



Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu  
*Ministerie van Volksgezondheid,  
Welzijn en Sport*

## **Dosisbesparing bij radiologische apparatuur**

RIVM rapport 080126001/2013

R. Stam



Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu  
*Ministerie van Volksgezondheid,  
Welzijn en Sport*

## **Dosisbesparing bij radiologische apparatuur**

Rapport 080126001/2013

## Colofon

© RIVM 2013

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

R. Stam

Contact:

Dr. Rianne Stam

Centrum Duurzaamheid, Milieu en Gezondheid

RIVM

rienne.stam@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Inspectie voor de  
Gezondheidszorg in het kader van het project V/080126/01/BD

## Rapport in het kort

### **Dosisbesparing bij radiologische apparatuur**

De doses straling die patiënten in Nederland bij medische diagnostiek oplopen behoren tot de laagste in Europa. Desondanks valt er op dit gebied nog steeds winst te behalen. Dit is van belang omdat de totale medische stralingsbelasting voor diagnoses de laatste jaren toeneemt. Dat komt doordat Nederlanders jaarlijks gemiddeld steeds meer medische verrichtingen ondergaan waarbij straling wordt gebruikt, zoals CT-scans. Moderne radiologische apparatuur biedt steeds meer mogelijkheden om de dosis per verrichting zo laag mogelijk te houden. Het RIVM heeft daarom geïnventariseerd welke eigenschappen van de apparatuur zijn verouderd en welke juist zijn gewenst om de dosis te verlagen.

Verouderd is bijvoorbeeld apparatuur waarbij het niet mogelijk is om de omvang van de röntgenbundel te beperken. Hetzelfde geldt voor apparatuur waarbij de dosis niet automatisch wordt aangepast aan de lichaamseigenschappen van de patiënt (zoals het gewicht). Voorbeelden van geavanceerde dosisbesparende technieken zijn 'magnetische navigatie', waarbij bijvoorbeeld een hartkatheter door bloedvaten wordt geleid met behulp van magnetische velden in plaats van met röntgenstralen. State of the art is het ook als de dosis kan worden aangepast aan de verschillende fases van de hartslag (ontspannen hart of juist niet). Daarnaast bestaan er detectoren met minder elektronische ruis, waardoor het apparaat gevoeliger is en met minder straling toe kan. Belangrijk zijn verder de nieuwste wiskundige methoden waarmee het beeld wordt gereconstrueerd (iteratieve reconstructie), waardoor een lagere dosis toereikend is.

Voor de stralingsbelasting van patiënten door diagnostische verrichtingen is het van belang zowel het aantal verrichtingen als de dosis per verrichting te beperken. Het huidige rapport richt zich vooral op de dosis per verrichting. Deze is relatief hoog bij CT-scans en bij interventies met een lange blootstelling aan röntgenstraling. Om de mogelijkheden van state of the art apparatuur optimaal te benutten is het van belang dat de gebruikers goed worden opgeleid en nageschoold. Dosisbesparing is extra belangrijk bij kinderen, omdat die kwetsbaarder zijn voor nadelige effecten van straling.

De inventarisatie is gemaakt op basis van literatuuronderzoek en interviews met experts uit diverse beroepsgroepen (radiologen, klinisch fysici, laboranten en fabrikanten). Het onderzoek werd verricht in opdracht van de Inspectie voor de Gezondheidszorg.

Trefwoorden: medische stralingstoepassingen, radiologie, röntgenonderzoek, dosis, medische technologie

## Abstract

### **Dose reduction for radiological devices**

The radiation doses that patients in the Netherlands receive in medical diagnostics are among the lowest in Europe. Nevertheless, some improvements are still possible. This is important because the overall medical radiation burden for diagnostic procedures has been increasing in the past few years. This is because Dutch citizens on average undergo ever more medical procedures that use radiation, such as CT scans. Modern radiological equipment offers more and more possibilities to keep the dose per procedure as low as possible. The National Institute for Public Health and the Environment has therefore assessed which properties of the equipment are outdated and which are desirable to reduce the dose.

Examples of outdated equipment are devices which do not make it possible to limit the size of the X-ray beam and devices that do not automatically adjust the dose to the properties of the patient's body (such as weight). Examples of advanced dose limiting techniques are 'magnetic navigation', where for example a cardiac catheter is led through blood vessels with the help of magnetic fields rather than X-ray images. Another example of the state of the art is the adjustment of the dose to the different phases of the cardiac cycle (contraction and relaxation). There are also detectors with reduced electronic noise that make the device more sensitive and capable of using less radiation. Also important are the latest mathematical techniques to reconstruct the image (iterative reconstruction), which make a lower dose adequate.

For the radiation burden of patients resulting from diagnostic procedures it is important to limit both the number of procedures and the dose per procedure. The present report mainly concerns the dose per procedure. It is relatively high for CT scans and for interventions with long exposure to X-rays. In order to use the possibilities of state of the art equipment optimally, it is important that the users are properly trained and provided with continuing education. Dose reduction is particularly important for children, because they are more vulnerable for the adverse effects of radiation.

The assessment was made on the basis of literature research and interviews with experts from various professions (radiologists, medical physicists, technicians and manufacturers). This investigation was conducted at the request of the Health Care Inspectorate of the Netherlands.

Keywords: medical radiation applications, radiology, X-ray examination, dose, medical technology

## Inhoud

### **Samenvatting—6**

#### **1 Inleiding—7**

- 1.1 Aanleiding—7
- 1.2 Doel—7
- 1.3 Afbakening—7
- 1.4 Methoden—7

#### **2 Kwaliteitscriteria en alternatieven—9**

- 2.1 Kwaliteit en ouderdom van apparatuur—9
- 2.2 Alternatieven zonder ioniserende straling—10
- 2.3 Alternatieven bij kwetsbare groepen patiënten—11
- 2.4 Belang van opleiding en correcte indicatiestelling—12

#### **3 Dosisbesparing bij radiologische apparatuur—13**

- 3.1 Opties voor röntgen algemeen—13
- 3.2 Opties voor doorlichting en interventies—14
- 3.3 Opties voor CT—17
- 3.4 Speciale overwegingen bij kinderen—21
- 3.5 Speciale overwegingen bij kwetsbare groepen volwassenen—23
- 3.6 Belang van opleiding en correct gebruik—23

#### **4 Conclusies en aanbevelingen—26**

#### **Literatuur—28**

#### **Lijst van geïnterviewde experts—32**

#### **Afkortingen—33**

## Samenvatting

Hoewel de medische stralingsbelasting in Nederland tot de laagste in Europa hoort, neemt de totale medische stralingsbelasting voor diagnoses de laatste jaren toe. Dat komt doordat Nederlanders jaarlijks gemiddeld steeds meer medische verrichtingen ondergaan waarbij straling wordt gebruikt. Moderne radiodiagnostische apparatuur biedt steeds meer mogelijkheden om de dosis per verrichting zo laag mogelijk te houden. De hoofdvraag in het onderzoek was om deze mogelijkheden te inventariseren. Daarbij werd zowel gekeken naar eigenschappen van de apparatuur die uit oogpunt van dosisbesparing als verouderd kunnen worden beschouwd als naar de state of the art van nieuwe technologieën. De benodigde informatie werd verkregen uit literatuuronderzoek in internationale databases en websites van beroepsverenigingen en uit interviews met relevante experts in Nederland (radiologen, klinisch fysici, radiodiagnostisch laboranten en fabrikanten van radiodiagnostische apparatuur). De resultaten moeten IGZ helpen te beoordelen wat zij op het gebied van dosisbesparende mogelijkheden kan verlangen van het veld.

Recente peilingen van fabrikanten suggereren dat de radiodiagnostische apparatuur in Nederland up-to-date is voor wat betreft computertomografie (CT) maar in mindere mate voor wat betreft doorlichting en MRI. Recente technische ontwikkelingen bij MRI en echografie maken dat ze in toenemende mate de beeldvormende techniek van eerste keus kunnen zijn zonder blootstelling aan ioniserende straling. Wel is het zo dat de verschillende beeldvormende technieken elkaar soms aan kunnen vullen, maar niet altijd kunnen vervangen. Alternatieven zonder ioniserende straling zouden als eerste in aanmerking dienen te komen bij extra kwetsbare groepen zoals kinderen en zwangere patiënten en bij het herhaald scannen van dezelfde patiënt. Als toch wordt gekozen voor beeldvormende technieken met ioniserende straling, zou de apparatuur aan minimale eisen op het gebied van dosisbesparing dienen te voldoen. Voorbeelden daarvan zijn de mogelijkheid tot diafragmeren, collimatie en filtering van de röntgenbundel, de zogenaamde '(last) image hold'-techniek, gepulseerde doorlichting en automatische dosismodulatie op basis van buisstroom. Met recente innovaties die de state of the art op het gebied van dosisbesparing weerspiegelen kan de dosis nog verder worden verlaagd. Voorbeelden daarvan zijn doorlichting met 'ultra low dose imaging', elektromagnetische navigatie en CT met dynamische collimatie, ECG-modulatie, geïntegreerde detectoren en iteratieve reconstructie. Dergelijke dosisbesparende mogelijkheden zijn met name belangrijk bij kinderen, die kwetsbaarder zijn voor de effecten van ioniserende straling, en bij interventies, die een relatief hoge patiëntdosis kunnen geven.

Voor het correct gebruik van de diverse beeldvormende technieken en vermindering van de stralingsbelasting zijn dosisbesparende opties en alternatieven zonder ioniserende straling niet voldoende. Voor het besluit tot een aanvraag en de keuze van de techniek zijn een strikte indicatiestelling en het volgen van diagnostische richtlijnen belangrijk. De radiologen en radiodiagnostisch laboranten spelen daarbij een belangrijke controlerende rol. Bij de instelling en bediening van apparatuur voor röntgenopnamen, doorlichting en CT dienen de mogelijkheden voor dosisbesparing optimaal te worden gebruikt en afgewogen te worden tegen de noodzakelijke beeldkwaliteit. Daarvoor zijn een degelijke opleiding, nascholing en overleg van de betrokken beroepsgroepen (laboranten, klinisch fysici en radiologen) nodig. Het onderzoek werd verricht in opdracht van de Inspectie voor de Gezondheidszorg (IGZ).

# 1 Inleiding

## 1.1 Aanleiding

Aanleiding voor dit onderzoek was een verzoek van de Inspectie voor de Gezondheidszorg (IGZ) voor het inventariseren van ontwikkelingen ten aanzien van het verlagen van de patiëntdosis bij het gebruik van radiologische apparatuur. De laatste jaren ontwikkelen fabrikanten namelijk steeds meer technologische verbeteringen om deze stralingsdosis te verminderen.

## 1.2 Doel

Doel van het onderzoek was om te inventariseren wat de 'state of the art' is van de in Nederland beschikbare radiodiagnostische apparatuur en de mogelijkheden om daarmee de patiëntdosis te minimaliseren. De keerzijde van die vraag is welke apparatuur of eigenschappen van radiodiagnostische apparatuur met het oog op dosisbesparing als verouderd kunnen worden beschouwd. Ook werd de vraag gesteld in hoeverre beeldvormende technieken zonder ioniserende straling (met name MRI en echografie) met de huidige stand van zaken een alternatief vormen voor diagnostische verrichtingen met ioniserende straling. Voor het beantwoorden van deze vragen diende literatuuronderzoek te worden gedaan en gesprekken te worden gevoerd met deskundigen uit de betrokken beroepsgroepen (radiologen, klinisch fysici, radiodiagnostisch laboranten, fabrikanten van medische apparatuur). De resultaten moeten IGZ helpen te beoordelen wat zij op het gebied van dosisbesparende mogelijkheden kan verlangen van het veld.

## 1.3 Afbakening

In nader overleg met de opdrachtgever (IGZ) werd besloten de vraagstelling te beperken tot radiodiagnostische apparatuur met de nadruk op hogedosisverrichtingen. De radiotherapie en nucleaire geneeskunde blijven buiten beschouwing. Over de combinatie van positron emissietomografie en computertomografie (CT) is in 2011 een RIVM-rapport verschenen (Bijwaard, 2011). Verder ligt de nadruk op de dosisbesparende mogelijkheden van de apparatuur zelf en niet op de mogelijkheden in de dosisadministratie en in radiologische informatiesystemen. Laatstgenoemde aspecten zijn aan bod gekomen in een eerder RIVM-rapport (Stam, 2012).

