



Milieurapport Vlaanderen

MIRA

Achtergronddocument
Thema ioniserende straling

Coördinerend auteur

Hans Vanmarcke, Studiecentrum voor Kernenergie

Auteurs

Hans Vanmarcke, Studiecentrum voor Kernenergie

Hilde Bosmans, Afdeling Radiologie, Katholieke Universiteit Leuven

Gilbert Eggermont, Vakgroep Menselijke Ecologie, Vrije Universiteit Brussel

Johan Brouwers, MIRA, VMM

Laatst bijgewerkt: november 2007

Woord vooraf

Dit is het achtergronddocument voor het hoofdstuk Ioniserende straling. Het achtergronddocument bundelt de kennis en informatie aangedragen in de MIRA-T-rapporten vanaf 1998. Dit document wordt elk jaar bijgewerkt en is raadpleegbaar op de websites www.milieurapport.be of www.milieurapport.be/AG en www.vmm.be/mira

Het Milieurapport Vlaanderen heeft de decretale opdracht enerzijds om de toestand van het milieu en het tot nu toe gevoerde milieubeleid te analyseren en te evalueren, en anderzijds om de verwachte ontwikkeling van het milieu volgens relevante beleidsscenario's te beschrijven. Daartoe werken een auteursgroep en kritische lezers (lectoren), onder coördinatie van het MIRA-team, jaarlijkse themarapporten (MIRA-T), vijfjaarlijkse scenariorapporten (MIRA-S) en tweejaarlijkse beleidsevaluatierapporten (MIRA-BE) uit. De rapporten worden beschikbaar gemaakt aan beleidsmakers en het brede publiek. Themarapporten zijn compacte studies van de verstoringsketens en onderbouwen de jaarlijkse milieujaarprogramma's van de Vlaamse overheid. Scenariorapporten zijn uitgebreide modelstudies van de verstoringsketen en leveren noodzakelijke inzichten om het Vlaamse milieubeleidsplan op te stellen. Beleidsevaluatierapporten zijn diepgaande studies over milieugerelateerde beleidsthema's.

Het geheel van de achtergronddocumenten bestaat uit *sectorhoofdstukken*, *milieuthema*-hoofdstukken en *gevolgen* hoofdstukken. Zo worden milieuverstoringen vanuit drie invalshoeken benaderd.

In de sectorhoofdstukken worden alle relevante milieuverstoringen die een sector teweegbrengt, beschreven. De maatschappelijke activiteiten die aan de basis liggen van de milieudruk in Vlaanderen, worden opgedeeld in 8 sectoren: grondstofstromen, huishoudens, industrie, energie, landbouw, transport, handel & diensten en toerisme & recreatie. Het doel van de sectorhoofdstukken is het samenbrengen van kwantitatieve inzichten in de milieudruk van een sector (zowel brongebruik als emissies) en in de onderliggende drijvende krachten ervan. Hiertoe worden indicatoren opgesteld vanuit de conceptuele milieuverstoringsketen (DPSI-R-denkkader). Indicatoren van de onderliggende maatschappelijke activiteiten (driving forces) en van de milieudruk (pressure) worden met elkaar vergeleken via indicatoren van eco-efficiëntie. De evolutie van de indicatoren wordt getoetst aan beleidsdoelstellingen. Ten slotte worden de ingezette beleidsinstrumenten en genomen maatregelen geëvalueerd (response). De activiteit-, druk-, toestand- (state) en impactindicatoren (impact) worden in de themahoofdstukken behandeld volgens een doorsnede naar milieuverstoring.

Het doel van de themahoofdstukken is het samenbrengen van kwantitatieve inzichten in de milieudruk (pressure) van de verantwoordelijke doelgroepen of sectoren (zowel brongebruik als emissies), de hieruit voortkomende milieutoestand (state) in de milieucompartimenten lucht, water en bodem en de gevolgen (impact) voor mens, natuur en economie. Hiertoe worden indicatoren opgesteld vanuit de conceptuele milieuverstoringsketen (DPSI-R-denkkader).

Het doel van de impacthoofdstukken is het samenbrengen van kwantitatieve inzichten over de gevolgen (impact) voor mens, natuur en economie. Hiertoe worden indicatoren opgesteld vanuit de conceptuele milieuverstoringsketen (DPSI-R-denkkader). De evolutie van de indicatoren wordt getoetst aan beleidsdoelstellingen. Ten slotte worden de ingezette beleidsinstrumenten en genomen maatregelen geëvalueerd (response). Daarbij kunnen ook extra maatregelen worden geformuleerd om de doelstellingen te halen.

Overname wordt aangemoedigd mits bronvermelding.

Hoe citeren?

Korte citering: MIRA Achtergronddocument 2007, Ioniserende straling

Volledige citering: MIRA (2007) Milieurapport Vlaanderen, Achtergronddocument 2007, Ioniserende straling. Vanmarcke H., Bosmans H., Eggermont G., Brouwers J., Vlaamse Milieumaatschappij, <http://www.milieurapport.be>

Inhoudsopgave

Overzicht figuren	8
Overzicht tabellen.....	10
Beschrijving van de verstoring	11
1 | Inleiding	11
2 | Mechanismen	11
2.1 | Natuurlijke radioactiviteit.....	13
2.1.1 | Kosmische straling	13
2.1.2 | Natuurlijke radioactieve stoffen.....	14
2.1.3 | Verhoogde concentraties aan natuurlijke radioactieve stoffen door industriële verwerking	15
2.2 | Radioactiviteit en ioniserende straling door de mens veroorzaakt	16
2.2.1 | Medische toepassingen	16
2.2.2 | Kernenergie.....	17
2.2.2.1 <i>Kernsplijting</i>	18
2.2.2.2 <i>Kernfusie</i>	20
2.2.3 | Industriële toepassingen en gebruiksgoederen	20
2.2.4 | Militaire toepassingen	21
2.2.5 | Radioactief afval.....	21
3 | Ruimtelijk perspectief	23
4 | Tijdspectief	23
5 | Verbanden met andere thema's	23
6 | Europese en Belgische beleidscontext	23
Indicatoren	26
1 | Radiologische en nucleair geneeskundige onderzoeken.....	26
1.1 | Inleiding	26
1.2 | Aantal radiologische onderzoeken D	26
1.3 | Aantal nucleair geneeskundige onderzoeken D	29
1.3.1 | Evolutie aantal onderzoeken.....	29
1.3.2 | Nucleaire activiteit bij toepassingen in de nucleaire geneeskunde.....	31
1.4 | Evaluatie en maatregelen.....	32
2 | Elektriciteitsproductie in kerncentrales.....	33
2.1 | Stroomproductie in nucleaire centrales D	33
2.1.1 | Internationale vergelijking	33
2.1.2 | Totale en nucleaire elektriciteitsproductie.....	33
2.1.3 | Aandeel sectoren in eindgebruik elektriciteit	34
2.1.4 | Kernuitstap	35
3 | Niet-nucleaire industriële activiteiten met verhoogde concentraties radionucliden	38
3.1 | Ertsverbruik in de fosfaatindustrie D	38
4 | Militaire toepassingen van ioniserende straling	39
4.1 | Aantal en kracht van boven- en ondergrondse militaire kernproeven D	39
5 | Andere toepassingen van ioniserende straling	41
5.1 | Bestraling voor sterilisatie en voedselconservering D	41
6 | Productie van radioactief afval	42
6.1 | Opslag van geconditioneerd radioactief afval in afwachting van definitieve berging P	42
6.1.1 | Overzicht actuele hoeveelheden radioactief afval	42
6.1.2 | Berging van radioactief afval.....	44

	6.1.2.1 / <i>Oppervlakteberging voor kortlevend radioactief afval (categorie A)</i>	44
	6.1.2.2 / <i>Diepe geologische berging voor langlevend (categorie B) en hoogactief (categorie C) radioactief afval</i>	46
6.2	Productie van kernafval in nucleaire centrales P	49
	6.2.1 | Afvalproductie in kerncentrales.....	49
	6.2.2 | Afvalbeheer in de nucleaire industrie.....	50
6.3	(Bio-)medisch nucleair afval P	50
	6.3.1 | Productie van nucleair afval in de (bio-)medische sector	50
	6.3.2 | Beheer van (bio-)medisch nucleair afval	51
6.4	Inventaris van de nucleaire passiva P	52
7	Radioactieve lozingen naar lucht en water	53
	7.1 | Radioactieve lozingen naar oppervlaktewater en naar lucht door kerncentrales P	53
	7.2 | Radiumemissie door de niet-nucleaire industrie P	54
	7.3 | Productie van andere radioactief besmette materialen / afvalstromen: rookmelders, bliksemafleiders, vluchtwegaanduidingen, schroot e.a. P	54
	7.3.1 | Ionisatie-rookmelders.....	54
	7.3.2 | Radioactieve bliksemafleiders	55
	7.3.3 | Vluchtwegaanduidingen met tritium.....	55
	7.3.4 | Radioactief besmet schroot	55
8	Blootstelling aan ioniserende straling.....	56
	8.1 | Inleiding	56
	8.1.1 | Dosis-eenheden en wegingsfactoren	56
	8.2 | Medische blootstelling aan ioniserende straling S	57
	8.2.1 | Indicatoren	57
	8.2.1.1 / <i>Blootstelling door radiologische onderzoeken</i>	57
	8.2.1.2 / <i>Blootstelling door nucleair geneeskundige onderzoeken</i>	64
	8.2.1.3 / <i>Totale medische blootstelling</i>	65
	8.2.2 | Ontwikkeling in de blootstelling.....	65
	8.2.2.1 / <i>Algemeen</i>	65
	8.2.2.2 / <i>Radiologie bij kinderen</i>	66
	8.2.2.3 / <i>Digitale radiologie</i>	67
	8.2.2.4 / <i>Screeningsprogramma's bij specifieke bevolkingsgroepen</i>	67
	8.2.3 | Beleid en maatregelen	67
	8.2.3.1 / <i>Beperking van de blootstelling</i>	67
	8.2.3.2 / <i>Betere dosisbepaling en risico-inschatting</i>	70
8.3	Blootstelling aan ioniserende straling in en rond kerncentrales S	71
8.4	Verhoogde blootstelling ten gevolge van kernproeven en het ongeluk in Tsjernobyl S	74
	8.4.1 | Besmetting van koemelk met cesium-137 en strontium-90..	74
	8.4.2 | Lichaamsbesmetting met cesium-137 bij niet-beroepshalve blootgestelde personen en de maandgemiddelde activiteit van luchtstof	75
	8.4.3 | Overzichtskaart cesium-137 depositie 10 jaar na het ongeval in Tsjernobyl.....	76
8.5	Reglementering van beroepsactiviteiten waarbij natuurlijke stralingsbronnen aanwezig zijn	76
8.6	Radioactief besmette gronden door de niet-nucleaire industrie S	77

8.6.1	| Inleiding	77
8.6.2	| Fosfaatindustrie.....	78
8.6.3	| Voormalige radiumfabriek.....	79
8.6.4	| Verwerking coltanerts	79
8.6.5	| Overzicht voor Vlaanderen	80
8.6.6	| Beleid en maatregelen	81
8.7	| Blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit S	82
8.8	| Radiologisch toezicht en noodplanning voor nucleaire ongelukken S	82
8.9	| Aandeel bronnen van ioniserende straling in de effectieve stralingsdosis voor de Vlaamse bevolking S	85
9	| Risico's m.b.t. ioniserende straling.....	86
9.1	| Perceptie van nucleaire risico's I	86
9.2	| Nucleair terrorisme I	88
10	| Gezondheidseffecten van ioniserende straling.....	89
10.1	| Gezondheidsschade t.g.v. blootstelling aan ioniserende straling I	89
10.1.1	| Gezondheidseffecten algemeen	89
10.1.2	| Epidemiologisch onderzoek.....	90
10.1.3	| Gezondheidseffecten van radon.....	92
10.1.4	| Ontwerp van nieuwe algemene aanbevelingen van de ICRP	92
10.1.5	| Actuele thema's in stralingsbescherming	94
10.2	| Gezondheidseffecten van het ongeluk in Tsjernobyl I	94
11	| Gevolgen van ioniserende straling op de natuur	95
11.1	| Effecten van ioniserende straling op ecosystemen I	95
12	| Economische implicaties van kernenergie.....	96
12.1	| Financiële reserves aangelegd voor de ontmanteling van de kerncentrales en de definitieve berging van de bestraalde splijtstof I	96
Referenties		97
Lijst met relevante websites.....		101
Auteurs voorgaande MIRA-rapporten		101
MIRA-referenties voor dit hoofdstuk.....		101
Begrippen		102
Afkortingen.....		103
Eenheden.....		104
Voorvoegsels eenheden		104
Terug naar Inhoudsopgave		105

Overzicht figuren

Figuur 1: Aandeel van de verschillende bronnen van ioniserende straling in de dosisbelasting van de bevolking (Vlaanderen, 2006)	12
Figuur 2: De natuurlijke vervalreeks van uranium-238.....	14
Figuur 3: De nucleaire splijtstofcyclus: van uraniumwinning tot afvalberging	19
Figuur 4: Productie van radioactief afval en verwerking door Belgoproces (2006).....	22
Figuur 5: Evolutie van het aantal X-stralenonderzoeken (België, 1997-2006)	27
Figuur 6: Vergelijking van het aantal onderzoeken in de radiologie in België met de omringende landen over de periode 1991-1995 (cijfers per jaar).....	27
Figuur 7a: Relatieve ontwikkelingen in het aantal onderzoeken met X-stralen (België, 1997-2006)	28
Figuur 7b: Ontwikkelingen in het aantal bloedvatenonderzoeken (België, 1997-2006)	29
Figuur 8: Evolutie van het aantal onderzoeken in de nucleaire geneeskunde (België, 1997-2006; Vlaanderen, 1997-2003; 2006)	30
Figuur 9: Vergelijking van het aantal onderzoeken per 1 000 inwoners en per jaar in de nucleaire geneeskunde in België met de omringende landen over de periode 1991-1995	30
Figuur 10: Aandeel van de nucleaire energie in de totale elektriciteitsproductie van enkele landen (2006)	33
Figuur 11: Evolutie totale en nucleaire elektriciteitsproductie in België en afzonderlijk voor Doel (1990-2006)	34
Figuur 12: Aandeel van de verschillende doelgroepen in het eindgebruik van elektriciteit (Vlaanderen, 1990-2006)	35
Figuur 13: Evolutie van het nucleair elektrisch vermogen in België als alle kerncentrales na 40 jaar sluiten en er geen nieuwe meer gebouwd worden	36
Figuur 14: Evolutie van de elektriciteitsproductie en van de reële CO ₂ -emissies door de elektriciteitssector. Simulatie van de bijkomende emissies indien de nucleaire energie zou vervangen geweest zijn door de gas/kolen-mix van het ogenblik (België, 1980-2005)	36
Figuur 15: Evolutie van het jaarlijkse en het totale fosfaatertsverbruik (Vlaanderen, 1950-2006)	39
Figuur 16: Aantal bovengrondse en ondergrondse kernproeven tussen 1945 en 2000.....	39
Figuur 17: Totale kracht van de bovengrondse en ondergrondse kernproeven tussen 1945 en 2000.....	40
Figuur 18: Evolutie van de opslag van geconditioneerd radioactief afval bij Belgoproces in Dessel (1990-2006).....	43
Figuur 19: Inplanting van het STOLA-ontwerp van oppervlakteberging in Dessel	45
Figuur 20: Ontwerp voor geologische berging van langlevend en hoogactief afval in Boomse klei	47
Figuur 21: Verwachte dosis voor de meest blootgestelde leden van de bevolking ten gevolge van de berging van het Belgisch radioactief afval.....	48
Figuur 22: Evolutie van de elektriciteitsproductie en de hoeveelheid laag- en middelactief geconditioneerd afval (driejaarlijks gemiddelde) die wordt afgevoerd naar NIRAS (Doel, 1990-2006)	49
Figuur 23: Evolutie van de jaarlijkse totale radiumemissie via het afvalwater van Tessenderlo Chemie (1990-2006)	54
Figuur 24: Intree-huid dosis voor een standaard thorax-AP-opname in 18 radiologische diensten (Vlaanderen)	58
Figuur 25: Overzicht van de gemeten dosis ter hoogte van de detector van 21 toestellen gebruikt voor angiografische onderzoeken (België, 2003-2005)	58
Figuur 26: Overzicht van de gemeten dosissen ter hoogte van de hand van de radioloog of vasculair chirurg, in 16 zalen waar angiografische procedures worden doorgevoerd (België, 2003-2005).....	59
Figuur 27: Gemiddelde effectieve dosis voor een aantal radiodiagnostische onderzoeken in Nederland	60
Figuur 28: Verloop van de gemiddelde effectieve jaardosis tengevolge van radiologische onderzoeken (België, 1997-2006).....	62
Figuur 29a: Verdeling van het aantal radiologische onderzoeken (Vlaanderen, 2006).....	63

Figuur 29b: Verdeling van de effectieve dosis tengevolge radiodiagnostische onderzoeken (Vlaanderen, 2006).....	64
Figuur 30: Evolutie van de collectieve stralingsbelasting voor de werknemers van de kerncentrale van Doel (1990-2006).....	71
Figuur 31: Cesiumbesmetting in koemelk van een boerderij in Dessel, provincie Antwerpen (1963-2003; detectielimiet 2004-2006)	74
Figuur 32: Strontiumbesmetting in koemelk van een boerderij in Dessel, provincie Antwerpen (1963-1990; 2003; detectielimiet 2004-2006)	75
Figuur 33: Het verloop van de lichaamsbesmetting met cesium-137 in Bq/persoon bij niet-beroepshalve blootgestelde personen in de streek van Mol-Dessel en de maandgemiddelde activiteit van het luchtstof in Mol in mBq/m ³	76
Figuur 34: Cesium-137 depositie 10 jaar na het ongeval in Tsjernobyl (Vlaanderen, 1995)..	76
Figuur 35: Emissie van ioniserende straling afkomstig van radium-226 (als vervalproduct van uranium), thorium-232 en kalium-40 (Vlaanderen, 1994)	78
Figuur 36: Verspreiding van radionucliden door de fosfaatindustrie (Vlaanderen, 1920-2006)	79
Figuur 37: Structuur van het Belgisch nucleair noodplan. Het crisiscentrum van de federale regering in Brussel beslist over de beschermingsmaatregelen en geeft de beslissingen door aan de provinciale crisiscentra voor verdere uitvoering	84
Figuur 38: Aandeel van de verschillende bronnen van ioniserende straling in de gemiddelde effectieve dosis van de bevolking in mSv/j (Vlaanderen, 2006)	85
Figuur 39: Vergelijking van de risicoperceptie door de bevolking en de evaluatie van risico's door wetenschappers	88

Overzicht tabellen

Tabel 1: Bronnen van ioniserende straling met voor elke bron de menselijke activiteit die de blootstelling het meest beïnvloedt en de belangrijkste wijze van blootstelling	13
Tabel 2: Het netto elektrisch vermogen van de kernreactoren in Doel (2006)	18
Tabel 3: De relatieve frequentie van de vijf belangrijkste onderzoeken voor nucleaire geneeskunde (Vlaanderen, 2001).....	31
Tabel 4: Kenmerken van de vier belangrijkste medisch nucleaire procedures (Vlaanderen, 2002)	31
Tabel 5: Radioactieve lozingen naar het oppervlaktewater en in de lucht (Doel, 1990-2006)	53
Tabel 6: Radiologische wegingsfactor (w_R) per stralingssoort en wegingsfactor (w_T) per weefsel	57
Tabel 7a: De gemiddelde effectieve dosis per onderzoek volgens 4 bronnen vergeleken met de waarden verrekend in dit MIRA-Achtergronddocument (in mSv)	61
Tabel 7b: De gemiddelde effectieve dosis per CT-onderzoek (in mSv).....	61
Tabel 8: Vergelijking van het aantal onderzoeken in de radiologie en in de nucleaire geneeskunde en van de medische blootstelling in Vlaanderen (1998 en 2002), Nederland (1998), het Verenigd Koninkrijk (2002) en Zwitserland (1998)	65
Tabel 9a: Diagnostische referentieniveaus voor radiodiagnostische onderzoeken (in mGy) en voor CT (in mGy.mm) op basis van onderzoek in Vlaanderen en uit de literatuur	69
Tabel 9b: Preliminair diagnostische referentieniveaus voor angiografische procedures, verkregen tijdens de eerste Belgische multicenter-studie van hoge dosis onderzoeken	69
Tabel 10: Collectieve bevolkingsdosis door de nucleaire brandstofcyclus per GWj elektrische energie geproduceerd in kerncentrales (Wereld, 1995-1997)	73
Tabel 11: Inventaris radioactief besmette gronden (Vlaanderen, 2006)	80
Tabel 12: De bijdrage in % per Sv effectieve dosis voor stochastische effecten bij lage doses en lage dosistempo's.....	90

Beschrijving van de verstoring

1 | Inleiding

Radionucliden zijn onstabiele atoomkernen. Sommige zijn van nature in mens en milieu aanwezig. Industriële processen kunnen ze ook aanmaken of concentreren, waarbij verspreiding mogelijk is via gebruik en lozing. *Radioactiviteit* is het fysisch verschijnsel waarbij deze nucliden uiteenvallen. Dit gaat gepaard met de uitzending van *ioniserende straling*. Die straling kan cellen in levende wezens beschadigen wat op termijn kan leiden tot kanker en erfelijke afwijkingen. Dit maakt een afdoend beheer tegen blootstelling aan ioniserende straling noodzakelijk.

De blootstelling aan ioniserende straling is een onderdeel van het dagdagelijkse leven, zoals de kosmische straling en de aanwezigheid van natuurlijke radioactieve stoffen in het leefmilieu. Andere zijn het resultaat van menselijke bedrijvigheid met als belangrijkste bronnen medische beeldvorming, de productie van nucleaire energie en de verhoogde concentratie van natuurlijke radionucliden in de niet-nucleaire industrie (bv. in afvalstoffen of bouwmaterialen). Daarnaast is er een risico van accidentele blootstelling, bv. door een ongeval met een kerncentrale.

2 | Mechanismen

Radioactiviteit is het fysisch verschijnsel waarbij onstabiele atoomkernen (*radionucliden*) uiteenvallen of desintegreren. Hierbij worden *deeltjes* of *straling* uitgezonden. Men spreekt ook van *ioniserende straling* omdat ze voldoende energie bezitten om elektronen los te maken en dus de materie te ioniseren. De mens kan ioniserende straling opwekken, zowel met toestellen (bv. röntgen- of X-stralenapparaten) als door het aanmaken van kunstmatige radionucliden (bv. in kerncentrales en deeltjesversnellers). De belangrijkste soorten ioniserende straling zijn:

- Alfastraling (α -straling): straling bestaande uit alfadeeltjes, dit zijn positief geladen heliumkernen. Ze zijn relatief zwaar en groot. Alfastralen zijn niet erg doordringend en kunnen gemakkelijk worden tegengehouden: enkele centimeter lucht of de dode opperhuid van de mens is al voldoende. Ze zijn zeer gevaarlijk bij inwendige besmetting (bv. door inhalatie of via de voedselketen);
- Bètastraling (β -straling): straling bestaande uit bètadeeltjes, dit zijn negatief geladen elektronen of positief geladen positronen. Ze zijn veel lichter dan alfadeeltjes en dringen daarom dieper in de materie door. Om ze tegen te houden zijn enkele centimeter plexiglas of enkele meters lucht nodig;
- Gammastraling (γ -straling): zeer energierijke elektromagnetische straling die ontstaat bij de desintegratie van een atoomkern. Gammastralen hebben een sterk doordringend vermogen en kunnen door honderden meters lucht gaan. Ze worden tegengehouden door enkele centimeters tot een meter materiaal, afhankelijk van de energie van de straling;
- Röntgenstraling of X-stralen: zeer energierijke elektromagnetische straling die zijn oorsprong niet vindt in een atoomkern maar ontstaat door elektronenovergangen in de elektronenschil of door afremming van elektronen in materie (remstraling). Is meestal minder energierijk dan gammastraling en dringt daarom minder ver in de materie door.

Radionucliden zijn radioactieve atoomkernen zoals cesium-137, jodium-131, radon-222 (de naam van het element wordt gevolgd door het aantal deeltjes in de kern). Ze veranderen bij verval meestal in een ander element. De eenheid van radioactiviteit is *becquerel* (symbool *Bq*). Een Bq betekent dat één atoomkern per seconde verandert. Soms wordt de radioactiviteit ook uitgedrukt per oppervlakte (Bq/m^2), per volume (Bq/m^3) of per massa (Bq/kg).

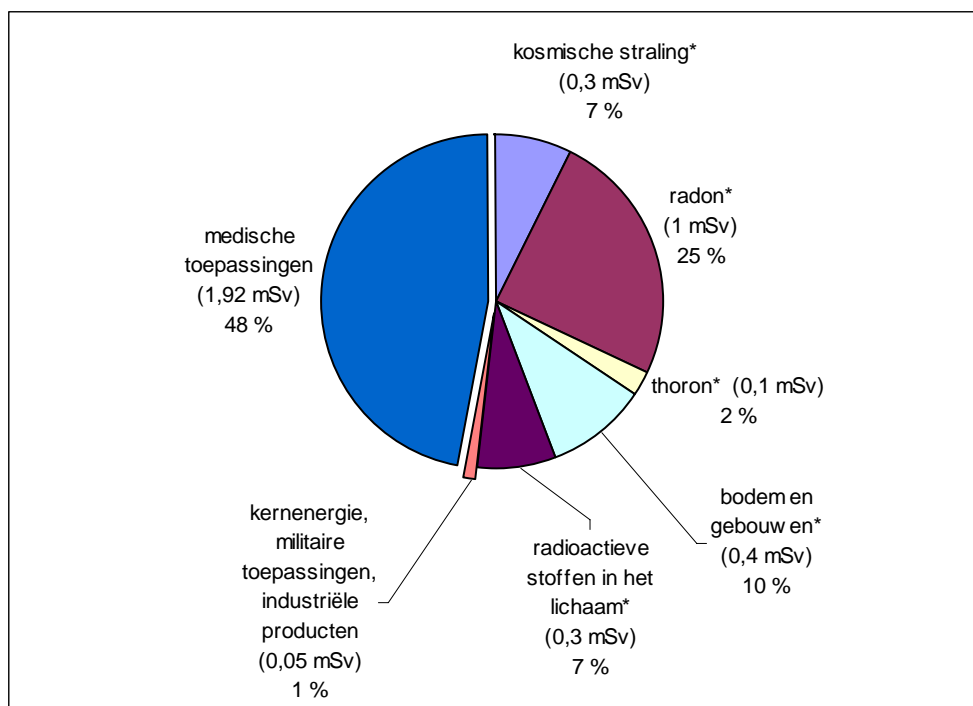
Een belangrijke eigenschap van een radionuclide is zijn halveringstijd. Dit is de tijd waarop de activiteit van een radioactieve stof met de helft vermindert. Afhankelijk van de stof varieert de

halveringstijd van fracties van een seconde (bv. polonium-214) tot vele miljarden jaren (bv. uranium-238) (zie figuur 2 in § 2.1.2.). Radionucliden met een lange halveringstijd vereisen langetermijnoplossingen ter bescherming van de toekomstige generaties.

Ioniserende straling draagt energie over op levende wezens. Deze energieabsorptie veroorzaakt biologische schade die kan leiden tot weefsel reacties, kanker en erfelijke afwijkingen (zie § 10.1 in deel Indicatoren). Het belangrijkste en gevoeligste doelwit van ioniserende straling is het DNA. Voorzichtigheidshalve neemt men aan dat er geen veilige drempelwaarde bestaat en dat de kans op kanker en erfelijke afwijkingen recht evenredig is met de stralingsdosis, uitgedrukt in *sievert* (symbol *Sv*) (zie § 8.1 in deel Indicatoren). Vaak gebruikte voorvoegsels zijn milli (mSv of 10^{-3} Sv), micro (μ Sv of 10^{-6} Sv) en nano (nSv of 10^{-9} Sv) en dikwijls wordt de dosis gegeven per tijdseenheid, het dosistempo (bv. in nSv/h of in mSv/j). De collectieve dosis voor een bevolkingsgroep is de som van de doses voor alle leden van die groep. De eenheid hiervan is de manSievert (manSv). De dosis die men oploopt hangt af van de intensiteit en karakteristieken van de stralingsbron, de soort straling en de duur van de blootstelling. De som van alle uitwendige en inwendige bronnen van ioniserende straling waaraan een individu is blootgesteld en de kans op blootstelling bij ongeval bepalen de omvang van het risico.

Figuur 1 toont de samenstelling van de stralingsbelasting voor Vlaanderen voor het jaar 2006. De gemiddelde effectieve dosis (zie ook § 8.8 in deel Indicatoren) wordt geschat op 4,1 mSv/j, waarvan 2,1 mSv/j afkomstig is van natuurlijke bronnen en 2,0 mSv/j van het toepassen van ioniserende straling door de mens. Drie vierde van de blootstelling komt van slechts twee bronnen, met name de geneeskunde en het natuurlijk radioactief edelgas radon dat uit bodem en bouwmaterialen vrijkomt. Sommige mensen – minder dan 1 % van de bevolking – worden door de uitoefening van hun beroep meer blootgesteld dan anderen, zoals mensen die bepaalde taken uitvoeren in kerncentrales of medisch personeel in bepaalde ziekenhuisafdelingen (medische beeldvorming of radiotherapie) en het vliegend personeel van luchtvaartmaatschappijen. Deze laatsten hebben een verhoogde blootstelling aan kosmische straling.

Figuur 1: Aandeel van de verschillende bronnen van ioniserende straling in de dosisbelasting van de bevolking (Vlaanderen, 2006)



* natuurlijke bronnen

Bron: UNSCEAR, 2000 omgerekend naar Vlaanderen.

