gebruik van elektronenoptische vergroting;
- verwijder een stroostralenrooster indien mogelijk bij kinderen, kleinere veldgrootten en afbeelding van grotere en contrastrijke structuren;
- gebruik een zo klein mogelijk veld (zorgvuldig diafragmeren);
- beperk de doorlichttijd en de buisstroom zoveel mogelijk;
- pas bij de patiënt afscherming van gevoelige organen toe (indien relevant en praktisch uitvoerbaar);
- draag persoonsdosimeters op de aanbevolen wijze (middenvoor op kraaghoogte, buiten het loodschort);
- weet hoe u zichzelf kunt beschermen (loodschorten, positioneren) om uw blootstelling aan straling tot een minimum te beperken.

En verder:

Toets procedures aan vastgestelde **diagnostische referentieniveaus** en voer regelmatig vergelijkende 'dosis x oppervlakteproduct'-metingen (DOP-metingen) uit.

Diagnostische referentieniveaus zijn dosiswaarden die voor radiologische verrichtingen zijn vastgesteld. Diagnostische referentieniveaus hebben betrekking op de stralingsbelasting van patiënten met een normaal postuur of op een standaardfantom. Bij een standaardprocedure wordt verwacht dat het diagnostische referentieniveau niet wordt overschreden. Het platform "Stralingsbescherming in het ziekenhuis" van de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie heeft in 2012 een eindrapport uitgebracht over Diagnostische Referentieniveaus in Nederland. Hierin worden DRNs beschreven voor zeven diagnostische verrichtingen bij volwassenen (mammografie, CTA-thorax, CT-abdomen, X-thorax en X-abdomen, diagnostische CT coronaire angiografie, diagnostische conventionele coronaire angiografie) en voor vier verrichtingen bij kinderen (X-thorax, X-bekken, CT-hoofd, Mictie Cysto-Urethrogram)⁷.

7

http://www.rivm.nl/Onderwerpen/M/Medische_Stralingstoepassingen/Stralingsbescherming_patiënten/Diagnostische_Referentieniveaus

Om ziekenhuizen uit te dagen de instellingen te optimaliseren zijn voor het uitvoeren van twee interventietechnieken, t.w. een diagnostische CT coronaire angiografie en een conventionele diagnostische coronaire angiografie (hartkatheterisatie) DRNs vastgesteld, die “haalbaar zijn door bijzondere inspanningen van de gebruiker op het gebied van de techniek (moderne apparatuur) en het acquisitieprotocol”.

1.2 *Bevoegdheid en bekwaamheid bij radiologische handelingen*

Bij zorgvuldige toepassing is röntgenstraling een betrouwbaar en onontbeerlijk hulpmiddel bij de diagnose en behandeling van patiënten. Echter, zoals in het voorgaande al is aangegeven, straling is carcinogeen en kan bij hogere dosis ook tot andere gezondheidsschade leiden. In Nederland is de aanwezigheid en het gebruik van (röntgen)toestellen en radioactieve stoffen uitsluitend toegestaan onder nauwkeurig omschreven voorwaarden. De wettelijke basis van de stralingsbescherming is beschreven in de Kernenergiewet en in het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming. Deze Kernenergiewet heeft de juridische status van “lex specialis”, hetgeen inhoudt, dat bij twijfel of tegenspraak de Kernenergiewetbepalingen voor gaan op die in andere wetten staan vermeld. De grondgedachte van de Kernenergiewet (KeW) luidt: ‘Niets is toegestaan, tenzij (...)’. Eenieder die een toestel zelfstandig bedient of een opdracht daartoe aan anderen verstrekt in het kader van een medische blootstelling dient over de wettelijk vereiste **(stralings)deskundigheid**⁸ te beschikken. Dat betekent concreet het kunnen overleggen van een diploma Stralingshygiëne, uitgegeven door een erkend opleidingsinstituut zoals aangegeven in de Regeling deskundigheidseisen radiologische verrichtingen. Het verrichten van handelingen op het gebied van de individuele gezondheidszorg, met gebruikmaking van radioactieve stoffen of toestellen die ioniserende straling uitzenden is, volgens de Wet op de Beeroepen in de Individuele Gezondheidszorg (Wet BIG) een voorbehouden handeling. De Wet BIG stelt dat een arts vanwege zijn deskundigheid op het gehele terrein van de geneeskunde **bevoegd** is tot het verrichten van voorbehouden handelingen. De Wet BIG stelt nog een tweede voorwaarde, namelijk dat de arts zelf **bekwaam** is of (onder bepaalde voorwaarden) de uitvoering opdraagt aan een ‘niet-zelfstandig bevoegde’, bijvoorbeeld een radiologisch laborant (tegenwoordig MBB’er genoemd: medisch beeldvormend en bestralingsdeskundige). De laborant of andere ondersteuner dient dan over de vereiste bekwaamheid te

⁸ Zie: Regeling van de Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport van 7 juni 2013, nr. 119559-104161-GMT, houdende deskundigheidseisen voor radiologische verrichtingen (Regeling deskundigheidseisen radiologische verrichtingen). Stcrt. Nr 16084, 17 juni 2013. Zie ook de aan het ziekenhuis verleende Kernenergiewetvergunning.

beschikken. De Wet BIG verwijst ook naar de Kernenergiewet vanwege de vereiste stralings**deskundigheid**. Voordat u een röntgentoestel bedient is het van belang om kennis te nemen van de wettelijke kaders waarbinnen deze handelingen zijn toegestaan. Tevens dient u voldoende deskundig te zijn om op optimale en veilige wijze gebruik te maken van de in het toestel opgewekte straling. De gebruiker van het röntgentoestel dient onder meer te weten:

- hoe het toestel werkt en wordt bediend;
- hoe een patiënt het beste kan worden gepositioneerd;
- hoe het gebruik van straling tot een minimum beperkt blijft;
- hoe en wanneer men afschermingsmiddelen en persoonsdosimeters gebruikt;
- hoe de ruimtelijke verdeling van (strooi)straling in de behandelkamer is;
- hoe de beeldkwaliteit en de patiëntdosis kan worden beïnvloed via de instelling/het gebruik van bijvoorbeeld kV, mA, een stroostralenrooster, een extra filter en diafragmering.

De uitvoering van het bedieningspaneel en andere factoren of beschikbare opties kunnen van toestel tot toestel variëren. Daarom is het belangrijk en verplicht dat de gebruiker specifieke instructie ontvangt voordat hij/zij het toestel daadwerkelijk bedient⁹. Gebruikelijk is dat deze instructie bij aanschaf van een nieuw apparaat door de leverancier wordt verzorgd. Verder zijn er tenminste twee groepen medewerkers in elk ziekenhuis die over actuele kennis van röntgenapparatuur en radiologische procedures beschikken. De radiologisch laborant (MBB'er) is breed geschoold in alle in de vorige alinea genoemde aspecten en is in veel ziekenhuizen direct beschikbaar voor assistentie bij radiologische procedures. Daarnaast zal een klinisch fysicus een bijdrage kunnen leveren aan de optimalisering, afregeling, acceptatie en kwaliteitsbewaking van de röntgenapparatuur. Behalve MBB'ers worden de laatste jaren in toenemende mate ook verpleegkundigen of OK-assistenten ingezet om een röntgen-doorlichttoestel tijdens procedures te bedienen. Deze inzet is echter niet geheel onomstreden, zie het "Standpunt LVO en NVMBR over bediening röntgenapparatuur op de OK"¹⁰. Wanneer in uw ziekenhuis/kliniek ook niet-MBB'ers het doorlichttoestel bedienen, is het zaak dat u als op-

⁹ In het Toetsingskader van het project Verantwoord gebruik van medische technologie in ziekenhuizen (Inspectie voor de Gezondheidszorg, 2013) wordt gesteld in item 4.7: Het ziekenhuis heeft een procedure die leidt tot registratie van bevoegdheid en bekwaamheid van gebruikers om met de toegepaste hulpmiddelen zelfstandig handelingen te verrichten. Uit deze registratie blijkt ook wanneer herscholing noodzakelijk is om de bevoegdheid en bekwaamheid op het vereiste niveau te houden. Per medewerker is een registratie van bevoegdheid en bekwaamheid op basis waarvan werkzaamheden worden verricht (moet zijn geïmplementeerd per 1-1-2014).

¹⁰ Zie: www.nvmb.nl nieuwsbericht d.d. 20-11-2013 (bezoekt op 29-01-2014)

drachtgever (zie Wet BIG) zich ervan overtuigt, dat deze medewerkers voldoende zijn geïnstrueerd in de veilige en juiste bediening van het doorlichttoestel¹¹. Hoe dan ook, **de medicus is volledig verantwoordelijk** voor de stralingsblootstelling van de patiënt en is medeverantwoordelijk voor afdoende bescherming van de medewerkers rondom de werkplek waar de handelingen worden verricht en voor veilige en kwalitatief goede zorg¹². De eindverantwoordelijkheid voor het goed functioneren van een integraal apparaatbeheersysteem ligt bij de Raad van Bestuur. Een gebruiker moet bij een goed ingerichte kwaliteitscyclus rondom apparatuur erop kunnen vertrouwen, dat de kwaliteit en veiligheid van de ter beschikking gestelde medische apparatuur is gegarandeerd. In de meeste ziekenhuizen is de afdeling klinische fysica of medische technologie of een apparaatcommissie etc. belast met de implementatie van deze kwaliteitscyclus voor medische apparatuur. In de praktijk wordt veelal gewerkt met al dan niet gekleurde onderhoudsstickers die aangeven dat een apparaat tot een bepaalde datum veilig is te gebruiken.

Een arts die niet voldoet aan de deskundigheidseisen die de KeW stelt, kan alleen een **aanvraag** indienen voor een radiologische handeling maar geen opdracht daartoe geven. De situatie dat een chirurg tegen een radiologisch laborant (MBB'er) zegt: "start de doorlichting maar" wordt beschouwd als een opdracht van de chirurg. In sommige aanbevelingen noemt men dat ook aanvragende/verwijzende artsen voldoende kennis van de stralingsbescherming dienen te bezitten, om een verantwoorde afweging te kunnen maken aangaande de rechtvaardiging van een radiologische handeling. De inmiddels vervangen EU-richtlijn 97/43 (Patiëntenrichtlijn) ging vergezeld van een aantal aanbevelingen die implicaties hebben voor (verwijzende) artsen. De eerste is dat zonder medische indicatie geen radiologische handeling mag worden verricht. De beslissing dient gebaseerd te zijn op een juiste beoordeling van de indicaties voor de toepassing, de verwachte (diagnostische) opbrengst en de mate waarin het mogelijke resultaat van belang is voor de diagnose en de daaruit voortvloeiende medische behandeling van de patiënt. Daarnaast is het evenzeer belangrijk, dat deze beoordeling plaatsvindt tegen de achtergrond van voldoende kennis van de fysische eigenschappen en de biologische effecten van ioniserende straling. Een andere aanbeveling uit de EU-richtlijn is gericht op het snel en doeltreffend doorgeven van bij eerder onderzoek verkregen informatie, om dubbele verrichtingen te vermijden, zie ook bijlage 8.1 voor de aanbevelingen in de nieuwste EU-

¹¹ Zie ook: Convenant/veldnorm "Veilige toepassing van medische technologie in het ziekenhuis", NVZ, NFU, Revalidatie Nederland, i.h.b. punten 3.1 en 3.8 (Utrecht, nov. 2011).

¹² Leidraad OMS (2008): Verantwoordelijkheid medisch specialist bij onderhoud en beheer van medische apparatuur.

Richtlijn. In het huidige Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming gaat artikel 8.2 over rechtvaardiging medische blootstelling, artikel 8.3 over optimalisatie medische blootstelling en artikel 8.4 over de verantwoordelijkheid voor medische blootstelling.

Rechtvaardiging kan als een proces worden opgevat: in het kader hiervan worden de zogenoemde $3 \times A$ -criteria (“triple A”) van de IAEA telkens als aandachtspunten genoemd:

- **Awareness** about radiation risks. (“Medische beelden zijn geen vakantiekiekjes”).
- **Appropriateness**: patients are referred for radiological examinations that are medically indicated, that fit in their care pathway. (patient consent, joint decision making; avoiding repeats, guidelines for clinical imaging like iRefer).
- **Audit**: to check the effectiveness of the justification process from a perspective of continuous improvement (audit requirements; verify compliance by inspections).

Ook de in de EU verantwoordelijke autoriteiten voor stralingsbescherming (HERCA) hebben diverse Position Papers gepubliceerd¹³ over rechtvaardiging van medische blootstelling.

In dit kader zijn de conclusies van een gezamenlijke workshop over “Justification of Medical Exposure in Diagnostic Imaging” van de EU en de IAEA (Brussel, 2009) van belang¹⁴: “Especially impressive are the figures on justification of medical radiological procedures, where there are indications that, in economically developed countries more than 20% of examinations may not be appropriate; this can be as high as 45% in special cases and up to 75% for some specific techniques”.

Informatie over de keuze van het meest geschikte beeldvormend onderzoek bij een bepaald klinisch beeld geeft bijvoorbeeld de database van de ACR Appropriateness Criteria. Deze database is ontwikkeld door het American College of Radiology (ACR) in samenwerking met een aantal andere gezaghebbende medisch-specialistische organisaties. Deze richtlijnen zijn gebaseerd op de recente literatuur, zijn zoveel mogelijk ‘evidence based’ en worden regelmatig geactualiseerd. De database is toegankelijk via de website van de ACR (www.acr.org). Ook de “European Society of Radiology” (ESR) heeft in samenwerking met de IAEA en de ACR een portaal beschikbaar gesteld (ESR iGuide¹⁵) voor een “clinical decision support system using imaging referral guidelines”.

¹³ <http://www.herca.org/documents.asp?p=4&s=13> (geraadpleegd 01-04-2016)

¹⁴ L. van Bladel, NVS symposium 11 maart 2016, Nieuwegein

¹⁵ <https://www.myesr.org/esriguide>

De verwachting is, dat het beschikbaar komen van geautomatiseerde “decision support”-systemen voor de aanvraag van radiologisch onderzoek (en “value based healthcare”-projecten) de komende jaren zal bijdragen aan het terugdringen van onnodige onderzoeken.

Binnen de heelkunde wordt veel gebruikt gemaakt van aanvullende diagnostiek waarbij een stralingsbelasting optreedt.

Deze beeldvorming wordt veelal gedaan voor het vaststellen van de diagnose waarbij onderscheid gemaakt kan worden in vier groepen:

1. Acute moment bij zieke patiënt.
 - a. Een polytrauma (ongeval) die binnenkomt op de SEH waarbij het spoedig aantonen maar ook het uitsluiten van diagnoses op de voorgrond staat in een vitaal bedreigde patiënt. Zie ook de “Canadian spine rules”¹⁶.
 - b. Septische patiënten op de SEH met buikkachten voor vaststellen van de diagnose en operatie-indicatie.
 - c. Acute vaatchirurgische patiënt waarbij diagnostiek gefaseerd een aneurysma kan aantonen en een CT mede bepalend is voor de behandeling.
2. Electieve setting waarbij diagnostiek nodig is voor het vervolgen van de behandeling (bijv. fractuurgenezing, follow-up van maligniteit).
3. Diagnostische fase poliklinisch. Vaststellen afwijking, work-up voor chirurgie, bepalen van het optimale beleid of afronden van diagnostiek.
4. Diagnostiek ten tijde van de behandeling op OK of angiokaamer, peroperatief röntgenonderzoek bij fractuurbehandeling, angiografie bij vasculaire interventies.

Medisch inhoudelijk is de afweging te maken welk onderzoek, wanneer nodig is; dit kan buiten beschouwing van de stralingscursus blijven. Essentieel is echter de hamvraag ‘wat is wijsheid’, welk onderzoek, wanneer wel/niet/in welke volgorde in relatie tot stralingsbelasting? Inderdaad, zowel vanuit het perspectief van de patiënt als dat van de professional/medisch specialist.

¹⁶ <http://www.mdcalc.com/canadian-c-spine-rule/> (geraadpleegd 01-04-2016)

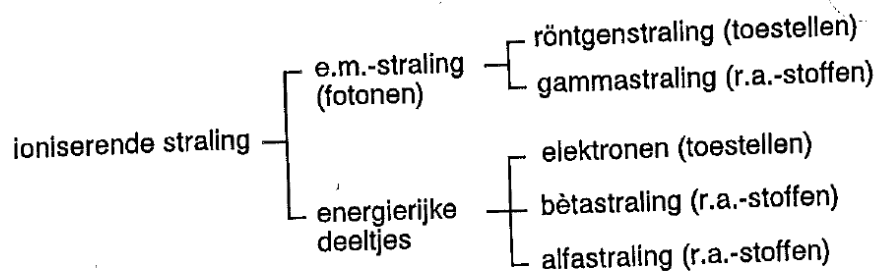
1.3 *Straling: soorten en blootstelling*

Het begrip straling omvat een breed scala aan fysische verschijningsvormen. Een eerste onderverdeling kan worden gemaakt door **niet-ioniserende** en **ioniserende straling** te onderscheiden. Binnen de ioniserende straling is er verschil in eigenschappen tussen enerzijds **deeltjesstraling** (zoals alfastraling, bètastraling/elektronen, neutronen, protonen, positronen) en anderzijds ioniserende **elektromagnetische straling** (fotonen).

Fotonen

Elektromagnetische energie wordt getransporteerd in de vorm van energiepakketjes die zich in vacuüm met de lichtsnelheid voortbewegen. Deze ‘energiepakketjes’ hebben als naam ‘foton’ gekregen (Einstein, 1905). Het zijn geen echte deeltjes - ze bezitten geen massa - maar zijn op te vatten als elektromagnetische ‘verstoringen’ met een bepaalde golflengte, frequentie en energie. Een bundel röntgenstraling uit een radiodiagnostiektoestel bevat een ‘mengsel’ van fotonen met uiteenlopende energieën (remstralingsspectrum). De Deense fysicus Niels Bohr (1913) realiseerde zich als eerste, dat een elektron rondom een atoomkern niet een willekeurige baan kan kiezen. Alleen die banen zijn toegestaan, waarin de gekwantiseerde energie van het elektron past. Een sprong van het elektron tussen twee banen kan alleen, als het energieverval een bepaalde waarde heeft, die moet worden toegevoegd (excitatie) of die vrijkomt (deëxcitatie) in de vorm van een foton. Bij het opwekken van röntgenstraling zien we dit effect optreden doordat er (bij hogere kV-waarden) karakteristieke röntgenstraling ontstaat, behorend bij specifieke elektronenbaanovergangen in de atomen van het anodemateriaal.

Voor hetzelfde stralingsdeeltje zijn soms twee verschillende namen in omloop: bètastraling bestaat bijvoorbeeld uit energierijke elektronen; gamma- en röntgenstraling zijn beide fotonenstraling. Deze naamgeving is deels historisch gegroeid, en deels gebaseerd op de oorsprong van de straling. In het algemeen gebruikt men voor straling afkomstig van radioactieve stoffen Griekse letters: alfastraling (α), bèta- (β -) en gamma- (γ -)straling.



Mensen worden aan verschillende vormen van niet-ioniserende elektromagnetische straling blootgesteld, zoals UV-straling, infraroodstraling en zichtbaar licht. De technologische revolutie van de 20^{ste} eeuw heeft de mate van blootstelling doen toenemen. Voorbeelden hiervan zijn:

- extreem laagfrequente velden ‘ELF-velden’ (hoogspanningsleidingen, elektrische apparaten zoals elektrische dekens);
- radiofrequente straling (radio- en TV-zenders, radar, magnetron, MRI, UMTS-telefoonzendmasten, 4G en 5G);
- UV-straling (zonlicht, zonnebanken, TL-buizen);

Daarnaast worden mensen blootgesteld aan **ioniserende straling** van zowel natuurlijke oorsprong als die, welke is veroorzaakt door menselijk handelen. Deze blootstelling wordt onder meer veroorzaakt door:

- de kosmische straling afkomstig van de zon en van melkwegstelsels: het meeste hiervan wordt tegengehouden door de atmosfeer, op grotere hoogte heersen hogere stralingsniveaus (blootstelling van de atmosfeer aan kosmische straling heeft tevens de vorming van radioactieve stoffen tot gevolg);
- de van nature aanwezige radionucliden op aarde, zoals uranium-238, uranium-235, thorium-232 en kalium-40: de blootstelling aan straling is afhankelijk van de lokale bodemgesteldheid, de bebouwing, en van het gebruik van delfstoffen in bijvoorbeeld bouwmaterialen en kunstmest;
- de medische toepassingen van straling en radioactieve stoffen bij diagnostiek en therapie;
- de fall-out van kernexplosies in de atmosfeer: deze explosies vonden plaats in de periode van 1954-1958 en 1961-1962, de straling ten gevolge van fall-out is inmiddels al behoorlijk afgenomen;
- het gebruik van splijtstoffen voor kernenergie en het radioactief afval dat dit met zich meebrengt, en dan niet zozeer het reguliere bedrijf maar ongevallen: het Tsjernobyl-ongeval in 1986 heeft geleid tot een iets verhoogde bijdrage aan de blootstelling van de Nederlandse bevolking; de ramp in Fukushima, Japan in 2011

leidt met name in de directe omgeving tot verhoogde blootstelling van de lokale bevolking;

- de toepassing van radioactiviteit in gebruiksgoederen, zoals lichtgevende verf op uurwerken, rookmelders en gloeikousjes voor gaslampen: de blootstelling is gering als gevolg van strenge regelgeving;
- de toepassingen van radioactiviteit en straling in wetenschap en techniek.

Kenmerkend voor de natuurlijke achtergrondstraling is het chronische karakter en het lage dosistempo. De totale effectieve dosis van een lid van de Nederlandse bevolking bedraagt gemiddeld circa 2,4 mSv per jaar. Twee derde deel is afkomstig van natuurlijke achtergrondstraling en gemiddeld een derde deel wordt veroorzaakt door kunstmatige bronnen. De kunstmatig veroorzaakte stralingsbelasting is voor het allergrootste deel afkomstig van medische diagnostiek. De hierdoor veroorzaakte effectieve dosis van gemiddeld circa 1,06 mSv per jaar per hoofd van de bevolking bedroeg in 1985 nog circa 0,4 mSv per jaar. Deze toename wijt men grotendeels aan de stijging van het aantal verrichtingen met de CT-scanner.

Kosmische straling is alle straling die de aarde van buitenaf bereikt. Deze is afkomstig van de zon, van ons eigen melkwegstelsel en daarbuiten. De kosmische straling wordt in de atmosfeer verzwakt, op zeeniveau bedraagt de jaarlijkse effectieve dosis nog circa 0,3 mSv. Door de geringere dikte van de beschermende luchtlagen is de dosis op 1 km hoogte tweemaal zo groot als op zeeniveau en op 4 km hoogte is deze zelfs tienmaal groter. Zo levert een enkele reis per vliegtuig van Amsterdam naar New York een effectieve dosis op van 40 microsievert.

De straling uit de aardkorst, die in Nederland voornamelijk uit klei- en zandgronden bestaat, is relatief laag. Het gaat hier voornamelijk om gammastraling die wordt uitgezonden door radioactieve stoffen die in de aardkorst aanwezig zijn. In rotsachtige gebieden zoals Bretagne en de Jura is de stralingsbelasting hoger dan in Nederland. Er zijn zelfs bepaalde gebieden in India en Brazilië waar de gemiddelde effectieve dosis ten gevolge van straling uit de aardkorst op een waarde van 20 tot 30 mSv per jaar uitkomt.

De van nature, via voedsel opgenomen in het lichaam aanwezige radioactieve stoffen zorgen voor een effectieve dosis van circa 0,3 mSv per jaar. De grootste bijdrage komt van het radionuclide kalium-40. Kalium is een essentieel bestanddeel in het menselijk lichaam, de gemiddelde relatieve gewichtconcentratie van kalium bedraagt 0,2 procent. Minder dan één procent van het natuurlijke kalium bestaat uit het radioactieve isotoop kalium-40. De gammastraling die kalium-40 uitzendt is met een gevoelige totale-lichaamsteller ('whole body counter') goed te meten.

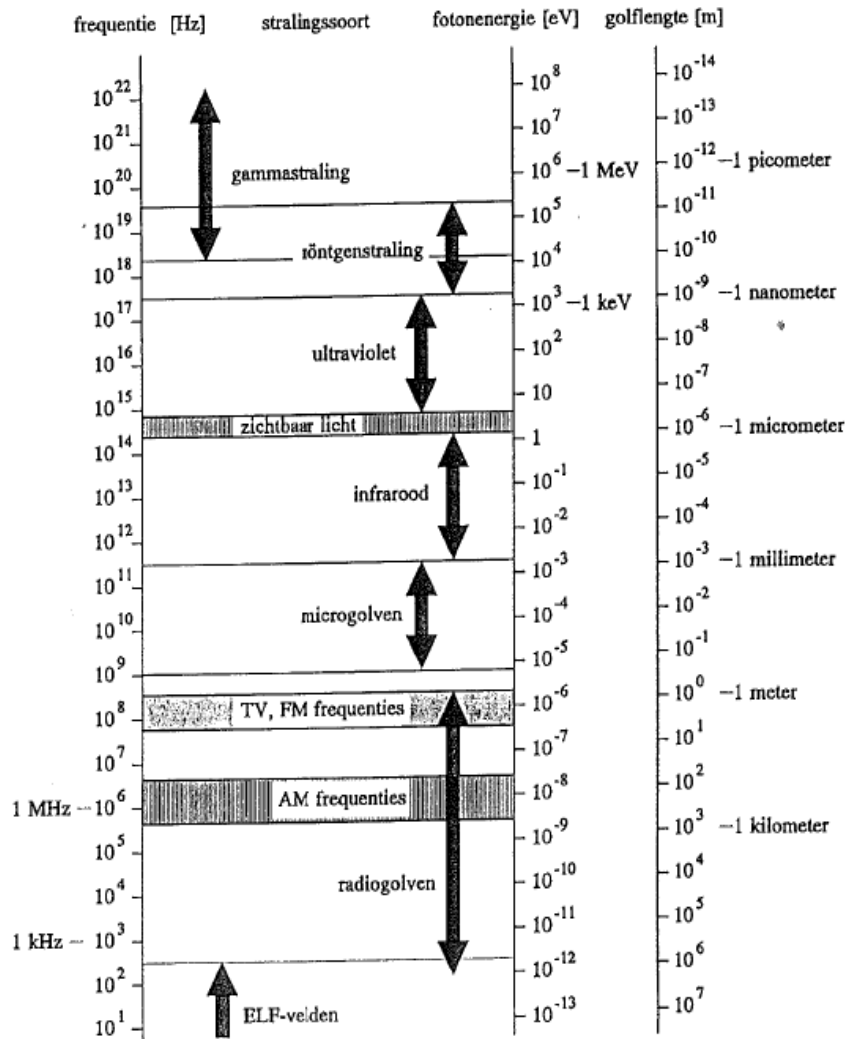
Radon is een radioactief edelgas dat ontstaat bij radioactief verval van uranium en thorium, elementen die van nature in de aardkorst voorkomen. Het gas zelf veroorzaakt niet zoveel problemen, maar de vervalproducten des te meer. Deze vervalproducten kunnen zich aan stofdeeltjes hechten die aanwezig zijn in de lucht en die vervolgens na inademing in de longen achterblijven. Hierdoor zullen de longen worden bestraald met alfastraling. Radongas komt vrij uit sommige bouwmaterialen, bijvoorbeeld gips. Ook radongas dat vrijkomt uit de bodem kan vanuit de kruipruimtes de woningen binnendringen. Met name in goed geïsoleerde woningen kunnen hogere concentraties van het radongas voorkomen. In Nederland is, vergeleken met het buitenland, de radongasconcentratie in woningen en op werkplekken relatief laag, namelijk gemiddeld 15,9 Bq/m³. Dit is ruim onder het nationale referentieniveau van 100 Bq/m³ en het Europese referentieniveau van 300 Bq/m³ (ref¹⁷).

Radioactieve stoffen

Van de meeste elementen kunnen verschillende isotopen voorkomen, van nature of kunstmatig verkregen. Isotopen, bijvoorbeeld koolstof-12 en koolstof-14 bezitten beide de chemische eigenschappen van het element koolstof, terwijl het aantal neutronen in de atoomkern verschilt. Sommige isotopen zijn van nature instabiel, de atoomkern zal vroeg of laat één tot enkele stralingsdeeltjes (vaak gepaard gaande met het uitzenden van gamma-fotonen) uitstoten waarbij een nieuwe kern wordt gevormd. Dit kan zich herhalen totdat een stabiele kern is ontstaan. Dit spontane natuurverschijnsel noemt men radioactiviteit, de betreffende isotopen zijn radionucliden en de chemische verbindingen waarin deze nucliden voorkomen heten radioactieve stoffen. De mate van (radio) activiteit wordt uitgedrukt in becquerel (Bq). De relatie tussen activiteit en opgelopen effectieve dosis is voor uitwendige bestraling afhankelijk van het soort radionuclide (type uitgezonden straling) en de afstand tot de bron (kwadratenwet). Voor het bepalen van de effectieve (volg)dosis bij inwendige besmetting met een bepaald radionuclide zijn van belang: type nuclide (vervalschema), chemische aard van de verbinding waarin het radionuclide voorkomt, innameroute (ingestie, inhalatie, wondbesmetting), metabool model (van de volwassen referentiemens) en ingenomen activiteit. Bij kinderen en de toepassingen in de nucleaire geneeskunde moet er met afwijkende metabole modellen rekening worden gehouden. Voor dit doel zijn er speciale tabellen met dosisconversiecoëfficiënten (Sv/Bq) beschikbaar, die de relatie tussen geïnjecteerde activiteit (MBq) en effectieve volg dosis (mSv) geven.

¹⁷ Radon, thoron en gammastraling op werkplekken en in publiek toegankelijke gebouwen in Nederland: Resultaten RIVM-meetcampagne 2016-2017. Goemans P, de Waard IR, Blaauboer RO, Smetsers RCGM, de Groot GM. RIVM rapport 2018-0027

Alle golfbewegingen (geluidsgolven, golven op wateroppervlakken, elektromagnetische golven) transporteren **energie**. Elektromagnetische golfbeweging is een trilling met elektrische en magnetische eigenschappen. Alle vormen van e.m.-straling planten zich in lucht voort met dezelfde snelheid, ongeveer 300.000 km per seconde. E.m.-straling omvat onder meer ELF-velden van hoogspanningsleidingen, radiogolven, microgolven, zichtbaar licht, UV-straling, röntgenstraling en ook gammastraling die door de meeste radioactieve stoffen wordt uitgezonden. Elektromagnetische straling kan met de golflengte, de frequentie of de energie worden gekarakteriseerd. De frequentie is namelijk omgekeerd evenredig met de golflengte, de evenredigheidsfactor is de voortplantingssnelheid; de energie van de e.m.-straling (fotonenergie) is recht evenredig met de frequentie. E.m.-straling vertoont eigenschappen van statische velden (bij lange golflengtes), van golven en van deeltjes. Wanneer de golflengte langer is dan de afstand van de waarnemer tot de bron, spreekt men over '**velden**', bijv. ELF-velden van 50 Hz met een golflengte van 6000 kilometer. Bij ioniserende straling staat het deeltjeskarakter op de voorgrond, men spreekt over de energie van de fotonen, doorgaans uitgedrukt in elektronvolt (eV). Wanneer elektromagnetische straling wordt gerangschikt naar golflengte, ontstaat het elektromagnetische spectrum.



Figuur: het elektromagnetische spectrum

Langs de verticale assen zijn schaalverdelingen aangebracht waarop de waarde van de frequentie (uitgedrukt in Hertz = trillingen per seconde), de golflengte (uitgedrukt in meter) en de energie van de straling (uitgedrukt in elektronvolt) is af te lezen. Het meest bekend is zichtbaar licht met een golflengte tussen de 390 en 780 nanometer, dat overeenkomt met een golflengte tussen $3,9 \times 10^{-7}$ meter en $7,8 \times 10^{-7}$ meter. De eigenschappen van deze verschillende frequentiegebieden, en daarbij inbegrepen ook het effect op het menselijk lichaam, zijn uiteenlopend en afhankelijk van de golflengte van de straling.

1.3.1 ELF-velden

Extreem laagfrequente velden zijn een vorm van elektromagnetische straling, het frequentiegebied ligt tussen 0 en 300 Hertz. De meeste

bronnen waaraan mensen bloot staan, hebben te maken met de distributie en het gebruik van elektriciteit en hebben een frequentie van 50 Hz (in sommige landen 60 Hz), overeenkomend met een golflengte van ongeveer 6000 km. De mogelijk schadelijke werking wordt toegekend aan het (variërende) magnetische veld, aangezien dit door de meeste materie heen dringt, zeker bij lage frequenties. De magnetische veldsterkte wordt uitgedrukt in de eenheid microtesla (μT). Dergelijke velden treden bijvoorbeeld op in de nabijheid van hoogspanningsleidingen, ondergrondse kabels, schakelstations, elektrische apparaten thuis en op het werk en in de medische praktijk. Met name recht onder hoogspanningsleidingen kunnen wat hogere veldsterkten heersen, maar zelfs deze waarden liggen beneden de volgens internationale normen aanvaardbare waarde van 100 μT die geldt voor continue blootstelling van leden van de bevolking. Deze blootstellingslimieten (ICNIRP, WHO) zijn gebaseerd op de mogelijk schadelijke effecten van kleine elektrische stroompjes die in het lichaam kunnen ontstaan door blootstelling aan ELF-velden. Meer recent is deze limiet door de Nederlandse overheid voor nieuw aan te leggen hoogspanningsleidingen verlaagd naar 0,4 microtesla vanwege een in studies gevonden statistisch verband (een causale verklaring is er nog niet) tussen het wonen in de buurt van een hoogspanningsleiding en een iets hogere kans op leukemie.

1.3.2 Radiofrequente straling

Het frequentiegebied van het elektromagnetische spectrum van ongeveer 10 kHz tot 300 GHz wordt het radiofrequente gebied genoemd. Communicatie-apparatuur, zoals omroepstations, vaste en mobiele radiozenders en radarapparatuur, stralen de opgewekte radiofrequente energie de ruimte in. De opgewekte stralingsenergie van microgolfapparatuur, zoals magnetrons en diathermie-apparatuur wordt lokaal benut, waarbij een gedeelte onbedoeld de ruimte instraalt. De elektromagnetische straling in het radiofrequente gebied heeft een te lage energie om ionisaties te kunnen veroorzaken. Indien de golflengte van de straling overeenkomt met tweemaal de lengte van het menselijk lichaam kan maximale absorptie optreden. Deze golflengte komt overeen met het frequentiegebied tussen ongeveer 30 tot 300 MHz. Radiofrequente straling (RF-straling) met een afwijkende frequentie wordt echter ook nog in voldoende mate geabsorbeerd. Bij fysiotherapie past men bijvoorbeeld frequenties van 27, 434 en 2450 MHz toe. Magnetrons, die worden gebruikt voor microgolfverhitting, zijn ingesteld op een frequentie van 2450 MHz. Ook in MRI-scanners wordt radiofrequente straling gebruikt voor de beeldvorming, naast permanente en geschakelde sterke magneetvelden. Er is veel onderzoek gedaan naar de effecten van radiofrequente straling, zowel in vitro als in vivo. Ook zijn epidemiologische studies verricht naar de even-

tuele gezondheidseffecten. De carcinogeniteit van blootstelling aan lage stralingsniveaus van RF-straling is niet overtuigend aangetoond. In wetenschappelijke kringen lijkt vooralsnog consensus te bestaan over de onschadelijkheid bij lage blootstellingsniveaus aan RF-straling.

1.3.3 UV-straling

Ultraviolette straling is een vorm van elektromagnetische straling die aan de langgolvlige kant wordt begrensd door het violet-blauwe licht en aan de kortgolvlige kant door het gebied van de ioniserende straling. Het UV-stralingsgebied wordt vaak nog onderverdeeld, omdat effecten van UV-straling sterk afhankelijk zijn van de golflengte.

De meest gehanteerde indeling is:

- UV-A: 315-400 nm; ('black light'); o.a. controle bankbiljetten;
- UV-B: 280-315 nm; ('erytheemgebied'); o.m. toegepast bij onderzoek;
- UV-C: 100-280 nm; ('kiemdodingsgebied'); industriële toepassingen.

De belangrijkste bron van UV-straling is de zon, slechts een tiende van de gemiddelde blootstelling aan UV wordt van kunstmatige bronnen ontvangen. Het zonlicht bevat het gehele UV-spectrum; UV-C wordt echter in de atmosfeer geabsorbeerd en bereikt het aardoppervlak niet. UV-B wordt voor een deel tegengehouden door de ozonlaag en UV-A bereikt het aardoppervlak vrijwel ongehinderd. Kunstmatige bronnen van UV-straling zijn bijvoorbeeld halogeenlampen zonder filters, gasontladingslampen (TL-buizen) en speciale apparatuur zoals lasapparaten. Daarnaast wordt UV-straling ook medisch aangewend bij de behandeling van huidaandoeningen als psoriasis (PUVA-behandeling), acne en eczeem.

Zonder de beschermende atmosferische laag (inclusief ozonlaag) zou de UV-straling van de zon waarschijnlijk voor de meeste levende organismen dodelijk zijn. De effecten van blootstelling openbaren zich met name in de huid en de ogen, het doordringend vermogen van UV-straling in de huid is namelijk gering: tienden van een millimeter of minder, afhankelijk van de golflengte. De gevolgen van bestraling met UV kunnen zich op korte dan wel lange termijn manifesteren.

Korte-termijneffecten zijn onder meer:

- erytheem (zonnebrand) (vooral UV-B, in mindere mate UV-A);
- huidverdikking (uitsluitend UV-B);
- bruinkleuring (vooral UV-B, in mindere mate UV-A);
- sneeuwblindheid (lasogen);
- allergische huidreacties bij overgevoeligheid voor zonlicht;

- een tijdelijke afname van de immunologische afweer van het lichaam ('koortslip', UV-A en UV-B).

Lange-termijneffecten zijn:

- versnelde veroudering van de huid;
- cataractvorming;
- inductie van huidkanker.

Mensen met een zongevoelige huid (huidtype I, blanke huid, vaak sproeten, lichtblond of rood haar en blauwe ogen) lopen hogere risico's op het krijgen van huidkanker, een factor van 2 à 4 wordt genoemd. De relatie tussen huidkanker en blootstelling aan UV-straling is, afhankelijk van het tumortype, minder of meer duidelijk aangetoond. Een overzicht:

- basale-celcarcinoom: 70 à 80% van de totale incidentie, lage letaliteit (circa 0,3%), de relatie met UV-bestraling is duidelijk aangetoond;
- plaveiselcelcarcinoom: 10 à 20% van de totale incidentie, lage letaliteit (circa 3%), de relatie met UV-bestraling is redelijk sterk aangetoond;
- melanoom: 5 à 10% van de totale incidentie, hoge letaliteit (circa 20 à 25%), de relatie met UV-bestraling is waarschijnlijk aanwezig, met name na blootstelling op jeugdige leeftijd.

De dosis UV-straling die bij een gemiddelde - niet aan zonlicht gewende - blanke huid net roodkleuring geeft wordt de minimale erythemdosis (MED) genoemd. De totale dosis UV-straling die op zomerdagen kan worden opgelopen bedraagt een veelvoud van deze waarde. Mensen die buitenwerk verrichten ontvangen jaarlijks gemiddeld 300 MED. Voor 'binnenwerkers' is deze blootstelling circa 100 MED, die voornamelijk 's zomers wordt opgelopen. Er wordt geadviseerd om de jaarlijkse extra dosis ultraviolette straling te beperken tot 100 MED. Met een zonnevakantie van zomers drie weken in Zuid-Europa wordt deze dosis al opgelopen.

1.3.4 Ioniserende straling

Evenals zichtbaar licht, magnetronstraling en radiogolven is röntgenstraling een vorm van elektromagnetische straling. Het bijzondere van röntgenstraling (en gammastraling) is, dat deze in de ermee doorstraalde materie (zoals lucht of weefsel) de daarin meestal in gebonden vorm aanwezige elektronen uit het atomaire verband kan losslaan. Dit proces noemt men ioniseren. De op deze wijze geïoniseerde atomen (ionen of radicalen genoemd) kunnen zeer reactief zijn en chemische bindingen aangaan, waardoor bijvoorbeeld de in de lichaamscellen aanwezige macromoleculen kunnen beschadigen, wat vooral bij beschadiging van DNA-moleculen nadelige gevolgen kan hebben. Alle straling die genoeg energie bezit om in materie ionisaties te veroorzaken duidt men aan met de verza-

melnaam 'ioniserende straling'. De benodigde energie voor een ionisatie is onder andere afhankelijk van het soort chemisch element (gekaracteriseerd door de zogenoemde Z-waarde (atoomnummer), die tevens de plaats in het Periodiek Systeem van de elementen bepaalt) en bedraagt gemiddeld enkele tientallen elektronvolts (eV).

Bij ELF-velden, radiofrequente straling en UV-straling vindt blootstelling van de mens vrijwel uitsluitend plaats door bestraling vanuit uitwendige bronnen. Bij ioniserende straling is daarnaast ook inwendige bestraling mogelijk ten gevolge van in het lichaam opgenomen radioactieve stoffen. Via voedsel, inademen en opname door de huid kunnen deze stoffen in het lichaam terecht komen. Bij uitwendige bestraling door ioniserende straling kan de stralingsenergie, afhankelijk van het doordringend vermogen van de straling, in mindere of meerdere mate lokaal in het lichaam worden geabsorbeerd. Het doordringend vermogen is afhankelijk van het soort straling en van de stralingsenergie. Een overzicht van de belangrijkste stralingssoorten en hun doordringend vermogen wordt gegeven in onderstaande tabel. De gehanteerde eenheid voor de energie van de ioniserende straling is de elektronvolt, één elektronvolt (eV) komt overeen met een energie van $1,6 \times 10^{-19}$ joule (J). Het doordringend vermogen van gamma- en röntgenstraling verschilt fundamenteel van dat van alfa- en bètastraling. Een alfa- of bètadeeltje met een gegeven energie heeft een beperkte dracht (reikwijdte); een zekere materiaaldikte zal een bundel van dergelijke deeltjes volledig absorberen. De intensiteit van een bundel röntgen- of gammastraling daarentegen wordt in materie weliswaar bij toenemende doordringdiepte exponentieel dalend verzwakt; echter zelfs tamelijk dikke afschermdelen lood of beton kunnen niet voorkomen, dat er nog fotonen door de afschermdelen heen gaan. In onderstaande tabel wordt de verzwakkende werking van weefsel uitgedrukt in een halveringsdikte, dat is de materiaaldikte die de helft van de opvallende fotonenstraling doorlaat.

TABEL: Doordringend vermogen van ioniserende straling

naam	soort deeltje	energie	doordringend vermogen in weefsel
alfastraling	'naakte' heli- umkern	4-8 MeV	ca. 70 µm (dikte opperhuid)
bètastraling	elektron	66 keV 750 keV 4 MeV	ca. 70 µm (dikte opperhuid) ca. 3 mm (diepte oog lens) ca. 2 cm
gammastraling	foton	10 keV 100 keV	halveringsdikte ca. 0,15 cm halveringsdikte ca. 4 cm
röntgenstraling		1 MeV 10 MeV	halveringsdikte ca. 10 cm halveringsdikte ca. 32 cm

1.3.5 Dosisbegrippen

Een blootstelling aan ioniserende straling leidt tot absorptie van stralingsenergie in weefsel. De mate van blootstelling van een individu wordt met drie, onderling samenhangende, grootheden beschreven. Daarnaast is een vierde grootheid in gebruik voor de blootstelling van bevolkingsgroepen. Onderstaande tabel geeft een overzicht.

TABEL: Grootheden voor de mate van blootstelling

	geabsorbeerde dosis D	equivalente dosis H	effectieve dosis E	collectieve dosis
eenheid	Gy (gray)	Sv (sievert)	Sv (sievert)	(mensityvert)
berekenwijze	J/kg in punt	$H = D \cdot w_R$	$E = H \cdot w_T$	$E_1 + E_2 + \dots$
specifiek voor	alle materie	weefsel / orgaan	gehele lichaam	bevolkingsgroep
gebruik in relatie met	energieafgifte van straling	biologische stralingschade	individueel risico op letale tumoren	bevolkingsrisico op letale tumoren

De geabsorbeerde dosis is de enige direct meetbare fysische grootheid van de vier in de tabel vermelde grootheden, de overige zijn rekenkundige grootheden die niet direct via metingen kunnen worden bepaald; ze worden ook wel aangeduid als **stralingsbeschermingsgrootheden**.

Geabsorbeerde dosis

Geabsorbeerde dosis is fysisch gedefinieerd in een **punt**(volume) van een bepaald materiaal. Dat heeft onder andere als voordeel, dat het stralingsveld in het puntvolume als homogeen kan worden beschouwd. Ook het (punt)volume zelf is homogeen van samenstelling, bijvoorbeeld lucht of

weefsel. Tenslotte zijn er in een klein (punt)volume minder storende effecten van verstrooiing (build-up effect). Met een klein-volume cilindrische ionisatiekamer (bijvoorbeeld kleiner dan 1 cm^3) kan op deze wijze het dosistempo in een röntgenbundel worden gemeten. In tegenstelling tot een dergelijke dosis- of dosistempometing is een DOP-meting (dosisoppervlakteproduct) - waarbij de bundel **als geheel** door een meetkamer straalt - te correleren aan de totaal in de patiënt geabsorbeerde röntgenenergie via vast te stellen conversiefactoren per type onderzoek.

Wanneer een röntgenbundel door een patiënt heen gaat, zal de geabsorbeerde dosis in opeenvolgende punten op een denkbeeldige lijn door de patiënt exponentieel afnemen vanwege absorptie in de patiënt. Daarbovenop speelt ook de kwadratenwet een rol vanwege de divergerende bundel. Omdat het menselijk lichaam niet homogeen is, zal de afname in dosis soms sprongsgewijs plaatsvinden: botten (grotere verzwakkingscoëfficiënt) absorberen meer röntgenfotonen dan zachte weefsels. Aan de uittreezijde bedraagt de geabsorbeerde dosis nog maar een paar procent van die aan de intreezijde (intreehuid dosis).

Door genoemde factoren en door interne verstrooiing in het lichaam bij bestraling met divergerende, brede bundels zal de geabsorbeerde dosis op de diverse punten in het lichaam afwijken van de “ideale” waarde die via kwadratenwet en exponentiële afname zou kunnen worden berekend. In de praktijk van de radiologische toepassingen wordt daarom gewerkt met de gemiddelde geabsorbeerde dosis van de diverse organen. Dit is alleen zinvol in het lage-dosisgebied ($< 100 \text{ mGy}$) waar alleen stochastische stralingseffecten kunnen optreden en waarbij de dosisverdeling binnen een orgaan voor het effect niet van belang is. Uiteraard geldt dit niet voor de radiotherapie: voor de beoogde weefselreacties in het tumorweefsel moeten de ingeplande dosiscontouren op alle punten worden gerealiseerd bij de bestraling.

In de literatuur komt een aan dosis nauw verwant begrip voor: kerma, wat een samentrekking is van kinetic energy released in material. Met de grootte kerma wordt de energieoverdracht van fotonen aan materie gekwantificeerd (= de kinetische energie die de bij de primaire ionisaties ontstane foto- en comptonelektronen meekrijgen) Net als bij geabsorbeerde dosis wordt kerma uitgedrukt in $\text{J/kg} = \text{gray}$. Omdat de vrijgemaakte foto- en comptonelektronen – die ontstaan zijn door bestraling met diagnostische röntgenstraling – binnen circa een millimeter hun verkregen kinetische energie via ionisatiesporen aan het materiaal afgeven, zal de lokale geabsorbeerde dosis normaal gesproken gelijk zijn aan de kerma. Daarom kan bij radiologische toepassingen worden gesteld: kerma = geabsorbeerde dosis. Bij megavoltbundels zoals toegepast in de ra-

diotherapie zijn de ionisatiesporen langer (orde van grootte: cm's) en daar kan kerma ongelijk zijn aan de geabsorbeerde dosis; hierop berust het huidsparend effect.

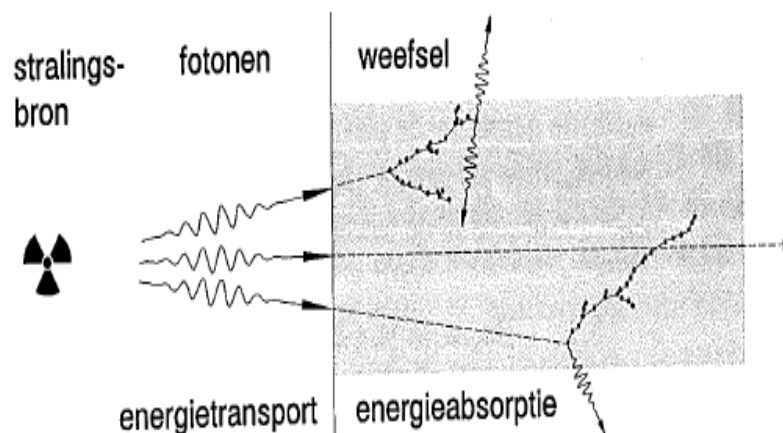
Absorptie is het verschijnsel dat wanneer straling op materie valt, stralingsenergie wordt omgezet in interne energie van de materie. Röntgenstraling veroorzaakt ionisaties in menselijk weefsel. De totale energieafgifte houdt verband met het aantal ionisaties, omdat voor elke ionisatie een zekere hoeveelheid energie benodigd is. Ionisaties kunnen een reeks van processen initiëren die kunnen uitmonden in klinisch waarneembare biologische effecten. De gemiddelde "concentratie" van de geabsorbeerde stralingsenergie in weefsel, de zogenoemde **geabsorbeerde orgaandosis**, is een belangrijke maat voor de geïnitieerde biologische schade. De geabsorbeerde dosis wordt uitgedrukt in de eenheid **gray (Gy)** of milligray (mGy). Een gray komt overeen met een energie-absorptie van 1 joule per kilogram weefsel.

Stralingsbeschermingsgrootheden

Naast de geabsorbeerde dosis zijn er verscheidene andere grootheden in gebruik, waarmee de mate van blootstelling kan worden vastgelegd. De twee belangrijkste zijn de stralingsbeschermingsgrootheden **equivalente dosis** en **effectieve dosis**, die beide in de eenheid sievert (Sv) of **millisievert (mSv)** worden uitgedrukt. De grootheid effectieve dosis heeft een relatie met het (stochastische) gezondheidsrisico en is praktisch bij het vergelijken van partiële blootstellingen zoals bij radiologische procedures. In de meest voorkomende (klinische) situaties worden personen partieel blootgesteld aan straling.

Dosisgrootheden

Ioniserende straling kan worden opgevat als een verzameling stralingsdeeltjes die elk een zekere hoeveelheid energie transporteren. Wanneer zo'n deeltje materie binnendringt kan het alle energie kwijtraken, bijvoorbeeld door middel van botsingen met aanwezige elektronen, gevolgd door een ionisatiespoor. Onderstaande figuur illustreert het energietransport door fotonen, gevolgd door absorptie van stralingsenergie in blootgesteld weefsel. De hoeveelheid geabsorbeerde energie is evenredig met het aantal veroorzaakte ionisaties. In de figuur is elke ionisatie door middel van een zwarte stip weergegeven.



Figuur: Transport en overdracht/absorptie van stralingsenergie

De hoeveelheid in de weefselmassa geabsorbeerde stralingsenergie, gedeeld door de massa van het bestraalde weefsel is de (gemiddelde) geabsorbeerde stralingsdosis. De geabsorbeerde stralingsdosis (symbool D) heeft als eenheid joule per kilogram (J/kg), met als speciale naam de **gray (Gy)**.