## 1.4 Methoden

Ten eerste is gezocht naar relevante rapporten op de websites van de volgende organisaties (in alfabetische volgorde): American Association of Physicists in Medicine (VS); American College of Radiology (VS); British Institute of Radiology (VK); Bundesamt für Strahlenschutz (Duitsland); Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Duitsland); Centre for Evidence-based Purchasing (VK); COCIR; CT Users Group (VK); EU Heads of Radiation Protection Authorities; European Commission, DG Energy; European Federation of Radiographer Societies; European Medical ALARA Network; European Society of Radiology; FDA Center for Devices and Radiological Health (VS); GE Healthcare; Health Protection Agency (VK); Impactscan (VK); International Atomic Energy Agency; International Commission on Radiological Protection; International Network of Agencies for Health Technology Assessment;



International Organization for Medical Physics; International Society of Radiographers and Radiological Technologists Institute of Physics and Engineering in Medicine (VK); KCare (VK); National Council on Radiation Protection and Measurements (VS); National Institute for Health and Care Excellence (VK); Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie; Nederlandse Vereniging voor Klinische Fysica; Nederlandse Vereniging voor Medische Beeldvorming en Radiotherapie; Nederlandse Vereniging voor Radiologie; NHS Improvement (VK); Philips Healthcare; Royal College of Radiologists (VK); Siemens Healthcare; Strahlenschutzkommission (Duitsland); Toshiba Medical Systems Corporation; Royal College of Radiologists (VK); Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu; World Health Organization.

Daarnaast werd in juni 2013 aanvullende informatie gezocht in peer-reviewed medische literatuur uit de periode 2008-2013 met de volgende zoektermen:

Pubmed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>):

```
((ionising OR ionizing) AND radiation) AND (exposure OR dose) AND
(patient OR medical OR clinical OR hospital OR healthcare) AND
(diagnosis OR *diagnostic OR radiology OR radiography OR x-ray OR ct
OR fluoroscopy) AND (equipment OR device* OR apparatus OR technology
OR technique OR method OR system) AND ((standard OR "state of the
art" OR benchmark) OR (lower* OR reduc* OR alternative OR replac* OR
supersede OR substitute) OR ("magnetic resonance imaging" OR mri OR
ultrasound OR optical OR photoacoustic OR "laser scanning"))
```

Scopus (<http://www.scopus.com/>):

```
TITLE-ABS-KEY(((ionising OR ionizing) AND radiation) AND (exposure
OR dose) AND (patient OR medical OR clinical OR hospital OR
healthcare) AND (diagnosis OR *diagnostic OR radiology OR
radiography OR x-ray OR ct OR fluoroscopy) AND (equipment OR device*
OR apparatus OR technology OR technique OR method OR system) AND
((standard OR "state of the art" OR benchmark) OR (lower* OR reduc*
OR alternative OR replac* OR supersede OR substitute) OR ("magnetic
resonance imaging" OR mri OR ultrasound OR optical OR photoacoustic
OR "laser scanning")) AND PUBYEAR AFT 2007
```

Een derde belangrijke informatiebron in het onderzoek was een serie telefonische interviews met vakinhoudelijke experts. Deze experts waren radiologen, klinisch fysici, radiodiagnostisch laboranten en productspecialisten bij fabrikanten van medische apparatuur. Van elk gesprek werd een schriftelijk verslag gemaakt dat ter correctie en aanvulling werd voorgelegd aan de betreffende expert. Alle experts gaven toestemming voor het gebruik van de informatie uit het schriftelijk verslag op een hoger abstractieniveau in dit RIVM-rapport. Daar waar constatering in het rapport niet direct vergezeld gaan van een literatuurreferentie, zijn ze in het algemeen gebaseerd op informatie van de experts. Een lijst van experts die hun medewerking verleenden aan dit onderzoek is te vinden aan het einde van dit rapport.

## 2 Kwaliteitscriteria en alternatieven

### 2.1 Kwaliteit en ouderdom van apparatuur

COCIR, het Europese samenwerkingsverband van producenten van radiologische en medische elektrische apparatuur, brengt met enige regelmaat overzichten uit van de ouderdom van radiodiagnostische apparatuur in Europese landen. In het meest recente overzicht stelt COCIR dat apparatuur die tot 5 jaar oud is de actuele staat van de technologie reflecteert (COCIR, 2009). Dit houdt in dat deze apparatuur naar het oordeel van de producenten de risico's voor patiënten en ziekenhuispersoneel beperkt, een effectievere diagnose en therapie mogelijk maakt, een kleinere kans op storingen of uitval geeft en netto met lagere bedrijfskosten gepaard gaat. Volgens COCIR zou ten minste 60% van de medische apparatuur jonger dan 5 jaar moeten zijn. In Nederland gold dit voor 60% van de CT-scanners, 49% van de MRI-scanners en 52% van de toestellen voor doorlichting. Niet meer dan 30% van de medische apparatuur zou tussen de 6 en 10 jaar oud moeten zijn. In Nederland gold dit voor 35% van de CT-scanners, 28% van de MRI-scanners en 22% van de toestellen voor doorlichting. Niet meer dan 10% van de medische apparatuur zou ouder dan 10 jaar moeten zijn. In Nederland gold dit voor 3% van de CT-apparatuur, 23% van de MRI-apparatuur en 26% van de toestellen voor doorlichting. Volgens de gegevens van COCIR leek het Nederlandse 'wagenpark' van radiologische apparatuur in 2009 dus vrijwel up-to-date te zijn voor CT, maar enigszins verouderd voor MRI en doorlichting (COCIR, 2009). COCIR geeft hierbij niet aan waarop het de minimale percentages in elke categorie baseert.

De Europese Commissie publiceerde recentelijk een geactualiseerde en uitgebreide versie van haar kwaliteitscriteria voor radiologische apparatuur, een verplichting onder Richtlijn 97/43/Euratom (Council of the European Union, 1997). Het betreft niet-bindende kwalitatieve en kwantitatieve criteria voor de aanvaardbaarheid van de gebruikte apparatuur en de te nemen corrigerende maatregelen. Deze dienen te worden afgestemd op de lokale omstandigheden in de lidstaat (European Commission, 2012). Deze aanvaardbaarheidscriteria voor radiologische apparatuur dienen te worden getoetst bij installatie, updates, onderhoud, verandering van 'intended use' en na alarmering bij kwaliteitscontroles. Hierbij dient bijzondere aandacht te worden besteed aan apparatuur voor onderzoeken bij kinderen en aan apparatuur met relatief hoge patiëntdoses, zoals die voor CT en interventieradiologie. Bij systemen voor doorlichting dient onder andere de dosis direct zichtbaar te zijn, het dosistempo reguleerbaar te zijn, de tijdsduur gesignaleerd en de bundel gecollimeerd te kunnen worden. Daarnaast zijn er kwantitatieve criteria voor begrenzing van het blootgestelde veld, voor het dosistempo, voor de intreedosis en kerma per beeld en voor de contrastinstellingen. Voor CT-scanners dienen onder andere protocollen voor kinderen aanwezig te zijn en dienen beeldartefacten die de diagnose kunnen beïnvloeden afwezig te zijn. Voor nieuwe apparatuur na 2009 dienen automatische dosismodulatie, indicatie van de CT-dosisindex en DICOM structured dose reports aanwezig te zijn. Daarnaast zijn er voor CT-scanners kwantitatieve criteria voor onder andere de nauwkeurigheid van dosismeldingen, beeldresolutie, tafeluitlijning, slicedikte en bundelbreedte, voor de maximale beeldruis en voor de maximale patiëntdoses voor specifieke verrichtingen. Hierbij werd wel de opmerking geplaatst dat de beschikbare criteria die uitsluitend op de CT-apparatuur zijn gebaseerd mogelijk onvoldoende garantie voor aanvaardbaarheid bieden. Vergelijking van dosisparameters en protocollen

met gangbare nationale diagnostische referentieniveaus (DRN) kan dan zinvol zijn.

Een deel van de criteria uit een eerdere versie van de kwaliteitscriteria van de Europese Commissie is opgenomen in artikelen 68 en 69 van het Besluit Stralingsbescherming (minister van Justitie, 2001). Dit betreft het aangeven van de dosis, de aanwezigheid van bundelfilter en diafragma, en voor doorlichting de regelbaarheid van het dosistempo, het gebruik van een beeldversterker en signalering van de tijdsduur. Volgens een enquête van het RIVM in 2008 had in ongeveer de helft van de algemene en categorale ziekenhuizen meer dan 70% van de doorlichtingsapparatuur een dosisindicator. Dit ondanks het feit dat in 95% van de gevallen een acceptatietest werd uitgevoerd bij ingebruikname van de apparatuur (De Waard en Stoop, 2010).

## 2.2 Alternatieven zonder ioniserende straling

De optimale manier om dosisreductie te bereiken is het kiezen voor alternatieve beeldvormende technieken zonder ioniserende straling (Coakley et al., 2011). Door technische verbeteringen op het gebied van snelheid, resolutie en penetratie en door de bredere beschikbaarheid kunnen met name echografie en MRI voor bepaalde toepassingen eerste keus zijn. Zo kan echografie als eerste optie worden overwogen bij de diagnose van vocht in de longen, pneumothorax, klachten van bekkenorganen en ontstekingen in de darm (Herfarth en Palmer, 2009; Baltarowich et al., 2012; Ashton-Cleary, 2013). Bij verdenking op blinde darmontsteking wordt in Nederland in eerste instantie een echo gedaan en daarna indien nodig een MRI of CT-scan (Heij et al., 2010). In bepaalde ziekenhuizen is een dienst acute MRI georganiseerd, waardoor voor de indicatie acute blindedarmontsteking helemaal geen CT-scans meer hoeven te worden gemaakt. Verder kan echocardiografie de eerste keus zijn voor diagnostische angiografie in plaats van het coronair angiogram.

Ook voor interventies, met name in de buikholte, heeft echografie duidelijke voordelen. Naast de afwezigheid van ioniserende straling maakt de snellere ('real-time') beeldvorming het makkelijker en veiliger om de sonde te manoeuvreren. Een biopsie onder echogeleide is in het algemeen goedkoper dan een biopsie onder CT-geleide en de draagbare echoapparatuur kan ook worden gebruikt bij kritieke patiënten die niet kunnen worden vervoerd. De nieuwere modellen 'phased array' transducers dringen dieper door in de weefsels en hebben een wijder beeldveld en een hogere resolutie. Bepaalde afwijkingen zijn nog steeds beter te zien op een CT- of MRI-beeld. Bestaande doorlichtings-, CT- of MRI-beelden kunnen echter ook worden gecombineerd met het echobeeld. De locatie van de transducer wordt daarbij bepaald door het uitzenden van een elektromagnetisch veld ('fusion imaging') (Childs en Tchelepi, 2009). Een ander voordeel van echografie is dat bepaalde anatomische structuren (bijvoorbeeld de hartkleppen) zichtbaar zijn die niet goed met röntgen kunnen worden onderscheiden. Dit verkleint de kans op fouten door miscommunicatie tussen de echo-cardioloog en de interventie-cardioloog. Nadelen van het gebruik van echografie zijn de variabiliteit in diagnostische nauwkeurigheid tussen verschillende bedieners en de verminderde effectiviteit bij dikke patiënten (Herfarth en Palmer, 2009).

Er is inmiddels aangetoond dat moderne MRI-technieken een goed alternatief zijn voor doorlichting en CT bij het vervolgen van patiënten met chronische ontstekingen van de darm. Het gaat daarbij vaak om relatief jonge patiënten met een normale levensverwachting waarvoor de cumulatieve effectieve dosis bij gebruik van CT kan oplopen tot 75 mSv (Coakley et al., 2011; McLaughlin et

al., 2012). Voor diagnostiek van het vaatbed in verschillende delen van het lichaam is contrast-MRI inmiddels een breed geaccepteerd alternatief voor CT-angiografie en digitale subtractieangiografie (Nael et al., 2011). Beperkingen in resolutie en snelheid maken MRI nog lastig toepasbaar bij interventies aan de coronairvaten. Er zijn inmiddels wel goede ervaringen met het gebruik van MRI bij interventies aan de grote vaten en de hersenen en bij elektrofysiologische en ablatie-ingrepen. Technische innovaties die interventie-MRI mede mogelijk hebben gemaakt zijn ECG-gestuurde 'steady-state free precession', parallelle computerbewerking en MRI-compatibele kathetermaterialen (Saikus en Lederman, 2009; Saeed et al., 2012). Nadelen van het gebruik van MRI zijn de langere scanduur en de hogere kosten ten opzichte van CT (Herfarth en Palmer, 2009).