Tabel 1 geeft hetzelfde overzicht maar nu vanuit een antropocentrisch perspectief. De verschillende bronnen worden met hun voornaamste verstoringsproces vermeld, dit is de menselijke activiteit die voor de belangrijkste verhoging van de dosis zorgt.

Tabel 1: Bronnen van ioniserende straling met voor elke bron de menselijke activiteit die de blootstelling het meest beïnvloedt en de belangrijkste wijze van blootstelling

bron van ioniserende straling	voornaamste menselijke activiteit	voornaamste wijze van blootstelling
<i>kosmische straling en natuurlijke radioactieve stoffen</i>		
kosmische straling	luchtvaart	uitwendig
radon en thoron	infiltratie uit de bodem	inademing vervalproducten
bodem en gebouwen	bouwmaterialen	uitwendig
in het lichaam	voeding	ingestie
<i>technologisch verhoogde concentraties aan natuurlijke radioactieve stoffen</i>		
historische radiumindustrie	omgevingsbesmetting	uitwendig, radon
fosfaatindustrie	stortplaatsen	uitwendig, radon
steenkoolcentrales	storten van vliegassen	uitwendig
thoriumverwerking	materiaalbewerking	inademing van stof
<i>radioactieve stoffen van antropogene oorsprong</i>		
kernenergie	onderhoud centrales	uitwendig
militaire toepassingen	wereldwijde besmetting	uitwendig, inname
Tsjernobyl ongeval	wereldwijde besmetting	uitwendig, inname
toepassingen industrie	ongeval	uitwendig
<i>medische toepassingen van ioniserende straling</i>		
radiologie	aantal CT-scans	uitwendig
nucleaire geneeskunde	aantal onderzoeken	inwendig
radiotherapie	aantal behandelingen	uitwendig
<i>nucleair afval</i>		
afvalopslag	ongeval	uitwendig, inname
oppervlakteberging	intrusie van de berging	uitwendig, inname
geologische berging	intrusie van de berging	uitwendig, inname

Hierna volgt een bespreking van de belangrijkste bronnen van ioniserende straling in Vlaanderen.

2.1 | Natuurlijke radioactiviteit

2.1.1 / Kosmische straling

De kosmische straling is een belangrijke component van de natuurlijke achtergrondstraling. Het is een voortdurende stroom van deeltjes die onze planeet met hoge snelheid bereikt. Hoog-energetische kosmische straling vindt zijn oorsprong buiten het zonnestelsel, terwijl een deel van de laag-energetische kosmische straling afkomstig is van de zon.

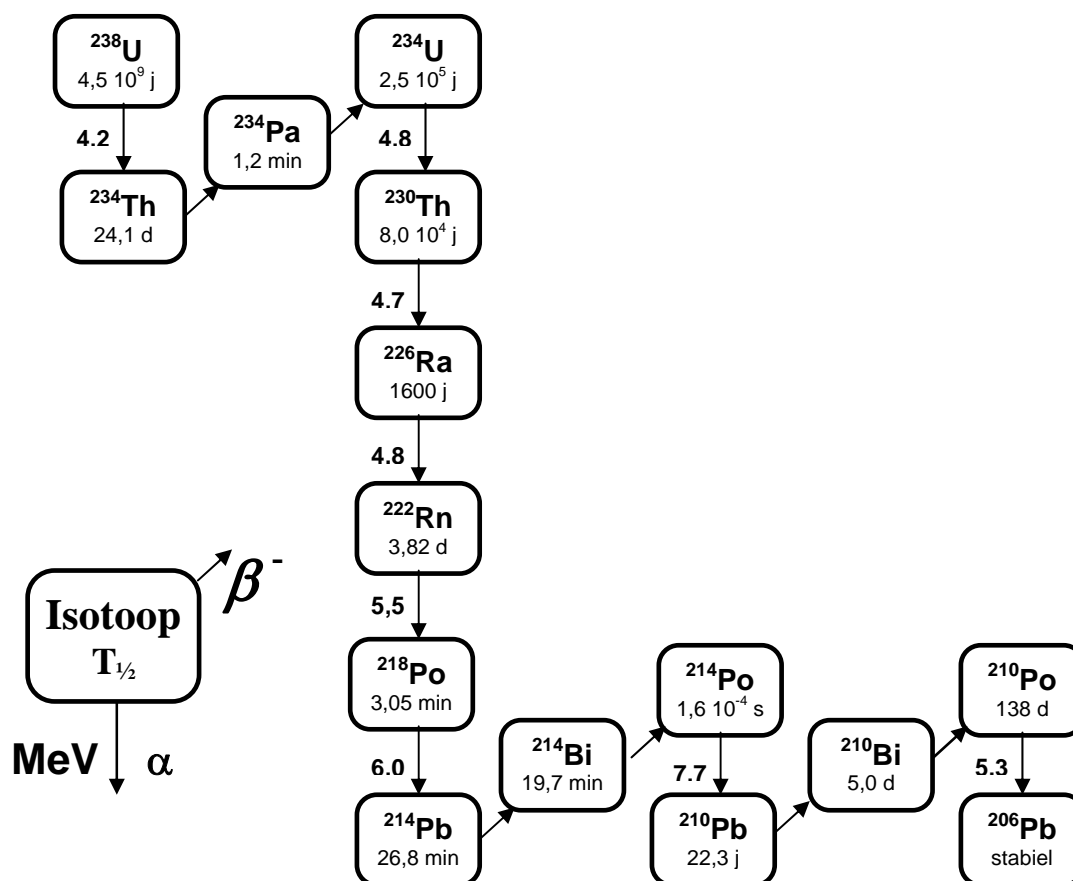
De kosmische straling kan opgedeeld worden in primaire en secundaire straling. De primaire straling bestaat uit deeltjes, voornamelijk protonen, die vanuit de ruimte op de aarde invallen, maar het aardoppervlak niet bereiken omdat ze worden tegengehouden door de atmosfeer. Bij die interactie ontstaat secundaire straling die het aardoppervlak kan bereiken en worden radioactieve stoffen gevormd (kosmogene radionucliden) zoals tritium (H-3) en koolstof-14 (C-14). Hoe hoger men gaat, hoe meer kosmische straling men oploopt. De intensiteit van de straling verdubbelt ongeveer om de 1 500 m. Op vlieghoogte is ze ongeveer 100 keer zo groot als op zeeniveau. De gemiddelde jaarlijkse blootstelling aan kosmische straling in Vlaanderen komt overeen met drie à vier retourvluchten van Europa naar Noord-Amerika.

2.1.2 / Natuurlijke radioactieve stoffen

De natuurlijke radioactiviteit is, met uitzondering van kosmische straling, het gevolg van het verval van radionucliden met een halveringstijd van meer dan 500 miljoen jaar. Belangrijk zijn de isotopen uranium-238, uranium-235, thorium-232 en kalium-40. De gammastraling die ze met hun vervalproducten uitzenden is verantwoordelijk voor de bijdrage die in figuur 1 staat aangegeven als 'bodem en gebouwen'. De natuurlijke radioactiviteit van de bodem verschilt van plaats tot plaats, zoals te zien is op de gammakaart van Vlaanderen (zie figuur 35). De opname van deze radionucliden in het lichaam via de voeding of de ademhaling zorgt voor een inwendige blootstelling ('radioactieve stoffen in het lichaam' in figuur 1).

De bovenvermelde langlevende radionucliden, met uitzondering van kalium-40, vormen het begin van een natuurlijke reeks: de uraniumreeks (U-238), de thoriumreeks (Th-232) en de actiniumreeks (U-235). Dit is een serie radioactieve transformaties die eindigt met een stabiel isotoop. De uraniumreeks wordt schematisch voorgesteld in figuur 2. Elk van de drie reeksen bevat een isotoop van het edelgas radon. Traditioneel worden die isotopen radon (Rn-222), thoron (Rn-220) en actinon (Rn-219) genoemd.

Figuur 2: De natuurlijke vervalreeks van uranium-238



De vervalreeks van uranium-238 eindigt bij het stabiel lood-206. Pijlen naar beneden wijzen op alfaverval, pijlen naar rechtsboven wijzen op bètaverval. De halveringstijden staan onder de isotopen vermeld en de energieën van de alfadeeltjes staan links van de pijlen. Een aantal isotopen sturen ook gammastraling uit. Het isotoop radon-222 wordt gevormd door alfaverval uit radium-226. De alfadeeltjes van polonium-218 en polonium-214 dragen het meest bij tot de radon blootstelling.

Als edelgas kunnen de radonisotopen zich vrij bewegen in bodem en bouwmaterialen en zo de omgevingslucht bereiken. Het is deze eigenschap die verantwoordelijk is voor de radon- en thoronproblematiek. De halveringstijd is belangrijk voor de hoeveelheid edelgas die de atmosfeer kan bereiken. Actinon heeft de kortste halveringstijd (3,96 seconden) en de

actiniumreeks (^{235}U) heeft van de drie natuurlijke reeksen de laagste activiteit, zodat de concentratie van actinon in de lucht verwaarloosbaar laag is. Radon en thoron zijn wel aanwezig in de binnenlucht. De veel langere halveringstijd van radon (3,82 dagen) in vergelijking met thoron (55,6 seconden) maakt dat de bijdrage van radon tot de stralingsbelasting van de bevolking veel groter is dan deze van thoron.

Radon ademen we in, maar als edelgas ademen we het ook terug uit. Op het eerste zicht, geen probleem. Radon is echter radioactief, zodat ook zijn kortlevende vervalproducten in de lucht voorkomen. Deze zijn vaste stoffen en blijven achter in de longen waar er twee alfadeeltjes worden uitgezonden afkomstig van polonium-218 en polonium-214. Deze alfadeeltjes beschadigen de cellen van de luchtwegen waardoor er, na vele jaren, longkanker kan ontstaan.

De gemiddelde radonconcentratie van 35 Bq/m^3 in de Vlaamse woningen is afkomstig van de bodem (12 Bq/m^3), de bouwmaterialen (15 Bq/m^3) en de buitenlucht (8 Bq/m^3). De infiltratie van radon uit de bodem is afhankelijk van de ligging, het type en het gebruik van de woning (o.a. de mate van verluchting), en veroorzaakt soms radonconcentraties hoger dan 100 Bq/m^3 . Vlaanderen is zoals Nederland een gebied met relatief lage radonconcentraties. In het zuiden van België, meer bepaald in de Ardennen, de Condroz en de streek tussen Samber en Maas zijn de radonconcentraties veel hoger en vindt men piekwaarden in woningen van 400 Bq/m^3 en meer. Oorzaak is de grotere radoninfiltratie uit de verweerde rotsachtige bodem.

Natuurlijke radionucliden komen in ons lichaam terecht via de voeding en in mindere mate door inademing. Kalium-40 veroorzaakt ongeveer de helft van de inwendige blootstelling. Een volwassen persoon consumeert ongeveer 4 gram kalium per dag en neemt daarmee meer dan 100 Bq kalium-40 in. Onafhankelijk van deze inname houdt ons lichaam de hoeveelheid kalium op een evenwichtspeil van 55 Bq kalium-40 per kg lichaamsgewicht. Ons lichaam heeft geen controlemechanismen voor de radionucliden uit de natuurlijke vervalreeksen, zodat de doses afhankelijk zijn van de ingenomen hoeveelheden. Polonium-210, een lid van de natuurlijke uranium-238 vervalreeks (figuur 2), zorgt voor de belangrijkste bijdrage.

2.1.3 / Verhoogde concentraties aan natuurlijke radioactieve stoffen door industriële verwerking

Tijdens industriële processen kunnen radionucliden aangerijkt raken. Er kunnen verhoogde concentraties aan natuurlijke radioactieve stoffen ontstaan oplopend tot meer dan $100\ 000 \text{ Bq/kg}$ in nevenproducten of afval. Meestal is de natuurlijke radioactiviteit van deze stoffen slechts een 'vervelende' eigenschap die vaak gepaard gaat met de aanwezigheid van zware metalen. Deze problematiek wordt internationaal aangeduid met het acroniem NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials). We kunnen de NORM-materialen ruwweg in drie groepen indelen.

- *Grondstoffen* (vb. zirkoonzand, fosfaaterts, tinerts, ijzererts, steenkool...): De niet-nucleaire industrie verwerkt zeer grote hoeveelheden grondstoffen met activiteitsconcentraties van de uranium- (figuur 2) en thorium vervalreeksen tussen de natuurlijke stralingsachtergrond (10 à 50 Bq/kg) en enkele tienduizenden Bq/kg . Grondstoffen met hoge activiteitsconcentraties worden meestal in de Europese Unie geïmporteerd uit ontwikkelingslanden. De natuurlijke vervalreeksen zijn in grondstoffen vrijwel altijd in evenwicht;
- *Nevenproducten, aanslag en afvalstoffen* (vb. allerlei soorten slib en stof, reactieproducten, aanslag in leidingen...): Deze bijproducten zijn het resultaat van fysische processen (bv. massascheiding bij het verwerken van minerale zanden of het vrijkomen van lood en polonium bij verhitting) of van chemische reacties (bv. het neerslaan van radium op de binnenzijde van productie-installaties in de olie- en gasindustrie of de productie van hoogovenslib in de staalindustrie). De hoeveelheden zijn meestal minder groot dan bij grondstoffen maar de activiteitsconcentraties kunnen door opconcentratie tot honderdduizenden Bq/kg oplopen. In deze brede waaier van bijproducten zijn de natuurlijke vervalreeksen meestal niet in evenwicht;

- *Toepassingen van thorium en uranium* (thorium: lenscoatings, gloei-elektroden, gaskousjes, wolfram-laselektrodes...; uranium: contra gewicht in vliegtuigen, munitie met verarmd uranium, afscherming van hoogactieve bronnen...): Bepaalde producten bevatten opzettelijk een hoog gehalte aan thorium of uranium, niet om van hun radioactieve eigenschappen, maar om hun fysische of chemische eigenschappen. De thorium of uranium activiteitsconcentratie van deze producten kan tot miljoenen Bq/kg oplopen.

Merk op dat de NORM-problematiek zich niet beperkt tot het verwerken van grondstoffen met hoge activiteitsconcentraties, maar zich zowat overal in de niet-nucleaire industrie kan stellen. In feite kan elke industrie met grote materiaalstromen met NORM-problemen te maken krijgen. Voorbeelden zijn de steenkoolcentrales waar de eerder lage radioactiviteit van steenkool geconcentreerd wordt in vliegias en bodemas of de staalindustrie waar de radioactiviteit van ijzererts en steenkool opgeconcentreerd wordt in de hoogovenslakken.

Tussen de verschillende NORM-industrieën en zelfs binnen een en dezelfde bedrijfstak bestaat er een zeer grote variabiliteit in mogelijke blootstellingen. De fosfaatindustrie, die de voornaamste bron van verhoogde concentraties aan natuurlijke radionucliden van industriële oorsprong in Vlaanderen is, is een uitstekend voorbeeld om dit punt te illustreren. De NORM-problematiek stelt zich in elk fosfaatbedrijf op een verschillende manier met specifieke blootstellingsscenario's. Ook de mogelijkheden om de blootstelling te reduceren lopen sterk uiteen maar eenvoudige tegenmaatregelen zijn veelal afdoende. De Europese wetgeving is met opzet flexibel gehouden en heeft de lidstaten een grote vrijheid gelaten bij het opleggen van eventuele tegenmaatregelen.

De omvangrijke NORM-erfenis uit ons industriële verleden is een extra complicerende factor. Nogal wat NORM-sites werden lang geleden besmet, lang voor de invoering van onze huidige reglementering voor stralingsbescherming. De vroegere radiumindustrie (1922-1969) heeft radiumvervuiling achtergelaten op een aantal plaatsen in Olen en Geel. De belangrijkste toepassingen van radium situeerden zich op het vlak van de geneeskunde waar het werd ingezet ter bestrijding van kwaadaardige tumoren (kanker). Door de snelle evolutie van de nucleaire technologie na de tweede wereldoorlog kwamen veiliger, goedkoper en betrouwbaarder radioactieve stoffen en bestralingstechnieken beschikbaar met minder afvalkost. De belangstelling voor het langlevende radium verdween. Voor cesium en nadien voor cobalt heeft zich trouwens eenzelfde evolutie voorgedaan. Kortlevende radionucliden met hoge specifieke activiteit en deeltjesversnellers nemen de plaats in.

2.2 | Radioactiviteit en ioniserende straling door de mens veroorzaakt

2.2.1 / Medische toepassingen

Ioniserende straling wordt in de medische sector gebruikt voor diagnose en therapie. Radiologische onderzoeken, die gebruik maken van röntgenstraling en de nucleaire geneeskunde waarbij een radioactief preparaat aan de patiënt wordt toegediend, behoren nog steeds tot de meest krachtige diagnostische middelen. Een arts oordeelt bij elke individuele patiënt en voor elk onderzoek of het gebruik van straling gerechtvaardigd is. Een erkende arts (radioloog, cardioloog, ...) of zijn gekwalificeerde helper dienen de stralen dan doelbewust toe aan de patiënt. Bij onderzoeksprogramma's voor de bevolking, zoals bv. de opsporing van borstkanker, moet de gehele actie gerechtvaardigd zijn en vervalt de individuele aanpak. De Verenigde Naties verwachten dat het gebruik van ioniserende straling in de diagnostiek en de therapie nog zal toenemen (UNSCEAR, 2000), in het bijzonder door de perspectieven die digitale beeldvorming biedt.

De meest verspreide toepassing is het *radiologisch onderzoek*, waarbij de stralen van een röntgenbuis door een patiënt worden gestuurd voor het stellen van een diagnose. De Belg ondergaat gemiddeld 1,2 X-stralenonderzoeken per jaar (figuur 5). De tandheelkundige onderzoeken zijn niet vervat in dit cijfer. Gemiddeld ondergaan de Belgen ook nog eens 0,35 tandheelkundige opnamen per jaar (Jones, 2007). De radiologische onderzoeken betreffen al lang niet meer enkel de klassieke röntgenfoto (*radiografie*) die in een zaal of aan bed wordt genomen. Er wordt ook gebruik gemaakt van *radioscopie* waar men röntgenstralen via een

camerasysteem omzet in bewegende beelden. Deze techniek wordt veel toegepast in operatiezalen en voor het uitvoeren van ingrepen onder geleiding van röntgenstralen (interventionele radiologie). Omdat deze ingrepen steeds complexer worden, nemen de scopietijd en het aantal opnamen toe en daarmee ook de blootstelling van de patiënt aan straling. De grootste bron van straling uit medische toepassingen komt van de CT-scan (Computed Tomography). Deze moderne toestellen leveren beelden van doorsneden van de patiënt, maar tegen een relatief hoge stralingsbelasting. Met de modernste scanners kan men 3D-beelden maken van het inwendige van de patiënt.

In de *nucleaire geneeskunde* dient men de patiënt een radioactieve stof toe voor diagnose of voor therapie. Door met detectoren rond de patiënt de verdeling van de radioactieve stof te meten krijgt men een beeld van de verdeling van de radioactiviteit in de patiënt en dus van onregelmatigheden of anders functioneren van organen. Zulke diagnose vindt jaarlijks gemiddeld een 50-tal keer per 1 000 Belgen plaats (figuur 8).

Grote *dierenklinieken* passen tegenwoordig ook nucleaire geneeskunde toe voor diagnose. Het voornaamste aandachtspunt in verband met risico's betreft hier de veiligheid van het personeel en de nucleaire afvalstromen.

Onder druk van de NIRAS prijszetting geven ziekenhuizen — net als de nucleaire industrie — afval met een lage radioactiviteit na controle als niet-radioactief afval vrij. De vrijgaveniveaus zijn wettelijk vastgelegd in het Koninklijk Besluit (KB) van 20 juli 2001. Ze zijn afgeleid voor grote hoeveelheden *afvalstoffen* op basis van een maximale individuele bevolkingsdosis van 10 $\mu\text{Sv/j}$ en een maximale collectieve dosis van 1 manSv/j ten gevolge van de vrijgave. Voor radionucliden met een halveringstijd van minder dan 6 maanden zijn deze vrijgaveniveaus geen voldoende voorwaarden. Daarvoor is een bijkomende gecontroleerde vervalopslag van enkele maanden tot enkele jaren vereist tot nagenoeg volledig verval onder het niveau van de radioactiviteit van de achtergrond. Ziekenhuizen hebben daartoe een opslag- en vervalbeleid ontwikkeld gebaseerd op een selectieve inzameling van het afval, de opslag tot verval van de kortlevende radionucliden en eventuele vrijgave als niet-nucleair biomedisch afval. De vervalopslag in de grote universitaire centra blijkt goed te verlopen. Enkel het afval van ambulante patiënten of van patiënten die niet in de stralingsgecontroleerde zones van ziekenhuizen verblijven kan nog problemen veroorzaken.

De *radiotherapie* gebruikt ook ioniserende straling. Bij deze technieken probeert men de dosis in een letsel zo hoog mogelijk te maken om de kankercellen te doden. De dosis aan het omliggende weefsel moet beperkt blijven. Verschillende nieuwe technieken worden nog ontwikkeld om deze doelstellingen beter te bereiken. Omdat radiotherapie wordt aangewend in een welbepaalde (kleine) groep patiënten die baat hebben bij een zo hoog mogelijke (gelokaliseerde) dosis die de dosis van gewone onderzoeken ver overtreft, nemen we deze dosissen niet op in de berekeningen voor de bevolking. Therapeutisch gebruik van jodium-131 zoals bij de behandeling van tumoren, en palliatief gebruik van onder meer strontium-89 zijn beperkt tot enkele gevallen per duizend personen per jaar. Ze geven evenwel aanleiding tot een verspreiding van radioactieve stoffen in het milieu. Voor crematie van radioactief behandelde personen zijn op advies van de Hoge Gezondheidsraad (HGR) beperkingen opgelegd. Palliatief gebruik van strontium-89 is niet aangewezen als de levensverwachting minder dan 3 maanden bedraagt. Tevens is voor therapeutische en palliatieve toediening van radionucliden een informatieprocedure voorgesteld om nabestaanden, lijkbezorgingdiensten en het milieu voldoende te beschermen. Voor het geval een patiënt behandeld met radionucliden vroegtijdig zou overlijden, zijn ook voorwaarden voor de balseming en crematie opgesteld.

De problematiek van blootstelling aan straling in de medische sector betreft zowel de patiënten als het klinische personeel dat bij de onderzoeken en/of behandeling betrokken is.

2.2.2 / Kernenergie

Bij fusie (samenvoegen) van de lichtste en bij fissie (splijting) van de zwaarste atoomkernen komen grote hoeveelheden energie vrij. Dit komt omdat heel lichte en heel zware atoomkernen een hogere bindingsenergie hebben dan middelzware atoomkernen. *Kernfusie*

is al miljarden jaren de energiebron van de zon, maar is op aarde erg moeilijk te realiseren vanwege de elektrische afstoting van de positief geladen kernen. Per seconde wordt er in de zon ongeveer 600 miljoen ton waterstof omgezet in 596 miljoen ton helium. Vier miljoen ton materie verdwijnt daarbij in de vorm van energie. Een enorme hoeveelheid maar toch klein in vergelijking met de reserve aan waterstof die in de zon aanwezig is.

Splijting van het uranium-isotoop 235 is de basis van de opwekking van elektriciteit in onze Belgische kerncentrales. Een uranium-235 kern reageert gemakkelijk met een traag neutron en valt in twee stukken uiteen (splijtingsproducten) en twee of drie snelle neutronen die, nadat ze zijn afgeremd, op hun beurt een nieuwe splijting kunnen veroorzaken. Op deze wijze ontstaat een nucleaire kettingreactie.

2.2.2.1 Kernsplijting

De splijting van zware atoomkernen levert veel energie op, waarmee elektriciteit geproduceerd wordt in kerncentrales. Op Belgisch grondgebied baat Electrabel 7 kernreactoren uit, waarvan 4 in Doel met een netto ontwikkelbaar vermogen van 2 839 MW (tabel 2) en 3 in Tihange met een vermogen van 2 985 MW. Reactortypes worden gedefinieerd door hun koelsysteem en door de manier waarop ze de snelle neutronen die vrijkomen bij kernsplijting afremmen. De Belgische kerncentrales zijn licht-water (dit is gewoon water) gemodereerde en gekoelde reactoren van het type druk-water reactor, meestal afgekort met het Engelse acroniem PWR: Pressurized Water Reactor. De helft van alle reactoren wereldwijd zijn PWR's.

Tabel 2: Het netto elektrisch vermogen van de kernreactoren in Doel (2006)

	Doel 1	Doel 2	Doel 3	Doel 4	<i>totaal</i>
netto vermogen (MW)	392	433	1 006	1 008	2 839

Bron: IAEA PRIS database, 2007.

Kerncentrales en nucleaire bedrijven lozen slechts beperkte hoeveelheden radioactieve stoffen in de lucht en in het water (tabel 5). Bij normale werking is hun bijdrage tot de bevolkingsdosis in Vlaanderen zeer klein (< 1%, zie figuur 1). Accidentele blootstelling en in het bijzonder een kernongeval vormt de grootste bedreiging.

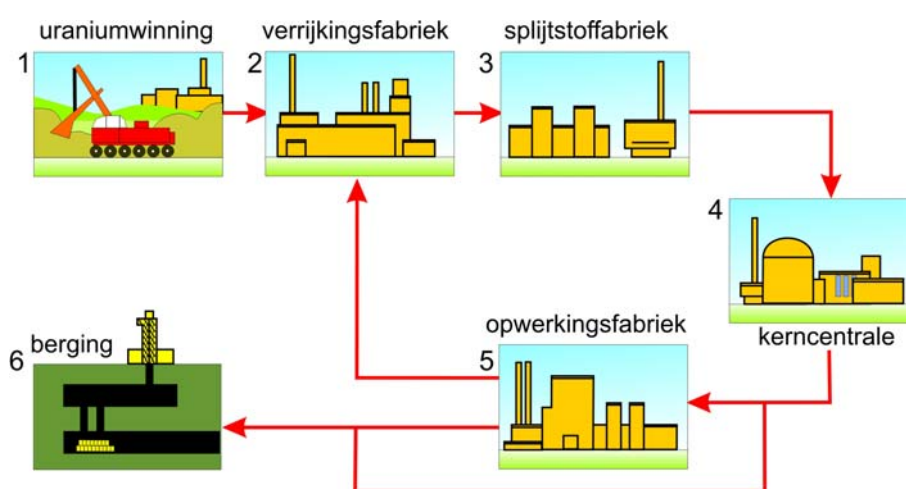
Kerncentrales zijn een deel van de nucleaire splijtstofcyclus die bestaat uit (figuur 3):

1. *Ontginning en verwerking* van uraniumerts: Bij de uraniummijnen blijven grote hoeveelheden afval achter die door de emissie van het radioactieve edelgas radon een duurzaam beheer vergen;
2. *Verrijking* van uranium-235 van een gewichtspercentage van 0,71 % in natuurlijk uranium tot 4 à 5 % voor gebruik in kerncentrales en tot 93 % voor de werking van de proefreactor BR2 van het Studiecentrum voor Kernenergie te Mol (SCK). Grote hoeveelheden verarmd uraniumafval worden opgeslagen nabij de buitenlandse verrijkingsinstallaties;
3. *Vervaardiging van reactorbrandstof* (splijtstofelementen): de omzetting naar uraniumdioxide, de vervaardiging van brandstofstaven (= dichtgelaste metalen buizen gevuld met splijtstoftabletten) en de assemblage van splijtstofelementen;
4. Splijtstofelementen blijven een 4-tal jaar in de reactor van een *kerncentrale* voor het produceren van elektriciteit. De kern van een Belgische reactor van 1 000 MW bevat ongeveer 80 ton uraniumsplijtstof;
5. 670 ton gebruikte splijtstof uit Doel en Tihange werd in Frankrijk *opgewerkt* (in zijn chemische componenten gescheiden) om er nog splijtbaar materiaal uit te halen. Het gevormde plutonium (1 %) werd bij Belgonucleaire in Dessel verwerkt tot MOX (mengoxide), dit is een mengsel van verarmd uranium en plutonium dat opnieuw als brandstof in kerncentrales gebruikt kan worden. Het uranium (94 %) dat naast plutonium overblijft in de gebruikte splijtstof, kan opnieuw verrijkt worden. De resterende 5 % – hoogradioactief afval, voornamelijk splijtingsproducten – werd bij de opwerking in glas ingebed en naar Belgoprocess overgebracht;

6. De niet-opgewerkte gebruikte splijtstof ligt *opgeslagen* op de vestigingsplaatsen van de kerncentrales. Opslag in gebouwen is geen duurzame oplossing voor het beheer van radioactief afval op lange termijn, ook al gebeurt dat onder gecontroleerde en veilige condities. Internationale organisaties, zoals het Internationaal Atoom Energieagentschap in Wenen (IAEA) en de Internationale Commissie Stralingsbescherming (ICRP) stellen als eindbestemming voor radioactief afval een bergingsinstallatie voor. De meest plausibele oplossing die momenteel intensief wordt onderzocht bestaat erin om, na een periode van meer dan 50 jaar waarin de warmteproductie van het afval afneemt, de bestraalde splijtstof en het verglaasde opwerkingsafval te bergen in een stabiele geologische laag.

Het al dan niet opwerken van de gebruikte kernbrandstof (splijtstof) bepaalt of de splijtstofcyclus open of gesloten is. In de gesloten cyclus werkt men de gebruikte splijtstof op om er nog splijtbaar materiaal uit te halen. In de open cyclus recycleert men het uranium en plutonium niet en slaat men dus punt 5 over.