Als gevolg van de blootstelling ontstaat schade in weefselcellen. Deze schade is echter bij eenzelfde geabsorbeerde stralingsdosis niet voor alle stralingssoorten (en -energieën) hetzelfde. De kans op stralingschade in cellen hangt samen met de **geabsorbeerde dosis**. Maar zelfs bij gelijke geabsorbeerde dosis kan er een verschil in biologische werking zijn, wat samenhangt met de aard van de straling. Dit berust op een verschillende microscopische verdeling van de geabsorbeerde energie in de ionisatiesporen (“tracks”), waarvoor de term ionisatiedichtheid wordt gebruikt. Zo is de biologische werkzaamheid van alfastraling groter dan die van röntgenstraling bij dezelfde geabsorbeerde stralingsdosis. Daarom wordt alfastraling als hoge-LET-straling aangeduid, waarbij LET staat voor “linear energy transfer”. De stralingsweegfactor (w_R ; onderschrift R van ‘radiation’) verrekent het relatieve verschil in biologische werkzaamheid, uitgaande van een factor 1 voor röntgenstraling. Biologische (stochastische) effecten relateert men aldus aan de **equivalente dosis**, een rekenkundige grootte die als een voor biologische werkzaamheid gecorrigeerde geabsorbeerde dosis kan worden opgevat. Voor röntgen-, gamma- en elektronenstraling heeft de stralingsweegfactor w_R de waarde 1; voor alfastraling geldt $w_R = 20$.

De **equivalente dosis** (symbool H) heeft, evenals de geabsorbeerde stralingsdosis, de eenheid joule per kilogram (J/kg), maar wordt in **sievert (Sv)** uitgedrukt. Met behulp van de equivalente dosis kan men de blootstelling aan verschillende soorten ioniserende straling optellen. Blootstelling aan eenzelfde equivalente dosis veroorzaakt dus dezelfde hoeveelheid schade in weefselcellen. Dit zegt nog niet alles over de manier waarop de schade zich uiteindelijk zal manifesteren omdat niet alle typen cellen even gevoelig zijn voor stralingsschade.

Rekenvoorbeeld: equivalente dosis

Na blootstelling van een weefsel of orgaan aan alfastraling ($D = 5$ mGy) en gammastraling ($D = 0,5$ mGy) is de equivalente dosis gelijk aan de - met de stralingsweegfactor gewogen - optelling van de geabsorbeerde doses:

$$H = D_1 \cdot w_{R,1} + D_2 \cdot w_{R,2}$$

$$H = 5 \cdot 20 + 0,5 \cdot 1$$

$$H = 100,5 \text{ mSv (millisievert)}$$

Na blootstelling van organen bestaat het risico op tumorinductie. De diverse weefsels en organen dragen in verschillende mate bij aan de letale gevolgen voor een individu. Deze verschillende gevoeligheid van weefsels en organen is verdisconteerd in de orgaan- of weefselweegfactor (w_T ; onderschrift T van 'tissue'). De weefselweegfactor voor de huid is bijvoorbeeld relatief klein (weinig kans op sterfte door een huidtumor) en voor het rode beenmerg relatief groot (meer kans op sterfte aan leukemie). De waarden van de weefselweegfactoren staan vermeld in de volgende tabel, de 'weegfactor' voor het gehele lichaam telt op tot 1.

TABEL : Weefselweegfactoren volgens ICRP-103 (2007).

Orgaan/weefsel	Aantal organen / weefsels	w _T *
Long, maag, colon, beenmerg, borstklier	5	0,12
Gonaden	1	0,08**
Schildklier, slokdarm, blaas, lever	4	0,04
Botoppervlak, huid, hersens, speekselklieren	4	0,01
Restorganen***	14	0,009

*De getabelleerde waarden gelden voor lage geabsorbeerde doses ($D < 0,2$ Gy). De waarden zijn bedoeld voor het berekenen van de effectieve dosis van werkers en leden van het publiek (inclusief kinderen).

**De w_T voor de gonaden is toegepast op het gemiddelde van de doses op testis en ovaria. Het betreft het risico op tumorinductie plus het risico op effecten in het nageslacht (twee generaties).

***in totaal 14; 13 in iedere sexe: adrenals, extrathoracic tissue (ET), gall bladder, heart, kidneys, lymphatic nodes, muscle, oral mucosa, pancreas, prostate (♂), small intestine (SI), spleen, thymus, uterus/cervix (♀).

Bij lage doses is alleen het risico op extra sterfte aan stralingsgeïnduceerde tumoren van belang. De blootstelling wordt hiertoe uitgedrukt in de **effectieve dosis**, een rekenkundige grootheid die als een soort “risico-maat” kan worden opgevat. Met behulp van de effectieve dosis en een risicogetal is de kans op het overlijden aan stralingsgeïnduceerde tumoren in te schatten. Men berekent de effectieve dosis (E) door de equivalente dosis (H) van blootgestelde organen te vermenigvuldigen met de weefselweegfactor (w_T) van het blootgestelde orgaan en vervolgens door de uitkomsten te sommeren over alle blootgestelde organen.

Rekenvoorbeeld: effectieve dosis

Na blootstelling van de maag, blaas en lever aan een equivalente dosis van elk 5 mSv is de effectieve dosis gelijk aan de - met de weefselweefactor gewogen - optelling van de equivalente doses:

$$E = H_1 \cdot w_{T,1} + H_2 \cdot w_{T,2} + H_3 \cdot w_{T,3}$$

$$E = 5 \cdot 0,12 + 5 \cdot 0,04 + 5 \cdot 0,04$$

$$E = 1 \text{ mSv}$$

Het totaal van de weefselweefactoren telt op tot 1, dus bij homogene blootstelling van het gehele lichaam is de waarde van de effectieve dosis gelijk aan de gewogen som van alle equivalente doses. De effectieve dosis (symbool E) heeft, evenals de equivalente dosis de eenheid joule per kilogram (J/kg) en beide grootheden worden in sievert (Sv) uitgedrukt.

Het totale risico van een stralingsbron of -toepassing, bijvoorbeeld 'radiodiagnostiek in Nederland', wordt niet alleen bepaald door de individuele dosis, maar ook door het aantal personen dat deze dosis ontvangt. De sommatie van alle ontvangen individuele doses ten gevolge van een (of meer) bron(nen), noemt met de **collectieve (effectieve) dosis**. Om aan te geven dat het een collectieve dosis betreft, wordt als eenheid menssievert (mensSv) gebruikt.

Rekenvoorbeeld: collectieve dosis

Een groep van 40 cursisten ontvangt tijdens een röntgenpracticum elk een effectieve dosis (E) van 1,5 μ Sv. De collectieve dosis is een sommatie van de individuele effectieve doses:

$$\text{collectieve dosis} = E_1 + \dots + E_{40}$$

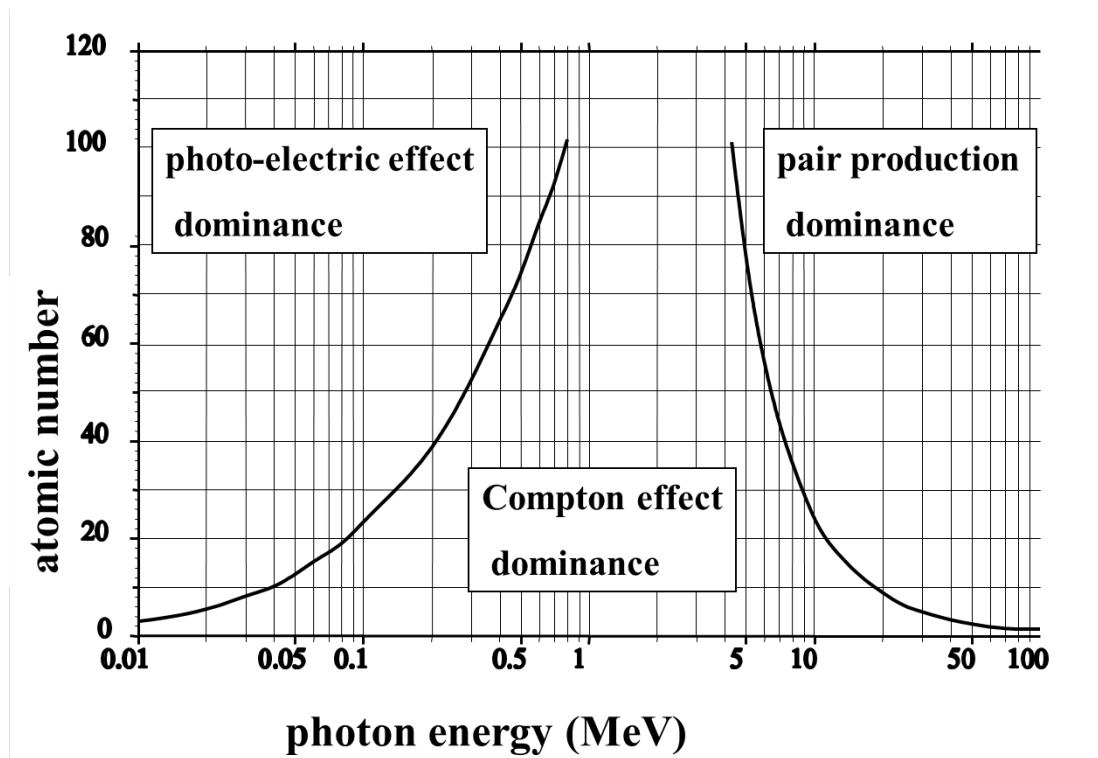
$$\text{collectieve dosis} = 40 \cdot 1,5 \mu\text{Sv} = 60 \times 10^{-6} \text{ menssievert.}$$

De diverse gehanteerde dosisbegrippen kunnen in de praktijk en bij onzorgvuldig gebruik soms aanleiding geven tot verwarring, waardoor onjuiste conclusies kunnen worden getrokken, wees hierop bedacht. Verder geldt, dat vanwege voortschrijdend inzicht en nieuwe wetenschappelijke gegevens de weefactoren – met name de weefselweefactoren – door de ICRP om de circa 10 jaar worden aangepast. Dat houdt in, dat een berekende effectieve-patiëntdosiswaarde voor eenzelfde radiologische opname dan ineens een andere waarde kan krijgen. Soms is dat een significant verschil, maar vaak laat de praktijk zien, dat bijvoorbeeld opnameprotocollen in de loop der tijd ook wijzigen en natuurlijk ook de door doorlichtapparatuur en CT-scanners gebruikte detectordosis voor goede beeldvorming.

1.4 *Interactie van röntgenstraling met weefsel*

Elektromagnetische golven bevatten zowel een fluctuerend elektrisch als magnetisch veld (loodrecht op elkaar staand). Wanneer deze op materie stuiten, zullen de in die materie aanwezige elektronen worden beïnvloed. Het hangt – naast onder andere van de golflengte – af van de vrijheidsgraden van de elektronen in de materie om “met de fluctuaties mee te bewegen”, hoe de elektromagnetische golven daardoor worden beïnvloed. Bij metalen is dit bijvoorbeeld anders dan bij glas of steen. Mogelijk treedt er reflectie op of transmissie of een combinatie van beide. Absorptie van de elektromagnetische energie is ook mogelijk (bij een zgn. “zwart lichaam” zelfs vrijwel volledige absorptie). Ook verschijnselen als breking, diffractie en interferentie kunnen optreden, mede afhankelijk van de aard van het object dat wordt bestraald en de golflengte van de elektromagnetische straling. Lichtfotonen kunnen voornamelijk doorzichtige materialen penetreren, zoals glas en de ooglens. Voor **ioniserende elektromagnetische straling** zoals röntgenstraling geldt, dat deze in staat is om elektronen los te slaan uit de atomaire verbanden waarin de elektronen zich normaal gesproken bevinden. Daarnaast kan dit soort straling geheel door een (verder ondoorzichtig) object heen gaan, zonder enige interactie te hebben met de daarin aanwezige atomen, atoomkernen en elektronen. In feite is door het kortgolvlige karakter van röntgenstraling de discreet opgebouwde materie een grote “gatenkaas”. Als er wel interacties optreden, zal dat met de in het weefsel aanwezige elektronen zijn (foto-elektrisch of comptoneffect). Wanneer röntgenstraling op weefsel valt, zullen de röntgenfotonen ofwel ongehinderd door de weefsel laag passeren ofwel elektronen “losslaan” (ionisatie), die in elk materiaal ruim voorhanden zijn. Deze losgemaakte elektronen nemen de (verhoudingsgewijze hoge) röntgenfotonenergie (groten)deels over, waardoor ze zelf een ionisatiespoor van circa enkele millimeters veroorzaken rondom de interactieplek. Deze langs het spoor (“track”) gecreëerde ionisaties dragen bij aan de geabsorbeerde dosis (en de daarmee gepaard gaande biologische effecten) in het bestraalde weefsel. Bij in de radiologie gebruikelijke röntgenspectra met maximale fotonenergie van circa 125 keV (bij een buisspanning van 125 kV) veroorzaken twee typen interacties van de röntgenfotonen met de elektronen in het weefsel de bovengenoemde ionisatiesporen: het **foto-elektrische effect** en het **comptoneffect**. De overeenkomst tussen beide interacties is: er wordt energie overgedragen van straling naar materie, van het foton naar een elektron. De verschillen tussen beide interactietypen zijn: bij het comptoneffect ontstaat tevens een verstrooid foton, met een lagere energie. Verder vindt het foto-elektrische effect voornamelijk plaats aan elektronen in de binnenste elektronenschillen (K-schil), terwijl het comptoneffect bij de meer los gebonden buitenste-schil-elektronen (L-, M-, N-schil) optreedt. Bij veel hogere fotonenergieën dan in de radiologie worden toegepast

kunnen ook andere wisselwerkingsprocessen met bestraald materiaal optreden, zoals het paarvormingsproces en het kernfoto-effect. Bij diagnostische röntgenspectra (30-125 keV) treedt bij bestraling van weefsels zowel het foto-elektrische effect als het comptoneffect afwisselend op; welk van de twee interacties in aandeel de overhand zal hebben hangt af van de feitelijke spectrale verdeling (gemiddelde fotonenergie, “hardheid”) en van de samenstelling van het bestraalde weefsel, met name de (gemiddelde) Z-waarde (atoomnummer) van het weefsel. Voor zacht weefsel bedraagt de Z-waarde 7,3 en voor botweefsel circa 15. Een laagenergetisch spectrum (“zacht”) en een hoge Z-waarde van het daarmee bestraalde weefsel zal overwegend foto-elektrische absorptie veroorzaken. Het comptoneffect heeft de overhand bij het bestralen van zacht weefsel met een lage Z-waarde met een hoger-energetisch röntgenspectrum, zie figuur 1.



FIGUUR 1: Wisselwerking van ioniserende straling met materiaal als functie van fotonenergie en Z-waarde van het materiaal.

Het bij een comptoninteractie ontstane verstrooide (compton)foton heeft een lagere energie dan het primaire foton dat de comptoninteractie veroorzaakte; immers de energie van het primaire foton wordt verdeeld over zowel het comptonelektron als het comptonfoton. De feitelijke energie van het comptonfoton is tevens afhankelijk van de verstrooiingshoek. Ondanks de lagere energie van het comptonfoton, vergeleken

met het primaire foton dat deze veroorzaakte, is het nog steeds een foton in het energiebereik van wat röntgenstraling wordt genoemd en kan daarom ook uit het bestraalde object “ontsnappen”. De hoek waaronder het comptonfoton wordt verstrooid varieert van interactie tot interactie, het resultaat na een bestraling van een klein volume weefsel is, dat er min of meer rondom het bestraalde volume strooistraling is uitgezonden. Bij grotere objecten zoals een patiënt, waar de plek waar de meeste comptonfotonen ontstaan (tot enkele centimeters onder het ingestelde intreeveld) asymmetrisch in de patiënt is gelegen, leidt deze asymmetrische ligging in combinatie met zelfabsorptie in de patiënt tot een van de bolvormige verdeling afwijkende strooistralingsverdeling rondom de patiënt. De meeste strooistraling kan worden gemeten aan de kant van de patiënt waar de röntgenbuis zich bevindt (“terug richting buis”); de in schuin voorwaartse richting verstrooide straling heeft ten opzichte van de schuin achterwaartse verstrooide straling een lagere intensiteit (veroorzaakt een lager dosistempo, $\mu\text{Gy}/\text{min}$). Foto-elektrische interacties en comptoninteracties samen zorgen er voor, dat een bundel röntgenstraling wordt verzwakt naarmate deze dieper in weefsel doordringt. Slechts een fractie van de straling die aan de intreezijde de patiënt binnendringt komt er aan de uittreezijde uit (enkele procenten) en wordt gebruikt voor de beeldvorming. Uit onderzoek is gebleken, dat naarmate de fotonenergie toeneemt, de interactiekans met materiaal afneemt; dit geldt zowel voor het foto-elektrisch effect als voor het comptoneffect, zij het dat de energieafhankelijkheid voor beide typen interactie verschilt. Dit impliceert, dat een hoger energetische röntgenbundel beter door een materiaal (of een patiënt) heen dringt. De absorptie van een bundel röntgenstraling in een patiënt gaat dus gepaard met het ontstaan van strooistraling, waarbij de verstrooide fotonen vanuit het blootgestelde weefsel in alle richtingen kunnen worden uitgezonden. Of scherper geformuleerd: **tijdens diagnostiek en interventie met röntgenstraling is de patiënt een bron van strooistraling.** Deze verstrooide röntgenstraling kan voor medisch personeel tot een aanzienlijke stralingsbelasting leiden.

Kwalitatieve verklaring van de verschillende wisselwerkingen tussen fotonen en weefsel.

Een gedetailleerde mathematische beschrijving en verklaring van de wisselwerking tussen fotonen en weefsel op atomaire schaal ligt in het domein van de kwantummechanica en is intuïtief minder inzichtelijk. Eenvoudig gezegd kunnen twee kwantumdeeltjes optimale interactie hebben indien hun golflengte ongeveer overeenkomt, zodat er onderling resonantie kan optreden.

Het foto-elektrisch effect vindt plaats aan gebonden elektronen, waarbij de afmeting van de zogenoemde atoomromp (atoomkern + binnenste schillen) als “interactieobject” kan worden gezien. Bij een hogere Z-

waarde van het bestraalde materiaal is de afmeting van de atoomromp (met name doordat K- en L-schil dichters op de atoomkern zitten) gekrompen, waardoor het foto-elektrisch effect ook bij kortere golflengte (hogere fotonenergie, hoger kV) kan optreden. Bij het compton-effect gaat het om interactie tussen “vrije elektronen” en fotonen. We zien dan ook een maximum interactie optreden bij een fotonenergie van 511 keV. Links en rechts van deze fotonenergie is de interactie minder (maar praktisch gezien wel relevant). Dit duidt op een resonantie-effect met een “vrij” ofwel zwak gebonden elektron (aanwezig in de buitenste elektroenschillen). Aangezien dit een kleiner “interactieobject” is, zal comptoninteractie bij kortere golflengtes, dus hogere fotonenergieën (= hoger kV voor diagnostiektoestellen) meer voorkomen.

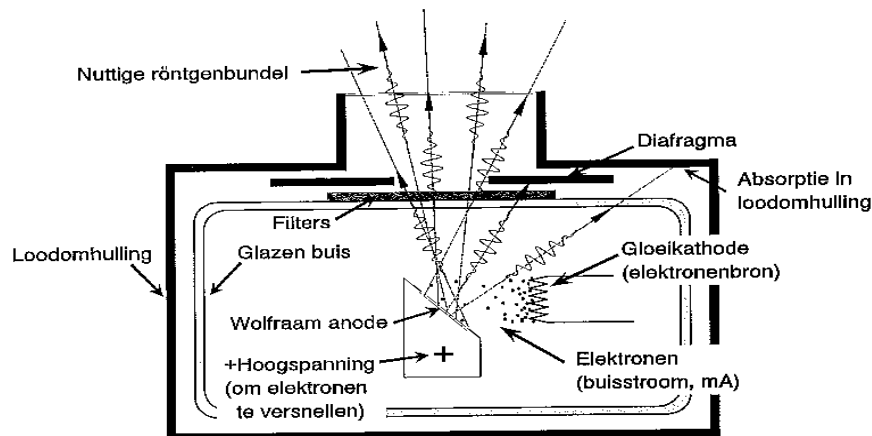
1.5 Opwekken van röntgenstraling

Röntgenstraling wordt geproduceerd bij sterke afremming van snelle elektronen. Dit wordt gerealiseerd in een röntgenbuis door elektronen in vacuüm te versnellen onder invloed van een zeer hoog potentiaalverschil, de buisspanning. De aldus versnelde elektronen worden vervolgens in een zwaar-metalen trefdoel (“reflectietarget”), de anode, afgeremd en tot stilstand gebracht. Er ontstaat op deze manier een zogenoemd remstralingsspectrum (Bremsstrahlung, X-rays). Voor het materiaal van het trefdoel wordt meestal het metaal wolfram gekozen, dat een hoog smeltpunt heeft en een hoge Z-waarde.

Toen Wilhelm Conrad Röntgen de remstraling ontdekte (1895), kon hij deze niet verklaren (vandaar de naam X-stralen). Voor zijn ontdekking ontving Wilhelm Conrad Röntgen in 1901 de eerste Nobelprijs voor de natuurkunde. Diverse fysische mechanismen rondom opwekking en toepassing van röntgenstraling, zoals het ontstaan van remstraling en karakteristieke röntgenstraling, het foto-elektrisch effect en de comptonwisselwerking (verstrooiing, hiervoor kreeg A.H. Compton in 1927 de Nobelprijs voor de natuurkunde) zijn pas “verklaarbaar” gebleken na de uitwerking van de theorieën over de kwantummechanica in de jaren 1920-1930. Dat de energie van elektromagnetische straling recht evenredig is met de frequentie van die straling werkte Albert Einstein in 1905 verder uit en paste het toe op het foto-elektrisch effect; voor dit werk ontving A. Einstein in 1921 de Nobelprijs natuurkunde. Bij het afremmen van elektronen (in de anode) zorgt de versnelling (afremming) voor asymmetrie in het afremmende elektron, het elektron wordt als ware het een sinaasappel “uitgeperst”, waardoor stralingsenergie vrijkomt¹. Een elektron is derhalve niet uitsluitend op te vatten als “robuust puntdeeltje”.

1. Feynman Lectures on Physics, vol III, 19-8

Figuur 2 toont een doorsnede van een röntgenbuis en het principe van het opwekken van röntgenstraling. Bovenop de remstraling kan er ook karakteristieke röntgenstraling worden opgewekt (boven bepaalde buisspanningen). De karakteristieke energie hiervan wordt bepaald door het anodemateriaal (vandaar de naam); de maximale bijdrage aan de totale röntgen-output bedraagt circa 10%; het merendeel van de uitgezonden röntgenstraling is remstraling. De elektronenstroom in een röntgenbuis, de **buisstroom**, drukt men uit in milliampères (mA). De buisstroom (mA) bepaalt het tempo waarin de röntgenstraling wordt geproduceerd. Een tweemaal hogere buisstroom betekent een tweemaal zo hoge intensiteit van de röntgenbundel. De **buisspanning**, uitgedrukt in kilovolt (kV), varieert in de praktijk van 60 tot 125 kV. De buisspanning beïnvloedt het penetrerend vermogen ('hardheid') van de röntgenstraling en de intensiteit van de röntgenbundel. **Vuistregel:** de maximale fotonenergie van een röntgenspectrum is (uitgedrukt in keV) gelijk aan de ingestelde buisspanning (uitgedrukt in kV); de gemiddelde fotonenergie is ongeveer de helft tot een derde van de maximale fotonenergie, afhankelijk van de toegepaste filtering. Bij een hogere buisspanning is het penetrerend vermogen van de röntgenstraling veel groter, zodat de buisstroom aanmerkelijk gereduceerd kan worden. Bij gebruik van een belichtingsautomaat gebeurt dit automatisch.



FIGUUR: Doorsnede van een röntgenbuis en het principe van het opwekken van röntgenstraling.

Kilovolt- en milliampère-instellingen zijn in moderne röntgenbuizen onafhankelijk van elkaar in te stellen. Een verhoging van de buisspanning die gepaard gaat met een reductie van de buisstroom leidt doorgaans tot een verminderde blootstelling aan straling voor de patiënt en medisch

personeel. Een hoger kV reduceert echter ook het contrast in het röntgenbeeld. In het algemeen wordt de keuze van de kV-instelling bij doorlichten bepaald door de (projectie-afhankelijke) patiëtdikte en is een compromis tussen de vereiste beeldkwaliteit en de stralingsbelasting voor de patiënt.

1.5.1 Filters

Een röntgenbuis bevat inherente (en wettelijk voorgeschreven) en soms additionele bundelfilters. Dit zijn dunne metalen plaatjes (meestal aluminium en koper) die in de bundel zijn aangebracht tussen het uittreewenster van de röntgenbuis en het diafragma. In sommige toestellen kan door middel van een filterwiel via de bedieningsconsole een bepaald filter worden voorgezet (variabele filtering). De gehele röntgenbundel passeert het filter. De functie van het filter is het absorberen van laagenergetische röntgenstraling, waardoor de röntgenbundel na passage “harder” is geworden. De reden om te filteren is het beperken van de intree-huid dosis van de patiënt. Het toevoegen van extra (koper)filtering wordt daarom in ieder geval aanbevolen bij langer durende (interventie)procedures waarbij de huid dosis kan oplopen, met name ook bij de zogenoemde cine-runs (filmen), waarbij de buisstroom hoger is. Het aanbrengen van extra bundelfilters heeft tot gevolg, dat de buis een intensere stralingsbundel moet produceren om het bundelverlies door absorptie in het filter te compenseren. Voor een extra 0,1 mm koperfilter neemt de ‘tube load’ bij 120 kV met 11% toe en bij 60 kV met 43%. Met de huidige generatie röntgenbuizen hoeft dat geen probleem (vanwege de warmte-ontwikkeling en -afvoer) te zijn. Daarmee wordt wel een reductie van 40% voor de huid dosis van de patiënt bereikt¹⁸. De beeldkwaliteit (signaal-ruisverhouding, SNR) neemt echter met 9% af. Daarom zal het toepassen van (meer) filtering bij voorkeur in overleg tussen artsen en klinisch fysici plaatsvinden, om de gewenste optimalisatie tussen (huid)dosisreductie en acceptabel verlies aan beeldkwaliteit te bereiken. In de praktijk blijkt de gekozen beeldkwaliteit per ziekenhuis te kunnen verschillen. Hoewel filtering primair wordt toegepast om (huid)dosisbesparend voor een patiënt te zijn, blijkt er ook een gunstige invloed op de dosis voor de werkers¹⁹.

¹⁸ Fetterly KA. Investigation of the practical aspects of an additional 0.1 mm copper X-ray spectral filter for cine acquisition mode imaging in a clinical care setting. *Health Phys.* 99(5): 624-630; 2010.

¹⁹ D. van Essen, Thoraxcentrum Erasmus MC Rotterdam, private communication

1.6 *Metten van straling*

In het algemeen is ioniserende straling goed te meten met daartoe geëigende en geijkte instrumenten. Met name diagnostiek-röntgenstraling is goed meetbaar, maar bij lage stralingsniveaus (laag dosistempo) of lagere fotonenergieën (< 30 keV) is een juiste detectorkeuze van belang om geen schijnveiligheid te creëren (“detector meet (vrijwel) niets, maar stralingsniveau is niet nul”). Daarnaast kan bij sommige detectieapparatuur gepulste doorlichting meettechnische problemen geven. Sommige typen ioniserende straling zijn echter lastiger te detecteren, zoals laag-energetische bètastraling, alfastraling en neutronen.

Stralingsdetectie berust op het ioniserend vermogen (voorbeelden: gasgevulde ionisatiekamer, Geiger-Müllertelbuis) of op de eigenschap dat ioniserende straling in sommige materialen zichtbaar-lichtflitsen opwekt. Dit laatste is toegepast in de natriumjodide-scintillatiedetector in een gammacamera voor SPECT of in de LSO/LYSO-scintillatiedetectoren in de nieuwste generatie PET-scanners. Verder kunnen door bestraling al dan niet reversibele fysisch-chemische veranderingen in het materiaal worden veroorzaakt, die achteraf kunnen worden bepaald of uitgelezen, zoals bij thermoluminescentiedosimetrie (TLD), toegepast in de persoonsdosimeter.

In een röntgendiagnostiekopstelling bevinden zich stralingsdetectoren vlak voor of in de beelddetector (BV of flat-panel beelddetector), die zijn gekoppeld aan de röntgengenerator. Hiermee wordt via de belichtingsautomaat een min of meer constante beelddetector-intreedosis geregeld. Raadpleeg een klinisch fysicus/stralingsdeskundige om in voorkomende situaties het juiste type stralingsmeetapparatuur in te zetten.

1.6.1 Operationele (meetbare) dosisgrootheden

Een dosimeter (TLD-badge) die het persoonsdosisequivalent, $H_p(10)$ meet, zal doorgaans een iets hogere uitslag geven dan de feitelijk ontvangen effectieve dosis door de betreffende badgedrager (los van het dragen van een loodschort, waarvoor apart moet worden gecorrigeerd). Uitzondering hierop: een “verkeerde” geometrie, bijvoorbeeld de badge is aan de voorzijde gedragen, terwijl de straling van achter komt. Bij lage fotonenergieën is de relatie tussen $H_p(10)$ en de ontvangen effectieve dosis niet meer ongeveer gelijk te stellen.

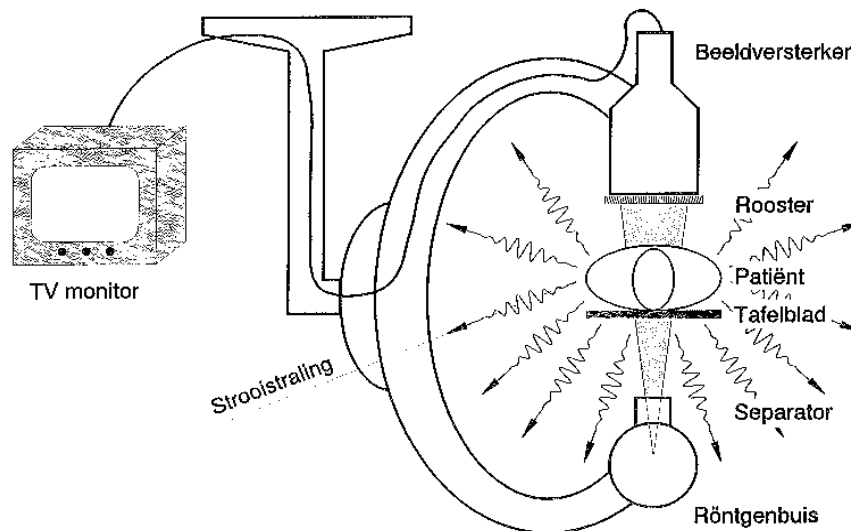
Het omgevingsdosisequivalent, $H^*(10)$ is een puntgrootheid (gedefinieerd in een fantoom: de ICRU-bol) die met een daartoe geschikte en geijkte detector kan worden gemeten. Daardoor kan op de werkplek $H^*(10)$ worden gemeten en uitgaande van een AP-bestrallingsgeometrie

(de fotonen komen frontaal op de werker af), zal dit een overschatting geven van de effectieve dosis.

Dus zowel $H^*(10)$ als $H_p(10)$ zijn meetbaar en kunnen worden gebruikt als goede schatters van de niet te meten effectieve dosis.

1.7 Beeldvorming en beeldkwaliteit

De productie van röntgenstraling vindt in een röntgenbuis plaats op de anode, die als de feitelijke stralingsbron mag worden opgevat. De grootte van de nuttige stralingsbundel wordt ingeperkt door de diafragma-opening. Wanneer een bundel röntgenstraling door een patiënt wordt geleid, zal een groot deel van de straling in de anatomische structuren van de patiënt worden geabsorbeerd. Een deel van de fotonen zal de patiënt echter volledig “doorkruisen”. De in het projectievlak min of meer (vanwege het “heel effect” is de bundel niet volledig homogeen maar bevat een lichte gradiënt) homogeen intredende röntgenbundel zal na passage door het lichaam van een patiënt in het projectievlak lokale intensiteitsvariaties (dosisvariaties) bevatten. Dit is het (latente) röntgenbeeld van de patiënt. Deze intensiteitsvariaties houden verband met de anatomische structuren en de samenstelling daarvan (Z -waarde) die de bundel op weg door de patiënt is gepasseerd. Een achter de patiënt gepositioneerde beelddetector (zoals een flat-panel detector of een klassieke beeldversterker) zet het röntgenbeeld om in signalen die op een monitor kunnen worden vertoond. Het contrast en het ruisniveau kunnen tijdens het doorlichten worden beïnvloed door de keuze van de buisspanning (kV) en de buisstroom (mA) van het röntgentoestel. Deze parameters kunnen soms nog handmatig worden ingesteld, maar meestal wordt de keuze overlaten aan de automatische belichtingsregeling (AEC), wat in de praktijk meestal is gekoppeld aan voorgeprogrammeerde instelkeuzes (zoals: thorax volwassene, extremiteit kind). De keuze van de buisspanning en -stroom, handmatig of automatisch, bepaalt het dosistempo waaraan de patiënt tijdens het doorlichten wordt blootgesteld.



FIGUUR: Een C-boog-configuratie

Het doel van het maken van een **röntgenopname** is een bijdrage te leveren aan de diagnostiek van een patiënt. **Doorlichten** is een hulpmiddel bij een medische handeling of interventie en is bedoeld om dynamische processen te kunnen volgen. In alle gevallen is het de bedoeling dat het geproduceerde (monitor)beeld zinvol bijdraagt aan de diagnose of aan de behandelprocedure. In dat kader wordt gesproken over de diagnostische beeldkwaliteit. Artsen kunnen onderling van mening verschillen over deze kwaliteitseisen; in de praktijk kan dat onder andere worden getest met artsenpanels om tot consensus te komen. Daarnaast is er het begrip fysische beeldkwaliteit, dat met bepaalde parameters kan worden gekwantificeerd. Deze fysische beeldkwaliteit op haar beurt is onder andere afhankelijk van de aard van het toegepaste röntgenspectrum, de “output” (dosistempo) van de röntgenbuis en de patiënteigenschappen (postuur, welk deel wordt afgebeeld, elementaire samenstelling (effectieve Z-waarde)). Daarnaast is de kwaliteit van het toestel en de beeldopnemer natuurlijk van groot belang. In een eerste eenvoudige benadering wordt ten aanzien van beeldkwaliteit onderscheid gemaakt tussen:

- **(spatiële) resolutie**, aantal lijnenparen per millimeter dat kan worden onderscheiden met een testfantoom²⁰, dit bepaalt welke lesie-grootte nog kan worden afgebeeld op de monitor. Resolutie wordt met name bepaald door de kwaliteit van de apparatuur (beelddetector); dit begrip wordt wel eens verward met “scherpte”, hetgeen onjuist is: röntgenbeelden zijn projectiebeelden (ongefocusseerd), in tegenstelling tot gewone fotografische opnames met zichtbaar licht, waarbij een lens voor een scherpe af-

²⁰ Zie bijvoorbeeld TOR 18FG Test Phantom, www.leadstestobjects.com

beelding zorgt (overigens bevindt zich in een klassieke beeldversterker wel een focuseringssysteem voor de elektronenbundel);

- **signaal-ruisverhouding** ("ruis", signal-to-noise ratio, SNR), is het object te onderscheiden van de altijd aanwezige achtergrondruis; dit wordt in belangrijke mate bepaald door de hoeveelheid röntgenfotonen die in de beelddetector worden geregistreerd. Dit wordt primair met de buisstroom (mA) geregeld.

- **contrast** (kunnen objecten die weinig in grijswaarde verschillen van hun omgeving nog worden onderscheiden). Deze eigenschap wordt vooral bepaald door de ingestelde kV-waarde (de buisspanning). Een hogere buisspanning veroorzaakt een hoger energetisch röntgenspectrum, met meer doordringend vermogen. De relatie tussen fotonenergie en doordringend vermogen is echter niet lineair met de buisspanning en ook per materiaal (zacht weefsel, bot) verschillend. Bijgevolg veranderen de relatieve intensiteiten binnen het projectiebeeld (het stralingscontrast) bij kV-aanpassingen; een hogere kV-waarde geeft een afname van het stralingscontrast.

Bovengenoemde invloeden van instelparameters op de beeldkwaliteit zijn een eerste benadering en geven een idee van wat verwacht kan worden bij het wijzigen van een instelling. In de praktijk gebruikt men meestal gecombineerde parameters zoals contrast-to-noise ratio (CNR) en contrastresolutie. Wanneer de instellingen zodanig worden gekozen, dat bijvoorbeeld kleine contrastverschillen niet zichtbaar zijn, heeft dat ook invloed op de andere beeldkwaliteitsparameters (contrastresolutie). In de testpraktijk worden contrastweergave en signaal-ruisverhouding doorgaans gecombineerd gemeten aan de hand van een testfantoom. Bij een bepaald type toestel en een bepaalde medische procedure zal in de praktijk deels empirisch en deels uit ervaring worden bepaald, wat de meest praktische (werkbare) instelparameters zijn. De relatie tussen (fysische) beeldkwaliteit en instelparameters van het röntgentoestel is complex. Zo is bijvoorbeeld de spectrale energieverdeling van de röntgenbundel vóór (intreepositie) en na (uittreepositie) het "doorkruisen" van de patiënt niet gelijk. Deze is afhankelijk van de instelparameter buisspanning (kV-waarde), gedraagt zich niet-lineair en is op beide genoemde posities ook nog eens verschillend, wat mede afhankelijk is van de patienteigenschappen (van welk deel van het lichaam wordt een afbeelding gemaakt; is het een dikke of dunne patiënt, wordt er contrastmiddel gebruikt?). Ondersteuning van klinisch fysici en/of applicatiespecialisten van de leverancier is bij het adequaat instellen van röntgenapparatuur gewenst. Een goed ("stralingszuinig" met een acceptabele diagnostische beeldkwaliteit) afgeregeld toestel kan een aanzienlijke (en gewenste) collectieve dosisreductie tot resultaat hebben. Voortschrijdende technische ontwikkelingen zoals verbeterde detectorgevoeligheid en nieuwe beeldre-

constructie-algoritmen (“post processing software”) geven bij de nieuwste toestellen die op de markt zijn lagere dosisniveaus. Daarbij sturen de nieuwste belichtingsautomaten niet meer alleen op kV en mA (“constante detector-ingangsdosis”), maar ook op beeldkwaliteitsparameters (SNR, CNR), waarbij bijvoorbeeld rekening wordt gehouden met wel/geen contrastmiddeltoediening en gewenste beeldkwaliteit bij de te verrichten procedure (zoals CAG, EVAR, ERCP).

Het dosistempo (dosis per tijdseenheid) in de patiënt is het hoogste in het gebied waar de straling, na het verlaten van de röntgenbuis, de huid bereikt. Tijdens doorlichting kan het dosistempo variëren van 10 mGy per minuut tot 500 mGy per minuut en incidenteel nog hoger. Bijgevolg kan de geabsorbeerde dosis in de huid na zeer langdurige procedures met een totale doorlichttijd van bijv. 30 minuten oplopen van minimaal 300 mGy tot meer dan 15.000 mGy (15 Gy). Een en ander is sterk afhankelijk van de afstelling en bedieningswijze van de apparatuur. Terwijl een geabsorbeerde dosis van 300 mGy geen direct effect veroorzaakt, zal een huiddosis van 15 Gy vrijwel zeker tot huidschade leiden met een langzaam ontwikkelings- en genezingsproces. Iedereen die een röntgentoestel bedient of daartoe opdracht geeft, moet om deze reden over voldoende kennis beschikken om de dosis voor de patiënt tot een redelijk minimum te beperken.

1.8 Beïnvloeden van de beeldkwaliteit, dosis en dosistempo

Tijdens doorlichten met een gegeven toestel wordt de beeldkwaliteit, het dosistempo, de totale dosis voor de patiënt en de blootstelling van het personeel in hoofdzaak bepaald door tien parameters:

1. De dikte van het doorstraalde gebied
2. De buisstroom (mA)
3. De buisspanning (kV)
4. De focus-huidafstand
5. De afstand tussen de patiënt en de beeldversterker
6. Het gebruik van elektronenoptische vergroting
7. Het gebruik van strooistralenroosters
8. De veldgrootte (diafragmeren)
9. Afscherming en positie t.o.v. patiënt en apparatuur
10. De totale doorlichttijd

Elk van deze factoren wordt verder in deze tekst toegelicht. Samen vormen deze punten tien praktische richtlijnen voor dosisbeperking.

De persoon die het toestel bedient kan alle parameters handmatig instellen, of kiezen voor een automatische belichtingsregeling. Bij **handmatige bediening** kan men alles instellen, behalve de dikte van het doorstraald volume. Deze dikte is afhankelijk van de patiënt en de voor het onderzoek vereiste projectierichting. Bij gebruik van een **automatische belichtingsregeling** stelt het doorlichttoestel de buisspanning (kV) en de buisstroom (mA) zodanig in, dat al kort na het inschakelen van het toestel een acceptabel beeld verschijnt. De wijze waarop kV en mA door de belichtingsautomaat worden ingesteld is afhankelijk van vele factoren, waaronder voorzieningen die de fabrikant heeft aangebracht en selecties op het bedieningspaneel. Bij sommige toestellen kan men het dosistempo op de beeldversterker instellen, en/of het initiële kV kiezen. Tijdens het doorlichten tonen de displays de actuele waarden van kV en mA. Alle overige factoren (4 t/m 10) zijn zowel bij handmatige bediening als bij het gebruik van een belichtingsregeling in te stellen door het bedienend personeel. Het is daarom belangrijk dat degene die het toestel bedient weet hoe een belichtingsregeling geselecteerd wordt, wat een dergelijke regeling inhoudt, en hoe de andere factoren (punt 4 t/m 10) gekozen dienen te worden om de juiste diagnostische beeldkwaliteit met een acceptabel gebruik van straling te verkrijgen.

Bij het maken van diagnostische röntgenopnames zijn de variabele instelparameters van de belichtingsautomaat: **buisstroom (mA)** en **belichtingstijd (seconde)**.

Door middel van de keuze voor het anatomisch af te beelden gebied (“thorax volwassene”) wordt een daarbij passende vaste kV-waarde ingesteld. Omdat de patiëntdosis bij verhoging van zowel buisstroom als belichtingstijd lineair toeneemt, worden deze parameters vaak samengenomen als **mAs-waarde**.

Zowel voor handmatige instelling als voor gebruik met een belichtingsregeling is regelmatige controle en onderhoud van de röntgenapparatuur nodig. Doorgaans worden deze controles als onderdeel van een kwaliteitsborgingsprogramma door daartoe gekwalificeerde medewerkers uitgevoerd.

1.8.1 Dikte van het doorstraalde gebied

Wanneer de röntgenbundel meer weefsel of weefsel met een hogere soortelijke massa moet passeren neemt de absorptie sterk toe, zodat zonder verdere maatregelen een röntgenbeeld met een sterk verminderde intensiteit de beeldversterker bereikt. Om een acceptabele beeldkwaliteit op de monitor te houden is een groter doordringend vermogen van de bundel en/of een hogere opbrengst van het röntgentoestel een vereiste. Voor een acceptabel beeld bij een dikke patiënt is, in vergelijking tot een patiënt met een normaal postuur, bij benadering een tien maal zo hoog dosistempo nodig. Hoe het dosistempo samenhangt met de dikte van het

doorstraalde volume is afhankelijk van de wijze waarop de buisspanning en de buisstroom handmatig of via een belichtingsregeling worden aangepast. Het dosistempo waaraan de specialist en het overige medisch personeel wordt blootgesteld is gerelateerd aan het dosistempo voor de patiënt en neemt ook toe bij patiënten met een groter postuur.

Richtlijn 1

Dosistempi voor de patiënt en medisch personeel nemen toe bij een toenemende dikte van het doorstraalde gebied

1.8.2 De buisstroom (mA)

De opbrengst van de röntgenbuis is recht evenredig met de buisstroom tussen de kathode en de anode, uitgedrukt in milliampère (mA). Het dosistempo op de huid, men spreekt ook wel van het intreedosistempo, neemt bijgevolg proportioneel toe als de buisstroom wordt verhoogd. Wanneer men de buisstroom verdubbelt zal zowel het dosistempo voor de patiënt als het dosistempo waaraan het medisch personeel wordt blootgesteld verdubbelen. In het algemeen moet de keuze van de buisstroom worden afgestemd op de keuze van de buisspanning.

Richtlijn 2

Houd de buisstroom zo laag mogelijk

1.8.3 De buisspanning (kV)

Een verhoging van de buisspanning leidt zowel tot een verhoogde opbrengst van de röntgenbuis als tot een verhoogd doordringend vermogen van de geproduceerde röntgenstraling. In het algemeen wordt bij het doorstralen van grotere structuren een hoger kV gebruikt. De beeldkwaliteit is doorgaans acceptabel terwijl vanwege het verhoogde doordringend vermogen met een lager dosistempo kan worden volstaan. De met een hoger kV gepaard gaande vermindering van de buisstroom reduceert het dosistempo maar heeft geen invloed op het doordringend vermogen van de straling.

Bij handmatige bediening is het gebruikelijk om eerst een lage buisstroom in te stellen, bijvoorbeeld lager dan 1 mA, waarna de buisspanning wordt verhoogd totdat het beeld op de monitor helder genoeg is. Helaas neemt het contrast in het beeld af bij een toenemend kV. Als het ontstane beeld te weinig contrast bevat kunt u het kV met een kleine stap verlagen en de buisstroom verhogen tot het beeld weer helder genoeg is. Deze werkwijze kunt u herhalen totdat een beeld met optimaal contrast

en helderheid is bereikt. Dit gebeurt in de praktijk natuurlijk niet bij elke individuele patiënt, nadat de optimale instellingen met een testfantoom zijn gevonden wordt volgens dit protocol gewerkt. Indien een automatische belichtingsregeling is ingeschakeld kunt u via de displays op het bedieningspaneel waarnemen hoe het toestel het kV instelt. Het initiële kV bijvoorbeeld is van invloed op het regelmechanisme. Een optimale keuze van deze parameter helpt voorkomen dat het dosistempo voor de de patiënt onnodig hoog is. De werking van de belichtingsregeling en aanpassingsmogelijkheden op het bedieningspaneel variëren per fabrikant en toesteltype. Bij de juiste instelling zal de dosis minimaal zijn bij een optimale beeldkwaliteit. Uw vragen over de keuzemogelijkheden op het bedieningspaneel en de werking van de belichtingsregelingen kunt u voorleggen aan de fabrikant (applicatiespecialist), een ervaren radiologisch laborant (“key user”) of een klinisch fysicus. Hoewel de combinatie van hoger kV en lagere mA in principe patiëntdosis verlagend is (vanwege de grotere transmissie door de patiënt), is dit bij de nieuwste doorlichtautomaten niet meer alleen bepalend. Moderne digitale detectoren en de daaraan verbonden beeldreconstructiesoftware sturen naast dosis ook op beeldkwaliteit. Daarin worden zaken meegenomen als: signaal-ruisverhouding, contrast-ruisverhouding en gebruiksomstandigheden (bewegingen in beeld, contrastmiddelgebruik, gekozen anatomisch programma). Daardoor is de relatie tussen patiëntdosis en kV-mA-instellingen complexer geworden.

Richtlijn 3

Houd de buisspanning (kV) zo hoog mogelijk om een compromis te bereiken tussen lage patiëntdoses en acceptabele beeldkwaliteit

1.8.4 De focus-huidafstand

Röntgenstraling ontstaat in een klein gebied in het inwendige van de röntgenbuis (het focus) en breidt zich steeds verder uit naarmate de afstand tot de bron toeneemt. Een analoge situatie, de warmtestraling van een kaarsvlam, kan het principe verduidelijken. De kaarsvlam veroorzaakt op korte afstand een extreem intense hitte, welke een potentieel risico op huidverbrandingen vormt. Bij een toenemende afstand tot de warmtebron wordt al gauw een aanzienlijke reductie van het verbrandingsrisico bereikt. Volgens hetzelfde principe zal bij röntgenstraling de bundelintensiteit afnemen wanneer de focus-huidafstand (FHA) wordt vergroot. **Het dosistempo (bundelintensiteit) op de huid is evenredig met het omgekeerde kwadraat van de focus-huidafstand.** Bij een verdubbeling van de afstand neemt het dosistempo af tot een kwart

van de uitgangswaarde. Deze relatie staat bekend als de **reciproke kwadratenwet** en is van toepassing op o.a. kegelvormige (divergerende) röntgenbundels. Voor de patiënt betekent dit een verminderde kans op huidschade. Bij veel procedures met laterale en schuine projecties (en ook isocentrisch, zoals bij speciale cardiologische en neurologische procedures) beperkt de geometrie van het onderzoek de maximaal in te stellen focus-huidafstand. Bij een verticale projectie (AP of PA) is bijvoorbeeld een grotere focus-huisafstand mogelijk dan bij laterale of schuine projectierichtingen. Laterale projectie gaat in het algemeen gepaard met een hoger dosistempo op de huid van de patiënt. Op röntgenstatieven is soms een voorziening aangebracht die voorkomt dat de buis te dicht op de huid wordt gepositioneerd. Bij sommige conventionele apparaten is de ondertafelbuis gefixeerd zodat de afstand tot de patiënt vastligt. De separator op de röntgenbuis van mobiele en vaste C-bogen is vaak een (plastic) conus, soms worden andere voorzieningen gebruikt. Men kan een dergelijke afstandhouder tijdelijk verwijderen, bijvoorbeeld ten behoeve van chirurgische ingrepen. In dat geval moet men tijdens de procedure zorgen dat de focus-huidafstand voldoende groot blijft.

Richtlijn 4

Houd de afstand tussen röntgenbuis en patiënt zo groot mogelijk

1.8.5 De afstand tussen de patiënt en de beeldopnemer

Uit oogpunt van optimale beeldkwaliteit en lage stralingsdoses dient de beeldopnemer (flat panel, BV) zo dicht mogelijk achter de patiënt geplaatst te zijn. Met de BV op korte afstand van de patiënt zal de anatomie minder vertekenen en minder vervagen. Op korte afstand van de patiënt is de intensiteit van het röntgenbeeld hoger dan op grotere afstand, zodat minder straling nodig is voor een voldoende helder beeld. In conclusie leidt een korte afstand tussen BV en patiënt tot lagere stralingsdoses en dikwijls tot een kwalitatief beter beeld. Tijdens met name chirurgische ingrepen kan de beeldversterker hinder opleveren voor de werkzaamheden. De afstand tussen BV en patiënt wordt in deze gevallen vergroot. Ofschoon dit niet wordt aanbevolen zal soms de afstandhouder van de röntgenbuis tijdelijk worden verwijderd, zodat de bewegingsvrijheid van de C-boog toeneemt. Beide acties kunnen leiden tot een hogere stralingsbelasting voor de patiënt. In deze gevallen moet bijzondere aandacht worden besteed aan alle overige dosisbeperkende maatregelen zoals beperking van de doorlichttijd, beperking van de veldgrootte en verwijdering van het stroostralenooster. Bij sommige neurologische en cardiologische procedures is bewust gekozen voor een grotere afstand

tussen BV en patiënt. De afstandsvergroting in combinatie met een klein focus (van de röntgenbuis) beeldt anatomische structuren geometrisch vergroot af. Bij deze procedures past men vaak isocentrische afbeeldingstechnieken toe, dat wil zeggen dat het doelgebied bij rotatie van de C-boog centraal in beeld blijft. Het betreft hier speciaal voor dit doel ontworpen apparatuur. Indien de omstandigheden aanleiding geven tot een 'air-gap' van meer dan 25 cm tussen patiënt en beeldversterker, dan is het strooistralenrooster doorgaans overbodig. Dit leidt tot een reductie van de patiëntdosis bij vergelijkbare beeldkwaliteit.

Richtlijn 5

Plaats de BV zo dicht mogelijk tegen de patiënt

1.8.6 Elektronenoptische vergroting

Het röntgenbeeld dat op het ingangsscherm van de beeldversterker valt wordt via elektronenoptiek omgezet in een lichtbeeld op het secundaire scherm. Een typische waarde voor de diameter van het ingangs- of primaire scherm is 9 inch (ongeveer 22½ cm). Meer geavanceerde beeldversterkers zijn ontworpen voor meerdere veldgrootten, typische waarden zijn diameters van 4, 6, 9 en 12 inch (overeenkomend met ca. 10, 15, 22½ en 30 cm). Wanneer slechts een deel van het primaire scherm in de röntgenbundel ligt wordt de interne elektronenoptiek zodanig aangepast dat desondanks het volledige secundaire scherm wordt benut. Dit noemt men elektronenoptische vergroting. Bij de meeste doorlichtapparaten wordt de diafragma-opening van de röntgenbuis automatisch aangepast, dit voorkomt dat de patiënt straling ontvangt die niet voor beeldvorming zal worden benut. Des te kleiner de veldgrootte op de beeldversterker, des te meer het beeld wordt uitvergroot. In de praktijk gebruikt men de vergrotingsoptie om de effectiviteit van de waarnemingen voor diagnostiek of interventie te verhogen. Daar bij elektronenoptische vergroting een kleiner deel van het primaire scherm wordt benut zal de lichtsterkte op het secundaire scherm evenredig afnemen. Hiervoor wordt in de praktijk automatisch gecompenseerd door het verhogen van de buisstroom. Het röntgenveld wordt bij elektronenoptische vergroting weliswaar kleiner maar de geabsorbeerde dosis in dit kleinere veld neemt daarbij toe. Maak alleen gebruik van de optie "vergroten" indien dit noodzakelijk is voor de beeldkwaliteit (hogere resolutie). Hoewel het voor de effectieve patiëntdosis dus niet zoveel uitmaakt, zal de intreehuidsdosis toenemen wanneer de vergrotingsoptie wordt ingeschakeld. Het intreeveld wordt kleiner, maar het dosistempo in de bundel neemt toe.