### 2.3 Alternatieven bij kwetsbare groepen patiënten

Kinderen hebben een hoger percentage delende cellen, een hogere waterinhoud in hun weefsels en een hogere levensverwachting dan volwassenen. Ze zijn daardoor kwetsbaarder voor de schadelijke effecten van ioniserende straling (Alzen en Benz-Bohm, 2011). Waar mogelijk, dienen alternatieven voor ioniserende straling daarom in het bijzonder te worden gebruikt voor onderzoek bij kinderen. Recente ontwikkelingen maken 'real-time', interactieve MRI mogelijk een gelijkwaardig alternatief voor doorlichting bij mictie-cystourethrografie in kinderen (Arthurs et al., 2013). Voor buikonderzoeken bij kinderen, bijvoorbeeld bij verdenking op blindedarmontsteking, wordt echografie als eerste keus aangeraden. Als de echo geen uitsluitsel biedt, wordt in tweede instantie een diagnostische laparoscopie aanbevolen. Pas als ook dat niet mogelijk is, wordt een CT-scan als aanvullend onderzoek aanbevolen (Heij et al., 2010). Uit de interviews bleek dat ook voor andere indicaties bij kinderen altijd eerst de vraag wordt gesteld of het met echo of MRI kan. Als er toch wordt gekozen voor CT, moet dat een weloverwogen keuze zijn en toegevoegde waarde hebben. Soms kiest men uiteindelijk toch voor CT omdat de verkregen informatie bruikbaar is, bijvoorbeeld bij congenitale hartafwijkingen.

Voor meer gedetailleerde beeldvorming van zachte weefsels (bijvoorbeeld lever, darmen, beenmerg en zenuwstelsel) heeft MRI in principe de voorkeur. Nadelen van MRI bij kinderen zijn de lagere beschikbaarheid, hogere kosten, langere scanduur en de noodzaak om angstige patiënten onder narcose te brengen. Bij trauma duurt MRI vaak te lang en wordt daarom in eerste instantie een echo of CT-scan gedaan. Het kan zijn dat de impact van de narcose, die voor MRI nodig kan zijn, voor kinderen zwaarder wordt ingeschat dan het ondergaan van CT. Wel komen er steeds betere technieken om bewegingsartefacten te voorkomen en kunnen met MRI zonder stralingsrisico's scans van het hele lichaam worden gemaakt voor de detectie van botmetastasen (Alzen en Benz-Bohm, 2011; Goo, 2011; International Atomic Energy Agency, 2012). Daarnaast zijn er 'rapid sequence' MRI-protocollen in opkomst waarmee het hoofd van een kind in minder dan drie seconden gescand kan worden zonder narcose te hoeven toepassen (O'Neill et al., 2012). Meer gedetailleerde overwegingen voor de keuze van alternatieve technieken bij kinderen worden gegeven in recente aanbevelingen van ICRP (Khong et al., 2013). In een enquête van het RIVM in 2006 bleken de meeste algemene ziekenhuizen bij kinderen waar mogelijk een beeldvormende techniek zonder ioniserende straling te kiezen (Stoop en Bijwaard, 2006).

Ook bij zwangerschap komen alternatieven zonder ioniserende straling als eerste in aanmerking (Wieseler et al., 2010). Zo is MRI inmiddels een goed

alternatief voor CT bij zwangere patiënten met een verdenking op blindedarmontsteking en onvoldoende informatie uit de echo (Coakley et al., 2011). Bij de keuze voor MRI moet men zich echter realiseren dat de mogelijke schadelijke effecten van opwarming en van het lawaai van de gradiëntspoelen op het ongeboren kind nog onvoldoende zijn onderzocht. Bij kans op schade aan het ongeboren kind en aan de buikorganen van de moeder komt echografie vaak als eerst in aanmerking (Wang et al., 2012).

Uit de interviews bleek dat er in Nederland, ook voor patiënten die herhaaldelijk moeten worden gescand, bij voorkeur technieken zonder ioniserende straling worden gekozen. Bij chronische ontstekingsziekten van de darmen bijvoorbeeld wordt de beeldvorming bij voorkeur met MRI of echografie gedaan. Ook bij artritis is er een verschuiving geweest van röntgen naar MRI. Bij patiënten jonger dan 35 jaar is het in bepaalde ziekenhuizen regel om zo veel mogelijk te beginnen met MRI of echografie. Boven die leeftijd wordt de meest pragmatische weg gekozen. De verschillende beeldvormende technieken zijn niet altijd gelijkwaardig. Het zijn in principe complementaire technieken, die je ook in de context van overige verrichtingen bij een patiënt moet zien. Als men een patiënt gaat bestralen, kan men al zien hoe het lichaam de straling absorbeert als vooraf een CT-scan wordt gemaakt. Bij een alternatieve techniek zou je die informatie kwijtraken. CT wordt toch nog gezien als het diagnostische werkpaard, zeker als men er met een echo niet uitkomt. De hogere snelheid, betere details en lagere kosten in vergelijking met MRI kunnen een reden zijn om voor CT te kiezen en daarbij aan dosisreductie te werken.

## 2.4 Belang van opleiding en correcte indicatiestelling

Volgens sommige experts is het inmiddels wel duidelijk welke verrichtingen men in eerste instantie met echografie of MRI kan doen. De keuze of volgorde ligt vaak protocollair vast, maar bij twijfel is het toch aan het individuele oordeel van de specialist. Een beredeneerde keuze van beeldvormende techniek vereist enige kennis van de stralingsbelasting die met de specifieke technieken gepaard gaat. In diverse onderzoeken bleek een minderheid van de aanvragende specialisten niet in staat te zijn om correct te beoordelen of een bepaalde beeldvormende techniek gebruikmaakt van ioniserende straling, hoe hoog gangbare CT-doses zijn of wat het risico op kanker is bij dosisintensieve verrichtingen. Naast training kan het gebruik van 'decision support'-software helpen om het percentage verrichtingen met ioniserende straling dat onvoldoende bijdraagt aan de diagnose omlaag te brengen. Hiermee kunnen eerdere verrichtingen aan dezelfde patiënt en het nut voor een bepaalde indicatie inzichtelijk worden gemaakt (Coakley et al., 2011; Dougeni et al., 2012; Uri, 2012).

Uit de interviews bleek dat er ook in Nederland verbetering mogelijk is in de kennis over beeldvormende technieken bij de aanvragende specialisten. Een strikte indicatiestelling en het volgen van richtlijnen voor diagnostiek achtte men belangrijk. Indien een niet-geïndiceerd onderzoek toch wordt verricht, is elke stralingsdosis onacceptabel. Aanvragende artsen zouden met name niet te makkelijk moeten kunnen beslissen tot het doen van CT-scans. Er zijn in Nederland geen officiële gidsen met verwijscriteria voor radiodiagnostiek zoals die in het VK en in de VS. Wel hebben radiologen de taak om de aanvragen voor beeldvormende technieken te verifiëren.

## 3 Dosisbesparing bij radiologische apparatuur

### 3.1 Opties voor röntgen algemeen

De nadruk in het huidige rapport ligt op radiodiagnostische verrichtingen met een relatief hoge patiëntdosis (doorlichting en interventies, CT). Een deel van de dosisbesparende innovaties wordt echter ook toegepast bij het maken van conventionele röntgenopnamen. Digitale beeldvorming met flat-paneledetectoren kan potentieel leiden tot lagere patiëntdoses met betere beeldkwaliteit en diagnostische nauwkeurigheid. Zo gaat het nemen van een opname met hogere vergroting bij flat-paneledetectoren gepaard met een geringere toename in de dosis dan dat bij beeldversterkers het geval is (Small et al., 2012). Of die verlaging in de praktijk ook wordt gehaald, hangt echter sterk af van de training van de gebruikers en van goede monitoring van de dosis. Door digitale beeldbewerking kan de opname er namelijk goed blijven uitzien, ook als de instellingen niet correct zijn en de dosis onacceptabel hoog is (International Atomic Energy Agency, 2012). De instellingen voor 'automatic exposure control' moeten daarom zodanig door de gebruiker worden gekalibreerd, dat een optimale verhouding tussen beeldkwaliteit en patiëntdosis wordt bereikt (Doyle et al., 2005). Een ander risico van digitale beeldvorming is dat het beeld vaak alléén wordt beoordeeld en niet meer zoals vroeger op een gezamenlijk 'plein' met collega's. Daarom is het goed om ook mislukte opnamen te bewaren en periodiek te analyseren.

Ten minste 90% van alle röntgendiagnostische apparatuur in Nederland is inmiddels digitaal (De Waard en Stoop, 2010). Digitale systemen bieden nieuwe mogelijkheden voor analyse van afwijkende beelden en voor het combineren van meerdere opnamen tot één beeld (Verma en Indrajit, 2008). De meeste digitale röntgensystemen vermelden tegenwoordig de detectordosis naast het beeld op het werkstation, zodat de radiodiagnostisch laborant de instellingen kan controleren (American College of Radiology, 2012). Met collimatoren kan de bediener de strooistraling in de periferie reduceren (Small et al., 2012). Bij de traumatologie en eerste hulp, bijvoorbeeld na verkeersongevallen, wordt traditioneel als eerste screening een set röntgenopnamen gemaakt. Een nieuw alternatief daarvoor met een lagere patiëntdosis is de zogenaamde 'linear slit scanning radiography'. Daarbij wordt het lichaam in plaats van aan een kegelvormige röntgenbundel aan een serie van smalle, waaivormige stralingsvlakken blootgesteld (Whiley et al., 2012).

Volgens de besproken literatuur en de interviews met experts kunnen de volgende eigenschappen van de apparatuur als verouderd worden beschouwd, respectievelijk als 'state of the art' worden gezien:

#### *Verouderd:*

- Röntgenfilm en film-schermcombinaties
- Planigrafie (focussen op een bepaald lichaamsvlak met een buckytoestel)
- Systemen zonder collimatie
- Systemen zonder verwijderbaar strooistralenrooster
- Systemen zonder dosisindicatie

#### *State of the art:*

- Digitale detectorsystemen (met name flat-paneledetectoren) in plaats van beeldversterkers

### 3.2 Opties voor doorlichting en interventies

Bij het gebruik van apparatuur voor doorlichting kan onderscheid worden gemaakt tussen conventionele doorlichting, waarbij beproefde technieken worden gebruikt voor met name maag-darmonderzoek en urologisch onderzoek, en complexere diagnostische procedures en interventies. Bij conventionele doorlichting dient de afstand tussen patiënt en de röntgenbron zo groot mogelijk te zijn en de afstand tussen patiënt en detector zo klein mogelijk. Aanpassing van het diafragma (met lichtbundel) en collimatie kunnen in principe stralingsvrij gebeuren ('virtuele collimatie'). Aluminium- en koperfilters kunnen laag-energetische fotonen die niet aan de beeldkwaliteit bijdragen uit de röntgenbundel verwijderen. Gepulste doorlichting en 'image hold' ('last fluoroscopy hold') dienen aanwezig te zijn. Hiermee kan het verworven beeld worden bestudeerd zonder dat er extra blootstelling optreedt. Voor het monitoren van de dosis (bij voorkeur het kerma-oppervlakteproduct) dient een gekalibreerde meter aanwezig te zijn. De totaal ontvangen dosis dient na afloop zichtbaar te zijn en te kunnen worden gearchiveerd (International Atomic Energy Agency, 2012; European Medical ALARA Network, 2012; Small et al., 2012). Alle fabrikanten van doorlichtingsapparatuur voor katheterisatie bieden inmiddels een variabele pulsfrequentie aan. Waar mogelijk kan daarmee een kleiner aantal beelden per seconde worden ingesteld en kan zo de dosis worden verlaagd (Koshy en Thompson, 2012). 'Image hold' en pulsering worden inmiddels in vrijwel alle Nederlandse ziekenhuizen gebruikt, maar filtering slechts in de helft van de algemene ziekenhuizen (De Waard en Stoop, 2010). In een recent rapport van het European Medical ALARA Network (2012) werd geconstateerd dat fabrikanten steeds vaker presets op de apparatuur installeren op basis van het bedoeld gebruik. Dit maakt het voor de ziekenhuizen lastiger om de instellingen aan te passen en te optimaliseren.