Figuur 3: De nucleaire splijtstofcyclus: van uraniumwinning tot afvalberging



Bron: SCK

In Vlaanderen komen niet alle delen van de splijtstofcyclus voor. Canada was in 2006 de grootste uraniumproducent (25 %), gevolgd door Australië (19 %) en Kazachstan (13 %). Grote commerciële verrijkingsfabrieken zijn operationeel in Frankrijk, Duitsland, Nederland, Groot-Brittannië, de Verenigde Staten en Rusland. In het verleden werd een deel van de Belgische bestraalde splijtstof opgewerkt in het Franse La Hague.

In Dessel produceert FBFC (Franco-Belge de Fabrication de Combustibles International), een dochteronderneming van het Franse AREVA, splijtstofstaven met uranium. De productie van MOX met het gerecycleerde Belgische plutonium werd in 2003 afgerond en de MOX-fabriek van Belgonucleaire heeft in de loop van 2006 zijn deuren gesloten wegens gebrek aan buitenlandse bestellingen. Synatom, een dochteronderneming van het door Suez gecontroleerde Electrabel en Tractebel, staat in voor de bevoorrading van de Belgische kerncentrales met verrijkt uranium en voor het beheer van de bestraalde splijtstof tot het als afval aan NIRAS wordt overgedragen. Synatom mikt op een strategische uraniumvoorraad voor 2 jaar en heeft een participatie van 11 % in de verrijkingsfabriek Eurodif (Rhônevallei in Frankrijk).

De meeste kerncentrales die nu operationeel zijn stammen uit de jaren 70 en 80 en worden gerekend tot de tweede generatie. Voorbeelden hiervan zijn de Belgische kerncentrales van Doel en Tihange. De derde generatie kerncentrales is de laatste 20 jaar ontworpen na het ongeval in Tsjernobyl als evolutionaire opvolger van de tweede generatie. Hiervan zijn al enkele in bedrijf in Japan of in aanbouw, zoals de European Pressurized Water Reactor (EPR) in Finland en Frankrijk. Deze ontwerpen combineren een verminderde kans op

kernsmeltongevallen met een verbeterde rentabiliteit. Daarnaast werkt men onder leiding van de Verenigde Staten en Frankrijk aan de ontwikkeling van nieuwe reactortypes (generatie 4) die veiliger zouden zijn, minder splijtstof verbruiken, minder of ander radioactief afval zouden produceren en met een splijtstofcyclus die proliferatiebestendiger zou moeten zijn. Uit meer dan 100 reactorconcepten werden 6 reactortypen geselecteerd voor verdere studie. Naargelang het type zal het nog 20 tot 40 jaar duren vooraleer deze reactoren commercieel inzetbaar zullen zijn. Ook in de schoot van het IAEA, maar dan met Russische deelname, is een netwerk met een gelijkaardige finaliteit opgericht (INPRO: International Project on Innovative Nuclear Reactors).

2.2.2.2 Kernfusie

Kernfusie is potentieel een bijzonder aantrekkelijke energiebron:

- de benodigde brandstoffen voor kernfusie – deuterium dat uit water gehaald wordt en tritium dat uit lithium gevormd wordt – zijn overvloedig op aarde aanwezig;
- de energieopbrengst van kernfusie is nog groter dan die van kernsplijting;
- er komen geen broeikasgassen vrij;
- de onderdelen van een fusiereactor worden hoogactief door bestraling met neutronen en door contact met de tritiumbrandstof. Een fusiereactor produceert ongeveer evenveel radioactief afval als een fissiereactor, maar door de kortere halveringstijden kan het meeste afval afkomstig van een fusiereactor al na enkele honderden jaren vrijgegeven worden;
- er is geen risico op een ongecontroleerde kettingreactie zoals bij kernsplijting.

Het fusieonderzoek heeft sinds de jaren vijftig grote vooruitgang geboekt, maar het dicht bij elkaar brengen van de positieve atoomkernen is erg moeilijk te realiseren, zodat de enige echte toepassing tot nu toe van militaire aard is, met name de waterstofbom. Het wetenschappelijk onderzoek naar het vreedzaam gebruik van kernfusie spitst zich toe op twee methodes: inertieële fusie en magnetische fusie. Bij inertieële fusie wordt een brandstofbolletje van verschillende kanten gebombardeerd met een laserstraal waardoor het bolletje implodeert en verhit tot miljoenen graden. Dit is voldoende om de fusiereactie te ontsteken en een grote hoeveelheid energie vrij te geven onder de vorm van een ontploffing. Het onderzoek op inertieële fusie gebeurt voornamelijk in de Verenigde Staten, terwijl Europa zich meer toelegt op magnetische fusie. Met krachtige magnetische velden kan men verhinderen dat de tot 150 miljoen graden verhitte brandstof in contact komt met de wanden van de reactor. De huidige fusie-experimenten verbruiken nog meer energie voor het opwarmen van de brandstof dan dat de fusiereactie zelf oplevert. Daarnaast stellen zich nog heel wat andere technologische uitdagingen, bv. op het vlak van materiaalsterkte, hoogvermogen robotica en de insluiting van het radioactieve tritium.

Schaalvergroting kan deze problemen oplossen. Na jaren van discussie hebben Europa, Japan, de Verenigde Staten, Rusland, China, Zuid-Korea en India in 2005 beslist om een nieuwe stap te zetten in de ontwikkeling van een kernfusiereactor met de bouw van ITER in het Zuid-Franse Cadarache (International Thermonuclear Experimental Reactor). De totale kosten voor bouw en exploitatie van ITER worden geschat op 10 miljard euro. Het fusieonderzoek heeft met de bouw van ITER een nieuwe impuls gekregen. Voor de periode 2007-2011 stelt de Europese Unie 1 947 miljoen euro voor fusie beschikbaar op een totale begroting van 2 751 miljoen euro voor het Euratom kaderprogramma. Zelfs met de bouw van ITER zal de ontwikkeling van een commerciële fusiereactor voor de productie van elektriciteit nog minstens 50 jaar duren. Binnen het ITER-consortium is afgesproken dat de volgende fase, een demonstratiereactor (DEMO), binnen enkele decennia in Japan zal gebouwd worden.

2.2.3 / Industriële toepassingen en gebruiksgoederen

Radioactieve stoffen vinden een industriële toepassing in processturing en kwaliteitscontrole (bv. diktemeting, niveauhoogtemeting, traceeronderzoek), in voedselbestraling, in industriële radiografie, in biomedische toepassingen ... Ook in sommige gebruiksgoederen komen

radioactieve stoffen voor, bijvoorbeeld in ionisatie rookmelders (Am-241), in lichtgevende wijzerplaten van uurwerken (tritium), in lichtgevende vluchtrouteaanduidingen in vliegtuigen (tritium) en in bliksemafleiders (Ra-226, Am-241, Kr-85) (verboden in België sinds 1985). Alleen bij ongevallen en ongecontroleerd gebruik kunnen deze toepassingen een gevaar betekenen.

Ongevallen met 'weesbronnen' van hoge activiteit zijn wereldwijd opgetreden met belangrijke gevolgen, zowel inzake blootstelling van de bevolking aan ioniserende straling als met belangrijke kosten voor het remediëren van de besmette zone achteraf. De controle op hoogactieve ingekapselde bronnen en weesbronnen werd in 2006 gevoelig verscherpt door de omzetting van de Europese richtlijn (2003/122/Euratom) in Belgische reglementering. Van elke hoogactieve ingekapselde bron moet een levensloopfiche opgemaakt worden, waarvan een kopie door het FANC wordt bijgehouden.

2.2.4 / Militaire toepassingen

De Verenigde Staten brachten in 1945 drie atoombommen tot ontploffing: een test in de woestijn van New Mexico, gevolgd door de vernietiging van de Japanse steden Hiroshima en Nagasaki. De nucleaire wapenwedloop bereikte zijn hoogtepunt in 1961 en 1962 toen Amerikanen en Russen probeerden elkaar de loef af te steken door de meeste en grootste bommen te laten ontploffen.

De bovengrondse kernproeven tussen 1945 en 1980 door de Verenigde Staten, de Sovjetunie en in mindere mate Frankrijk, China en Groot-Brittannië hebben grote hoeveelheden radioactieve stoffen wereldwijd verspreid. Ze vormden in de jaren vijftig en zestig een belangrijke blootstellingsbron voor de bevolking (zie § 8.4 in deel Indicatoren). De ondergrondse proeven waren minder krachtig dan de bovengrondse proeven en leidden meestal niet tot verspreiding van radioactieve stoffen, hoewel daarover door de militaire geheimhouding onzekerheid bestaat.

2.2.5 / Radioactief afval

De Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Verrijkte Spleitstoffen (NIRAS) is belast met het beheer van het radioactief afval in België en met de inventaris van alle installaties en sites die radioactieve afvalstoffen bevatten. Producenten van radioactief afval hebben een meldingsplicht bij NIRAS en moeten een overeenkomst afsluiten voor het beheer ervan. Alvorens zulk afval kan geborgen worden, dient het voorbehandeld of 'geconditioneerd' te worden waarbij men het volume zoveel mogelijk reduceert. Een typische aanpak is als volgt:

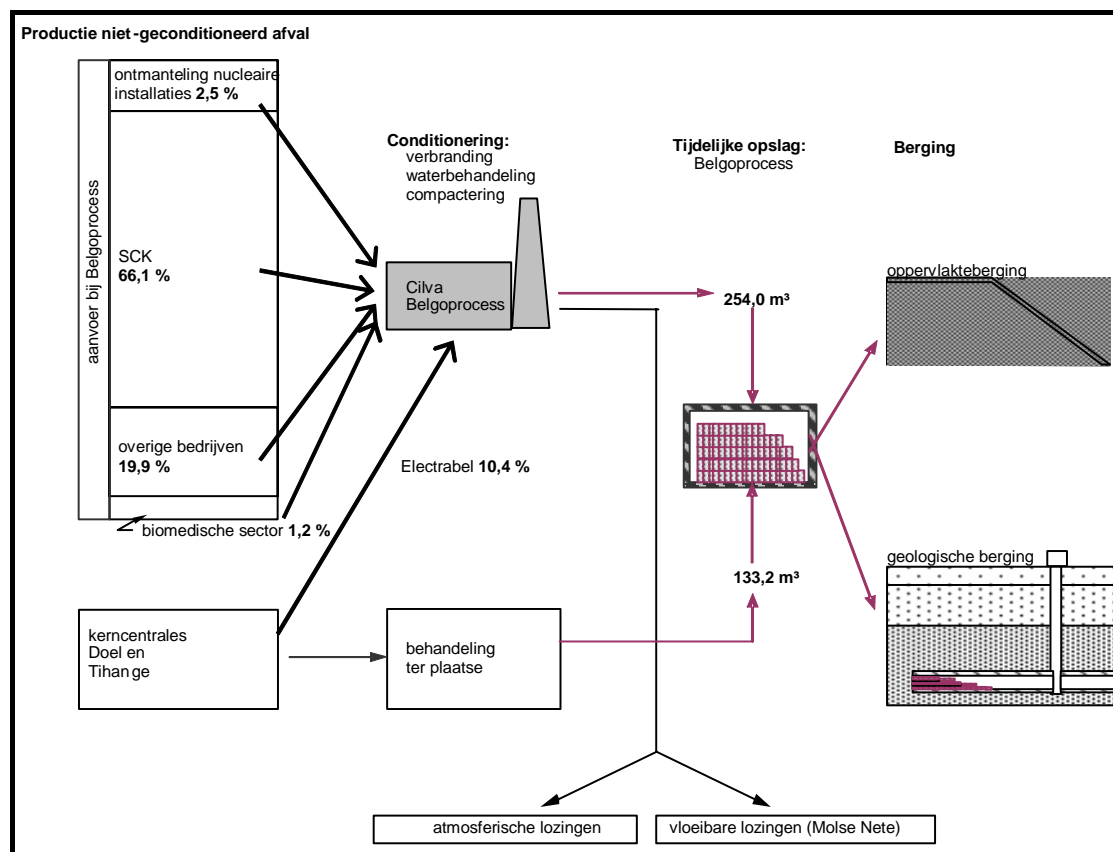
- vloeibaar afval krijgt een chemische of thermische behandeling;
- vast brandbaar afval wordt bij een temperatuur van 900 °C verbrand en tot as verwerkt;
- niet-brandbaar afval wordt voor zover het persbaar is onder zeer hoge druk (2 000 ton) geperst;
- niet persbaar afval wordt versneden, zodat het in standaard vaten kan worden verzameld.

Het resultaat van de voorbehandeling wordt in cement, bitumen of glas vastgezet en in vaten ingesloten om verspreiding te voorkomen. Afvalproducenten kunnen slechts 50 jaar aansprakelijk worden gesteld voor verborgen gebreken in de kwaliteit van het afval. Dit onderlijnt het belang van een afdoende kwaliteitscontrole op de karakterisatie van het afval, van aan de bron tot na de conditionering in vaten. De voogdijoverheid gaf echter nog geen gevolg aan voorstellen van NIRAS voor een waar nodig meer diepgaande afvalkarakterisatie en controle in de toekomst. NIRAS wenst op een geïntegreerde en systematische wijze rekening te houden met de onzekerheden op de radiologische karakteristieken van het afval.

Figuur 4 geeft voor 2006 een beeld van de aanvoer en verwerking van radioactief afval door Belgoprocess, de industriële dochtermaatschappij van NIRAS. Het grootste volume niet-geconditioneerd afval (66,1 %) was afkomstig van het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK). Het betrof voornamelijk vloeibaar afval dat Belgoprocess sinds de overname van de 'waste-afdeling' van het SCK in 1989 verwerkt. De kerncentrales vertegenwoordigden 10,4 %,

de afbraak van oude installaties in Mol-Dessel 2,5 %, en de overige bedrijven 19,9 %. Ziekenhuizen en biomedische laboratoria voerden in 2006 1,2 % van het afval bij Belgoprocess aan. Na verwerking werd 254 m³ laag- en middelactief geconditioneerd afval verkregen. Daarnaast verwerkten de kerncentrales het grootste deel van hun afval zelf ter plaatse en droegen in 2006 bijkomend 133,2 m³ geconditioneerd afval aan NIRAS over. De kleine verschillen in hoeveelheden geconditioneerd afval ten opzichte van figuur 18 zijn te verklaren door het feit dat niet alle vaten die in 2006 zijn opgehaald of aangemaakt door Belgoprocess, ook effectief in 2006 in de opslaggebouwen werden opgenomen. Sommige vaten werden pas begin 2007 in deze gebouwen geplaatst.

Figuur 4: Productie van radioactief afval en verwerking door Belgoprocess (2006)



De procenten in deze figuur zijn uitgedrukt ten aanzien van het totale volume.

De gebruikte kernbrandstof is niet beschouwd in deze figuur (zie §§ 6.1 en 6.2 in deel Indicatoren).

Bron: Covens, 1997; NIRAS, 2007.

Voor verwerking en beheer op korte termijn maakt NIRAS onderscheid tussen verschillende afvaltypen op basis van het dosistempo bij contact met het afval:

- *laagactief afval* (laagstralend afval zou een betere omschrijving zijn voor dit type afval): contactdosistempo ≤ 5 mSv/h; de verwerking vereist een minimale afscherming van het personeel; grote hoeveelheden ontstaan bij de ontmanteling van nucleaire installaties;
- *middelactief afval* (middelstralend afval): contactdosistempo tussen 5 mSv/h en 2 Sv/h; afscherming van het personeel met betonnen muren en loodglasvensters; voornamelijk afval dat ontstaat bij de fabricage van kernbrandstof en bij de opwerking van kernbrandstof;
- *hoogactief afval* (hoogstralend afval); contactdosistempo > 2 Sv/h; zeer grote concentraties aan radionucliden waardoor het warmte afgeeft; de verwerking vereist hetzelfde type voorzorgsmaatregelen als middelactief afval met eventueel bijkomende maatregelen om kritikaliteit – een ongecontroleerde kettingreactie in een grote

hoeveelheid splijtbaar materiaal – te vermijden; betreft bestraalde kernbrandstof en verglaasd opwerkingsafval.

Het KB van 18 november 2002 bepaalt dat elke exploitant die een installatie heeft voor opslag, verwerking, conditionering en karakterisering van nucleair afval door NIRAS erkend moet worden. Het nucleair afval moet aan acceptatiecriteria voldoen en de exploitant moet dit met een kwaliteitssysteem kunnen aantonen. Het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) kan staalnames opleggen en NIRAS kan inspecties uitvoeren en erkenningen intrekken. Buitenlandse conditionering moet voorafgaandelijk door NIRAS worden goedgekeurd.

Voor een bespreking van de verschillende opties voor definitieve berging van het afval verwijzen we naar hoofdstuk 6 in deel Indicatoren.

3 | Ruimtelijk perspectief

De ruimtelijke dimensies van de blootstelling aan een bepaalde bron van ioniserende straling zijn afhankelijk van de eigenschappen van de betrokken radioactieve stoffen, de verspreidingswijze en de geloosde hoeveelheden. De verspreiding van radionucliden kan lokaal (bv. bij toepassingen in de nucleaire geneeskunde) tot mondiaal (bv. het ongeval met de kernreactor van Tsjernobyl) milieulast veroorzaken.

4 | Tijdspectief

Tot de ontdekking van de X-stralen door Röntgen in 1895 en van de natuurlijke radioactiviteit door Becquerel in 1896 was de natuurlijke straling de enige straling waaraan de mens was blootgesteld. Industriële, maar vooral medische toepassingen hebben sindsdien de stralingsbelasting van de mens gevoelig doen toenemen (zie hoofdstuk 8 in deel Indicatoren).

Radioactiviteit dooft uit met de tijd. De halveringstijd geeft het tempo aan waarmee een radionuclide verdwijnt. Het kortlevende radioactieve afval moet gedurende enkele honderden jaren van mens en milieu geïsoleerd worden. Voor het hoogactieve en langlevende afval is een oplossing op heel lange termijn nodig. Het duurt ongeveer 200 000 jaar vooraleer de radiotoxiciteit van de gebruikte kernbrandstof door radioactief verval afgenomen is tot het niveau van het uraniumerts.

5 | Verbanden met andere thema's

Het thema Ioniserende straling heeft vooral raakpunten met verschillende andere thema's (1.4 Energie, 2.12 Klimaatverandering, 2.9 Verzuring, 2.17 Beheer afvalstoffen) die beïnvloed worden door de aard van de brandstof gebruikt bij de elektriciteitsproductie. Meer dan 50 % van de elektriciteit in België wordt immers opgewekt door nucleaire energie. De vervanging van de bestaande kerncentrales door klassieke centrales op basis van fossiele brandstoffen kan aanleiding geven tot een toename van broeikasgassen (CO₂ en in mindere mate CH₄ en N₂O), van verzurende gassen (SO₂ en NO_x) en van afvalstoffen (vliegashoudend bodemas) in het milieu.

6 | Europese en Belgische beleidscontext

De fundamentele principes van de stralingsbescherming worden door internationale adviesorganen zoals de ICRP (zie § 8.1.1) vastgelegd. Dit zorgt voor een grote uniformiteit tussen de verschillende nationale wetgevingen. De Europese Commissie zet deze basisprincipes in Europese richtlijnen en aanbevelingen om, die de lidstaten in hun nationale reglementering moeten overnemen.

De Europese Gemeenschap voor Atoomenergie, of kortweg *Euratom*, werd in 1957 samen met de Europese Economische Gemeenschap (EEG) opgericht met als doel het bevorderen van de vreedzame toepassingen van kernenergie. Het Euratom verdrag geeft de Europese Commissie verregaande bevoegdheden op het vlak van stralingsbescherming,

splijtstofvoorziening en bescherming tegen misbruik van splijtbaar materiaal voor militaire of terroristische doeleinden. De richtlijn basisnormen van 1996 voor de bescherming van bevolking en werknemers, en de medische richtlijn van 1997 voor de bescherming van patiënten zijn belangrijke voorbeelden van de uitgebreide Europese reglementering voor stralingsbescherming. Deze richtlijnen werden met het KB van 20 juli 2001 in Belgische reglementering omgezet (zie verder). Voor de regelmatige en billijke splijtstofvoorziening van alle gebruikers werd een Europees agentschap opgericht – Euratom Supply Agency – dat evenwel nooit helemaal de rol heeft kunnen spelen die het was toegedacht door toedoen van de Europese kernwapenstaten. Wel werd een strikt controlesysteem opgezet dat moet waarborgen dat de civiele splijtbare materialen niet voor andere doeleinden worden aangewend dan waarvoor zij bestemd zijn (non-proliferatie). De Europese Unie beschikt op dit gebied over een 200-tal inspecteurs met uitgebreide bevoegdheden. Het geheel van deze controlemaatregelen (inspecties, boekhouding splijtbaar materiaal, handelsbeperkingen ...) wordt 'safeguards' genoemd. De Europese Unie heeft echter geen bevoegdheid voor controle van militaire splijtstof in het Verenigd Koninkrijk en Frankrijk.

Het Euratom-verdrag heeft in tegenstelling tot het EEG-verdrag nooit grote wijzigingen ondergaan. Nochtans is de realiteit, die aan de basis lag van het verdrag, in de afgelopen vijftig jaar aanzienlijk gewijzigd:

- de louter adviserende functie van het Europees Parlement in het Euratom-verdrag. Er is zelfs geen formele verplichting voor de Europese Raad om het Parlement te raadplegen;
- het Euratom-verdrag omvat geen bepalingen over maatschappelijk belangrijke thema's als de veiligheid van kerncentrales en het beheer en opslag van radioactief afval;
- de noodzaak van een geharmoniseerd Europees energiebeleid vanuit het gezichtspunt van de klimaatbeheersing en de daarmee verbonden Kyoto-doelstellingen;
- de veiligheidsproblemen met kerncentrales van het Sovjet-type in de nieuwe lidstaten uit Oost-Europa.

In deze context deed de Europese Commissie in 2002 opnieuw een poging tot harmonisering van het beleid via richtlijnen op het vlak van nucleaire veiligheid, ontmanteling van kerncentrales en beheer van nucleair afval. De oorspronkelijke voorstellen, die bekend staan als 'the nuclear package', voorzien in:

- het invoeren van uniforme veiligheidsnormen en inspectiesystemen voor nucleaire installaties;
- het garanderen van de beschikbaarheid van voldoende financiële middelen op het ogenblik van ontmanteling, sanering en berging;
- een strikt tijdschema voor berging van radioactief afval. Voor langlevend en hoogactief afval (categorie B en C) zou de bergingsplaats tegen 2008 moeten bepaald worden en operationeel zijn tegen 2018. Voor kortlevend afval (categorie A), indien apart geborgen, zou de bergingsinfrastructuur al in 2013 operationeel moeten zijn.

De meeste lidstaten aarzelden om deze bevoegdheden aan Europa over te dragen. Om te vermijden dat de nieuwe Europese regelgeving rond de veiligheid van nucleaire installaties en radioactief afvalbeheer op de lange baan werd geschoven, heeft de Europese Commissie in 2004 aangepaste voorstellen ingediend maar voorlopig zonder veel resultaat.

De federale minister van Binnenlandse Zaken is verantwoordelijk voor het nucleair noodplan en heeft de voogdij over het *Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle* (FANC), bevoegd voor alle aangelegenheden in verband met stralingsbescherming, nucleaire veiligheid en safeguards in België. De federale minister van Economische Zaken heeft de voogdij over de nucleaire onderzoeksinstellingen en is bevoegd voor het nucleair afvalbeleid via NIRAS. Ioniserende straling is een federale bevoegdheid en daarom hebben de meeste cijfers in dit hoofdstuk betrekking op België. Het zwaartepunt van de Belgische nucleaire industrie heeft echter altijd in Vlaanderen gelegen met de voormalige radiumindustrie in Olen, de nucleaire site van Mol-Dessel en de 4 kerncentrales in Doel. Waar mogelijk worden in dit document afzonderlijke cijfers voor Vlaanderen weergegeven. Ongeacht de federale bevoegdheden

inzake ioniserende straling, heeft ook het Vlaamse Gewest een eigen rol te vervullen (bv. bij de sanering van sites met een gemengde chemische en radioactieve besmetting).

Het *KB van 20 juli 2001*, het zogenaamde ARBIS (Algemeen Reglement op de Bescherming van de bevolking, van de werknemers en van het leefmilieu tegen het gevaar van Ioniserende Stralingen) vernieuwt de Belgische reglementering en administratieve organisatie. Het voert de wet van 15 april 1994 uit die voorziet in de oprichting van het FANC en regelt de omzetting van de 'Europese richtlijn basisnormen' en van de 'Europese medische richtlijn':

- het *FANC* centraliseert voorheen sterk versnipperde bevoegdheden op het vlak van de stralingsbescherming in België en kan als instelling van openbaar nut flexibeler optreden dan een overheidsadministratie. Het nieuwe ARBIS voert vergunningsplicht in bij ontmanteling en specificeert vrijgavecriteria en vrijgaveniveaus. Ook de criteria voor vloeibare en atmosferische lozingen werden aangepast;
- de *richtlijn basisnormen* van 1996 voorziet in een verlaging van de dosislimieten voor werknemers van 50 tot 20 mSv/j en voor de bevolking van 5 tot 1 mSv/j. Medische blootstelling (van patiënten) en de natuurlijke stralingsachtergrond tellen niet mee voor de dosislimieten. Beroepsactiviteiten waarbij natuurlijke stralingsbronnen aanwezig zijn vallen voortaan onder het toepassingsgebied van het reglement;
- de *medische richtlijn* van 1997 legt een aantal zeer concrete verplichtingen op voor de bescherming van patiënten bij gebruik van ioniserende straling in de geneeskunde. Het FANC heeft in een vademecum de verschillende aspecten verder toegelicht: zie http://www.fanc.fgov.be/nl/publications_vademecum_radiologues.htm.

De werking van het FANC werd in 2005 op vraag van de minister van Binnenlandse Zaken doorgelicht. De externe audit stelde een managementprobleem aan de top van het FANC vast. Dit leidde in 2006 en 2007 tot een ingrijpende reorganisatie en de benoeming van een nieuwe directeur-generaal.

Het FANC kan instellingen erkennen voor het uitvoeren van de systematische controle op de nucleaire installaties. De Kamer van Volksvertegenwoordigers sprak zich in april 2007 uit voor een centralisering van de nucleaire controle binnen het FANC. Als gevolg daarvan nam de beheerraad van het FANC actie om alle erkende instellingen vanaf 1 januari 2008 bijeen te brengen in een filiaal van het FANC met de naam BEL V. De minister van Binnenlandse Zaken, die de voogdij heeft over het FANC, heeft echter zijn veto geplaatst op de uitvoering van deze maatregel tot de nieuwe regering zijn beleid heeft bepaald.

Indicatoren

De indicatoren zijn geschikt in samenhangende indicatorblokken. Achter de naam van elke indicator staat aangegeven op welke schakel van de milieuverstoringsketen de indicator betrekking heeft:

- **D:** 'Driving forces' of maatschappelijke activiteiten: de onderliggende oorzaken van de verstoringen (productie, consumptie, transport, recreatie, enz.);
- **P:** 'Pressure' of milieudruk: de directe oorzaken van de verstoringen, nl. brongebruik (energie, water, ruimte, grondstoffen) en emissies (lozingen naar lucht, water en bodem, afval);
- **S:** 'State' of milieutoestand/-kwaliteit: de resulterende toestand van de verschillende milieucomponenten (lucht, water, bodem);
- **I:** 'Impact' of gevolgen van de milieuverstoring voor mens, natuur en economie: een inschatting van de negatieve gevolgen van de milieukwaliteit voor mens, natuur en economie;
- **R:** 'Response' of reacties van de doelgroepen en het beleid op de milieuverstoring.

1 | Radiologische en nucleair geneeskundige onderzoeken

1.1 | Inleiding

Figuur 1 liet al zien dat medische toepassingen de grootste bijdrage leveren tot de stralingsbelasting van de Vlaamse bevolking. Twee parameters bepalen de omvang van deze blootstelling: het *aantal* onderzoeken en/of behandelingen dat de bevolking ondergaat en het *type* onderzoeken dat wordt uitgevoerd. De keuze van het onderzoek, de patiënt met zijn specifiek medisch probleem en de manier waarop het onderzoek wordt uitgevoerd bepalen de stralingsdosis per onderzoek. In § 8.2 gaan we in op de dosimetrische aspecten van de blootstelling. Hier bespreken wij eerst de frequenties van de uitgevoerde onderzoeken.