Richtlijn 6

Voorkom overbodig gebruik van elektronenoptische vergroting

1.8.7 Stroomstralingsrooster

Een stroomstralingsrooster is een vierkante plaat van enkele millimeters dik die is opgebouwd uit evenwijdige of gefocusseerde loodlamellen.



Figuur 4: Doorsnede van een (gefocusseerd) stroomstralingsrooster

Een voor de beeldversterker geplaatst rooster werkt als selectief filter voor stroomstraling uit de patiënt, waardoor het contrast in het beeld verbetert. Men spreekt van een stroomstralingsrooster. Tegenover de contrastverbetering staat een verhoogde patiëntdosis, want de filtratie van straling moet door het verhogen van de buisstroom (mA) worden gecompenseerd. De dosisstoename is aanvaardbaar indien de procedure beelden met een verhoogd contrast verlangt. Sommige apparaten hebben een voorziening om het rooster automatisch in te trekken, bij andere apparaten zoals C-bogen kan het rooster soms (niet altijd) handmatig of met hulp van gereedschap worden verwijderd²¹. Indien het rooster is verwijderd kan een dosisreductie met een factor 2 of meer worden bereikt. In het algemeen is een rooster niet nodig:

- bij afbeelding van baby's/kleine kinderen
- bij afbeelding van extremiteiten
- indien de beeldversterker op een grotere afstand dan 25 cm van de patiënt is geplaatst

Richtlijn 7

Verwijder het rooster bij afbeelding van kinderen en extremiteiten en indien de beeldversterker niet nabij de patiënt kan worden geplaatst

²¹ Voorkom beschadigingen bij het handmatig verwijderen van roosters. Deze kunnen de effectiviteit aantasten, vervanging is kostbaar.

1.8.8 Veldgrootte (diafragmeren)

Twee paar collimatoren blokkeren de uittredende röntgenstraling en laten een stralingsbundel met een rechthoekige doorsnede door, op sommige toestellen worden ronde irisdiafragma's toegepast. De veldgrootte op de huid van de patiënt wordt bepaald door de diafragma-opening in combinatie met de focus-huidafstand. De rand van een collimator is op de monitor als een halfschaduw waarneembaar. Om de afmetingen van het röntgenveld aan te passen kunt u het diafragma handmatig verstellen, op sommige statieven kan dit elektrisch worden bediend. Het gaat om de lengte en breedte van het veld (de X- en Y-richting), die onafhankelijk van elkaar in te stellen zijn. Een grotere diafragma-opening betekent een groter beeldvlak op de monitor en voor de patiënt een groter gebied dat aan röntgenstraling wordt blootgesteld. Open het diafragma nooit verder dan de afmetingen van de beeldversterker toelaten. Alle straling die buiten het primaire scherm terechtkomt is de patiënt gepasseerd, maar wordt niet afgebeeld. Door de veldgrootte te verkleinen verbetert de beeldkwaliteit en wordt een belangrijke reductie in de blootstelling van de patiënt en medisch personeel bereikt. Men spreekt in de praktijk van zorgvuldig **diafragmeren**. Het stroostralingsniveau dat in de patiënt wordt gegenereerd hangt samen met de grootte van het blootgestelde gebied. Bij een kleiner veld ontstaat minder strooistraling en daardoor zal de ook beeldkwaliteit verbeteren. Verstrooide straling uit de patiënt is ook van invloed op de blootstelling van het medisch personeel. Het dosistempo ten gevolge van opgewekte strooistraling hangt direct samen met het volume van het blootgestelde weefsel. Wanneer het veld met een factor twee (in beide richtingen) wordt vergroot, neemt het verstrooiend volume van het blootgestelde weefsel met een factor vier toe. Dientengevolge zal het dosistempo voor het medisch personeel ook met een factor vier toenemen. Een vuistregel – met meestal zeer ruime veiligheidsmarge – is: per vierkante meter (m^2) veldgrootte geldt voor alle verstrooiingshoeken, dat er op 1 meter afstand van het verstrooiende oppervlak minder dan 10% wordt gemeten van het dosistempo ter plekke van het centrum van het verstrooiende oppervlak. Deze vuistregel geldt voor diagnostische röntgenstraling en diverse soorten verstrooiende oppervlakken (weefsel, water, beton). Voor niet al te korte afstanden tot het verstrooiende oppervlak kan de omgekeerde kwadratenwet worden toegepast vanuit die waarde van 10% op 1 meter van het verstrooiend oppervlak. Aanzienlijke dosisreductie voor het medisch personeel wordt bereikt door het stralingsveld zo klein te maken dat alleen de relevante structuren op de monitor te zien zijn.

Richtlijn 8

Gebruik een zo klein mogelijk röntgenveld (zorgvuldig diafragmeren)

1.8.9 Afscherming en positie ten opzichte van patiënt en apparaat

De röntgenbuis is de stralingsbron voor de patiënt en de patiënt vormt een bron van strooistraling voor het medisch personeel. Het belangrijkste middel tot dosisreductie voor het medisch personeel is het gebruik van afschermingsmiddelen en een juiste positionering ten opzichte van de patiënt en de apparatuur. Alle aanwezigen moeten tijdens het doorlichten een loodschort dragen, tenzij ze zich achter een afschermingswand bevinden. De meeste strooistraling vanuit de patiënt is “terug richting röntgenbuis”. Parallel aan de tafelrand waarop de patiënt ligt, gerekend vanaf het midden van de primaire bundel tot een afstand van 1 m naar rechts (nog steeds evenwijdig aan de tafelrand) varieert het dosistempo (PA-projectie, thorax, patiënt ligt op de rug) van 300 tot 15 microgray/minuut²². In dezelfde geometrie zijn de dosistempi loodrecht hierop, dus vanuit het midden van de beeldversterker naar achteren gaande tot 1,5 m afstand (van de patiënt af bewegend) 600 tot 10 $\mu\text{Gy}/\text{min}$. Bij een rechts-anterieuere schuine projectie zijn de dosistempi vanaf de tafel tot op 1,2 m afstand: 200-10 $\mu\text{Gy}/\text{min}$. Bij het doorlichten van dunnere objecten zoals hand of pols, zullen de strooistralingsniveaus lager liggen.

Richtlijn 9

Medisch personeel moet loodschorten dragen of achter een afscherming werken en letten op de meest gunstige positie ten opzichte van de stralingsbron

1.8.10 De totale doorlichttijd

De controle over de doorlichttijd is het meest belangrijke aspect van dosisbeperking voor zowel patiënt als werker. Zowel voetpedaalbediening als een in de hand te houden bedieningsknop worden hiervoor gebruikt. Een vuistregel is, dat wanneer niet naar de monitor wordt gekeken, doorlichten geen zin heeft. Voor een meer uitgebreide beoordeling van beelden kan beter een opgeslagen beeld worden gebruikt (Last Image Hold). In dit kader is ook het kiezen van een zo laag mogelijke frame rate (beelden per seconde) van belang. Verder blijkt uit onderzoek, dat ervaren artsen doorgaans minder doorlichttijd nodig hebben dan beginnende assistenten. Echter tussen ervaren artsen onderling zijn ook aanzienlijke individuele verschillen in doorlichttijd geconstateerd, los van de eventuele complexiteit van een procedure en de praktijkvariatie tussen ziekenhuizen.

²² British J. Rad. (2003), 76, 321-327

Richtlijn 10

Beperk de doorlichttijd tot het absolute minimum

1.9 *Afscherming van ruimten*

(S. van Dullemen o.b.v. een presentatie van W. Veldkamp)

Zoals eerder aangegeven mogen medewerkers, bezoekers en patiënten per jaar hooguit aan 1 mSv worden blootgesteld in de algemeen toegankelijke ruimtes van een ziekenhuis, zoals gangen, patiëntenkamers en werkplekken. Daarom is het veelal noodzakelijk dat er in ruimtes waar met röntgentoestellen of radioactieve bronnen wordt gewerkt - zoals röntgenkamers en OK's - in de wanden afschermingsmateriaal wordt aangebracht. Betonnen vloeren/plafonds in de meeste ziekenhuisgebouwen zijn op zich al dik genoeg; de doorgaans gipsen wanden laten te veel straling door. Wanneer (tijdelijke) noodgebouwen worden betrokken met houten vloeren/plafonds, dan moet ook worden uitgerekend of daarin extra afscherming moet worden aangebracht.

Rekening houdend met het ALARA-principe en met in de tijd gezien variabele zaken zoals eventueel toenemende gemiddelde wekelijkse werkbelasting²³ van het röntgentoestel vanwege het in gebruik nemen van nieuwe apparatuur, door nieuwe procedures in te voeren, meer patiënten per dag te behandelen enzovoort, wordt de afscherming berekend op bijvoorbeeld 0,3 mSv per jaar, zodat er enige toekomstige speelruimte voor genoemde wijzigingen over blijft.

Voor het gebruik van C-bogen en andere röntgenopstellingen volstaat in de praktijk meestal 2 mm lood als in de wand aangebrachte extra afscherming. Uiteraard moet dit per situatie worden bekeken en berekend. Van belang hierbij zijn zaken als: afstand van de bron tot de muur, gebruikte buisspanning, wanddikte en -materiaal exclusief lood, verstrooiingshoek, soort toestel. Bedenk, dat het bij C-bogen niet om de afscherming van de primaire bundel gaat – die wordt immers vrijwel geheel geabsorbeerd in de beelddetector – maar om de in de patiënt ontstane stroostraling.

Bij het achteraf aanbrengen van zaken aan afschermende wanden (bijvoorbeeld gaten boren) of bij kleine verbouwingen moet de integriteit van de afscherming worden gewaarborgd. Ook relevant is het wijzigen van de gebruiksfunctie van omliggende ruimtes, gangen, etc. Bij het berekenen van de vereiste afschermingsdikte geldt voor een gang (waar al-

²³ In mA·min/week

leen passanten kortdurend kunnen worden blootgesteld), dat een hogere stralingsdosis per week is toegestaan dan voor een naastgelegen werkkamer (waar in principe gedurende 8 uren/dag ofwel 2000 uren per jaar blootstelling kan plaatsvinden).

1.10 *Risico's en normstelling*

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd, dat 1) elke dosis ioniserende straling schadelijk is, omdat het de kans om kanker te krijgen vergroot (stochastisch effect) en 2) vanaf een bepaalde drempeldoses, afhankelijk van het beschouwde effect, weefselreacties ontstaan (zoals cataract in de ooglen en huidschade). Bij het merendeel van de radiodiagnostische toepassingen en in de stralingsbescherming van radiologisch werkers en leden van de bevolking spelen weefselreacties vrijwel geen rol, gezien de hoogte van de ontvangen stralingsdoses bij reguliere stralingstoepassingen. Daarom wordt in dit hoofdstuk over risico's en normstelling voornamelijk gekeken naar de stochastische effecten. De meest geschikte maat om stochastische stralingsrisico's in uit te drukken is de grootheid effectieve dosis. Hiermee kunnen onderling verschillende bestralingssituaties (bijvoorbeeld partiële bestralingen, zoals een thoraxopname versus een opname van de extremiteiten) qua risico toch met elkaar worden vergeleken. De vooral vanuit epidemiologisch onderzoek verkregen risicogetallen voor het optreden van fatale tumoren zijn weliswaar behept met (statistische) onzekerheden, maar bieden toch een basis om normen op te stellen. Daarnaast moet rekening worden gehouden met maatschappelijke aanvaardbaarheid. Uiteindelijk worden stralingsnormen door de overheid (politiek) bepaald, mede gebaseerd op wetenschappelijke informatie.

1.10.1 Risicobeperking

Om de hiervoor aangeduide gezondheidsrisico's van ioniserende straling in de praktijk te kunnen hanteren, heeft de ICRP in 1977 het drietrapsysteem geïntroduceerd van 1) rechtvaardiging, 2) ALARA en 3) dosislimieten. Achtereenvolgende toepassing van deze punten voorkomt dat er weefselreacties kunnen optreden en het beperkt de stochastische effecten tot aanvaardbare niveaus.

In de praktijk blijkt dit door de ICRP voorgestelde systeem door de jaren heen effectief te zijn geweest en is later eveneens toegepast voor het beperken en beheersen van risico's van andere agentia. Hieronder worden de elementen uit het drietrapsysteem beknopt toegelicht. Tevens wordt aangegeven, hoe de praktische uitwerking zou moeten zijn volgens de EU-richtlijn. **Rechtvaardiging** (justificatie of indicatiestelling) van een stralingstoepassing geschiedt doorgaans op macroniveau door de over-

heid, welke al dan niet een vergunning verleent. De voor- en nadelen van de stralingstoepassing moeten zijn afgewogen. Op microniveau is het bij medische stralingsblootstelling telkens opnieuw een afweging, of voor de betrokken patiënt een bepaald onderzoek gerechtvaardigd is. In de EU-richtlijn wordt verder aangegeven²⁴, dat zowel de verwijzende arts als de arts die verantwoordelijk is voor de blootstelling onnodige onderzoeken dienen te voorkomen. Blootstelling in verband met biomedisch en medisch-klinisch onderzoek moet worden beoordeeld door een medisch-ethische commissie en er moet aan bepaalde criteria worden voldaan (artikel 4). Voorts moet speciale aandacht worden geschonken aan de rechtvaardiging van medische blootstelling die geen direct nut heeft voor de betrokkene en dan met name blootstelling op medisch-juridische gronden.

ALARA (optimalisering) is een acronym: ‘as low as reasonably achievable’. Rekening houdend met sociale en economische factoren, moet de stralingsdosis zo laag als redelijkerwijs mogelijk is worden gehouden. Dit is een belangrijke taak voor de uitvoerend specialist en de MBB’ers (radiologisch laboranten). De EU-richtlijn schrijft voor, dat er eisen aan (het gebruik van) röntgenapparatuur moeten worden gesteld, zoals acceptatietests en het periodiek uitvoeren van kwaliteitscontrole en -borging, alsmede beoordeling en evaluatie van patiëntdoses.

De **dosislimieten** zijn bedoeld om individuen te garanderen, dat een bovengrens wordt gesteld aan de kans op individuele gezondheidsschade. Voor de stochastische dosislimieten geldt derhalve, dat het geen waarde betreft, waaronder geen effect op kan treden. Ook wanneer een eventueel iets boven de limiet gelegen dosis wordt ontvangen, zal er geen direct biologisch effect waarneembaar zijn.

In de EU-richtlijn (zie ook bijlage 2) worden verder aspecten genoemd als: zowel de verwijzende arts als de uitvoerend specialist (radioloog) wordt op het passende niveau bij de rechtvaardigingsprocedure betrokken (artikel 5, lid 1). Elke medische blootstelling moet plaatsvinden onder klinische verantwoordelijkheid van een arts (artikel 5, lid 2). Voorts: de verwijzende persoon (arts) die een medische blootstelling voorschrijft, moet de beschikking krijgen over aanbevelingen betreffende verwijzingscriteria voor medische blootstellingen, stralingsdoses daaronder begrepen (artikel 6, lid 2). In artikel 7, lid 4: de lidstaten stimuleren dat in de basisopleiding van artsen en tandheekundigen een cursus stralingsbescherming wordt opgenomen. In een in 1996 verschenen Gezondheidsraadrapport betreffende deskundigheids-eisen voor medische stralingstoepassingen worden gewenste opleidingseisen voor artsen nader omschreven; naar verwachting zullen nieuw opgestelde eindtermen voor de cur-

²⁴Richtlijn 2013/59/Euratom van de Raad van 5 december 2013. Artikel 57, lid 1, onder c (zie bijlage 7.2)

sus stralingshygiëne voor medisch specialisten in de loop van 2016 van kracht worden.

De hierboven geschetste drietrapsystematiek is niet in alle situaties toepasbaar. Er wordt immers uitgegaan van beïnvloedbaarheid van de stralingsbron en de reguleerbaarheid van de blootstellingscondities. In de volgende tabel is een indeling in verschillende categorieën stralingsblootstelling gemaakt. Hieruit valt af te leiden, dat bijvoorbeeld de natuurlijke achtergrondstraling niet of nauwelijks reguleerbaar is. Voor medische toepassingen kunnen geen individuele dosislimieten gelden, omdat noodzakelijk medisch onderzoek zou kunnen worden belemmerd. Radiotherapie zou zelfs onmogelijk zijn. Het ontbreken van deze randvoorwaarde van dosislimieten versterkt de noodzaak van rechtvaardiging en optimalisatie.

TABEL: Indeling van stralingsblootstelling naar aard en keuzemogelijkheid.

aard van de blootstelling	voor individu een afgewogen keuze	blootgestelde heeft geen keuze
opzettelijk	<i>patiënten:</i> medische diagnostiek en therapie	<i>bevolking:</i> nucleaire wapens
onopzettelijk	<i>radiologisch werkers:</i> beroepshalve <i>bevolking:</i> technologisch: vliegen, wintersport	<i>bevolking:</i> natuurlijke achtergrondstraling <i>embryo en foetus:</i> medisch handelen / beroepshalve bij zwangere vrouw <i>radiologisch werkers, bevolking:</i> ongevallen, rampen

De in de tabel weergegeven indeling geeft ook de aandachtsgebieden van de verschillende Ministeries aan, die elk verantwoordelijk zijn voor een deel van ioniserende stralingstoepassingen. Uiteraard is het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS) betrokken bij medische stralingstoepassingen; de bescherming van werknemers valt onder het Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid (SZW) en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) tenslotte is betrokken bij enerzijds de bescherming van de bevolking tegen extra blootstelling aan straling door eisen te stellen aan instellingen die verhoogde stralingsniveaus in 'openbaar gebied' veroorzaken (vergunningseis van maximaal toegestane terreingrensdoses) en anderzijds bij de organisatie van stralingsbescherming in ongevals- en rampsituaties, zoals vervat in het Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten²⁵. Het Zelfstandig Bestuursorgaan (ZBO) Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS)²⁶ heeft sinds 2015 belangrijke taken overgenomen van Ministeries en heeft een regisserende en toezichhoudende rol in Nederland.

De indeling uit de tabel ligt niet alleen ten grondslag aan het naast elkaar bestaan van verschillende dosislimieten (of het ontbreken daarvan) voor de onderscheiden categorieën, maar schept ook een kader voor risico-vergelijking. Het vergelijken van bijvoorbeeld de dosis ten gevolge van een röntgenopname met de extra stralingsdosis die iemand ontvangt door een retourvlucht Amsterdam-New York of met de natuurlijke

²⁵ Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten. Inspectie Leefomgeving en Transport. Ministerie van Economische Zaken. Oktober 2014.

²⁶ <https://www.autoriteitnvs.nl/anvs/kerntaken>

achtergrondstraling kan averechts werken, omdat er dan appels met peren worden vergeleken.

Een voorbeeld van een voor een specifieke blootstellingscategorie bedoelde norm is een interventieniveau zoals bepaald voor het besluit tot evacuatie van de bevolking binnen de eerste 24 uur uit een bepaald gebied. Dit interventieniveau is gebaseerd op een te ontvangen effectieve dosis van 200 mSv^{27 28} door een niet-schuilende volwassene, hetgeen in reguliere situaties een hoge grenswaarde zou zijn. De essentie ligt ook hier weer in de afweging (rechtvaardiging) van kosten en baten: de kosten zijn bijvoorbeeld de met evacuatie gepaard gaande risico's (verkeersongelukken, paniek onder de bevolking, ontwrichting van de samenleving) en de baten zijn een reductie in stralingsdosis en het voorkomen van weefselreacties. Daarnaast staat in artikel 7.37 van het Bbs, dat in radiologische noodsituaties hulpverleners bij levensreddende werkzaamheden tot 500 mSv aan effectieve dosis zouden mogen ontvangen (na informed consent, "vrijwillig"); voor het veiligstellen van uitermate belangrijke materiële belangen en voor hulp bij het uitdelen van jodiumprofylaxe, het uitvoeren van evacuaties en het handhaven van de openbare orde en veiligheid zijn de dosisreferentieniveaus respectievelijk 250 mSv en 100 mSv. Overigens zijn de geschatte blootstellingsniveaus voor medische hulpverleners (SEH) bij de voorziene scenario's van terroristische aanslagen met "vuile bommen" niet veel afwijkend van die waaraan artsen in ziekenhuizen al kunnen worden blootgesteld bij bijvoorbeeld interventieprocedures²⁹. Van het verlenen van spoedeisende hulp aan (mogelijk) radioactief besmette slachtoffers moet daarom **niet** worden afgezien vanwege de stralingsrisico's voor de arts en omloop. Na de eerste acute behandeling van de radioactief inwendig besmette patiënt is het raadzaam om met het NVIC contact op te nemen voor advies over het eventueel toedienen van antidota om het opgenomen radionuclide versneld uit het lichaam van de patiënt te verwijderen³⁰. Bij de gebruikelijke werkwijzen (handschoenen, witte jas, eventueel gebruik van een mondneusmasker³¹) bij mogelijk vrijkomend stof, is het risico op inwendige besmetting van de hulpverlener zeer gering.

²⁷ Risicoschatting en –management bij radiologische en nucleaire incidenten, dr R.C.G.M. Smetsers, Hoofd Laboratorium voor Stralingsonderzoek, RIVM, 11 maart 2011.

²⁸ Er ligt een voorstel tot verlaging tot 100 mSv.

²⁹ RIVM-rapport 660003004/2010. R. de Groot, G.A. van Zoelen, A.J.H.P. van Riel, M.E.C. Leenders. Triage en eerste opvang van slachtoffers na radiologische incidenten.

³⁰ Ronald de Groot, Marianne Leenders, Jan Meulenbelt, Kees van der Zwan. Radioactieve besmetting: stel dát. Medisch Contact, jaargang 69, 3 april 2014, pp. 701-703.

³¹ Bijvoorbeeld een FFP2-masker of een chirurgisch mondneusmasker type IIR.

Bij reguliere radiologische procedures geldt, dat naast beheersing van de individuele stralingsdoses voor patiënten, door het radiologisch onderzoek technisch goed uit te voeren, de beperking van de collectieve effectieve dosis van belang is. Immers de totale bevolkingsdosis wordt niet alleen bepaald door de waarde van de individuele patiëntdosis, maar ook door het totale aantal verrichtingen. Nadruk op rechtvaardiging door zorgvuldige indicatiestelling, juiste afstelling van apparatuur en het vermijden van onnodige duplicaties zijn daarom van belang.

1.10.2 Normstelling

Op grond van de vastgestelde risicogetallen en afwegingen over de maatschappelijke aanvaardbaarheid van de gevolgen heeft de ICRP aanbevelingen gedaan voor dosislimieten. Deze dosislimieten zijn bedoeld om de onbedoelde blootstelling van leden van de bevolking en blootgestelde werkers te beperken. De stralingsbelasting ten gevolge van natuurlijke straling (onvermijdbaar) en medische toepassingen (op indicatie) wordt hierbij buiten beschouwing gelaten. Deze aanbevolen waarden worden via EU-Richtlijnen in de nationale wetgeving (Kernenergiewet) opgenomen.

Dosislimieten (per kalenderjaar, Bbs, artikel 7.34)		
	Blootgestelde werker	Lid bevolking
Effectieve dosis	20 mSv	1 mSv
Equivalentente dosis in:		
Ooglenzen	20 mSv	15 mSv
Huid	500 mSv	50 mSv
Handen en voeten	500 mSv	-

Hierop aanvullend geldt voor de ongeboren vrucht van een blootgestelde werker een equivalentente dosis van 1 mSv vanaf het moment van melding van de zwangerschap aan de ondernemer tot aan het einde van de zwangerschap (Bbs, artikel 7.36).

In Nederland is de Kernenergiewet de raamwet, waarin alle wettelijke bepalingen die verband houden met ioniserende stralingstoepassingen, ook de medische toepassingen, zijn samengebracht. In het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming worden vele praktische zaken wettelijk geregeld, zoals vergunningplicht, dosislimieten, deskundigheidseisen voor personen die werken met ioniserende straling, eisen ten aanzien van röntgenapparatuur en de onderzoekkamers (afscherming), toezicht, persoonsdosimetrie en opleidingseisen voor erkende opleidingen voor stralingsdeskundigheid.

De ICRP stelt ten aanzien van de bevolking, dat geen enkele leeftijdscategorie een extra sterfterisico van meer dan 1% mag lopen ten gevolge van levenslange, continue en reguliere blootstelling aan straling. Op grond van statistieken blijkt het jaarlijks sterfterisico van 15-jarige meisjes het laagst in Nederland, namelijk 1:10.000. Voor acute sterfte door bijvoorbeeld een ongeval is het toegestane extra risico voor deze groep dan 1:1.000.000. Vanwege de latente periode bij tumorinductie door straling en het met de leeftijd toenemende risico op kanker, wordt het extra toegestane risico van 1% bij continue, reguliere blootstellingen pas bereikt bij de leeftijdsgroep van 34- tot 42-jarigen. Dit extra risico van 1% blijkt te worden veroorzaakt door een stralingsdosis van circa 1 mSv per jaar. Dit is de basis voor de dosislimiet voor de bevolking.

De aanbevolen jaardosislimiet voor blootgestelde werkers (radiologisch werkers) is een factor 20 hoger dan de limiet voor leden van de bevolking. Onder andere omdat blootgestelde werkers persoonlijk voordeel genieten van hun beroep, wordt geaccepteerd dat zij een verhoogd risico lopen. Het beroepsrisico dat zij aanvaarden is, indien hun beroepsmatige blootstelling jaarlijks 20 mSv zou bedragen, gemiddeld over de jaren op het niveau van 1:1000 per jaar. Dit risiconiveau wordt voor normale, 'veilige' arbeidssituaties 'net acceptabel' gevonden. Afhankelijk van het gehanteerde risicomodel wordt bij jaarlijkse blootstelling aan een effectieve dosis van 20 mSv het risico van 1:1000 pas bereikt rond de leeftijd van 65 jaar. In de praktijk ligt de jaarlijkse blootstelling van blootgestelde werkers in Nederland op een veel lager niveau en derhalve is het beroepsrisico bij bijvoorbeeld een jaarlijkse effectieve dosis van 2 mSv een factor tien lager.

1.10.3 Controle op naleving van de dosislimieten

Het vaststellen of een blootgestelde werker (radiologisch werker) voldoet aan de gestelde effectieve dosislimiet van 20 mSv per jaar gebeurt met een TLD-persoonsdosismeter van een door de overheid erkende dosimetrische dienstverlener. Er zijn verschillende types persoonsdosismeter, al naar gelang de stralingssoort waaraan de werknemer zal worden blootgesteld. De detectielimiet van dergelijke TLD-persoonsdosimeters bedraagt circa 0,035 mSv (inclusief variaties in de natuurlijke achtergrond). Het merendeel (95%) van de ruim 50.000 geregistreerde blootgestelde werkers, waarvan het grootste deel werkzaam is in de gezondheidszorg en de luchtvaart, ontvangt op jaarbasis doorgaans een geregistreerde dosis van minder dan 2 mSv, gemiddeld 0,5 mSv. Slechts die artsen, die frequent interventieprocedures uitvoeren, zoals sommige interventieradiologen en cardiologen, ontvangen op jaarbasis een aanzienlijk hogere effectieve dosis. Blootgestelde werkers die meer dan 6 mSv per jaar kunnen ontvangen (blijkend uit een risicoanalyse) worden ingedeeld als cate-

gorie-A-werker; indien de ingeschatte blootstelling per jaar tussen 1 en 6 mSv ligt, wordt men ingedeeld als B-werker. Een blootgestelde werker (radiologisch werker) categorie A wordt bij indiensttreding medisch gekeurd en wordt in principe jaarlijks medisch onderzocht. Dit onderzoek wordt verricht door een erkend **stralingsarts**, d.i. een bedrijfsarts met het stralingsbeschermingsdeskundigheidsdiploma van coördinerend deskundige (voorheen deskundigheidsniveau 3), die als zodanig is erkend en opgenomen in een register.

Om na te gaan, of een Nederlandse burger niet meer dan de toegestane extra stralingsdosis van 1 mSv ontvangt (dus bovenop de natuurlijke achtergrondstraling en de eventuele medische blootstellingen) is niet eenvoudig. De Nederlandse overheid hanteert in dit verband een brongericht beleid. Dit houdt in, dat een instelling of bedrijf voor maximaal 0,1 mSv per jaar mag bijdragen aan de dosis van een willekeurige Nederlander die aan de terreingrens verblijft. Ter invulling van het ALARA-principe wordt in de aan de instelling verstrekte vergunning doorgaans de lagere waarde van 0,01 mSv (10 microsievert) voorgeschreven. Hierbij geldt voor bijvoorbeeld een ziekenhuis, dat alle stralingsbronnen binnen de terreingrens, van röntgentoestel, nucleair-geneeskundige afdeling, jodiumtherapiekamer tot en met de bestralingsbunker van de radiotherapie-afdeling bij elkaar genomen dienen te worden. De overheid gaat ervan uit, dat een gemiddelde Nederlander maximaal aan tien bronnen tegelijk kan worden blootgesteld, wat in dat geval een maximale extra dosisbijdrage van 1 mSv kan geven, zijnde de dosislimiet voor een lid van de bevolking.

1.10.4 Regelgeving voor ziekenhuizen

Alle ziekenhuisdirecties/Raden van Bestuur (in de termen van de Kernenergiewet “ondernemer” genoemd) hebben voor hun stralingstoepassingen (Radiologie of meer) op basis van de Kernenergiewet (Kew) een vergunning moeten aanvragen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen een complexvergunning (biedt meer flexibiliteit, maar vereist een eigen Stralingsbeschermingseenheid die onafhankelijk toezicht houdt) of een verzamelvergunning. Alle UMC's hebben een complexvergunning. In minder risicovolle situaties, zoals in een zelfstandige tandartspraktijk geldt een registratieplicht, tenzij het om CT-conebeam-apparatuur gaat, dan is weer een vergunning nodig. Vergunningen omvatten doorgaans meerdere pagina's met voorschriften, waar de Raad van Bestuur aan is gehouden. Zonder actuele vergunning mag niet met ioniserende straling worden gewerkt, zelfs het in bezit (“voorhanden”) hebben van een röntgentoestel is niet zomaar toegestaan. Overtreding van vergunningvoorschriften of van bepalingen uit het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming kan hoge boetes of zelfs gevangenisstraf tot gevolg

hebben. In het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming³² staan met name in Hoofdstuk 8 de voor de medische toepassingen relevante artikelen.

In de publiek toegankelijke ruimtes in een ziekenhuis mag niet meer dan 1 mSv per jaar kunnen worden ontvangen. In de zogenoemde bewaakte en gecontroleerde zones mag dat hoger zijn. Een röntgenkamer is doorgaans als bewaakte zone geclassificeerd; dit moet aan de buitenzijde worden aangeduid op de voorgeschreven wijze. Op een afdeling waar met ioniserende straling wordt gewerkt, is een lokale toezichthoudend medewerker stralingsbescherming benoemd, daarnaast zijn er meestal overkoepelende toezichthouders zoals de (algemeen) coördinerend stralingsbeschermingsdeskundige. Deze toezichthouders zorgen o.a. voor voorlichting en instructie, persoonsdosimetrie, indeling van werkers, risicoanalyses et cetera). Er moet een klinisch fysicus beschikbaar zijn voor o.a. kwaliteitsbewaking en optimalisatie van de apparatuur, het bepalen van de juiste apparatuurstellingen bij specifieke procedures, patiëntendosimetrie et cetera. Volgens het zogenoemde GHI-bulletin (Ministerie van VWS, Inspectie IGJ) moeten afdelingen een Stralingshygiënecommissie instellen, waarin vertegenwoordigers van alle betrokken beroepsgroepen (artsen, MBB'ers, verpleegkundigen, toezichthouder, klinisch fysicus) participeren.

1.10.5 Kwaliteitsbewaking

Net zoals bij andere medische hulpmiddelen en apparatuur het geval is, draagt de medisch specialist een bepaalde verantwoordelijkheid voor de goede werking van röntgenapparatuur. Het op geleide van een doorlichtbeeld verrichten van medische handelingen houdt impliciet in, dat er op de diagnostische waarde van het monitorbeeld wordt vertrouwd. Die waarde hangt niet alleen af van de door of in opdracht van de medisch specialist bepaalde instellingen (zoals af te beelden gebied, projectiestand, kV, vergroten, diafragmeren etc.), maar ook van de juiste afregeling van bijvoorbeeld de belichtingsautomaat, de correcte weergave van grijswaarden op de monitor, de beeldbewerkingssoftware etc. Het is daarom van belang goed samen te werken en te communiceren met MBB'ers, klinisch fysici of ziekenhuis(leveranciers)technici. Kennis van de organisatie en resultaten van de kwaliteitsbewaking van de röntgenapparatuur lijkt daarbij essentieel om op de doorlichtbeelden te kunnen vertrouwen. Ook al is er een goed onderhoudscontract, het ziekenhuis blijft verantwoordelijk voor controle en beoordeling van de apparatuur. Een klinisch fysicus is de spil als het om kwaliteitsbewaking en acceptatie gaat, maar

³² zie <http://wetten.overheid.nl>

de medisch specialist is gedurende de doorlichtprocedure ook deels verantwoordelijk voor (het juiste gebruik van) de techniek³³. De geschiktheid en juiste afregeling van monitoren (beeldstations) waarop radiologische beelden worden beoordeeld is van groot belang; ook de uniformering tussen beeldstations onderling en op afdelingen buiten radiologie. Het betreft aspecten als helderheid van het beeld en de aanwezigheid en juiste werking van geschikte software om alle grijswaarden goed weer te geven. Goed ingestelde monitoren voorkomen ook vermoeidheid bij de beoordelaars die veel (en wisselende) beelden achter elkaar bekijken. Het is in de praktijk wel eens in een ziekenhuis voorgekomen, dat door ongeschikte monitoren bij de afdeling longziekten de longartsen op de thoraxopnames onverklaarbare afwijkingen zagen (die artefacten bleken te zijn), waardoor zij relatief vaak als vervolg CT-thoraxopnames aanvroegen.

1.10.6 Risico's en perceptie

Straling is voor een leek een veel ruimer begrip dan voor een deskundige. Dat straling 'iets op afstand doet' accepteren beiden, een leek haalt soms allerlei vormen van straling door elkaar, variërend van licht, geluid, elektromagnetische straling, 'radioactieve straling', straling van hoogspanningsleidingen tot aan begrippen uit de paranormale of alternatieve sfeer zoals aura's en aardstraling. De term 'straling' kan bij mensen mogelijk in het onderbewuste aanwezige psychologische associaties oproepen van 'geheimzinnige dodende stralen', zoals die in films en stripverhalen voorkomen (zie Van den Berg³⁴). Zogenoemde "framing" door het gebruik van suggestieve termen als "elektrosmog" bevordert angst voor straling. Het begrip 'risico' kan verschillende betekenissen hebben. Ten eerste als de mogelijkheid van optreden van een bepaald nadelig effect. Ten tweede als het product van de kans op een effect en de ernst ervan. Tenslotte op meer beschrijvende wijze: "zij neemt geen risico". Daarnaast zijn meer uitgebreide studies verricht naar hoe mensen het begrip risico hanteren (zie Vlek, 1996). Hieruit blijkt, dat het begrip risico veel meer dimensies omvat.

Deze dimensies hebben te maken met zaken zoals:

- de mogelijke ernst van de schade,
- de geografische omvang,

³³ Zie ook: Veilig gebruik van medische technologie krijgt onvoldoende bestuurlijke aandacht in de ziekenhuizen. Geaggregeerd rapport van toezichtbezoeken naar de implementatie van het convenant 'Veilige toepassing van medische technologie in het ziekenhuis'. Inspectie voor de Gezondheidszorg, Utrecht, juni 2014: "Training van gebruikers en technici wordt inmiddels procedureel meegenomen in nieuwe aanschaftrajecten rond medische technologie in alle ziekenhuizen.", pag. 22

³⁴ G.P. van den Berg (1997). Straling: één pot nat; psychologische aspecten van elektromagnetische straling. NVS-nieuws, 22 (4), pp 11-15.

- het aantal betrokkenen,
- het tijdsverloop van de schade (acuut versus later),
- de beheersbaarheid van de gevolgen,
- de vertrouwdheid met de gevolgen,
- de vrijwilligheid van de blootstelling (keuzevrijheid),
- het belang van de verwachte gevolgen,
- de intentie tot schaden,
- de sociale verdeling van risico's en voordelen.

Zo kan een betrekkelijk gering gevolg, gepaard gaand met onbekendheid over de gevolgen of met een ongelijke verdeling van lusten en lasten (het 'not in my back yard'-syndroom, afgekort 'NIMBY-syndroom') bij het publiek als groot risico worden ervaren.

Eveneens kan worden verklaard, waarom radon als relatief grote bron van stralingsbelasting bij de bevolking, die tot een aanzienlijk aantal berekende gevallen van longkankersterfte moet leiden, toch nauwelijks onrust veroorzaakt in Nederland. Het gaat namelijk om een 'natuurlijke, in vrijwel alle gebouwen aanwezige en neutrale' stralingsbron. Indien het door de bevolking ervaren risico slechts bepaald zou worden door de feitelijke kans op sterfte per bron, dan zou het niet uitmaken of men door de kat of de hond wordt gebeten. Voor veel mensen maakt dit echter wel degelijk iets uit.

De risicoperceptie van de mogelijke gevaren van straling wordt dus sterk beïnvloed door de aard van de toepassing, ongeacht het feitelijke risico. Zo kan iemand zonder enige angstgevoelens een radiologisch onderzoek met een relatief hoge dosisbelasting ondergaan, terwijl dezelfde persoon zich ernstige zorgen kan maken over de gevaren van een hoogspanningsleiding achter zijn woning. Het feitelijke (stralings?)risico van blootstelling aan elektromagnetische velden door hoogspanningsleidingen is zeer gering. Ook het onbeperkt zonnebaden dat velen doen, doet vermoeden dat de emotie (sociale wenselijkheid, plezier) het wint van de ratio (de feitelijke risico's op door UV-straling geïnduceerde huidtumoren). Bovenstaand verschil in risicoperceptie wordt ook aangetroffen bij personen die beroepsmatig ioniserende straling toepassen. Ondanks scholing leven er bij sommige radiologisch werkers irreële ideeën over de gevaren van straling. Wat betreft de medische stralingstoepassingen lijkt het erop, dat hoe meer straling artsen toepassen, des te lager men de risico's inschat. Tandartsen lijken vaak voorzichtiger met straling om te gaan dan bijvoorbeeld interventieradiologen of interventiecardiologen, terwijl het verschil in de aan patiënten en medewerkers 'uitgedeelde' dosis evident is. Wellicht speelt een zekere 'bedrijfsblindheid' hierin een rol. Ook blijkt soms, dat radiologisch laboranten en artsen die op dezelfde afdeling werkzaam zijn, een verschillend idee van risico hebben. Ook hier geldt, dat naast de feitelijke risico's andere zaken een rol kunnen spelen in de

beleving van deze risico's. Vlek³⁵ geeft aan, hoe met deze multidimensionale risicoperceptie kan worden omgegaan. Als het aan de burger ligt, wordt het ALARA-principe steeds verder toegepast, ook indien er geen grenswaarden of normen worden overschreden. Verder zouden autoriteiten begrip moeten hebben voor de verwarring die kan heersen en de soms vage klachten die bij burgers leven en hierop een gerichte communicatiestrategie hanteren. "Social media" zoals Twitter en Youtube kunnen bij ongevallen met potentieel schadelijke agentia zoals straling onrust onder de bevolking snel verspreiden.

De op een risicogetal gebaseerde dosislimieten houden rekening met effecten op het individu en zijn nageslacht. Een blootstelling in enig jaar aan de jaardosislimiet van 1 mSv betekent voor een lid van de bevolking een veiligheidshalve berekende kans van 1:20.000 (0,005%) op een fatale kanker. Bij deze lage dosis is er statistisch overigens nog nooit extra sterfte aangetoond. Daar staat tegenover een daadwerkelijk geconstateerde 'natuurlijke kans' om aan kanker te overlijden van 20 - 30%. Dat wil zeggen dat 1 van de 3 tot 5 levendgeborenen op enig tijdstip overlijdt aan kanker. Individueel gezien is er voor een doorsnee Nederlander dus weinig reden zich bezorgd te maken over mogelijke kankerinductie door ioniserende straling. Een ander aspect wat de vergelijking met bijvoorbeeld beroepsrisico's bemoeilijkt is het gegeven, dat ongevallen in bijvoorbeeld de industrie feitelijk plaatsvinden en dat de berekende risico's op kanker voor bijvoorbeeld een radiologisch werker 'zouden kunnen optreden'. Indien dit gebeurt - wellicht op veel latere leeftijd, wanneer de kans op 'natuurlijke' sterfte door kanker al groot is - valt niet na te gaan of de in het verleden beroepsmatig ontvangen stralingsdosis hiervan de oorzaak is.

³⁵ C.A.J. Vlek (1996). A multi-level, multi-stage and multi-attribute perspective on risk assessment, decision-making and risk control. *Risk Decision and Policy* 1 (1) pp 9-31.

2. *De techniek van het doorlichten*

W. Veldkamp

2.1 *Inleiding*

Fluoroscopie of doorlichting is een techniek voor röntgenonderzoek waarbij de patiënt gedurende langere tijd wordt blootgesteld aan röntgenstraling. De door de patiënt verzwakte röntgenstraling wordt gedetecteerd met een conventionele beeldversterker (BV) of met een moderne flat-panel detector (FPD) en zo worden real-time bewegende beelden verkregen. Door het gebruik van deze relatief gevoelige detectortechnologieën kan de stralingsbelasting binnen acceptabele grenzen worden gehouden bij beperkte doorlichtduur.

In dit hoofdstuk wordt de techniek van het doorlichten behandeld. Hierbij gaat het om de werking van de verschillende technische componenten in de beeldvormende keten. Uiteindelijk zal de kennis over de werking van de componenten zich vertalen naar begrip ten aanzien van bijvoorbeeld de effecten op de dosis (denk aan intreedosis en effectieve dosis) van handelingen zoals diafragmeren en vergroten. Achtereenvolgens zullen de volgende onderwerpen worden besproken:

Technische componenten:

- Doorlichten: toen, nu, straks.
- Werking van de beeldversterker
- Werking van de automaat

Effect op de patiëntdosis van:

- Diafragmeren
- Vergroten
- Gepulst doorlichten

2.2 *Doorlichten: toen, nu, straks*

De allereerste fluoroscopische (= doorlicht)procedures produceerden beelden van lage kwaliteit. Hierbij werd een oplichtend (fosfor) scherm gebruikt met een lage efficiëntie. Het scherm vervult zowel de functie van detectie als van weergave. Vanwege de lage efficiëntie moest fluoroscopie in het donker plaatsvinden (voor het maken van de fotografische afbeelding als boven geïllustreerd, was echter licht nodig). Bovendien werd de werker daardoor deels aan primaire straling blootgesteld en ontving de patiënt een relatief hoge dosis.

De ontwikkeling van vacuümversterkerbuizen (ook wel radiobuizen of elektronenbuizen genoemd) eind jaren 40 van de vorige eeuw leidde in de jaren 50 tot de ontwikkeling van de beeldversterker. De beeldverster-

ker genereerde doorlichtbeelden die aanzienlijk beter te beoordelen waren. De eerste beeldversterkers hadden een klein intreeveld en een glazen vacuüm behuizing. De modernere exemplaren hebben intreeveldafmetingen tot 57 cm in diameter met een metalen vacuüm behuizing. Het is nu wettelijk niet meer toegestaan om te doorlichten zonder gebruik te maken van beeldversterking of van de moderne gevoelige detectoren.

Een doorlichtstatief (C-boog) is opgebouwd uit de volgende onderdelen: röntgenbuis, tafel en een beeldversterker, waarbij röntgenbuis en beeldversterker via een vaste, maar draaibare boog aan elkaar verbonden zijn. Daarnaast is er een bedieningsconsole en een monitor aanwezig. De belichtingsautomaat (automatische exposure controle) zorgt voor de juiste stralingsdosis op de beeldversterker om een goede beeldkwaliteit te krijgen. Modernere systemen gebruiken in plaats van een beeldversterker een zogenaamde flat-panel detector.

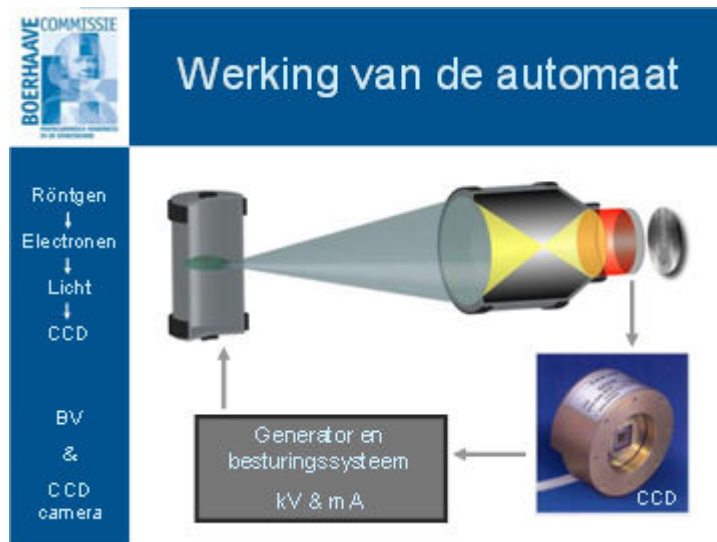
2.3 Componenten en werking van de beeldversterker



De klassieke beeldversterker bestaat uit de volgende componenten: een intreescherm bestaande uit o.a. een fosforlaag, een uittreescherm bestaande uit een fosforlaag en tenslotte een CCD-chip (CCD staat voor ‘charge coupled device’) die licht omzet in een digitaal beeld.

De werking van de beeldversterker kan als volgt worden beschreven: röntgenfotonen (al dan niet verzwakt door de patiënt) bereiken het intreescherm van de beeldversterker. De röntgenfotonen geven hun energie af aan de fosforlaag in het intreescherm en maken hiermee elektronen vrij uit het intreescherm. De elektronen worden vervolgens in versnelling gebracht door een elektrisch veld dat in de beeldversterker is aangelegd en dat er voor zorgt dat de elektronen met veel kinetische energie het uit-

treescherm bereiken (hier vindt de feitelijke versterking plaats). Het aangebrachte elektrische veld in de beeldversterker zorgt er bovendien voor dat de elektronen worden gefocusseerd (het focus kan automatisch worden verlegd; dit gebeurt bij vergroten). De versnelde elektronen produceren vervolgens relatief veel licht in de fosforlaag in het uittreescherm van de beeldversterker door hun kinetische energie af te geven. Dit licht valt op de CCD-chip die het vervolgens omzet in een digitaal beeld.

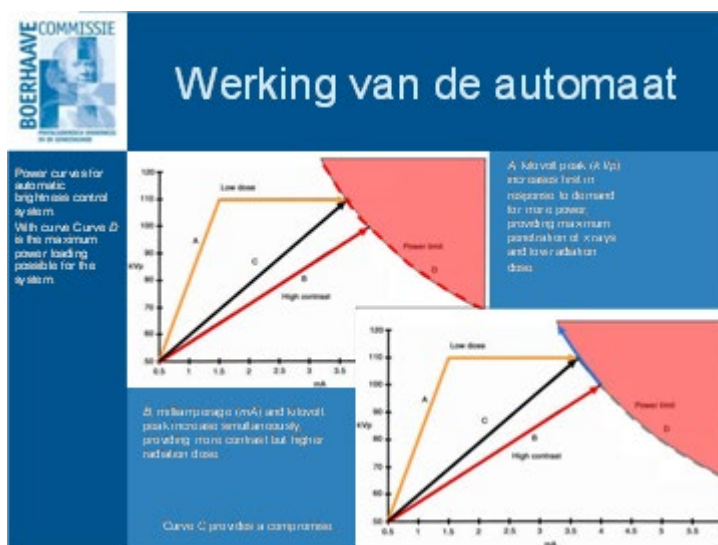


In het bovenstaande is vrijwel de gehele beeldvormende keten beschreven. De component die nog mist is de belichtingsautomaat. Het doel van deze automaat is het verkrijgen van de gewenste dosis op de beeldversterker bij het doorlichten of bij het maken van opnamen (foto) of cine (film). Hiertoe wordt de lichtopbrengst in het centrum van de CCD aan de automaat doorgegeven. De automaat streeft naar een lichtopbrengst die een geschikte signaal-ruisverhouding geeft (passend bij de beeldkwaliteit van het specifieke doorlichtprogramma dat men gekozen heeft). Bepalende factoren bij de werking van de automaat zijn:

- het doordringend vermogen van de röntgenbundel (afhankelijk van projectierichting, postuur van de patiënt, gebied van blootstelling op de patiënt);
- de gewenste beeldkwaliteit die kan worden gekozen op de bedieningsconsole.

Een eventueel nadeel van de automaat is dat veel beweging van het te doorlichten lichaamsdeel leidt tot veel aanpassingen door de automaat, hetgeen een onrustig doorlichtbeeld kan geven. Een oplossing hiervoor kan zijn om even te doorlichten met de automaat om de doorlichtinstellingen (kV, mA) te bepalen. Vervolgens kan dan 'handmatig' worden

doorlicht waarbij de door de automaat bepaalde kV- en mA-waarden worden ingesteld.



In de figuur, staat op de x-as de buisstroom (mA) en op de y-as de buisspanning (kV) uitgezet. Curve D geeft het maximale vermogen dat de röntgenbuis aan kan. Als voorbeeld zijn er curves getoond voor drie verschillende doorlichtprogramma's die gekozen zouden kunnen worden op de console. Curve B geeft bijvoorbeeld een hogere beeldkwaliteit met hogere dosis dan curves A en C. Curve A is het lage dosisprogramma en curve C een compromis tussen A en C. Curve B kiest voor een hoger mA gecombineerd met een lager kV dan curve A.

2.4 Diafragmeren

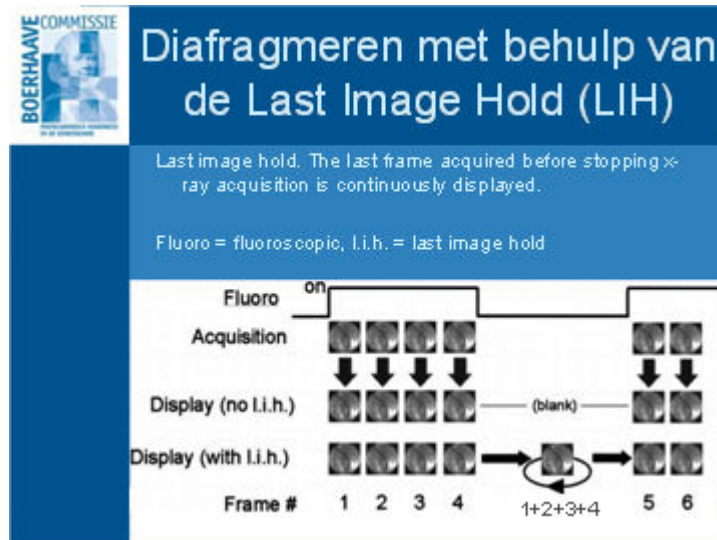
Bij diafragmeren wordt het veld van blootstelling op de patiënt en dus op de beeldversterker verkleind. Belangrijk is om op te merken, dat het focus binnen in de beeldversterker bij het diafragmeren niet wordt verlegd. De automaat die rekening houdt met de lichtopbrengst in het centrum van de CCD zal geen reden zien kV en mA bij te stellen. Hierdoor blijft het intreedosistempo gelijk. Tegelijkertijd neemt het blootgesteld volume van de patiënt met eenzelfde factor af als waarmee de veldgrootte afneemt. Dit zorgt ervoor dat de effectieve dosis zal dalen (minder organen worden blootgesteld; dan wel een kleiner deel van organen).