Voor complexere diagnostische procedures en interventies zijn additionele voorzieningen nodig, omdat de dosis daarbij vaak relatief hoog is en er ook deterministische effecten kunnen optreden. Voorbeelden van dergelijke procedures zijn percutane coronairinterventies, neurovasculaire interventies en chemo-embolisatie van levertumoren. Er heeft de laatste jaren wereldwijd een toename in het aantal complexe interventieprocedures met doorlichting plaatsgevonden. De lange doorlichtingstijden en herhaalde beeldseries kunnen daarbij soms tot huidschade leiden. De doorlichtingstijd alléén heeft onvoldoende voorspellende waarde voor de dosis. Monitoring van de dosis tijdens de interventie is daarom essentieel, bij voorkeur over een oppervlak dat vergelijkbaar is met het doorgelichte gebied (International Atomic Energy Agency, 2010). Overigens weegt volgens sommige geïnterviewde experts de stralingsbelasting van de patiënt bij dit soort interventies minder zwaar dan bij de radiodiagnostiek, omdat de ingreep direct nodig is voor genezing. Er zijn meer zorgen over de stralingsbelasting van werknemers bij interventies. Een goede ontwikkeling op dat vlak is het live registeren van de persoonsdosis, die direct van de badge naar een computer wordt gestuurd. Dit helpt bij de bewustwording van de eigen blootstelling.

Naast de al genoemde opties bij conventionele doorlichting kan bij doorlichting tijdens interventies 'automatic exposure control' worden toegepast. Hiermee wordt de buisstroom aangepast aan de verzwakking van de röntgenbundel, die afhankelijk is van de weefseleigenschappen en van de positie van de camera. Ook kan een recente serie doorlichtingsbeelden tegenwoordig als set worden opgeslagen en als referentie dienen voor verdere ingrepen ('fluoro loop'). Sommige fabrikanten bieden de mogelijkheid om het live beeld te beperken tot een kleine 'region of interest' en dat te integreren in het laatst verkregen

doorlichtingsbeeld. De dosis is dan lager, maar men heeft toch de indruk naar een live totaalbeeld te kijken.

Bij 'biplane' hartkatheterisatie worden twee beelden tegelijk verkregen met twee gantries onder een hoek van 90 graden, in plaats van ze achter elkaar op te nemen met één gantry. Dit lijkt tot nog toe eerder langer te duren en een hogere dosis te geven dan sequentiële opnamen (Small et al., 2012). Wel kan men in academische ziekenhuizen met een 'biplane' statief een hogere frame rate realiseren. Hierdoor kan de beeldvorming in een zo kort mogelijke tijd worden afgerond met toediening van zo min mogelijk contrastmiddel. Het is ook mogelijk om een driedimensionaal beeld te reconstrueren uit een serie doorlichtingsbeelden die met een roterende röntgenbuis zijn gemaakt ('3D rotational angiography'). Tot voor kort ging dat gepaard met een hogere effectieve patiëntdosis dan CT. Recente verbeteringen hebben de dosis echter omlaag gebracht tot het niveau van CT met ECG-modulatie. Het voordeel van 'rotational angiography' is dat de techniek makkelijker in de interventieruimte kan worden gebruikt en de patiënt niet tussendoor naar de CT-ruimte hoeft te worden verplaatst (De Buck et al., 2013).

De nieuwste ontwikkeling in dosisreductie bij interventies met doorlichting is het combineren van verbeterde röntgenbuistechnologie met digitale technieken voor het verwijderen van beeldruis. De laatste röntgenbuistechnologie omvat verbeterde filtering van straling die niet aan het beeld bijdraagt, aanpassing van het focusgebied en verkorting van de puls. Bij de beeldbewerking wordt 'real-time' gecorrigeerd voor bewegingen van de patiënt en voor random ruis in de elektronica en worden beeldelementen gemiddeld die niet aan de anatomische structuur bijdragen. Toepassing van deze technieken geeft een verlaging van de dosis tot 75% zonder afname in beeldkwaliteit. Schadelijke deterministische effecten kunnen hierdoor worden vermeden (Söderman et al., 2013).

Voor bepaalde interventies is het mogelijk om het gebruik van doorlichting te minimaliseren door het gebruik van elektromagnetische navigatie. Hierbij wordt vóór de interventie een aantal doorlichtingsbeelden gemaakt van de lokale anatomie (hart, vaatbed). Vervolgens induceert men met een extern elektromagnetisch veld elektrische spanningen in sensoren op de katheter, waarmee de ruimtelijke positie in het lichaam wordt bepaald. De positie van de katheter wordt vervolgens geprojecteerd op de bestaande doorlichtingsbeelden, zodat er tijdens de plaatsing en behandeling geen blootstelling aan ioniserende straling meer optreedt (Piorkowski en Hindricks, 2011). Nadelen van deze techniek zijn de gevoeligheid voor verstoring door ijzer, de relatief lange tijdsduur en de hoge kosten. De techniek wordt daarom in Nederland wel in speerpuntziekenhuizen toegepast, maar voert voor perifere ziekenhuizen nog te ver. Het is zelfs mogelijk om met een dergelijk elektromagnetisch navigatiesysteem vóór de interventie een anatomische beeld van het hart en de omringende vaten van een patiënt op te bouwen, zodat er helemaal geen doorlichting en blootstelling aan ioniserende straling meer optreedt (Casella et al., 2011).

Een beknopt overzicht van dosisbesparende technieken bij doorlichting en interventie is te vinden in Tabel 1.



*Tabel 1 Overzicht dosisbesparende opties in apparatuur voor doorlichting en interventies*

<b>Stralingsvrij diafragmeren</b>	Aanpassing van de vorm en breedte van de röntgenbundel aan patiënt en onderzoeksgebied zonder blootstelling
<b>Virtuele collimatie</b>	Stralingsvrije aanpassing van de positie van de collimatoren met gebruik van 'image hold'
<b>Bundelfilters</b>	Manuele of automatische toevoeging van extra filters ter verwijdering van fotonen met lage energie-inhoud
<b>Verwijderbaar rooster</b>	Rooster reduceert stroostraling op detector maar vereist toename in dosis; bij kleine bestraalde volumes (bijvoorbeeld ledematen, kinderen) niet zinvol
<b>'Image hold'</b>	Het laatstverkregen beeld wordt opgeslagen tot de volgende sequentie om nader te bekijken zonder blootstelling
<b>'Frame grab'</b>	Een specifiek beeld uit een doorlichtingsserie wordt opgeslagen om nader te bekijken zonder blootstelling
<b>'Fluoro loop'</b>	Een serie doorlichtingsbeelden wordt als set opgeslagen om nader te bekijken zonder blootstelling
<b>'Region of interest'</b>	Beperking van het live beeld tot een kleinere regio, en integratie in een eerder verkregen, groter beeld
<b>Elektromagnetische navigatie</b>	Katheternavigatie door elektromagnetische inductie in combinatie met bestaande doorlichtingsbeelden
<b>Gepulste doorlichting</b>	Toediening van röntgenstraling in pulsen waardoor de totale blootstellingsduur afneemt; met variabele puls-frequentie kan de dosis verder worden verlaagd
<b>'Automatic exposure control'</b>	Automatische aanpassing van de buisstroom aan verzwakking van de röntgenbundel
<b>'Ultra low dose imaging'</b>	'Real time' digitale ruisonderdrukking in combinatie met verbeterde röntgenbuistechnologie
<b>'3D rotational angiography'</b>	Alternatief voor CT op de angiokamer met doorlichtingstechnieken en vergelijkbare dosis

Volgens de besproken literatuur en de interviews met experts kunnen de volgende eigenschappen van de apparatuur als verouderd worden beschouwd, respectievelijk als 'state of the art' worden gezien:

*Verouderd:*

- Systemen zonder mogelijkheid tot diafragmeren
- Systemen zonder collimatie
- Systemen zonder filtering van laag-energetische fotonen
- Systemen zonder gepulste doorlichting
- Systemen zonder 'image hold'
- Systemen zonder monitoring van dosis en doorlichtingstijd tijdens acquisitie
- Systemen zonder dosisrapportage na afloop

*State of the art:*

- Digitale detectorsystemen (met name flat paneledetectoren) in plaats van beeldversterkers
- Live imaging in beperkte 'region of interest'
- Nieuwste röntgenbuis- en detectortechnologie voor 'ultra low dose imaging'
- Elektromagnetische navigatie zonder extra doorlichting
- Multi-axis angiografie-statief met robotarm en 3D-functionaliteit

**3.3 Opties voor CT**

Sinds tien jaar zijn de multislice-spiraalscanners sterk in opkomst. Met deze scanners kunnen steeds meer en uitgebreidere scans in kortere tijd worden gemaakt. Hierdoor worden bewegingsartefacten gereduceerd, waardoor de kans kleiner wordt dat een scan moet worden herhaald. Ook worden interventies onder CT-geleide beter uitvoerbaar. Daar staat tegenover dat de patiëntdosis per scan potentieel met tientallen procenten kan toenemen (Bijwaard en Stoop, 2006). Fabrikanten van CT-scanners passen daarom inmiddels een serie technieken toe die de dosis reduceren zonder verlies van beeldkwaliteit (McCollough et al., 2009; Nievelstein et al., 2010; Coakley et al., 2011; European Medical ALARA Network, 2011; Small et al., 2012; Khong et al., 2012; Dougeni et al., 2012; Koshy en Thompson, 2012; McCollough et al., 2012; Cousins et al., 2013). Mede door deze technische innovaties is er in Nederlandse ziekenhuizen voor bepaalde verrichtingen een verschuiving geweest van conventionele röntgenonderzoeken naar lage dosis-CT. Voorbeelden van dit soort verrichtingen zijn de perfusie-ventilatiescan bij verdenking op longembolie, het intraveneus pyelogram, röntgenopnamen van de darm, galactografie van de borst en flebografie. In de volgende paragrafen worden de dosisbesparende innovaties bij CT meer in detail besproken.

De *nieuwste detectortechnologie* heeft een hogere gevoeligheid en lagere ruis door combinatie van het detectormateriaal en een chip voor versterking en preprocessing binnen één detectorelement. Idealiter heeft het detectormateriaal een zo snel mogelijke reactie op röntgenfotonen en een zo kort mogelijk 'nagloeien'. Daardoor wordt de beeldresolutie verhoogd en komen er minder artefacten in voor (Roobottom et al., 2010). Naast de detectorkwaliteit is het belangrijk dat het nuttig oppervlak van de detectoren zo groot mogelijk is.

Een nadeel van multislice-CT is dat voor de reconstructie van de eerste en de laatste slice van een scan een extra volume met extra dosis moet worden gescand. Met *dynamische collimatie* opent de detector geleidelijk bij aanvang van de scan en sluit deze weer tegen het einde van de opgegeven range. Dit voorkomt dat de röntgenbundel de patiënt bereikt buiten het geplande scanvolume ('over-ranging'). Naar schatting kan hiermee een gemiddelde dosisbesparing van 5% worden bereikt (McCollough et al., 2012). Een ander nadeel van multislice-CT is dat de software vereist dat alle detectoren in een rij uniform worden bestraald. De penumbra van de bundel moet dus buiten het detectorgebied vallen ('over-beaming'), wat tot een hogere dosis kan leiden (Dougeni et al., 2012). Dynamische collimatie en bredere detectorelementen met meer slices kunnen de mate van 'over-beaming' en daarmee de dosis reduceren (Philips Healthcare, 2009).