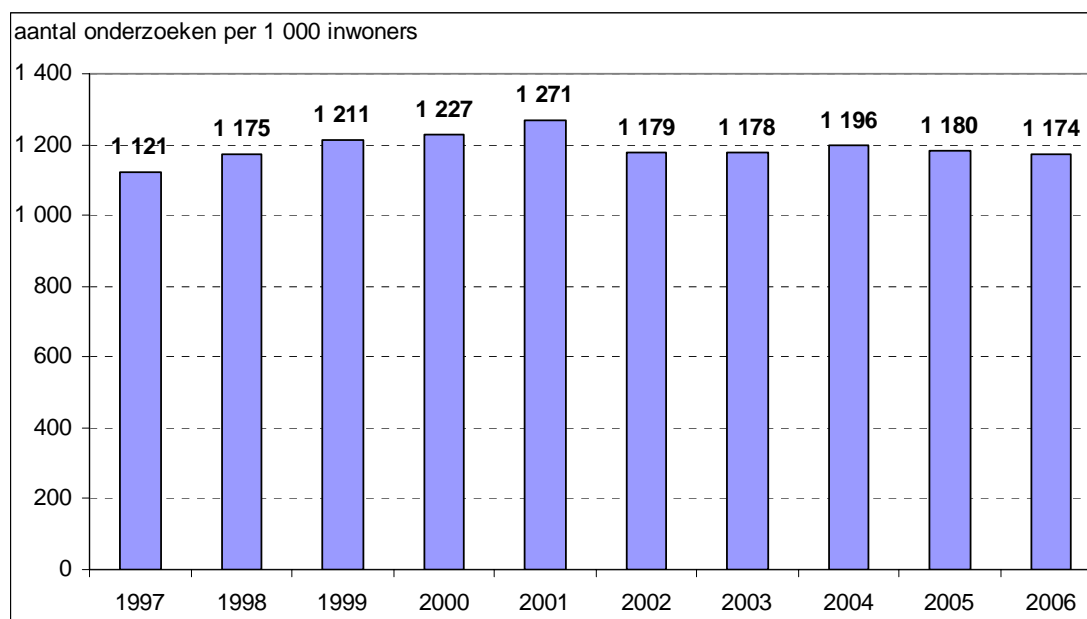
Het aantal medische onderzoeken waarbij ioniserende straling wordt gebruikt, kan geschat worden op basis van gegevens van het Rijksinstituut voor Ziekte- en Invaliditeitsverzekering (RIZIV). Hierbij introduceert men mogelijks een fout:

- Men kan het aantal onderzoeken onderschatten omdat sommige onderzoeken worden terugbetaald door een andere financier: verzekering, bedrijf... of omdat de patiënt niet verzekerd is. Op een totaal van 150 000 uitgevoerde onderzoeken op een grote radiologische dienst bleken er een 900-tal, dus 0,6 %, niet door het RIZIV te worden vergoed. Deze fout is dus waarschijnlijk erg klein;
- Er bestaat ook de kans dat het aantal onderzoeken wordt overschat. De ziekenhuizen en radiologische diensten hebben er financieel belang bij om het aantal uitgevoerde onderzoeken te overschatten. De onderzoekers nemen echter aan dat de kwaliteitscontrole van het RIZIV geen grote excessen toelaat.

1.2 | Aantal radiologische onderzoeken **D**

In figuur 5 is de evolutie van het aantal onderzoeken met behulp van ioniserende straling voor België weergegeven over de periode 1997-2006. Tandheelkundige opnamen zijn niet vervat in deze cijfers. Het aantal onderzoeken per hoofd van de bevolking neemt vanaf 1997 toe met ongeveer 3 % per jaar. In 2002 is er een daling met 7 % door inspanningen om de kost voor de sociale zekerheid te beheersen. Zo werden onder andere de terugbetalingstarieven van schedelonderzoeken beperkt en werd er een rem gezet op het gebruik van de spoedgevallendiensten. De laatste jaren schijnt een zeker evenwicht bereikt.

Figuur 5: Evolutie van het aantal X-stralenonderzoeken (België, 1997-2006)

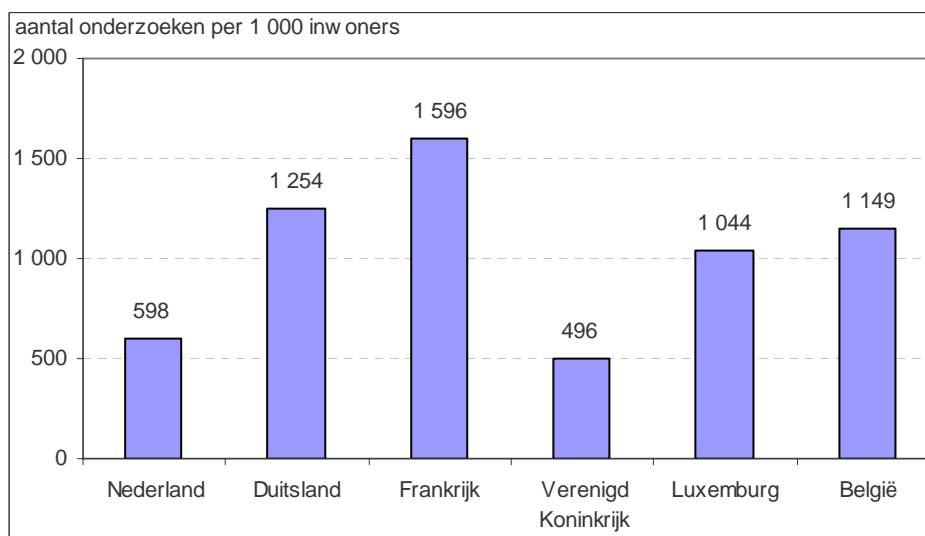


Bron: RIZIV, 2007.

Het aantal X-stralenonderzoeken uitgevoerd in Vlaanderen is gelijkaardig met dat in België: per 1 000 inwoners respectievelijk 1 166 (Vlaanderen) en 1 162 (België) in 1997 en 1 110 (Vlaanderen) respectievelijk 1 174 (België) in 2006.

Uit een rapport van de Verenigde Naties (UNSCEAR, 2000) blijkt dat het aantal radiologische onderzoeken in Vlaanderen/België hoog is ten opzichte van Nederland en het Verenigd Koninkrijk, maar vergelijkbaar met Duitsland en Frankrijk (figuur 6). Op de eerste vergadering van de Europese werkgroep 'DoseDataMed' rond bevolkingdoses werd geopperd dat de frequenties mogelijk beïnvloed worden door het terugbetalingsstelsel voor medische akten (2004): de landen met de laagste frequenties zijn deze met een forfaitair betalingssysteem.

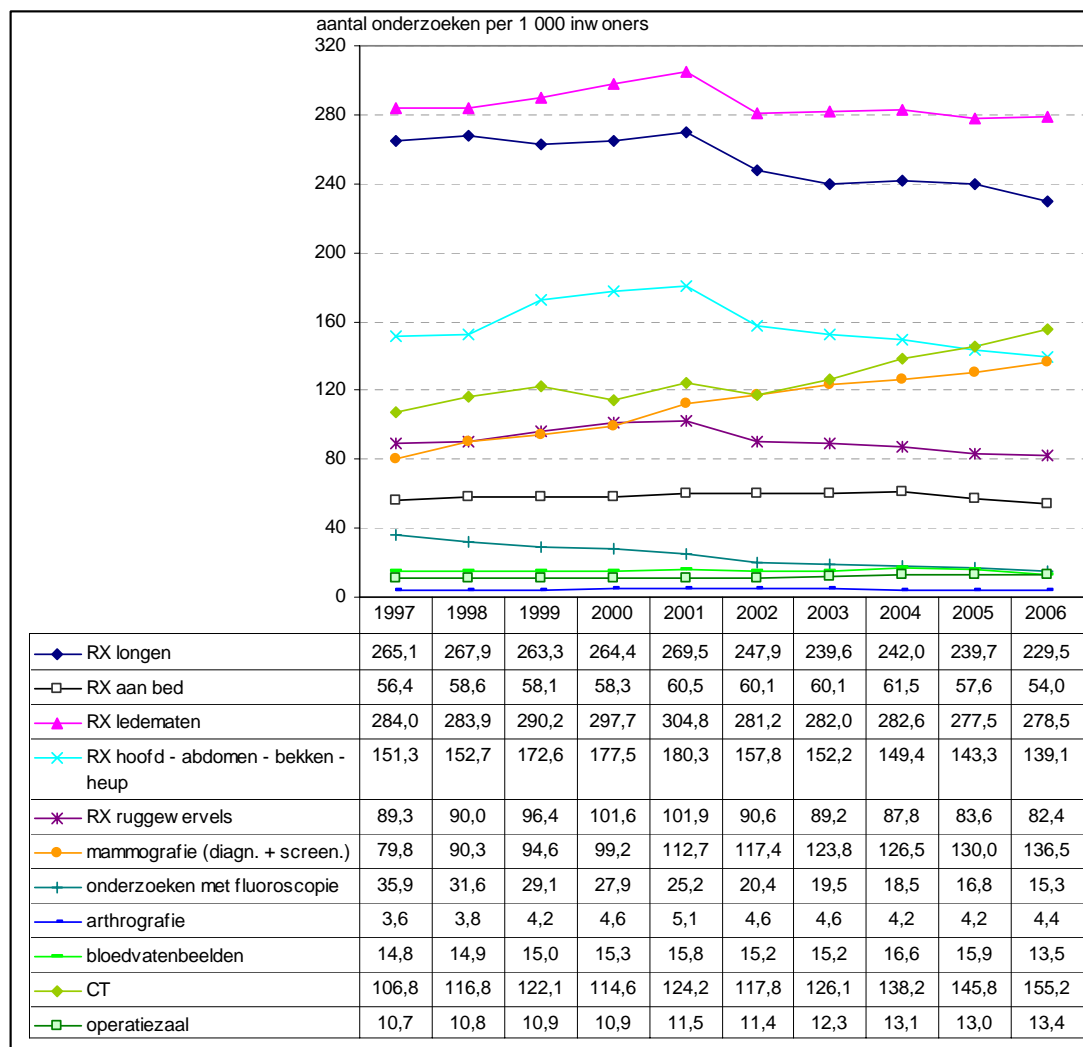
Figuur 6: Vergelijking van het aantal onderzoeken in de radiologie in België met de omringende landen over de periode 1991-1995 (cijfers per jaar)



Bron: UNSCEAR, 2000 en RIZIV, 2000.

Meer gedetailleerde RIZIV-cijfers laten een verschuiving zien tussen de types radiologische onderzoeken (figuur 7a). Deze classificatie gebeurde met behulp van de methode aanbevolen door de Hoge Gezondheidsraad (HGR, 1997).

Figuur 7a: Relatieve ontwikkelingen in het aantal onderzoeken met X-stralen (België, 1997-2006)



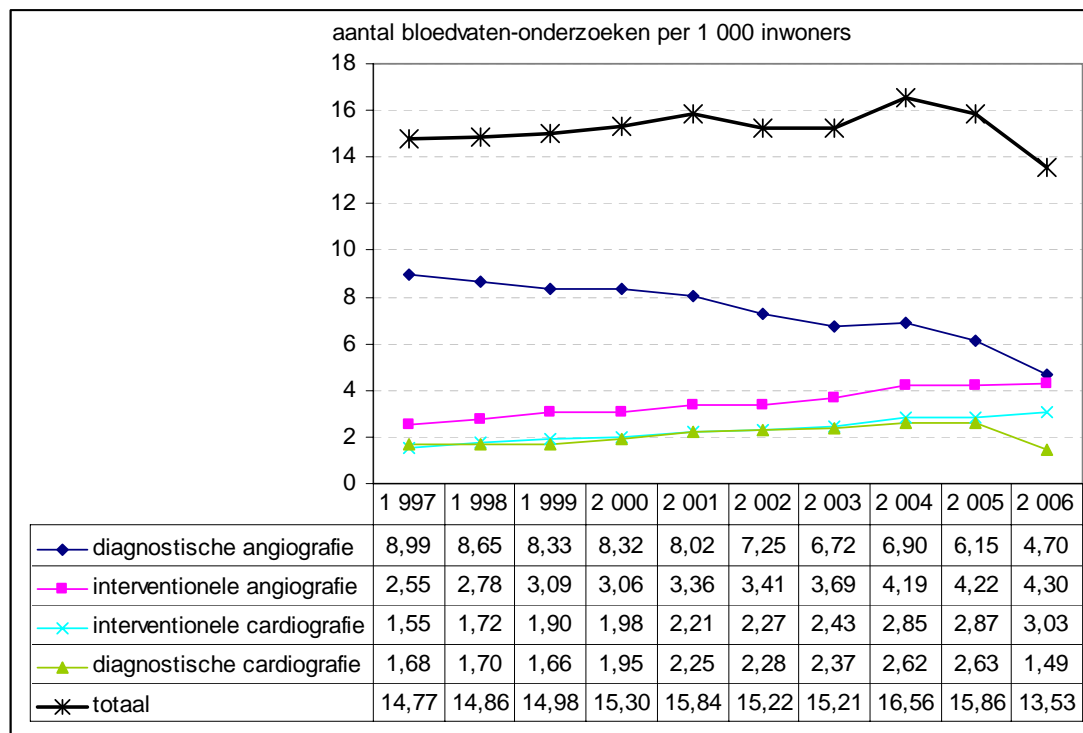
Bron: RIZIV, 2007.

Traditionele technieken als onderzoeken van het spijsverteringsstelsel (omvat in 'onderzoeken met fluoroscopie') of van de ruggewervels worden meer en meer verdrongen door een CT-scan (Computed Tomography) of Magnetische Resonantie beeldvorming (MR). Mammografie kent sinds 2001 een sterke groei omdat de Vlaamse regering toen het licht op groen heeft gezet voor de gratis borstkankerscreening bij vrouwen tussen 50 en 69 jaar. De klassiekers zoals longfoto's en foto's van de buik (abdomen) vertonen geen grote veranderingen in aantal.

Beeldvorming van bloedvaten is een aparte groep binnen het X-stralen onderzoek. Bloedvaten kunnen gevisualiseerd worden om een diagnose te stellen of men kan therapieën doorvoeren (bv. het opheffen van vernauwingen van de bloedvatwanden). Het totaal aantal onderzoeken blijft relatief constant (figuur 7b). De vermindering van de diagnostische onderzoeken is het gevolg van alternatieve onderzoeken die minder invasief zijn en/of waar geen X-stralen hoeven gebruikt te worden. In dit kader vermelden we de continue uitbouw en verbetering van de MR bloedvatenbeeldvorming en idem dito voor CT. Misschien is de daling van het aantal diagnostische coronarografieën in 2006 aan de recentere opmars van MR en

CT voor deze toepassingen te wijten. De bloedvatenonderzoeken dient men nauwlettend te volgen. De blootstelling voor de patiënt en voor de medische ploeg die het onderzoek uitvoert kan immers vooral bij interventies erg hoog zijn. Artsen verleggen nog elke dag hun kunde en kennis in dit domein: steeds kleinere vaten of meer ingewikkelde medische problemen krijgen een oplossing. Het risico voor de patiënt wordt kleiner geacht dan bij open chirurgie en de hospitalisatieduur is gevoelig korter.

Figuur 7b: Ontwikkelingen in het aantal bloedvatenonderzoeken (België, 1997-2006)



Onderverdeling in diagnostische onderzoeken en interventies. Er wordt ook onderscheid gemaakt tussen procedures uitgevoerd door radiologen of vasculaire chirurgen enerzijds (angiografie) en cardiologen (cardiografie) anderzijds.

Bron: RIZIV, 2007.

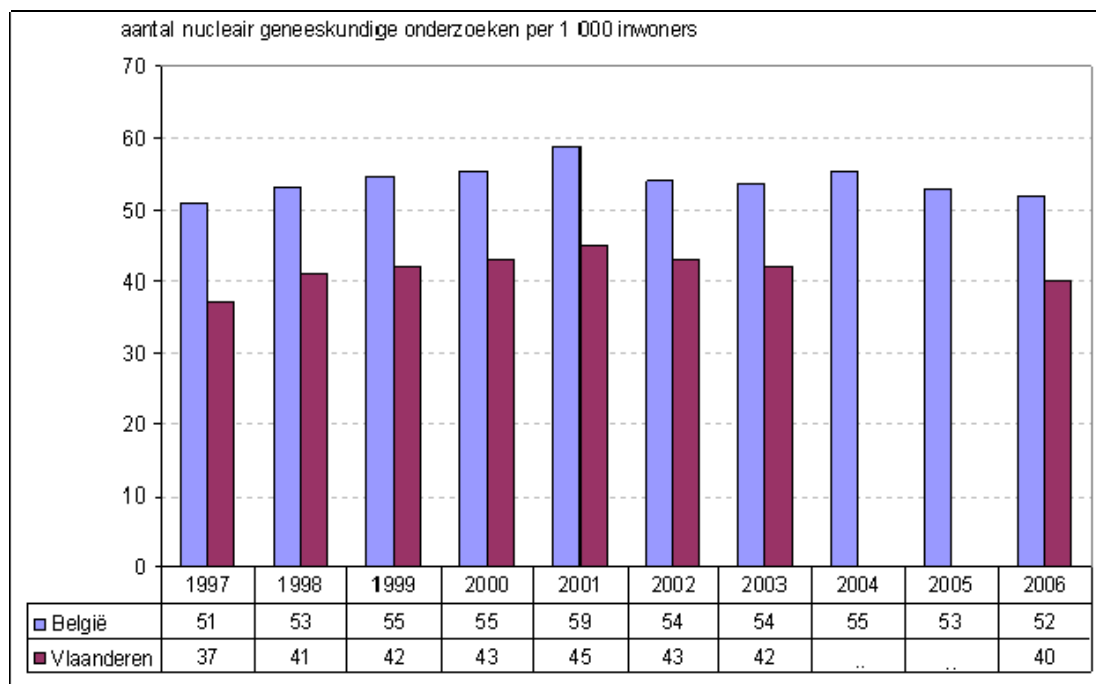
Het gebruik van de niet-ioniserende beeldvormingstechnieken (echografie en MR) kent de laatste jaren een groei. Ze werden in 2003 in Vlaanderen voor 28 %, respectievelijk 2,5 % van het totaal aantal onderzoeken in de medische beeldvorming gebruikt.

1.3 | Aantal nucleair geneeskundige onderzoeken D

1.3.1 / Evolutie aantal onderzoeken

In figuur 8 is de evolutie van het aantal onderzoeken in de nucleaire geneeskunde (= de toediening van radionucliden voor medische beeldvorming) voor Vlaanderen/België weergegeven over de periode 1997-2006. Dat aantal *nucleair geneeskundige onderzoeken* daalde in 2002 met 4 % na de vijf jaar daarvoor licht te zijn gestegen en bleef daarna op hetzelfde peil.

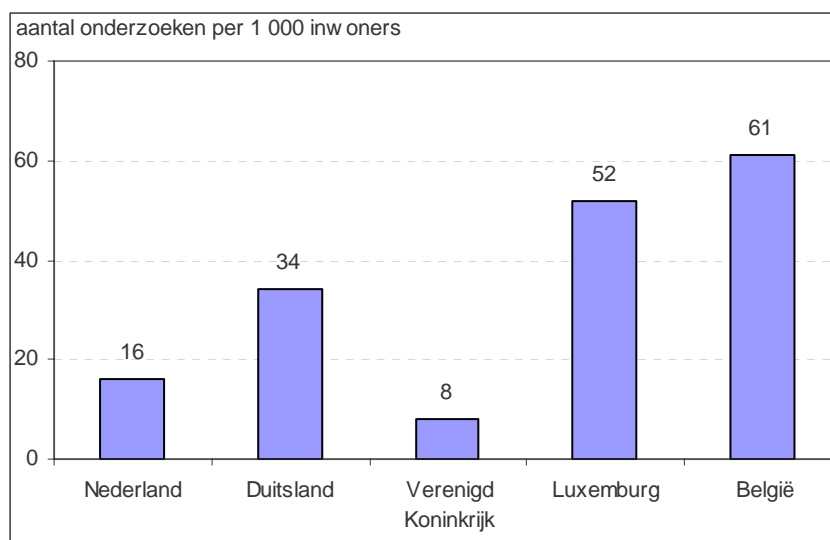
Figuur 8: Evolutie van het aantal onderzoeken in de nucleaire geneeskunde (België, 1997-2006; Vlaanderen, 1997-2003; 2006)



Bron: RIZIV, 2007.

België is koploper in Europa, zowel wat het aantal nucleair geneeskundige diensten betreft als het aantal onderzoeken per inwoner (figuur 9). Het aantal onderzoeken is in Vlaanderen 20 à 25 % lager dan het gemiddelde in België. Hierbij kan meespelen dat de grote universitaire centra in Brussel niet meetellen voor Vlaanderen, terwijl veel Vlamingen daar een onderzoek laten uitvoeren. Waar het verschil in frequentie van onderzoeken met onze buurlanden vandaan komt is niet duidelijk.

Figuur 9: Vergelijking van het aantal onderzoeken per 1000 inwoners en per jaar in de nucleaire geneeskunde in België met de omliggende landen over de periode 1991-1995



Bron: UNSCEAR, 2000 en RIZIV, 2000.

Tabel 3 geeft de relatieve frequentie van de belangrijkste nucleair geneeskundige onderzoeken in Vlaanderen. De gegevens komen uit een inventarisatie bij 19 Vlaamse ziekenhuizen (De Geest, 2002). Dit zijn de eerste Vlaams/Belgische gegevens op dit vlak. Hier valt op dat botscintigrafie ('botscan') veruit het merendeel van de onderzoeken uitmaakt.

Tabel 3: De relatieve frequentie van de vijf belangrijkste onderzoeken voor nucleaire geneeskunde (Vlaanderen, 2001)

type onderzoek	aandeel in totaal
botscintigrafie	45 %
schildklierscintigrafie	18 %
myocard perfusie (hart)	12 %
myocard ejectie (hart)	5 %
long perfusie	5 %

Bron: De Geest, 2002.

Het aantal positron-emissietomografieën (zie § 8.2.1) steeg van 470 per jaar in 1997 tot 16 600 in 2006. Hiermee blijft dit een kleine fractie binnen de nucleair geneeskundige onderzoeken. Deze techniek neemt echter snel uitbreiding door de grote beschikbaarheid van cyclotrons in België. Het Belgische bedrijf IBA is namelijk wereldleider voor de ontwikkeling en bouw van deze cyclotrons.

Het therapeutisch gebruik van radionucliden in de nucleaire geneeskunde is zeer beperkt in vergelijking met de diagnostische toepassingen en bestaat voornamelijk uit de behandeling van de schildklier met jodium-131.

1.3.2 / Nucleaire activiteit bij toepassingen in de nucleaire geneeskunde

Een studie over het gebruik van nucleaire geneeskunde in 19 Vlaamse diensten wijst uit dat technetium-99m (halveringstijd 6 uur) het meest gebruikte nuclide is (De Geest, 2002). Een werkgroep van de Belgische Vereniging voor Nucleaire Geneeskunde (BSNM) heeft richtlijnen opgesteld voor de toe te dienen activiteit voor verschillende onderzoeken (BSNM, 2002). Tabel 4 vermeldt de kenmerken van de belangrijkste onderzoeken. Op basis van het totaal aantal medische nucleaire verrichtingen en gegevens uit het buitenland schatten we dat de nucleaire geneeskunde in België jaarlijks 10^{14} tot 10^{15} Bq aan radiofarmaca verbruikt, waarvan meer dan 95 % met een halveringstijd van minder dan een paar weken. Het gebruik van het dosisbelastende thallium-201 is sterk teruggelopen.

Tabel 4: Kenmerken van de vier belangrijkste medisch nucleaire procedures (Vlaanderen, 2002)

procedure	radiofarmacon	referentie-activiteit* (MBq)	effectieve dosis voor referentieactiviteit (mSv)
botscintigrafie	Tc-99m-HDM/MDP	740	4,22
schildklierscintigrafie	Tc-99m-Pertechnetaat	110	1,43
	I-123 bij 55 % opname	40	14,4
	bij 35 % opname	40	8,80
myocard perfusie (hart)	bij 15 % opname	40	4,28
	Tl-201	150	33,0
	Tc-99m tetrofosmin rust	900	6,84
	inspanning	900	6,30
long perfusie	Tc-99m-MIBI rust	900	8,10
	inspanning	900	7,11
long perfusie	Tc-99m-MAA	110	1,21

* De referentieactiviteit is de door de BSNM aanbevolen activiteit voor het onderzoek van een standaard, gezonde volwassen man.

Bron: BSNM, 2003a.

1.4 | Evaluatie en maatregelen

In de loop der jaren zijn er door de overheid verschillende maatregelen genomen om het gebruik van de medische beeldvorming te beperken. Deze maatregelen werden vooral door economische motieven geïnspireerd. De laatste jaren zien we een stagnatie van het aantal onderzoeken en een verschuiving naar de meer gesofisticeerde onderzoeken, zoals bv. CT. Naast de directe maatregelen om de budgetten in de medische beeldvorming te controleren zijn er ook nog andere evoluties van belang. Met het oog op het beperken van de hospitalisatieduur kunnen andere dan de gebruikelijke RX-onderzoeken aangewezen zijn. Soms is de 'one-stop-shop', waarbij meteen het meest complete onderzoek doorgevoerd wordt, de oplossing die vanuit het oogpunt van de 'evidence based medicine' wordt aangevoerd. De CT-scanner speelt in deze evolutie een belangrijke rol en indien de beschikbaarheid van de MR-scanner een beperkende factor is in de optimalisatie van een zorgprogramma, is ook hier de CT-scanner een frequent alternatief. De dosis is bij medische beeldvorming bepalend voor de beeldkwaliteit zodat er telkens een afweging moet gemaakt worden tussen de beeldkwaliteit om de vereiste diagnostische gegevens te verkrijgen en het blootstellingsrisico.

Het opstarten van het Vlaamse bevolkingsonderzoeksprogramma naar borstkanker verhoogt het aantal radiologische onderzoeken in Vlaanderen, maar moet beschouwd worden als een investering in de gezondheid van de vrouw. Een kwaliteitsvol programma zal de mortaliteit door borstkanker doen dalen. De Vlaamse regering implementeert de Europese voorschriften in dat verband erg strikt (van Engen, 2006) en informeert het brede publiek via haar website (http://www.zorg-en-gezondheid.be/uploadedFiles/NLsite/Cijfers/Operationele_gegevens/Borstkankerscreening/GC2005-Resultaten.doc). In de toekomst kunnen meer screeningsprogramma's gebaseerd op X-stralenonderzoeken volgen, zoals het opsporen van dikkedarm-kanker met behulp van CT. Het is van cruciaal belang om de X-stralendosis en de kwaliteit van de beelden op een continue wijze op te volgen en dat vereist een goede samenwerking tussen de organiserende overheid, de medische fysica, de medische ploeg en de screeningscentra.

Volgens de Europese medische richtlijn moeten de lidstaten maatregelen nemen om zinloze onderzoeken te vermijden. Een zinloos onderzoek is een onderzoek waarvan de uitslag — positief of negatief — geen invloed heeft op het te volgen beleid of op de diagnose van de arts. De Britse Royal College of Radiologists geeft het voorkomen van zinloze onderzoeken op als belangrijkste methode om onnodige blootstelling van patiënten te voorkomen (NRPB, 1990). De Britse radiologen hebben daarom richtlijnen opgesteld voor doorverwijzende artsen. Deze geven duidelijk aan in welke gevallen een radiologisch onderzoek zinvol, dan wel zinloos is. De Europese Commissie heeft dit document in het Nederlands vertaald (EC, 2000c) en het RIZIV heeft een door Belgische radiologen bewerkte versie van dit document op haar website geplaatst (<http://www.riziv.be/care/nl/doctors/promotion-quality/guidelines-rx/pdf/guidelinesnl.pdf>). Het blijft onduidelijk in hoeverre dit document bekend is bij de voorschrijvende artsen. Een Europees congres over training in stralingsbescherming stelde vast dat specialisten en huisartsen weinig vertrouwd zijn met de mogelijkheden van de moderne radiodiagnostiek en daarom lang niet altijd het meest adequate onderzoek aanvragen (Vaño, 2003).

Maatregelen ter beperking van het gebruik van radiodiagnostische onderzoeken zouden in Vlaanderen vooral tot doel kunnen hebben het aantal onderzoeken niet verder te doen toenemen en het gebruik van CT in de radiologie te beperken (zie ook § 8.2 in deel Indicatoren). Om deze doelstelling te bereiken zal men de beeldvormende activiteiten moeten evalueren in het licht van het gehele ziekenhuisgebeuren.

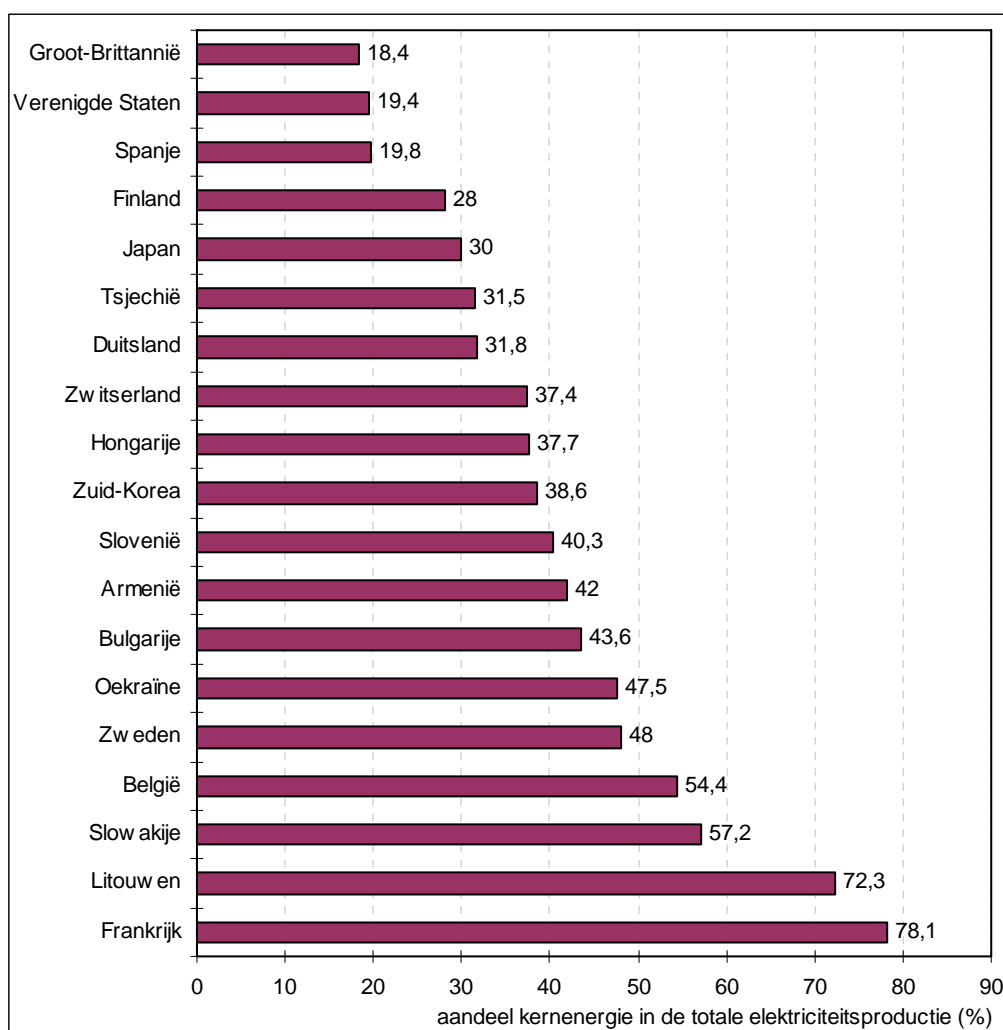
2 | Elektriciteitsproductie in kerncentrales

2.1 | Stroomproductie in nucleaire centrales D

2.1.1 / Internationale vergelijking

Kerncentrales leverden in 2006 32 % van de elektriciteit van de EU en ongeveer 20 % wereldwijd. België (54,4 %) heeft na Frankrijk (78,1 %), Litouwen (73,2 %) en Slowakije (57,2 %) het hoogste aandeel elektriciteit uit nucleaire centrales in de wereld (figuur 10).