De voordelen van diafragmeren zijn daarom:

- Dosisreductie in termen van effectieve dosis.
- Betere beeldkwaliteit: een kleiner blootgesteld oppervlak resulteert in minder strooistraling. Strooistraling levert verslechtering van beeldkwaliteit; minder strooistraling betekent dus een kwalitatief beter beeld.

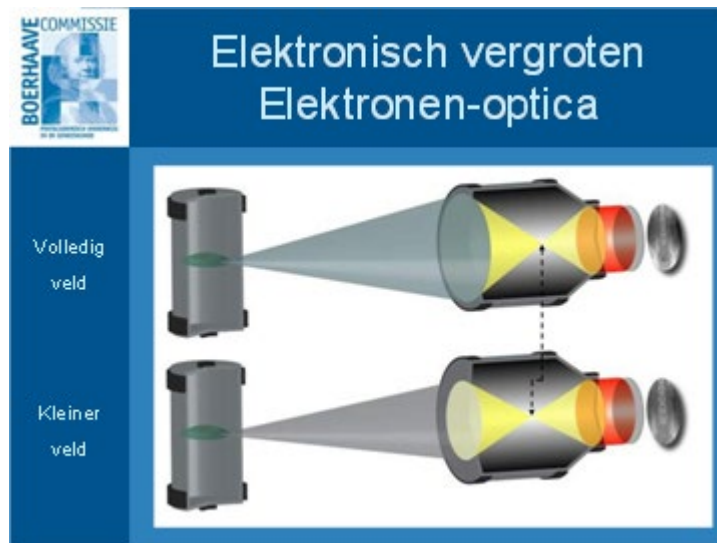
Daarnaast zal de dynamiek in zwartingswaarden afnemen aangezien we ons beperken tot afbeelding van een specifieke structuur met een specifieke verzwakkingswaarde, in plaats van meerdere structuren of organen met verschillende verzwakkingseigenschappen. Een en ander resulteert in een rustiger beeld.

2.5 Last Image Hold



Bij de vroegere doorlichttechniek was er alleen sprake van beeldweergave wanneer de röntgenbuis straalde. De Last Image Hold (LIH)-modus die hedendaagse systemen bieden, maakt gebruik van het laatste frame (plaatje) of een combinatie van een aantal opeenvolgende frames. Een combinatie van meerdere frames zorgt voor verbetering van de beeldkwaliteit in termen van signaal-ruisverhouding. Een LIH-beeld wordt continu getoond op de monitor, zodat de anatomie ook zichtbaar is als de röntgenbuis niet straalt. Gebruik van deze functie verlaagt de blootstelling van de patiënt en werker aan röntgenstraling aanzienlijk. Bij oudere systemen die deze optie niet bieden wordt bij iedere getoonde afbeelding gebruik van röntgenstraling gemaakt. Concluderend: met LIH, is afbeelden mogelijk zonder extra dosis voor de patiënt. Belangrijk is de optie om deze “last image” op te kunnen slaan, waardoor het maken van een opname (die meer detail en contrast heeft maar wat met een hogere dosis gepaard gaat) kan worden vermeden.

2.6 Vergroten



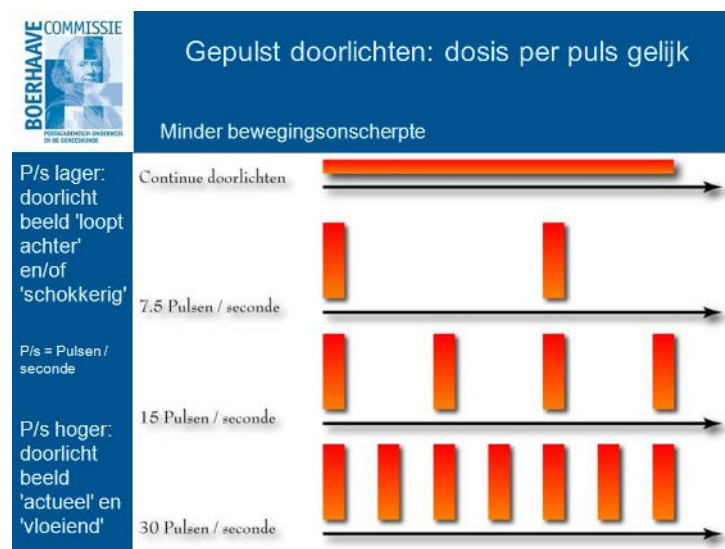
Bij het vergroten wordt gediafragmeerd, maar daarbij wordt ook het focus verlegd in de beeldversterker. Hierdoor zal het volledige uitreeveld worden blootgesteld bij een kleiner intreeveld en daarmee zal de volledige CCD worden belicht. Met andere woorden: alle lichtgevoelige elementen in de CCD – de uiteindelijke pixels van een beeld – worden gebruikt om een kleiner deel van de patiënt af te beelden. De detailwaarneembaarheid (ook wel resolutie genoemd), zal toenemen.

Om de volledige CCD-chip te kunnen belichten bij een kleiner intreeveld, wordt als het ware het lichtsignaal op de CCD uitgesmeerd over een groter oppervlak (als resultaat van het verleggen van het focus). Hierdoor daalt de intensiteit in het centrum van de CCD. De automaat meet de lichtintensiteit in het centrum van de CCD en constateert dus een afname hierin. De automaat is afgesteld om een constante intensiteit in het centrum van de CCD te handhaven en zal dus kV en mA opschroeven langs voorgeprogrammeerde zogenoemde regelcurves (zie figuur). Hierdoor neemt de intreedosis toe. Omdat het veld op de patiënt is verkleind bij vergroten (minder organen blootgesteld dan wel een kleiner deel van organen) zal de effectieve dosis per saldo gelijk blijven. De factor waarmee de intreedosis toeneemt, is gelijk aan de factor waarmee het veld op de BV afneemt bij het vergroten. Dit verklaart bijvoorbeeld een toename van een factor 2,8 bij omschakelen van een 25 cm naar een 15 cm beeldformaat: $25^2 / 15^2 = 2,8$ (veldgrootte in centimeter; het kwadraat van de diameter is een maat voor het oppervlak).

Wanneer we het bovengenoemde rekenvoorbeeld in woorden samenvatten, dan kunnen we stellen dat bij vergroten het intreedosistempo omgekeerd kwadratisch toeneemt met het BV-formaat (hogere huiddosis). Tegelijkertijd neemt het blootgestelde volume van de patiënt met eenzelfde factor af. Hierdoor zal de effectieve dosis grosso modo gelijk blijven. Voordelen van vergroten: een betere beeldkwaliteit door betere weergave van kleine details (de spatiële resolutie neemt toe).

2.7 Gepulst doorlichten

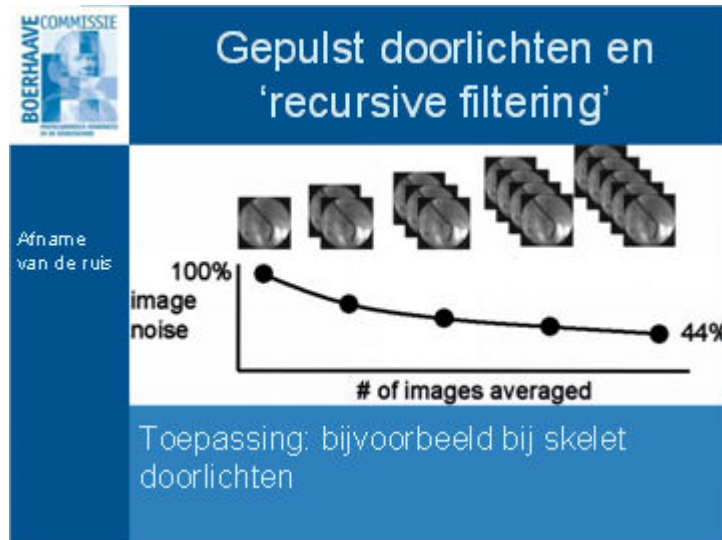
Een relatief recente technische innovatie bij het doorlichten is het gepulst doorlichten. Bij gepulst doorlichten, worden de röntgenstralen niet langer continu geleverd maar in snel opeenvolgende pulsen. Dit vermindert de duur van blootstelling en deze techniek heeft geleid tot een stralingsreductie van ongeveer 40% ten opzichte van het continu doorlichten. Het beeld behorende bij een puls blijft staan totdat beeldinformatie beschikbaar is van een nieuwe puls. Gepulst doorlichten kan plaatsvinden hetzij met behulp van een pulserende röntgengenerator of met een grid-gecontroleerde röntgenbuis. Bij deze tweede oplossing bevindt zich een grid (rooster) tussen kathode en anode dat afwisselend de elektronen richting anode blokkeert of doorlaat.



Bij gepulst doorlichten kunnen we spreken over het aantal pulsen per seconde (de puls-rate) en de dosis per puls (pulshoogte). Naarmate de puls-rate lager wordt gekozen bij gelijkblijvende pulshoogte, zal de dosis afnemen, maar zal het beeld meer schokkerig over komen. Anderzijds, bij een hogere puls-rate zal de dosis hoger zijn terwijl het beeld vloeiender oogt.

Een grotere pulshoogte zal voor een betere beeldkwaliteit per puls zorgen maar dit zal uiteraard ook de dosis doen toenemen. In de praktijk zijn er diverse combinaties van pulshoogte en puls-rate denkbaar.

2.8 Recursive filtering



De beelden van digitale fluoroscopie kunnen softwarematig worden bewerkt met behulp van beeldbewerkingstechnieken. Deze technieken kunnen blootstelling aan straling voor de patiënt en werker verminderen en/of betere visualisatie van de anatomie bewerkstelligen. Beeldbewerkingsopties omvatten onder andere Last Image Hold, subtractie (DSA), “edge enhancement” en “recursive filtering”.

Recursive filtering wordt gebruikt om een afname van de beeldruis te bereiken. De afname wordt bereikt door een beeld weer te geven dat bestaat uit het gemiddelde van de beeldinformatie van het huidige frame met één of meer voorgaande frames. Naarmate het aantal frames toeneemt dat wordt gebruikt voor de middeling zal de beeldruis in het resultaatbeeld steeds verder afnemen. Deze techniek zal goed werken voor relatief statische afbeeldingen (bijvoorbeeld bij skeletprocedures), maar bij het afbeelden van dynamische processen zal versmering (“artificial lag”) van de beeldinformatie optreden, hetgeen tot onaanvaardbare beeldkwaliteit kan leiden. Dit ongewenste effect kan ook optreden bij snel bewegende instrumenten in beeld of bij verschuivingen van de patiënttafel. Moderne doorlichtsystemen maken gebruik van bewegingsdetectie om het ongewenste effect (zoveel mogelijk) te vermijden door tijdelijk de recursive filtering met minder beelden over elkaar uit te voeren of eventueel even stop te zetten.

2.9 Opnamen

Naast de acquisitie van digitale doorlichtbeelden (frames) kunnen ook opnames worden gemaakt. Digitale opnames hebben dezelfde resolutie als digitale doorlichtbeelden, maar kenmerken zich door een betere signaal-ruisverhouding (met als neveneffect een hogere patiëntdosis dan de dosis die hoort bij een individueel doorlichtframe dat met een lagere mAs-waarde is gemaakt).

2.10 Artefacten van de beeldversterker

Lag

Lag is het verschijnsel waarbij de luminescentie van het uittreescherm na-ijlt. In feite is het de traagheid van de fosfor dat hiervoor verantwoordelijk is. Lag heeft een negatieve invloed op de temporele resolutie van het beeld. Dit probleem gold vooral voor de oudere generatie beeldversterkers. Huidige beeldversterkers kunnen een vertraging van ongeveer 1 milliseconde hebben.

Vignetting

Een afname in helderheid van het centrum naar de periferie van een beeld wordt vignetting genoemd. Als gevolg daarvan heeft het centrum van een beeldversterker een betere beeldkwaliteit dan de periferie.

Veiling Glare

Verstrooiing van het licht in het intree- en uittreescherm en defocusering van elektronen binnen in de beeldversterker wordt aangeduid met de term ‘veiling glare’. Veiling glare reduceert het contrast in het uiteindelijke beeld (het uit zich als “blurring” (vervaging) in het beeld).

Pincushion distortion

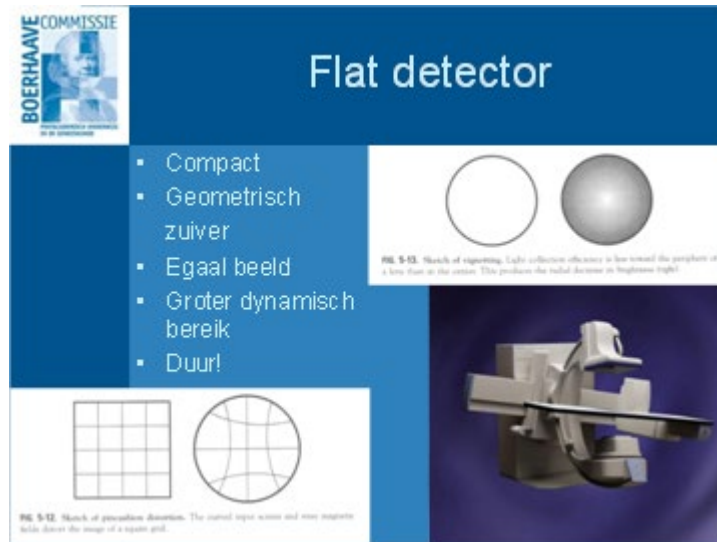
“Pincushion distortion” is een geometrische vervorming van de hele afbeelding. De vervorming is een gevolg van de projectie van de röntgenbundel op het gebogen intreescherm (het intreescherm is bol in verband met het feit dat de beeldversterker van binnen vacuüm is) en de uiteindelijke platte afbeelding op de monitor. De vervorming is eenvoudig te visualiseren door een rechthoekig rooster af te beelden.

S-vervorming

Elektronen in de beeldversterker bewegen langs rechte paden als gevolg van het aangebrachte elektrische veld. Externe elektromagnetische bronnen beïnvloeden echter deze elektronenpaden. Dit effect is sterker in de periferie van de beeldversterker dan dicht bij het centrum. Dit kenmerk zorgt ervoor dat S-vormige verstoringen in de afbeelding terecht

kunnen komen. Grotere beeldversterkers zijn gevoeliger voor externe elektromagnetische velden.

2.11 Flat-panel detectoren



Het zwaartepunt van dit hoofdstuk ligt bij de beeldversterker die nog zeer veelvuldig wordt gebruikt in de klinische praktijk. De modernere flat-panel detector zal nu in het kort besproken worden.

De huidige generatie flat-panel detector kan de beeldinformatie in de detector in 1/30e seconde uitlezen en dat maakt ze daarmee ook geschikt voor fluoroscopie (waar uitleessnelheid uiteraard van belang is). De uitlezing wordt in de praktijk gesynchroniseerd met de pulsen van het gepulst doorlichten. Vaak worden de detectorelementen in de detector gegroepeerd, zodat 2×2 detectorelementen van 150 micrometer uiteindelijk 1 beeldpixel van 300 μm vormen (1 μm = 0,001 mm). Dit wordt “binning” genoemd. In vergrotingsmodus zal het systeem echter omschakelen naar de hogere resolutie van 150 μm , dit gebeurt door unbinning van de detectorelementen. Het beeld van de beeldversterker is cirkelvormig. Het beeld van de flat-panel detector is doorgaans rechthoekig en geeft dus meer beeldinformatie. Vaak bieden de flat-panel detectorsystemen naast vierkante ook cirkelvormige collimatoren.

De flat-panel detector heeft een aantal potentiële voordelen vergeleken met de klassieke beeldversterker. Zo is de flat-panel detector ongevoelig voor specifieke artefacten die bij de beeldversterker kunnen optreden zoals: vignetting, pincushion-verstoring en S-vertanding. Daarnaast is de flat-panel detector compacter. Dit maakt dat toegang tot de patiënt en het manoeuvreren eenvoudiger is. Een ander voordeel van de flat-panel detector is het grotere dynamische bereik: dit betekent dat een grote

range aan dosiswaarden op de detector vertaald wordt naar bruikbare beeldinformatie. Bij de beeldversterker treedt eerder onder- en overbelichting op wanneer de detectordosis lagere of hogere waarden bereikt.

Dosiseffecten bij diafragmeren/vergroten zijn voor de flat-panel detector en de beeldversterker vergelijkbaar.

Diafragmeren:

Voor beide technologieën geldt: het veld van blootstelling verandert. Er verandert echter niets in de detector.

Vergroten:

Bij de flat-panel detector is het dosiseffect te verklaren door de signaal-ruisverhouding: wanneer de pixels in het beeld kleiner worden (unbinning) ontstaat er meer ruis. Om hiervoor te compenseren is meer dosis nodig.

2.12 *Samenvatting*

De functie van de beeldversterker in fluoroscopische beeldvorming is om de verzwakte röntgenstraling uit de patiënt om te zetten in een zichtbare afbeelding. Het beeld wordt geproduceerd door omzetting van de röntgenfotonen in elektronen (in het intreescherm van de beeldversterker) en tenslotte, omzetting van elektronen in zichtbaar licht aan de uitgangszijde (fosfor in het uitreescherm). De intensiteit van het uiteindelijke beeld wordt meer dan duizend keer helderder dan het oorspronkelijke, latente beeld zoals gecreëerd in het input fosfor (intreescherm). Beeldversterkers komen voor in vele maten, en de meeste hebben meerdere vergrotingsmodi. Beeldversterkers kennen artefacten die zijn verbonden met de constructie en de werking van de beeldversterker, zo zijn ze bijvoorbeeld gevoelig voor externe elektromagnetische velden.

3. *Klinische blootstelling van patiënten*

S. van Dullemen (o.b.v. de presentatie van J. Geleijns)

3.1 *Inleiding*

De NCRP³⁶ heeft aanbevelingen gegeven hoe aan dosisbeperking te doen bij interventieprocedures.

Aanbeveling 1

In de analyse van de voor- en nadelen van onder doorlichting uitgevoerde interventies is het stralingsrisico één van de vele risico's die moet worden meegenomen.

Aanbeveling 2

Om gelijksoortige interventieprocedures onderling te vergelijken, zijn het gemeten dosis-oppervlakteproduct (DOP) en de geabsorbeerde dosis in het gedefinieerde referentiepunt de te gebruiken grootheden.

Het door IEC/FDA gedefinieerde referentiepunt voor interventieprocedures betreft de meting van de cumulatieve intreedosis voor de patiënt, gemeten vrij-in-lucht. Hierbij wordt dus geen rekening gehouden met de exacte positie van de patiënt, de terugverstrooide straling, de verschillende projecties en de verzwakking door de tafel. Waarden voor deze cumulatieve dosis voor verschillende interventieprocedures zitten gemiddeld onder de drempel voor huidschade, maar de maximaal gemeten waarden kunnen daar aanzienlijk boven liggen. Een goede afstelling van de apparatuur en de keuze voor het meest geschikte toestel zijn daarom van groot belang. Daarbij gaat het om optimalisatie van zaken als:

- juiste filtering;
- frame rate;
- keuze kV/mA-belichtingscurve (high/low dose);
- afstelling beeldopnemer (zoals ingangsdosis BV/flat-panel);
- goede afstelling monitorbeeld
- software updates;
- reguliere kwaliteitsbewaking volgens protocollen;
- reduceren van omgevingslicht in plaats van de monitorhelderheid opvoeren. Hierbij moet de balans worden gevonden tussen verbeterde zichtbaarheid van kleine objecten op het monitorbeeld

³⁶ National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP-Report No. 168 (2010). Radiation Dose Management for Fluoroscopically-Guided Interventional Medical procedures.

en de noodzaak om kleine objecten zoals ballonkatheters en opvoerdraden in de werkruimte nog te kunnen zien.

Bij neuro-embolisatieprocedures ligt de gemiddelde waarde (3,8 Gy) van de geabsorbeerde dosis in het referentiepunt al in de kritieke zone voor de inductie van huidschade.

Aanbeveling 3

Effectieve dosis moet **niet** worden gebruikt voor **kwantitatieve** schattingen voor het stochastische stralingsrisico voor **individuele** patiënten of **patiëntgroepen** (deze groepen kunnen qua stralingsgevoeligheid afwijken van de gemiddelde bevolking, bijvoorbeeld vanwege genetische predispositie voor tumorinductie, waardoor de weefselweegfactoren niet kunnen worden gebruikt).

Effectieve dosis kan wel worden gebruikt als een **kwalitatieve** indicator van het stochastische stralingsrisico om verschillende typen procedures in een risicocategorie in te delen en onderling te vergelijken.

Aanbeveling 4

Als risicocategorieën (voor medische procedures!) worden in grote lijnen aangehouden:

Verwaarloosbaar	< 0,1 mSv
Minimaal	0,1-1 mSv
Minor	1-10 mSv
Laag	10-100 mSv
Acceptabel ³⁷	> 100 mSv

Aanbeveling 5

Een onder doorlichting uitgevoerde interventieprocedure moet worden ingedeeld als een potentieel hoge-dosisprocedure als in meer dan 5% van de gevallen de geabsorbeerde huiddosis groter is dan 3 Gy of de DOP-waarde groter dan 300 Gy·cm².

Aanbeveling 6

Piekdosiswaarden in weefsel, zoals in de huid of de ooglen, moet worden geëvalueerd betreffende het mogelijk optreden van weefselschade.

Aanbeveling 7

Procedures met een potentieel hoge dosis moeten worden uitgevoerd op een voor het voorgenomen gebruik ontworpen toestel.

³⁷ In de context van het te verwachten voordeel van de medische procedure.

Aanbeveling 8

Indien een doorlichtstatief geregeld wordt gebruikt voor hogedosisprocedures ($D_{\text{ref}} > 3 \text{ Gy}$), dan moet deze zijn voorzien (of daartoe worden geüpgraded) van een toegevoegd dosis-monitoringssysteem dat D_{ref} meet, anders moet het toestel worden vervangen door een modern statief.

Aanbeveling 9

Apparatuur die doorgaans wordt gebruikt voor pediatrische procedures moet voor dit doel goed zijn ontworpen, uitgerust en ingesteld.

Uit diverse onderzoeken blijkt, dat de praktijkvariatie betreffende de gemeten DOP-waarden of intree-huid doses bij eenzelfde procedure aanzienlijk kan verschillen (tot aan een factor 20).

3.2 Effectieve dosiswaarden patiëntblootstelling

Voor effectieve dosiswaarden voor de patiënt van diverse onderzoeken zie de tabellen in de bijlagen.

3.3 Blootstelling van de ongeboren vrucht bij een zwangere patiënt

Een weloverwogen indicatiestelling kan er toe leiden, dat zwangere patiënten worden onderzocht of behandeld met röntgenstraling. Formeel zijn er geen dosislimieten voor de ongeboren vrucht bij medische blootstelling. Wanneer het röntgenveld buiten het abdomen ligt, zal de dosis in de ongeboren vrucht ruim onder 1 mSv liggen. Hartkatheterisatieprocedures leveren daarom een relatief lage stralingsbelasting voor de foetus op, ruim onder 1 mSv. Wanneer de primaire bundel in het abdomen komt, kunnen de dosiswaarden voor de ongeboren vrucht variëren van enkele millisieverts tot 20 mSv (CT). Soms kunnen extra maatregelen helpen om de dosis te beperken: een andere toegangsroutte kiezen (subclaviaal in plaats van via de lies) of zorgen dat de patiënt een lege blaas heeft. Externe afscherming op het bekken van de patiënt is doorgaans van beperkt nut.

3.4 Blootstelling van patiënten en vrijwilligers voor wetenschappelijk onderzoek

Vrijwilligers (dit kunnen ook patiënten zijn) mogen onder bepaalde voorwaarden worden blootgesteld aan ioniserende straling. In het Bbs geven de artikelen 8.7 (Rechtvaardiging en blootstelling van verzorgers en van proefpersonen bij wetenschappelijk onderzoek) en 8.10 (Dosisbeperking bij wetenschappelijk onderzoek) de kaders aan en wordt ook

verwezen naar de Wet medisch-wetenschappelijk onderzoek met mensen.

ICRP-publicatie 62: Radiological Protection in Biomedical Research is volgens de aan de ziekenhuizen verleende Kernenergiewetvergunning het te hanteren referentiekader voor het doen van wetenschappelijk onderzoek bij patiënten en vrijwilligers waarbij ioniserende straling wordt gebruikt. Hierin wordt verwezen naar de Declaration of Helsinki: Recommendations Guiding Medical Doctors in Biomedical Research Involving Human Subjects. Adopted by the Eighteenth World Medical Assembly, Helsinki, Finland, 1964; and revised by the Twenty-ninth World Medical Assembly, Tokyo, Japan, 1975.

Daarnaast is er een EU-rapport³⁸ over deze materie. In 2016 heeft de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie (NCS)³⁹ de bestaande regels geëvalueerd. Een aanbeveling is, dat het ongewenst is wanneer gezonde vrijwilligers meerdere malen achtereen deelnemen in studies waarbij stralingsblootstelling plaatsvindt.

Uitgangspunt is, dat het onderzoeksprotocol de dosisbelasting aangeeft. De medisch-ethische toetsingscommissie (METC) kan dan afwegen of aan de in ICRP-62 gestelde criteria is voldaan. Er wordt onderscheid gemaakt tussen vijf categorieën van typen onderzoek met toenemend maatschappelijk/wetenschappelijk belang, gaande van categorie I (triviaal risico, onderzoek gericht op het verwerven van fundamentele kennis), IIa (gericht op klinisch toepasbare kennis), IIb (maatschappelijk relevant onderzoek, gericht op diagnose, behandeling of preventie), IIIa (substantiële bijdrage aan behandeling en preventie van ernstige aandoeningen) naar IIIb (kennisverwerving direct gericht op het redden van levens of het verlichten van ernstige ziekten). Aan deze categorieën zijn toegestane risiconiveaus gekoppeld, waarbij er tevens drie groepen deelnemers worden onderscheiden: kinderen, volwassenen en ouderen (> 50 jaar). Kinderen mogen 2-5x minder dosis ontvangen dan volwassenen, boven de leeftijd van 50 jaar daarentegen mag men 5 tot 10x zoveel dosis oplopen als een volwassene onder de 50. In verband met het geven van toestemming zijn diverse leeftijden van belang voor kinderen: 12 en 16 jaar, zie www.ccmo.nl. In voornoemd NCS-rapport worden meer gedifferentieerde toegestane blootstellingsniveaus per leeftijdsklasse voorgesteld. Een van de geregeld voorkomende situaties is die van een volwassene in categorie IIb: deze proefpersoon mag dan maximaal 10 mSv effectieve dosis ontvangen, voor het onderzoek als geheel, dus niet per scan of in-

³⁸ European Commission. Guidance on medical exposures in medical and biomedical research. Radiation Protection 99 (1998).

³⁹ Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie. Human Exposure to Ionising Radiation for Clinical and Research Purposes: Radiation Dose & Risk Estimates. Subcommittee Radiation Doses & Risk Estimation for Medical Diagnostics and Research (May 2016).

jectie van radiofarmaca (PET-scan). Uiteraard moet in alle gevallen het ALARA-principe worden toegepast. Tegen de redenering dat de blootstelling van proefpersonen aan ioniserende straling kan worden vergeleken (en daarmee (deels) gerechtvaardigd) met bijvoorbeeld de achtergrondstraling, beroepsmatige blootstelling of andere vrijwillig genomen risico's kan bezwaar worden gemaakt. Ook het niet-detecteerbaar zijn van de risico's tegen het hoge achtergrondrisico wordt niet als relevant gezien, eerder zou het blootstellingsrisico van vrijwilligers bij wetenschappelijk onderzoek moeten worden gerelateerd aan andere om altruïstische redenen gemaakte keuzes⁴⁰.

⁴⁰ D.Willems, M.Burger, M.Huikeshoven. Stralingsrisico moet anders beoordeeld. Medisch Contact, nr 18/19 (2015)

4. *Klinische patiëntdosimetrie*

S. van Dulleman (o.b.v. presentaties van W. Veldkamp en J. Geleijns)

4.1 *Patiëntdosis: dosis-oppervlakteproduct*

Indien de röntgenbundel in zijn geheel door een zogenoemde vlakke ionisatiekamer straalt, waarbij zowel variaties in röntgenintensiteit als verschillen in bundeldoorsnede wordt geregistreerd, spreken we van een dosis-oppervlaktemeting (DOP, in het Engels DAP: dose area product). Eenheid: dosis x oppervlak = Gy·m². Het voordeel van een DOP-meting is, dat het niet uitmaakt op welke afstand van het focus de meting plaatsvindt, zolang de röntgenbundel geheel binnen de afmeting van de vlakke ionisatiekamer past, de afmeting van de DOP-meter is bijvoorbeeld 10 cm × 10 cm.

Een gemeten DOP-waarde bij het diafragmahuis kan op deze manier informatie geven over de intree-huiddosis: 20 Gy·cm² gemeten bij het diafragmahuis is ook 20 Gy·cm² ter plekke van de huid. Als daar het bestraalde oppervlak 100 cm² bedraagt, dan is de intree-huiddosis (dan weer in een punt) 20:100 = 0,2 Gy, dus ruimschoots onder de huid-drempeldosis voor erytheem. Wel moet worden bedacht, dat terugverstrooiing (backscatter) vanuit de patiënt hierin niet is meegenomen. De DOP-waarde is bij veel toestellen met ingebouwde DOP-meter af te lezen op de bedieningstafel en/of op de monitor. Bij een los aangebrachte DOP-meter is een aparte uitleesunit aanwezig, soms met de mogelijkheid van een geprinte DOP-waarde, die in sommige ziekenhuizen aan de status wordt gehecht bij complexe interventieprocedures. Helaas is de eenheid waarin de DOP-waarde wordt uitgedrukt per fabrikant verschillend: eenheden als Gy·m² of cGy·cm² (cGy = centigray = 0,01 Gy) worden meestal gebruikt.

Verder zijn er systemen leverbaar, waarbij real time huiddosiswaarden (of dosiscontouren) worden weergegeven, zodat nog tijdens de procedure kan worden voorkomen dat de drempeldosis voor de huiddosis wordt overschreden, bijvoorbeeld door andere projecties te kiezen.

4.2 *Orgaan- en weefseldosis, effectieve dosis*

Orgaandoses zijn niet rechtstreeks te meten, daarom wordt er met tabellen gewerkt die zijn afgeleid van metingen aan fantomen. Verder is er software verkrijgbaar, zoals PC-XMC, waarmee een klinisch fysicus op de afdeling dosisberekeningen kan maken. Als input voor de berekening moeten een aantal zaken via invulschermen worden gegeven: type patiënt (leeftijdsklassen), soort opname (thorax, abdomen etc.) ingestelde kV- en mA-waarden, positie en afmeting intreeveld, focus-huidafstand, type en

dikte filter, intree-huiddosis of DOP-waarde. Het resultaat van de berekening is dan een lijst met orgaandoses en de daaruit te berekenen effectieve dosis.

Verder zijn er vanuit de literatuur conversiecoëfficiënten bekend, waarmee een gemeten DOP-waarde bij een specifieke procedure kan worden omgerekend naar de effectieve patiëntdosis. Zo gelden bijvoorbeeld voor pediatrische hartkatheterisaties als conversiefactoren: 1,4 mSv/Gy·cm² voor 0-2-jarigen; 0,67 mSv/Gy·cm² voor 2-7-jarigen en 0,26 mSv / Gy·cm² voor 7-18-jarigen.

4.3 *Dosis op de ongeboren vrucht*

Gebruik makend van de PC-XMC-software kan ook de uterusdosis worden berekend. In het geval van een vroege zwangerschap kan deze orgaandosiswaarde als foetale dosis worden genomen. Dit wordt uitgedrukt als equivalente dosis in mSv. De eenheid effectieve dosis wordt in dit verband niet gebruikt, omdat voor een foetus geen weefselwegfactoren bekend zijn. Voor een AP-abdomenopname in een vroeg stadium van de zwangerschap kan zo een foetale dosis van 0,08 mSv worden berekend. Met software zoals FETDOSE kunnen meer uitgebreide berekeningen worden gemaakt van foetale doses bij blootstelling van zwangere patiënten aan röntgenstraling. Hiervoor wordt verwezen naar de deskundigen op de afdeling Radiologie (klinisch fysicus, gespecialiseerde MBB'er).

4.4 *Persoonsdosimetrie*

Indien de risicoanalyse uitwijst, dat een medewerker kan worden blootgesteld aan meer dan 1 mSv per jaar, volgt indeling als blootgestelde werker categorie B. Bij een kans op overschrijding van 6 mSv per jaar wordt iemand ingedeeld als A-werker.

Voor het vaststellen van de dosis moet de werker een persoonsdosismeter verstrekt krijgen van een door de overheid erkende dosimetriedienst (bijvoorbeeld NRG Arnhem of Philips), ook wel “ambtelijke dosismeter” genoemd. De dosisgegevens worden na uitlezing (langdurig) opgeslagen in het Nationale Dosisregistratie Systeem (NDRIS). Deze dosimeters (ook wel badge genoemd) zijn van het type TLD (thermoluminescentiedosismeter) en kunnen daarom alleen worden uitgelezen door verhitting in een speciale uitlezer bij de dosimetriedienst. Hierdoor worden de dosimeters tevens “gereset”. Daarom bestaat er een cyclus van 13 perioden in een jaar (voor A-werkers om de 14 dagen) waarin de TLD's telkens worden verstuurd naar de dosimetriedienst en weer worden ontvangen door de ziekenhuisafdelingen, inclusief rapportage van de dosisuitslagen over de voorgaande periode. Deze periodieke rapportage is doorgaans in te zien bij de lokale toezichthoudend deskundige. Voor

A-werkers kijkt de stralingsarts ook mee, in ieder geval voor het jaarlijkse keuringsgesprek/contact.

De erkende dosimetriedienst is verplicht een gedegen kwaliteitssysteem te hanteren, de betrouwbaarheid van het systeem is hoog te noemen. Er wordt gecorrigeerd voor de achtergrondstraling, maar zaken zoals “fading” en richtingsgevoeligheid geven toch een bepaalde meetonnauwkeurigheid. Het is natuurlijk de bedoeling dat de badge altijd wordt gedragen tijdens het werken met röntgenapparatuur, bij voorkeur middenvoor op kraaghoogte, buiten het loodschort. De gerapporteerde uitslagen betreffen: oppervlaktedosis (huiddosis), dieptedosis ofwel persoonsdosis-equivalent $H_p(10)$ in een bepaalde periode, de jaardosis en de cumulatieve dosis (vanaf eerste registratie als blootgestelde werker). De waarde van $H_p(10)$ kan worden geïnterpreteerd (tenzij er speciale omstandigheden zijn) als de effectieve dosis die de betreffende werker zou hebben ontvangen als hij/zij over het gehele lichaam aan het betreffende stralingsveld blootgesteld is geweest. Echter in de praktijk draagt de werker een loodschort bij het uitvoeren van interventieprocedures. Hiervoor moet de waarde van $H_p(10)$ worden gecorrigeerd met de zogenoemde beschermingsfactor van het loodschort. De waarde van deze correctiefactor waar $H_p(10)$ door kan worden gedeeld kan variëren naar gelang de loodschortdikte en is verder afhankelijk van het wel of niet dragen van een schildklierbeschermer. De meest gebruikte en veilige waarde voor deze factor is 5. In een ziekenhuis zijn er op jaarbasis doorgaans enkele specialisten (meestal interventiecardiologen en interventieradiologen) die per jaar een $H_p(10)$ -waarde groter dan 20 mSv hebben. Na toepassing van de correctiefactor voor het loodschort blijven ook deze werkers onder de dosislimiet. Overigens zijn de twee genoemde specialismen doorgaans de enige met hogere jaaruitslagen; alle overige blootgestelde werkers – zowel medisch specialisten als ondersteuning – zitten doorgaans lager dan 1 mSv per jaar.

Er kunnen zich situaties voordoen (bijvoorbeeld bij zwangerschap), dat direct uitleesbare dosimeters gewenst zijn. Hiervoor is de Elektronische Persoonsdosimeter (EPD) geschikt. Het voordeel hiervan is, dat de piekmomenten in de stralingsbelasting kunnen worden achterhaald (dosis en dosistempo als functie van de tijd). Er zijn inmiddels ook geavanceerde dosimetriesystemen verkrijgbaar voor bijvoorbeeld gebruik in een katheterisatie- of angiokamer, waarbij online de dosiswaarden van de werkers grafisch worden weergegeven.

Voor zwangere werkers kan met behulp van eerder genoemde software een dosisschatting worden gemaakt. In de meeste gevallen is dat niet nodig, omdat bij het volgen van de normale werkprocedures en vastgestelde protocollen en het dragen van een geschikt loodschort (en dat is niet twee over elkaar) de dosis voor de foetus ruim onder de limiet blijft. In

speciale gevallen (niet standaard) kan een EPD onder het loodschort op de buik gedragen geruststelling geven.

4.5 *Vingerdosimetrie*

In de speciale (weinig voorkomende) situaties, waarbij de hand van de arts veel en lang in de primaire stralingsbundel verblijft, kan het zinvol zijn om een handdosimetrie-project uit te (laten) voeren. Voor dit doel zijn TLD-dosimeter in een vingerring te verkrijgen. Daarnaast zijn er elektronische vingerdosimeters in de handel.

4.6 *Ooglensdosimetrie*

Standaard wordt vooralsnog uitgegaan van de gemeten $H_p(10)$ -waarde op kraaghoogte voor een eerste schatting van de ooglensdosis van werkers. Ook voor dit doel zijn specifiek voor ooglensdosimetrie ontworpen kleine TLD- of elektronische dosimeters verkrijgbaar, die op het voorhoofd tussen de ogen kunnen worden gedragen, of aan een bril kunnen worden bevestigd. Door de (verlaagde) ooglensdosislimiet zal er waarschijnlijk meer belangstelling ontstaan voor specifieke dosimetrie van de ooglens, waarvoor een aparte grootheid, $H_p(3)$ is ontwikkeld.

5. *Bescherming van werkers*

S. van Dullemen (deels o.b.v. de presentatie van J. Geleijns)

5.1 *Inleiding*

Uitgangspunt bij het beschermen van werkers tegen stralingsblootstelling is, dat handelingen – voor zover mogelijk – worden uitgevoerd achter een afscherming, waardoor de jaarbelasting onder de 1 mSv blijft. Dit is de situatie bij bedieningsconsoles in röntgenkamers: de doorgaans aanwezige loodglaswand biedt deze afscherming.

Bij doorlichtprocedures is het meestal niet mogelijk dit vanachter een afschermende wand uit te voeren; de arts (en ondersteuning) staat naast de patiënt tijdens het doorlichten en ontvangt de uit de patiënt tredende verstrooide straling. Daarom zijn extra maatregelen vereist om de jaardosis in ieder geval onder de werkerslimieten te houden en verder uiteraard zo laag als redelijkerwijs mogelijk is (ALARA). Deze maatregelen betreffen het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM) en het toepassen van lokale afscherming in de werkruimte. De eerder genoemde maatregelen om de patiëntdosis te verlagen, dragen doorgaans ook bij aan een lagere werkersdosis. De algemene wetmatigheid (omgekeerde kwadratenwet) van afstand houden blijft in voorkomende situaties en voor zover mogelijk een belangrijke manier om de werkersdosis te beperken. Een stapje terug van 50 cm afstand naar 70 cm scheelt al de helft aan stralingsbelasting.

5.2 *Persoonlijke beschermingsmiddelen*

5.2.1 *Loodschort*

Er zijn in de handel verschillende modellen verkrijgbaar, van het klassieke schortmodel met ondersteuning gevende sluitbanden tot tweedelige vest en kilt modellen, waardoor het gewicht niet geheel op de schouders rust. Een loodschort moet goed worden gedragen, met de sluitbanden aangespeld, dus niet half open hangend.

Het aantal millimeter loodequivalent is doorgaans op het schort aangegeven, verkrijgbaar zijn diktes van 0,25; 0,35; 0,50 en 0,75 mm. Veel verkrijgbare loodschorten zijn niet meer uitsluitend (of geheel niet) uit lood samengesteld; daarvoor worden soms milieuargumenten aangevoerd die mogelijk discutabel zijn.

Voor een goede bescherming is behalve de loodequivalentdikte ook de pasvorm van het loodschort van groot belang; er moeten geen “gaten” rondom de hals en in de armsgaten open blijven. Er is de mogelijkheid een loodschort op maat te laten maken. Overigens beschermt het lood-

schort vooral organen in de romp; beenmerg is gedeeltelijk afgeschermd en de schildklier niet.

Een loodschort geeft afhankelijk van de dikte (0,25-0,50 mm loodequivalent) en de toegepaste buisspanning (60-125 kV) een verzwakking van de opvallende straling van 67-99,5%⁴¹. Op zich zegt dit onvoldoende over de feitelijke dosisreductie voor de medewerker. Daarom zijn er zogenaemde “beschermingsfactoren” beschreven, die aangeven door welke factor de uitslag, $H_p(10)$ van de – boven het loodschort aan de midvoorzijde gedragen – persoonsdosimeter kan worden gedeeld om de effectieve dosis van betrokken medewerker te schatten.

De keuze van een geschikt type loodschort is afhankelijk van het gebruik⁴². Van belang zijn:

- aantal procedures per jaar;
- te doorlichten volume (romp, hoofd, extremiteiten);
- gebruikte buisspanning en buisstroom;
- totale doorlichttijd en aantal opnames per procedure.

Indien de straling vooral uit voorwaartse richting komt en de werker niet veel draait, volstaat een klassiek (keukenmodel) loodschort. Een loodschort van het manteltype (of vest en kilt) is nodig, wanneer de strooi-straling uit verschillende richtingen kan komen.

Voor röntgengeleide interventies bij kinderen (buisspanning < 80 kV) volstaat een dikte van 0,15 mm loodequivalent, in de praktijk 0,25 mm. Bij algemene interventies is minimaal 0,25 mm nodig, in de praktijk 0,35-0,50 mm. Bij CT-geleide interventies (buisspanning hoger dan 100 kV) is de vereiste dikte minimaal 0,35 mm, in de praktijk 0,50 mm loodequivalent. Overigens kan met een loodschort van het type mantel de dikte van 0,5 mm worden bereikt door twee loodflappen van 0,25 mm over elkaar heen te slaan. Voor normaal gebruik (zoals de meeste artsen) geldt voor anterieure bestraling het advies van 0,35 mm en bij intensief gebruik (cardioloog, interventieradioloog) 0,50 mm loodequivalentdikte. Bij posterieure bestraling is het advies in beide situaties 0,25 mm dikte.

In voorkomend geval is een loodschortdrager een geschikte “tijdelijke” afscherming (“mandekking”) voor een persoon die zonder loodschort aan desondanks aanwezig is bij een doorlichtprocedure (wat normaal gesproken niet de bedoeling is).

5.2.2 Kwaliteitsbewaking loodschort

Scherpe vouwen kunnen de afschermende werking van het loodschort aantasten. Het is daarom belangrijk om een loodschort met zorg te be-

⁴¹ H. Eder et al. RøFö 177: 399-404 (2005)

⁴² NCS Report 19 (2008). Code of practice for personal dosimetry of professionals wearing protective clothing during radiological procedures. Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie.

handelen en het na gebruik op een geschikte hanger achter te laten. Het is aan te bevelen en vereist om de schorten jaarlijks tenminste visueel te inspecteren op beschadigingen, zoals gaten, krassen en vouwen. Doorlichten van een loodschort maakt scheuren en gaten zichtbaar. De kwaliteitscontrole moet worden gedocumenteerd en traceerbaar zijn voor inspecties.

5.2.3 Schildklierbeschermer

Bij intensief interventiewerk (langdurige doorlichtprocedures, hoge intensiteit strooistraling, grote velden, arts staat dichtbij de patiënt) en ontbrekende mogelijkheid om bijvoorbeeld een loodglasscherm te gebruiken, is de schildklierbeschermer een belangrijke aanvulling op het loodschort en geeft het een aanzienlijke verdere dosisreductie. Als aanbevolen actieniveau (niet officieel vastgelegd) zou een Hp(10)-waarde (dus buiten het loodschort gemeten) van 5-6 mSv per jaar kunnen worden aangehouden. In de afweging van wel/niet dragen tellen de nadelen ook mee: oncomfortabel, hygiëne, logistiek, kosten. Genoemde situatie zal doorgaans ook als categorie-A-werk zijn ingedeeld, met tevens de equivalente ooglensdosis als serieus punt van aandacht voor extra bescherming.

5.2.4 Loodglasbril

Bij ooglensbescherming van de blootgestelde werker gaat het om het voorkómen van cataract op langere termijn (een weefselreactie). Bij veelvuldig uitgevoerde langdurige interventieprocedures kan de equivalente ooglensdosislimiet worden bereikt.

Uit recent uitgevoerde metingen⁴³ blijkt opnieuw, dat maatregelen zoals de patiënt zo dicht mogelijk bij de beeldopnemer (BV, flat panel) positioneren en het correcte gebruik van een loodglasscherm (indien mogelijk bij de betreffende procedure) tot een aanzienlijke dosisreductie op de ooglens van de arts leiden. Daarnaast dragen eerder genoemde maatregelen als afstand houden en de patiëntdosis optimaliseren ook bij aan een lagere ooglensdosis voor de arts. In aanvulling op bovenstaande maatregelen kan een loodglasbril de ooglensdosis verder verlagen.

Loodglasbrillen (doorgaans 0,75 mm loodequivalent) zijn te verkrijgen op sterkte voor bril dragers en in diverse modellen. De goede werking van loodglasbrillen is in de praktijk vooral afhankelijk van geometrische factoren. In het ideale geval wordt de pasvorm van de bril individueel bepaald en is de modelkeuze mede afhankelijk van de aard van de te verrichten procedure en het postuur en de lengte van de arts. Vanwege de genoemde variaties kan er niet één waarde voor de beschermingsfactor

⁴³ Privécommunicatie D. Zweers, afd. Radiologie, LUMC, mei 2014.

van een loodglasbril worden gegeven. Gemiddeld over verschillende operators en procedures zijn dosisreductiefactoren van 2,1 voor het oog aan de buiszijde en 0,8 (geen significante dosisreductie) voor het oog aan de niet-buiszijde gevonden⁴⁴. Met name van belang is goede afscherming door de bril rondom; uit boven aangehaald onderzoek blijkt, dat door schuine zijwaartse of onderlangs komende instraling de bescherming soms te wensen over laat. Door het optimaliseren van de geometrie van de opstelling, bijvoorbeeld door de monitor op een andere positie te brengen, kan schuine instraling worden verminderd.

Van een werkgever mag worden verwacht en gevraagd dat deze een veilige werkplek aanbiedt en dat wettelijke dosislimieten worden gehandhaafd. In die zin is in de Nederlandse praktijk op bovenbeschreven wijze – mits men zich daar ook aan houdt – te voorkomen dat stralingswerkers door hun werk cataract zullen krijgen. Tenslotte ter vergelijking: in Nederland springt bij patiënten de diagnose staar bij het specialisme oogheelkunde er uit. In 2012 kwamen circa 143.000 patiënten met deze diagnose bij een ziekenhuis, waarmee dit de meest voorkomende diagnose in Nederland is. Hiervan kregen een kleine 80.000 patiënten een operatie.

5.2.5 Gelaatsscherm

Deze heeft de functie van de loodglasbril en beschermt bovendien tegen spatten. Niet iedereen werkt er prettig mee, onder andere optische vervorming kan vervelend zijn. Naar patiënten toe kan het onprettig overkomen.

5.2.6 Loodmuts

Dit is een soort muts over het hoofd (0,5 mm Pb-eq.) die samen met een loodglasbril het hoofd meer volledig afschermt⁴⁵.

5.2.7 Loodhandschoenen

Verkrijgbaar in de diktes dun (transmissie 55-65%) of dik (transmissie 45-55%) voor buisspanningen van 60-80 kV. Hersterilisatie is mogelijk. In de praktijk is het gebruik hiervan zelden nodig of nuttig. Soms is gebruik zelf contra-productief, omdat de belichtingsautomaat gaat bijregelen “om door de handschoen heen te stralen”, waardoor de patiëntdosis toeneemt.

⁴⁴ B.D. van Rooijen et al.: Efficacy of Radiation Safety Glasses in Interventional Radiology. Cardiovasc. Intervent. Radiol. (CIRCE) Nov. 2013, DOI 10.1007/s00270-013-0766-0

⁴⁵ E. Kuon, J. Birkel, M.Schmitt and J.B. Dahm. Radiation exposure benefit of a lead cap in invasive cardiology. Heart, Oct. 2003; 89: 1205-1210

5.3 Beschermingsmiddelen in de werkruimte

5.3.1 Loodglas aan plafond

Dit is een onmisbare voorziening bij elke interventieopstelling en levert een aanzienlijke dosisreductie voor de werker, vooral als het scherm (met halfronde uitsparing) goed wordt aangesloten op de patiënt.

5.3.2 Verrijdbaar scherm

Mobiele schermen op zwenkwielen met doorgaans 2 mm lood kunnen goed inzetbaar zijn. Sommige modellen hebben uittrekbare loodglasdelen, soms ook voorzien van halfronde uitsparingen om tegen de patiënt aan te zetten voor goede zichtbaarheid op het werk.

5.3.3 Loodlamellen

Loodlamellen aan de tafel kunnen de stralingsbelasting voor de werker aanzienlijk verlagen. Hetzelfde geldt voor lamellen aan de beeldverstevker bij bepaalde toepassingen.

5.3.4 Cabine

Door een verrijdbare cabine te gebruiken, hoeft geen loodschort te worden gedragen. Gesuggereerd voor gebruik bij cardiologische elektrofysiologische procedures. Zie www.lemerpax.com

5.3.5 Loodcape aan statief

Voor werkers met ernstige rugklachten zijn er loodschorten die aan een statief zijn opgehangen⁴⁶, zodat er weinig gewicht te dragen is.

5.3.6 Afscherming op de patiënt

Soms worden loodschorten (of andere afschermende hulpmiddelen) gebruikt om patiënten (bijvoorbeeld een heupschort bij staande thoraxopnames) of helpers/verzorgenden af te schermen tegen verstrooide straling (het afschermen van de primaire bundel is in principe contraproductief omdat de belichtingsautomaat hierop reageert).

Onder stralingsdeskundigen zijn de meningen over nut/noodzaak soms verdeeld. Los van de (soms lastig te kwantificeren) vraag tot hoever het ALARA-principe moet worden toegepast voor op zich geringe risico's, speelt ook de risicoperceptie een rol. Enerzijds wordt gesteld, dat bij-

⁴⁶ Low Back Pain, Lead Aprons and the Angiographer. AJNR Am. J. Neuroradiol. July 1, 1999, 21(7):1364

voorbeeld het gebruiken van een (heup)loodschort bij staande thoraxopnames bestaande angsten bevestigt, anderzijds wordt belang gehecht aan de “psychologische waarde” hiervan: “*we care for you*”. Belangrijk is in ieder geval om hierin een eenduidig beleid te voeren ter voorkoming van verwarring en ongerustheid, zowel bij patiënten als medewerkers. Het bovenstaande is evenzeer van toepassing op het gebruik (of niet) van gonadenafscherming.

Er zijn afdekkende (disposable) sheets in de handel (zoals Radpad® en Ecolab®) waarmee delen van patiënten kunnen worden bedekt, zodat de arts minder strooistraling ontvangt. Of dit in de praktijk goed werkt is nog niet geheel duidelijk, in sommige ziekenhuizen wordt hier op proef mee gewerkt. Recente metingen⁴⁷ laten zien, dat er in sommige situaties (pacemaker-implantatie (75-80%) en EVAR-procedures (30-66%)) relevante dosisreductie voor betrokken werkers kan worden bereikt, hoewel minder dan door de fabrikanten wordt aangegeven. Bij CAG-procedures bleek het gebruik minder zinvol. De toegevoegde waarde van afdekkende sheets is het grootst, indien geen loodglasscherm kan worden gebruikt.