Met '*automatic exposure control*', '*anatomic dose modulation*' of '*automatic tube current modulation*' wordt de buisstroom gevarieerd over de lengte en over de doorsnede van de patiënt, afhankelijk van de lichaamsomvang, de weefseleigenschappen en de gevoeligheid voor straling. De bediener heeft enige controle over de instellingen, in het bijzonder over de hoeveelheid beeldruis die

acceptabel wordt geacht. Hiermee zijn dosisreducties mogelijk van 20 tot 50%. Er wordt uitgegaan van een vooraf gespecificeerde beeldkwaliteit die mede afhankelijk is van de grootte en dichtheid van de organen in een slice. Daarbij is het belangrijk om voor dunnere slices geen al te hoge beeldkwaliteit te kiezen. Ook als er relatief veel ruis in dunne slices zit, kunnen ze na reconstructie dikkere beelden met minder ruis geven die voldoende zijn voor de diagnose ('scan thin, reconstruct thick') (Coakley et al., 2011). De instellingen van de fabrikant hoeven niet altijd de maximale dosisbesparing te geven (Sarti et al., 2012). Evaluatie en aanpassing van protocollen door de gebruikers blijft daarom belangrijk.

Met '*adaptive filtering*' van de ruwe scandata wordt door lokale middeling de signaal-ruisverhouding verbeterd. Dit gebeurt alleen voor projecties met een relatief zwak signaal en sterke ruis. In het beeld dat uit deze gefilterde data wordt gereconstrueerd zijn de ruis en beeldartefacten aanmerkelijk gereduceerd. Hierdoor kan met een lagere patiëntdosis worden gescand. De techniek is inmiddels standaard aanwezig op nieuwe CT-scanners (European Medical ALARA Network, 2011).

Het grootste aandeel in de dosisreductie wordt geleverd door '*iteratieve reconstructie*' van het anatomische beeld uit de projectiegegevens. Daarbij wordt ruis na afloop van de scan geïdentificeerd en verwijderd, rekening houdend met de fysieke eigenschappen van het systeem. De techniek maakt het ook makkelijker om beelden te reconstrueren als de projectiedata incompleet zijn, bijvoorbeeld door afscherming of door metalen implantaten (McCollough et al., 2012). Daardoor kunnen ook scans met een relatief lage dosis een acceptabele beeldkwaliteit opleveren. De techniek was vroeger tijdrovend, maar is in de laatste jaren snel genoeg geworden om praktisch toepasbaar te zijn in de dagelijkse ziekenhuisroutine. In de traumatologie, waar de snelheid en hoge resolutie van CT-scans voordelen bieden, kan iteratieve reconstructie dosisreducties geven in de orde van 20% (Maxfield et al., 2012). Iteratieve reconstructie is nog niet standaard aanwezig op alle nieuwe CT-scanners (European Medical ALARA Network, 2011).

De geïnterviewde experts schatten dat 10 tot 20% van de scanners in Nederland is uitgerust met iteratieve reconstructietechnieken. Deze kunnen standaard op nieuwe systemen worden geleverd en de fabrikanten zijn bezig met het upgraden van bestaande systemen. Er bestond eerder de nodige weerstand tegen, omdat het uitgangspunt was dat men niet te veel aan de ruwe data moet veranderen door die 'op te schonen'. Niet alle radiologen durven de techniek aan, omdat de beelden er anders uitzien en men soms bang is om een diagnose te missen. Dat vergt aanpassing in de beoordeling door de radioloog en daarvoor is training en fine-tuning van het systeem nodig. Nadelen van iteratieve reconstructie zijn de relatief hoge kosten en het feit dat het proces voor de gebruiker een 'black box' is. Het kan grondig zijn maar langzamere scans geven, of sneller maar minder gedegen gebeuren. Die laatste variant kan nuttig zijn in een spoedeisende situatie. Deze techniek dringt ook steeds meer door bij perifere ziekenhuizen.

Er zijn ook *orgaanspecifieke technieken* ontwikkeld om de dosis buiten het doelorgaan te reduceren. De belangrijkste voorbeelden daarvan zijn het triggeren van een CT-scan van het hart in een bepaalde fase van de hartslag ('sequential scanning' of 'step-and-shoot') en het moduleren van de buisstroom over de hartcyclus ('ECG tube current modulation'). Daarmee wordt de dosis zo veel mogelijk beperkt tot de periode met minimale beweging die voor het reconstrueren van het beeld wordt gebruikt. Zo kunnen dosisreducties van ruwweg 30% tot 80% worden bereikt. Één van de nadelen is dat de techniek

alleen goed werkt bij patiënten met een relatief lage en stabiele hartslag. Er zijn daarom ook protocollen ontwikkeld waarbij de triggering van de CT-scan wordt aangepast aan trends en variabiliteit in het ECG. Een andere mogelijkheid om de dosis te reduceren bij CT-angiografie is het gebruik van dual-source CT. Hiermee is een hogere 'pitch' (verhouding tussen tafelsnelheid en bundelbreedte) mogelijk, waardoor een complete hartscan gedurende één diastole in de hartcyclus kan worden gemaakt. De effectieve dosis kan daarmee lager dan 1 mSv worden (Bischoff et al., 2009; Gerber et al., 2009; McCollough et al., 2009; Small et al., 2012).

Met de voorgaande technieken kan de dosis worden verlaagd zonder noemenswaardige afname in de beeldkwaliteit. Door de *buisspanning te verlagen* neemt de energie per röntgenfoton en daarmee de dosis af en neemt de scherpte van jodiumcontrast toe. De hoeveelheid beeldruis neemt ook toe bij lagere buisspanning, maar dit effect is minder sterk bij patiënten met een kleinere lichaamsomvang (McCollough et al., 2009). Wanneer de CT-scanner voldoende keus biedt om lagere buisspanningen te selecteren, kan die dus worden aangepast aan de lichaamsomvang van de patiënt en aan de voor de diagnose maximaal toelaatbare beeldruis. Aanpassingen van de buisspanning kunnen echter niet los worden gezien van de buisstroom. Bij korte rotatietijden van de scanner (kleiner dan 0,5 s) moet de buisstroom worden verhoogd als de buisspanning wordt verlaagd, om een voldoende hoge intensiteit van fotonen te krijgen (McCollough et al., 2012). Moderne CT-systemen zijn in staat om de optimale combinatie van buisstroom en buisspanning te berekenen.

Met de introductie van *dual-source CT* is het mogelijk geworden om in één scan beelden van hetzelfde anatomische gebied te vormen met verschillende buisspanningen. Deze kunnen vervolgens worden gebruikt om weefsels met verschillende röntgenabsorptie te vergelijken en te isoleren. Hiermee kan bijvoorbeeld botweefsel worden afgetrokken van een beeld van het hart, een beeld met jodiumcontrast worden vergeleken met de achtergrond of kunnen atherosclerotische plaques worden gekarakteriseerd (Siemens Healthcare, 2008). Met dual energy methoden kan in principe op dosis worden bespaard in meer-fasenstudies, doordat het mogelijk wordt om een fase minder te scannen. Het werkt goed voor zulke specifieke toepassingen, maar is voor algemene systemen relatief duur.

Voor het afschermen van gevoelige organen, zoals de borsten, kan *bismuth-afscherming* worden toegepast. Het nadeel daarvan is echter dat er beeldartefacten door kunnen ontstaan en het soms tot een hogere totale dosis kan leiden. Daarom wordt in Nederland geadviseerd om geen afscherming te gebruiken maar de dosis te minimaliseren met andere technieken, zoals diafragmeren en verlaging van de buisstroom (Nivelstein et al., 2010).

Zoals eerder besproken werden door de nieuwe technische ontwikkelingen in CT de patiëntdoses lager, werd de onderzoekstijd korter en werd het mogelijk om snel bewegende organen als het hart af te beelden. Daarmee werd het mogelijk om bepaalde interventies onder CT-geleide uit te voeren in plaats van onder doorlichting. Bij deze '*CT-doorlichting*' wordt al ongeveer 90% van de patiëntdosis toegediend bij de planningsscans die vóór de interventie worden gemaakt. De resterende dosis tijdens de interventie kan worden gereduceerd door in plaats van doorlopende scans intermitterende scans te gebruiken. Daarbij wordt bij het drukken op het acquisitie-pedaal maar een klein aantal aangrenzende beelden opgenomen ('quick check'). Dit kan een aanmerkelijke dosisreductie geven (Sarti et al., 2012).

Een andere nieuwe ontwikkeling is *spectral CT*, die in de toekomst wellicht single positron emission tomography (SPECT) gaat vervangen. Met Spectral CT wordt de röntgenbundel in een detector met meerdere lagen gesplitst in fotonen van verschillende energie. Hiermee kan het onderscheid tussen weefsels van verschillende samenstelling worden verbeterd en kan men afwijkingen en contrastvloeistof beter onderscheiden. CT scans worden daarmee kwantitatiever. De verwachting van de geïnterviewde experts is dat deze techniek geen hogere dosis per scan geeft, maar wel tot een groter aantal scans kan leiden omdat er meer informatie uit kan worden gehaald.

Een beknopt overzicht van dosisbesparende technieken bij CT is te vinden in Tabel 2.

Volgens de besproken literatuur en de interviews met experts kunnen de volgende eigenschappen van de apparatuur als verouderd worden beschouwd, respectievelijk als 'state of the art' worden gezien:

*Verouderd:*

- Systemen met 4 slices of minder per beeldelement voor uitgebreidere scans, zoals een buikonderzoek (voor een eenvoudige vraag, bijvoorbeeld botsectie, kan een single slice-scanner nog bruikbaar zijn)
- Systemen zonder dosismodulatie op basis van buisstroom (liefst in combinatie met een automatische regeling van de buisspanning zonder afname van beeldkwaliteit)
- Systemen zonder dosismelding vóór en tijdens acquisitie
- Systemen zonder gestandaardiseerde en te exporteren dosisrapportage na acquisitie

*State of the art:*

- Dynamische collimatoren
- Bundelfilters
- Detectoren met elektronica geïntegreerd in het fotodiodemateriaal
- Voor cardiac CT: een 64-slice scanner met een snelle rotatietijd of twee röntgenbuizen, of een scanner met 128 slices of hoger
- ECG-gestuurde modulatie of triggering van de buisstroom
- Iteratieve reconstructie
- Regelbare buisspanning

Tabel 2 Overzicht dosisbesparende opties in CT-scanners

<b>Dynamische collimatie</b>	Aanpassing van collimatie aan het begin en einde van een spiraalscan om dosistoename door extra rotaties voor reconstructie van het beeld te minimaliseren
<b>Bundelfilters</b>	Manuele of automatische toevoeging van extra filters ter verwijdering van fotonen met lage energie-inhoud
<b>Selectieve afscherming</b>	(Bismuth) afscherming van gevoelige organen; kan nadelige gevolgen hebben voor de beeldkwaliteit
<b>'Automatic exposure control'</b>	Aanpassing van de buisstroom aan de variërende anatomie tussen patiënten en over de scanlengte binnen één patiënt
<b>Regelbare buisspanning</b>	Aanpassing van de buisspanning aan de lichaamsomvang van de patiënt en een acceptabel ruisniveau
<b>'ECG-gated tube current modulation'</b>	Reductie van de buisstroom in fases van de hartslag die niet worden gebruikt voor beeldvorming
<b>'Prospective ECG triggering'</b>	Aanschakelen van de buisstroom uitsluitend in fases van de hartslag die worden gebruikt voor beeldvorming
<b>'Flash spiral CT'</b>	Gelijktijdige belichting van twee detectorrijen per rotatie met hogere tafelsnelheid
<b>'Dual source CT'</b>	Gebruik van twee gelijktijdig roterende röntgenbuizen; geeft kortere, dosisefficiëntere scantijden
<b>Geïntegreerde detectoren</b>	Detectoren met elektronica geïntegreerd in het fotodiodemateriaal
<b>'Adaptive filtering'</b>	Verbetering van de signaal-ruisverhouding door lokale middeling in projecties met sterkere ruis
<b>Iteratieve reconstructie</b>	Statistische beeldreconstructietechniek; relatief ongevoelig voor ruis en daardoor dosisefficiënter

### 3.4 Speciale overwegingen bij kinderen

Bij röntgenopnamen en doorlichting van kinderen is een nauwkeurige en op de juiste manier aangepaste collimatie essentieel vanwege de kleinere lichaamsomvang en de nabijheid van hun inwendige organen. Een extra dik koperen buisfilter kan worden aangebracht als de apparatuur uitsluitend voor kinderen wordt gebruikt. Ook moet het stroostralenrooster verwijderbaar zijn, omdat verwijdering bij bepaalde onderzoeken van kinderen jonger dan 8 jaar een dosisreductie geeft. De beeldversterker of flat panel kan bij kleine kinderen het gehele lichaam bestrijken. Omdat bij kinderen vaker zal worden gebruikgemaakt van vergroting, dient die zo veel mogelijk digitaal te gebeuren en niet door analoge beeldvergroting met extra dosis. De buisstroom en het product van buisstroom en blootstellingstijd dienen over een brede range aanpasbaar te zijn om te compenseren voor verschillen in dikte. Apparatuur met 'automatic exposure control' dient geoptimaliseerd te zijn voor gebruik bij kinderen om een onnodig lange blootstellingsduur te voorkomen. Hiervoor kunnen speciale lage-dosisprogramma's worden geïnstalleerd. Ook voor de beeldbewerking na het scannen zijn speciale instellingen voor kinderen

ontwikkeld (International Atomic Energy Agency, 2012). Aandacht voor dergelijke dosisbesparende opties is in het bijzonder belangrijk voor interventies bij kinderen. Hun hogere hartfrequentie, kleiner lichaamsomvang en het vaker voorkomen van ongebruikelijke anatomische variaties kunnen er toe leiden dat de procedures bijzonder tijdrovend zijn en dat uitvoering in meerdere sessies moet plaatsvinden (Cousins et al., 2013).