Figuur 10: Aandeel van de nucleaire energie in de totale elektriciteitsproductie van enkele landen (2006)



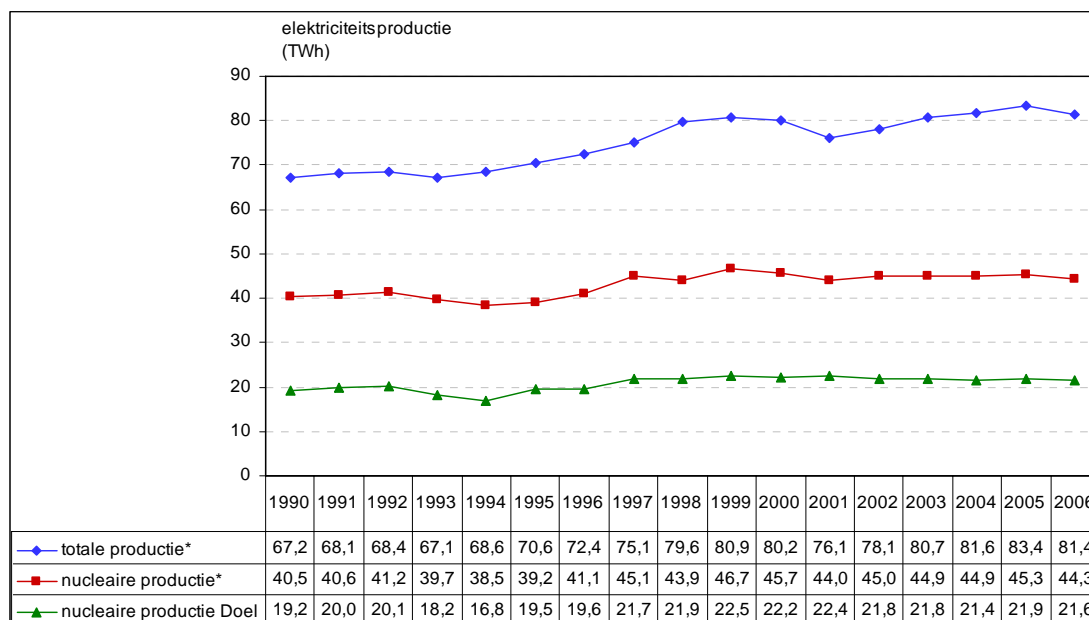
Bron: World Nuclear Association, 2007.

2.1.2 / Totale en nucleaire elektriciteitsproductie

Figuur 11 geeft het verloop weer van de totale en nucleaire elektriciteitsproductie in België. De productie in de enige Vlaamse site met kernreactoren (Doel) is in deze figuur ook nog eens afzonderlijk weergegeven. Het aandeel van kernenergie in de Belgische elektriciteitsproductie bedroeg 54,4 % in 2006. De 4 kerncentrales van Doel stonden in voor 26,5 % van de stroomproductie. Het nucleair aandeel neemt langzaam af, maar trager dan de toename in elektriciteitsgebruik ondanks een onveranderd aantal kernreactoren. Dit is mogelijk door de toenemende invoer van elektriciteit. Maar ook de ingevoerde elektriciteit –

niet verrekend in figuur 11 – is grotendeels van nucleaire oorsprong: Frankrijk is met zijn omvangrijke nucleaire stroomproductie immers met ruime voorsprong de grootste stroomexporteur binnen Europa (Eurostat, 2007). In 2006 was de invoer 10 TWh groter dan de uitvoer; dit komt neer op 11 % van het binnenlandse verbruik.

Figuur 11: Evolutie totale en nucleaire elektriciteitsproductie in België en afzonderlijk voor Doel (1990-2006)



* inbegrepen het aandeel van EDF (Electricité de France) in de kerncentrale Tihange 1

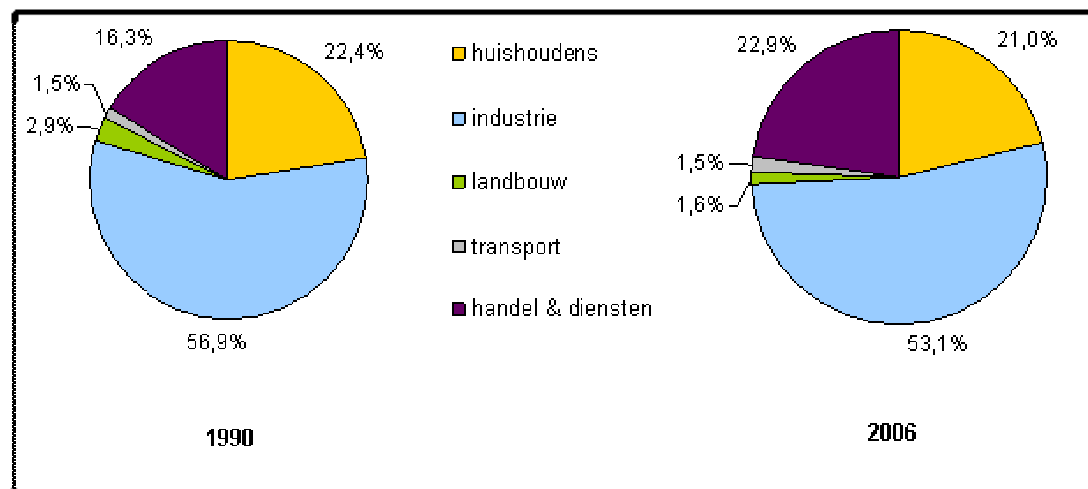
Bron: Electrabel (2007), VITO (2007).

De kostprijs van een nucleaire kWh bestaat voor 60 % uit investeringskosten, voor 20 % uit brandstofkosten en voor 20 % uit onderhoud- en werkingskosten (Eyckmans, 2003). De hoge investeringskost maakt dat deze centrales voldoende lang moeten draaien, zodat de investeringskost over voldoende geproduceerde kilowatturen kan gespreid worden. Dit betekent dat nucleaire centrales voornamelijk geschikt zijn voor de productie van de zogenaamde basislast, zodat ze, met uitzondering van perioden van onderhoud, vrijwel het hele jaar door continu draaien. De gemiddelde *benuttingsfactor* van de Belgische kerncentrales in 2006 bedroeg 87,2 %. Tijdens piekperioden kan men best beroep doen op flexibele snel opstartende centrales met een lagere investeringskost en een hogere brandstofkost zoals gascentrales.

2.1.3 / Aandeel sectoren in eindgebruik elektriciteit

Figuur 12 geeft het aandeel van de verschillende sectoren in Vlaanderen weer inzake eindgebruik van elektriciteit voor de jaren 1990 en 2006. De energiesector zelf, die in Vlaanderen vooral bestaat uit elektriciteit- en gasbedrijven en petroleumraffinaderijen, is niet in de figuur opgenomen. In absolute termen is het elektriciteitsgebruik bij de meeste sectoren toegenomen in de periode 1990-2006: huishoudens +44 %, industrie +43 %, transport +51 % en handel & diensten +116 %. Enkel de landbouw ging minder elektriciteit gebruiken: -16 %. Wat de aandelen in het elektriciteitsgebruik betreft, zien we vooral een vermindering van het aandeel van de industrie ten voordele van handel & diensten.

Figuur 12: Aandeel van de verschillende doelgroepen in het eindgebruik van elektriciteit (Vlaanderen, 1990-2006)



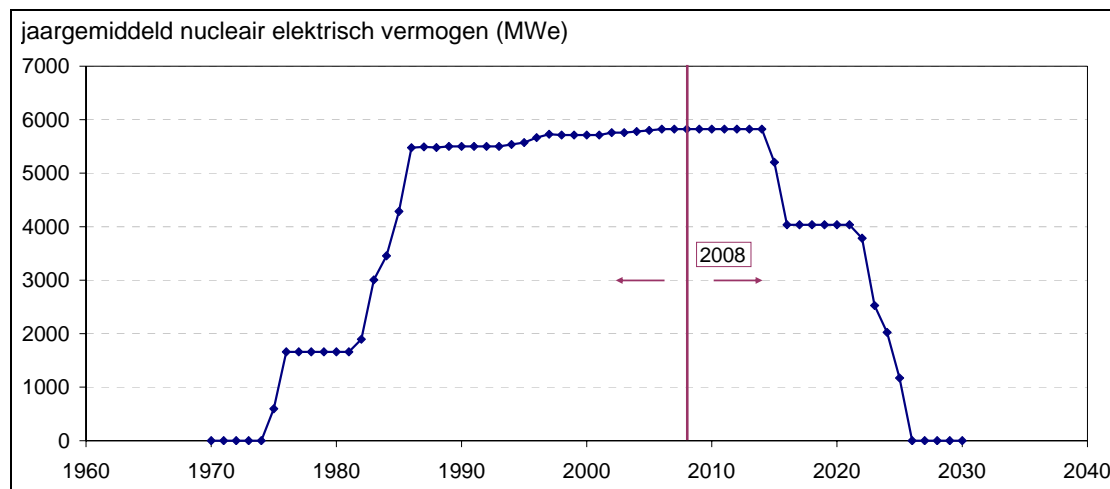
Bron: Energiebalans Vlaanderen VITO.

2.1.4 / Kernuitstap

De uitbatingsvergunning van de Belgische kerncentrales is gebaseerd op een regime van tienjaarlijkse veiligheidsevaluaties om ze conform te maken aan de meest recente veiligheidsregels. In de officiële vergunning is geen maximale levensduur opgenomen, maar de wet op de kernuitstap van 31 januari 2003 bepaalt dat de kerncentrales dicht moeten als ze 40 jaar oud zijn. De huidige vergunningen laten een hogere opbrand van de splijtstof en langere reactorcycli toe. Naast veiligheidsargumenten spelen ook argumenten van economische, juridische en politieke aard een rol in de beslissing tot eventuele sluiting van een centrale (Torfs, 1999). In een aantal landen, zoals in België en Duitsland, is er een afbouw van de bestaande nucleaire elektriciteitsvoorziening gepland na 30 à 40 jaar productie. Anderzijds hebben een 50-tal kerncentrales in de Verenigde Staten en de kerncentrale van Borssele in Nederland een verlenging van hun vergunning gekregen tot 60 jaar. De eigenaars van de kerncentrale in Borssele hebben zich verbonden om in ruil voor het langer openhouden 250 miljoen euro te investeren in duurzame energie. De kerncentrale van Borssele dateert uit 1973. Ze ligt nabij Vlissingen aan de Schelde op slechts 15 km van de Belgische grens.

De wet op de kernuitstap beperkt de levensduur van kerncentrales in België tot 40 jaar. Dat zou betekenen dat de eerste drie centrales in 2015 sluiten (Doel 1 en 2, en Tihange 1) en de laatste in 2025. Bovendien mogen er geen nieuwe kerncentrales voor industriële elektriciteitsproductie gebouwd worden. Figuur 13 toont het verloop van de nucleaire productiecapaciteit volgens het uitstapscenario. Electrabel vernieuwde de stoomgeneratoren van Doel 2 in 2004 en zal deze van Doel 1 in 2009 vervangen, ondanks de vooropgestelde sluiting in 2015. Dit kan erop wijzen dat Electrabel rekening houdt met de mogelijkheid dat een toekomstige regering op de beslissing tot kernuitstap zal terugkomen.

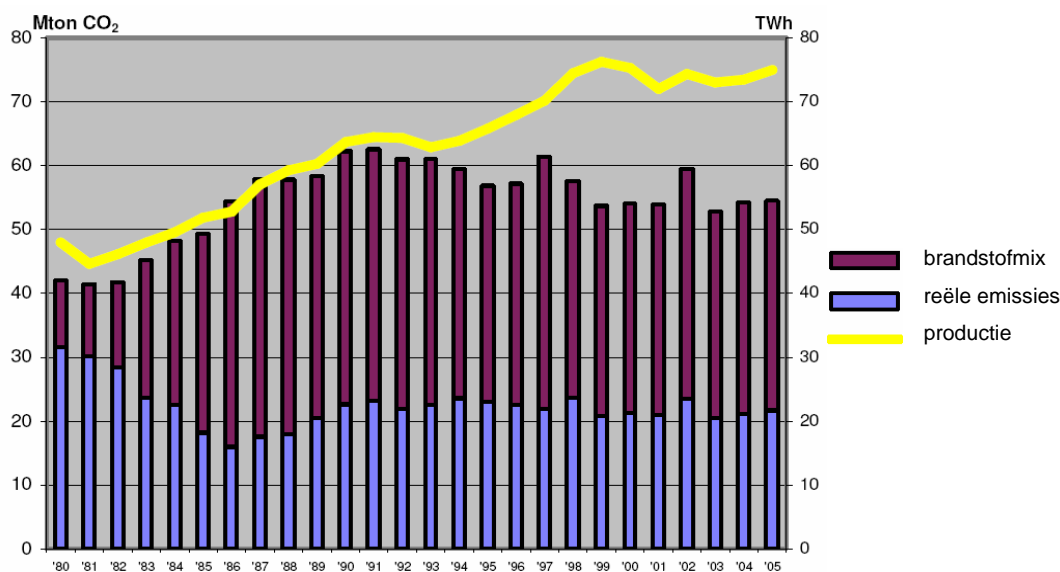
Figuur 13: Evolutie van het nucleair elektrisch vermogen in België als alle kerncentrales na 40 jaar sluiten en er geen nieuwe meer gebouwd worden



Bron: IAEA PRIS database, 2007.

Rusland ratificeerde in 2004 het Kyoto-protocol, waardoor het protocol op 16 februari 2005 officieel in voege is getreden (zie Achtergronddocument Klimaatverandering op www.milieurapport.be/AG). De sluiting van de kerncentrales vanaf 2015 heeft niet onmiddellijk gevolgen voor de Belgische Kyoto-doelstelling (7,5 % vermindering van de broeikasgasuitstoot in de periode 2008-2012 tegenover 1990), maar maakt de uitdaging nadien des te groter. De kerncentrales waren in 2006 immers goed voor 54,4 % van de totale elektriciteitsproductie in België. Figuur 14 geeft een overzicht van de reële CO₂-emissies door de elektriciteitssector, samen met een inschatting van de CO₂-emissies indien men in België geen kerncentrales had gebouwd.

Figuur 14: Evolutie van de elektriciteitsproductie en van de reële CO₂-emissies door de elektriciteitssector. Simulatie van de bijkomende emissies indien de nucleaire energie zou vervangen geweest zijn door de gas/kolen-mix van het ogenblik (België, 1980-2005)



Bron: Rapport Commissie Energie 2030 (2007)

De federale regering richtte in 2005 de Commissie Energie 2030 op voor de analyse van het Belgisch energiebeleid. De Commissie onderzocht in overleg met het planbureau de energievoorzichten voor de komende 25 jaar aan de hand van het PRIMES-model. Op 17 juni 2007 overhandigde de commissie haar eindrapport aan minister Verwilgen (CE2030, 2007). Het rapport stelt dat de toepassing van het post-Kyoto beleid erg duur zal zijn zonder kernenergie en wil de kerncentrales open houden na 2015. Zoals in Nederland zou België een stuk van de winst die de eigenaar van de kerncentrales verdient door het langer openhouden ervan, kunnen afromen door middel van belastingen en de opbrengst daarvan investeren in hernieuwbare energie.

Een rapport van de universiteit van Antwerpen (Verbruggen, 2007) verwerpt het uitgangspunt van de commissie energie 2030 dat het mogelijk zou zijn om de toekomst aan de hand van scenarioberekeningen te analyseren. Radicale beleidskeuzes zouden nodig zijn om tot een duurzame energiehuishouding te komen. Centraal in het rapport staat het voorstel om de energiekost via een CO₂-taks en een elektriciteitstaks stelselmatig en drastisch te verhogen totdat de hernieuwbare energiebronnen aan de vraag kunnen voldoen. Kernenergie wordt als grootschalig, te gevaarlijk en als concurrent van de hernieuwbare energiebronnen verworpen. Een mondiaal energieplan binnen de Verenigde Naties met bindende belastingafspraken en financiële transferten tussen rijk en arm is noodzakelijk om deze ommekeer te realiseren.

Een 30-tal energie-experten roepen in een open brief op tot sluiting van Doel 1 en 2 in 2015, zoals voorzien door de wet op de kernuitstap (<http://www.duurzame-energie-durable.be>). Dit zou volgens hen de nucleaire overcapaciteit verminderen en aldus geen probleem stellen voor de bevoorrading van het land. De sluiting zou de ontwikkeling van hernieuwbare energiebronnen stimuleren en een aansporing zijn tot rationeel energiegebruik.

In Nederland is in 2006 een parlementair debat over de bouw van nieuwe kerncentrales gehouden. De staatssecretaris voor milieu heeft, om de klimaatdoelstellingen in het jaar 2020 te halen, de voorwaarden van veiligheid, ruimte en milieu onderzocht waaraan een mogelijke nieuwe kerncentrale zou moeten voldoen. Vanuit veiligheidsoogpunt zou het om een reactor van de 3^{de} generatie moeten gaan. Waar de kerncentrale zou komen is nog niet duidelijk. In ieder geval vereist de nood aan koelwater een ligging nabij de kust of bij een stroom met voldoende hoog debiet. De staatssecretaris is zelf voorstander voor het bouwen van een tweede centrale in Borssele (naast de bestaande centrale) omwille van het maatschappelijk draagvlak dat in Zeeland voor kernenergie zou bestaan. Het parlement reageerde verdeeld op zijn initiatief en de nieuwe Nederlandse regering besloot van het voorstel af te zien.

Het rapport "Kernenergie en maatschappelijk debat" van het Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek (viWTA, 2004) maakt een analyse van de krachtlijnen van het maatschappelijk debat en besluitvorming in België vanaf invoering tot het besluit van afbouw van de nucleaire productie van elektriciteit. Het huidige debat rond de plaats van kernenergie in een toekomstgericht globaal concept van duurzame ontwikkeling wordt gezien als een duidelijk voorbeeld van polarisatie tussen voor- en tegenstanders.

Voorstanders van de blijvende inzet van kernenergie focussen op:

- op de positieve bijdrage van kernenergie bij de oplossing van de klimaatproblematiek (waarbij kernenergie als 'één van de oplossingen' – zij het een onmisbare – wordt naar voren geschoven);
- de bijdrage aan de bevoorradingszekerheid van het land (in een context waar naar alle verwachtingen de prijzen van fossiele brandstoffen zullen toenemen);
- de lage externe kosten (impact op milieu en gezondheid);
- de strikte veiligheidsvoorschriften en;
- de technische oplosbaarheid van het afvalprobleem.

Tegenstanders wijzen op:

- het ontbreken van een duurzame oplossing voor het radioactieve afval, dat voor hen trouwens onoverkomelijke problemen in verband met transgeneratiele ethiek stelt;
- de proliferatierisico's (en ethische vragen wat dat betreft);
- de niet-geïnternaliseerde kosten (de directe en indirecte subsidies (bv. de geplafonneerde verzekeringskosten voor het nucleaire risico));
- de ontmantelingskosten en kosten voor de berging van afval die volgens de tegenstanders hoger zullen oplopen dan nu ingeschat en;
- de mogelijkheid om de economische groei in absolute zin los te koppelen van een stijging van de energievraag.

3 | Niet-nucleaire industriële activiteiten met verhoogde concentraties radionucliden

3.1 | Ertsverbruik in de fosfaatindustrie D

De Vlaamse fosfaatindustrie verwerkt grote hoeveelheden fosfaaterts voor diverse toepassingen, waarvan de voornaamste de productie van kunstmeststoffen en veevoeders zijn. Fosfaaterts bevatten van nature concentraties aan radionucliden van de natuurlijke uranium- en thoriumvervalreeksen die hoger zijn dan de normale gehalten in de aardkorst. Waar de radionucliden uiteindelijk terechtkomen, wordt bepaald door het zuur waarmee het fosfaat ontsloten wordt. Zwavelzuur is het meest gebruikte zuur, waarbij het radium-226 uit de natuurlijke uraniumreeks vrijwel geheel naar het gevormde fosforgips gaat. De stortplaatsen van het fosforgips komen aan bod in § 8.5 bij de bespreking van de radiumbesmette zones in Vlaanderen. De Vlaamse bedrijven die dit procedé toepassen of toegepast hebben zijn:

- UCB, Oostende (1953 - 1987);
- Prayon Rupel, Puurs (1963 - 1992);
- Nilefos (het voegere Rhodia Chemie), Zelzate (1925 - heden);
- BASF, Antwerpen (1967 - 1993).

Tessenderlo Chemie laat de fosfaaterts met zoutzuur reageren, met afvalslib als bijproduct. Tot het begin van de jaren '90 werd twee derden van het radium met het afvalwater geloosd. De radiumlozingen door Tessenderlo Chemie komen aan bod in § 7.2. De twee vestigingen zijn:

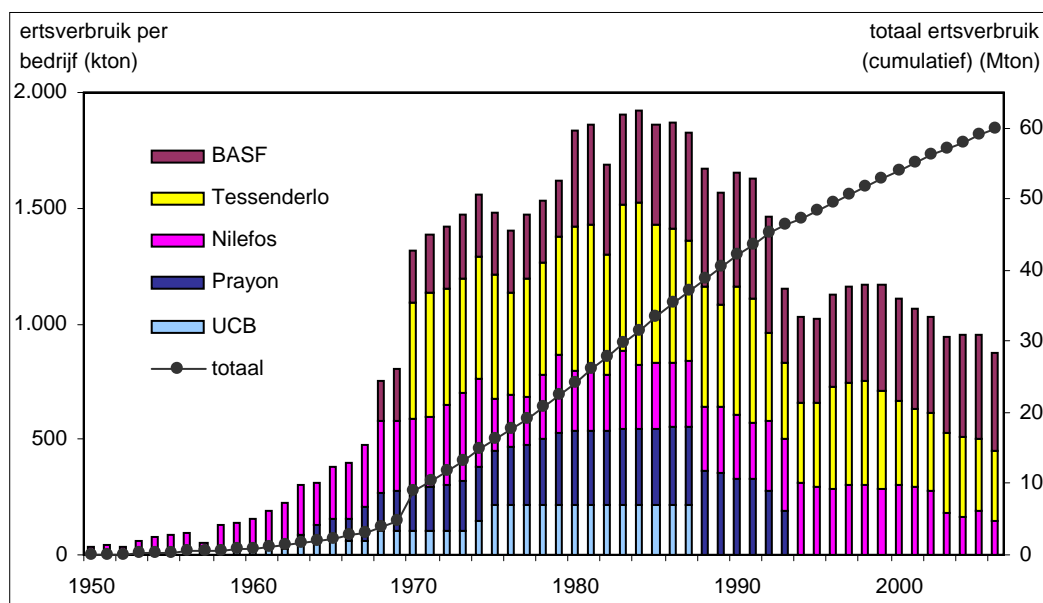
- Tessenderlo Chemie, vestiging Tessenderlo (1920 - 1995);
- Tessenderlo Chemie, vestiging Ham (1931 - heden).

BASF Antwerpen zet sinds 1980 ook salpeterzuur in voor de ontsluiting van fosfaaterts zonder belangrijke stromen aan nevenproducten. De radioactiviteit komt in dit procedé in verdunde vorm in de eindproducten terecht; dit zijn bij BASF kunstmeststoffen:

- BASF, Antwerpen (1980 - heden).

Figuur 15 geeft een overzicht van de hoeveelheden erts dat de fosfaatindustrie in Vlaanderen tussen 1950 en 2006 verwerkt heeft. Het jaarlijks ertsgebruik is sinds de jaren 80 op de helft teruggevallen tot zo'n 900 kton per jaar. Dit komt vooral door de sluiting van UCB in Oostende in 1987 en het overplaatsen van de basisfosforzuurafdeling van Prayon Rupel naar Marokko in 1992.

Figuur 15: Evolutie van het jaarlijkse en het totale fosfaatertsverbruik (Vlaanderen, 1950-2006)



De jaarcijfers van Tessenderlo Chemie zijn beschikbaar vanaf 1970. Het ertsverbruik tussen 1920 en 1970 schatten we op 3 000 kton. Deze bijdrage is vanaf 1970 bij het totaal ertsverbruik opgenomen.

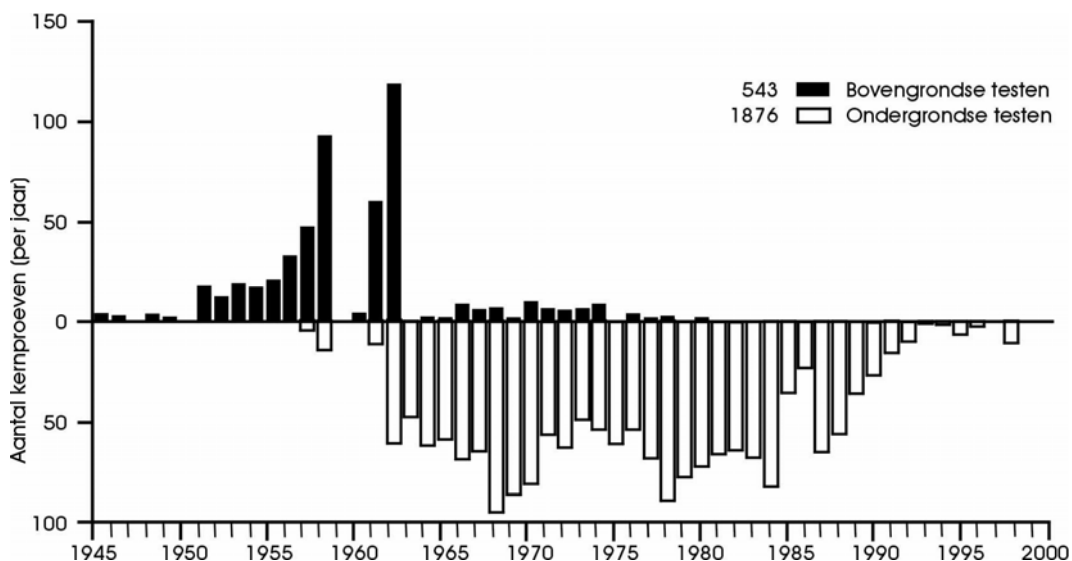
Bron: Paridaens, 2001 en 2007.

4 | Militaire toepassingen van ioniserende straling

4.1 | Aantal en kracht van boven- en ondergrondse militaire kernproeven D

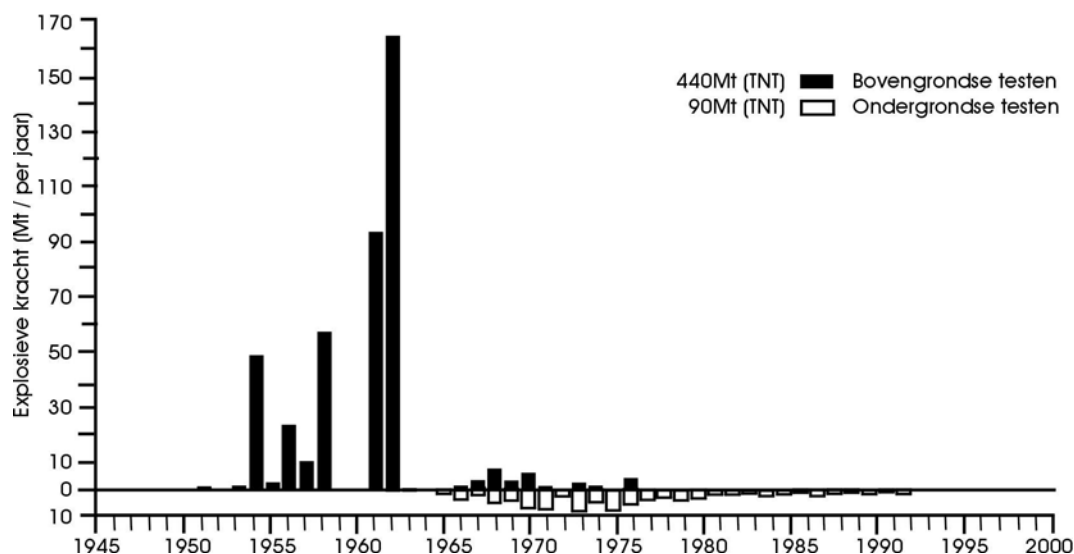
De wapenwedloop tussen de grootmachten heeft tijdens en na de tweede wereldoorlog geleid tot de ontwikkeling van talloze nucleaire wapens. Figuur 16 geeft een overzicht van het jaarlijks aantal bovengrondse en ondergrondse kernproeven en figuur 17 van de totale explosieve kracht, uitgedrukt in het aantal kilo- of megaton TNT-equivalent (TNT of trinitrotolueen is een van de meest gebruikte explosieven).