⁴⁷ M.C.M. Lagerweij, I. Syntychakis, Zorgtechnologie Isala. Poster op IRPA-congres, Genève, 23-27 juni 2014

6 *Biologische effecten van ioniserende straling*

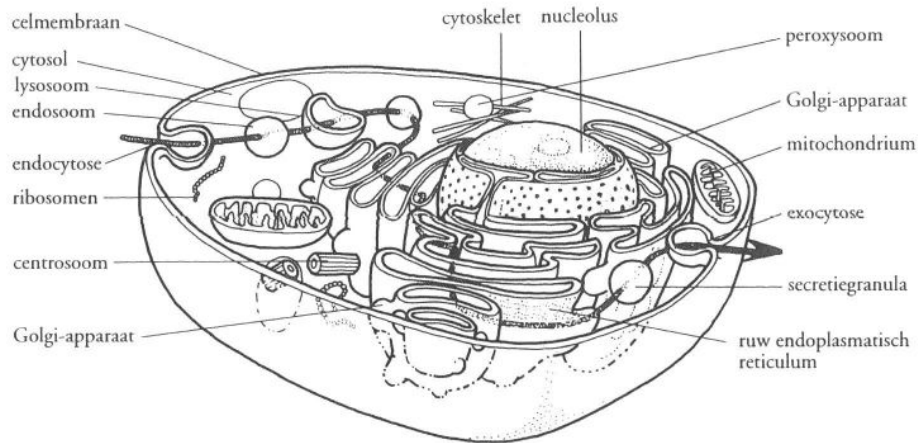
J. Wondergem, G. van den Aardweg en S. van Dullemen (latere aanvullingen en correcties). Er is gebruik gemaakt van een collegedictaat van P.P.W. van Buul (genetische effecten).

6.1 Inleiding

De verschillende invalshoeken betreffende het ontstaan van stralingschade en de diverse effecten op het menselijk organisme worden besproken. Specifieke aandacht wordt gegeven aan risico's bij foetale blootstelling aan ioniserende straling en aan effecten op het nageslacht.

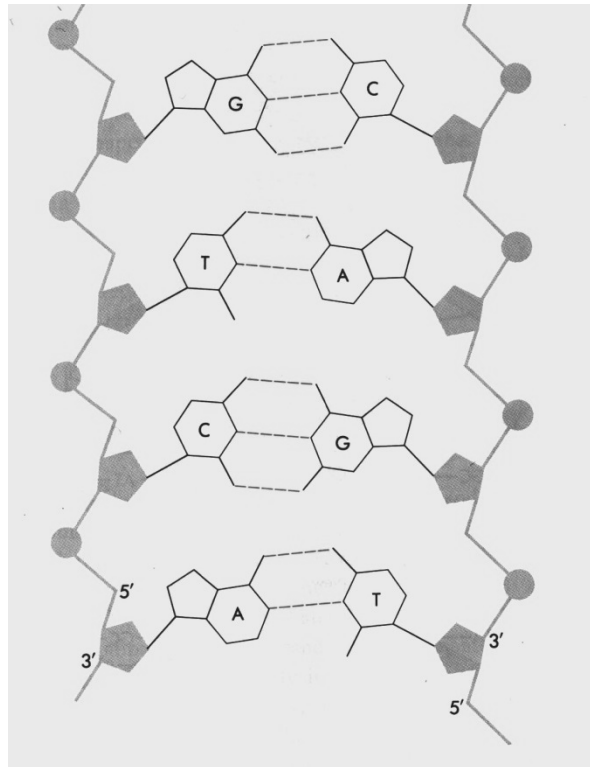
6.1.1 De cel

De cel wordt beschouwd als de kleinste, min of meer zelfstandig functionerende eenheid, waaruit alle organismen of levende wezens zijn opgebouwd. Een groep cellen met dezelfde kenmerken vormen samen een weefsel, bijvoorbeeld spier-, bot- of zenuwweefsel. Organen zijn opgebouwd uit een aantal gespecialiseerde celtypen. Het orgaan als geheel heeft ook weer een gespecialiseerde functie. De cel bestaat onder meer uit een celmembraan, dat de celinhoud omhult en het cytoplasma waarin (behalve bij bacteriën) een celkern aanwezig is (*Figuur 1*). De celmembraan is de verbinding van het cytoplasma met het buitenmilieu van de cel. Signaalprikkelers van en naar buiten gaan via de celmembraan. Het cytoplasma bestaat uit vloeistof, het cytosol en diverse celorganellen (bepaalde structuren in de cel). De verschillende functies in de cel zijn nauw verbonden met opname van stoffen (endocytose) via de celmembraan, waarna versmelting volgt met lysosomen voor synthese en vertering. De uitscheiding (exocytose) van afvalproducten gebeurt weer via de celmembraan. Mitochondriën zorgen voor de energievoorziening van de cel.



Figuur 1. Schematische weergave van een cel met cellkern en organellen. De route van opname, synthese en uitscheiding van stoffen is aangegeven.

De celkern bevat de erfelijke informatie, die opgeslagen is in het DNA (desoxyribonucleïnezuur) van de chromosomen. Het DNA bestaat uit zeer lange moleculen waarvan de organische stikstofbasen **adenine (A)**, **guanine (G)**, **cytosine (C)**, en **thymine (T)** de belangrijkste componenten vormen. Door een precieze “matching” van enerzijds adenine met thymine en anderzijds cytosine met guanine worden twee lange complementaire DNA-moleculen via waterstofbruggen bij elkaar gehouden, waarbij bovendien een draaiing optreedt, zodat een soort “wenteltrap” wordt gevormd met de waterstofbruggen en stikstofbasen als “traden” Een dergelijke structuur noemt men dubbele helix (*Figuur 2*).



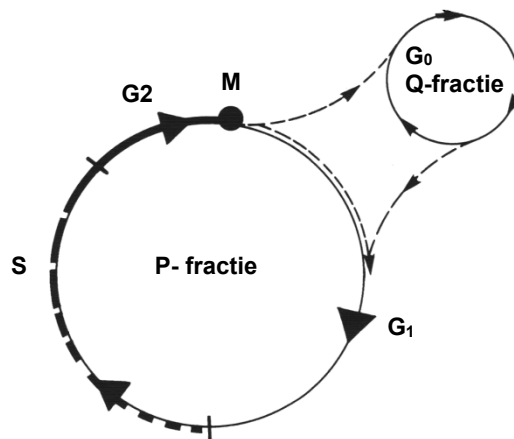
Figuur 2. DNA-dubbele-helix waarbij de baseparen en de waterstofbruggen de 'treden' van de trap vormen. De gestreepte verbindingslijnen in het midden stellen de waterstofbruggen voor; de vijfhoeken links en rechts in de keten zijn de ribosegroepen en de rondjes stellen de verbindende fosfaatgroepen voor.

Op deze manier wordt de volgorde van de basen op de ene streng dus volledig bepaald door de basenvolgorde op de andere streng en vice versa. Het menselijk DNA bevat per cel in totaal 3 miljard baseparen. De hoeveelheid DNA die de informatie bevat voor de productie van één soort eiwit wordt een gen genoemd. Bij de mens wordt het totaal aantal genen geschat op ongeveer 23.000. De erfelijke informatie wordt vertaald in het RNA, dat uit de celkern naar het cytoplasma wordt getransporteerd door de kernmembraan. Dit RNA wordt samen met de ribosomen gebruikt voor de eiwitsynthese aan het ruw endoplasmatisch reticulum.

6.1.2 Celdelingscyclus

De celcyclus ligt aan de basis van elke vorm van leven. De celcyclus is een opeenvolging van fysiologische en structurele gebeurtenissen die resulteren in de eigenlijke celdeling, de mitose. Na de mitose zijn er twee dochtercellen ontstaan die identiek zijn aan de moedercel. In de celcyclus kunnen verschillende fasen worden onderscheiden: de **G₁**, **S**, **G₂** en **M-fase** (Figuur 3). De G₁, S en G₂ fase vormen de interfase tussen twee opeenvolgende delingen. Niet-delende cellen zijn in de rustfase, de **G₀-fa-**

se. Als cellen in deling gaan komen ze vanuit de rustfase in de **G₁-fase**. Tijdens deze fase treedt er plasmagroei op, vermeerdering van celorganellen en productie van eiwitten. Daarna, tijdens de **S-fase**, wordt er nieuw DNA gesynthetiseerd en wordt de DNA-inhoud verdubbeld; er worden chromatiden en centromeren gevormd. Na de S-fase gaan de cellen door naar de **G₂-fase**. In deze fase wordt het nieuw gesynthetiseerde DNA gecontroleerd op fouten en vindt de voorbereiding voor de mitose plaats, zoals productie van eiwitten en vermeerdering van celorganellen. Na de eigenlijke celdeling, de **mitose**, kunnen de nieuwe dochtercellen ofwel opnieuw een celcyclus doorlopen, ofwel wat betreft de delingsactiviteit in ruste gaan (G₀-fase).



Figuur 3. Delende (prolifererende) cellen doorlopen in een vast patroon de celcyclus van mitose (M) tot mitose. Na deling kunnen de cellen doorgaan met een volgende celdeling of in ruste gaan. Alle rustende cellen tezamen vormen de Q-fractie (quiescent = in ruste). Alle delende cellen tezamen vormen de P-fractie (P van prolifererend).

Het is van groot belang dat de biochemische processen die noodzakelijk zijn voor het verloop van de ene fase, volledig uitgevoerd zijn voordat de volgende fase aanvangt. Voor deze strikte regulatie van de celdeling zijn verschillende celcyclus-controlepunten en feedbackmechanismen in de celcyclus ingebouwd.

6.2 Basisbegrippen radiobiologie

6.2.1 Interactie van ioniserende straling met biologisch materiaal

Wanneer biologisch materiaal wordt blootgesteld aan ioniserende straling treedt er interactie op tussen de straling en die materie. Wisselwerking van gamma- en röntgenstraling met materie verloopt via het foto-elektrisch effect en het comptoneffect. Via deze processen ontstaan energie-

rijke elektronen die hun energie vooral verliezen door middel van excitaties en ionisaties van de atomen langs het ionisatiespoor. Biologisch materiaal bestaat voor 70 tot 90% uit water. De producten, die bij bestraling van water ontstaan zijn daardoor sterk bepalend voor de uiteindelijke hoeveelheid stralingsschade. Bij ionisaties van watermoleculen ontstaan via een aantal tussenstappen chemisch instabiele atomen en moleculen die men radicalen noemt. Deze deeltjes zijn zeer reactief en kunnen de structuur van biomoleculen, zoals eiwitten, enzymen, vetten, suikers en dergelijke wijzigen. Door de gewijzigde structuur is het molecuul niet meer functioneel. In het bijzonder schade aan DNA, dat in de celkern aanwezig is, kan leiden tot diverse biologische effecten. Het DNA in de celkern bevat informatie die vitaal is voor het functioneren en de reproductie van de cel.

6.2.2 Radicaalvorming

Wanneer gevolgen van blootstelling aan straling klinisch waarneembaar zijn, heeft er al een reeks van processen plaatsgevonden die op atomair niveau begint met excitaties, ionisaties en de vorming van radicalen. Ionisaties kunnen leiden tot het ontstaan van chemisch instabiele atomen en moleculen die men radicalen noemt, doordat een elektron weggeschoten wordt en het getroffen atoom of molecuul daardoor een elektron tekort komt. Waterstof-(H^{\bullet}) en hydroxyl-(OH^{\bullet}) radicalen, die ontstaan door ionisatie van water (radiolyse), kunnen gemakkelijk chemische bindingen vormen met naburige atomen en moleculen, bijvoorbeeld DNA. Het DNA kan daarom zowel direct worden beschadigd door de ioniserende straling als indirect veranderingen ondergaan door reacties met de in de nabijheid gevormde radicalen. De meeste radicalen recombineren echter al binnen een fractie van een seconde of worden weggevangen door zogenoemde “scavengers” zoals vitamine C, vitamine E en SH-groepen bevattende verbindingen. Een deel van de gevormde radicalen leidt binnen één seconde na blootstelling aan straling tot chemisch gemodificeerde moleculen.

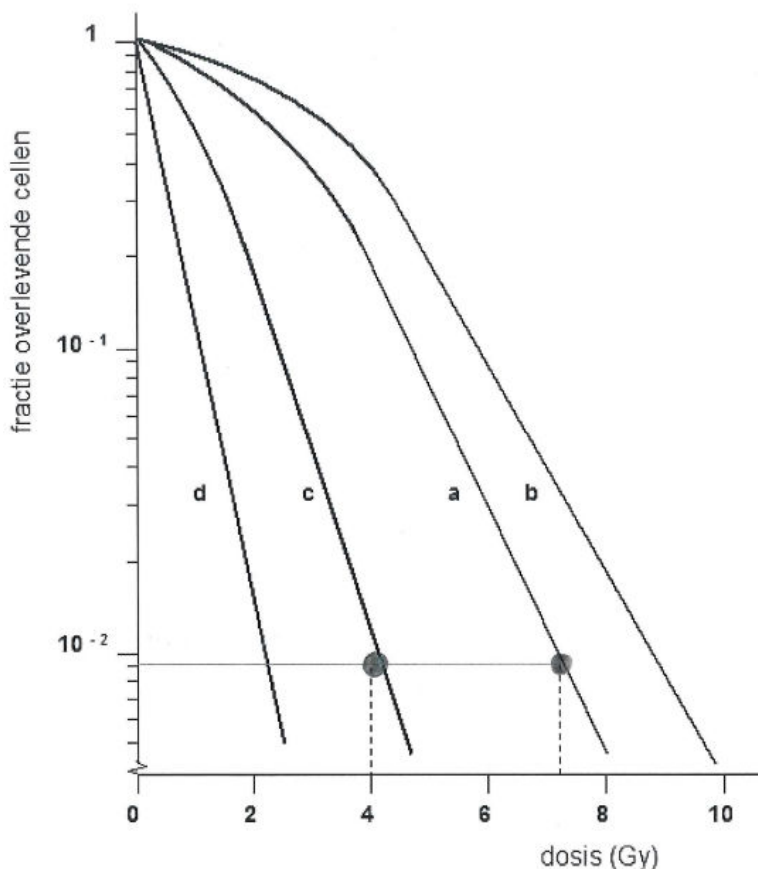
6.2.3 Relatieve Biologische Effectiviteit (RBE)

De grootte van een biologische effect is niet alleen afhankelijk van de hoeveelheid geabsorbeerde energie per massa eenheid (geabsorbeerde dosis), maar ook van de ruimtelijke verdeling van de energieafgifte. De lineieke energieoverdracht (LET: Linear Energy Transfer), is de energie die een ioniserend deeltje per eenheid van weglengte afgeeft aan materie en wordt uitgedrukt in de eenheid kiloelektronvolt per micrometer ($keV/\mu m$). De LET-waarde voor zware deeltjes (protonen, neutronen, alfadeeltjes) is veel groter dan voor fotonen en elektronen, omdat zware

deeltjes hun energie over een veel kortere weglengte overdragen. Bovendien gaat de energieoverdracht direct naar de in de cel aanwezige (bio)-moleculen zonder tussenkomst van water. Een gevolg hiervan is dat de stralingsschade in de cel ten gevolge van ionisaties sterk geconcentreerd wordt en daardoor minder goed kan worden hersteld. Hoge-LET-straling heeft daardoor een grotere biologische effectiviteit dan lage-LET-straling. De RBE van een stralingssoort is gedefinieerd als de verhouding van de dosis van 250kV-röntgenstraling (de referentiestraling) tot de dosis van de stralingsbron waarvoor de RBE wordt berekend, die hetzelfde biologische effect teweeg zal brengen.

$$RBE = \frac{\text{Dosis (Gy) van de referentiestraling, voor een bepaald effect}}{\text{Dosis (Gy) van de beschouwde stralingssoort, voor datzelfde effect}}$$

In *Figuur 4* is te zien hoe de RBE uit de overlevingscurven van cellen in celkweek, na bestraling met verschillende soorten straling, kan worden bepaald. In *figuur 4* is de RBE voor neutronen $7,2 \text{ Gy} / 4 \text{ Gy} = 1,8$. Naast de LET is de RBE ook afhankelijk van factoren zoals de zuurstofconcentratie, herstelcapaciteit van de cellen en de toegediende stralingsdosis.



Figuur 4. Overlevingscurven van een bepaald type zoogdiercellen na bestraling met:
a. 250kV-röntgenstraling (referentiestraling)
b. gammastraling van Co-60
c. 3MeV-neutronen
d. 5,3MeV-alfastraling.

6.2.4 Zuurstofeffect (OER)

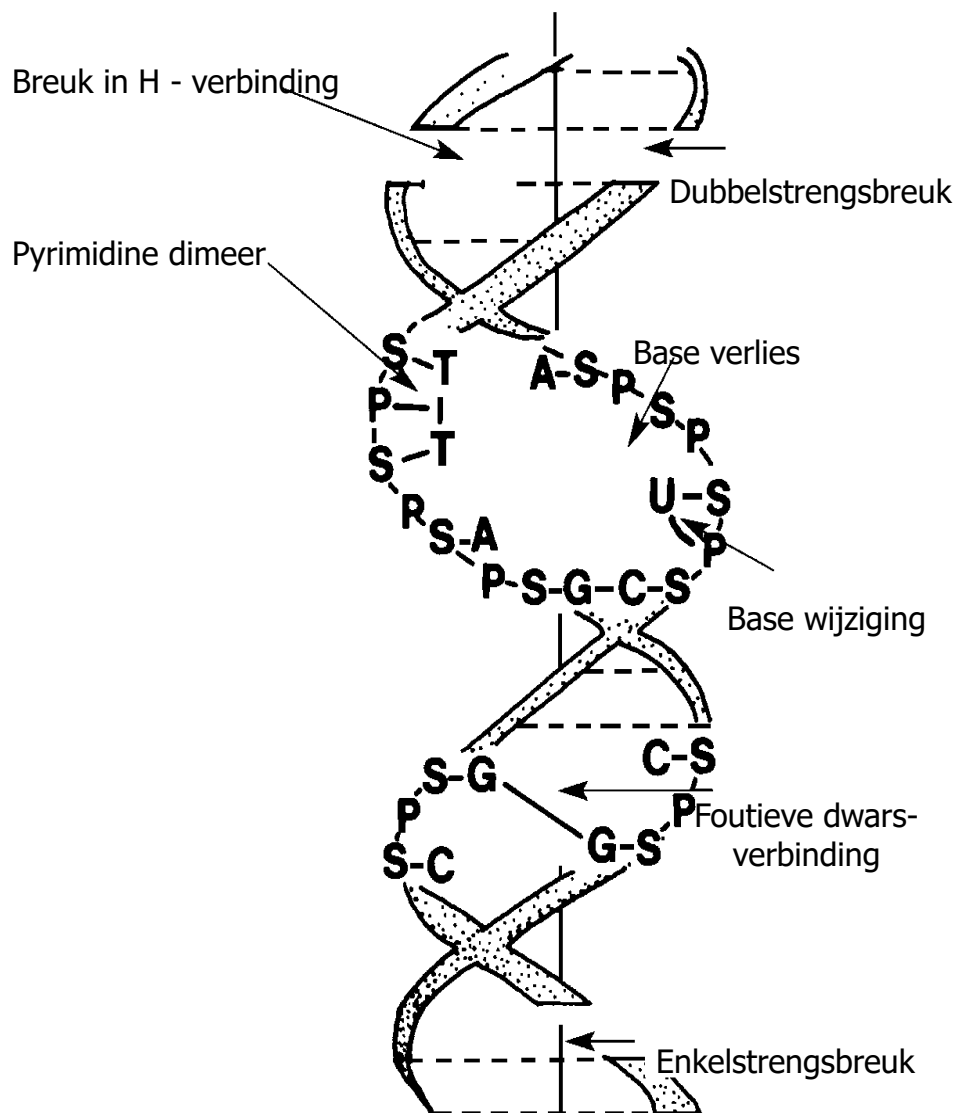
Een van de belangrijkste factoren die invloed heeft op de hoeveelheid schade die wordt veroorzaakt in een cel door bestraling met lage-LET-straling is de aanwezigheid van zuurstof. In afwezigheid van zuurstof (totale anoxie, zoals in sommige tumorgebieden) moet een stralingsdosis circa driemaal hoger zijn om een even groot biologisch effect te verkrijgen in vergelijking met de dosis die nodig is om eenzelfde effect te verkrijgen in aanwezigheid van zuurstof. De verhouding van de stralingsdosis in af- of aanwezigheid van zuurstof wordt zuurstofversterkingsfactor genoemd (OER: Oxygen Enhancement Ratio). Dit verschil wordt veroorzaakt doordat in aanwezigheid van zuurstof reactieve zuurstofradicalen – peroxy-radicalen – worden gevormd tijdens de bestraling. In de radiotherapie (weefselreacties) moet met dit effect rekening worden gehouden, in de diagnostiek (stochastische effecten) speelt het vrijwel geen rol.

6.3 (Sub)cellulaire stralingseffecten

6.3.1 DNA-schade

Beschadiging van DNA-moleculen kan invloed hebben op de erfelijke eigenschappen van (geslachts)cellen, op delingseigenschappen van de cel en uiteindelijk op de celoverleving. Andere fysiologisch actieve moleculen worden evenzeer chemisch gemodificeerd, maar de cel kan: a) veel meer schade van deze moleculen verdragen voordat functionele tekorten optreden, en b) deze moleculen zijn eenvoudig te vervangen. De belangrijkste beschadigingen (*Figuur 5*) die onder invloed van ioniserende straling in het DNA ontstaan zijn:

- schade aan stikstofbasen;
- schade aan onderlinge verbindingen tussen strengen;
- breuken in één van de DNA strengen: enkelstrengsbreuken;
- breuken in beide DNA strengen: dubbelstrengsbreuken.



Figuur 5. Diverse typen van schade in het DNA na bestraling.

6.3.2 Herstel van DNA-schade

Bij een mens treden circa 10.000 spontane lesies per cel per dag op. Daarom zijn er DNA-herstelmechanismen aanwezig die het DNA kunnen repareren. Afhankelijk van de aard en mate van de schade kan herstel plaatsvinden binnen enkele minuten tot uren na blootstelling aan ioniserende straling. De voor de cel belangrijkste herstelmechanismen zijn:

- Base excision repair; herstel van schade aan baseparen;
- Nucleotide excision repair; herstel van een beschadigd nucleotide;
- Non homologous endjoining; herstel van dubbelstrengsschade;

- Homologe recombinatie; herstel van dubbelstrengsschade (alleen in de late S- en G₂-fase van de celcyclus);
- Mismatch repair; foutieve reparatie van verkeerd of niet ingevoegde basen tijdens de mitose.

Blijvende of verkeerd herstelde schade kan leiden tot celdood of mutaties.

6.3.3 Celschade

Schade die door ioniserende straling in (zoogdier)cellen is geïnduceerd kan op verschillende manieren tot uiting komen.

a) mitose-uitstel: de voortgang van de celcyclus kan worden vertraagd, vooral in de fase kort voor de mitose (G₂-fase). Na deze periode kan de cel weer deelnemen aan de celcyclus en eventueel een kloon van dochtercellen produceren.

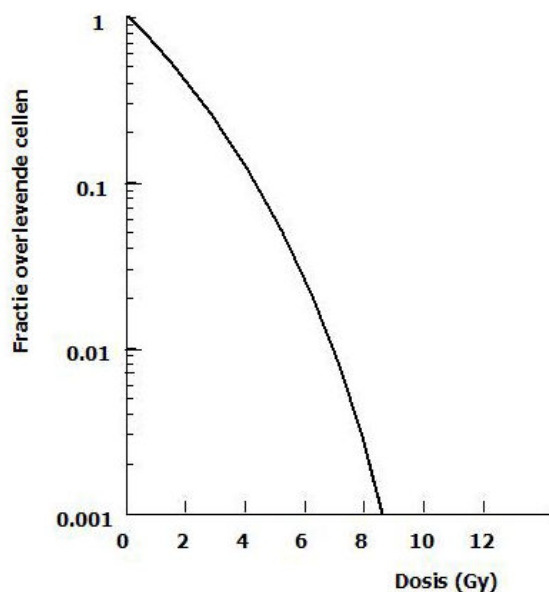
b) celdood: hierbij kunnen zich verschillende mogelijkheden voordoen.

- Een cel kan, zonder een poging tot deling te doen, desintegreren. Deze wijze van doodgaan wordt interfase-dood of apoptose genoemd; ook wel gereguleerde celdood. Dit effect ziet men bij sommige celtypen al na lage doses: bijvoorbeeld lymfoïde cellen en spermatogonia.
- Een cel kan, na een periode van enkele uren uitstel, in mitose gaan, maar de deling verloopt abnormaal en er ontstaan twee niet-vitale dochtercellen wat resulteert in mitosedood.
- Een cel kan éénmaal of enkele keren een succesvolle mitose doormaken, maar tenslotte blijken geen van de dochtercellen tot verdere deling in staat te zijn.
- In opeenvolgende generaties dochtercellen kan meer celdood optreden dan normaal, terwijl toch uiteindelijk een zeer groot aantal dochtercellen overleeft.

6.4 Effecten van dosis, fractionering en dosistempo

Veel inzicht over de biologische effecten van straling is verworven dankzij bestralingsexperimenten op celkweken met een “oneindig” vermogen tot deling. Na bestraling van cellen in kweek gaat een deel van de cellen dood of verliest het vermogen tot ongeremde groei en is niet meer in staat om tot een kolonie uit te groeien. Telling van het aantal kolonies, die ontstaan uit cellen die na bestraling overleven, is een veel gebruikte methode om celoverleving te bepalen. De celoverlevingscurve geeft de relatie tussen de hoogte van de stralingsdosis en celoverleving weer (*Fi-*

guur 6). Door deze op een semi-logaritmische schaal weer te geven, ontstaat een curve die bij lage dosis een zogenoemde “schouder” vertoont en bij hogere dosis een veel steiler verloop laat zien, de “helling” van de curve. Het optreden van een schouder in de celoverlevingscurve wordt toegeschreven aan het feit dat binnen een bepaald dosisgebied DNA-schade efficiënter gerepareerd kan worden. Bij hogere doses is de schade dermate groot dat dit minder efficiënt plaatsvindt.



Figuur 6. Celoverlevingscurve voor een bepaald type cellijn na bestraling. Alleen bij hogere doses is er een (schijnbaar) lineair verband tussen de dosis en de fractie overlevende cellen.

Naast de dosis zijn twee andere factoren belangrijk voor de celoverleving: (a) het aantal fracties waaruit de totaaldosis is opgebouwd, en (b) de tijdsduur waarbinnen de stralingsdosis wordt toegediend.

- a) Bij gefractioneerde bestraling wordt de totaaldosis niet éénmalig gegeven maar in verschillende fracties verspreid over een zekere tijdsperiode. In de tijd tussen de verschillende fracties (in de radiotherapie is dit standaard 24 uur) kan DNA-schade worden hersteld door diverse herstelprocessen. Bij gefractioneerde bestraling zal de mate van “repareerbare” beschadigingen groter zijn dan wanneer diezelfde dosis niet-gefractioneerd wordt gegeven. Het aantal overlevende cellen zal dus groter zijn na gefractioneerde bestraling dan na eenmalige bestraling.
- b) Het effect van het dosistempo is eveneens van invloed op het aantal overlevende cellen. Na acute blootstelling van bijvoorbeeld 2 Gy in 1 min zullen veel minder cellen overleven dan na een langduriger blootstelling aan 2 Gy in 4 uur. Bij langduriger blootstelling aan stra-

ling krijgen herstelprocessen meer gelegenheid om gedurende de langere stralingstijd de stralingsschade te herstellen met als gevolg minder mutaties en celdood. Een voorbeeld van langdurige (chronische) blootstelling aan straling is de natuurlijke achtergrondstraling. Ook in het lichaam opgenomen en geïncorporeerde radionucliden kunnen langdurige dosisafgifte veroorzaken.

6.5 Effecten van straling op de mens

De UNSCEAR en de ICRP onderscheiden twee typen schadelijke effecten van blootstelling aan ioniserende straling bij mensen. De eerste groep wordt gevormd door tumorinductie (carcinogenese) en genetische schade, die beide kunnen worden ingeleid door een klein aantal mutaties in DNA. Bijgevolg geeft de kleinste hoeveelheid ioniserende straling in een omvangrijke populatie cellen altijd een zekere, hoewel kleine, kans op schadelijke veranderingen bij een enkele cel. Tumorinductie en genetische effecten noemt men derhalve stochastische of kansgebonden schade. Bij toenemende dosis neemt de **kans** op tumoren en genetische schade toe. De ICRP gaat er veiligheidshalve van uit, dat de relatie tussen dosis en stochastisch effect lineair is (de zogenoemde linear non-threshold, LNT-hypothese) waarbij wordt aangenomen, dat er geen drempeldosis is. Volledigheidshalve moet worden vermeld, dat de (soms stevige) discussie over de validiteit van de LNT-hypothese nog steeds wordt gevoerd^{48 49}.

Na blootstelling aan voldoende hoge doses ($D > 0,5$ Gy) is de expressie van weefsel- en orgaanschade geassocieerd met het verlies van delingsvermogen en het afsterven van grotere aantallen cellen, hetgeen vrijwel zeker leidt tot expressie van schade. Bij toenemende dosis neemt de ernst van de aangebrachte schade toe. Voor elk effect in deze categorie, zoals haaruitval (epilatie) en stralingsschade aan de huid, geldt een bepaalde drempeldosis. Zolang de ontvangen dosis de drempelwaarde voor optreden van het effect niet overschrijdt, wordt het effect niet waargenomen. Boven de drempeldosis zal dit effect **vrijwel zeker** optreden, waarbij de **ernst** van het effect is gerelateerd aan de ontvangen stralingsdosis.

De schade die men kan verwachten na een zekere blootstelling aan ioniserende straling is onder andere afhankelijk van de stralingsdosis:

- Bij lage stralingsdoses ($D < 0,1$ Gy) is er alleen kans op het optreden van stochastische effecten. De grootte van deze kans kan

⁴⁸ <http://www.sciencemag.org/news/2011/10/attack-radiation-geneticists-triggers-furor>

⁴⁹ Siegel et al. Dose Optimization to Minimize Radiation Risk for Children Undergoing CT and Nuclear Medicine Imaging Is Misguided and Detrimental. *J Nucl Med* 2017; 58:865-868; doi: 10.2967/jnumed.117.195263

voor een individu berekend worden uit de effectieve dosis en een risicogetal. Bij toenemende dosis neemt de kans op stochastische effecten ook toe.

- Bij een hogere dosis (vanaf 0,1 Gy) zullen bij het overschrijden van bepaalde orgaanspecifieke drempeldoses, naast een toenemende kans op stochastische effecten, weefselreacties optreden, die naarmate de geabsorbeerde dosis hoger is, ernstiger vorm zullen aannemen.

6.6 Stochastische (kansgebonden) effecten

6.6.1 Inleiding carcinogenese

Het belangrijkste gezondheidseffect op de lange termijn na blootstelling aan relatief lage doses ioniserende straling is de verhoogde kans op kanker. De ontwikkeling van kanker is een complex proces dat uit verscheidene opeenvolgende stappen bestaat en doorgaans een aantal jaren in beslag neemt. De vormen van kanker die worden gevonden na blootstelling aan ioniserende straling zijn in het algemeen niet te onderscheiden van “spontaan” (zonder direct aanwijsbare oorzaak) optredende vormen. Bij het ontstaan van kanker spelen mutaties in DNA-herstelgenen, activatie van proto-oncogenen en/of uitschakeling van tumor-suppressor-genen een belangrijke rol. Blootstelling aan ioniserende straling doet één of enkele stappen in het van nature optredende proces van tumorinductie versneld verlopen. De stapsgewijze veranderingen leiden tot een ontregeling van de mechanismen van de normale celdeling, zodanig dat een aantal klonogene cellen zich ongecontroleerd gaan vermenigvuldigen, leidend tot maligne celwoekeringen en het ontstaan van tumoren.

6.6.2 Epidemiologische gegevens over tumorinductie

Gegevens over het ontstaan van kanker ten gevolge van blootstelling aan ioniserende straling zijn verkregen uit vele radiobiologische experimenten met dieren en uit epidemiologisch onderzoek aan enkele grote groepen mensen die om verschillende redenen aan ioniserende straling zijn blootgesteld:

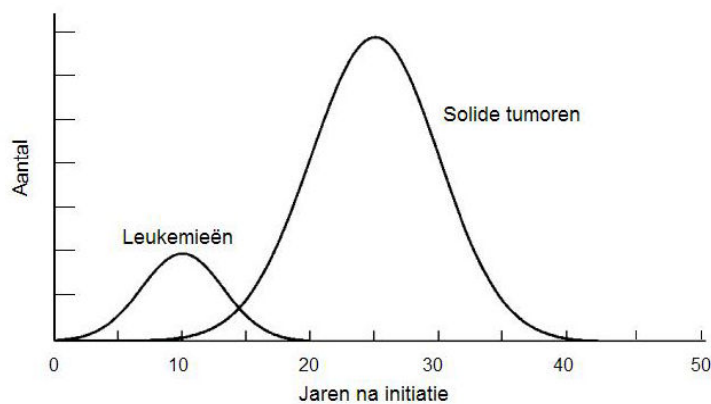
- personen die de explosies van de atoombommen in Hiroshima en Nagasaki hebben overleefd;
- mensen die werden behandeld met externe bundels ioniserende straling (radiotherapie) of radioactieve stoffen voor goedaardige aandoeningen, zoals ontstekingen van de mammae, ziekte van

Bechterew, ringworm (tinea capitis), zuigelingen met een vergrote schildklier;

- mensen die voor diagnostische doeleinden aan ioniserende straling werden blootgesteld, zoals herhaaldelijk doorlichten ten behoeve van tuberculose-onderzoek;
- mensen die beroepshalve aan ioniserende straling werden blootgesteld, zoals mijnwerkers in uraniummijnen en radiologen uit de begintijd van de medische toepassing van ioniserende straling.

6.6.3 Latente- en risicoperiode

Op basis van het epidemiologisch onderzoek bij de slachtoffers van de atoombommen (Life Span Studies) zijn vooral risicoschattingen voortgekomen. Uit al deze gegevens bleek dat het enkele tot vele tientallen jaren kon duren voordat een stralingsgeïnduceerde tumor manifest werd. Men noemt deze periode de latente periode. Elke vorm van kanker kent een specifieke latente periode. Onderzoek bij overlevenden van de atoomexplosies in Japan laat zien, dat de eerste gevallen van leukemie pas na een periode van ongeveer 3 jaar tot expressie komen (de minimum latente periode). De laatste gevallen werden waargenomen na een periode van circa 25 jaar. De maximale latente periode voor het optreden van leukemie bedraagt dus 25 jaar. Van 3 tot 25 jaar na blootstelling aan ioniserende straling bestaat dus het risico dat een leukemie tot expressie kan komen, de risicoperiode. Leukemie komt na een relatief korte latente periode tot expressie. Wanneer de leukemie-incidentie begint af te nemen, gaat de frequentie van andere tumoren juist toenemen (Figuur 7). Voor deze vormen van kanker bedraagt de latente periode minimaal 10 jaar en de risicoperiode is dermate lang dat we zeggen, eigenlijk voor de rest van het leven.



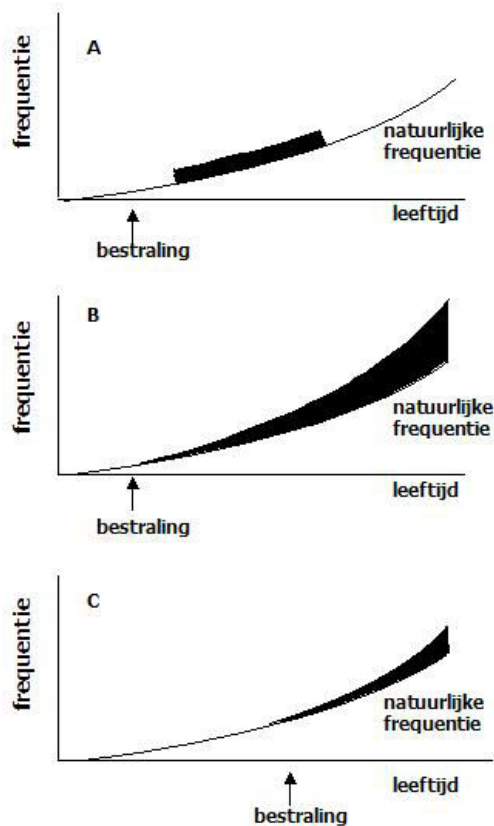
Figuur 7. Ontstaan van tumoren als functie van het aantal jaren na initiatie door ioniserende straling.

6.6.4 Absoluut en relatief risicomodel

Het ontstaan van kanker is een veel voorkomende gebeurtenis in een populatie van mensen. Gedurende het gehele leven bestaat er een bepaalde kans om een bepaald type kanker te krijgen. Leeftijd, geslacht, hormoonstatus etc. spelen hierbij een belangrijke rol. Om stochastische effecten te kwantificeren zijn risicoschattingen nodig, waarbij de “extra” kans op kanker gerelateerd moet worden aan de blootstelling. Werd vroeger (ICRP-1977) gebruik gemaakt van het absoluut risicomodel, de laatste risicoschattingen (ICRP-1991) zijn berekend met het relatief risicomodel.

In het absoluut (of additief) risicomodel wordt verondersteld, dat het aantal extra tumoren als gevolg van blootstelling aan ioniserende straling, onafhankelijk is van de leeftijd van de personen ten tijde van de bestraling. De totale incidentie is dan de som van de natuurlijke incidentie en de constante bijdrage ten gevolge van de ontvangen dosis (*Figuur 8A*). Deze constante bijdrage ten gevolge van straling kan gelden voor de rest van het leven (verhoogde kans op solide tumoren) of tijdelijk (alleen een verhoogde kans tijdens de risicoperiode, bijvoorbeeld bij leukemie).

In het relatief (of multiplicatief) risicomodel speelt de leeftijd waarop iemand wordt blootgesteld aan ioniserende straling een belangrijke rol. In dit model leidt blootstelling aan straling tot een relatieve verhoging van de incidentie van kanker, ten opzichte van de natuurlijke incidentie. Hierbij wordt de natuurlijke frequentie vermenigvuldigd met een bepaalde factor. De grootte van deze factor is afhankelijk van de dosis. Hoe jonger iemand is ten tijde van de blootstelling, des te hoger is de kans om kanker te krijgen (*Figuur 8B en C*). Risicoschattingen uitgevoerd met dit laatste model leiden in het algemeen tot hogere risicogetallen. Voor de gemiddelde mens wordt de kans op overlijden door kanker ten gevolge van blootstelling van het gehele lichaam aan ioniserende straling geschat op 5% (5×10^{-2}) per sievert (Sv). Dit betekent dat een individu na blootstelling aan een dosis van 1 Sv een “extra” kans heeft van 5% om voortijdig te overlijden aan kanker. Kinderen zijn gevoeliger dan de “gemiddelde” volwassen mens wat betreft stralingsgeïnduceerde tumoren.



A. Absoluut risicomodel. Toename van tumorexpressie met een constante waarde over de tijdsperiode tussen minimale en maximale latente periode.

B. Relatief risicomodel. Toename van tumorexpressie met percentage van de natuurlijke frequentie, personen bestraald op jonge leeftijd.

C. Relatief risicomodel. Toename van tumorexpressie met percentage van de natuurlijke frequentie, personen bestraald op latere leeftijd.

Figuur 8. Absoluut risicomodel (A) en relatief risicomodel (B) voor de inductie van tumoren.

6.7 Weefselreacties

6.7.1 Inleiding

In de meeste organen en weefsels is een continu proces van celverlies en aanmaak van nieuwe cellen gaande. Blootstelling van organen en weefsels aan hogere doses ioniserende straling ($D > 0,5$ Gy) veroorzaakt schade aan een groot aantal cellen, waardoor “extra” celdood optreedt. Als gevolg van dit “extra” celverlies kan de functie van die organen of weefsels gedeeltelijk achteruit gaan, of zelfs verloren gaan. Onder een bepaalde drempeldosis is er geen effect van straling op de functie waar te nemen. Boven die bepaalde drempeldosis echter wel. Hoe hoger de dosis, des te meer cellen beschadigd zullen worden en des te ernstiger het functieverlies zal zijn. Deze effecten kunnen direct of kort na de bestraling optreden, maar het kan ook maanden tot jaren duren voor ze tot uitdrukking komen.

6.7.2 Acute en late stralingsreacties

Onder acute stralingsreacties wordt verstaan die weefselbeschadigingen die binnen enkele dagen tot een paar weken tot uiting komen. Alle snel-delende, epitheliale weefsels, zoals huid (epidermis), slijmvlies van de mond-keelholte, darmepitheel, mannelijke geslachtsorganen, en bloed-vormende organen behoren tot deze categorie. Deze weefsels hebben van nature een hoge delingsfrequentie, waardoor de stralingsschade ook relatief snel tot expressie komt. Ten gevolge van een groot verlies van prolifererende cellen zal er in korte tijd een tekort ontstaan aan functionele cellen, waardoor de integriteit en de functie van het weefsel/orgaan wordt aangetast. In het algemeen is de stralingsreactie van acuut reagerende weefsels/organen slechts van tijdelijke duur en treedt er uiteindelijk herstel op door de aanmaak van nieuwe cellen uit de overlevende stamcellen. Tot de late stralingsreacties worden die weefselreacties gerekend die pas na geruime tijd, maanden of zelfs jaren na bestraling tot expressie komen. Weefsels die tot deze categorie behoren zijn onder andere de ooglenzen, de huid (dermis), het centrale zenuwstelsel, longen, nieren, spierweefsel, hart en het bloedvatstelsel. Aangezien cellen van deze weefsels in het algemeen een lage delingsfrequentie hebben of zelfs helemaal niet meer delen, zal door straling veroorzaakte schade ook laat tot uiting komen. Naast de schade aan deze weefsels en organen zelf ontstaat er nog extra schade door een verminderde bloedvoorziening. De zich ontwikkelende schade aan de bloedvaten leidt er toe dat de door straling beschadigde weefsels/organen minder zuurstof en voedingsstoffen krijgen, wat uiteindelijk zal leiden tot nog meer celdood en necrose. In tegenstelling tot acute stralingsreacties zijn late stralingsreacties niet van tijdelijke aard, maar ontwikkelen zich chronisch progressief. Met andere woorden, na expressie van de schade, zal er geen verbetering van de integriteit/functie van een laat reagerend weefsel/orgaan kunnen optreden maar uitsluitend een verslechtering.

6.7.3 Huid

Bij uitwendige bestraling kan de huid een aanzienlijke dosis ontvangen. De eerste verandering die binnen enkele uren na bestraling optreedt ($D > 2$ Gy), is een voorbijgaande roodheid van de huid (erytheem). Deze roodheid duurt een aantal uren, maar binnen 2-3 weken ontstaat wederom erytheem dat langduriger van aard is. In de menselijke huid treedt erytheem op bij een enkelvoudige dosis van 6-8 Gy röntgen- of gammastraling en bij ongeveer 30 Gy na een standaard (radiotherapeutisch) fractioneringsschema (2 Gy/dag). Met toenemende dosis zijn tevens droge of natte desquamatie (afschilfering, eventueel met blaarvorming) van de epidermis waarneembaar. Andere veranderingen van de epidermis zijn veranderingen in pigmentatie, tijdelijke of permanente ontharing

(epilatie), en verlies van zweet- en talgkliertjes. Bij een enkelvoudige dosis van 3-5 Gy ontstaat tijdelijke epilatie, terwijl bij enkelvoudige doses > 7 Gy permanente epilatie zal optreden. De late effecten van de huid zijn op zijn vroegst enkele maanden na blootstelling waarneembaar en worden veroorzaakt door veranderingen in de dermis. Deze dermale veranderingen zijn progressief en veelal een gevolg van schade aan bloedvaten, waardoor de bloedvoorziening stagneert met als gevolg een afsterven van de epidermis en dermis resulterend in necrose. In een nog latere fase, soms jaren na blootstelling aan straling kunnen fibrose (vorming van overmatig bindweefsel) en teleangiëctasieën (permanent verwijde bloedvaten) ontstaan.

Drempeldoses en tijdschaal voor huidreacties na acute eenmalige bestraling		
Effect	Tijdschaal	Drempeldosis
voorbijgaand erytheem <small>capillairen</small>	uren	2 - 3 Gy
dieper erytheem <small>capillairen</small>	2 tot 4 weken	2 - 5 Gy
tijdelijke (permanente) epilatie <small>haarwortel stamcellen</small>	na 3 weken	> 3 Gy (> 7 Gy)
natte desquamatie <small>huid stamcellen</small>	maand	20 Gy
bloedvaten <small>endothelcellen</small>	maanden	15 Gy
fibrose / necrose <small>Fibroblasten</small>	maanden	15 Gy
atrofie <small>vetcellen</small>	maanden	15 Gy

6.7.4 Long

De reactie van de long na blootstelling aan hoge doses straling kan ingedeeld worden in twee opeenvolgende fasen. De acute fase, radiatiepneumonitis (longontsteking), ontstaat 2-6 maanden na blootstelling. Bij de meerderheid van de slachtoffers/patiënten is deze fase van tijdelijke aard. De late fase ontwikkelt zich meestal na een periode van een jaar en wordt gekenmerkt door toename van bindweefsel in de long (fibrosevorming). Deze fase is echter chronisch en in veel gevallen ook progressief. Een aantal factoren bepaalt de ernst van de acute en late stralingschade in de long: bestraald volume, totale dosis, aantal blootstellingen, duur van de blootstelling en longfunctie vóór de blootstelling aan straling. Chronische fibrosevorming kan uiteindelijk leiden tot een vermin-

derde zuurstofopname door de long. Dit heeft tot gevolg dat de betrokkene kortademig wordt en in zeer ernstige gevallen kan overlijden ten gevolge van ademgebrek of hartproblemen.

6.7.5 Ooglens

De ooglens is één van de meest stralingsgevoelige weefsels in het menselijk lichaam. Bestraling van de ogen kan jaren later een vertroebeling van de ooglens veroorzaken en leiden tot een verminderd gezichtsvermogen. Cataract kan ook aan andere oorzaken te wijten zijn zoals veelvuldige blootstelling aan UV-licht en gebruik van bepaalde medicijnen (bijv. corticosteroiden). Afhankelijk van de plaats in de lens waar de troebeling(en) ontstaan is (zijn), onderscheiden we drie soorten cataract: (1) Nucleair cataract, (2) corticaal cataract, en (3) achterste subcapsulair cataract. Deze laatste soort cataract is karakteristiek voor mensen waarvan de ooglens is blootgesteld aan ioniserende straling en/of corticosteroiden. Bij een acute eenmalige dosis van 0,5 Gy (lage-LET-straling) zijn geringe afwijkingen in de ooglens gevonden, die echter geen significante vermindering van het gezichtsvermogen veroorzaken. Bij hogere doses wordt het effect echter ernstiger en treedt eerder op. Cataract kan ook optreden na langdurige blootstelling aan equivalente oogdoses > 20 mSv per jaar (ICRP publication 2011). Bij ongunstig verloop kan cataract tot blindheid leiden, de meeste mensen kunnen echter operatief worden behandeld wanneer het verlies van gezichtsvermogen het dagelijks leven te zeer hindert.

Lensverandering bij cardiologisch werkers

Cirac-Bjelac et al. Cath. Cardiovas. Interv. 76, 826-834, 2010

Personnel	N	Age (years)	Years at work in cardiology	Cumulative dose (Gy)
Intervention cardiologists	56	42 ± 7	9.2 ± 6.9 (1 - 33)	3.7 ± 7.5 (0.02 - 43)
Nurses	11	38 ± 11	6.0 ± 4.6 (1 - 14)	1.8 ± 3.1 (0.01 - 6.5)
Controle	22	44 ± 9	n/a	n/a

Dose (Gy)	N	Posterior lens changes	RR (95% CI)
0	22	2 (9%)	1.0 (n/a)
< 1.0	31	12 (39%)	4.3 (1.0 - 17)
1 - < 2	11	5 (45%)	5.0 (1.1 - 22)
2 - < 3	9	5 (55%)	6.1 (1.4 - 26)
≥ 3	16	12 (75%)	8.3 (2.1 - 32)
Exposed	67	34 (51%)	5.6 (1.4 - 21)

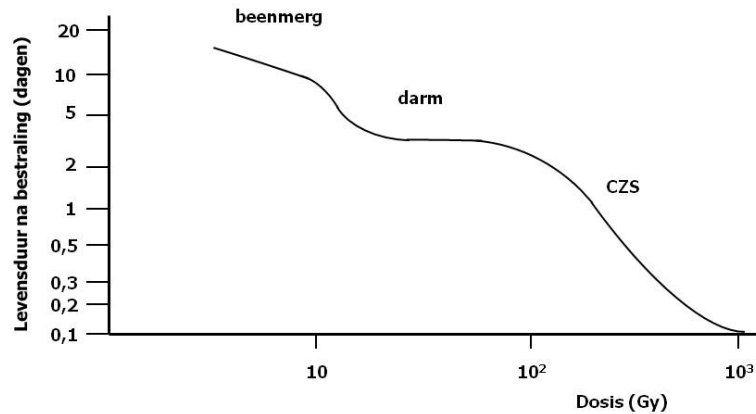
6.7.6 Totale-lichaamsbestraling

Blootstelling van het gehele lichaam aan hoge stralingsdoses kan schade veroorzaken aan belangrijke organen die gepaard gaat met een reeks van kenmerkende symptomen: de zogenaamde stralingssyndromen. Kort na blootstelling kan een eerste lichaamsreactie worden waargenomen, die bij lagere dosis van voorbijgaande aard is en bij hoge doses een veelal dodelijk verloop heeft. Men onderscheidt drie syndromen (*Figuur 9*), te weten het beenmergsyndroom, het darmsyndroom en het syndroom van het centraal zenuwstelsel (CZS).

Het beenmergsyndroom is het gevolg van een tekort aan beenmergstamcellen en ontstaat 1 tot 2 weken na blootstelling aan een enkelvoudige dosis < 10 Gy. Vooral cellen met een korte levensduur (granulocyten) en stralingsgevoelige cellen (lymfocyten) zorgen al voor problemen binnen een week. Ten gevolge hiervan verliest het lichaam het vermogen om pathogenen adequaat te bestrijden en bestaat er een grote kans op infecties. Na ongeveer 14 dagen verminderd het aantal bloedplaatjes (thrombocyten) dramatisch en zal er thrombocytopenie ontstaan met bloedingen als gevolg. Tenslotte verdwijnen de rode bloedlichaampjes (erythrocyten) en treed er bloedarmoede (anemie) op. Indien er geen beenmergtransplantatie of behandeling met groeifactoren plaatsvindt, zal 50% van de slachtoffers die worden blootgesteld aan een geabsorbeerde dosis van 4,5 Gy binnen een periode van 30 dagen aan dit syndroom overlijden (Letale Dosis: $LD_{50/30d} = 4,5$ Gy).

Het darmsyndroom ontwikkelt zich binnen 1 week als gevolg van een tekort aan stamcellen in de darmcrypten. Na een geabsorbeerde dosis tussen 10-50 Gy verdwijnt het darmslijmvlies massaal waardoor een bloederige, waterdunne diarree ontstaat. Het individu sterft aan dehydratie en verstoringen in de mineraalhuishouding. De ernst van het darmsyndroom neemt toe met hogere dosis. Bij lagere doses treden lichte vormen van dit syndroom op, die goed zijn te behandelen mits er genoeg "overlevende" stamcellen zijn. In het geval dat het slachtoffer wordt gered van het darmsyndroom moet er tevens zorg worden besteed aan het beenmergsyndroom om het slachtoffer te behoeden voor sterfte aan dit syndroom.

Het centraal zenuwstelselsyndroom treedt op na blootstelling aan hoge, enkelvoudige doses ioniserende straling van 40-50 Gy of meer. Slachtoffers van de atoombommen van Hiroshima en Nagasaki, die dit is overkomen stierven binnen enkele uren tot hooguit een dag na blootstelling. De doses zijn dermate hoog dat niet alleen het DNA fragmenteert, maar ook de celmembranen zwaar beschadigd worden. De coördinerende functie van de hersenen stagneert met de dood als gevolg.



Figuur 9. Overlevingstijd van de muis als functie van een acute, enkelvoudige dosis totale-lichaamsbestraling.