Ook voor onderzoek van kinderen met CT kunnen diverse opties bijdragen aan het minimaliseren van de dosis: iteratieve reconstructie en de aanpasbaarheid van buisstroom, buisspanning, pitch en (dynamische) collimatie aan lichaamsgewicht en -omvang. Ook is er een speciaal bundelfilter voor kinderen om extra röntgenfotonen met lage energie weg te filteren. Om de scantijd zo kort mogelijk te houden en bewegingsartefacten te voorkomen zijn een kortere rotatietijd en hoge pitch wenselijk. Het gebruik van wide-detector en dual-source CT-scanners bij kinderen, bijvoorbeeld bij scans van thorax en hart, maakt kortere scantijden en aanzienlijke dosisreductie mogelijk (International Atomic Energy Agency, 2012; Khong et al., 2012; Khong et al., 2013). Voor relatief korte scanlengtes kan de optie 'step-and-shoot' nuttig zijn. Bij scanners met een relatief groot aantal slices kan daarmee een lage-dosisscan in één rotatie worden gedaan (Nivelstein et al., 2010). Bij kinderen treedt door de kleinere lichaamsomvang en samenstelling van de weefsels minder verzwakking van de bundel op. Daarom kan in principe met een lagere buisspanning worden gewerkt, als de scanner die mogelijkheid biedt. Bij CT-onderzoek op kinderen is bijvoorbeeld gebleken dat het gebruik van een lagere buisspanning (80 kV) en een 64-slice in plaats van een 16-slice scanner een lagere patiëntdosis geeft zonder reductie in beeldkwaliteit (Chen et al., 2009; McCollough et al., 2009). Voor sommige indicaties kan zelfs een nog lagere buisspanning (70 kV of 60 kV) worden gebruikt. De geïnterviewde experts gaven aan dat kinderen in principe zouden moeten worden gescand op de modernste en snelste scanner die in het ziekenhuis beschikbaar is.

Met gebruikmaking van voorgaande technieken zijn er speciale protocollen ontwikkeld die zijn gebaseerd op fantomen die zijn geoptimaliseerd voor kinderen. Daarin wordt een evenwicht gevonden tussen dosis en beeldkwaliteit. Hoewel fabrikanten tegenwoordig dergelijke protocollen bij de scanner leveren, is het in de praktijk vaak nodig om in het ziekenhuis verfijndere protocollen op te stellen en filters aan te passen voor verschillende leeftijden en lichaamsgroottes (International Atomic Energy Agency, 2012). Daarbij moet goed naar de indicatie voor een scan worden gekeken en vooral worden gevraagd hoeveel ruis men acceptabel acht ('ruisgestuurd protocol'). Het beeld moet goed genoeg zijn om de afwijking te zien, maar hoeft niet 'mooi' te zijn (Nivelstein et al., 2010). Het omgaan met alle beschikbare mogelijkheden om de dosis bij onderzoeken aan kinderen te reduceren, is zeer complex geworden. De Amerikaanse voorlichtingscampagne 'Image gently' geeft adviezen over het optimaliseren van CT-protocollen voor kinderen met de beschikbare technologie (Applegate en Cost, 2013). In Nederland werd in 2008 op de sandwich-cursus kinderradiologie, een door de Nederlandse Vereniging voor Radiologie georganiseerde landelijke bij- en nascholingscursus voor radiologen, het boekje 'Multi-slice CT op de kinderleeftijd' gepresenteerd. Hierin zijn voor de gangbare scanners protocollen voor CT-onderzoek bij kinderen beschreven.

### 3.5 Speciale overwegingen bij kwetsbare groepen volwassenen

De geïnterviewde experts gaven aan dat zwangere patiënten in Nederland in principe niet met ioniserende straling worden gediagnostiseerd, maar met echografie of MRI. Sommige ziekenhuizen hebben voor mogelijk zwangere patiënten een stroomdiagram beschikbaar dat de keuze voor de techniek helpt bepalen. De voordelen en risico's dienen daarbij zorgvuldig tegen elkaar te worden afgewogen (Health Protection Agency, 2009; Wang et al., 2012). Als het toch nodig is om technieken met ioniserende straling toe te passen, dient dit met een zo laag mogelijke dosis te gebeuren. Zo wordt tegenwoordig in plaats van een perfusie-ventilatiescan met radioactieve tracers een beperkte CT-scan gedaan, waarbij de baarmoeder wordt ontzien. Waar mogelijk wordt gekozen voor een moderne scanner met iteratieve reconstructie. Ook kan door het drinken van een bariumhoudend middel een zekere afscherming van de ongeboren vrucht worden bereikt.

In dikke patiënten treedt extra absorptie op en kan het nodig zijn de dosis te verhogen om een voldoende hoge beeldkwaliteit te krijgen. Dit kan bij CT worden bereikt door de buisstroom, buisspanning en rotatietijd te verhogen. Wel wordt een groot deel van de extra dosis geabsorbeerd door vetweefsel, en niet zozeer door de interne organen. 'Automatic exposure control' houdt hier rekening mee (McCollough et al., 2009).

Het gaat bij kwetsbare groepen niet alleen om het minimaliseren van de stralingsdosis, maar ook om optimaliseren van de contrastgevoeligheid. Voor oudere patiënten met mogelijke nierfunctiestoornissen en gevoeligheid voor jodium is het contrastmiddel een groter probleem dan de straling en wil men de toegediende hoeveelheid het liefst zo laag mogelijk houden. De stochastische, langetermijneffecten van ioniserende straling zijn voor oudere patiënten minder relevant dan voor jongere.

Ook bij patiënten die herhaaldelijk onderzocht moeten worden is extra aandacht voor dosisbesparing geboden. Het gaat hier niet zozeer om specifieke technieken voor deze groepen patiënten, maar om een combinatie van dosisbesparende technieken over de hele keten, inclusief de beeldbewerking na afloop van de scan. Een voorbeeld hiervan is het gebruik van een extreem lage dosisprotocol voor longonderzoek. Verder wordt momenteel een 'disease monitoring'-methode ontwikkeld. Wanneer bijvoorbeeld een longpatiënt herhaald moet worden gescand, kan voor de eerste scan een normaal protocol worden gebruikt. Daarna kan dezelfde patiënt worden gevolgd met lagere doses, gebruikmakend van de oude data. Er wordt dan vooral gekeken naar de veranderingen in grootte of dichtheid van specifieke plekken in de long ten opzichte van de beginsituatie. Een ander voorbeeld zijn de herhaalde functiemetingen, zoals myocardperfusie. Ook in de oncologie komt herhaald scannen van een patiënt voor. Waar mogelijk wordt daarbij gekozen voor een scanner met iteratieve reconstructie. Om de stralingsbelasting van individuele patiënten te bewaken is het wel nodig dat die ergens wordt geregistreerd. Een mogelijkheid is het bijhouden van de cumulatieve stralingsdosis van individuele patiënten in het patiëntendossier en het inbouwen van een waarschuwing als bepaalde dosiscriteria worden overschreden.

### 3.6 Belang van opleiding en correct gebruik

Hoe dosisefficiënt een modern radiodiagnostisch systeem ook is: als de bediener een hogere beeldkwaliteit en lager ruisniveau selecteert dan nodig is voor de diagnose, is de patiëntdosis onnodig hoog. Zo wordt bijvoorbeeld voor elektrisch



functieonderzoek van het hart een relatief grote katheter gebruikt. De eisen voor beeldvorming zijn daardoor lager en men kan dus voor een lagere dosis kiezen. Overigens hebben de handelingen van de bedieners ook invloed op de beeldkwaliteit. Denk hierbij aan ademhalingsinstructies voor de patiënt en een goede timing van de contrasttoediening. Door de complexiteit van de indicaties voor een CT-scan en de grote variatie in apparatuur, onderzoeksprotocollen en voorkeuren van de beoordelaars is het opstellen van regels voor beeldkwaliteit niet eenvoudig (McCollough et al., 2012). Daarom is overleg tussen de betrokken beroepsgroepen (laboranten, klinisch fysici en radiologen) nodig. Opleiding en overtuiging van het nut van deze technieken zijn belangrijk, met name bij de introductie van nieuwe technologieën. Onder radiologen is er veel interesse in de nieuwste apparatuur en die wordt dan ook snel gebruikt. Volgens sommige fabrikanten worden de mogelijkheden voor dosismodulatie echter niet overall optimaal gebruikt. Soms weet men zelfs niet dat het er op zit. Er wordt bij de initiële training wel aandacht aan besteed, maar het is ingewikkeld en men is bang om door het gebruik ervan de diagnose te missen. Goed getrainde radiodiagnostisch laboranten kunnen ook een belangrijke rol spelen bij het optimaal gebruikmaken van dosisbesparende opties op CT-apparatuur. Ze kunnen daarbij de berekende patiëntdosis voor een bepaald onderzoek vergelijken met DRN en streefwaarden (Coakley et al., 2011; Stam, 2012).

Men name voor minder ervaren ziekenhuizen is er meer begeleiding nodig bij het optimaal gebruik van nieuwe opties op de apparatuur. Zij vragen de ervarener ziekenhuizen nog te weinig: "Hoe doen jullie het nou?". Wat dit punt betreft werd in een voorgaand RIVM-rapport al geconcludeerd dat het belangrijk is om onderzoeksprotocollen en dosisbesparende vernieuwingen landelijk te coördineren en te standaardiseren, zodat alle ziekenhuizen daarvan gebruik kunnen maken. Daarnaast zou er in landelijke richtsnoeren, bij de scholing van beroepsgroepen en bij de inspecties aandacht moeten zijn voor het optimaliseren van de dosis (Stam, 2012). Het uitwisselen van informatie bij de beroepsverenigingen moet wel specifiek genoeg zijn voor bepaalde fabrikanten en typen apparaat. Multi-slice CT-apparatuur van verschillende fabrikanten kan namelijk verschillen in afmetingen, detectorontwerp, dosisefficiëntie en collimatietechniek (Nivelstein et al., 2010). Verschillende fabrikanten zetten teams met stralingsdeskundigen op voor vragen van gebruikers. De informatie in gebruikersnetwerken kan echter objectiever zijn dan die van de fabrikanten. Het is overigens niet zo dat de kleinere, perifere ziekenhuizen het per definitie minder goed doen. Het hangt ook af van de instelling van de betrokken ziekenhuismedewerkers, met name de radiologen. In academische ziekenhuizen geldt volgens bepaalde experts soms de wet van de remmende voorsprong. Men denkt er wetenschappelijker en wil nieuwe toepassingen eerst grondig uitzoeken en erover publiceren. Daardoor kan de acceptatie wat langer duren. Verder zijn er ziekenhuizen die meer gespecialiseerd zijn in andere technieken dan CT, bijvoorbeeld in MRI.