Figuur 16: Aantal bovengrondse en ondergrondse kernproeven tussen 1945 en 2000



Bron: UNSCEAR, 2000.

Figuur 17: Totale kracht van de bovengrondse en ondergrondse kernproeven tussen 1945 en 2000



Bron: UNSCEAR, 2000.

De Verenigde Staten brachten in 1945 drie atoombommen tot ontploffing: een test in de woestijn van New Mexico, gevolgd door de vernietiging van de Japanse steden Hiroshima en Nagasaki. De wapenwedloop bereikte zijn hoogtepunt in 1961 en 1962 toen Amerikanen en Russen probeerden elkaar de loef af te steken door de meeste en grootste bommen te laten ontploffen. De krachtigste bom, een 50 megaton waterstofbom (97 % fusie en 3 % fissie), werd op 30 oktober 1961 door de Sovjetunie tot ontploffing gebracht. De atoombommen die de Japanse steden Hiroshima en Nagasaki vernielden waren relatief kleine wapens, respectievelijk 15 kiloton en 21 kiloton. In 1963 ondertekenden de Verenigde Staten en de Sovjetunie een verdrag dat bovengrondse testen verbiedt. Daarna werden er bijna uitsluitend ondergrondse testen uitgevoerd, in het totaal 1876, dit is 1 à 2 per week tot eind de jaren tachtig. De ondergrondse proeven waren minder krachtig dan de bovengrondse proeven en leidden meestal niet tot verspreiding van radioactieve stoffen.

De koude oorlog heeft een enorme tol geëist inzake radioactieve verontreiniging. De verwerking van de radioactieve kernkoppen vormt nog steeds een mogelijke bron van verspreiding van radioactief materiaal. De START I- en II-akkoorden over de halvering van de Amerikaanse en Russische kernarsenalen werden afgesloten in juli 1991 en januari 1993, maar de ratificatie door de Verenigde Staten laat op zich wachten. Ondertussen zijn de twee landen toch begonnen met een afbouw van het aantal kernwapens. Waar het totaal aantal kernwapens in de wereld in 1987-1988 piekte op meer dan 60 000, is dat aantal tegenwoordig gereduceerd tot een goede 20 000. Het verdrag op de algehele stopzetting van kernproeven werd opengesteld voor ondertekening in 1996, maar ook hier ligt de Verenigde Staten dwars. Inmiddels is een wereldwijd monitoringsysteem in ontplooiing.

De wereld werd in 1998 geconfronteerd met een nucleaire wapenwedloop in Azië. India voerde 5 ondergrondse kernproeven uit waarop Pakistan reageerde met 6 ondergrondse kernproeven. Hoewel de rechtstreekse gezondheidsimpact van deze gebeurtenissen voor Vlaanderen verwaarloosbaar is, illustreren deze gebeurtenissen de kans op een nucleair conflict en wijzen op een ontoereikende wereldwijde consensus om de verspreiding van kernwapens terug te schroeven. India en Pakistan, maar ook Israël, hebben het Non-Proliferatie Verdrag (tegen de verspreiding van kernwapens) niet getekend en Noord-Korea heeft het verdrag in 2003 opgezegd en verklaarde in 2004 kernwapens in zijn bezit te hebben. De Verenigde Staten meten krypton-85 concentraties in de atmosfeer in de buurt van Korea als controle op de opwerking van splijtstof voor militaire doeleinden. Krypton-85 metingen, zoals uitgevoerd door de universiteit van Gent, kunnen een nieuw gevoelig instrument worden voor proliferatiecontrole (Eggermont, 1999). Op 31 juli 2006 verzocht de

Veiligheidsraad van de Verenigde Naties Iran zijn verrijgings- en opwerkingsactiviteiten stop te zetten. Iran weigerde aan het verzoek gevolg te geven en betwistte de inspectiebevoegdheid van het IAEA. Het feit dat geen van de 5 officiële kernwapenstaten (Verenigde Staten, Rusland, Frankrijk, Verenigd Koninkrijk en China) noch de 3 andere de facto kernwapenstaten (India, Pakistan en Israël) echt van plan lijken om hun kernwapenarsenaal volledig af te bouwen is op de lange duur een tijdbom onder het Non-Proliferatie Verdrag (Carchon, 2006).

5 | Andere toepassingen van ioniserende straling

5.1 | Bestraling voor sterilisatie en voedselconservering D

Men kan het aantal micro-organismen in producten die niet verhit mogen worden, verminderen door behandeling met hoge doses ioniserende straling. Wereldwijd zijn er een 170-tal industriële installaties voor het bestralen van producten, voornamelijk medisch wegwerpmateriaal (bv. het steriel maken van verbandgaas, injectiespuiten, infuuslangen ...), maar ook het conserveren van kunstwerken, archeologische objecten en boeken aangetast door schimmels, bacteriën of insecten. Het steriliseren van medisch wegwerpmateriaal is ook een courante praktijk in België.

De behandeling van voedsel met ioniserende straling wordt al tientallen jaren in beperkte maar toenemende mate toegepast in een 30-tal landen. Bestraling remt de kiemvorming af (bv. bij aardappelen), vertraagt het rijpingsproces van verse groenten en fruit om zo de houdbaarheid te verlengen, vernietigt ziekteverwekkende kiemen (bv. Salmonella) en doodt eventueel aanwezige insecten en parasieten. Belangrijke toepassingen zijn de conservering van gedroogde vruchten, kruiden en specerijen, en de vermindering van de kans op voedselvergiftiging van gevogelte, eiwit, garnalen en kikkerbillen. In de Europese Unie zijn er een 20-tal vergunde installaties waarvan 1 in België: Sterigenics in Fleurus. De Europese richtlijnen 1999/2/EG en 1999/3/EG inzake de behandeling van voedsel met ioniserende straling werden met de koninklijke besluiten van 12 maart en 18 december 2002 in Belgische reglementering omgezet. De maximaal toegelaten stralingsdosis van 10 kGy (zie § 8.1.1) doet volgens de wereldgezondheidsorganisatie geen problemen van voedselveiligheid rijzen. Op het etiket van de behandelde levensmiddelen moet de vermelding staan "doorstraald", "door straling behandeld" of "met ioniserende straling behandeld". Ondanks het feit dat de wereldgezondheidsorganisatie de bestraling van voedsel veilig vindt en de toepassing zelfs aanmoedigt om de kans op voedselvergiftiging te verminderen, blijft het wantrouwen van de consument groot. Tegenstanders argumenteren dat doorstraling van voedingsmiddelen overbodig is wanneer goede hygiënische praktijken worden toegepast. Voor nieuwe toepassingen dient het FANC voorafgaandelijk advies in te winnen bij de Hoge Gezondheidsraad alvorens het toestemming voor die toepassing kan verlenen.

Op 11 maart 2006 deed zich een ernstig bestralingsongeval voor in een bedrijf uit Fleurus dat recent door het Amerikaanse Sterigenics werd overgenomen. Een werknemer die de alarmprocedure negeerde werd blootgesteld aan een zeer hoge kortstondige stralingsdosis, boven de drempelwaarde voor deterministische effecten (zie § 10.1) en diende in een gespecialiseerde inrichting in Parijs te worden behandeld. Ongevalsanalyse toonde tekortkomingen aan op alle niveaus: van werknemer, over bedrijf en toezichhoudende erkende instelling tot vergunnende overheid. Het dossier is in behandeling voor de rechtbank van Charleroi. De werknemer herstelde maar houdt aan het voorval een verhoogd kankerrisico over.

6 | Productie van radioactief afval

6.1 | Opslag van geconditioneerd radioactief afval in afwachting van definitieve berging

6.1.1 / Overzicht actuele hoeveelheden radioactief afval

NIRAS definieert geconditioneerd afval als radioactief afval dat in een vorm is gebracht die op veilige en economische wijze behandeld, vervoerd, opgeslagen en geborgen kan worden.

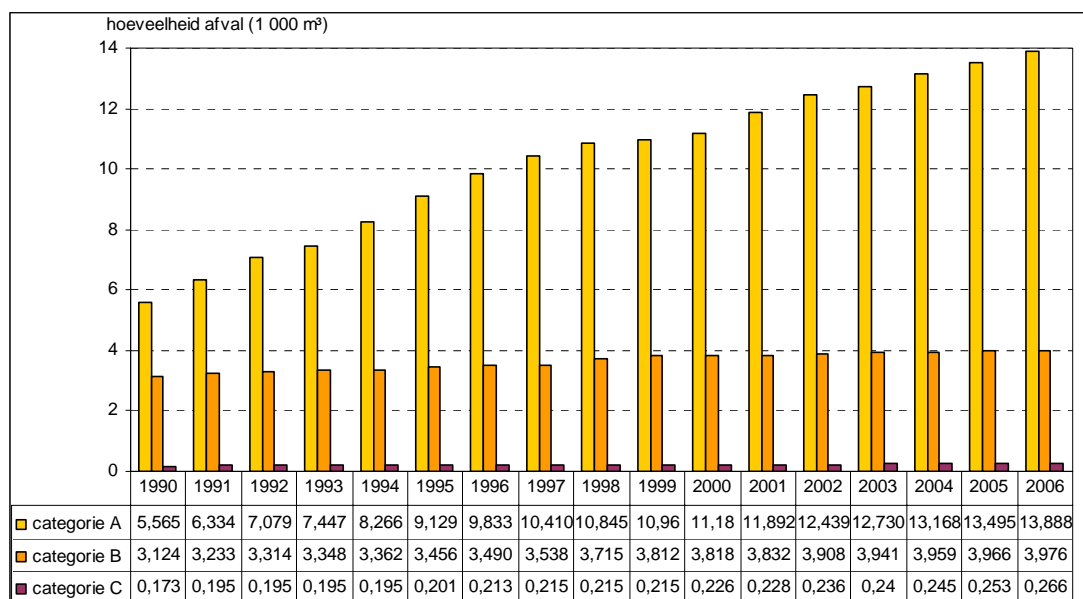
Voor de berging en het beheer op lange termijn wordt het radioactief afval ingedeeld op basis van de halveringstijd (tijd waarop de activiteit van een radionuclide met de helft vermindert):

- categorie A: laag- en middelactief kortlevend afval; voornamelijk bèta- en gammastralers met korte halveringstijden (< 30 jaar) en lage stralingsintensiteit;
- categorie B: laag- en middelactief langlevend afval; voornamelijk afval besmet met alfastralers met lange halveringstijden in concentraties die te hoog zijn voor categorie A; bevat ook wisselende hoeveelheden bèta- en gammastralers;
- categorie C: hoogactief afval; met warmteafgifte > 20 W/m³.

België stortte in de periode 1967-1982, net als vele andere landen, radioactief afval in zee. In totaal werd 15 765 m³ geconditioneerd laagactief en radiumhoudend afval in de Noord-Atlantische Oceaan gedumpt op een diepte van 4 000 m. In 1982 stopte België vrijwillig met deze activiteit, maar het ondertekende pas in 1993 de Conventie van Londen die een definitief verbod op zeeberging inhield. Sinds 1983 wordt dit soort afval opgeslagen bij Belgoprocess in Dessel.

Het grootste deel van het nucleair afval is afkomstig van de *splijstofcyclus*. Deze cyclus is opgebouwd rond de nucleaire elektriciteitsproductie en bestaat in Vlaanderen uit splijstofproductie, kerncentrales, afvalverwerking en nucleair onderzoek. Belgoprocess – de industriële dochtermaatschappij van NIRAS – verwerkt, conditioneert en slaat het radioactief afval op. Figuur 18 toont de hoeveelheden radioactief afval die bij Belgoprocess in Dessel worden opgeslagen. In afwachting van berging nemen deze hoeveelheden jaarlijks toe.

Figuur 18: Evolutie van de opslag van geconditioneerd radioactief afval bij Belgoprocess in Dessel (1990-2006)



Niet-opgewerkte gebruikte kernbrandstof en ontmantelde stoomgeneratoren liggen in Doel en Tihange opgeslagen en zijn niet verrekend in deze figuur.

Bron: NIRAS, 2007.

Eind 2002 was er heel wat mediabelangstelling voor enkele tientallen *vaten* met radioactief afval bij Belgoprocess die gebreken vertoonden. De vaten dateerden uit de jaren 80 en waren gedeeltelijk bestemd voor storting in zee, wat echter niet meer heeft plaatsgevonden na 1982. Een aantal gecementeerde vaten vertoonden roestvorming met soms perforatie van het vat tot gevolg, en bij een aantal vaten gebitumineerd afval werd zwelling vastgesteld. In beide gevallen is er geen radioactiviteit in de omgeving terechtgekomen. NIRAS controleert sinds 2003 de vaten met laagradioactief afval op fouten. Midden 2007 was meer dan 90 % geïnspecteerd en uit dit onderzoek blijkt dat 1 400 van de 34 000 vaten niet aan de kwaliteitseisen voldoen. In 2007 werd ook gestart met de controle van de 16 000 vaten met middelactief afval. Na een eerste nog onvolledige inspectie van de buitenkant van de stapeling werden 82 niet-conforme vaten aangetroffen. De meeste probleemvaten werden destijds door het SCK geproduceerd en voldoen niet aan de *huidige* acceptatiecriteria voor oppervlakteberging. Deze problematiek toont aan dat de wijziging van acceptatiecriteria door veranderende bergingskeuze een probleem kan vormen.

NIRAS raamt de afvalvolumes die het tegen 2070 zal moeten beheren op:

- 70 500 m³ categorie A afval, waarvan 51 800 m³ afkomstig van de ontmanteling van de nucleaire installaties; geconditioneerd onder de vorm van cement: 66 300 m³, polymeer: 700 m³, bitumen: 500 m³ en nog onbekend: 3 000 m³;
- 8 900 m³ categorie B afval; geconditioneerd onder de vorm van cement: 4 160 m³, bitumen: 3 400 m³ en nog onbekend: 1 340 m³;
- 4 900 m³ categorie C afval, waarvan 90 % bestraalde kernbrandstof en 10 % opwerkingsafval, indien het moratorium voor opwerking gehandhaafd blijft.

Deze raming houdt geen rekening met afval dat in het kader van de splijtstofcyclus oorspronkelijk in het buitenland werd geproduceerd. Meer bepaald de grote hoeveelheden mijnafval bij de winning van uranium en verarmd uraniumafval afkomstig van de verrijdingsfabrieken. Het verarmd uranium is verpakt in afvalvormen die niet voorzien zijn op langdurige opslag. De langetermijnverantwoordelijkheid van Synatom, die een participatie van 11 % heeft in de Franse verrijdingsfabriek Eurodif, is voor dit type afval nog niet duidelijk.

De wet op de *kernuitstap* van 31 januari 2003 bepaalt dat de kerncentrales dicht moeten zodra ze 40 jaar oud zijn. Een wetwijziging die de sluiting met 20 jaar zou uitstellen, heeft gevolgen voor het aspect radioactief afval. De bestraalde kernbrandstof neemt elk jaar met zo'n 120 ton toe (voor de centrales van Doel en Tihange samen en indien het moratorium voor opwerking gehandhaafd blijft), zodat de hoeveelheid hoogactief afval met de helft zou verhogen. De toename van het laag- en middelactief afval zou – zonder een kernongeval – 10 % bedragen omdat het grootste deel ervan afkomstig zal zijn van de ontmanteling van de bestaande nucleaire installaties.

Internationaal werkt men aan de ontwikkeling van *generatie 4 reactoren* met een gesloten splijtstofcyclus. Natrium- of gasgekoelde snelle neutronenreactoren splijten uranium-238 en verbruiken tot 100 keer minder natuurlijk uranium. Een doorgedreven opwerking met chemische scheiding van plutonium en andere transuranen en de omzetting ervan (verbranding) in een speciaal ontworpen versneller of kweekreactor reduceren de warmteafgifte, waardoor de benodigde lengte van de ondergrondse bergingsgalerijen voor het hoogactief afval afkomstig van een dergelijke splijtstofcyclus bij geologische berging een factor 3 kleiner is dan voor de huidige types centrales. Plutonium is net als de andere transuranen weinig mobiel in klei, zodat de radiologische impact bij het normale evolutiescenario wordt bepaald door de veel mobilere langlevende splijtingsproducten (zie figuur 21). Hun activiteit hangt af van het aantal splijtingen en is dus evenredig met de geproduceerde energie, zodat de nieuwe reactortypes maar een gering effect hebben op de verlaging van de radiologische impact ten opzichte van de huidige kerncentrales (2^{de} generatie) (Marivoet, 2006). Geologische berging van hoogactief afval blijft dus ook bij kerncentrales van de 4^{de} generatie noodzakelijk. Bovendien zorgen de lozingen van de opwerkingsfabriek (waar de chemische scheiding van de bestraalde brandstof plaatsgrijpt) voor een bijkomende dosisbelasting (zie tabel 10 in § 8.3 in deel indicatoren), waardoor er gevaar bestaat voor afwenteling van milieudruk naar andere milieucompartmenten.

6.1.2 / Berging van radioactief afval

Europees wordt als beginsel gehanteerd dat ieder land zelf verantwoordelijk is voor zijn eigen radioactief afval, inclusief de eindberging daarvan. De basisprincipes waaraan een bergingsinstallatie voor radioactief afval moet voldoen, zijn:

- bescherming van mens en milieu door het radioactief afval vooraf te immobiliseren en nadien voldoende lange tijd uit het leefmilieu te isoleren;
- beperking van de lasten voor toekomstige generaties door op termijn een passieve bescherming te bieden; bedoeling is een evenwichtige verdeling te krijgen van de lasten en de lasten verbonden aan kernenergie tussen de opeenvolgende generaties.

6.1.2.1 / Oppervlakteberging voor kortlevend radioactief afval (categorie A)

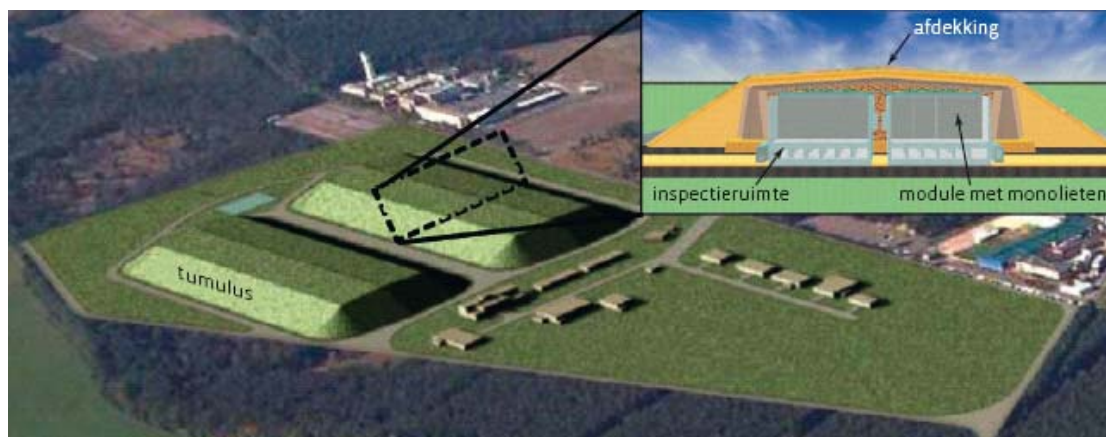
Overeenkomstig bovenvermelde principes moet kortlevend radioactief afval (categorie A) gedurende enkele honderden jaren van mens en milieu geïsoleerd worden. Nadien kan de bergingsite door de sterke daling van de radioactiviteit vrijgegeven worden. Voor het langetermijnbeheer heeft men de keuze voor een oppervlakteberging met een controle- en toezichtperiode van ongeveer 300 jaar of voor diepe berging.

De federale regering heeft in 1998 voor de zoektocht naar een bergingslocatie voor het categorie A afval besloten om de klassieke ingenieursbenadering de rug toe te keren en te kiezen voor een meer participatieve benadering in gemeenten met een nucleaire bedrijvigheid. Drie partnerschappen tussen gemeenten en NIRAS werden opgericht, met name STOLA in Dessel (1999), MONA in de buurgemeente Mol (2000) en PALOFF in Fleurus-Farciennes (2003). Werkgroepen binnen deze partnerschappen onderzochten of er binnen hun gemeenten een maatschappelijk draagvlak zou kunnen zijn voor een project met maatschappelijke meerwaarde. In Dessel en Mol werden in 2005 voorontwerpen voor oppervlakte- of diepe berging goedgekeurd in de gemeenteraad mits aan een aantal voorwaarden, waaronder een akkoord over een maatschappelijk luik met compensaties voor de lokale bevolking, voldaan wordt. In Fleurus heeft de gemeenteraad op eenparig advies van het schepencollege het bergingsvoorstel van PALOFF verworpen. Op 23 juni 2006 heeft

de federale regering gekozen voor een oppervlakteberging in Dessel op de grens met Mol. Het maatschappelijk luik voor de huidige en toekomstige bevolking ter compensatie voor de komst van de berging moet nog worden geconcretiseerd. Om het dossier op lokaal niveau verder op te volgen en de bestaande participatieve aanpak uit te breiden, werden de mandaten van STORA in Dessel (opvolger van STOLA) en MONA in Mol verruimd tot de bespreking van alle afvaltypes, dus ook het categorie B en C afval en heeft NIRAS geopteerd voor samenwerking tussen beide gemeenten. De regeringsbeslissing heeft het bergingsproject voor categorie A afval in de ontwerpfase gebracht. De bouwfase is volgens NIRAS voorzien in de periode 2011-2016. Ondertussen is het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC) begonnen met de bepaling van zijn vergunningsstrategie.

Figuur 19 stelt het STOLA-voorontwerp van oppervlakteberging voor. Het bestaat uit twee dubbele rijen afgesloten betonnen bergingsmodules. Elke module is zes lagen hoog gevuld met 936 betonnen monolieten of caissons met buitenafmetingen 1,94 m (l) x 1,94 m (b) x 1,34 m (h) die het geconditioneerde afval bevatten. De modules zijn beschermd tegen de insijpeling van regenwater door middel van een meerlagige afdichting met als voornaamste bestanddelen 1,5 m klei en een 3 m dikke biologische laag die het geheel het uitzicht van een tumulus geeft. De oppervlakteberging komt op een terrein van enkele tientallen hectaren dat in het oosten grenst aan Belgoprocess, waar het categorie A afval ligt opgeslagen. Op basis van de geschatte hoeveelheden zou de installatie kunnen beperkt blijven tot 34 bergingsmodules. Bij wijze van voorzorg voorziet het ontwerp 40 modules. Elke tumulus zou in dat geval 412 m lang en 154 m breed zijn en een hoogte van 20 m hebben.

Figuur 19: Inplanting van het STOLA-ontwerp van oppervlakteberging in Dessel



Bron: STOLA, 2005.

De belangrijkste barrières die de goede werking van de bergingsinstallatie na de uitbatingsfase moeten verzekeren zijn van technische aard:

- de voorbehandeling of conditionering van het afval;
- de fysische en chemische eigenschappen van de betonnen monolieten en bergingsmodules om het afval gedurende honderden jaren in te sluiten;
- de afdekking met klei om de infiltratie van regenwater te verhinderen.

De langetermijnimpact van de bergingsinstallatie wordt onderzocht voor verschillende scenario's. Het normale evolutiescenario, dat rekening houdt met de verwachte degradaties van de diverse barrières, is het referentiescenario. Daarnaast worden ook intrusiescenario's onderzocht waarbij de barrières van de bergingsinstallatie door menselijke activiteiten zouden omzeild worden of versneld aangetast.

NIRAS identificeerde de radionucliden die het meest tot de dosisbelasting bijdragen op basis van hun fysische en chemische eigenschappen en de inventaris aan radioactieve afvalstoffen. Stabiele isotopen van hetzelfde element vormen een belangrijke informatiebron

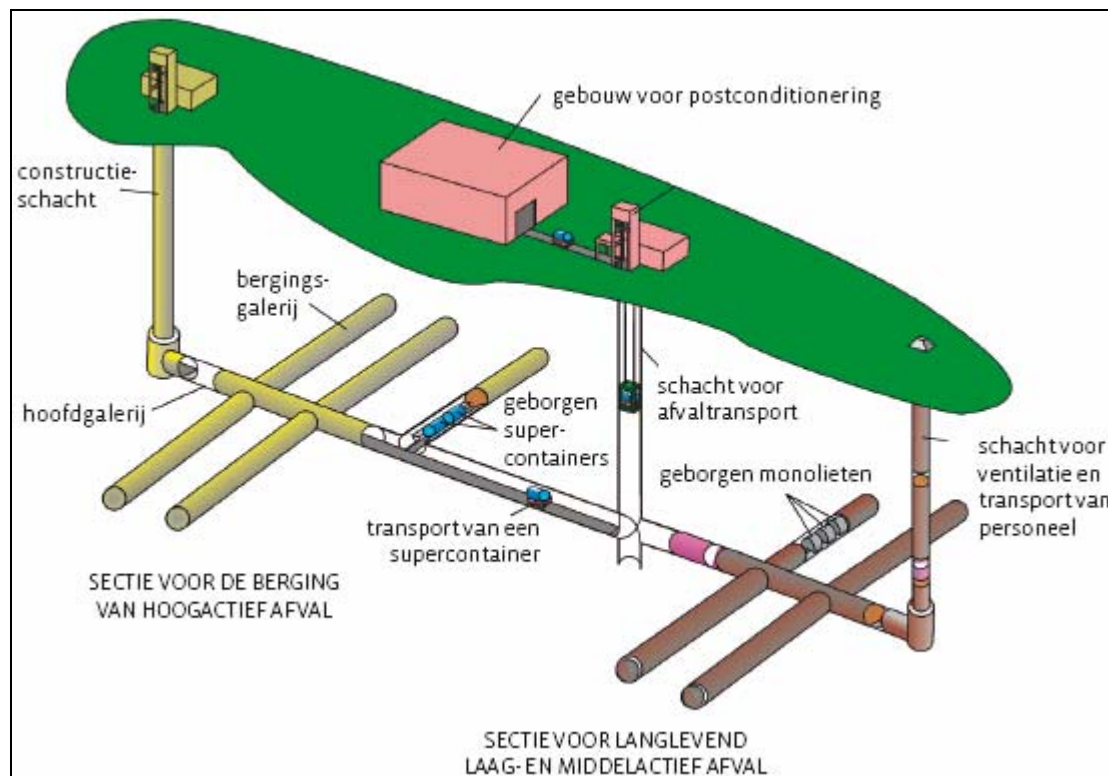
bij de scenarioberekeningen vanaf de vrijzetting uit het geconditioneerde afval tot de blootstelling van de bevolking. De radiologische impact voor de meest blootgestelde leden van de bevolking wordt uitgedrukt in mSv/j en mag de internationaal aanbevolen dosisbeperking van 0,1 à 0,3 mSv/j niet overschrijden (ICRP, 2000; IAEA, 1999). De berekende radiologische impact voor toekomstige generaties voor het voorontwerp van oppervlakteberging in Dessel bedraagt 0,002 mSv/j. Dit is klein vergeleken met de doses die door natuurlijke stralingsbronnen en medische toepassingen worden opgelopen (figuur 38).

6.1.2.2 / Diepe geologische berging voor langlevend (categorie B) en hoogactief (categorie C) radioactief afval

Voor het langlevende en hoogactieve radioactief afval (categorieën B en C) is een oplossing nodig die verzekert dat het afval gedurende honderdduizenden jaren buiten de levensruimte (biosfeer) van de mens blijft. Diepe geologische formaties komen hiervoor in aanmerking. Binnen de Europese Unie onderzoekt men steenzout, kristallijne rots en klei. Het onderzoek in België spitst zich toe op berging in klei met de bouw begin jaren '80 van het ondergrondse laboratorium Hades op een diepte van 224 m, in het midden van de 100 m dikke Boomse kleilaag, onder het SCK in Mol.

Figuur 20 schetst een beeld van het huidige ontwerp voor geologische berging. Het bergingsconcept werd in 2004 grondig gewijzigd om de weerstand tegen corrosie van de metalen verpakking (zie verderop) te verhogen en om beter te voldoen aan de vereisten voor hoogactief afval en in het bijzonder voor de directe berging van bestraalde splijtstof. Het nieuwe concept omvat verschillende schachten, een transportgalerij en een aantal zones (per afvaltype) met bergingsgalerijen. De vaten met hoogactief afval worden in een bijkomende verpakking geplaatst: de zogenaamde supercontainer die bestaat uit een 3 cm dikke koolstofstalen oververpakking, omgeven door een 70 cm dikke betonnen mantel in een roestvrijstalen omhulsel. De oververpakking is een belangrijke barrière die als functie heeft de radionucliden gedurende de eerste duizenden jaren in te sluiten en te isoleren van het poriënwater in de klei. Tijdens deze periode zal de warmteafgifte van het afval de omringende klei met enkele tientallen graden opwarmen, wat de eigenschappen van de klei kan verstoren. Een test op ware grootte van de thermische effecten op Boomse klei wordt momenteel in het ondergrondse laboratorium voorbereid (het Praclay-experiment). De functie van de dikke betonnen mantel tijdens de bergingsfase is het beschermen van de werknemers tegen straling. Na de berging zorgt de mantel ervoor dat gedurende zeer lange tijd gunstige chemische condities zullen heersen, zodat de oververpakking uiterst traag zal corroderen.