6.8 Genetische effecten

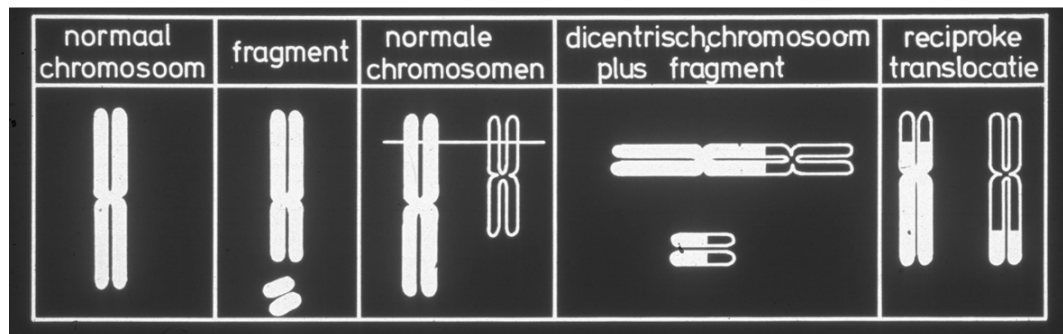
6.8.1 Inleiding

Ondanks uitgebreide epidemiologische studies aan groepen mensen met een historie van verhoogde blootstelling aan straling, zijn tot voor kort alle pogingen om bij de mens door straling geïnduceerde genetische effecten aan te tonen, negatief uitgevallen. Instabiliteit van minisatellieten is de enige genetische parameter die bij de mens na blootstelling aan verhoogde stralingsdoses, zoals bij de ramp met de kernreactor in Tsjernobyl of rond de atoombom-testplaatsen in Kazachstan, een statistisch significante toename in het nageslacht vertoont. De relatie tussen instabiliteit van hypervariabele repetitieve DNA-sequenties en menselijke ziektebeelden is echter nog onduidelijk, zodat voorlopig nog moet worden gewerkt met extrapolatie van gegevens verkregen aan proefdieren, hoofdzakelijk de muis.

6.8.2 Chromosoomafwijkingen

Veranderingen op het niveau van stikstofbasen kunnen leiden tot zogenoemde gen- of puntmutaties. Dit zijn zeer lokale veranderingen in individuele genen. Breuken in het DNA kunnen aanleiding geven tot breuken in het chromosoom. De geïnduceerde breuken kunnen in principe weer door cellulaire processen worden hersteld. Door niet-herstelde of verkeerd herstelde breuken ontstaan echter ofwel chromosomale frag-

menten, die leiden tot celdood, ofwel tot afwijkende chromosoomconfiguraties die doorgegeven kunnen worden aan volgende celpopulaties. De meeste structurele chromosoomafwijkingen hebben het afsterven van de cel tot gevolg en worden daarom instabiel genoemd, zoals de dicentrische chromosoomstructuren (*Figuur 10*).

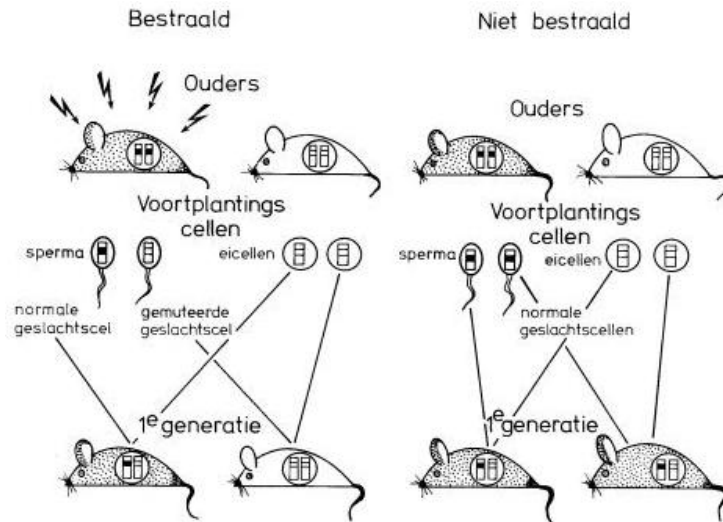


Figuur 10. Ontstaan van chromosoomfragmenten door bestraling en foutief herstel van breuken.

Vanuit genetisch oogpunt zijn de reciproke translocaties de meest belangrijke structurele chromosoomafwijkingen, omdat deze afwijkingen wel levensvatbaar zijn, terwijl er op het breukvlak toch een mutatie is ontstaan.

6.8.3 Genetische afwijkingen

Ioniserende straling veroorzaakt primair genmutaties en chromosomale herstructureringen. Van de genmutaties zijn de dominante en de geslachtsgebonden mutaties het meest belangrijk, omdat deze direct in het nageslacht tot uiting kunnen komen, terwijl dit voor recessieve mutaties (*Figuur 11*) in veel mindere mate het geval is. In de praktijk blijken echter de meeste mutaties intermediair te zijn tussen dominant en recessief in, die daarom voor risicoschattingen slechts gedeeltelijk worden meegenomen.

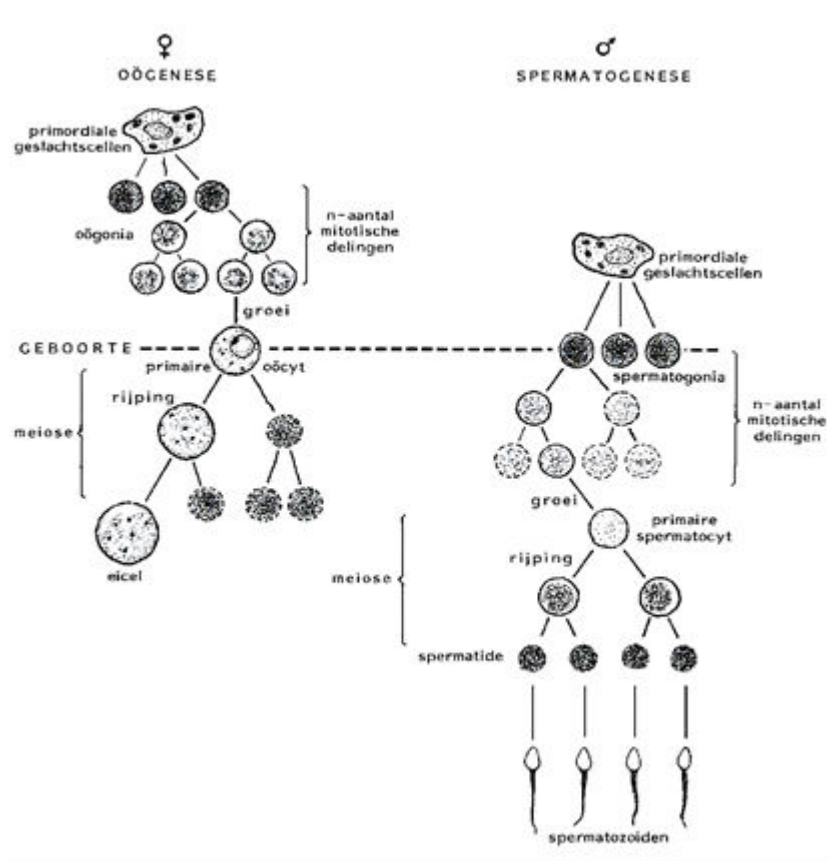


Figuur 11. Specifieke locustest voor mutaties in de vachtkleur bij de muis. Het gegeven voorbeeld betreft één gen. Bij de uitvoering van de test kunnen tegelijkertijd mutaties voor zeven vachtkleurgenen worden opgespoord.

De meest frequent voorkomende menselijke ziektebeelden worden multifactorieel bepaald, dat wil zeggen dat naast genetische factoren ook omgevingsfactoren ertoe bijdragen of de ziekte werkelijk tot uiting komt. Als omgevingsfactoren moet hierbij worden gedacht aan *life style*, zoals roken, teveel alcoholconsumptie, kwaliteit van de voeding, stress, etc. maar ook aan zaken als moederlijk metabolisme (diabetes, ondervoeding, hypertensie e.a.), drugsgebruik, luchtvervuiling of virale en bacteriële infecties. Van de structurele chromosoomafwijkingen (Figuur 10) zijn vooral de reciproke translocaties belangrijk. Dit zijn stabiele afwijkingen, die van generatie op generatie kunnen worden overgedragen en door abnormale paringsconfiguraties tijdens de vorming van de geslachtscellen aanleiding kunnen geven tot de geboorte van kinderen met ernstige geestelijke en lichamelijke handicaps.

6.8.4 Stadia van de geslachtscelvorming

Alleen genetische afwijkingen in geslachtscellen, of onrijpe voorstadia daarvan, hebben een kans om op het nageslacht te worden overgedragen.



Figuur 12. Vorming van de geslachtscellen bij de mens

Bij de vrouw zijn op het moment van geboorte alle geslachtscellen (oöcyten) in een vroeg stadium van de eerste reductiedeling (meïose) gefixeerd (Figuur 12). Ongeveer een half jaar voor elke ovulatie (vanaf de pubertijd) rijpen een aantal oöcyten, waarvan er uiteindelijk iedere keer meestal slechts één enkel exemplaar de race wint. Het blijkt nu onder andere uit muizenexperimenten dat rijpende oöcyten een duidelijk grotere gevoeligheid voor de inductie van genetische stralingsschade bezitten dan de rustende primaire oöcyt. Een eerste advies aan met een significante dosis bestraalde vrouwelijke personen moet dan ook zijn om minstens 6 maanden te wachten met een zwangerschap opdat deze gevoelige populatie van cellen de ovaria kan verlaten. Pilgebruik is hierop niet van invloed, omdat dit een normale rijping van oöcyten toelaat en alleen de ovulatie ervan onderdrukt. Bij de man zijn de geslachtscellen op het moment van geboorte aanwezig als stamcelspermatogonia, waaruit zich onder hormonale invloeden rond de pubertijd gedifferentieerde spermatogonia, spermatocyten, spermatiden en uiteindelijk rijpe spermatozoiden ontwikkelen (Figuur 12). Van deze verschillende spermatogenetische stadia blijken de spermatiden het meest gevoelig voor de inductie van genetische defecten, zodat hier als een eerste advies na blootstelling aan signi-

ficante stralingsdoses moet luiden: minstens twee maanden wachten met het verwekken van nakomelingschap. Voor genetische risicoschattingen op lange termijn gaat men echter uit van de lagere stralingsgevoeligheden van respectievelijk de rustende primaire oöcyten en de stamcelspermatogonia omdat dit permanente populaties van cellen zijn die over langere periodes, tot aan het einde van de reproductieve periode, stralingsschade kunnen accumuleren. Hierbij bestaan sterke aanwijzingen dat de rustende primaire oöcyten door hun andere biologische stadium (meiotische profase) duidelijk minder gevoelig zijn voor genetische schade dan de stamcelspermatogonia (mitotisch delende cellen), mogelijk met een factor 5 à 10.

6.8.5 Verdubbelingsdosis

Van alle in het verleden gebruikte methodes voor risicoschattingen wordt tegenwoordig eigenlijk alleen de methode van de verdubbelingsdosis nog toegepast. Onder de verdubbelingsdosis verstaat men de stralingsdosis die nodig is om evenveel genetisch bepaalde ziektes in de menselijke populatie te induceren als er spontaan iedere generatie bijkomen. Een belangrijk uitgangspunt van deze methode is gebaseerd op het populatiegenetisch concept dat de min of meer stabiele frequentie van genetisch bepaalde ziektes in een populatie de resultante is van het evenwicht tussen nieuwe spontane mutaties die in elke generatie zullen ontstaan en het uitselecteren van een aantal van deze mutaties in elke generatie door vroegtijdige dood of door gebrek aan mogelijkheden tot voortplanting. Voor risicoschattingen neemt men tegenwoordig de spontane frequentie van genetische aandoeningen van de mens en vergelijkt die met de frequenties van geïnduceerde genetische defecten als vachtkleur-, skelet-, cataract- en eiwitmutaties, translocaties etc. zoals ze bij de muis gemeten zijn. De op deze wijze berekende verdubbelingsdosis heeft onder de condities van lage-LET-straling en laag dosistempo een waarde van 1 Gy.

6.9 Effecten van ioniserende straling op het ongeboren kind

6.9.1 Inleiding

Onder normale omstandigheden is in Nederland de kans zeer klein dat tijdens de zwangerschap het ongeboren kind wordt blootgesteld aan een stralingsdosis die substantieel hoger is dan de jaarlijkse achtergrondstralingsdosis. Toch zijn er omstandigheden waarbij het ongeboren kind een dosis kan ontvangen die de limiet van 1 mSv over de gehele periode van de zwangerschap overschrijdt (ICRP-90). Het betreft het embryo of de foetus van:

- vrouwen die tijdens de zwangerschap werden onderzocht door middel van een CT-abdomen of vergelijkbaar;
- vrouwen die tijdens de zwangerschap werden behandeld voor kanker waarbij de buik werd blootgesteld aan straling (radiotherapie);
- zwangere radiologisch werkers, bij wie ten onrechte geen beschermende maatregelen zijn getroffen;
- vrouwen die betrokken zijn geweest bij een stralingsongeval (een zeer uitzonderlijke situatie).

In deze situaties vindt blootstelling van het ongeboren kind voornamelijk plaats via uitwendige blootstelling van de aanstaande moeder aan röntgen- of gammastraling (lage-LET-straling). Biologische effecten van straling met een hogere LET-waarde (neutronen, protonen, α -straling) kunnen anders zijn en blijven hier verder buiten beschouwing. In het algemeen verschilt het stralingsrisico voor de zwangere vrouw zelf niet van dat van niet-zwangere vrouwen. Aangezien sneldelende weefsels echter stralingsgevoeliger zijn dan andere weefsels en het embryo tijdens de ontwikkeling tot foetus zeer vele celdelingen ondergaat, zijn ongeboren kinderen in deze stadia gevoeliger voor straling dan volwassenen. De gegevens over de gevolgen van prenatale blootstelling aan straling bij de mens zijn schaars. Biologische effecten van ioniserende straling bij het ongeboren kind worden net als bij volwassenen ingedeeld in weefselreacties en stochastische effecten.

In belangrijke mate is de kennis over de teratogene effecten van straling gebaseerd op onderzoek met proefdieren (*Figuur 13*) en op bevindingen bij kinderen van vrouwen die zwanger waren ten tijde van de atoombomexplosies in Hiroshima en Nagasaki.

6.9.2 Weefselreacties

Het optreden van teratogene effecten blijkt sterk afhankelijk te zijn van het stadium van de zwangerschap waarin de blootstelling aan straling plaatsvond. Hierbij kunnen drie fasen worden onderscheiden:

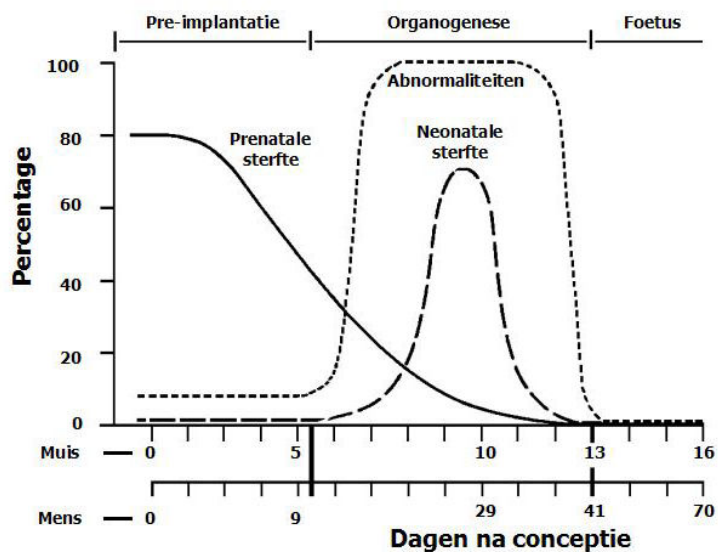
- pre-implantatiefase, *eindigend circa 10 dagen na conceptie*;
- organogenese, *de periode van aanleg van de organen, lopend vanaf circa tien dagen na de conceptie tot circa veertig dagen na de conceptie*;
- foetale periode, *de fase van foetale ontwikkeling gedurende de rest van de zwangerschap*.

Pre-implantatiefase. In de pre-implantatiefase zijn bij de mens geen effecten van straling op de ongeboren vrucht waargenomen. De inzichten over stralingseffecten in deze fase zijn verkregen door experimenten met knaagdieren (*Figuur 13*). Er zijn twee mogelijkheden: 1) het embryo kan worden beschadigd waardoor het niet tot innesteling komt en de vrucht wordt afgestoten. Dit blijft in het algemeen onopgemerkt, aangezien naar schatting één op de drie van alle bevruchtingen eindigt in een mislukking van de innesteling; 2) blootstelling aan straling in deze fase hoeft niet tot afwijkingen te leiden, omdat het verlies van één of meer cellen gecompenseerd kan worden door andere cellen. De vrucht komt normaal tot ontwikkeling. De kans op een afwijking na de geboorte is even groot als zonder blootstelling aan straling.

Organogenese. In deze periode heeft men bij blootstelling van proefdieren aan een hoge dosis straling misvormingen geconstateerd. Vooral misvormingen aan de organen in borstkas en buikholte, groeistoornissen en misvormingen van het skelet, de ogen (cataract), en het centrale zenuwstelsel met een onvolledige ontwikkeling en/of te kleine omvang van de grote hersenen, zijn waargenomen. Deze misvormingen kunnen zo ernstig zijn dat de ontwikkeling van de organen vroegtijdig stopt en het embryo overlijdt.

Foetale fase. In de foetale fase zijn bijna alle organen aangelegd en groeien daarna verder uit. De gevoeligheid voor het ontstaan van misvormingen neemt snel af. De meest relevante periode in deze fase is die tussen de 8^e en de 15^e week, wanneer de grote hersenen zich ontwikkelen. Blootstelling in deze periode kan leiden tot verminderde ontwikkeling van de geestelijke vermogens (mentale retardatie); de intelligentiescore (*IQ*) neemt af met ongeveer 20-30 IQ punten per Gy blootstelling.

Uit de gegevens valt een drempeldosis van 100 mGy af te leiden (zie tabel). Door de verdere ontwikkeling van de kleine hersenen is de kans op mentale retardatie nog steeds aanwezig tussen de 16^e en de 25^e week, maar het risico is wel lager dan in de weken daarvoor. Voor perioden later in de zwangerschap is een verband tussen prenatale stralingsblootstelling en mentale retardatie niet aangetoond.



Figuur 13. Frequentie van prenatale afwijkingen en abnormaliteiten bij muis en mens na een enkelvoudige dosis van 2 Gy. Dag 0 is de dag van de conceptie.

RISICOTABEL VOOR PRENATALE BLOOTSTELLING

Periode na conceptie (weken)	Soort risico	Drempeldosis *)
Weefselreactie		
0-2 weken (pre-implantatie)	prenatale sterfte	100 mGy (LD ₅₀ bij 1 Gy)
3-8 weken (organogenese)	misvormingen (orgaanvorming) skeletgroei geboortegewicht ontwikkeling van de hersenen	100 – 200 mGy > 50 – 250 mGy > 50 mGy > 100 – 300 mGy
8-15 weken (hersenen)	mentale retardatie	100 mGy
16-25 weken (hersenen)	mentale retardatie	> 100 mGy
25-38 weken (hersenen)	mentale retardatie	kans zeer klein
Stochastisch		
0-38 weken (gehele periode)	sterfte aan leukemie/jeugdanker (tot 15 jaar) sterfte aan kanker gedurende rest van leven	6% / 1 Gy 15% / 1 Gy
0-38 weken (gehele periode)	genetische effecten	kans zeer klein

*) lage-LET-straling

6.9.3 Stochastische effecten

Uit onderzoek onder vrouwen die tijdens de zwangerschap aan straling waren blootgesteld, is een verband gevonden tussen stralingsblootstelling van het ongeboren kind en het optreden van leukemie en jeugdkanker op jonge leeftijd. Gegevens uit Groot-Brittannië (*Oxford Survey of Childhood Cancers*) laten zien, dat de extra sterfte door stralingsgeïnduceerde tumoren bij in utero blootgestelde kinderen, van wie de moeder aan radiodiagnostisch onderzoek in het buik/bekkengebied werd blootgesteld, circa 6% per Gy geabsorbeerde dosis in de baarmoeder bedraagt (tot de leeftijd van 15 jaar).

6.9.4 Risico's voor zwangere patiënten

In de radiodiagnostiek zijn de stralingsdoses doorgaans zodanig laag, dat de drempeldoses voor weefselreacties (teratogene effecten), zoals aangeboren misvormingen, niet worden overschreden. Uit oogpunt van stralingsbescherming gaat de aandacht daarom uit naar dosisreductie vanwege de kans op kanker (ALARA-principe). Hoewel bij radiotherapie van zwangere vrouwen de geabsorbeerde dosis van de ongeboren vrucht aanmerkelijk groter kan zijn dan bij radiodiagnostisch onderzoek, staat ook hier de inperking van het risico op tumoren voor de nakomeling voorop, tenzij de foetale blootstelling dusdanig hoog zal zijn, dat weefselreacties niet meer kunnen worden genegeerd.

6.9.5 Richtlijn ICRP

Na blootstelling aan een dosis boven 500 mGy is er een aanzienlijke kans op schade aan de ongeboren vrucht. Na blootstelling aan een dosis tussen 100 en 500 mGy is deze kans kleiner. De ernst en het type schade is afhankelijk van de dosis en het tijdstip wanneer de vrucht werd blootgesteld. De beslissing om tot zwangerschapsafbreking over te gaan zal gebaseerd moeten worden op individuele omstandigheden. Daarbij moeten ook de risico's die zwangerschapsafbreking met zich meebrengt meegetekend worden. Bij het overwegen van een dergelijke beslissing moet de aanstaande moeder worden bijgestaan door de behandelend arts, een radiobioloog, klinisch fysicus of een stralingsdeskundige die weet welke dosis de zwangere en in het bijzonder de ongeboren vrucht heeft ontvangen. In het algemeen kan worden gesteld dat het op basis van epidemiologisch onderzoek en wetenschappelijke bevindingen niet gerechtvaardigd is om een zwangerschap te beëindigen wanneer een ongeboren vrucht minder dan 100 mGy heeft ontvangen. Verder zullen individuele omstandigheden een belangrijke rol spelen bij de beslissing op een eventuele abortus.

6.10 Referenties

In onderstaande leerboeken vindt u uitgebreidere radiobiologische informatie.

Bos J.J., Draaisma, F.S. and Okx, W.J.C. Inleiding tot de stralingshygiëne. Hoofdstuk 5. Sdu Uitgevers, Den Haag, 2007.

Hall, E.J., Giaccia A.J. Radiation Biology for the Radiobiologist, 7th edition. Hoofdstukken 1-15, en 19 Publishers: Lippincott, Williams and Wilkins, Philadelphia, USA, 2012.

Kogel, A. van der, Joiner, M., Basic Clinical Radiobiology. Fourth edition. Publisher: Hodder Arnold, 2009.

Ru, V.J. de, Scheurleer, J.S., Welleweerd, J. en Wesselink, M.L. (red.). Radiobiologie en stralingsbescherming, 4e herziene druk, Hoofdstukken 1, 2, 4, 5 en 6. Uitgever: Elsevier Gezondheidszorg, Maarssen, 2003.

6.11 Begrippenlijst

Absoluut risicomodel	model om het risico op het aantal extra tumoren te schatten, die ontstaan als gevolg van bestraling. Het aantal extra tumoren is in dit model een constante bovenop de natuurlijke frequentie en onafhankelijk van de leeftijd op het moment van bestraling
acute stralingsreacties	reacties die optreden in de weefsels binnen enkele uren tot een paar weken na bestraling
apoptose	gereguleerde celdood zonder dat de cel eerst in deling gaat
Base excision repair BEIR	herstel van de baseparen na beschadiging Amerikaanse commissie die zich bezig houdt met de 'Biological Effects of Ionizing Radiation'
beenmergsyndroom	syndroom waarbij de beenmergcellen massaal dood gaan na totale-lichaamsbestraling
Carcinogenese	proces waarbij tumoren worden gevormd uit normale cellen
cataract	vertroebeling van de ooglens
celcyclus	cyclus die de cel doormaakt alvorens te delen
celkern	kern in de cel waar het DNA ligt opgeslagen
celmembraan	wand die de cel omhult
celorganellen	specifieke structuren in de cel
celoverlevingscurve	grafiek die de relatie aangeeft tussen het aantal overlevende cellen en de ontvangen dosis
centraal zenuwstelsel- syndroom	schade aan het centrale zenuwstelsel na totale-lichaamsbestraling
congenitale afwijking	afwijkingen die bij de geboorte aanwezig zijn
cytoplasma	totaal van vloeistof en organellen in de cel
cytosol	vloeistof in de cel

Darmsyndroom	schade aan het darmstelsel na totale-lichaamsbestraling
dermis	onderhuid
deterministische schade	schade aan weefsels en organen waarbij de ernst van de schade toeneemt met de dosis (weefselreacties)
dicentrisch chromosoom	chromosoom met twee centromeren, die een ringstructuur vormen
DNA	DeoxyriboNucleic Acid: structuur die de genen bevat met alle erfelijke eigenschappen
dominante mutatie	mutatie in het DNA van de geslachtscellen die maar bij één van de ouders hoeft voor te komen om tot expressie te komen in het nageslacht
dosis-effectrelatie	relatie tussen de dosis en het effect dat daardoor ontstaat
dosistempo	dosis per tijdseenheid (mGy/min)
drempeldosis	dosis die overschreden moet worden om een effect te zien/meten in weefsels of organen
dubbele helix	twee complementaire strengen waaruit het DNA is opgebouwd en die als een spiraal om elkaar gewonden zijn
dubbelstrengsbreuken	breuken in beide strengen van het DNA
Elektron	negatief geladen subatomair deeltje
enkelstrengsbreuken	breuk in één enkele streng van het DNA
epidermis	opperhuid
Fibrose	vorming van bindweefsel
foetale periode	fase in de zwangerschap waarbij het embryo uitgroeit
fractioneren	uitsplitsen van de totale dosis over meerdere fracties
G ₀ -fase	fase waarbij de cellen niet in deling zijn
genmutaties	verandering in één enkel gen
geslachtsgebonden mutaties	verandering in het DNA van de geslachtscellen
gray (Gy)	eenheid van geabsorbeerde dosis

Hoge-LET-straling	Straling met zeer efficiënte overdracht van stralingsenergie op materie (neutronen, protonen, alfastraling)
homologe recombinatie	herstel van een dubbelstrengsbreuk in het DNA waarbij het onbeschadigde, homologe deel in het chromosoom afkomstig van de andere ouder, als matrijs wordt gebruikt
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ionisatie	proces waarbij ionen gevormd worden, bijvoorbeeld onder invloed van straling
Klonogene cellen	cellen die in staat zijn om kolonies te vormen
Lage-LET-straling	straling met minder efficiënte overdracht van stralingsenergie op materie (röntgenstraling, elektronen, gammastraling, bètastraling)
late stralingsreacties	schade in weefsels en organen die pas weken of vele maanden na bestraling zichtbaar/meetbaar worden
latente periode	periode tussen het blootstaan aan straling en het manifest worden van een tumor
LET (keV/μm)	Lineair Energy Transfer. Lineïek energieverlies langs ionisatiespoor (track)
lysosomen	membraanstructuren in de cel betrokken bij verteringsprocessen in de cel
Meiose	extra deling in de geslachtscellen waarbij het aantal chromosomen gehalveerd wordt
mentale retardatie	verminderde geestelijke vermogens
minisatellieten	stukjes DNA van 15-100 basenparen lang, die 20-50 keer herhaald worden
mitochondriën	structuren in de cel betrokken bij de energielevering
mitose	deling van een cel in twee dochtercellen
mitosedood	fase waarin delende cellen dood gaan door te veel aanwezige DNA-schade die niet hersteld is
mutatie	verandering in een gen

multifactorieel	diverse factoren uit de omgeving die bijdragen aan een bepaald ziektebeeld
Non-homologe endjoining	herstel van dubbelstrengsbreuk in het DNA waarbij de uiteinden aan elkaar gezet worden
nucleotide excision repair	herstel van beschadigde basen in het DNA
numerieke chromosoomafwijking	afwijking in het aantal chromosomen
OER	Oxygen Enhancement Ratio. Verhouding van celoverleving in afwezigheid en aanwezigheid van zuurstof tijdens de bestraling
organogenese	fase van de zwangerschap waarin de organen worden aangelegd
P-fractie	totaal aantal van alle cellen in deling
pre-implantatiefase	fase van de zwangerschap tussen conceptie en innesteling van de bevruchte eicel in de baarmoeder
proto-oncogenen	genen die het ontstaan en de ontwikkeling van tumoren stimuleren
puntmutaties	één enkele mutatie van een base in een gen
Q-fractie	totaal aantal van alle niet-delende cellen
Radiatie-pneumonitis	longontsteking veroorzaakt door bestraling
radicalen	instabiele atomen/moleculen die een elektron missen en daardoor reactief zijn
radionucliden	instabiele isotopen die radioactief verval tonen
reciproke translocaties	uitwisseling van fragmenten van chromosomen tussen chromosomen onderling
RBE	Relatieve Biologische Effectiviteit. Verhouding van de hoeveelheid schade veroorzaakt door een bepaalde stralingsbron ten opzichte van die veroorzaakt door de referentiebron (250kV-röntgenstraling)
recessieve mutaties	identieke mutatie in het DNA van de geslachtscellen die bij beide ouders aanwe

relatief risicomodel	<p>zig moet zijn om tot expressie te komen in het nageslacht</p> <p>model om het risico op het aantal extra tumoren te schatten, die ontstaan als gevolg van bestraling. Het aantal extra tumoren is hierbij een percentage bovenop de natuurlijke incidentie en is afhankelijk van de leeftijd op het moment van bestraling</p>
RNA	<p>stukjes van de erfelijke code in het DNA worden vertaald in RNA (Ribo Nucleic Acid) dat deze informatie van de celkern naar het cytoplasma brengt.</p>
risicoperiode	<p>periode waarbinnen tumoren verwacht kunnen worden als gevolg van bestraling</p>
risicoschattingen	<p>schattingen die gemaakt worden voor de bevolking voor het risico op het ontstaan van een tumor of het overlijden aan een tumor</p>
ruw endoplasmatisch reticulum	<p>geplooid membraansysteem in het cytoplasma waar de synthese van eiwitten plaatsvindt</p>
Sievert (Sv)	<p>eenheid van equivalente en effectieve dosis</p>
stochastische schade	<p>schade aan weefsels of organen waarbij gekeken wordt naar de kans op het ontstaan van tumoren of genetische afwijkingen</p>
stralingssyndromen	<p>schade aan weefsels en organen na totale-lichaamsbestraling</p>
structurele chromosoomafwijkingen	<p>afwijkingen in de opbouw van de chromosomen</p>
Teleangiëctasieën teratogene effecten	<p>permanent verwijde bloedvaten afwijkingen/misvormingen aan het ongeboren kind</p>
tumorsuppressor-genen	<p>genen die de ontwikkeling van tumoren onderdrukken</p>
UNSCEAR	<p>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</p>

Verdubbelingsdosis

dosis die nodig is om het aantal mutaties te verdubbelen ten opzichte van de natuurlijke frequentie

7 *Actuele ontwikkelingen*

In dit hoofdstuk wordt kort verwezen naar recente publicaties over diverse praktische aspecten van de medische stralingshygiëne.

1. EVAR-procedures

Het gebruik van disposable strooistraling werend afdek materiaal reduceert significant de blootstelling aan strooistraling voor de vaatchirurg en reduceert daarnaast ook de dosis voor het overige OK-personeel tijdens EVAR-procedures.

Referentie:

Ir. Carla Kloeze. Significante dosisreductie door gebruik van strooistraling werend afdek materiaal bij EVAR-procedures. *Gamma Professional*, juli 2015, jaargang 65, nr 3, p 3-7.

2. Risicoanalyse Endoscopische Verrichtingen onder doorlichting

Uit een risicoanalyse op een endoscopieafdeling van een Nederlands ziekenhuis (per jaar 325 ERCP's, 75 oesophagusdilataties en 22 colo- of gastroscopieën) blijkt dat de MDL-artsen als blootgestelde B-werker moeten worden ingedeeld. Voor de endoscopie-assistenten blijkt dat zij onder de limieten blijven om als B-werker te worden ingedeeld. Opmerkelijk: "Op het gebied van doorlichten zou er winst kunnen worden behaald door ook aan te geven wanneer er mag worden gestopt met doorlichten".

Referentie:

ir. D.J.W. (Dennis) Hulsen. *Afstudeerscriptie Risicoanalyse Endoscopische Verrichtingen Onder Doorlichting* (2014).

3. Ooglensdosis en -bescherming

De equivalente ooglensdosis bij interventiespecialisten kan boven 20 mSv per jaar uitkomen. In deze studie zijn dosisreductiefactoren (DRF) bepaald voor loodglasbrillen. Deze DRF is de dosis zonder bescherming van de ooglens gedeeld door die wanneer een loodglasbril wordt gedragen. DRF-waarden voor frontaal invallende röntgenstraling variëren tussen 5,2-7,6.

Voor klinisch relevante invalhoeken (deels zijwaarts) zijn de gemeten DRF-waarden 1,4-5,2. Geconcludeerd wordt, dat een DRF van 2 (toegepast op de uitslag van de persoonlijke dosimeter (badge)) een conservatieve schatting kan zijn voor de dosisreductie waarin de meeste typen loodglasbril voorzien.

Referentie:

Martin CJ, Magee JS, Sandblom V, Almén A, Lundh C. Eye Dosimetry and Protective Eyewear for Interventional Clinicians. *Radiat Prot Dosi-*metry, Apr. 5 (2015).

4. Rechtvaardiging van opnamen op Intensive Care

Op intensive care (IC) afdelingen worden op grote schaal röntgenfoto's van borstkas, hart en longen verricht. In bepaalde situaties, maar vaak ook routinematig. Dit was wereldwijd een gewone praktijk voor enkele decennia. Recente studies tonen echter geen meerwaarde aan van het routinematig verrichten van deze röntgenfoto's als het gaat om belangrijke uitkomsten als mortaliteit, beademingsduur en IC opnameduur. Toch blijkt de gewoonte van routine foto's slechts moeizaam uit de dagelijkse praktijk te verdwijnen.

In het proefschrift 'Optimization of chest radiography practice for critically ill patients' onderzochten promovendus Martijn Tolsma en prof. Nardo van der Meer de huidige praktijk op Nederlandse intensive care afdelingen. Naast het onderzoeken van de diagnostische waarde van deze röntgenfoto's voor specifieke patiëntgroepen, keken zij ook naar het aanvraaggedrag van Nederlandse intensivisten en waren zij op zoek naar andere waardes van deze röntgenfoto's naast de puur diagnostische waarde.

Zij vonden in alle patiëntengroepen een lage diagnostische waarde van de röntgenfoto's voor belangrijke bevindingen, vergelijkbaar met het resultaat van eerdere studies. Ook toonden zij aan dat het kritisch stellen van indicaties tot een veilige reductie in het aantal foto's kan leiden. Echter lijkt er naast de puur diagnostische waarde ook een belangrijke aanvullende waarde van röntgenfoto's te zijn voor zaken als medische verslaglegging, follow-up van een bekende aandoening of het nemen van beslissingen als welke patiënten veilig van de intensive care kunnen worden ontslagen. In dat geval heeft een röntgenfoto zonder belangrijke bevindingen toch waarde voor de klinische praktijk.

Het uiteindelijke doel is om het aantal potentieel onnodige röntgenfoto's te reduceren op een veilige en voor de praktijk acceptabele manier. Om kosten te reduceren, maar ook om werkbelasting voor het personeel en straling voor de patiënten te beperken. Daarom adviseren de onderzoekers om röntgenfoto's niet meer strikt routinematig te verrichten, maar om lokaal duidelijke afspraken en protocollen te maken met betrekking tot de indicaties. Elke röntgenfoto dient bij voorkeur door een ervaren IC dokter te worden aangevraagd voor een gedocumenteerde reden.

Optimization of chest radiography practice for critically ill patients, Martijn Tolsma (2016).

<https://www.tias.edu/kennisgebieden/detail/health/detail/promotie-optimization-of-chest-radiography-practice-for-critically-ill-patients-martijn-tolsma>

5. Implementatie Europese Richtlijn 2013/59/Euratom

In februari 2018 moet de nieuwe EU-Richtlijn zijn geïmplementeerd. Daartoe wordt momenteel in Nederland het Besluit stralingsbescherming (Bs) geheel opnieuw geschreven: Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs). Op door de overheid georganiseerde inspraakworkshops is aangegeven, dat er vanwege een nieuwe graduele risico-inschatting een mogelijke lastenverzwaring voor ziekenhuizen mee gepaard kan gaan, hetgeen nog onderwerp van studie is hoe hiermee om te gaan.

Zie o.a. <http://www.autoriteitnvs.nl/>

6. Interventieradiologie

In 2017 verscheen RIVM rapport 2017-0025, getiteld “Interventieradiologie – Inventarisatie van de Nederlandse praktijk met speciale aandacht voor stralingsbescherming van de patiënt”. Het rapport is vrij toegankelijk via <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2017-0025.html>

Rapport in het kort:

Bij sommige medische ingrepen, zoals dotteren, wordt gebruikgemaakt van radiologie. Het RIVM doet enkele aanbevelingen om het stralingsniveau zo laag mogelijk te houden. Een daarvan is om altijd zogeheten Medisch Beeldvormings- en Bestralingsdeskundigen in te zetten om een optimale dosis te bereiken. Vooral bij ingrepen op afdelingen Cardiologie zijn zij vaak niet betrokken. Daarnaast is het verstandig om patiënten van tevoren te screenen op bijvoorbeeld straling gerelateerde gevoeligheden, en hen achteraf te volgen of er klachten zijn ontstaan. Dit gebeurt in Nederland weinig.

Dit blijkt uit onderzoek van het RIVM, als vervolg op een studie uit 2007. De aanbevelingen die toen zijn gegeven, blijken grotendeels te zijn opgevolgd. De ziekenhuizen gebruiken redelijk nieuwe apparatuur en de betrokken interventieradiologen bezitten doorgaans een diploma stralingsbescherming. Mogelijkheden om de stralingsdosis te beperken zijn in de ziekenhuizen ruim aanwezig en worden veel ingezet.

Wel worden complicaties na de interventie, zoals rode huid en haaruitval, weinig opgenomen in een daarvoor opgezet register. Bovendien wordt in

de helft van de onderzochte ziekenhuizen niet geprobeerd om minder vaak gebruik te maken van opties die de dosis verhogen.

Het onderzoek is in opdracht van de Inspectie voor de Gezondheidszorg (IGZ) uitgevoerd. Hiervoor is in de wetenschappelijke literatuur de state of the art van interventieradiologie onderzocht en een digitale enquête onder 18 ziekenhuizen gehouden.

7. Guidelines for Radiation Protection and Dosimetry of the Eye Lens, Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie, Report 31, May 2018.

In dit rapport worden de consequenties besproken die samenhangen met het verlagen van de ooglensdosislimiet (van 150 mSv naar 20 mSv per jaar).

Voor het werken met doorlichtsystemen waarbij de te verwachten ooglensdosis op basis van een risicoanalyse boven 15 mSv/jaar wordt geschat, wordt monitoring bij de ooglens als noodzakelijk gezien, met daartoe geschikte dosimeters die zijn gekalibreerd voor $H_p(3)$ of $H_p(0,07)$.

Als na een periode van monitoring blijkt dat de gemeten ooglensdosis consistent lager is dan de gemeten $H_p(10)$ aan de kraag of op de borstkas, dan kan vervolgens met die laatste worden volstaan.

Voor werkers die op grond van de ooglensdosis (groter dan 15 mSv per jaar) als A-werker worden ingedeeld is het advies om tenminste om de twee jaar de gezichtsscherpte te testen en om elke 5 of 10 jaar een slitlemp onderzoek aan te bieden (niet verplicht, op vrijwillige basis).

8 Bijlagen

Bijlage 8.1: Hoofdstuk VII Medische blootstellingen uit de EU-Richtlijn⁵⁰

HOOFDSTUK VII MEDISCHE BLOOTSTELLINGEN

Artikel 55

Rechtvaardiging

1. Medische blootstellingen moeten per saldo voldoende voordeel opleveren wanneer het totale potentiële diagnostische of therapeutische voordeel, waaronder begrepen het directe nut voor de gezondheid van de persoon die de behandeling ondergaat en het maatschappelijk nut, wordt afgewogen tegen de schade welke de persoon die de blootstelling ondergaat, kan ondervinden, rekening houdend met de doeltreffendheid, de voordelen en de risico's van beschikbare alternatieve technieken die hetzelfde oogmerk hebben maar geen of minder blootstelling aan ioniserende straling meebrengen.

2. De lidstaten zorgen ervoor dat het in lid 1 gedefinieerde beginsel wordt toegepast, en in het bijzonder dat:

- a) nieuwe soorten handelingen die medische blootstelling meebrengen, worden gerechtvaardigd alvorens zij algemeen worden aanvaard;
- b) alle individuele medische blootstellingen vooraf worden gerechtvaardigd, met inachtneming van de specifieke oogmerken van de blootstelling en de kenmerken van de betrokken persoon;
- c) indien een handeling die medische blootstelling meebrengt, in het algemeen niet gerechtvaardigd is, zij in bijzondere omstandigheden in afzonderlijk te beoordelen en te documenteren specifieke gevallen toch gerechtvaardigd mag zijn;
- d) de verwijzende persoon en de medisch deskundige, als omschreven door de lidstaten, trachten, waar zulks uitvoerbaar is, eerdere diagnostische informatie of medische dossiers met betrekking tot de voorgenomen blootstelling te verkrijgen en rekening houden met deze gegevens om onnodige blootstelling te voorkomen;

⁵⁰ Richtlijn 2013/59/Euratom van de Raad van 5 december 2013 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling, en houdende intrekking van de Richtlijnen 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom en 2003/122/Euratom, artikel 83, 2h. Publicatieblad L13 van de Europese Unie, 57^e jaargang, 17 januari 2014.

- e) medische blootstellingen in verband met medisch en biomedisch onderzoek worden beoordeeld door een in overeenstemming met de nationale procedures en/of door de bevoegde autoriteit ingestelde ethiekcommissie;
- f) de bevoegde autoriteit, in samenwerking met betrokken medisch-wetenschappelijke verenigingen of relevante organisaties, een specifieke rechtvaardiging verstrekt voor medisch- radiologische procedures die als onderdeel van een bevolkingsonderzoek worden uitgevoerd;
- g) de blootstelling van verzorgers en zorgverleners per saldo voldoende voordeel dient op te leveren, rekening houdend met het directe nut voor de gezondheid van de patiënt, het nut voor de verzorger/zorgverlener en de schade die de blootstelling kan veroorzaken;
- h) elke medisch-radiologische procedure bij een asymptomatische persoon voor de vroege opsporing van een ziekte deel uitmaakt van een bevolkingsonderzoek, of een specifieke gedocumenteerde rechtvaardiging voor de betrokkene door de medisch deskundige vereist, in samenspraak met de verwijzende persoon en overeenkomstig de richtlijnen van relevante medisch-wetenschappelijke verenigingen en de bevoegde autoriteit. Er moet bijzondere aandacht worden besteed aan de voorlichting van de persoon die wordt onderworpen aan medische blootstelling, als vereist in artikel 57, lid 1 punt d.

Artikel 56

Optimalisatie

1. De lidstaten zorgen ervoor dat alle doses ten gevolge van medische blootstellingen voor radiodiagnostiek, interventieradiologie en planning, sturing en verificatie, zo laag gehouden worden als redelijkerwijs mogelijk is, gelet op de noodzaak om de vereiste medische gegevens te verkrijgen, rekening houdend met economische en sociale factoren

Voor alle medische blootstellingen van patiënten voor radiotherapeutische doeleinden worden de blootstellingen van doelvolumes afzonderlijk gepland en wordt de toediening op passende wijze gecontroleerd, ermee rekening houdend dat de doses voor niet-doelvolumes en -weefsels zo laag zijn als redelijkerwijs mogelijk is en dat zij in overeenstemming zijn met het beoogde radiotherapeutische doel van de blootstelling.

2. De lidstaten zien toe op de vaststelling, de regelmatige herziening en het gebruik van diagnostische referentieniveaus voor radiodiagnostisch onderzoek, in voorkomend geval rekening houdend met de aanbevolen Europese diagnostische referentieniveaus, en indien gepast voor interventieradiologische procedures, en de beschikbaarheid van richtsnoeren op dit gebied.

3. De lidstaten zorgen ervoor dat bij elk medisch en biomedisch onderzoeksproject dat met medische blootstelling gepaard gaat:

- a) de betrokken personen vrijwillig deelnemen;
- b) deze personen geïnformeerd worden over de risico's van de blootstelling;
- c) een dosisbeperking wordt vastgesteld voor personen voor wie geen direct medisch nut van de blootstelling verwacht wordt;
- d) in het geval van patiënten die er vrijwillig in toestemmen een experimentele medische handeling te ondergaan, en die naar verwachting hiervan diagnostisch of therapeutisch nut zullen ondervinden, door de medisch deskundige en/of de verwijzende persoon de betrokken dosisniveaus op individuele basis worden beschouwd voordat de blootstelling plaatsvindt.

4. De lidstaten zorgen ervoor dat de optimalisatie de keuze van de apparatuur, de constante productie van adequate diagnostische informatie of behandelingsresultaten omvat, alsmede de praktische aspecten van medisch-radiologische procedures, de kwaliteitsborging, en de beoordeling en evaluatie van patiëntdoses of de controle van toegediende hoeveelheden alsmede de bijbehorende personeelsdoses, met inachtneming van economische en sociale factoren.

5. De lidstaten waarborgen dat:

- a) voor de blootstelling van verzorgers en ondersteuners, indien nodig, dosisbeperkingen worden vastgesteld;
- b) passende richtsnoeren worden opgesteld voor de blootstelling van verzorgers en ondersteuners.

6. Ingeval een patiënt een behandeling of diagnose met radionucliden ondergaat, dat de medisch deskundige of de onderneming, zoals voorgescreven door de lidstaat, de patiënt of diens vertegenwoordiger informatie verstrekt over de risico's van ioniserende straling en passende instructies om de doses voor personen die met de patiënt in contact komen zo gering te houden als redelijkerwijs mogelijk is. Voor therapeutische procedures zijn schriftelijke instructies vereist.

Deze instructies worden verstrekt vóór het vertrek uit ziekenhuis of kliniek, of een daarmee te vergelijken instelling.

Artikel 57

Verantwoordelijkheden

1. De lidstaten waarborgen dat:

- a) elke medische blootstelling plaatsvindt onder de klinische verantwoordelijkheid van een medisch deskundige;
- b) de medisch deskundige, de medisch-fysisch deskundige en de personen die gemachtigd zijn om praktische onderdelen van de medisch-radiologische procedures uit te voeren, worden betrokken bij het optimaliseringsproces zoals voorgeschreven door de lidstaten;
- c) de verwijzende persoon en de medische deskundige worden bij de rechtvaardigingsprocedure van individuele medische blootstelling betrokken zoals voorgeschreven door de lidstaten;
- d) voor zover dat praktisch uitvoerbaar is en voordat de blootstelling plaatsvindt, ziet de medisch deskundige of de verwijzende persoon, zoals voorgeschreven door de lidstaten, erop toe dat de patiënt of diens vertegenwoordiger juiste informatie krijgt over de voordelen en risico's van de stralingsdosis bij medische blootstelling. Soortgelijke informatie en passende richtsnoeren worden overeenkomstig artikel 56, lid 5, onder b), aan verzorgers en zorgverleners verstrekt.

2. De praktische aspecten van medisch-radiologische procedures kunnen door de onderneming of medisch deskundige worden gedelegeerd, indien gepast, aan een of meer personen die gemachtigd zijn om ter zake werkzaam te zijn op een erkend specialisatiegebied.

Artikel 58

De procedures

De lidstaten waarborgen dat:

- a) voor elk soort standaard medisch-radiologische procedure voor elke apparatuuropstelling voor relevante categorieën patiënten schriftelijke protocollen worden uitgewerkt;
- b) informatie over de blootstelling van de patiënt deel uitmaakt van het verslag over de medisch-radiologische procedure;
- c) verwijzingsrichtsnoeren voor medische beeldvorming, waarin rekening is gehouden met stralingsdoses, beschikbaar worden gesteld aan de verwijzende personen;
- d) bij medisch-radiologische handelingen een medisch-fysisch deskundige op passende wijze wordt betrokken, waarbij de mate van betrokkenheid samenhangt met het radiologische risico van de handeling. Met name houdt dat het volgende in:
 - i) bij radiotherapeutische handelingen, uitgezonderd standaard therapeutische nucleairgeneeskundige handelingen, wordt een medisch-fysisch deskundige nauw betrokken;
 - ii) bij standaard therapeutische nucleairgeneeskundige handelingen, alsook radiodiagnostische en interventieradiologische handelingen, waarmee hoge doses als bedoeld in artikel 61, lid 1, onder c), zijn gemoeid, wordt een medisch-fysisch deskundige betrokken;

iii) bij andere medisch-radiologische handelingen die niet onder a) of b) vallen, wordt, waar passend, een medisch-fysisch deskundige betrokken voor raadpleging en advies over aangelegenheden betreffende stralingsbescherming in verband met medische blootstelling;

e) klinische audits vinden plaats in overeenstemming met de nationale procedures;

f) passende locale controle plaatsvindt bij elke stelselmatige overschrijding van de diagnostische referentieniveaus en zo nodig op passende wijze snel corrigerend wordt opgetreden.

Artikel 59

Opleiding en erkenning

De lidstaten zien erop toe dat de medisch deskundige, de medisch-fysisch deskundige en de in artikel 57, lid 2, bedoelde personen voldoen aan de in artikelen 14, 18 en 79 bepaalde voorschriften voor opleiding en erkenning.

Artikel 60

Apparatuur

1. De lidstaten waarborgen dat:

a) op alle radiologische apparatuur die in gebruik is, streng toezicht wordt uitgeoefend wat de stralingsbescherming betreft;

b) voor elke medisch-radiologische installatie een bijgewerkte inventaris van medisch-radiologische apparatuur ter beschikking van de bevoegde autoriteit wordt gehouden;

c) de onderneming passende programma's voor kwaliteitsborging en evaluaties van doses en toegediende hoeveelheden toepast; en

d) er vóór de ingebruikneming van de apparatuur voor klinische doeleinden acceptatietests worden uitgevoerd en er daarna periodiek en na elke onderhoudsprocedure die de prestatie kan aantasten prestatietests worden uitgevoerd.

2. De lidstaten zorgen ervoor dat de bevoegde autoriteit het nodige doet om te bewerkstelligen dat de onderneming de nodige maatregelen treft om inadequaate of slecht functionerende medisch-radiologische apparatuur die in gebruik is te corrigeren. Zij stelt tevens specifieke criteria voor de aanvaardbaarheid van apparatuur vast om aan te geven wanneer passende corrigerende actie vereist is, waaronder het buiten bedrijf stellen van de apparatuur.

3. De lidstaten waarborgen dat:

- a) het gebruik van fluoroscopie-apparatuur zonder inrichting voor de automatische regeling van het dosistempo, dan wel zonder beeldversterker of soortgelijk toestel is verboden;
- b) apparatuur voor uitwendige bestraling met een nominale stralingsenergie van meer dan 1 MeV dient te zijn voorzien van een inrichting om de belangrijkste behandelingsparameters te controleren. Voor apparatuur die is geïnstalleerd voor 6 februari 2018 kan vrijstelling van deze vereiste worden verleend.
- c) alle voor interventieradiologie gebruikte apparatuur wordt voorzien van een inrichting, of een functie, die de medisch deskundige en de personen die onderdelen van de medische procedures uitvoeren informeert over de hoeveelheid straling die door de apparatuur tijdens de procedure wordt uitgezonden. Voor apparatuur die is geïnstalleerd voor 6 februari 2018 kan vrijstelling van deze vereiste worden verleend.
- d) alle voor interventieradiologie en computertomografie gebruikte apparatuur alsook nieuwe apparatuur voor planning, sturing en verificatie wordt voorzien van een inrichting of een functie die de medisch deskundige aan het einde van de procedure informeert over de relevante parameters voor het bepalen van de patiëntdosis.
- e) voor interventieradiologie en computertomografie gebruikte apparatuur de in lid 3, onder punt d) vereiste informatie moet kunnen doorsturen naar het onderzoeksdossier. Voor apparatuur die is geïnstalleerd voor 6 februari 2018 kan vrijstelling van deze vereiste worden verleend.
- f) onverminderd lid 3, onder c), d) en e), nieuwe medische radiodiagnostische apparatuur die ioniserende straling uitzendt voorzien wordt van een inrichting of een soortgelijke voorziening die de medisch deskundige in staat stelt de voor het bepalen van de patiëntdosis relevante parameters te kennen. Indien nodig kan de apparatuur deze informatie doorsturen naar het onderzoeksdossier.