Het belang van opleiding en correct gebruik van de apparatuur speelt in het bijzonder een rol bij interventies, waarbij ook niet-radiologische specialisten betrokken kunnen zijn. Bij interventies is de manier waarop de bediener de apparatuur gebruikt een belangrijke factor in de patiëntdosis. Die wordt bijvoorbeeld beïnvloed door hoe lang men op het pedaal drukt, door het minimaliseren van de afstand tussen bron en detector, door het aantal diagnostische series dat wordt gemaakt en door het kiezen van de juiste 'image mode' en het juiste anatomische programma. Voor de interventieradiologie zijn in Nederland een speciale opleiding en een registratiesysteem ingesteld (Meeuwssen et al., 2007). Bij diagnostische handelingen en interventies buiten de afdeling radiologie zijn echter ook cardiologen, vaatchirurgen, internisten, maag-

darm-leverartsen en urologen betrokken. Als het goed is, volgen de specialisten die zelfstandig doorlichtingen doen een cursus stralingsdeskundigheid op niveau 4A/4M, een applicatie voor het betreffende doorlichtingsapparaat en opfriscursussen. Een deel van de OK-medewerkers heeft stralingsdeskundigheid op niveau 5. Laatstgenoemden mogen dan assisteren tijdens doorlichting. Wel kan er in de praktijk individuele variatie zijn met betrekking tot het serieus nemen van stralingsbescherming en zou deze bij chirurgen en orthopeden ondergeschikt kunnen worden als de spanning oploopt tijdens een procedure of in avonden en weekeinden. Waar nodig kunnen de radioloog of radiodiagnostisch laborant in een time-out tijdens de interventie met de chirurg in overleg gaan over de beste stralingshygiënische opties voor de patiënt in kwestie.

Veelvoorkomende handelingen met een relatief hoge dosis voor de patiënt zijn vaatdiagnostiek, diagnostiek van de galwegen en het plaatsen van stents. Het komt daarbij voor dat cardiologen röntgenapparatuur laten bedienen door eigen assistenten die wellicht geen stralingshygiënische opleiding hebben, terwijl dat op de afdeling radiologie gebeurt door radiodiagnostisch laboranten (Stoop en De Waard, 2012). Dit zou kunnen resulteren in suboptimale instellingen met een hogere patiëntdosis. Zo kunnen doorlichtingstijden bij cardiologen in opleiding langer zijn dan bij meer ervaren cardiologen of arts-assistenten. De persoon die de interventie uitvoert moet daarom niet alleen uitvoerig zijn getraind in een snelle en effectieve uitvoering van de interventie, maar moet ook goed op de hoogte zijn van het gebruik van dosisbesparende opties in de apparatuur (International Atomic Energy Agency, 2010). Beroepsverenigingen als de Society for Cardiovascular Angiography and Interventions (2013) hebben daarvoor diverse tools ontwikkeld. Nascholing op het gebied van verantwoord gebruik van straling en het optimaal instellen van de apparatuur kan tot aanzienlijke verlaging van de patiëntdosis leiden. Feedback over de geregistreerde doorlichtingstijden aan de bedieners kan ook tot vermindering van de blootstelling leiden (Bar-On et al., 2010; Ngo et al., 2011; Azpiri-Lopez et al., 2013). Uiteindelijk ligt de verantwoordelijkheid voor de bevoegdheid en bekwaamheid van gebruikers van stralingsbronnen bij de vergunninghouder, de Raad van Bestuur van het ziekenhuis (minister van Justitie, 2001).

## 4 Conclusies en aanbevelingen

In een eerder RIVM-rapport uit 2012 werd al geconstateerd dat de nieuwe technische ontwikkelingen bij radiologische apparatuur in het eerste decennium van de 21<sup>e</sup> eeuw, met name bij CT, potentieel tot verhoging van de patiëntdosis per verrichting hadden kunnen leiden. In de praktijk hebben verbeterde detectoren en dosisbesparende technieken er echter toch voor gezorgd dat de gemiddelde patiëntdosis per verrichting in die periode is gedaald (Stam, 2012). In het huidige rapport werd de actuele stand van zaken op het gebied van dosisbesparende mogelijkheden bij radiodiagnostische apparatuur nader onderzocht. De nadruk lag daarbij op technieken met een relatief hoge patiëntdosis (doorlichting en CT) en technieken zonder ioniserende straling die in bepaalde gevallen een alternatief kunnen zijn (echografie en MRI). De resultaten moeten IGZ helpen te beoordelen wat zij op het gebied van dosisbesparende mogelijkheden kan verlangen van het veld.

Volgens gegevens van fabrikanten is de radiodiagnostische apparatuur die in Nederland wordt gebruikt up-to-date voor CT en in mindere mate voor doorlichting en MRI. De optimale manier voor dosisbesparing is om alternatieve technieken zonder ioniserende straling te gebruiken. De verbeterde snelheid, resolutie en penetratie van moderne echografie- en MRI apparatuur zorgen ervoor dat ze als technieken van eerste keus kunnen worden overwogen bij de diagnose van bepaalde aandoeningen van het vaatbed, de longen, het maag-darmkanaal en de bekkenorganen. Daarbij moet wel worden aangemerkt dat verschillende technieken soms complementaire informatie kunnen opleveren. Bij extra kwetsbare groepen patiënten, met name bij kinderen en bij zwangerschap, dienen alternatieven zonder ioniserende straling als eerste in aanmerking te komen. Volgens de geïnterviewde experts gebeurt dat in Nederland in het algemeen ook. Voor het correct gebruik van de diverse beeldvormende technieken en vermindering van de stralingsbelasting van patiënten zijn een strikte indicatiestelling en het volgen van diagnostische richtlijnen belangrijk. De radiologen en radiodiagnostisch laboranten spelen hierbij een belangrijke controlerende rol.

Op basis van de literatuur en interviews met experts werden eigenschappen van radiodiagnostische apparatuur geïnventariseerd die uit stralingshygiënisch oogpunt als verouderd kunnen worden beschouwd. Daarnaast werden eigenschappen geïnventariseerd die de state of the art vertegenwoordigen, met name op het gebied van dosisbesparing. Doorlichtingssystemen zonder mogelijkheid tot diafragmeren, collimatie en filtering van de röntgenbundel dienen als verouderd te worden beschouwd. Daarnaast dient de doorlichting gepulseerd te kunnen worden toegediend en moeten de laatst verkregen beelden stralingsvrij kunnen worden bekeken. Verder dienen de dosis en doorlichtingstijd tijdens de acquisitie zichtbaar te zijn en na afloop in een dosisrapportage te kunnen worden opgeslagen. Recente innovaties die de state of the art voor doorlichting weerspiegelen zijn digitale detectorsystemen, beperking van het live beeld tot een kleine regio, 'ultra low dose imaging', elektromagnetische navigatie en 3D-angiografie. Dergelijke dosisbesparende mogelijkheden zijn met name belangrijk bij interventies, die een relatief hoge patiëntdosis kunnen geven.

CT-systemen zonder automatische dosismodulatie op basis van buisstroom dienen als verouderd te worden beschouwd. Daarnaast zouden systemen met 4 slices of minder per beeldelement niet meer moeten worden gebruikt voor

uitgebreidere scans. Ook voor CT dienen de dosis en doorlichtingstijd tijdens de acquisitie zichtbaar te zijn en na afloop in een dosisrapportage te kunnen worden opgeslagen. De state of the art op het gebied van dosisbesparing bij CT is de toepassing van dynamische collimatie, bundelfilters, regelbare buisspanning, geïntegreerde detectoren en iteratieve reconstructie van de verkregen beelden. Voor cardiovasculaire toepassingen zijn ECG-modulatie of -triggering en scanners met 64 slices of meer, snelle rotatietijden of twee röntgenbuizen state of the art.

Toepassing van voornoemde dosisbesparende opties is in het bijzonder belangrijk bij onderzoek aan kinderen, vanwege hun kleinere lichaamsomvang, verhoogde kwetsbaarheid en langere levensverwachting. Met gebruikmaking van alle beschikbare opties dienen speciale instellingen en protocollen voor kinderen te worden gebruikt. Daarnaast moet het stroostralenrooster verwijderbaar zijn en kan extra bundelfiltering helpen de dosis te verminderen. Bij CT-scans van kinderen kan een extra lage buisspanning worden gebruikt en meer beeldruis worden geaccepteerd zolang dat de diagnose niet bemoeilijkt. Gebruik van scanners met een zo hoog mogelijk aantal slices per beeldelement, een korte rotatietijd en hoge pitch of twee röntgenbuizen kunnen helpen de dosis te verlagen en de scantijd zo kort mogelijk te houden. Ook bij groepen kwetsbare volwassen patiënten, zoals zwangere vrouwen, en bij herhaald onderzoek dienen technieken en instellingen met een zo laag mogelijke dosis te worden gebruikt.

Met alle mogelijkheden voor dosisbesparing op radiologische apparatuur blijft de rol van de bediener ervan essentieel. Deze dient, afhankelijk van het type patiënt en de benodigde informatie, de optimale verhouding tussen beeldkwaliteit en toepassing van dosisbesparende mogelijkheden te vinden. Daarvoor zijn een degelijke opleiding, nascholing en overleg van de betrokken beroepsgroepen (laboranten, klinisch fysici en radiologen) nodig. Landelijke coördinatie en overleg tussen ervaren en minder ervaren ziekenhuizen is daarbij belangrijk. De fabrikanten van radiodiagnostische apparatuur kunnen een faciliterende rol spelen. Training en overleg zijn in het bijzonder belangrijk bij interventie, waarbij relatief hoge patiëntdoses voorkomen en waarbij ook niet-radiologische specialismen betrokken kunnen zijn.

## Literatuur

- Alzen, G., G. Benz-Bohm (2011) Radiation protection in pediatric radiology. *Dtsch Arztebl Int* 108: 407-414.
- American College of Radiology (2010) ACR-AAPM-SIIM practice guideline for digital radiography. American College of Radiology, Reston.
- Applegate, K.E., N.G. Cost (2013) Image Gently: a campaign to reduce children's and adolescents' risk for cancer during adulthood. *J Adolesc Health* 52: S93-7.
- Arthurs, O.J., A.D. Edwards, I. Joubert, M.J. Graves, P.A.K. Set, D.J. Lomas (2013) Interactive magnetic resonance imaging for paediatric vesicoureteric reflux (VUR). *Eur J Radiol* 82: e112-9.
- Ashton-Cleary, D.T. (2013) Is thoracic ultrasound a viable alternative to conventional imaging in the critical care setting?. *Br J Anaesth* 111: 152-160.
- Azpiri-Lopez, J.R., J.L. Assad-Morell, J.G. Gonzalez-Gonzalez, G. Elizondo-Riojas, A. Davila-Bortoni, R. Garcia-Martinez, R. Trevino-Frutos (2013) Effect of physician training on the X-ray dose delivered during coronary angioplasty. *J Invasive Cardiol* 25: 109-113.
- Baltarowich, O.H., L.M. Scoutt, U.M. Hamper (2012) Nongynecologic findings on pelvic ultrasound: focus on gastrointestinal diseases. *Ultrasound Q* 28: 65-85.
- Bar-On, E., D.M. Weigl, T. Becker, K. Katz, O. Konen (2010) Intraoperative C-arm radiation affecting factors and reduction by an intervention program. *J Pediatr Orthop* 30: 320-323.
- Bijwaard, H. (2011) Inventarisatie van ontwikkelingen van PET-CT. Rapport 300080008/2011. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Bijwaard, H., P. Stoop (2006) Ontwikkelingen in de Computer Tomografie. Rapport 265021004/2006. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Bischoff, B., F. Hein, T. Meyer, M. Hadamitzky, S. Martinoff, A. Schomig, J. Hausleiter (2009) Trends in radiation protection in CT: present and future status. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 3 Suppl 2: S65-73.
- Casella, M., G. Pelargonio, A. Dello Russo, S. Riva, S. Bartoletti, P. Santangeli, A. Scara, T. Sanna, R. Proietti, L. Di Biase, G.J. Gallinghouse, M.L. Narducci, L. Sisto, F. Bellocchi, A. Natale, C. Tondo (2011) 'Near-zero' fluoroscopic exposure in supraventricular arrhythmia ablation using the EnSite NavX mapping system: personal experience and review of the literature. *J Interv Card Electrophysiol* 31: 109-118.
- Chen, S., K. Moulton, C. Spry (2009) Computed Tomography for pediatric Patients: Review of clinical effectiveness and indications for use. Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health, Ottawa.
- Childs, D.D., H.T. Tchelepi (2009) Ultrasound and abdominal intervention: new luster on an old gem. *Ultrasound Clin* 4: 25-43.
- Coakley, F.V., R. Gould, B.M. Yeh, R.L. Arenson (2011) CT radiation dose: what can you do right now in your practice?. *AJR Am J Roentgenol* 196: 619-625.