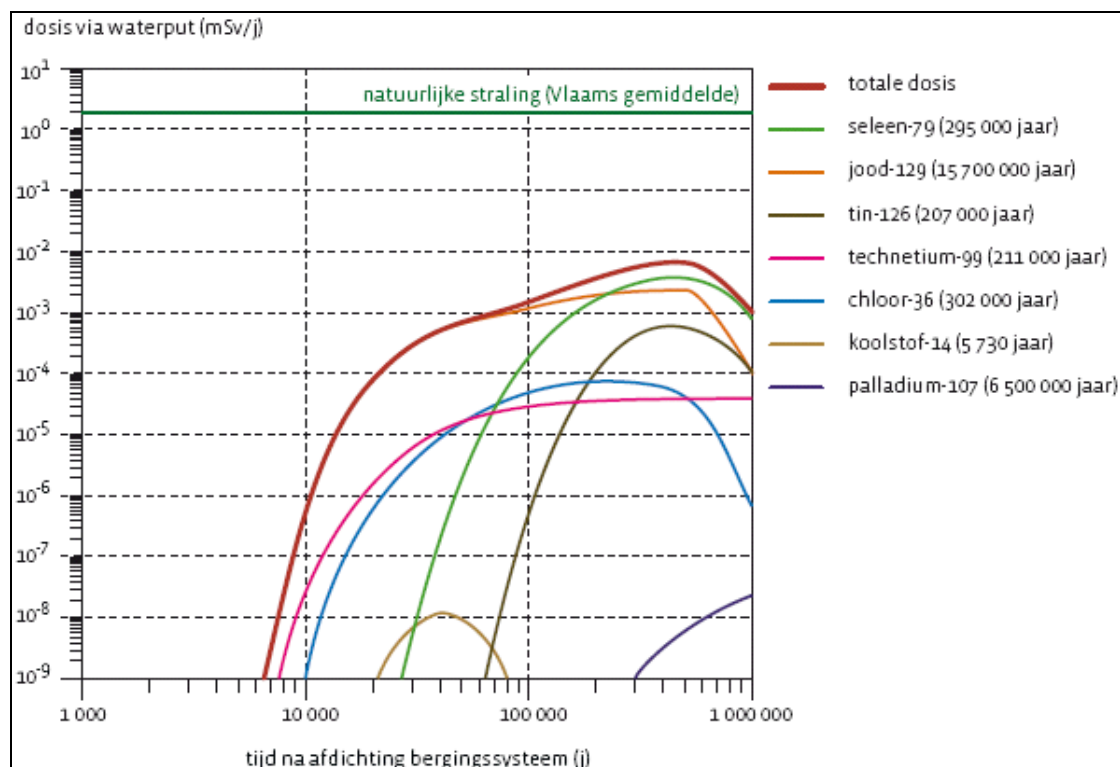
Figuur 20: Ontwerp voor geologische berging van langlevend en hoogactief afval in Boomse klei



Bron: NIRAS en SCK, 2007.

De methodiek om de veiligheid van het bergingssysteem te evalueren is dezelfde als voor de oppervlakteberging op de veel langere tijdshorizon na. Naast het referentiescenario dat de verwachte evolutie van het bergingssysteem beschrijft, worden ook een aantal mogelijke maar minder waarschijnlijke scenario's (waaronder intrusiescenario's) onderzocht. Figuur 21 toont de verwachte evolutie van de blootstelling voor iemand die in de omgeving van de bergingssite zou leven en die zijn drinkwater en irrigatiewater zou oppompen uit een diepe put vlak boven de Boomse kleilaag op de plaats waar, volgens de berekening, de hoogste radionuclideconcentraties zullen voorkomen. Klei is een heel efficiënte barrière tegen de migratie van radionucliden. Het duurt tenminste 5 000 jaar vooraleer de meest mobiele radionucliden uit het midden van de Boomse kleilaag naar de bovenliggende aquifer kunnen migreren. De meeste radionucliden vervallen tot verwaarloosbare activiteiten tijdens hun verblijf in de kunstmatige barrières of tijdens hun transport doorheen de kleilaag. De hoogste doses worden tussen 100 000 en 1 miljoen jaar na voltooiing van de berging verwacht, maar dan nog blijven ze onder de 0,01 mSv/j. Dit is een grootteorde lager dan de internationale dosisbeperking van 0,1 à 0,3 mSv/j.

Figuur 21: Verwachte dosis voor de meest blootgestelde leden van de bevolking ten gevolge van de berging van het Belgisch radioactief afval



De figuur is opgemaakt uitgaande van een levensduur voor de kerncentrales van 40 jaar. Enkel de radionucliden (met hun halveringstijd) die het meest tot de dosis bijdragen zijn afzonderlijk weergegeven. Het totaal omvat ook de radionucliden met een kleinere bijdrage.

Bron: SCK, 2007.

Na ontlasting van de gebruikte splijtstof uit de reactor zal men minstens 60 jaar wachten alvorens het hoogactief afval (zowel verglaasd afval als gebruikte splijtstof) naar de geologische bergingssite over te brengen. Dit doet men om de thermische belasting van de Boomse klei te beperken. NIRAS voorziet een stapsgewijze berging van het hoogactief en langlevend afval, waarbij het langlevend afval vanaf 2035 zou geborgen worden en het hoogactief afval nog enkele tientallen jaren later. Ondertussen gaat het onderzoek verder en heeft de overheid nog geen definitieve keuze voor de Boomse klei als bergingsmedium gemaakt. Een aantal voorbeelden van onderzoeksthema's voor de berging zijn:

- 40 % van het categorie B afval is in bitumen geïmmobiliseerd. Het komt voornamelijk van de vroegere Europese opwerkingsfabriek Eurochemic in Dessel en bevat tot 30 % oplosbare zouten, voornamelijk natriumnitrat. In tegenstelling tot het hoogactief afval wordt de weerstand tegen uitloging van de bitumenmatrix niet beschouwd in de veiligheidsevaluatie; men veronderstelt hier dat de ingesloten radionucliden onmiddellijk vrijkomen in het kleimassief. Potentiële problemen zijn het verstoring effect van het uitgeloopte natriumnitrat op de gunstige eigenschappen van de klei en de opbouw van zwellingsdruk door gasproductie en door opname van poriënwater.
- De uitgraving en bouw van de berging induceert microbiële activiteit die voor verschillende problemen kan zorgen. Methaanproducerende bacteriën en nitraatreducerende bacteriën produceren gas, waardoor spanningen in het kleimassief ontstaan die tot breuken zouden kunnen leiden. Boomse klei bevat ook 1 tot 5 % pyriet. De oxidatie van een deel ervan door contact met omgevingslucht tijdens de uitgraving resulteert in een grote hoeveelheid sulfaat, die na afsluiting van de bergingszone in een zuurstofarme omgeving in sulfide kan omgezet worden door sulfaatreducerende bacteriën. Een goede kennis van deze cyclus en de invloed ervan op de corrosie en degradatie van de kunstmatige barrières is belangrijk voor de veiligheidsevaluatie.

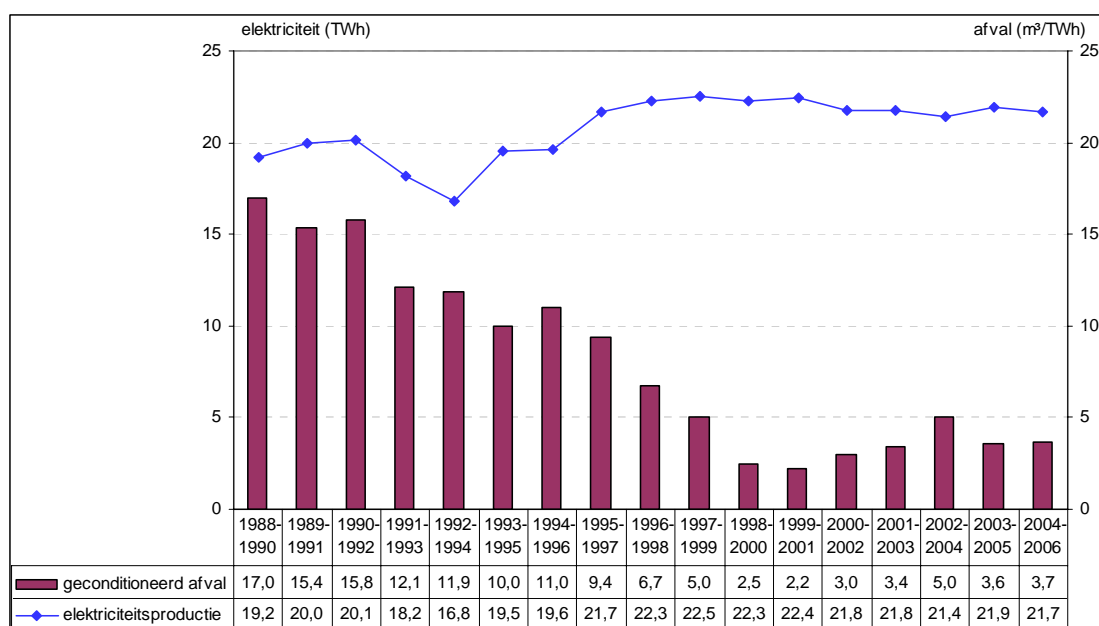
- De onzekerheid over de levensduur van de kunstmatige barrières over een tijdspanne van meer dan 1 000 jaar wordt opgevangen door de stabiliteit van de 100 m dikke kleiformatie. Inderdaad, de levensduur van zowel het hoogactief afval (glas, niet-opgewerkte splijtstof) als van de metallische containers in de condities van het recente bergingsconcept kan nog niet met voldoende zekerheid worden voorspeld. Maar anderzijds kan men wel stellen dat de natuurlijke Boomse kleiformatie nog minstens een miljoen jaar stabiel zal zijn;
- De modellering van de biosfeer via het scenario van een waterput op de meest besmette plaats van de aquifer is conservatief maar onwaarschijnlijk. In de praktijk zullen de radionucliden via de aquifer in een rivier of kwelgebied aan het oppervlak komen. Het rivierscenario is door de grote verdunning verwaarloosbaar. In kwelgebieden is er een intense interactie tussen het opborrelende grondwater en de bodem. Lokale biosfeerprocessen zullen de eigenschappen van de radionucliden wijzigen, wat tot ophoping in specifieke milieucompartimenten kan leiden, met andere overdrachtmechanismen naar de mens tot gevolg. Naar de langetermijnpact van deze processen in natuurlijke ecosystemen, gecombineerd met mogelijke wijzigingen in het gebruik van de gronden (bv. van bos naar landbouw), is nog maar weinig onderzoek gedaan. Dit relateert enigszins het gebruik van de dosisschattingen in figuur 21 als risico-indicatoren voor situaties van chronische blootstelling over lange termijnen.

6.2 | Productie van kernafval in nucleaire centrales P

6.2.1 / Afvalproductie in kerncentrales

Figuur 22 toont het driejaarlijks gemiddelde van de door kerncentrales afgevoerde hoeveelheden geconditioneerd laag- en middelactief afval naar NIRAS. Over de laatste 17 jaar is de hoeveelheid radioactief afval per eenheid opgewekte elektriciteit in de kerncentrales van Doel sterk afgenomen. De afvoer naar NIRAS lag in 2000 en 2001 praktisch stil om administratieve redenen. In 2002 kwam ze met een inhaalbeweging terug op gang.

Figuur 22: Evolutie van de elektriciteitsproductie en de hoeveelheid laag- en middelactief geconditioneerd afval (driejaarlijks gemiddelde) die wordt afgevoerd naar NIRAS (Doel, 1990-2006)



Bron: Electrabel, 2007.

Figuur 22 houdt geen rekening met de 120 ton *hoogactieve* bestraalde kernbrandstof die elk jaar in België ontstaat en waarvan ongeveer de helft afkomstig is van Doel. De totale hoeveelheid bestraalde kernbrandstof, ontladen uit de reactoren in Doel sinds de start van de elektriciteitsproductie, bedroeg 1 537 ton eind 2006. Het grootste deel ervan, 1 226 ton, ligt op de site in Doel opgeslagen in splijtstofdokken of in roestvrij stalen containers. Eind 2006 was daarmee 34 % van de huidige opslagcapaciteit benut. De overige 311 ton uit Doel en 359 ton uit Tihange werden in het Franse La Hague opgewerkt om er nog splijtbaar materiaal uit te halen. Het hoogradioactief afval, voornamelijk splijtingsproducten, dat na opwerking overblijft, werd ter plaatse verglaasd, d.w.z. ingebed in een borosilicaatglas. Het afvalglas werd vervolgens in een roestvrij stalen container gegoten. Elke container bevat 150 liter (ongeveer 400 kg) gestold glas, waarvan 14 % splijtingsproducten. In het totaal werden 420 glascontainers van Frankrijk naar Belgoprocess in Dessel overgebracht waar ze gedurende een periode van meer dan 50 jaar met lucht worden gekoeld in afwachting van berging in een stabiele geologische laag. Het laatste transport van verglaasd opwerkingsafval vond plaats op 3 april 2007. De kwaliteitscontrole op het verglaasde opwerkingsafval blijft beperkt tot nazicht van gegevens afgeleid uit het productieproces. De federale regering kwam op 8 juli 2005 op zijn beslissing terug om aanvullende controles op het verglaasd afval op te leggen. NIRAS werd wel verzocht een overlegprocedure op te stellen om in de toekomst karakterisatieproblemen aan te pakken. Een nota daarover kreeg tot nu toe geen gevolg van de voogdijminister. In de periode 2009 tot 2019 zullen nog andere afvalvormen, zoals de hulzen waarin de splijtstof opgesloten zat, naar Vlaanderen terugkeren.

Daarnaast is er nog transport en opwerking van de hoogverrijkte, bestraalde brandstof van de BR2-onderzoeksreactor van het SCK.

Ook het plutonium kwam naar België terug voor de productie van MOX-brandstof. De fabricage van MOX voor Electrabel werd in 2003 beëindigd en de MOX-fabriek van Belgonucleaire in Dessel heeft in 2006 zijn deuren gesloten wegens gebrek aan buitenlandse bestellingen. Belgonucleaire heeft gelijktijdig een ontmantelingsdossier bij de bevoegde overheden ingediend en heeft in 2007 een voorlopige ontmantelingsvergunning van het FANC gekregen. De ontmanteling van de handschoenkasten en allerlei infrastructuren en de ontsmetting en vrijgave van de industriële gebouwen zal 5 jaar in beslag nemen. Dit zal naar schatting 200 m³ geconditioneerd plutoniumhoudend afval en 80 m³ andere soorten geconditioneerd radioactief afval opleveren. De vrijgegeven gebouwen zouden daarna een nieuwe niet-nucleaire bestemming kunnen krijgen.

Het SCK ontmantelde de *prototype-kerncentrale BR3* (11 MW) als proefproject voor het ontwikkelen van technieken om de hoeveelheid radioactief afval zo klein mogelijk te houden. Het grootste deel van het gegenereerde afval kon na eventuele behandeling als niet-radioactief afval vrijgegeven worden. Het resterende radioactieve afval werd naar Belgoprocess afgevoerd. Hiervoor werd een vergunning door het FANC afgeleverd na verduidelijking van de mogelijke afvalaanpak door NIRAS.

De vervanging van de *stoomgeneratoren* van de kerncentrales van Doel en Tihange is ook een vorm van ontmanteling. De besmette generatoren werden niet naar Belgoprocess afgevoerd maar liggen voorlopig in Doel en Tihange opgeslagen. De conditionering van de stoomgeneratoren werd nog niet bepaald, waardoor hun afvalvolume nog niet volledig in het bergingsprogramma van NIRAS is opgenomen. De vergunningsprocedure voor de vervanging van de stoomgeneratoren van Doel 1 is in 2007 opgestart.

6.2.2 / Afvalbeheer in de nucleaire industrie

Zie § 6.1.2.

6.3 | (Bio-)medisch nucleair afval P

6.3.1 / Productie van nucleair afval in de (bio-)medische sector

De grootste fractie van het kortlevend nucleaire afval in *hospitelen* wordt via de patiënt verspreid in het milieu. Daarnaast zijn er verspreide, gereguleerde maar weinig

gecontroleerde lozingen in riolen door hospitalen en biomedische laboratoria. De *biomedische laboratoria* gebruiken in vergelijking met de nucleaire geneeskunde veel minder radiofarmaca.

Een relatief nieuwe toepassing van radionucliden situeert zich in de *diergeneeskunde*. Het gebruik van radionucliden voor medische beeldvorming bij dieren concentreert zich, maar niet exclusief, in universitaire centra.

Het aandeel van de medische sector in de productie van radioactief afval in België is klein. In 2006 vertegenwoordigde het afval van ziekenhuizen en biomedische laboratoria slechts 1,2 % van het totale volume niet-geconditioneerd afval aangevoerd bij Belgoprocess (figuur 4). Occasioneel worden oude therapeutische bronnen voor geologische berging afgevoerd. Doordat een sluitende inventaris van het verbruik van radionucliden in de nucleaire geneeskunde en therapie moeilijk is, en het overgrote deel via de ambulante patiënt in het milieu terecht komt of ondertussen vervalt, is een precieze schatting van het medisch-nucleair afval niet mogelijk.

6.3.2 / Beheer van (bio-)medisch nucleair afval

Gebruikers en verantwoordelijken voor nucleair ziekenhuisafval signaleren dat er geen duidelijk overzicht bestaat van het medisch nucleair afval. Er bestaat vaak geen sluitende inventaris van diensten noch van binnenkomende en gebruikte materialen. De indruk bestaat dat in veel gevallen nucleair afval tijdelijk wordt opgeslagen en daarna geloosd. De activiteit van het materiaal wordt daarbij niet of onnauwkeurig gemeten en er wordt soms weinig verschil gemaakt tussen de verschillende radionucliden. De nieuw ontwikkelde technieken om op basis van meting van remstraling ook laagenergetische bètastralers nauwkeurig te detecteren in het biomedisch afval hebben de verbruikers aangezet tot meer selectieve ophaling van afval en betere procesbeheersing. Enkele jaren terug maakte een studiedag over de aanpak van het nucleair biomedisch ziekenhuisafval uit België en Nederland al duidelijk dat er een toenemende trend is voor vervalopslag van afval in regionale centra (BVS, 2000). Daarbij gaat toenemende aandacht uit naar bacteriologische risico's naast radiologische. Vanuit de Belgische centra is er kritiek op de prijsstructuur van NIRAS die geen radioactiviteit maar volume of gewicht belast. NIRAS gaf op een studiedag aan dit probleem te onderkennen, maar acht een verandering niet evident (BVS, 2000). De Hoge Gezondheidsraad drong er bij NIRAS op aan om het langlevende koolstof-14 en tritium afval, dat door Belgoprocess bij verbranding gecontroleerd geloosd wordt in de atmosfeer en de Molse Nete, niet langer op gelijke voet te plaatsen met de andere nucleaire afvalstromen. Om de situatie te verbeteren stelde de Belgische Vereniging voor Nucleaire Geneeskunde een document op met aanbevelingen voor een verantwoord afvalbeheer (BSNM, 2003b).

Om de hoge NIRAS-tarieven te ontlopen onderzochten de Vlaamse universiteiten de mogelijkheid om het bio-medisch tritium en koolstof-14 afval onder bepaalde voorwaarden vrij te geven en als risicohoudend ziekenhuisafval te verbranden. De KUL heeft als eerste, in oktober 2004, een vergunning van het FANC gekregen voor het verbranden van het vaste tritium en koolstof-14 afval bij INDAVER en Machiels in plaats van bij Belgoprocess. Om de voorwaardelijke vrijgave en verbranding van vloeibaar afval mogelijk te maken werkt het FANC aan een aanpassing van het ARBIS. De andere Vlaamse universiteiten, maar ook Janssen Pharmaceutica onderzoeken momenteel dezelfde piste.

Niet-nucleaire afvalverwerkende bedrijven hebben stralingsmonitoren aan hun toegangspoorten geïnstalleerd om de toegenomen aanvoer van radioactief besmet afval te detecteren. Regelmatig worden significante overschrijdingen van de achtergrondstraling vastgesteld. De alarmen zijn vooral afkomstig van ziekenhuisafval, van huisvuil besmet met radionucliden van ambulante patiënten en van materialen waarin van nature of door productieprocessen een hogere concentratie aan natuurlijke radionucliden aanwezig is. Sommige uitbaters van verbrandingsovens hebben beslist om alle bijkomende kosten, zoals het scheiden van het afval, het terugsturen van besmet afval, de vervalopslag of het afvoeren naar NIRAS aan de afvalproducenten aan te rekenen. Deze kosten kunnen aanzienlijk zijn en sommige nucleair geneeskundige diensten ervaren het als onbillijk dat niet alle afvalverwerkende bedrijven hierin hetzelfde beleid voeren (Hermans, 2004).

In 2006 heeft het FANC richtlijnen uitgevaardigd voor de uitbaters van installaties uit de niet-nucleaire sector die een meetpoort voor de detectie van radioactieve stoffen bezitten. Naast maatregelen inzake stralingsbescherming en acceptatiedrempels worden ook de stappen beschreven die dienen genomen te worden ingeval van een alarm op een meetpoort. Het Nucleair en Technologisch Centrum (NuTeC) van de XIOS Hogeschool Limburg heeft de richtlijnen van het FANC aan de praktijk getoetst bij een afvalverbrandingsinstallatie, een ziekenhuis, een recyclagepark, een overslagstation en een aantal kringloopcentra. De meeste alarmen bleken van medische radionucliden afkomstig te zijn. Drie Limburgse ziekenhuizen met een nucleair geneeskundige afdeling hebben daarna beslist om zelf een meetpoort aan te schaffen en de controle van het ziekenhuisafval op zich te nemen (NuTeC, 2005).

6.4 | Inventaris van de nucleaire passiva P

De programmawet van 12 december 1997 geeft NIRAS de opdracht tot *inventarisatie* van alle nucleaire installaties en van alle plaatsen die radioactieve stoffen bevatten in België, en tot controle van de fondsen voor de verwerking en berging van het radioactief afval, inclusief het ontmantelingsafval. NIRAS heeft begin 2003 de eerste vijfjaarlijkse inventaris (1998-2002) aan de regering overhandigd. Die inventaris omvat 1 064 sites verdeeld over 951 exploitanten die houder zijn van 3 510 vergunningen. Het betreft de nucleaire industrie, medische instellingen, onderzoekscentra en de talrijke bedrijven die ioniserende straling gebruiken voor diverse industriële toepassingen. De inventaris van het radioactief afval bedraagt 21 000 m³ geconditioneerd en niet-geconditioneerd afval en 9 200 bronnen. Het afval dat zal ontstaan tijdens de ontmantelingsfase van alle vergunde installaties wordt geraamd op 47 000 ton radioactief afval, 1 495 000 ton niet-radioactief afval en bijna 1 900 bronnen.

De kostprijs voor het beheer en de berging van de geïnventariseerde radioactieve stoffen op 1 januari 2000 wordt geraamd op 5,6 miljard euro en is hoofdzakelijk gekoppeld aan een vijftiental sites. De nucleaire exploitanten en Synatom hebben provisies vastgelegd die deze kosten voor bijna 84 % zouden moeten dekken. Dit zijn voor 50 % bestaande provisies en voor 34 % provisies die zullen aangelegd worden binnen een bestaand maar periodiek te herzien financieringsmechanisme. Het saldo dat niet gedekt was op 1 januari 2000 heeft vooral betrekking op de ontmanteling en sanering van de proefopwerkingsfabriek Eurochemic in Dessel en de vroegere afvalverwerkingsafdeling van SCK in Mol. Met het KB van 24 maart 2003 heeft de federale regering de saneringskosten voor de nucleaire installaties uit het verleden in Mol-Dessel opgenomen in een nieuwe 'Federale bijdrage' en dus ten laste gelegd van de eindgebruiker van elektriciteit. De 'Federale bijdrage' omvatte in 2004 volgende componenten: de financiering van de sanering in Mol-Dessel (55 miljoen euro), het Kyoto-fonds voor de reductie van de emissies van broeikasgassen (25 miljoen euro), de gedeeltelijke financiering van de CREG (8,6 miljoen euro), steun aan OCMW's (25 miljoen euro) en aan beschermde huishoudelijke klanten (16 miljoen euro). Het KB van 4 april 2003 verplicht NIRAS haar tegoeden uitsluitend in producten van de Belgische Staat te beleggen, wat een impact kan hebben op de prestaties van de beheerde fondsen en provisies, maar ook het risico van verwatering van deze fondsen vermijdt bij problemen op de beurs.

In uitvoering van de wet van 11 april 2003 diende NIRAS voor de tweede keer een eensluidend advies te geven over een rapport van Synatom aan het opvolgingscomité voor de nucleaire provisies en dit zowel voor het beheer van bestraalde splijtstof als over de ontmanteling van kerncentrales. Dit bij wet vastgelegde proces beoogt de financiële ruggengraat te verzekeren van de overheidsinstelling NIRAS. De gevolgde procedure is door de verregaande betrouwbaarheidseisen niet erg transparant, hoewel het kostenramingen betreft die in niet-geactualiseerde bedragen kunnen oplopen tot 12 miljard euro. Voor de ontmantelingsscenario's werd nog geen rekening gehouden met een eventuele weerslag van de wet op de kernuitstap die vervroegde ontmanteling van drie kerncentrales zou toelaten. Het opvolgingsbeleid moet de overheid in staat stellen om via NIRAS de verantwoordelijkheid van privébedrijven over te nemen voor hun passiva op lange termijn. Daarenboven moet de werkingscontinuïteit van NIRAS kunnen verzekerd worden als de provisies door bepaalde opties voor lange tijd onderbroken worden (zie ook § 12.1).

7 | Radioactieve lozingen naar lucht en water

7.1 | Radioactieve lozingen naar oppervlaktewater en naar lucht door kerncentrales

P

Tabel 5 geeft een overzicht van de *radioactiviteit geloosd* in het oppervlaktewater (Schelde) en in de lucht door de kerncentrale van Doel. Tritium is het zware waterstofisotoop met een halveringstijd van 12,3 jaar. Het is een zwakke bètastraler die omwille van zijn lage radiotoxiciteit apart wordt vermeld. Tritium komt terecht in alle waterstofhoudende producten aanwezig in het milieu en kan in de biologische cyclus doordringen (organisch gebonden tritium). Jodium-131 – dat een halveringstijd heeft van 8 dagen – wordt afzonderlijk vermeld wegens zijn specifieke eigenschap op te stapelen in de schildklier van de mens.

De vloeibare lozingen bedroegen in 2006 maar een fractie van de vergunde lozingslimieten en hebben een verwaarloosbare impact op de dosisbelasting van de omwonenden. Een controlemeting ervan kan zelfs in de war gestuurd worden door lozing in dezelfde waterweg van jodium-131 door een ambulante patiënt behandeld met radiojodium (bv. voor schildklierkanker). De niet-nucleaire afvalbewerker Indaver gelegen aan de overkant van de Schelde in Doel stoot nagenoeg evenveel jodium-131 uit als het kernpark. Dit is afkomstig van huishoudelijk en medisch afval van patiënten uit de nucleaire geneeskunde.

De atmosferische lozingen zijn door het geringer aantal lekkende brandstofstaven sterk afgenomen. Bovendien zijn de geloosde edelgassen voornamelijk kortlevend. De lichte stijging van bepaalde waarden in 2006 heeft te maken met een wijziging in rapportering. Vanaf 2006 worden ook meetwaarden beneden de detectielimieten aan het FANC gerapporteerd. Het toezichtsprogramma toont aan dat er – ten opzichte van de jaren daarvoor – geen meetbare verhoging is van het stralingsniveau voor de omwonende bevolking. Veruit de meeste radioactiviteit blijft ingesloten in de brandstofstaven en komt pas gedeeltelijk (zij het op zeer lange termijn) na berging vrij.

Tabel 5: Radioactieve lozingen naar het oppervlaktewater en in de lucht (Doel, 1990-2006)

	vloeibare lozingen		atmosferische lozingen			
	tritium (GBq)	rest (o.a. I- 131) (GBq)	edelgas (GBq)	tritium (GBq)	I-131 (GBq)	aerosol (GBq)
vergunde jaarlímiet	103 600	1 480,0	2 960 000	88 800	14,8	148,0
1990	63 000	15,5	15 600	752	0,485	0,162
1991	38 100	30,1	31 300	548	0,657	0,100
1992	45 200	4,5	26 400	774	0,193	0,075
1993	34 300	23,6	5 190	553	0,097	0,008
1994	33 900	9,3	970	846	0,010	0,000
1995	47 000	37,8	4 120	613	0,032	0,004
1996	31 300	18,9	2 050	288	0,009	0,003
1997	38 400	26,4	74	227	0,006	0,002
1998	47 100	16,1	3 310	52	0,014	0,002
1999	48 400	27,8	2 660	60	0,003	0,000
2000	30 900	15,0	95	17	0,009	0,000
2001	37 500	6,7	33	329	0,004	0,001
2002	27 500	7,8	331	1026	0,009	0,005
2003	34 300	8,4	775	710	0,003	0,010
2004	42 100	5,2	25	30	0,006	0,001
2005	39 900	4,5	71	476	0,018	0,0006
2006	46 100	1,7	115	1980	0,036	0,052

Bron: Electrabel, 2007.

Belgoproces behandelt de radioactief besmette *afvalwaters* van de nucleaire bedrijven in Mol-Dessel (SCK, FBFC, Belgonucleaire, IRMM en Belgoproces) en loost de gezuiverde

afvalwaters via een 10 km lange pijpleiding in de Molse Nete. De lozingen in de Molse Nete bedroegen in 2006 voor tritium 2 500 GBq en voor de andere bètastralers 0,31 GBq.