Artikel 61

Bijzondere handelingen

1. De lidstaten zorgen ervoor dat de passende medische radiologische apparatuur, praktische technieken en randapparatuur worden gebruikt voor medische blootstellingen:

- a) van kinderen;
- b) in het kader van een bevolkingsonderzoek;
- c) waarbij de patiënt hoge doses krijgt toegediend, zoals het geval kan zijn bij interventieradiologie, nucleaire geneeskunde, computertomografie of radiotherapie.

Bijzondere aandacht wordt besteed aan de programma's voor kwaliteitsborging en de evaluatie of verificatie van doses en toegediende hoeveelheden activiteit voor deze handelingen.

2. De lidstaten zorgen ervoor dat de medisch deskundigen en de in artikel 57, lid 2, genoemde personen die de in lid 1 vermelde blootstellingen uitvoeren, een passende opleiding krijgen betreffende deze medisch-radiologische handelingen zoals overeenkomstig artikel 18 is vereist.

Artikel 62

Bijzondere bescherming tijdens zwangerschap en borstvoeding

1. De lidstaten zorgen ervoor dat de verwijzende persoon of de medisch deskundige, waar passend, overeenkomstig de voorschriften van de lidstaten zich ervan op de hoogte stellen of de persoon die een medische blootstelling ondergaat zwanger is of borstvoeding geeft, tenzij dat om duidelijke redenen kan worden uitgesloten of niet relevant is voor de radiologische procedure.

2. Indien zwangerschap niet uitgesloten kan worden, en afhankelijk van de medisch-radiologische procedure, wordt, met name wanneer het gaat om de buik- en bekkenstreek, bijzondere aandacht geschonken aan de rechtvaardiging, met name in verband met de urgentie, en aan de optimalisatie, waarbij rekening wordt gehouden met de blootstelling van zowel de zwangere persoon als met die van het ongeboren kind.

3. Bij personen die borstvoeding geven, wordt in de nucleaire geneeskunde, afhankelijk van de medisch-radiologische procedure, bijzondere aandacht geschonken aan de rechtvaardiging, met name in verband met de urgentie, en aan de optimalisatie, waarbij rekening wordt gehouden met zowel de persoon als met het kind.

4. Onverminderd de leden 1, 2 en 3 nemen de lidstaten maatregelen die bijdragen tot de bewustmaking van personen op wie dit artikel van toepassing is, zoals bekendmakingen op geschikte plaatsen.

Artikel 63

Toevallige en onopzettelijke blootstellingen

De lidstaten zorgen ervoor dat:

- a) alle redelijke maatregelen worden genomen om de waarschijnlijkheid en de omvang van toevallige of onopzettelijke blootstellingen van personen die medische blootstelling ondergaan tot een minimum te beperken;
- b) bij radiotherapeutische handelingen het programma voor kwaliteitsborging een studie van het risico van toevallige of onopzettelijke blootstellingen bevat;
- c) de onderneming voor alle medische blootstellingen een passend systeem invoert voor de registratie en analyse van gebeurtenissen die tot

toevallige of onopzettelijke blootstellingen leiden of kunnen leiden, in samenhang met het radiologische risico van de handeling;

d) er regelingen worden getroffen om de verwijzende persoon en de medisch deskundige alsmede de patiënt of zijn vertegenwoordiger in te lichten over een klinisch significante onopzettelijke of toevallige blootstelling en over de resultaten van de analyse;

e) i) de onderneming de bevoegde autoriteit zo snel mogelijk op de hoogte brengt van significante gebeurtenissen, overeenkomstig de voorschriften van de bevoegde autoriteit;

ii) de onderzoeksresultaten en de remediëringsmaatregelen om dergelijke gebeurtenissen te vermijden binnen de door de betrokken lidstaat vastgestelde termijn ter kennis worden gebracht van de bevoegde autoriteit;

f) er mechanismen bestaan om informatie die van belang is voor stralingsbescherming bij medische blootstelling en betrekking heeft op de lering die uit significante gebeurtenissen is getrokken tijdig te verspreiden.

Artikel 64

Ramingen van bevolkingsdoses

De lidstaten zorgen ervoor dat de verdeling van de individuele doses schatting bij medische blootstellingen voor radiodiagnostiek en interventieradiologie wordt bepaald, waar nodig rekening houdend met de leeftijdsverdeling en het geslacht van de blootgestelde bevolking.

Bijlage 8.2: Medische Stralingsbelasting

Nieuwe gegevens medische stralingsbelasting bekend (RIVM, 29-04-2014)

De stralingsdosis per inwoner als gevolg van medische diagnostiek in Nederland was in 2012 gemiddeld 0,93 mSv. Deze stralingsdosis is sinds 2002 ieder jaar gestegen al neemt de stijging wel af. Dit blijkt uit onderzoek van het RIVM onder de Nederlandse ziekenhuizen.

Het RIVM analyseert jaarlijks gegevens over de frequenties en doses van diagnostische verrichtingen waarbij straling wordt gebruikt. Deze gegevens worden gepubliceerd in opdracht van het Ministerie van VWS op de website www.rivm.nl/ims. Het gebruik van straling kan bijdragen aan goede diagnostiek, maar brengt een licht verhoogde kans op kanker voor de patiënt met zich mee. Deze kans wordt groter naarmate de dosis hoger is. De informatie die het RIVM hierover publiceert, moet ertoe bijdragen dat voor- en nadelen van het gebruik van straling bij medische diagnostiek goed worden afgewogen.

De gemiddelde stralingsdosis wordt berekend door de frequentie van de verrichtingen te combineren met de bijbehorende doses. Frequentiegegevens zijn bekend voor de jaren 2002 tot en met 2012. In 2013 zijn de frequentiegegevens over 2012 opgevraagd bij de ziekenhuizen met een online vragenlijst.

De grootste bijdrage aan de stralingsdosis per inwoner komt van CT onderzoeken: 0,45 mSv per inwoner. Sinds 2001 is er een duidelijk stijging te zien in het aantal CT onderzoeken dat per jaar wordt uitgevoerd. De CT onderzoeken die het meeste toevoegen aan de stralingsdosis zijn onderzoeken van de buik. Overige röntgenonderzoeken leveren een bijdrage van 0,38 mSv per inwoner. In deze categorie voegen angiografieën het meest toe. De dosis ten gevolge van nucleaire geneeskunde bedraagt 0,09 mSv. Hier leveren voornamelijk onderzoeken naar de hartfunctie een grote bijdrage.

Meer informatie kunt u vinden op de website: www.rivm.nl/ims.

Bijlage 8.3: Dosistrends röntgendiagnostiek in Nederland

Bron:

http://www.rivm.nl/Onderwerpen/M/Medische_Stralingstoepassingen/Trends_en_stand_van_zaken/Diagnostiek

Röntgenverrichtingen

De gemiddelde effectieve dosis voor de verschillende typen röntgenonderzoek varieert van 0,04 tot 12 mSv, zie tabel 1. Deze waarden zijn met de frequentie gewogen gemiddelden voor de verschillende categorieën. In Nederland wordt de dosis per radiologische verrichting niet structureel bepaald. Voor de schatting is met name gebruik gemaakt van gegevens afkomstig uit het [Demonstratieproject Patiëntendosimetrie radiologie](#), hier en daar aangevuld met gegevens uit de literatuur.

Tabel 1 Gemiddelde effectieve dosis per onderzoek voor verschillende typen röntgenverrichtingen.

Categorie onderzoek	Gemiddelde effectieve dosis (mSv)
Hand/bucky (exclusief thorax)	0,13
Thorax-onderzoek	0,04
Mammografie	0,35
Doorlichting/contrast	3,6
Angiografie coronair (diagnostische en interventie)	6,9
Angiografie overig (diagnostisch en interventie)	12
Röntgengeleide interventies (exclusief angiografie)	5,3

CT-onderzoeken

De waarden in tabel 2 zijn gebaseerd op metingen uitgevoerd in het kader van het [Demonstratieproject Patiëntendosimetrie radiologie](#). Met behulp van deze meetgegevens en gegevens over de frequentie van de onderzoeken is een gewogen gemiddelde effectieve dosis per onderzoek geschat.

Tabel 2: Overzicht van de verschillende CT-onderzoeken met de gemiddelde effectieve dosis per onderzoek en een indicatie (min-max) van de inter-ziekenhuisspreiding.

CT-onderzoek	Gemiddelde E (min-max) in mSv
Hoofd	1,2 (0,5 - 2,1)
Wervelkolom	3,1 (1,6 - 5,1)
Thorax	5,5 (1,7 - 12)
Abdomen	11 (5,9 - 19)
Bekken	7,4 (4,0 - 13)
Interventies	8,1

Zie ook: W. Teeuwisse, J. Geleijns, W. Veldkamp. An inter-hospital comparison of patient dose based on clinical indications. Eur Radiol (2007) 17: 1795-1805

Bijlage 8.4: Voorbeeld van een Inspectieproject

Als voorbeeld van de werkwijze en aandachtspunten van Inspecties worden delen van het PROJECTPLAN Inspectieproject A1013 Interventieradiologie en -cardiologie (2011)⁵¹ weergegeven.

1. Aanleiding en achtergronden

In de meeste ziekenhuizen kunnen patiënten onder doorlichting worden onderzocht of behandeld. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij het dotteren van patiënten met een verstopping van kransslagader of een lichaamsbloedvat. Tijdens deze behandeling staat de uitvoerend arts naast de patiënt die op de operatietafel ligt en kan daarom tijdens het belichten een grote dosis straling ontvangen. Uit gegevens van het Nationaal Dosis Registratie Systeem (NDRIS) blijkt dat personen werkzaam in de interventiecardiologie gemiddeld een veel hogere stralingsdosis ontvangen dan in de rest van de gezondheidszorg. Bijvoorbeeld in 2008 waren de gemiddelde doses in NDRIS voor personen werkzaam in de interventiecardiologie 2,30 en voor personen werkzaam in de totale gezondheidszorg 0,25 mSv (doses gemeten buiten het loodschoot).

Interventiecardiologie

Naar aanleiding van de verlaging van de blootstellingslimiet voor ioniserende straling in 2002, heeft de Commissie Coronairangiografie van de Nederlandse Vereniging voor Cardiologie (NVvC) geschat dat het voor de meeste interventiecardiologen mogelijk is om de jaardosis buiten het loodschoot te beperken tot minder dan 20 mSv, mits er "de nodige maatregelen genomen worden en er gewerkt wordt volgens een adequaat protocol". Om dit te onderbouwen, is in 2002 door NRG voor een door de NVvC geselecteerde groep interventiecardiologen, die volgens de NVvC aan deze twee voorwaarden (maatregelen en protocol) voldoet, de jaardosis geanalyseerd. Er bleek een aanzienlijke stijging te zijn van personen die buiten het loodschoot meer dan 20 mSv ontvangen, namelijk van 0% in 1996 tot 7,9% in 2001. De gemiddelde dosis van deze specifieke groep cardiologen varieerde in deze periode van 6,81 tot 8,17 mSv per jaar buiten het loodschoot (Bron: Onderzoek naar de doses bij interventieradiologie, 1996-2001. NRG 2003).

Als van een groep cardiologen die met maatregelen en volgens protocol werkt, al zo'n 8% buiten het loodschoot meer dan 20 mSv ontvangt, is het de vraag hoe het zit met de ontvangen dosis van interventiecardiologen die minder maatregelen of protocollen hebben of toepassen.

Interventieradiologie

Personen die werkzaam zijn in de interventieradiologie zijn in het NDRIS (nog) niet als aparte blootgestelde beroepsgroep opgenomen. Interventieradiologen worden in het huidige NDRIS-systeem ingedeeld in de groep "algemene röntgendiagnostiek". In deze groep zit een relatief grote groep (1%) met een dosis op het loodschoot van meer dan 5 mSv per jaar. Naar alle waarschijnlijkheid zijn dit personen die te maken hebben met interventies. Het percentage personen met meer dan 20 mSv is in de periode 1999 tot en met 2008 ruim verdubbeld (van 0,1% naar 0,22%). Het aantal niet-cardiologische ingrepen onder doorlichting is dan ook de laatste jaren aanzienlijk toegenomen.

⁵¹

http://www.inspectieszw.nl/Images/A1013%20projectplan%20interventieradiologie%20en%20cardiologie%202011_tcm335-331652.pdf (geraadpleegd op 30-01-2015)

Voorbeelden van dergelijke relatief nieuwe technieken zijn: uterus-embolisatie (waarbij de bloedtoevoer van vleesbomen wordt geblokkeerd met kleine plastic of gelatine korreltjes), het plaatsen van een stent bij een plaatselijke verwijding van de buikslagader (aneurysma) en de behandeling van een acuut ischemisch herseninfarct.

De cardiologische interventietechnieken zijn inmiddels vrij routineus en gestandaardiseerd. Dit zorgt voor een relatief lage stralingsbelasting voor de cardioloog. De niet-cardiologische ingrepen zijn veel nieuwer en meer divers. Dit verhoogt de (kans op) een hogere stralingsbelasting voor de direct betrokkenen.

Initiatieven van klinisch fysici: Optimalisatie en risicoanalyse; laatste ontwikkelingen (zie ook bijlage 3)

De Nederlandse Vereniging voor klinisch fysici heeft een aantal initiatieven genomen die een zinvolle bijdrage leveren aan het stralingsbeschermingsbeleid van ziekenhuizen:

Optimalisatie:

- De analoge doorlichtingsapparatuur is steeds vaker vervangen door digitale beeldsystemen. Het blijkt dat de meeste medische specialisten erg aan digitale beelden moeten wennen; de perceptie van digitale beelden is anders dan van analoge beelden. De leverancier van digitale doorlichtingsapparatuur “lost dit probleem meestal op” door het apparaat op een hogere dosis af te stellen. En als de leverancier dit niet doet dan vragen de specialisten in het begin vaak wel een hogere dosis-instelling van de apparatuur. Dit verhoogt niet alleen de dosis van patiënten, maar ook van de omstanders. Een belangrijke stralingshygiënische winst is dus te halen uit een optimale instelling van de apparatuur. Als de standaard beschermingsmaatregelen tegen blootstelling aan straling worden genomen, is bij een geoptimaliseerde instelling van de doorlichtingsapparatuur een verdere verlaging van de ontvangen stralingsdosis van omstanders eigenlijk niet meer mogelijk. Om ziekenhuizen uit te dagen de instellingen te optimaliseren heeft het Platform voor Radiologie en Nucleaire Geneeskunde van de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie (NCS) in juli 2009 diagnostische referentieniveaus (DRNs) vastgesteld voor het uitvoeren van twee interventietechnieken; een diagnostische CT coronaire angiografie en een conventionele diagnostische coronaire angiografie (hartkatheterisatie). (Bron: Diagnostische Referentieniveaus in Nederland Fase 2, 31 juli 2009.) Bovendien zijn er streefwaarden voor beide technieken vastgesteld, die, volgens de NCS, “haalbaar zijn door bijzondere inspanningen van de gebruiker op het gebied van de techniek (moderne apparatuur) en het acquisitieprotocol”.

Vanwege de meer complexe toepassing is ook de waarde voor de DRN voor de CT katheterisatie wat complexer. De DRN voor de conventionele techniek daarentegen is uitgedrukt in een Dosisoppervlakteproduct (DOP, Gy.cm²) en is eenvoudig af te lezen op de bedieningsconsole van de interventieapparatuur. De naar een gemiddelde patiënt met een gewicht van 76,4 kg geïnterpoleerde DOP-waarde van een ziekenhuis geeft daarom een indicatie van de optimalisatie van de conventionele diagnostische hartkatheterisatie onder doorlichting in dat ziekenhuis. Dit kun je op zijn beurt weer beschouwen als een indicatie voor de optimalisatie van de overige verrichtingen onder doorlichting. Het DRN en de haalbare waarde (streefwaarde) voor conventionele diagnostische coronaire angiografie zijn respectievelijk: DOP = 80 Gy.cm² en 30 Gy.cm².

- Er is een handig instrument op de markt voor het optimaliseren van situaties waarin personen worden blootgesteld aan ioniserende straling; “Dose Aware” (Philips). Het verloop van het momentane dosistempo wordt direct inzichtelijk gemaakt op een schermplaatje. Gebruikers zien zodoende meteen het effect van bijvoorbeeld het innemen van een andere positie. Dit is een handig hulpmiddel gebleken bij de bewustwording van specialisten en het aanleren van andere werkmethoden.

Systeemverplichtingen

Risicoanalyse

De risicoanalyse is de basis voor het nemen van maatregelen en het schrijven van werkprotocollen. Dit betekent dat de ziekenhuizen moeten beschikken over een adequate risicoanalyse voor het uitvoeren van ingrepen onder doorlichting.

Protocollen

De stralingsbelasting van personen die betrokken zijn bij cardiologische en radiologische interventies, wordt gereduceerd door het nemen van maatregelen en het strak protocolleren van deze maatregelen en interventies. In het kader van het ALARA-principe, moet volgens dergelijke protocollen worden gewerkt. Dit zal worden beoordeeld⁵².

Intern toezicht:

Het systeem van intern toezicht op het toepassen van de protocollen zal worden beoordeeld.

Stralingshygiënische verplichtingen

Daarnaast zal er ook op de werkplek worden geïnspecteerd. De onderwerpen die daar de focus zullen krijgen zijn:

Maatregelen:

Welke beschermingsmiddelen worden ingezet bij het uitvoeren van radiologische of cardiologische interventies?

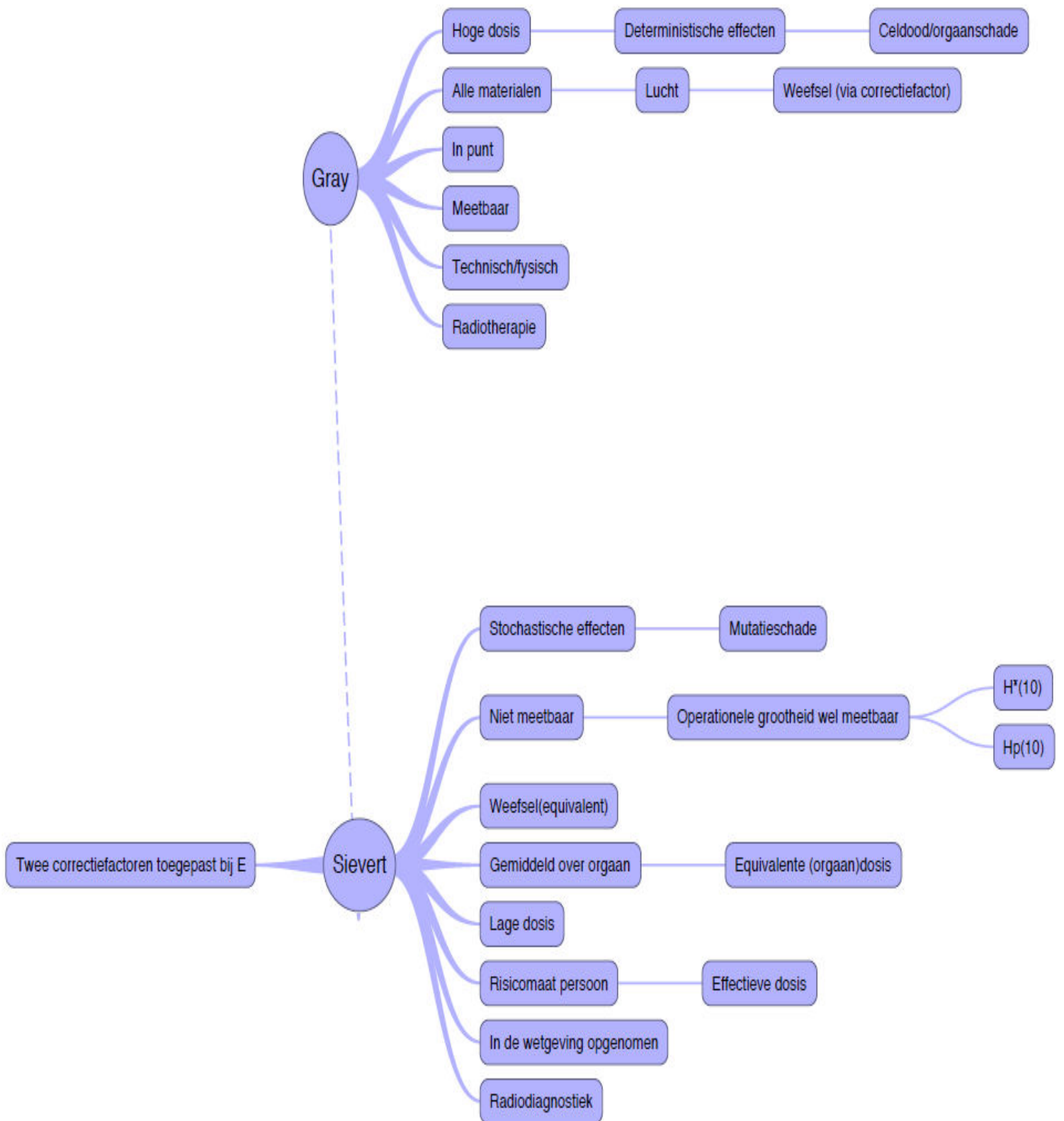
Dosimetrie:

Omdat de doelgroep kans loopt op een hoge jaarlijkse stralingsdosis, en de ontvangen dosis een maat kan zijn voor de zorgvuldigheid van het navolgen van de protocollen, is het van belang dat de persoonlijke dosiscontrolemiddelen op een goede manier en op de juiste momenten worden gedragen. Ook is het van belang dat de controlemiddelen tijdig worden ingeleverd voor uitlezing.

Tijdens de inspectie zal aandacht worden besteed aan de draagdiscipline, de controle hierop, op de omwisselprocedure en de terugkoppeling van de dosisresultaten.

⁵² Bij het protocolleren van interventies moet men in het achterhoofd houden dat behandeling onder doorlichting mede wordt bepaald door de patiënteigenschappen die niet altijd van te voren te voorzien zijn. De term “een strak protocol” is in die gevallen geen garantie voor een korte procedure. De wijze waarop tijdens de procedure de stralingsbescherming wordt ingevuld met maatregelen is natuurlijk tot op zekere hoogte wel te protocolleren. Dit is ook de reden dat er alleen voor de diagnostische hartkatheterisaties een DRN is opgesteld omdat deze vrij routinematig en eenvoudig kunnen worden uitgevoerd.

Bijlage 8.5: Overeenkomsten en verschillen tussen gray en sievert



Bijlage 8.6: Sentinel Node Procedures

Onderstaande informatie is afkomstig uit het UMCU met dank aan mw. J.P.C. Hoornstra, stralingsdeskundige.



Sentinel Node procedures en markeringen met ^{125}I -zaadjes in borsttumoren en/of okselklieren

In het UMC Utrecht worden Sentinel Node procedures uitgevoerd bij verschillende organen (o.a. cervix, borst, mondbodem, penis en vulva). De sentinelnode (SN, schildwachtklier) is de eerste lymfeklier in het drainagetraject vanuit de tumor. Deze SN heeft een zeer voorspellende waarde voor eventuele lymfogene metastasering en wordt met een open radioactieve bron gevisualiseerd. Indien deze SN geen metastase bevat kan met hoge waarschijnlijkheid lymfogene metastasering worden uitgesloten.

Op de afdeling Nucleaire Geneeskunde wordt $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -nanocolloid (open bron) rond de tumor ingespoten en aan de buitenzijde van het lichaam wordt een markering aangebracht ter plaatse van de radioactiviteit.

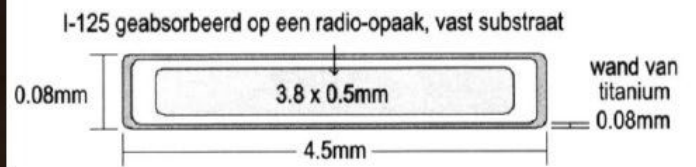
Op de operatiekamer wordt met behulp van de markering en een gammateller (probe) de SN verwijderd. Deze handelingen zorgen voor een geringe stralingsbelasting bij de operateur en het OK-personeel. Op de afdeling Pathologie worden de weefselpreparaten en SN bipten bewerkt en histologisch onderzocht op de aanwezigheid van tumorcellen. Afhankelijk van het moment van bewerking kan dit een stralingsbelasting op de handen van de medewerkers van de pathologie geven. In het UMC Utrecht worden deze preparaten direct bewerkt.

Naast het gebruik van $^{99\text{m}}\text{Tc}$ wordt voor de markering van tumoren sinds 2012 ook gebruikt gemaakt van ^{125}I -zaadjes. Dit zijn ingekapselde radioactieve bronnen. De stralingsrisico's van deze ingekapselde bronnen zijn zeer gering. Het betreft namelijk een zeer kleine hoeveelheid radioactiviteit waardoor blootstelling van de betrokken medewerkers zeer beperkt blijft. De hoeveelheid radioactiviteit per bron is echter voldoende groot om onder het regime van de kernenergiewet te vallen (ze zijn niet vrijgesteld). Hierdoor is een registratie van de bronnen verplicht. Vanwege het kleine formaat van de bronnen (zie figuren) bestaat er een kans dat de bronnen onopgemerkt blijven en onbedoeld zoekraken. Het is belangrijk hier bij de uitvoering van de procedure alert op te blijven.

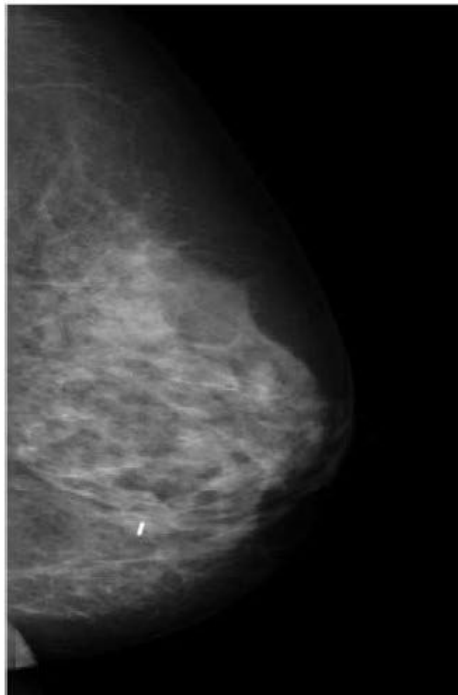
In onderstaande tabel wordt naast de gegevens van de bronnen, de stralingsbelasting voor de operateur en pathologisch medewerkers bij 1 procedure weergegeven.

Bron (gegevens)	Activiteit (MBq)	Halveringstijd (dagen)	Uitgezonden energie (keV)	Stralingsbelasting chirurg (microSv)	Stralingsbelasting patholoog (microSv)
^{125}I -zaadje	7,4	59,4	35	0,7 op de handen	< 0,1 op de handen
$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -nanocolloid	120	0,25	141	25 op de handen	0,9 op de handen

Bijlage



Jodiumzaadje



Mammografie met jodiumzaadje

gammaprobe

Bijlage 8.7: Dosisconversiecoëfficiënten: DOP naar effectieve dosis

Data used to obtain effective dose estimates for fluoroscopically-guided diagnostic and interventional procedures. Adapted and reprinted with permission of the National Council on Radiation Protection and Measurements, http://www.ncrppublications.org/Reports/160.		
Groups/Subgroups	Examinations	Dose Conversion Coefficient (DCCE) [mSv·(Gy·cm²)⁻¹]
Urinary studies	Cystometrography, Cystography, Excretory urography, micturating cysto-urethrography, Urethrography	0.18
Endoscopic retrograde cholangiopancreatography (ERCP)		0.26
Arthrograms		0.1
Orthopedic procedures		0.01
Vertebroplasty		0.2
Obstetrics and gynaecology procedure	Pelvimetry	0.29
	Hysterosalpingogram	0.29
Noncardiac diagnostic procedures		
Peripheral vascular	Arteriography (all types)	0.26
	Peripheral phlebography/venography	0.1
	Carotid and cerebral angiography	0.087
Renal	Antegrade pyelography, Retrograde pyelography	0.18
	Renal angiogram, Abdominal aortography	0.26
	Thoracic aortography, arch angiogram	0.12
Other peripheral		
Neurological	Cervical spine	0.13
	Thoracic spine	0.19
	Lumbar spine	0.21
	Pulmonary angiography, Venacavogram	0.12
Noncardiac interventional vascular procedures		
Percutaneous transluminal angioplasty (PTA)		0.26
Stent placement	Renal/visceral PTA with stent, Iliac PTA with stent, Bile duct, dilation and Stenting	0.26
	Carotid stent	0.087
Inferior vena cava filters	Filter placement only, Hepatic	0.26
Embolization	Chemoembolization, Pelvic arterial Embolization, Pelvic vein embolization: ovarian vein, Other tumor embolization, Embolization	0.26
	Pulmonary angiography with filter, Bronchial artery embolization	0.12
	Thrombolytic therapy	0.26
	Transjugular intrahepatic portosystemic shunt (TIPS)	0.26
Cardiac procedures		
Diagnostic coronary angiography		0.12
Interventional procedures	Angioplasty	0.20-0.26
	Percutaneous transluminal coronary angioplasty	0.18-0.28
	Embolization	0.26
	Cardiac radiofrequency ablation	0.1-0.23

Zie website IAEA:

https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content/InformationFor/HealthProfessionals/4_InterventionalRadiology/patient-staff-dose-fluoroscopy.htm (geraadpleegd op 08-12-2015)

Beschrijving situatie

Enkele maanden geleden werd onze hulp gevraagd voor de analyse van een stralingsincident in ziekenhuis A te B. Wij denken dat dit incident wijst op een probleem dat in veel meer huizen kan spelen. Dat is de reden van dit artikel.

Wat is er gebeurd? Halverwege een doorlichtmiddag viel het de laborante op dat het toestel tegen het einde van een defaecografie-onderzoek een zeer hoge dosiswaarde aangaf van 3000 mGy. Het dosisgeheugen van het toestel ging niet meer dan 48 h terug. Het vermeldde nog twee hoge doses van 2000 en 2500 mGy. De fabrikant van het toestel had geen storings kunnen vinden. Bij de inspectie volksgezondheid werd melding gedaan van een stralingscalamiteit en een intern onderzoek werd gestart waarbij het ziekenhuis ondergetekenden als extern deskundigen heeft aangetrokken.

Hoe waren de röntgenonderzoeken uitgevoerd? De defaecografieën waren gemaakt in de gebruikelijke zijdelingse positionering van de patiënt en gediafragmeerd op rectum en anus. De patiënten waren ingesteld onder doorlichting en opnamen waren gemaakt in rust, met filmpjes in CINE mode bij aanspannen van de bekkenbodemspieren, persen en defaecatie. De filmpjes waren 10-30 sec lang. Een voorschrift over de uitvoering van het onderzoek sprak over doorlichtingsopnamen. Inderdaad was het bij het gebruikte toestel mogelijk om videoregistraties van een doorlichtsessie te bewaren en naar het PACS te verzenden. De beeldkwaliteit van deze opnamen was bij zijdelingse projectie van een obese patiënt maar matig. Om deze reden gebruikten de assistenten in opleiding tot radioloog, die het onderzoek gewoonlijk uitvoerden, vaak de CINE mode, een snelle opeenvolging van foto's met veel betere kwaliteit. De frame rate, het aantal opnamen per seconde, stond bij de gewraakte onderzoeken ingesteld op 4 fps.

De fabrikant van het toestel adviseerde bij de defaecografieën de CINE mode niet meer te gebruiken. De dosiswaarden bij de defaecografie waren na het incident een factor 50(!) lager.

Voorts worden na het incident de dosiswaarden van ieder doorlichtingsonderzoek met de hand genoteerd. De bevindingen worden regelmatig door de radiologen en de klinisch fysicus geëvalueerd.

Nader onderzoek door de calamiteitencommissie van het ziekenhuis levert nog meer relevante feiten op. Het gebruikte toestel is tien jaar oud, maar voldoet aan alle wettelijke eisen. Na vijf minuten doorlichten klinkt een signaal. De doorlichting is gepulst en de parameters zijn goed ingesteld. Tijdens en direct aansluitend op het onderzoek zijn twee dosiswaarden, het dosis-oppervlakteproduct (DAP) en de patiënt-intreedosis (PED) op de bedieningslessenaar af te lezen. Deze dosiswaarden worden niet automatisch geregistreerd. De geconstateerde hoge dosiswaarden zijn geheel toe te schrijven aan het gebruik van de CINE mode op het toestel bij defaecografie-onderzoek. Tijdens deze onderzoeken worden in een statische zijdelingse richting foto's ge-

maakt van het rectum en de anus in rust, tijdens ophouden, persen en defaecatie. De recente defaecografieën werden steeds drie CINE runs gemaakt van 10-30 sec. De andere radiologische toestellen op de afdeling, de CT-scanner en de angiografische en interventiestatieven, registreren de dosis wel automatisch. Een evaluatie van de doorlichtonderzoeken van eerdere jaren maakt aannemelijk dat de manier van werken de afgelopen jaren niet is veranderd.

Discussie

Het doorlichtingsonderzoek van de tractus digestivus is de laatste tien jaar belangrijk in betekenis afgenomen. Het gevolg hiervan is dat de aandacht en de kennis van de radiologen op dit terrein is afgenomen. Vooral ook waar het gaat om de stralingshygiënische aspecten. De technische mogelijkheden van de radiologische toestellen zijn intussen voortgeschreden. De CINE modus is een relatief nieuwe mogelijkheid die voor enkele toepassingen, met name slikonderzoek van de hals, toegevoegde waarde heeft. De CINE mode is gemakkelijk te activeren en de uitwerking kan de onderzoeker een zelfde indruk geven als de gepulste doorlichting, maar dan met een veel betere beeldkwaliteit. Anders dan de doorlichting wordt de CINE mode niet beperkt door akoestische waarschuwingssignalen. De weergave van de dosiswaarden op het toestel kan de onderzoeker op het spoor brengen van bedieningsfouten. Maar als de dosiswaarden niet opvallen tussen de andere displays, niet systematisch worden bewaard en geëvalueerd, blijft een foute werkwijze lang onopgemerkt. Dosiswaarden alleen hebben voor een onderzoeker niet automatisch betekenis als normaalwaarden of een dosislimiet niet expliciet in een onderzoeksprotocol staan vermeld. De voorgaande overwegingen kunnen doen vermoeden dat dit incident niet op zich zelf staat, maar wijst op een verkeerde werkwijze die op deze afdeling, maar ook elders in het land kan zijn ontstaan.

Conclusie

Uit het gebeuren zijn enkele lessen te trekken. Het is niet voldoende dat de radiologische dosis tijdens een doorlichtingsprocedure zichtbaar is. De waarden moeten ook worden geregistreerd en regelmatig getoetst aan standaardgetallen voor dit onderzoek op dit apparaat. De CINE mode voor het vastleggen van de bevindingen bij doorlichtingsonderzoek moet met terughoudendheid worden gebruikt. Voor de meeste toepassingen is een frame rate van 1 per seconde voldoende. Bij het overschrijden van vast te stellen dosiswaarden moet de onderzoeker worden gewaarschuwd. Bijvoorbeeld door een akoestisch signaal naar analogie van de wettelijke verplichting van de zoemer na vijf minuten doorlichting. Aan de te bereiken stralingsdosis bij onderzoek in CINE mode moeten harde grenzen worden gesteld. Omdat de laatste twee punten mogelijk ingrijpende wijzigingen in de techniek van de apparatuur met zich mee brengen, zijn deze pas op termijn te realiseren.



NCRP Commentary No. 27: Implications of Recent Epidemiologic Studies for the Linear-Nonthreshold Model and Radiation Protection

National Council on Radiation Protection and Measurements

Overview

In May 2018, the National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) published Commentary No. 27, *Implications of Recent Epidemiologic Studies for the Linear-Nonthreshold Model and Radiation Protection*.

For over 40 years, the linear-nonthreshold (LNT) dose-response model has been used to develop practical and prudent guidance on ways to protect workers and members of the public from the potential for harmful effects of ionizing radiation, specifically, from low linear-energy transfer* (low-LET) radiation.

Commentary No. 27 was produced by an interdisciplinary group of radiation experts who critically assessed recent epidemiologic studies of populations exposed to low dose and low dose-rate ionizing radiation. The studies were then judged as to their strength of support for the LNT model as used in radiation protection.

NCRP concludes that the recent epidemiologic studies support the continued use of the LNT model for radiation protection. This is in accord with judgments by other national and international scientific committees, based on somewhat older data, that no alternative dose-response relationship appears more pragmatic or prudent for radiation protection purposes than the LNT model.

The Commentary provides a critical review of 29 high-quality epidemiologic studies of populations exposed to radiation in the low dose and low dose-rate range, mostly published within the last 10 years. Studies of total solid cancers and leukemia are emphasized, with briefer consideration of breast and thyroid cancer, heritable effects, and some noncancers, *e.g.*, cardiovascular disease and cataracts.

The epidemiologic methods, dosimetry and statistical approaches for each study were evaluated. These components of study quality were used to classify each study as to its support of the LNT model for use in radiation protection. The classifications were: strong, moderate, weak-to-moderate, no support, and inconclusive.

The 29 epidemiologic studies are listed below with literature references and the classification for support of the LNT model. Full references are provided in the Commentary.

*Linear energy transfer (LET) is a measure of the energy lost by ionizing radiation as it travels through matter. Low-LET radiations (*e.g.*, x rays, gamma rays, and electrons) transfer their energy at a low rate. High-LET radiations (*e.g.*, protons, alpha particles, and heavy ions) transfer their energy at a higher rate.

**Purchase a copy of NCRP Commentary No. 27:
*Implications of Recent Epidemiologic Studies for the
Linear-Nonthreshold Model and Radiation Protection***
<https://www.ncrppublications.org/Commentaries/27>

Bijlage 8.10: Wettelijke Eindtermen

De wegwijzer naar informatie en diensten van alle overheden



Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ

Geldend van 18-12-2015 t/m heden

[bijlage 3.3](#)[bijlage 3.3](#)[bijlage 3.3](#)[bijlage 3.3](#)[bijlage 3.3](#)

Bijlage 3.3, behorende bij artikel 3.20

Datum van inwerking-treding	Terugwerkende kracht	Betreft	Ontstaansbron			Inwerkingtreding		
			Ondertekening	Bekendmaking	Kamerstukken	Ondertekening	Bekendmaking	Opmerking
18-12-2015		Wijziging	25-11-2015	<u>Stcrt. 2015, 46041</u>		25-11-2015	<u>Stcrt. 2015, 46041</u>	
01-07-2014		Nieuw	16-06-2014	<u>Stcrt. 2014, 17286</u>		16-06-2014	<u>Stcrt. 2014, 17286</u>	

Onderdeel A: Opleiding Stralingshygiëne voor Medisch Specialist die gebruik maken van röntgenapparatuur

De eindtermen zijn voorzien van de aanduidingen K = kennis (knowledge); V = vaardigheden (skills) en C = competenties (competences). Deze drie categorieën zijn in de genoemde volgorde hiërarchisch ondergeschikt: een hogere categorie-aanduiding impliceert dat ook aan de voorgaande moet zijn voldaan (K < V < C).

Kerncompetentie 1 De medisch specialist verricht zijn op de juiste wijze gerechtvaardigde medische procedure op zodanige manier, dat de patiënt een redelijk lage stralingsbelasting ontvangt, waarbij het totale risico van de procedure voor de patiënt zo laag mogelijk wordt gehouden (het ALARA-principe). Bovendien gebruikt de medisch specialist de binnen de klinische context geschikte beeldacquisitietechniek met de geschikte diagnostische beeldkwaliteit (C).

Nadere typering van de context

De procedures onder doorlichting zullen doorgaans worden uitgevoerd in daartoe geschikte ruimtes (bewaakte of gecontroleerde zones), zoals operatiekamers, katheterisatiekamers of angioruimtes. Vaak – maar niet altijd en overall, afhankelijk van de lokale afspraken – wordt de doorlichting uitgevoerd of ondersteund door een MBB'er, een verpleegkundige of een OK-assistent. Gedurende de procedure is de aanwezige medisch specialist (de opdrachtgever conform de Wet BIG) verantwoordelijk voor (optimalisatie van) zowel de dosis die de patiënt ontvangt als die van de in de onderzoeks- of behandelruimte aanwezige medewerkers.

In deze context gaat het erom dat de medisch specialist ³³:

1. volgens geaccepteerde professionele medische standaarden handelt met betrekking tot de rechtvaardiging van de blootstelling. Hierbij wordt het PROLARA-concept³⁴ gehanteerd, hetgeen inhoudt, dat het stralingsrisico wordt afgewogen naar de totale uitkomst van de medische procedure betreffende risico's en levensverwachting (C);
2. de medische procedure uitvoert met daartoe geschikte (bijvoorbeeld qua projectiemogelijkheden) en voor het specifieke doel optimaal ingestelde doorlichtapparatuur, zoals voor pediatrische behandelingen, langdurige procedures (V);
3. de röntgenapparatuur op de geschikte wijze voor een specifiek doorlichtprotocol gebruikt, daarbij gebruik makend van de aanwezige opties en hulpmiddelen tot dosisreductie (V);
4. zorg draagt voor juiste patiëntpositionering zonder gebruik te maken van doorlichting en de gewenste projectiestanden indien mogelijk direct kiest zonder de proefondervindelijke methode met doorlichting te gebruiken (C);
5. handelt volgens standaarden (Good Medical Practice) voor specifieke doorlichtprocedures teneinde de totale doorlichttijd te beperken (C).

Daarvoor is het nodig dat de medisch specialist³⁵:

6. de aard van röntgenstraling begrijpt en de wijze waarop deze wordt geproduceerd en verder het elektromagnetische spectrum, röntgenspectra, interactie van röntgenstraling met materie, achtergrondstraling (K);
7. de functie beschrijft van de onderdelen van de beeldvormende keten (K);
8. beeldkwaliteit globaal beschrijft in termen van resolutie (spatueel en temporeel), signaal-ruisverhouding en contrast en het onderscheid benoemt en herkent tussen bijvoorbeeld hoog- en laagcontrastbeelden, etc. (K/V);
9. bekend is met de invloed die het aanpassen van verschillende instelparameters of het gebruik van diverse opties heeft op beeldkwaliteit en patiëntendosis en dit toepast: buisspanning, kilovolt (kV); buisstroom (mA); filters (extra bundelopharding); wigfilters, diafragma (beperken veldgrootte); gepulste doorlichting (pulshoogte, -lengte, -frequentie); beeldfrequentie; vastzetten laatste beeld (Last Image Hold); filmodus (cine; vastzetten belichtingswaarde (set point)); hoge-dosis/lage-dosisbelichtingsregeling; vergroting; strooistralenrooster; projectie- en angulatiestanden (PA, LAT etc.); automatische belichtingsregeling; geometrie (positie röntgenbuis/positie beeldontvanger en omgekeerde kwadratenwet), het gebruik van contrast; routeplanning (road mapping) en deze waar nodig toepast (V);
10. de principes van de stralingsbescherming kent en toepast: rechtvaardiging; ALARA, dosislimieten voor werkers (K/V);
11. bekend is met de relevante basis- en operationele grootheden (geabsorbeerde dosis, intreehuidsdosis, orgaandosis (equivalente dosis), effectieve dosis, dosis-oppervlakte-product, detectordosis) (K);
12. globaal de dosisverdeling in en rond de patiënt beschrijft (verzwakkingscurve, bijdragen van strooistraling) (K);
13. de functie kent van de in de röntgenopstelling ingebouwde dosismeter (Dosis-Oppervlakte-Product, DOP); op de hoogte is van dosisreferentiewaarden voor diagnostische procedures en in voorkomende situaties een klinisch fysisch raadpleegt, bijvoorbeeld wanneer een schatting van een orgaandosis of de effectieve dosis nodig is na een intensieve/ lange doorlichtprocedure (K/V);
14. zich realiseert, dat er speciale pediatrie doorlichtprotocollen bestaan en de doorlichtparameters aanpast bij het doorlichten van kinderen in diverse leeftijdsklassen (V);
15. de procedure kent en die volgt indien onjuiste of onbedoelde blootstelling heeft plaatsgevonden (V/C);
16. de voor- en nadelen kent van het toepassen van afscherming op de patiënt (bijvoorbeeld gonadenafscherming, bismut-afdekking, etc.) (K);
17. niet terughoudend is bij het behandelen van een urgente (zwangere) patiënt waarbij doorlichting nodig is (V).

Kerncompetentie 2 De medisch specialist werkt op een veilige manier volgens het ALARA-principe met röntgenstraling om onnodige blootstelling van zichzelf, de andere aanwezige werkers en eventuele ondersteuners te voorkomen (C).

Nadere typering van de context

In het algemeen zal het werken volgens gebruikelijke protocollen (Good Medical Practice) leiden tot geoptimaliseerde patiëntendoses en relatief lage doses voor de medewerkers, met andere woorden: dosisreductie voor de patiënt is meestal congruent met een lagere dosis voor de arts en de omloopmedewerker. Desondanks moet er – zeker bij een hoog werkaanbod en bij bepaalde procedures – extra aandacht worden gegeven aan beschermende maatregelen voor de medewerkers. De dosislimieten voor de medisch specialist en de medewerkers mogen niet worden overschreden.

In deze context gaat het erom dat de medisch specialist:

18. een persoonsdosismeter draagt indien noodzakelijk of verplicht (V);
19. uitslagen van persoonsdosimetrie relateert aan werkbelasting en type van uitgevoerde procedures op specifieke doorlichtapparatuur (V);
20. de geschikte afschermingshulpmiddelen gebruikt (bijvoorbeeld een aan het plafond gemonteerd beweegbaar loodglas) (C);
21. zich bewust is van de positie die alle medewerkers innemen rondom een patiënt die wordt doorlicht en dat hij de voor de procedure niet essentiële omstanders een grotere afstand laat houden of vraagt de ruimte te verlaten (C);
22. niet terughoudend is in de zorg voor en de (acute) behandeling van patiënten die (mogelijk) radioactief zijn vanwege een voorafgaand nucleair-geneeskundig onderzoek of ten gevolge van stralingsincidenten/ongevallen (V);
23. speciale aandacht geeft aan zwangere medewerkers (dosislimiet foetus, toepassen van het ALARA-principe, voldoen aan de gestelde (ziekenhuis)regels, risicoperceptie) (C).

Daarvoor is het nodig dat de medisch specialist:

24. de basisprincipes van de stralingsbescherming (tijd, afstand, afscherming) kent en in de praktijk toepast om onnodige blootstelling te vermijden (V);
25. de relevante dosislimieten kent (effectieve dosis en equivalente dosis voor geselecteerde organen, bijvoorbeeld extremiteiten, ooglenzen) voor blootgestelde (radiologisch) werkers en niet-blootgestelde werkers (niet-radiologisch werkers, zoals verpleging, helpers) (K);
26. weet welke posities rond een patiënt beter kunnen worden vermeden tijdens doorlichten (indien mogelijk) en dit toepast (K/V);
27. de specifieke maatregelen kent die genomen moeten worden indien medewerkers zwanger zijn (K);
28. vertrouwd is met de relevante operationele dosismetingen (persoonsdosisequivalent, $H_p(10)$ en omgevingsdosisequivalent, $H^*(10)$) (K);
29. de relatie begrijpt tussen de uitslag van een persoonsdosismeting en de effectieve dosis (afhankelijk van de draagpositie van de dosismeter, loodequivalent van het loodschoot, kV-instelling enzovoort) en hiermee rekening houdt (V);
30. bekend is met de risico's van radioactiviteit die in speciale medische procedures wordt toegepast, zoals de schildwachtkliermethode (sentinel node) met ^{99m}Tc en de lokalisatie van niet-palpabele tumoren met ^{125}I en hiermee zodanig omgaat, dat het risico laag blijft (V);
31. de functie en de doelmatigheid kent van de beschikbare afschermingshulpmiddelen (loodschorten, schildklierkraag, loodglasbril) (K).

Kerncompetentie 3 De medisch specialist legt op verzoek of indien noodzakelijk stralingsrisico's globaal uit aan de patiënt, diens familie of andere betrokkenen. Daarnaast communiceert de medisch specialist met klinisch fysici, MBB'ers, verpleegkundigen/OK-assistenten en stralingsdeskundigen over het optimaliseren van de stralingsbescherming op de afdeling. Daarbij wordt behalve patiëntenblootstelling ook de blootstelling van de medewerkers en derden in ogenschouw genomen, evenals de wettelijke begrenzingen. De medisch specialist aarzelt niet om wanneer nodig experts (klinisch fysicus, radioloog) te consulteren (C).

Nadere typering van de context

Aangezien de medisch specialist verantwoordelijk is voor de toegediende stralingsdosis aan de patiënt, moet hij de risico's hiervan kennen en kunnen uitleggen. Omdat een deel van de kennis een beperkte houdbaarheid heeft, is het van belang dat de medisch specialist de funderende principes uit de stralingshygiëne en aanverwante vakgebieden begrijpt, zodat hij in staat is zijn kennis bij te houden.

In deze context gaat het erom dat de medisch specialist:

32. de grenzen van zijn eigen kennis en deskundigheid betreffende de effecten van straling kent en erkent, de juiste vragen daarover weet te formuleren en zo nodig ondersteuning vraagt bij de aangewezen deskundigen (zoals MBB'er of klinisch fysicus) (C);
33. indien noodzakelijk met alle betrokkenen communiceert over zaken betreffende stralingsbescherming (V);
34. stralingsrisico's in het perspectief ziet van de andere aanwezige risico's en de maatschappelijke context (V);
35. op zijn eigen stralingsrisicoperceptie reflecteert (C).

Daarvoor is het nodig dat de medisch specialist:

36. aan een borstvoeding gevende patiënt uitlegt, dat blootstelling aan röntgenstraling geen reden is om de borstvoeding te onderbreken of staken, maar een toegediend contrastmiddel eventueel wel (K, V);
37. de verschillende meebepalende factoren van (stralings)risicoperceptie kent en tevens rekening houdt met de valkuilen om effectief te communiceren over stralingsrisico's (V);
38. een globale kennis heeft van de niet-ioniserende stralingsrisico's in vergelijking met die van ioniserende straling (K);
39. onderscheid weet te maken tussen feiten en aannames betreffende de risico's van ioniserende straling (K);
40. herkent dat er een gecompliceerde relatie is tussen enerzijds wetenschappelijke kennis over stralingsbescherming en anderzijds de soms oploeiende maatschappelijke onrust en persoonlijke emoties hierover (K);
41. de rechtvaardiging als de sleutel tot acceptatie van medische blootstelling aan ioniserende straling beschouwt (K);
42. zich bewust is van de verschillende professionele rollen van MBB'ers, klinisch fysici, toezichhoudend deskundigen enz. (K);
43. kennis heeft van de effectieve-dosiswaarden van de belangrijkste, meest voorkomende medische procedures (K);
44. de dosisbegrippen begrijpt die in de stralingsbescherming worden gebruikt (geabsorbeerde dosis, equivalente dosis, effectieve dosis, orgaandosis, intree-huidosis, foetale dosis, ooglensdosis, extremitatendosis) (K);
45. fundamentele kennis heeft van de relevante aspecten van de radiobiologie van de mens: stochastische effecten, weefselreacties, teratogene en genetische effecten (K);
46. op de hoogte is van de relevante wet- en regelgeving betreffende medische stralingstoepassingen (K).

Bijlage 8.11: Rechtvaardiging medische blootstelling

Onderstaande tekst is geschreven vanuit de persoonlijke optiek door een aios Radiologie.

Gedurende de werkdag gaat de telefoon wel honderd keer voor overleg met de kliniek. 'Wij zouden graag een CT-scan willen van een patiënt die 3 dagen geleden geopereerd is en nu septisch wordt' tot 'Graag een MRI-appendix van een meisje van 5 jaar met een inconclusieve echo en lage verdenking, maar we kunnen patiënt niet zonder diagnose naar huis laten gaan' tot zelfs 'Patiënt is bang voor een tumor, want in de familie komt het vaker voor, dus ter geruststelling willen we graag een CT-thorax-abdomen op korte termijn'. Iemand die gevallen is en pijn heeft aan zijn enkel of pols, gaat de SEH niet af zonder röntgenfoto, terwijl soms toch echt de klinische verdenking laag is. Vaak heeft de patiënt zelfs al een röntgenfoto gehad, voordat hij/zij überhaupt een dokter heeft gezien. Doordat tegenwoordig beeldvorming laagdrempeliger beschikbaar is en de SEH's en dus de doktoren steeds drukker zijn, is het vaak efficiënter werken als het hele plaatje al compleet is, zodat mensen zo spoedig mogelijk de SEH verlaten met een adequate behandeling.