COCIR (2009) Age profile diagnostic medical imaging devices. Edition 2009. COCIR, Brussel.

Council of the European Union (1997) Directive 97/43/EURATOM on health protection of individuals against the dangers of ionizing radiation in relation to medical exposure. Council of the European Union, Luxemburg.

Cousins, C., D.L. Miller, G. Bernardi, M.M. Rehani, P. Schofield, E. Vano, A.J. Einstein, P. Geiger, P. Heintz, R. Padovani, K.H. Sim (2013) Radiological Protection in Cardiology. ICRP Publication 120. Ann ICRP 42: 1-125.

De Buck, S., B.S.N. Alzand, J. Wielandts, C. Garweg, T. Phillips, J. Ector, D. Nuyens, H. Heidbuchel (2013) Cardiac three-dimensional rotational angiography can be performed with low radiation dose while preserving image quality. Europace, in press.

De Waard, I.R., P. Stoop (2010) Resultaten enquête kwaliteitsaspecten afdelingen radiologie. Rapport 300080004/2010. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.

Dougeni, E., K. Faulkner, G. Panayiotakis (2012) A review of patient dose and optimisation methods in adult and paediatric CT scanning. Eur J Radiol 81: e665-83.

Doyle, P., D. Gentle, C.J. Martin (2005) Optimising automatic exposure control in computed radiography and the impact on patient dose. Radiat Prot Dosimetry 114: 236-239.

European Commission (2012) Criteria for acceptability of medical radiological equipment used in diagnostic radiology, nuclear medicine and radiotherapy. European Commission, Brussel.

European Medical ALARA Network (2011) Optimisation of patient exposure in CT procedures - synthesis document. European Commission, Brussel.

European Medical ALARA Network (2012) Progress report Working Group (2). European Commission, Brussel.

Gerber, T.C., B. Kantor, C.H. McCollough (2009) Radiation dose and safety in cardiac computed tomography. Cardiol Clin 27: 665-677.

Goo, H.W. (2011) Regional and whole-body imaging in pediatric oncology. Pediatr Radiol 41 Suppl 1: S186-94.

Health Protection Agency (2009) Protection of pregnant patients during diagnostic medical exposures to ionising radiation. Health Protection Agency, Chilton.

Heij, H.A., M.N.Y.H. Go, G. Kazemier, J.B.M. Puylaert, M. Offringa, M.S. Schilthuis, P.J. Hajenius, M. van Diejen-Visser, O.J. Bakker (2010) Richtlijn voor diagnostiek en behandeling van acute appendicitis. Nederlandse vereniging voor Heelkunde, Utrecht.

Herfarth, H., L. Palmer (2009) Risk of radiation and choice of imaging. Dig Dis 27: 278-284.

International Atomic Energy Agency (2010) Patient dose optimization in fluoroscopically guided interventional procedures. International Atomic Energy Agency, Wenen.

International Atomic Energy Agency (2012) Radiation protection in paediatric radiology. International Atomic Energy Agency, Wenen.

- Khong, P., D. Frush, H. Ringertz (2012) Radiological protection in paediatric computed tomography. *Ann ICRP* 41: 170-178.
- Khong, P.L., H. Ringertz, V. Donoghue, D. Frush, M. Rehani, K. Applegate, R. Sanchez (2013) Radiological protection in paediatric diagnostic and interventional radiology. *ICRP Publication 121. Ann ICRP* 42: 1-63.
- Koshy, S., R.C. Thompson (2012) Review of radiation reduction strategies in clinical cardiovascular imaging. *Cardiol Rev* 20: 139-144.
- Maxfield, M.W., K.M. Schuster, E.A. McGillicuddy, C.J. Young, M. Ghita, S.A.J. Bokhari, I.B. Oliva, J.A. Brink, K.A. Davis (2012) Impact of adaptive statistical iterative reconstruction on radiation dose in evaluation of trauma patients. *J Trauma Acute Care Surg* 73: 1406-1411.
- McCullough, C.H., A.N. Primak, N. Braun, J. Kofler, L. Yu, J. Christner (2009) Strategies for reducing radiation dose in CT. *Radiol Clin North Am* 47: 27-40.
- McCullough, C.H., G.H. Chen, W. Kalender, S. Leng, E. Samei, K. Taguchi, G. Wang, L. Yu, R.I. Pettigrew (2012) Achieving routine submillisievert CT scanning: report from the summit on management of radiation dose in CT. *Radiology* 264: 567-580.
- McLaughlin, P.D., O.J. O'Connor, S.B. O'Neill, F. Shanahan, M.M. Maher (2012) Minimization of Radiation Exposure due to Computed Tomography in Inflammatory Bowel Disease. *ISRN Gastroenterology* 2012: 1-7.
- Meeuwssen, E.J., P. Stoop, H. Bijwaard (2007) Kwaliteitsborging ter optimalisatie van de patiëntdosis in de interventieradiologie. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Minister van Justitie (2001) Besluit van 16 juli 2001, houdende vaststelling van het Besluit stralingsbescherming. *Staatsblad*, 6 september 2001. Voor de meest recente versie zie: <http://wetten.overheid.nl/> (laatst geraadpleegd op 14 augustus 2013).
- Nael, K., J.M. Moriarty, J.P. Finn (2011) Low dose CE-MRA. *Eur J Radiol* 80: 2-8.
- Ngo, T.C., L.C. Macleod, D.I. Rosenstein, J.H. Reese, R. Shinghal (2011) Tracking intraoperative fluoroscopy utilization reduces radiation exposure during ureteroscopy. *J Endourol* 25: 763-767.
- Nivelstein, R.A., I.M. van Dam, A.J. van der Molen (2010) Multidetector CT in children: current concepts and dose reduction strategies. *Pediatr Radiol* 40: 1324-1344.
- O'Neill, B.R., S. Pruthi, H. Bains, R. Robison, K. Weir, J. Ojemann, R. Ellenbogen, A. Avellino, S.R. Browd (2012) Rapid Sequence Magnetic Resonance Imaging in the Assessment of Children with Hydrocephalus. *World Neurosurg*, in press.
- Philips Healthcare (2009) The Brilliance iCT and DoseWise strategies - Simplification of dose management with optimized image quality. Philips Healthcare, Eindhoven.
- Piorkowski, C., G. Hindricks (2011) Nonfluoroscopic sensor-guided navigation of intracardiac electrophysiology catheters within prerecorded cine loops. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 4: e36-8.
- Roobottom, C.A., G. Mitchell, G. Morgan-Hughes (2010) Radiation-reduction strategies in cardiac computed tomographic angiography. *Clin Radiol* 65: 859-867.

- Saeed, M., S.W. Hetts, J. English, M. Wilson (2012) MR fluoroscopy in vascular and cardiac interventions (review). *Int J Cardiovasc Imaging* 28: 117-137.
- Saikus, C.E., R.J. Lederman (2009) Interventional cardiovascular magnetic resonance imaging: a new opportunity for image-guided interventions. *JACC Cardiovasc Imaging* 2: 1321-1331.
- Sarti, M., W.P. Brehmer, S.B. Gay (2012) Low-dose techniques in CT-guided interventions. *Radiographics* 32: 1109-19; discussion 1119-20.
- Siemens Healthcare (2008) Dual energy CT. SOMATOM Definition. Siemens Healthcare, Erlangen.
- Small, G.R., B.J.W. Chow, T.D. Ruddy (2012) Low-dose cardiac imaging: reducing exposure but not accuracy. *Expert Rev Cardiovasc Ther* 10: 89-104.
- Söderman, M., S. Holmin, T. Andersson, C. Palmgren, D. Babic, B. Hoornaert (2013) Image Noise Reduction Algorithm for Digital Subtraction Angiography: Clinical Results. *Radiology*, in press.
- Stam, R. (2012) Management van de patiëntdosis in Nederland en het Verenigd Koninkrijk. Mogelijkheden voor verbetering. RIVM rapport 610111001/2012. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Stoop, P., H. Bijwaard (2006) Optimalisatie van de dosis bij radiologisch onderzoek van kinderen. RIVM rapport 265021005/2006. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Stoop, P., I.R. de Waard (2012) Medische röntgentoepassingen buiten afdelingen radiologie en ziekenhuizen. RIVM rapport 300080012/2012. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Uri, I.F. (2012) Lack of radiation awareness among referrers: implications and possible solutions. *Int J Clin Pract* 66: 574-581.
- Verma, B., I. Indrajit (2008) Impact of computers in radiography: The advent of digital radiography, Part-2. *Indian J Radiol Imaging* 18: 204-209.
- Wang, P.I., S.T. Chong, A.Z. Kielar, A.M. Kelly, U.D. Knoepp, M.B. Mazza, M.M. Goodsitt (2012) Imaging of pregnant and lactating patients: part 1, evidence-based review and recommendations. *AJR Am J Roentgenol* 198: 778-784.
- Whiley, S.P., G. Mantokoudis, D. Ott, H. Zimmerman, A.K. Exadaktylos (2012) A review of full-body radiography in nontraumatic emergency medicine. *Emerg Med Int* 2012: 108-129.
- Wieseler, K.M., P. Bhargava, K.M. Kanal, S. Vaidya, B.K. Stewart, M.K. Dighe (2010) Imaging in pregnant patients: examination appropriateness. *Radiographics* 30: 1215-29; discussion 1230-3.
- Society for Cardiovascular Angiography and Interventions (2013) Quality improvement resources. <http://www.scai.org/GuidelinesQuality.aspx> (laatst bezocht op 14 augustus 2013).



## Lijst van geïnterviewde experts

(in alfabetische volgorde)

Ir. Arjen Becht, klinisch fysicus, Gelre ziekenhuizen, Apeldoorn

Martin Boer, Productmanager angiografie en cardiologie, Healthcare Sector, Siemens Nederland N.V., Den Haag

Ronald Booij, radiodiagnostisch laborant en Coördinator Research & Innovation unit CT, Erasmus MC, Rotterdam

Dr. Sjirk Boon, Clinical Scientist iXR, Philips Healthcare, Best

Michiel de Bruijn, Productmanager CT, Healthcare Sector, Siemens Nederland N.V., Den Haag

Stefan Hage, radiodiagnostisch laborant en hoofd techniek afdeling Radiologie, Medisch Centrum Alkmaar

Dr. Rick van Rijn, kinderradioloog, Emma Kinderziekenhuis – Academisch Medisch Centrum Amsterdam

Dr. Arnold Schilham, klinisch fysicus, Universitair Medisch Centrum Utrecht

Dr. Koos Schut, radioloog, Tergooi ziekenhuis, Hilversum

Dr. Aart Spilt, radioloog, Kennemer Gasthuis, Haarlem

Dr. Leon de Vries, Director CT Clinical Science and Application, Philips Healthcare, Best

De auteur bedankt alle experts hartelijk voor hun medewerking.

## Afkortingen

ALARA	As low as reasonably achievable
COCIR	European Coordination Committee of the Radiological, Electromedical and Healthcare IT Industry
CT	Computertomografie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DRN	Diagnostisch(e) referentieniveau(s)
ECG	Elektrocardiogram
EU	Europese Unie
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IGZ	Inspectie voor de Gezondheidszorg
MRI	Magnetic resonance imaging
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
VK	Verenigd Koninkrijk van Groot-Brittannië en Noord-Ierland
VS	Verenigde Staten van Amerika

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)