Ik begrijp dat een klinicus die een patiënt voor zich heeft zitten soms denkt dat het inderdaad makkelijker is om hieraan toe te geven of in de drukte van de dag vergeet waarom beeldvorming wordt gedaan. Patiënten worden veeleisender en stel je voor: de patiënt is bang, heeft vervolgens inderdaad een tumor en jij hebt die scan geweigerd, dan zou dat nog wel eens uit kunnen draaien op een klacht. Ondanks dat je als radioloog relatief 'weinig' patiëntencontact hebt, krijgen we alles mee van deze veranderingen in de medische wereld. Ik denk dat we als radioloog moeten blijven kijken naar de indicatie van een scan en of deze gerechtvaardigd is. Maar ik denk zeker dat dit een gezamenlijke verantwoordelijkheid is van zowel radioloog als aanvragend specialist. Ook al hebben we geleerd tijdens de stralingscursus dat inderdaad een CT-scan allemaal wel meevalt qua hoeveelheid straling en dat de gevolgen ervan beperkt zijn, maar als dat zich allemaal opstapelt dan is het einde zoek. Dus daarom is het belangrijk om per patiënt te bekijken of het gerechtvaardigd is om een scan te vervaardigen en desnoods uit te leggen dat ook een scan nadelige effecten zou kunnen hebben.

Vaak worden radiologen als 'vervelende' types gezien, die niet snappen waarom een scan op dat moment nodig is of waarom we 'zo moeilijk doen'. Ik denk echter dat het tegendeel waar is. Al mijn collega's hebben ook in de kliniek gewerkt als ANIOS van verschillende specialismen en vaak snappen we heel goed waarom iemand een scan wil. Ik denk alleen

dat het belangrijk is dat we logisch blijven nadenken en echt blijven 'dokteren'. Een patiënt met een diverticulitis, dalend infectielab en geen buikpijn, zal zeker weten niet opeens een perforatie hebben. Dus een scan herhalen binnen 3 dagen is dan echt zinloos en geeft dus ook zinloze, onnodige, niet-gerechtvaardigde stralingsblootstelling.

Het is mooi dat we geleerd hebben dat medische stralingsblootstelling gerechtvaardigd moet zijn, met een goede indicatie en dat indien de straling wordt toegepast het ALARA-principe geldt, maar in de praktijk wordt dit allemaal lang niet altijd toegepast. Tegenwoordig moet elke patiënt een diagnose hebben, voordat deze het ziekenhuis verlaat. Ziek of niet ziek, als je buikpijn hebt, moeten we weten waar dat vandaan komt. Ik denk dat dit alles behalve met een gerechtvaardigde indicatiestelling te maken heeft.

Dus mijn oproep aan alle artsen die de stralingscursus volgen: blijf dokteren en probeer logisch na te denken. Beeldvorming is een prachtige techniek om ons verder te helpen als we er niet uit komen, of als patiënten ziek zijn en we willen weten waarom. Maar laat beeldvorming ook vooral achterwege als er geen 'echte' indicatie voor is, vanwege stralingsbescherming van de patiënt, want ook daar ben je verantwoordelijk voor als dokter.

Bijlage 8.12: Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (selectie)

- Titelblad
- Relevante definities
- Hoofdstuk 8. Medische blootstelling

- **Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (selectie)**
- Titelblad
- Afdeling 5.3: Eisen aan opleidingen voor medisch-radiologische handelingen
- Artikel 8.1: eisen aan medisch-radiologische apparatuur

- **Regeling stralingsbescherming medische blootstelling (geheel)**



404

Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming)

Wij Willem-Alexander, bij de gratie Gods, Koning der Nederlanden, Prins van Oranje-Nassau, enz. enz. enz.

Op de voordracht van Onze Minister van Infrastructuur en Milieu, gedaan mede namens Onze Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid en Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport, van 31 mei 2017, nr. IenM/BSK-2017/135624, Hoofddirectie Bestuurlijke en Juridische Zaken;

Gelet op Richtlijn 2013/59/Euratom van de Raad van 5 december 2013 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling, en houdende intrekking van de Richtlijnen 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom en 2003/122/Euratom (PbEG L 13/1) en gelet op Richtlijn 2011/70/Euratom van de Raad van 19 juli 2011 tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval (PbEU 2011, L199);

Gelet op de artikelen 4, eerste lid, 15c, 16, eerste lid, 17, derde lid, 17a, 18a, derde lid, 21, eerste tot en met derde lid, 28, 29, eerste lid, 31, eerste lid en vierde lid jo. artikel 18a, derde lid, de artikelen 32, eerste, derde en vierde lid, 34, eerste, tweede en derde lid jo. de artikelen 16, eerste lid en 17, en achtste lid, de artikelen 37, eerste lid, 38a, eerste lid, 67, eerste lid, 68, 69, eerste, vijfde en zesde lid, 73, 74 en 75 van de Kernenergiewet;

Gelet op artikel 16 van de Arbeidsomstandighedenwet en artikel 37, tweede lid, van de Wet op de beroepen in de individuele gezondheidszorg;

Gelet op de artikelen 8.40, 8.41, 8.42, 8.42a en 19.3, eerste lid, van de Wet milieubeheer;

De Afdeling advisering van de Raad van State gehoord (advies van 20 september 2017, nr. W14.17.0180/IV);

Gezien het nader rapport van Onze Minister van Infrastructuur en Milieu, uitgebracht mede namens Onze Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid en Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport van 16 oktober 2017, nr. IenM/BSK-2017/232823, Hoofddirectie Bestuurlijke en Juridische Zaken;

Hebben goedgevonden en verstaan:

lozing in de lucht: in de lucht ontsnappen van of laten ontsnappen van gasvormige radioactieve stoffen dan wel van in een gasstroom meegevoerde deeltjes van radioactieve stoffen;

lozing in het oppervlaktewater: in het oppervlaktewater ontsnappen of laten ontsnappen van vloeibare of in vloeistof opgeloste radioactieve stoffen dan wel van in een vloeistofstroom meegevoerde deeltjes van radioactieve stoffen;

maatregel: remediërende of beschermingsmaatregel;

medische blootstelling: blootstelling van patiënten of asymptomatische personen ten behoeve van hun eigen medische of tandheelkundige diagnose of behandeling die bedoeld is om hun gezondheid te verbeteren, alsook blootstelling van verzorgers en van proefpersonen tijdens wetenschappelijk onderzoek;

medisch deskundige: arts, tandarts of andere zorgverlener die bij of krachtens de artikelen 36 of 36a van de Wet op de beroepen in de individuele gezondheidszorg bevoegd is klinische verantwoordelijkheid te dragen voor een individuele medische blootstelling;

medisch-radiologisch: betrekking hebbend op radiodiagnostische en radiotherapeutische procedures, en interventieradiologie of op een andere medische toepassing van ioniserende straling voor planning, besturing en verificatie;

medisch-radiologische installatie: faciliteit waar medisch-radiologische procedures plaatsvinden;

medisch-radiologische procedure: elke procedure die aanleiding geeft tot medische blootstelling;

meet-, regel- of ijkbron: bron die uitsluitend wordt gebruikt in een al dan niet vaste meet-, regel- of ijkopstelling;

mijnbouw: handelingen in het kader van het verrichten van verkenningsonderzoek, het opsporen of het winnen van delfstoffen of aardwarmte, dan wel het opslaan van stoffen;

milieumonitoring: meting van de externe dosistempo's ten gevolge van radioactieve stoffen in het milieu of van concentraties van radionucliden in milieucompartmenten;

natuurlijke bron: bron van ioniserende straling van natuurlijke, terrestrische of kosmische oorsprong;

noodplan: nationaal crisisplan als bedoeld in artikel 6.5 of bedrijfsnoodplan als bedoeld in artikel 6.7, bestaande uit voorzorgsmaatregelen bij blootstelling in een radiologische noodsituatie op basis van hypothetische gebeurtenissen en bijbehorende scenario's;

omgevingsdosisequivalent: omgevingsdosisequivalent als gedefinieerd in bijlage 2;

omgevingsdosisequivalenttempo: omgevingsdosisequivalenttempo als gedefinieerd in bijlage 2;

ondernemer: natuurlijke persoon, rechtspersoon of bestuursorgaan onder wiens verantwoordelijkheid een handeling wordt verricht of maatregel wordt uitgevoerd;

ongewilde verspreiding: ongewilde verspreiding van een radioactieve stof als gevolg van een handeling die onder verantwoordelijkheid van een ondernemer is verricht en die niet meer onder controle van de betrokken ondernemer is;

onbedoelde blootstelling: medische blootstelling die aanzienlijk verschilt van medische blootstelling die voor een specifiek doel bestemd is;

Onze Minister: Onze Minister van Infrastructuur en Milieu;

Onze Ministers: Onze Minister van Infrastructuur en Milieu, Onze Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid en Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport;

open bron: bron, niet zijnde een ingekapselde bron en niet zijnde een toestel of versneller;

AFDELING 7.4. BEROEPSMATIGE BLOOTSTELLING IN BESTAANDE SITUATIES

Artikel 7.38 (radon op het werk)

1. Het referentieniveau voor het jaargemiddelde van radonconcentratie in de lucht op werkplekken bedraagt 100 becquerel/m³.

2. De werkgever zorgt ervoor dat metingen voor het bepalen van de radonconcentratie worden uitgevoerd:

a. op werkplekken die zich bevinden op de benedenverdieping of in de kelder in gebieden genoemd in het nationaal actieprogramma radon, bedoeld in artikel 6.20; en

b. op specifieke soorten werkplekken als bedoeld in het nationaal actieprogramma radon, bedoeld in artikel 6.20.

3. Indien de radonconcentratie op de werkplekken, bedoeld in het tweede lid, het referentieniveau, bedoeld in het eerste lid of in het achtste lid indien daaraan uitvoering is gegeven, overschrijdt, neemt de werkgever maatregelen om te zorgen dat de radonconcentratie wordt teruggebracht tot onder dit referentieniveau.

4. Indien de radonconcentratie op werkplekken ondanks de maatregelen, bedoeld in het derde lid, het referentieniveau, bedoeld in het eerste lid of in het achtste lid indien daaraan uitvoering is gegeven, blijft overschrijden, is de werkgever verplicht tot kennisgeving hiervan aan de Autoriteit.

5. Op de werkplekken, bedoeld in het tweede, derde en vierde lid, is dit hoofdstuk, met uitzondering van dit artikel, niet van toepassing, met dien verstande dat voor de werkplekken, bedoeld in het vierde lid, bij regeling van Onze Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid een of meer artikelen van dit hoofdstuk van toepassing kunnen worden verklaard.

6. De werkgever zorgt ervoor dat voor de werkplekken waarbij het referentieniveau genoemd in het eerste lid, blijvend wordt overschreden:

a. de blootstelling van de werknemers aan radon wordt vastgesteld en met passende frequentie wordt gemonitord en de gegevens geregistreerd;

b. maatregelen worden genomen om de blootstelling van de werknemers aan radon tot een minimum te beperken; en

c. op daarvoor geschikte plaatsen doelmatige en duidelijke waarschuwingsborden of waarschuwingsstekens en opschriften worden aangebracht.

7. De werkgever bewaart de geregistreerde gegevens in ieder geval totdat de persoon op wie de gegevens betrekking hebben, de leeftijd van vijftien jaar heeft bereikt of zou hebben bereikt, maar ten minste dertig jaar nadat deze persoon de handelingen heeft beëindigd.

8. Bij regeling van Onze Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid kan in afwijking van het eerste lid voor bij die regeling aangewezen werkplekken als bedoeld in het vierde lid, een referentieniveau worden vastgesteld van ten hoogste 300 becquerel/m³ als jaargemiddelde van de radonconcentratie in de lucht, en kunnen nadere regels worden gesteld met betrekking tot het tweede, derde, vierde en zesde lid.

HOOFDSTUK 8. MEDISCHE BLOOTSTELLING

§ 8.1. Algemene bepalingen

Artikel 8.1 (delegatiebepalingen)

Bij regeling van Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport, kunnen nadere regels worden gesteld ten aanzien van:

a. de kwaliteitsborging, bedoeld in artikel 8.8, tweede lid, onderdeel b;

- b. het bepaalde in artikel 8.8, tweede lid;
- c. de maatregelen, bedoeld in artikel 8.11, vierde lid;
- d. het bepaalde in artikel 8.12, tweede lid;
- e. het bepaalde in artikel 8.13, tweede volzin;
- f. de behandelingsparameters, bedoeld in artikel 8.15, onderdeel f.

§ 8.2. Algemene bepalingen over bescherming bij medische blootstellingen

Artikel 8.2 (rechtvaardiging medische blootstelling)

1. Een medische blootstelling vindt uitsluitend plaats indien zij gerechtvaardigd is.

2. Een medische blootstelling is gerechtvaardigd indien zij per saldo voldoende voordeel oplevert wanneer het totale potentiële diagnostische of therapeutische voordeel, waaronder de gezondheidsvoordelen voor de persoon die de behandeling ondergaat en het maatschappelijk voordeel, opweegt tegen de gezondheidsschade die de persoon die de blootstelling ondergaat, kan ondervinden, rekening houdend met de doeltreffendheid, de voordelen en de risico's van beschikbare alternatieve technieken die hetzelfde doel hebben maar geen of minder blootstelling aan ioniserende straling met zich meebrengen.

Artikel 8.3 (optimalisatie medische blootstelling)

1. Alle doses ten gevolge van medische blootstellingen voor radiodiagnostiek, interventieradiologie en planning, sturing en verificatiedoel-einden, worden zo laag gehouden als redelijkerwijs mogelijk is, gelet op de noodzaak om de vereiste medische gegevens te verkrijgen en rekening houdend met economische en sociale factoren.

2. De optimalisatie, bedoeld in het eerste lid:

a. omvat, met inachtneming van economische en sociale factoren, de keuze van de apparatuur, de consistente productie van adequate diagnostische gegevens of behandelingsresultaten, de praktische aspecten van medisch-radiologische procedures, de kwaliteitsborging, de beoordeling en evaluatie van patiëntdoses en de controle van toege-diende activiteit;

b. heeft betrekking op de omvang van de individuele doses en hangt samen met het medische doel van de blootstelling;

c. wordt, indien dat passend is, tevens toegepast op orgaandoses.

3. De medisch deskundige, de klinisch fysicus en de personen die bevoegd zijn om de praktische aspecten van de medisch-radiologische procedure uit te voeren, worden betrokken bij de optimalisatie, bedoeld in het eerste lid.

4. Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport bevordert de vaststelling, de regelmatige herziening en het gebruik van diagnostische referentieniveaus voor radiodiagnostisch onderzoek, indien gepast voor interventieradiologische procedures, en de beschikbaarheid van richtlijnen op dit gebied.

Artikel 8.4 (verantwoordelijkheid)

1. De ondernemer draagt ervoor zorg dat elke medische blootstelling plaatsvindt onder de verantwoordelijkheid van een medisch deskundige die voldoet aan artikel 5.14.

2. De ondernemer of de medisch deskundige kan de praktische aspecten van medisch-radiologische procedures delegeren, indien gepast en in overeenstemming met artikel 38 van de Wet op de beroepen in de individuele gezondheidszorg, aan een of meer personen die bevoegd zijn om ter zake werkzaam te zijn op een erkend specialisatiegebied.

3. Voorts draagt de ondernemer ervoor zorg dat de medisch deskundige of de persoon die in opdracht van die deskundige de blootstellingen, bedoeld in artikel 8.16, eerste lid, verricht, hiervoor een passende opleiding heeft gevolgd.

§ 8.3. Bijzondere bepalingen over bescherming bij medische blootstellingen

Artikel 8.5 (rechtvaardiging bij individuele medische blootstellingen)

1. De verwijzende persoon en de medisch deskundige beoordelen ieder op grond van hun specifieke verantwoordelijkheid en vooraf of een individuele medische blootstelling gerechtvaardigd is, met inachtneming van het specifieke doel van de blootstelling en de kenmerken van de betrokken persoon.

2. In afwijking van artikel 8.2, tweede lid, kan een medische blootstelling van een soort die ingevolge dat lid verboden is, in bijzondere omstandigheden en in afzonderlijk te beoordelen specifieke gevallen gerechtvaardigd worden. De afzonderlijke beoordeling van de rechtvaardiging, bedoeld in het eerste lid, wordt geregistreerd in het dossier van de betrokkene.

3. De verwijzende persoon en de medisch deskundige verkrijgen, indien dat uitvoerbaar is, eerdere diagnostische of medische gegevens met betrekking tot de voorgenomen blootstelling en houden rekening met deze gegevens om onnodige blootstelling te voorkomen.

Artikel 8.6 (rechtvaardiging medisch-radiologische procedure bij asymptomatische personen)

Een medisch-radiologische procedure bij een asymptomatische persoon die vroege opsporing van een ziekte tot doel heeft, vindt uitsluitend plaats nadat bijzondere aandacht is besteed aan de voorlichting van deze persoon en:

- a. in het kader van een bevolkingsonderzoek; of
- b. indien er een specifieke, gedocumenteerde rechtvaardiging aanwezig is die is opgesteld door de medisch deskundige in samenspraak met de verwijzende persoon en in overeenstemming met de toepasselijke richtlijnen van de beroepsgroep en met het bepaalde bij regeling van Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport.

Artikel 8.7 (rechtvaardiging en blootstelling van verzorgers en van proefpersonen bij wetenschappelijk onderzoek)

1. De medisch deskundige laat de blootstelling van een verzorger uitsluitend toe indien die blootstelling per saldo voldoende voordeel oplevert, waarbij hij rekening houdt met het directe gezondheidsvoordeel voor de patiënt, het voordeel voor de verzorger en de schade die de blootstelling kan veroorzaken.

2. De medisch deskundige verstrekt een verzorger voorafgaand aan de blootstelling adequate informatie over de voordelen en de risico's van de stralingsdosis bij medische blootstelling.

3. Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport kan dosisbeperkingen en nadere regels vaststellen voor:

- a. blootstellingen van verzorgers;
- b. blootstellingen van personen die worden betrokken bij wetenschappelijk onderzoek als bedoeld in artikel 1, eerste lid, van de Wet medisch-wetenschappelijk onderzoek met mensen.

Artikel 8.8 (klinisch fysicus)

1. De klinisch fysicus:
 - a. treedt op inzake aangelegenheden betreffende stralingsfysica of brengt daarover specialistisch advies uit met het oog op de uitvoering van de bepalingen van dit hoofdstuk en van artikel 4.27, derde lid, onderdeel b;
 - b. werkt samen en onderhoudt contact met de stralingsbeschermingsdeskundige.
2. Afhankelijk van de medisch-radiologische handeling, neemt de klinisch fysicus de verantwoordelijkheid voor de dosimetrie op zich, met inbegrip van fysische metingen voor de beoordeling van de door de patiënt en andere personen die een medische blootstelling ondergaan ontvangen dosis, adviseert hij over medisch-radiologische apparatuur en draagt hij in het bijzonder bij tot:
 - a. de optimalisatie van de stralingsbescherming van patiënten en andere personen die een medische blootstelling ondergaan, met inbegrip van de toepassing en het gebruik van diagnostische referentieniveaus;
 - b. de bepaling en uitvoering van kwaliteitsborging van de medisch-radiologische apparatuur;
 - c. acceptatietests voor medisch-radiologische apparatuur;
 - d. de uitwerking van technische specificaties voor medisch-radiologische apparatuur en het ontwerp van de inbouw en opstelling daarvan;
 - e. het toezicht op het medisch-radiologische ontwerp van de inbouw en opstelling van medisch-radiologische apparatuur;
 - f. de analyse van gebeurtenissen die tot toevallige of onbedoelde blootstellingen leiden of kunnen leiden;
 - g. de selectie van noodzakelijke apparatuur om metingen ten behoeve van stralingsbescherming uit te voeren;
 - h. de opleiding van medische deskundigen en ander personeel in relevante aspecten van stralingsbescherming.

Artikel 8.9 (optimalisatie in bijzondere omstandigheden)

1. De ondernemer draagt ervoor zorg dat voor medische blootstellingen voor radiotherapeutische doeleinden de te bestralen doelvolumes individueel worden gepland en de toediening op passende wijze wordt gecontroleerd, ermee rekening houdend dat de doses voor niet-doelvolumes en -weefsels zo laag zijn als redelijkerwijs mogelijk is, zonder aan het beoogde radiotherapeutische effect afbreuk te doen.
2. De ondernemer draagt ervoor zorg dat aan een patiënt die een behandeling of diagnose met radionucliden ondergaat of diens vertegenwoordiger:
 - a. informatie wordt verstrekt over de risico's van ioniserende straling;en
 - b. passende instructies worden verstrekt om de doses voor personen die met de patiënt in contact komen zo laag te houden als redelijkerwijs mogelijk is.
3. De instructies, bedoeld in het tweede lid, onderdeel b, worden verstrekt voordat de betrokkene het ziekenhuis, kliniek of een vergelijkbare instelling verlaat waar de behandeling of diagnose heeft plaatsgevonden. Bij een behandeling met radionucliden worden de instructies schriftelijk verstrekt.

Artikel 8.10 (dosisbeperking bij wetenschappelijk onderzoek)

Onverminderd artikel 8.7, derde lid, onderdeel b, en het bepaalde bij of krachtens de Wet medisch-wetenschappelijk onderzoek met mensen:

a. draagt de ondernemer er zorg voor dat een dosisbeperking wordt vastgesteld voor personen die worden betrokken bij wetenschappelijk onderzoek als bedoeld in artikel 1, eerste lid, van de Wet medisch-wetenschappelijk onderzoek met mensen, voor wie geen direct medisch voordeel van de blootstelling verwacht wordt;

b. beschouwt de medisch deskundige voordat de blootstelling plaatsvindt de betrokken dosisniveaus op individuele basis, in het geval van patiënten die toestemming hebben gegeven om een experimentele medische behandeling te ondergaan en die naar verwachting hiervan diagnostisch of therapeutisch voordeel zullen ondervinden.

Artikel 8.11 (medische blootstelling van vrouwen die zwanger zijn of borstvoeding geven)

1. De verwijzende persoon of de medisch deskundige informeert bij een vrouw die een medische blootstelling ondergaat of zij zwanger is of borstvoeding geeft, tenzij dat om duidelijke redenen kan worden uitgesloten of niet relevant is voor de radiologische procedure.

2. Indien zwangerschap niet kan worden uitgesloten, wordt afhankelijk van de medisch-radiologische procedure en met name wanneer het gaat om de buik- en bekkenstreek, bijzondere aandacht geschonken aan:

a. de rechtvaardiging van de blootstelling, met name in verband met de urgentie van het uitvoeren van de procedure;

b. de optimalisatie van de stralingsbescherming, waarbij rekening wordt gehouden met zowel de vrouw als met het ongeboren kind.

3. Indien de vrouw die een medische blootstelling ondergaat borstvoeding geeft, wordt in de nucleaire geneeskunde bijzondere aandacht geschonken aan:

a. de rechtvaardiging van de blootstelling, met name in verband met de urgentie van het uitvoeren van de procedure;

b. de optimalisatie van de stralingsbescherming, waarbij rekening wordt gehouden met zowel de vrouw als met het kind.

4. De ondernemer neemt maatregelen die bijdragen tot bewustmaking van de vrouwen, bedoeld in het eerste lid, over medische blootstellingen als bedoeld in dit artikel.

Artikel 8.12 (toevallige of onbedoelde blootstellingen en significante gebeurtenissen)

1. De ondernemer draagt ervoor zorg dat:

a. alle redelijke maatregelen worden genomen om de waarschijnlijkheid en de omvang van toevallige of onbedoelde blootstellingen van personen die medische blootstelling ondergaan tot een minimum te beperken;

b. bij radiotherapeutische handelingen het programma voor kwaliteitsborging een onderzoek naar het risico van toevallige of onbedoelde blootstellingen bevat;

c. voor alle medische blootstellingen een passend systeem wordt ingevoerd ten behoeve van de registratie en analyse van gebeurtenissen die tot toevallige of onbedoelde blootstellingen leiden of kunnen leiden, dat in verhouding staat tot het radiologische risico van de handeling;

d. maatregelen worden getroffen om de verwijzende persoon en de medisch deskundige alsmede de patiënt of zijn vertegenwoordiger in te lichten over een klinisch significante toevallige of onbedoelde blootstelling en over de resultaten van de analyse.

2. Voorts draagt de ondernemer ervoor zorg dat het Staatstoezicht op de volksgezondheid:

a. zo spoedig mogelijk op de hoogte wordt gebracht van significante gebeurtenissen;

b. binnen redelijke termijn na de gebeurtenissen op de hoogte wordt gebracht van de onderzoeksresultaten en de genomen maatregelen om dergelijke gebeurtenissen in de toekomst te vermijden.

Artikel 8.13 (individuele dosisschattingen)

Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport draagt zorg voor de verdeling van individuele dosisschattingen als gevolg van medische blootstelling voor radiodiagnostiek en interventieradiologie. Indien nodig, wordt rekening gehouden met de leeftijdsverdeling en het geslacht van de blootgestelde populatie.

§ 8.4. Eisen aan procedures en apparatuur

Artikel 8.14 (procedures)

1. De ondernemer draagt ervoor zorg dat:
 - a. schriftelijke protocollen worden uitgewerkt voor elk soort standaard medisch-radiologische procedure, voor elke apparatuuropstelling en voor relevante categorieën patiënten;
 - b. informatie over de blootstelling van de patiënt deel uitmaakt van het verslag over de medisch-radiologische procedure;
 - c. passende controle wordt uitgevoerd en zo nodig passende maatregelen worden getroffen bij een stelselmatige overschrijding van de diagnostische referentieniveaus;
 - d. klinische audits plaatsvinden in overeenstemming met de nationale procedures.
2. Voorts draagt de ondernemer ervoor zorg dat een klinisch fysicus:
 - a. nauw wordt betrokken bij radiotherapeutische handelingen, met uitzondering van standaard therapeutische nucleairgeneeskundige handelingen;
 - b. wordt betrokken bij standaard therapeutische nucleairgeneeskundige handelingen, alsmede radiodiagnostische en interventieradiologische handelingen met hoge doses;
 - c. wordt betrokken voor advies over aangelegenheden betreffende stralingsbescherming in verband met medische blootstelling bij overige medisch-radiologische handelingen.
3. Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport, draagt zorg voor de beschikbaarstelling van verwijzingsrichtsnoeren voor medische beeldvorming aan verwijzende personen, waarbij rekening is gehouden met stralingsdoses.
4. Na de klinische audit, bedoeld in het eerste lid, onderdeel d, worden, indien nodig, de betreffende handelingen gewijzigd of worden nieuwe normen toegepast.

Artikel 8.15 (apparatuur)

- De ondernemer draagt ervoor zorg dat:
- a. op alle radiologische apparatuur die in gebruik is streng toezicht wordt uitgeoefend inzake de stralingsbescherming;
 - b. voor elke medisch-radiologische instelling een bijgewerkte inventaris van medisch-radiologische apparatuur ter beschikking wordt gehouden van de Autoriteit en van het Staatstoezicht op de volksgezondheid;
 - c. passende programma's voor kwaliteitsborging en evaluaties van doses en toegediende hoeveelheden worden toegepast;
 - d. acceptatietests worden uitgevoerd voor de ingebruikneming van de apparatuur voor klinische doeleinden en daarna periodiek en na elke onderhoudsprocedure die de werking kan aantasten prestatietests worden uitgevoerd;

e. de nodige maatregelen worden getroffen om de werking van medisch-radiologische apparatuur te verbeteren die in gebruik is en die niet voldoet aan bij regeling van Onze Minister gestelde eisen aan het functioneren van die apparatuur;

f. apparatuur voor uitwendige bestraling met een nominale stralings-energie van meer dan 1 mega-elektronvolt is voorzien van een voorziening om de belangrijkste behandelingsparameters te controleren;

g. alle voor interventieradiologie gebruikte apparatuur is voorzien van een voorziening of een functie die de medisch deskundige en de personen die onderdelen van de medische procedures uitvoeren, informeert over de hoeveelheid straling die door de apparatuur tijdens de procedure wordt uitgezonden;

h. alle voor interventieradiologie en computertomografie gebruikte apparatuur en nieuwe apparatuur voor planning, sturing en verificatiedoelinden zijn voorzien van een voorziening of een functie die de medisch deskundige aan het einde van de procedure informeert over de relevante parameters voor het bepalen van de patiëntdosis en die deze informatie doorstuurt naar het onderzoeksdossier;

i. onverminderd het bepaalde in de onderdelen g en h, nieuwe medische radiodiagnostische apparatuur die ioniserende straling uitzendt, is voorzien van een voorziening of functie die de medisch deskundige in staat stelt de voor het bepalen van de patiëntdosis relevante parameters te kennen en die, indien nodig, deze informatie doorstuurt naar het onderzoeksdossier;

j. geen gebruik gemaakt wordt van fluoroscopie-apparatuur zonder voorziening voor de automatische regeling van het dosistempo of zonder beeldversterker, dan wel van een soortgelijk toestel.

Artikel 8.16 (apparatuur in bijzondere gevallen)

1. De ondernemer draagt ervoor zorg dat passende medisch-radiologische apparatuur, technieken en randapparatuur worden gebruikt voor medische blootstellingen:

- a. van kinderen;
- b. in het kader van een bevolkingsonderzoek;
- c. waarbij de patiënt hoge doses krijgt toegediend.

2. Bij de blootstellingen, bedoeld in het eerste lid, wordt bijzondere aandacht besteed aan de programma's voor kwaliteitsborging en de evaluatie of verificatie van doses en toegediende hoeveelheden activiteit voor deze handelingen.

Artikel 8.17 (verspreiding medisch-radiologische apparatuur)

Onze Minister van Volksgezondheid, Welzijn en Sport kan regels stellen om onnodige verspreiding van medisch-radiologische apparatuur te voorkomen.



Regeling van de Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat, de Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid en de Minister voor Medische Zorg van 9 januari 2018, nr. IENM/BSK-2017/291098, houdende vaststelling van nadere regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming)

De Staatssecretaris van Infrastructuur en Waterstaat, de Staatssecretaris van Sociale Zaken en Werkgelegenheid en de Minister voor Medische Zorg,

Gelet op Richtlijn 2013/59/Euratom van de Raad van 5 december 2013 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling, en houdende intrekking van de Richtlijnen 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom en 2003/122/Euratom (PbEG L 13/1) en Richtlijn 2011/70/Euratom van de Raad van 19 juli 2011 tot vaststelling van een communautair kader voor een verantwoord en veilig beheer van verbruikte splijtstof en radioactief afval (PbEU 2011, L 199);

Gelet op de artikelen 2.3, eerste lid, 3.2, eerste en vierde lid, 3.4, vierde lid, 3.6, derde lid, onder e, 3.17, vijfde lid, 3.20, vierde lid, 3.22, derde lid, 4.7, eerste lid, 4.15, derde lid, 5.4, derde en vierde lid, 5.5, derde lid, 5.7, zesde lid, 6.2, zesde lid, 6.7, eerste lid, 6.21, eerste en derde lid, 9.8, eerste lid, 9.10, eerste en tweede lid, 10.4, derde lid, en 10.8, eerste lid, van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming en artikel 76, derde lid, van de Kernenergiewet;

Gelet op de artikelen 1, 18, eerste lid, 19, 41, 41a en 42 van het Besluit kerninstallaties, splijtstoffen en ertsen en de artikelen 1b, 1c, 2, 4c, 23, 27 en 32 van het Besluit vervoer splijtstoffen, ertsen en radioactieve stoffen;

Gelet op artikel 33 van de Algemene wet erkenning EU-beroepskwalificaties;

BESLUITEN:

HOOFDSTUK 1. ALGEMENE BEPALINGEN

Artikel 1.1 (begripsomschrijvingen)

In deze regeling wordt verstaan onder:

besluit: Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming;

categorie 1-stof: radioactieve stof die is aangewezen als categorie 1-stof in bijlage 4.1 of die op grond van de in die bijlage opgenomen voorwaarden behoort tot categorie 1;

categorie 2-stof: radioactieve stof die is aangewezen als categorie 2-stof in bijlage 4.1 of die op grond van de in die bijlage opgenomen voorwaarden behoort tot categorie 2;

categorie 3-stof: radioactieve stof die is aangewezen als categorie 3-stof in bijlage 4.1 of die op grond van de in die bijlage opgenomen voorwaarden behoort tot categorie 3;

cyclotron: circulaire versneller;

diploma: diploma, certificaat of ander getuigschrift:

a. als bedoeld in de Tijdelijke regeling erkenning opleidingen deskundigen radioactieve stoffen en toestellen 2013,

b. als bedoeld in de Regeling erkenning opleidingen deskundigen radioactieve stoffen zoals deze regeling luidde op 19 juli 2003, of

c. dat is afgegeven door een erkende instelling;

erkende instelling: instelling als bedoeld in artikel 5.11 van het besluit;

erkenning: erkenning als bedoeld in artikel 5.11 van het besluit;

Minister: Minister van Infrastructuur en Waterstaat;

Ministers: Minister van Infrastructuur en Waterstaat, Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid en Minister voor Medische Zorg;

opleiding: opleiding of opleidingen van de instelling waarvoor een erkenning is aangevraagd of verleend;

opleidingsverantwoordelijke: persoon of personen die door de instelling zijn aangewezen voor de borging van de kwaliteit van de opleiding;



3. Een opleiding bij een erkende instelling als bedoeld in het tweede lid:
 - a. beschikt over faciliteiten die nodig zijn om cursisten van de kerncompetenties en overige kwalificaties, bedoeld in dat lid, te voorzien;
 - b. beschikt over adequate procedures ten behoeve van de kwaliteitsborging, bedoeld in de artikelen 5.25 en 5.26;
 - c. beschikt over een opleidingsverantwoordelijke die is geregistreerd als stralingsbeschermingsdeskundige als bedoeld in artikel 5.1, onderdeel b;
 - d. verstrekt uitsluitend diploma's voor de desbetreffende toepassing aan cursisten die een opleiding als bedoeld in het eerste lid met goed gevolg hebben afgerond.

AFDELING 5.3. EISEN AAN OPLEIDINGEN VOOR MEDISCH-RADIOLOGISCHE HANDELINGEN

Artikel 5.23 (eisen opleidingen voor medisch-radiologische handelingen)

1. Een opleiding bij een erkende instelling voor opleidingen voor medisch-radiologische handelingen voorziet een persoon als bedoeld in het tweede, derde of vierde lid van de in die leden bedoelde kerncompetenties en overige kwalificaties.
2. Voor andere medische specialisten als bedoeld in artikel 3 van de Regeling stralingsbescherming medische blootstelling, onder wiens verantwoordelijkheid medisch-radiologische handelingen worden uitgevoerd: de kerncompetenties en overige kwalificaties, bedoeld in bijlage 5.3, onderdeel A.
3. Voor radiotherapeuten-oncoloog als bedoeld in artikel 3 van de Regeling stralingsbescherming medische blootstelling: de kerncompetenties en overige kwalificaties, bedoeld in bijlage 5.3, onderdeel B.
4. Voor radiologen als bedoeld in artikel 3 van de Regeling stralingsbescherming medische blootstelling: de kerncompetenties en overige kwalificaties, bedoeld in bijlage 5.3, onderdeel C.

Artikel 5.24 (eisen opleidingen voor medisch-radiologische handelingen, vervolg)

Een opleiding bij een erkende instelling voor opleidingen voor medisch-radiologische handelingen:

- a. beschikt over faciliteiten die nodig zijn om cursisten van de kerncompetenties, bedoeld in artikel 5.23, te voorzien;
- b. beschikt over adequate procedures ten behoeve van de kwaliteitsborging als bedoeld in de artikelen 5.25 en 5.26;
- c. beschikt over een opleidingsverantwoordelijke die is geregistreerd als stralingsbeschermingsdeskundige als bedoeld in artikel 5.1, onderdeel b;
- d. verstrekt uitsluitend diploma's voor medisch-radiologische handelingen aan cursisten die een opleiding als bedoeld in artikel 5.23 met goed gevolg hebben afgerond.

AFDELING 5.4. KWALITEITSBORGING ERKENDE INSTELLINGEN

Artikel 5.25 (eisen procedures en examens)

Een opleiding aan een erkende instelling beschikt over adequate procedures ten behoeve van de kwaliteitsborging van de examens indien:

- a. een examenreglement is vastgesteld waarbij ten minste is geregeld:
 - 1°. de samenstelling van de examencommissie, voor wat betreft de vereiste deskundigheid op het gebied van stralingsbescherming en didactiek;
 - 2°. de betrokkenheid van een ambtenaar van de Autoriteit of van het Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport indien het een medische opleiding betreft;
 - 3°. de duur en wijze van examineren;
 - 4°. de geheimhouding van de examenopgaven;
 - 5°. de beoordelingsnormen en de normen voor slagen, herexamens en afwijzen;
 - 6°. bepalingen omtrent een practicum;
 - 7°. een beroepsprocedure en een klachtenprocedure over het examen;
 - 8°. een regeling voor de examinering van kandidaten met dyslexie of een arbeidshandicap;
- b. de opleidingsverantwoordelijke na afloop van elk examen een examenverslag vaststelt;
- c. de instelling aan iedere kandidaat het examenreglement kenbaar maakt;
- d. het schriftelijk examenwerk gedurende ten minste een jaar na afloop van het examen wordt bewaard en op verzoek van de cursist voor hem ter inzage wordt gelegd.



Artikel 5.30 (taken stralingsbeschermingsdeskundige op het niveau van algemeen coördinerend deskundige in de stralingsbeschermingseenheid)

De stralingsbeschermingsdeskundige, bedoeld in artikel 5.1, onderdeel a, in de stralingsbeschermingseenheid heeft tot taak:

- a. het voorbereiden en opstellen van het stralingsbeschermingsbeleid en het adviseren over dit beleid;
- b. het voorbereiden en, indien daartoe gemandateerd, verlenen van interne toestemmingen;
- c. het houden van intern toezicht op de naleving van de wettelijke bepalingen en van de voorschriften in de interne regeling, in de stralingsbeschermingsvoorschriften en in de interne toestemmingen;
- d. het kennisgeven van de nieuwe toepassingen aan de Autoriteit, voor zover de verplichting tot kennisgeving volgt uit een voorschrift in de vergunning;
- e. het beheren en onderhouden van een deugdelijke administratie van relevante gegevens die betrekking hebben op de stralingsbescherming, op de stralingstoepassingen en de bronnen; en
- f. het zo vaak als nodig, maar in ieder geval jaarlijks voor 1 juni over het voorafgaande kalenderjaar, zorgdragen voor een rapportage over de stralingsbescherming aan de ondernemer en de Autoriteit.

HOOFDSTUK 6. ALGEMENE BEPALINGEN INZAKE BLOOTSTELLING

§ 6.1. Stralingsincidenten, ongevallen en radiologische noodsituaties

Artikel 6.1 (systeem voor het registreren en analyseren van stralingsincidenten, ongevallen of radiologische noodsituaties)

De verplichting tot het invoeren en in werking houden van een systeem voor het registreren en analyseren van stralingsincidenten, ongevallen of radiologische noodsituaties, bedoeld in artikel 6.2, zesde lid, van het besluit, berust op de in artikel 4.2, aangewezen vergunninghouders.

Artikel 6.2 (bedrijfsnoodplan)

De verplichting tot het zorgen voor een bedrijfsnoodplan als bedoeld in artikel 6.7, eerste lid, van het besluit, berust op de in artikel 4.2 aangewezen ondernemer.

§ 6.2. Bouwmaterialen

Artikel 6.3 (aanwijzing bouwmaterialen)

1. Als bouwmaterialen, bedoeld in artikel 6.21, eerste lid, van het besluit, worden aangewezen de in bijlage 6.1 genoemde bouwmaterialen.
2. In geval met toepassing van de in artikel 6.21, tweede lid, van het besluit bedoelde methode door de ondernemer is bepaald dat er een gerede kans is dat het referentieniveau van 1 millisievert in een kalenderjaar als bedoeld in artikel 9.10, achtste lid, van het besluit wordt overschreden, doet de ondernemer ter uitvoering van artikel 6.21, derde lid, van het besluit een kennisgeving aan de Autoriteit.

HOOFDSTUK 7.

(gereserveerd).

HOOFDSTUK 8. MEDISCHE BLOOTSTELLING

Artikel 8.1 (eisen aan medisch-radiologische apparatuur)

De ondernemer zorgt ervoor dat:

- a. indien nieuwe apparatuur in gebruik wordt genomen, deze, indien uitvoerbaar, een voorziening heeft die de stralingsdosis tijdens een radiologische verrichting aangeeft;
- b. bij een toestel waarmee radiodiagnostische verrichtingen worden toegepast, een filter wordt gebruikt teneinde de stralingsbelasting van de patiënt te beperken;
- c. een toestel beschikt over een vaste of automatische diafragma-instelling zodat de randen van de röntgenbundel zichtbaar zijn, tenzij het mammografisch of tandheelkundig onderzoek betreft;
- d. een toestel waarmee radiodiagnostische verrichtingen worden toegepast is voorzien van een diafragma of tubus met het doel de röntgenbundel te beperken tot het juiste gebied;
- e. het diafragma een middel bevat om afmetingen van de bundel vooraf te kunnen aangeven;



- f. een toestel, geschikt voor doorlichting, bij cumulatief doorlichten frequent een akoestisch signaal afgeeft.

HOOFDSTUK 9. BLOOTSTELLING VAN LEDEN VAN DE BEVOLKING

Artikel 9.1 (dosisbeperking registratieplichtige handelingen)

1. Voor de toepassing van dit artikel wordt onder een multifunctionele individuele dosis verstaan: een effectieve dosis die het gevolg is van het gebruik van een gebied buiten de locatie op zodanige wijze dat dit de hoogst mogelijke dosis geeft.
2. De ondernemer zorgt ervoor dat bij het verrichten van een handeling, behorend tot een categorie als genoemd in artikel 3.10, derde lid, van het besluit, waarvoor een registratie is vereist:
 - a. de bijdrage aan de effectieve dosis voor personen op enig punt buiten de locatie ten gevolge van die handelingen zo laag als redelijkerwijs mogelijk is, en
 - b. de multifunctionele individuele dosis op enig punt buiten de locatie in geen geval de waarde van 10 microsievert per kalenderjaar overschrijdt.
3. In geval van handelingen met van nature voorkomende radionucliden waar de schade ten gevolge van die handelingen bepaald en getoetst wordt via de externe straling ten gevolge van de besmetting van enig niet-bereikbaar oppervlak, geldt met het oog op de stralingsbescherming dat, indien de externe straling onder normale bedrijfsomstandigheden op 0,1 meter afstand van enig bereikbare buitenzijde van een bron een hoger omgevingsdosisequivalenttempo veroorzaakt dan 10 microsievert per uur, zodanige maatregelen worden genomen dat voor die handelingen een dosisbeperking van 1 millisievert effectieve dosis in een kalenderjaar wordt gehanteerd.

Artikel 9.2 (referentieniveaus)

1. Voor blootstelling van leden van de bevolking in een radiologische noodsituatie geldt een referentieniveau als bedoeld in artikel 9.8, eerste lid, onder a, van het besluit van 100 millisievert als acute effectieve dosis of jaarlijkse effectieve dosis.
2. Voor blootstelling van leden van de bevolking in de transitie van een radiologische noodsituatie naar een bestaande blootstellings situatie, in het bijzonder bij de beëindiging van langetermijnbeschermingsmaatregelen zoals vestiging elders, geldt een referentieniveau als bedoeld in artikel 9.8, eerste lid, onder b, van het besluit van 20 millisievert als jaarlijkse effectieve dosis.
3. Voor blootstelling van leden van de bevolking in een bestaande blootstellings situatie geldt een referentieniveau als bedoeld in artikel 9.10, eerste lid, van het besluit, van 20 millisievert als jaarlijkse effectieve dosis.

HOOFDSTUK 10. HET BEHEER EN HET ZICH ONTDOEN VAN RADIOACTIEVE AFVALSTOFFEN

Artikel 10.1 (aanwijzing categorieën van gevallen waarin een beëindigingsplan vereist is)

In gevallen behorend tot de volgende categorieën handelingen zorgt de ondernemer voor een beëindigingsplan als bedoeld in artikel 10.8, eerste lid, van het besluit:

- a. handelingen met een versneller die deeltjes met een energie van meer dan 20 mega-elektronvolt produceert of handelingen met een cyclotron die deeltjes met een energie van meer dan 8 mega-elektronvolt produceert;
- b. handelingen ten behoeve van olie- of gasexploratie of olie- of gasproductie als bedoeld in bijlage 3.1, onderdeel A, onderdeel 4, waarbij van nature voorkomend radioactief materiaal voorhanden is;
- c. handelingen ten behoeve van kolengestookte energieproductie als bedoeld in bijlage 3.1, onderdeel A, onderdeel 14, of
- d. handelingen ten behoeve van thermische fosforproductie als bedoeld in bijlage 3.1, onderdeel A, onderdeel 7.

HOOFDSTUK 11. INTREKKING EN WIJZIGING OVERIGE REGELINGEN

Artikel 11.1 (intrekking)

De Uitvoeringsregeling stralingsbescherming en de Regeling bekendmaking rechtvaardiging gebruik van ioniserende straling worden ingetrokken.



Regeling van de Minister voor Medische Zorg van 12 januari 2018, kenmerk 1281162-172106-WJZ, houdende basisveiligheidsnormen voor stralingsbescherming bij medische blootstelling (Regeling stralingsbescherming medische blootstelling)

De Minister voor Medische Zorg,

Gelet op artikel 5.14, vierde lid, van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming;

Besluit:

Artikel 1 Definitiebepaling

In deze regeling wordt verstaan onder:

besluit: Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming;

ConeBeam CT: toestel dat gebruik maakt van computertomografietechniek en door middel van een conische röntgenbundel het te diagnosticeren volume in maximaal één rotatie bereikt.

Artikel 2 Deskundigheideisen

De deskundigheideisen, bedoeld in de artikelen 3 en 4, zijn van toepassing op de medisch deskundigen, bedoeld in artikel 5.14, eerste lid, van het besluit.

Artikel 3 Opleiding bij erkende instellingen

Een radiotherapeut-oncoloog, radioloog, tandarts, met inbegrip van tandheelkundig specialist kaakchirurg, of andere medisch specialist heeft met goed gevolg een opleiding afgerond bij een instelling die krachtens artikel 5.11 van het besluit is erkend met inachtneming van de eisen, bedoeld in de artikelen 5.22 en 5.23 van de Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming, voor zijn specifieke beroepsgroep, of een gelijkwaardige opleiding.

Artikel 4 Aanvullende eis ConeBeam CT

Onverminderd artikel 3 heeft een tandarts of een tandheelkundig specialist kaakchirurg onder wiens medische verantwoordelijkheid patiënten worden blootgesteld aan de ioniserende straling van een ConeBeam CT met goed gevolg een opleiding Toezichthoudend Medewerker Stralingsbescherming Tandheelkunde voor toepassingen met de ConeBeam CT afgerond bij een instelling die krachtens artikel 5.11 van het besluit is erkend met inachtneming van de eisen voor deze specifieke toepassing, bedoeld in artikel 5.22, tweede lid, van de Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming, of een gelijkwaardige opleiding.

Artikel 5 Intrekking

De Regeling deskundigheideisen radiologische verrichtingen wordt ingetrokken.

Artikel 6 Citeertitel

Deze regeling wordt aangehaald als: Regeling stralingsbescherming medische blootstelling.

Artikel 7 Inwerkingtreding

Deze regeling treedt in werking op het tijdstip waarop het besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming) (*Stb.* 2017, 404) in werking treedt.

Deze regeling zal met de toelichting in de Staatscourant worden geplaatst.

De Minister voor Medische Zorg,
B.J. Bruins



TOELICHTING

Algemeen

Met deze regeling wordt uitvoering gegeven aan het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (hierna: besluit). Meer specifiek gaat het om artikel 5.14, van dat besluit. In die bepalingen gaat het om deskundigheidseisen (opleidingseisen) voor medische professionals die met straling werken.

Deze regeling bevat deskundigheideisen voor medisch deskundigen die met straling werken. De eisen waren in het verleden opgenomen in de Regeling deskundigheideisen radiologische verrichtingen en worden in de nu voorliggende regeling opgenomen ter implementatie van artikel 18, eerste lid, van richtlijn 2013/59/EURATOM. Ingevolge artikel 5.14, tweede volzin, van het besluit, moet deze opleiding, training en voorlichting bij een erkende instelling worden gevolgd. Voor een meer specifieke toelichting op de deskundigheideisen voor medisch deskundigen wordt verwezen naar de artikelsgewijze toelichting bij de artikelen 2, 3 en 4.

Omdat in deze regeling geen nieuwe verplichtingen worden opgelegd in vergelijking met de situatie toen het Besluit stralingsbescherming en de Regeling deskundigheidseisen radiologische verrichtingen nog van kracht waren, heeft de nu voorliggende regeling geen regeldrukgevolgen.

Artikelsgewijs

Artikelen 2 en 3

Artikel 2 bevat een reikwijdtebepaling en maakt duidelijk dat de nu voorliggende regeling van toepassing is op de personen, bedoeld in artikel 5.14, eerste lid, van het besluit. Het gaat daarbij om medisch deskundigen. Artikel 3 bevat de daadwerkelijke opleidingseisen voor achtereenvolgens radiotherapeuten-oncoloog, radiologen (met inbegrip van nucleair geneeskundigen), tandartsen en andere medisch specialisten. De term 'medisch specialist' verwijst naar de bijzondere deskundigheid dat heeft geleid tot een wettelijk erkend specialisme als bedoeld in artikel 14 van de Wet op de beroepen in de individuele gezondheidszorg. Voor iedere beroepsgroep bestaat een apart curriculum, hetgeen tot uitdrukking komt in de artikelen 5.22 en 5.23 van de Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming. De eindtermen van de curricula zijn in (afzonderlijke onderdelen van) bijlage 5.2 en 5.3 bij de Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming vastgesteld.

Hier wordt ook verwezen naar het overgangsrecht dat is opgenomen in artikel 12.3, vierde lid, van het besluit. Dat bepaalt dat een onder het 'oude' Besluit stralingsbescherming afgegeven erkenning van opleidingen op het gebied van medische blootstelling geldig blijft onder het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming.

Artikel 4

Artikel 4 bevat een opleidingseis voor tandartsen en tandheelkundig specialisten kaakchirurg die gebruik maken van een toestel dat gebruik maakt van computertomografietechniek, ook bekend als de ConeBeam CT. Die opleiding is 'Toezichthoudend Medewerker Stralingsbescherming Tandheelkunde voor toepassingen met de ConeBeam CT' of een opleiding die wordt erkend op grond van artikel 5.11 van het besluit met inachtneming van artikel 5.22, tweede lid, van de Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming. Een diploma of certificaat van een gelijkwaardige opleiding die in het verleden is met succes is doorlopen, volstaat ook. Met de aanduiding 'onverminderd artikel 3' in artikel 4 van deze regeling wordt duidelijk gemaakt dat het gaat om eisen die gelden in aanvulling op de eisen die in artikel 3 zijn opgenomen.

Artikelen 5 en 6

Om redenen van wetgevingstechniek is ervoor gekozen om de Regeling deskundigheideisen radiologische verrichtingen in te trekken en te vervangen door een nieuwe regeling. Omdat laatstgenoemde regeling in het bijzonder gaat over medische blootstelling, is gekozen voor een nieuwe citeertitel: Regeling stralingsbescherming medische blootstelling.

Artikel 7

Dit artikel bevat de inwerkingtredingsbepaling. Er is voor gekozen om de nauwe samenhang met het nieuwe Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) tot uitdrukking te laten komen in de inwerkingtredingsbepaling. In de praktijk zal dit neerkomen op inwerkingtreding met ingang van



6 februari 2018, zoals artikel 106, eerste lid, van richtlijn 2013/59/EURATOM voorschrijft, of zo kort mogelijk na die datum.

*De Minister voor Medische Zorg,
B.J. Bruins*