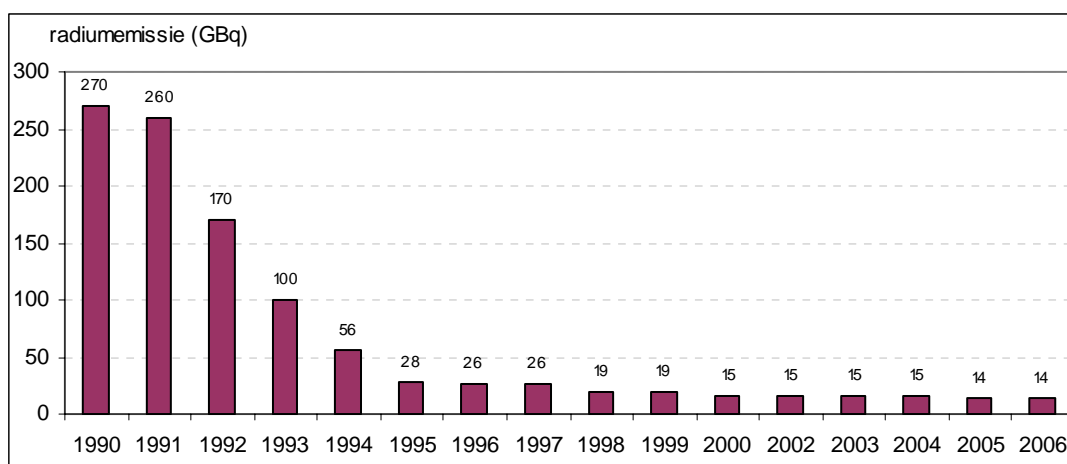
Er is onzekerheid ontstaan over de accumulatie van tritium in ecosystemen na analyse van de lozingen door de opwerkingsfabrieken van Sellafield in Engeland en La Hague in Frankrijk. Deze problematiek is vooral relevant in het kader van de ontwikkeling van fusiereactoren waar grote hoeveelheden tritium zullen geproduceerd worden en waarvan de insluiting een technologische uitdaging blijft.

7.2 | Radiumemissie door de niet-nucleaire industrie P

De meeste fosfaatbedrijven ontsluiten (of ontsloten) het fosfaaterts met zwavelzuur (Nilefos, Prayon-Rupel (tot 1992), UCB (tot 1987) en BASF (tot 1993)) en produceren gips als nevenproduct. Radium komt als radiumsulfaat in het gips terecht. De gipsstorten komen aan bod in § 8.5 bij de bespreking van de radiumbesmette zones in Vlaanderen. Het grootste fosfaatertsverwerkende bedrijf in Vlaanderen, BASF Antwerpen, ontsluit de fosfaatertsen (sinds 1980) met behulp van salpeterzuur, waardoor de radioactiviteit in de kunstmeststoffen calciumnitraat en calciumammoniumnitraat terecht komt.

Tessengerlo Chemie verwerkt Marokkaanse fosfaatertsen tot dicalciumfosfaat dat hoofdzakelijk gebruikt wordt voor veevoeders. De ontsluiting van de fosfaatertsen gebeurt er met zoutzuur. Vroeger bleef twee derden van het radium in oplossing en werd geloosd in de Grote Laak (behoort tot Netebekken) of in de Winterbeek (behoort tot Demerbekken). Het radiumgehalte van deze afvalwaters bedroeg tot begin jaren '90 ongeveer 20 Bq/l, met een debiet van 1 500 m³/h. Sindsdien wordt door toevoeging van bariumzouten vermeden dat het grootste deel van het radium nog in oplossing komt. Hierdoor daalde het radiumgehalte in de afvalwaters tot 2 Bq/l met een debiet van 1 000 m³/h. Figuur 23 toont de dalende radiumemissie via het afvalwater van Tessenderlo Chemie.

Figuur 23: Evolutie van de jaarlijkse totale radiumemissie via het afvalwater van Tessenderlo Chemie (1990-2006)



Bron: Tessenderlo Chemie, 2007

7.3 | Productie van andere radioactief besmette materialen / afvalstromen: rookmelders, bliksemafleiders, vluchtwegaanduidingen, schroot e.a. P

7.3.1 / Ionisatie-rookmelders

Ionisatie-rookmelders ter bescherming van personen tegen de gevaren van rook en brand zijn in België vrij in de handel te koop. Ze bevatten een kleine americium-241 bron met een activiteit van 5 à 40 kBq. Ze zijn door het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle

(FANC) vrijgesteld van vergunning omdat het radioactief materiaal opgesloten zit in een lekdichte afgeschermd bronhouder en de uitwendige straling beperkt is. De voornaamste zorg betreft de vele duizenden afgedankte ionisatie-rookmelders die jaarlijks samen met het huishoudelijk restafval verbrand worden en waarbij de radioactieve stoffen in de natuur terechtkomen. OVAM (Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het Vlaamse Gewest) zamelt de ionisatie-rookmelders selectief in via het circuit van klein gevaarlijk afval (KGA). Het FANC heeft OVAM laten weten dat de ionisatie-rookmelders onder bepaalde voorwaarden vrijgesteld zijn van de nucleaire wetgeving, zodat ze op basis van een milieubeleidsvereenkomst kunnen verwerkt worden naar analogie van het Recupelsysteem voor afgedankte elektrische en elektronische apparatuur. Enkel de verwerker die de rookmelders demonteert en de radioactieve bronnetjes naar NIRAS afvoert is vergunningsplichtig bij het FANC.

De Hoge Gezondheidsraad (HGR) opteert in haar adviezen van 2003 en 2005 om het gebruik van optische rookmelders, die geen radioactieve bron bevatten, te stimuleren en tegelijkertijd een uitdovingsbeleid voor het gebruik van ionisatie-rookmelders op te zetten.

7.3.2 / Radioactieve bliksemafleiders

Tot 1985 kon men in België bliksemafleiders kopen die voorzien waren van één of meerdere radioactieve bronnen: radium-226 (50 %), americium-241 (40 %) en krypton-85 (10 %). Sindsdien zijn ze verboden omdat de aanwezigheid van radioactieve bronnen op geen enkele wijze bijdraagt tot de goede werking van de bliksemafleider en omdat ze een gezondheidsrisico inhouden. Geschat wordt dat er in België nog een duizendtal van zulke toestellen staan op grote kantoorgebouwen, appartementsblokken, klokkentorens en pylonen. Sporadisch treft men ze op privé-woningen of bedrijven aan. Bij ongecontroleerde afbraak of beschadiging van de bliksemafleider kunnen radioactieve stoffen verspreid geraken in het milieu met bestralings- of besmettingsgevaar tot gevolg. Het FANC spoort sinds 2003 alle radioactieve bliksemafleiders op. Eigenaars van gebouwen waarop een toestel wordt aangetroffen krijgen van het FANC een aanmaning om het toestel binnen 6 maanden te laten verwijderen. Alleen erkende bedrijven mogen radioactieve bliksemafleiders afbreken en afvoeren naar NIRAS en dit op kosten van de eigenaar van het gebouw. Eind 2006 waren er al 1 546 radioactieve bliksemafleiders opgespoord en verwijderd.

7.3.3 / Vluchtwegaanduidingen met tritium

De Hoge Gezondheidsraad heeft in 2006 advies uitgebracht over het gebruik van lichtgevende vluchtwegaanduidingen met tritium naar aanleiding van een vraag van twee Nederlandse firma's aan het FANC voor invoer van dergelijke noodsignalisatie in België. Het gasvormige tritium zit opgesloten in dichtgelaste buisjes van borosilicaatglas binnenin bekleed met fluorescerend fosfor. De totale activiteit van een dispositief kan tot 800 GBq tritium oplopen, verspreid over diverse buisjes met een activiteit van maximaal 185 GBq. De meest gekende toepassingen zijn aan boord van vliegtuigen en schepen, zodat we er kunnen van uitgaan dat dergelijke producten regelmatig in Belgische (lucht)havens aanwezig zijn zonder vergunning of toezicht van de Belgische overheid. De Hoge Gezondheidsraad is van mening dat deze veiligheidssignalisaties met tritium niet kunnen vrijgesteld worden van vergunning op basis van typegoedkeuring. Zonder begeleidingsplan is het risico veel te hoog om deze signalisatie zomaar vrij op de markt te brengen.

7.3.4 / Radioactief besmet schroot

Bronnen en radioactief besmet schroot vormen een probleem bij recyclage. Vrijwel alle grote schroot- en staalbedrijven zijn uitgerust met stralingsdetectoren aan de toegangspoorten om het binnenkomend schroot te controleren op radioactiviteit. Het grootste deel van het besmette schroot bestaat uit natuurlijke radioactieve stoffen in de vorm van aanslag in leidingen, pompen en kranen, enz. afkomstig van de olie- en gaswinning, de chemische industrie en de kunstmestindustrie. Wordt besmet schroot gevonden, dan moet de lading ontsmet worden totdat de dosistempo's vergelijkbaar zijn met de natuurlijke stralingsachtergrond. Het FANC heeft in 2006 richtlijnen uitgevaardigd voor de uitbaters van installaties die een meetpoort bezitten (zie § 6.3.2). In tegenstelling tot Nederland zijn

Belgische schrootbedrijven niet verplicht een meetpoort of andere detectieapparatuur aan te schaffen om binnenkomend schroot op radioactiviteit na te meten.

Minder veelvuldig voorkomend maar moeilijker en heel wat duurder om nadien te ontsmetten, is het accidenteel smelten van ingekapselde radioactieve bronnen. Begin juni 1998 werden verhoogde luchtconcentraties van cesium-137 waargenomen boven Zuid-Frankrijk en Noord-Italië. De oorzaak ervan kon met behulp van atmosferische modellen teruggebracht worden tot het smelten van een cesiumbron in een staalfabriek te Algeciras (Z-Spanje) enkele dagen voor de eerste waarnemingen. De ingekapselde cesiumbron was onopgemerkt via het schroot in de hoogoven terechtgekomen, gedeeltelijk verdampt en met de wind verspreid over de Middellandse zee.

8 | Blootstelling aan ioniserende straling

8.1 | Inleiding

8.1.1 / Dosis-eenheden en wegingsfactoren

De ICRP (International Commission on Radiological Protection) is een wetenschappelijke commissie in 1928 opgericht door de 'International Society of Radiologists' onder het voorzitterschap van de Zweed Rolf Sievert. Ze publiceert regelmatig aanbevelingen en richtlijnen en bepaalt aldus de basisprincipes van de *stralingsbescherming*. De laatste algemene aanbevelingen, gekend als ICRP publicatie 60, dateren van 1991 en worden eind 2007 herzien. Voor een overzicht van het ontwerp van nieuwe aanbevelingen zie § 10.1.4.

De wisselwerking van ioniserende straling met materie leidt via ionisatie en excitatie tot absorptie van stralingsenergie. De grootheid *geabsorbeerde dosis* is gedefinieerd als de geabsorbeerde energie per eenheid van massa, uitgedrukt in gray (Gy). 1 Gy is 1 joule per kg.

De *effectieve dosis* is gedefinieerd als de som van de gewogen orgaandoses ten gevolge van inwendige en uitwendige blootstelling. Deze grootheid brengt de gevoeligheid van de verschillende organen voor de verschillende soorten ioniserende straling in rekening. De effectieve dosis is een maat voor de biologische effecten van de blootstelling met als eenheid de sievert (Sv). Door deze "biologische" definitie is het niet mogelijk om de effectieve dosis in de praktijk te meten. Daarom heeft men operationele grootheden in het leven geroepen die voor alle stralingssoorten, energieën en bestralingsgeometrieën gelijk zijn aan de effectieve dosis of lichtjes groter. In de praktijk, bv. met een persoonlijke dosimeter, meet men dus de operationele grootheden. De som van alle bronnen van ioniserende straling waaraan een individu is blootgesteld en de kans op blootstelling bij ongeval bepalen het risico.

De *collectieve dosis* in manSv is de som van de effectieve doses voor een groep mensen die blootgesteld worden aan een bepaalde bron van ioniserende straling of via een bepaalde blootstellingsweg.

De effectieve dosis (E) wordt berekend als de som over weefsels en stralingssoorten van het product van de geabsorbeerde dosis (D_{TR}) met de radiologische wegingsfactor (w_R) van de straling en de stralingsgevoeligheid van de verschillende weefsels (w_T). De waarden voor de wegingsfactoren werden door de ICRP in publicatie 60 vastgelegd. Ze werden bepaald voor een referentiebevolking met een gelijk aantal personen van de beide geslachten en een normale leeftijdsdistributie. In formulevorm geeft dit:

$$E = \sum_T \sum_R w_T w_R D_{TR}$$

In tabel 6 worden de radiologische wegingsfactoren, w_R , voor diverse stralingssoorten en de wegingsfactoren, w_T , voor de verschillende stralingsgevoelige weefsels weergegeven. w_R is een maat voor de biologische effectiviteit van de diverse stralingssoorten. Deze factoren zijn overgenomen in het KB van 20 juli 2001.

Tabel 6: Radiologische wegingsfactor (w_R) per stralingssoort en wegingsfactor (w_T) per weefsel

stralingssoort	w_R	weefsel	w_T
γ - en X-straling	1	gonaden	0,20
β -straling	1	rood beenmerg	0,12
neutronen	5 à 20	dikke darm	0,12
protonen	5	longen	0,12
α -straling	20	maag	0,12
		blaas	0,05
		borstweefsel	0,05
		lever	0,05
		slokdarm	0,05
		schildklier	0,05
		huid	0,01
		botoppervlak	0,01
		rest van het lichaam	0,05

Bron: ICRP, 1991.

8.2 | Medische blootstelling aan ioniserende straling **S**

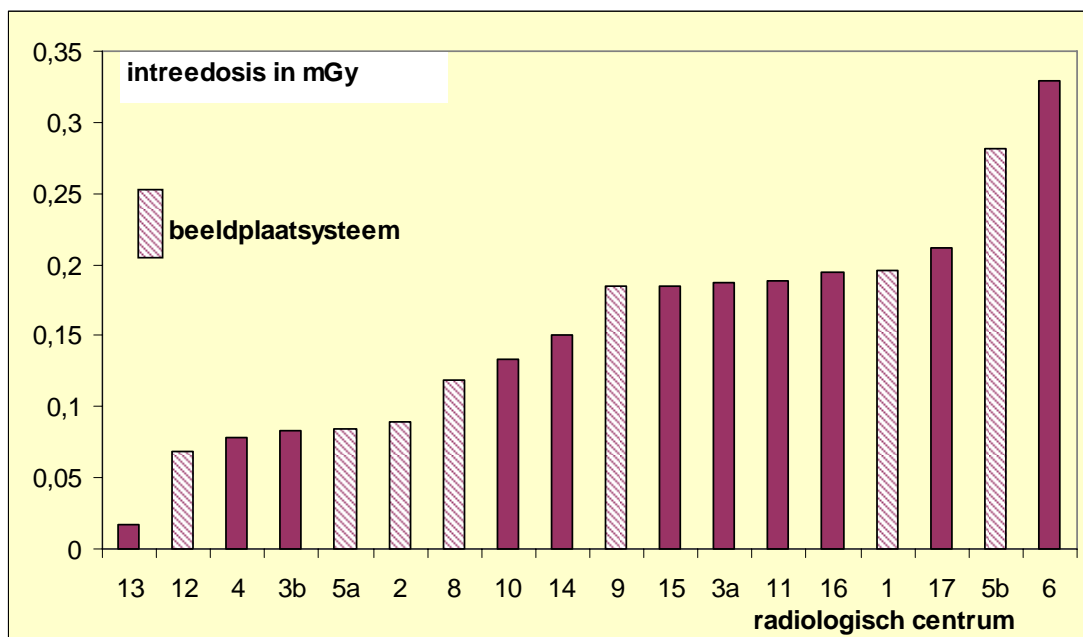
8.2.1 / Indicatoren

Medische toepassingen zijn verantwoordelijk voor nagenoeg de volledige blootstelling aan niet-natuurlijke stralingsbronnen in Vlaanderen (figuur 1) en dragen dus in belangrijke mate bij tot de collectieve dosis van de bevolking.

8.2.1.1 / Blootstelling door radiologische onderzoeken

De dosis van een radiodiagnostisch onderzoek kan – zowel voor patiënt als operator – enorm variëren tengevolge van de onderzoekstechniek, de dikte en het ziektebeeld van de patiënt en de instelparameters op het toestel. Figuur 24 geeft de intree-huiddosis voor een standaard frontale longfoto (thorax AP) in 18 Vlaamse radiologische diensten (Mol H, 2001). Dit onderzoek werd uitgevoerd op een testobject zodat variaties in de patiënt werden uitgesloten. De verschillen in dosis zijn dus enkel te wijten aan verschillen in de apparatuur en in de gebruikte parameters. De figuur toont een verschil van een factor 20 tussen de hoogste en de laagste dosis.

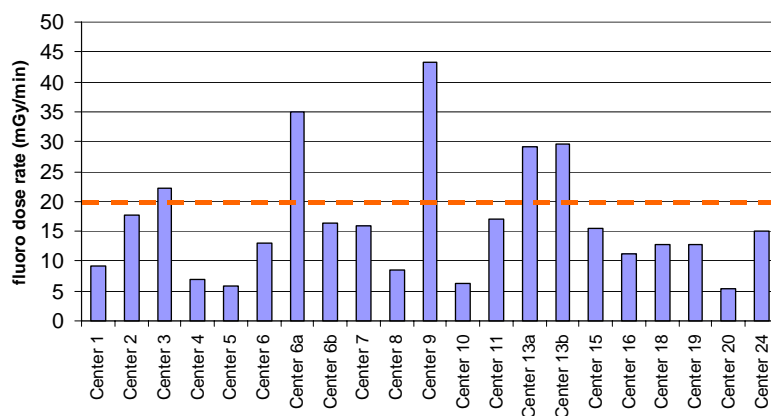
Figuur 24: Intree-huidsdosis voor een standaard thorax-AP-opname in 18 radiologische diensten (Vlaanderen)



Bron: Mol, 2001.

In figuur 25 en figuur 26 tonen we een analogo fenomeen voor diagnostische beeldvorming van de bloedvaten in de onderste ledematen in 20 Belgische ziekenhuizen. De afregeling van de toestellen (figuur 25) en de dosis die de operator gemiddeld per procedure ter hoogte van de handen ontvangt bij zijn concrete werkzaamheden (figuur 26) variëren enorm. Extrapolaties tonen dat bepaalde artsen mogelijks de normen voor extremitetendosis overschrijden, terwijl andere artsen met een soortgelijke taak, slechts een erg beperkte dosis oplopen.

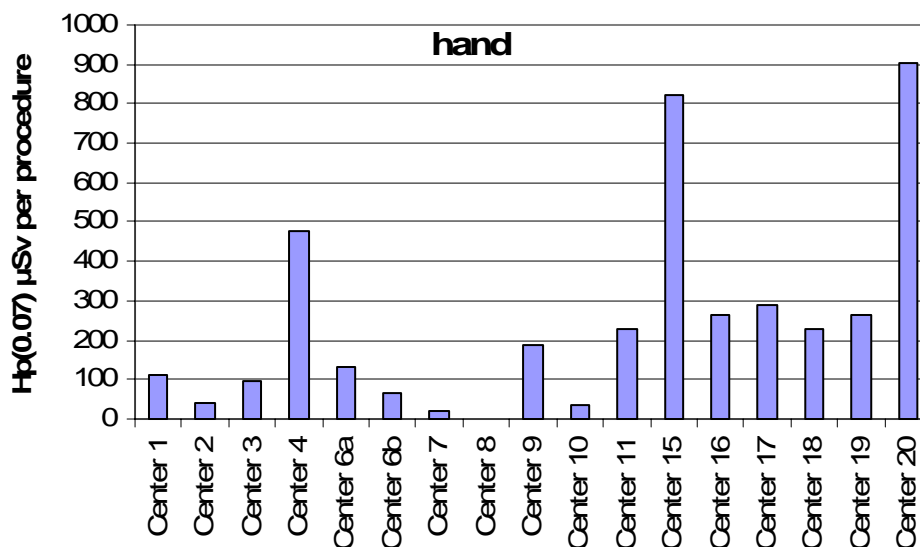
Figuur 25: Overzicht van de gemeten dosis ter hoogte van de detector van 21 toestellen gebruikt voor angiografische onderzoeken (België, 2003-2005)



De data werden gecollecteerd in het kader van de eerste Belgische multi-center studie naar dosis en beeldkwaliteit bij hoge dosis beeldvorming.

Bron: Bleeser et al., 2007.

Figuur 26: Overzicht van de gemeten dosissen ter hoogte van de hand van de radioloog of vasculair chirurg, in 16 zalen waar angiografische procedures worden doorgevoerd (België, 2003-2005)



Bron: Buls N. en Berus D. (persoonlijke communicatie, 2006).

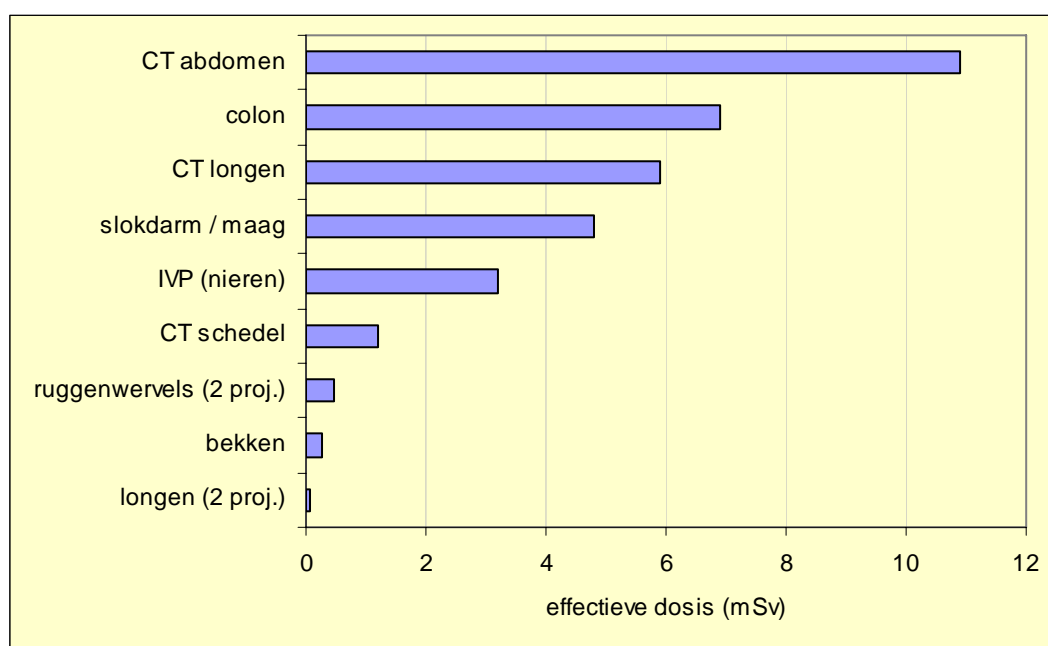
Het fenomeen van sterk uiteenlopende dosissen bij eenzelfde onderzoekstype is geen typisch Vlaams of Belgisch fenomeen; verschillende onderzoekers melden dergelijke resultaten. Dit heeft een aantal belangrijke gevolgen:

- Sommige artsen gebruiken dosissen die een grootteorde hoger zijn dan wat collega's in andere centra voor dezelfde medische indicatie toedienen. Dit kan het gevolg zijn van het gebruik van verouderde apparatuur, een verkeerde combinatie van X-stralentoestel en detector, verkeerde instelparameters of suboptimale procedures. Het is belangrijk om met gerichte datacollectie, bv. in samenwerking met de medische fysici verbonden aan een bepaalde dienst, de centra te detecteren die erg hoge dosissen geven. Naast dosimetrie zijn er verschillende andere metingen nodig indien men de oorzaak van een te hoge dosis wil opsporen;
- Indien men de gemiddelde dosis van een bepaald onderzoek in Vlaanderen wil kennen, zal men een voldoende grote steekproef moeten houden. Per centrum moeten voldoende patiëntengegevens genoteerd worden, zodat patiënten met verschillende body mass index of gewicht omvat zijn in de studie. Er moeten tevens voldoende centra deelnemen aan het onderzoek. Dit kan leiden tot zogenaamde "diagnostische referentie niveaus" of DRL's. Dit zijn gemiddelde dosiswaarden voor standaardonderzoeken doorgevoerd op een standaard patiënt of testobject na metingen in bv. een twintigtal centra;
- De dosisschattingen gebruikt in dit MIRA-Achtergronddocument zijn gebaseerd op gegevens uit een beperkt aantal centra. Deze zijn misschien onvoldoende representatief voor de gehele regio. Grootschalige studies of meetcampagnes zijn nodig voor correcte dosisschattingen;
- De dosislast kan in Vlaanderen/België nog significant verminderen. In het Verenigd Koninkrijk meldt men dat de verhouding tussen de hoogste gemiddelde dosis en de laagste binnen een bepaalde regio kan teruggebracht worden tot een factor 2. Dit kan ook in onze regio gerealiseerd worden mits inzet van voldoende geschoolde experts. Medische stralingsfysici zijn het best geplaatst om de nodige datacollecties in de dagdagelijkse praktijk te begeleiden. Artsen zijn verantwoordelijk voor de datacollectie zelf en röntgenlaboranten of medische beeldvormers moeten opgeleid worden voor de registraties. Van de overheid wordt verwacht dat ze het wettelijk kader creëert, dat ze de nodige onderzoeksactiviteiten ondersteunt en dat ze haar controlerende functie

waarneemt. Dit geheel zou neerkomen op de praktische implementatie van het ALARA-principe in de Vlaamse beeldvorming.

Figuur 27 toont de effectieve dosis voor verschillende radiologische onderzoeken in Nederland. De figuur geeft duidelijk aan dat natuurlijk ook de keuze van de onderzoekstechniek een grote weerslag heeft op de dosis voor de patiënt.

Figuur 27: Gemiddelde effectieve dosis voor een aantal radiodiagnostische onderzoeken in Nederland



Bron: RIVM, 2005.

De blootstelling ten gevolge van *radiologische onderzoeken* werd tot MIRA-S 2000 geschat op basis van dosiswaarden uit het UNSCEAR-rapport van 1993 (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Deze waarden werden herzien en voor een aantal belangrijke onderzoeken (CT en interventionele onderzoeken) wordt de dosisbelasting nu hoger ingeschat (UNSCEAR, 2000). Een onderzoek – uitgevoerd in opdracht van MIRA – in 20 Vlaamse ziekenhuizen voor 5 belangrijke radiodiagnostische technieken, waaronder CT, komt tot waarden die in een aantal gevallen nog hoger liggen (Mol, 2001). Oorzaak is het relatief groot aantal opnames tijdens een onderzoek. Een recente Nederlandse studie geeft dan weer lagere waarden (RIVM, 2005). Tabel 7a geeft een vergelijking van de effectieve dosis per onderzoek voor de vier vermelde bronnen en vermeldt ook de effectieve dosissen die gebruikt werden voor de berekeningen in dit MIRA-Achtergronddocument (rechter kolom). Deze laatste dosissen werden gehaald uit recente lokale studies aangevuld met internationale literatuur.

Tabel 7a: De gemiddelde effectieve dosis per onderzoek volgens 4 bronnen vergeleken met de waarden verrekend in dit MIRA-Achtergronddocument (in mSv)

onderzoek	UNSCEAR 1993	UNSCEAR 2000	Mol 2001	RIVM 2005	MIRA-AG 2007
thorax	0,14	0,14	0,15	0,07	0,31 ¹
extremititeiten	0,06	0,06	..	..	0,032 ²
ruggewervels	1,7	1,8	2,6	0,35	2,6
bekken	1,2	0,83	..	0,28	0,83
schedel	0,16	0,07	..	..	0,14
abdomen	1,1	0,53	0,92	0,45	0,92
spijsverteringsstelsel	5,7	5,0	..	4,8	12,9 ³
cholesystografie	1,5	2,3	..	..	2,3
urografie	3,1	3,7	7,9	3,2	7,2
angiografie	6,8	12	..	12,2	Diagn.: 5,7 ⁴ Intervent.: 9,8 ⁵
PTCA	..	22	..	..	15,3 ⁶
mammografie	1	0,51	..	0,4	0,34 ⁷
CT	4,3	8,8	7,7	1,3 – 11	7,2 ⁸
tomografie beenderen	0,88	..	..	..	..

De dosiswaarden vermeld voor het MIRA-Achtergronddocument 2007 zijn gemiddelde waarden voor de verschillende onderzoekscategorieën. De veronderstelde dosisbereiken zijn als volgt:

¹ dosis voor longfoto PA (0,15 mSv) en de tweevoudige opname PA + zijaanzicht (0,45 mSv);

² dosis van RX vinger (0,0001 mSv) tot RX ribben (0,62 mSv);

³ dosis van slikact (2 mSv) tot onderzoek van de dikke darm met dubbel contrast (20 mSv);

⁴ dosis van diagnostische angiografie van de cerebrale vaten (1 mSv) tot diagnostisch onderzoek van de onderste ledematen (7,5 mSv);

⁵ dosis bij interventionele angiografie van cerebrale vaten (2 mSv) tot onderste ledematen (10 mSv);

⁶ diagnostische coronarografie is niet vervat in deze categorie. Er werd een waarde van 9,6 mSv aangenomen in de berekeningen coronarografie. De dosis voor RF-ablatie werd geschat op 16 mSv;

⁷ de dosis voor screeningsmammografie (2 borsten) wordt geschat op 0,34 mSv. De waarde per borst voor een diagnostische mammografie is 0,17 mSv;

⁸ de dosissen per type CT staan vermeld in tabel 7b.

Bron: UNSCEAR, 1993; UNSCEAR, 2000; Mol, 2001; RIVM, 2005; MIRA-T 2007.

Tabel 7b specificeert de CT-waarde uit 7a per type CT-onderzoek.

Tabel 7b: De gemiddelde effectieve dosis per CT-onderzoek (in mSv)

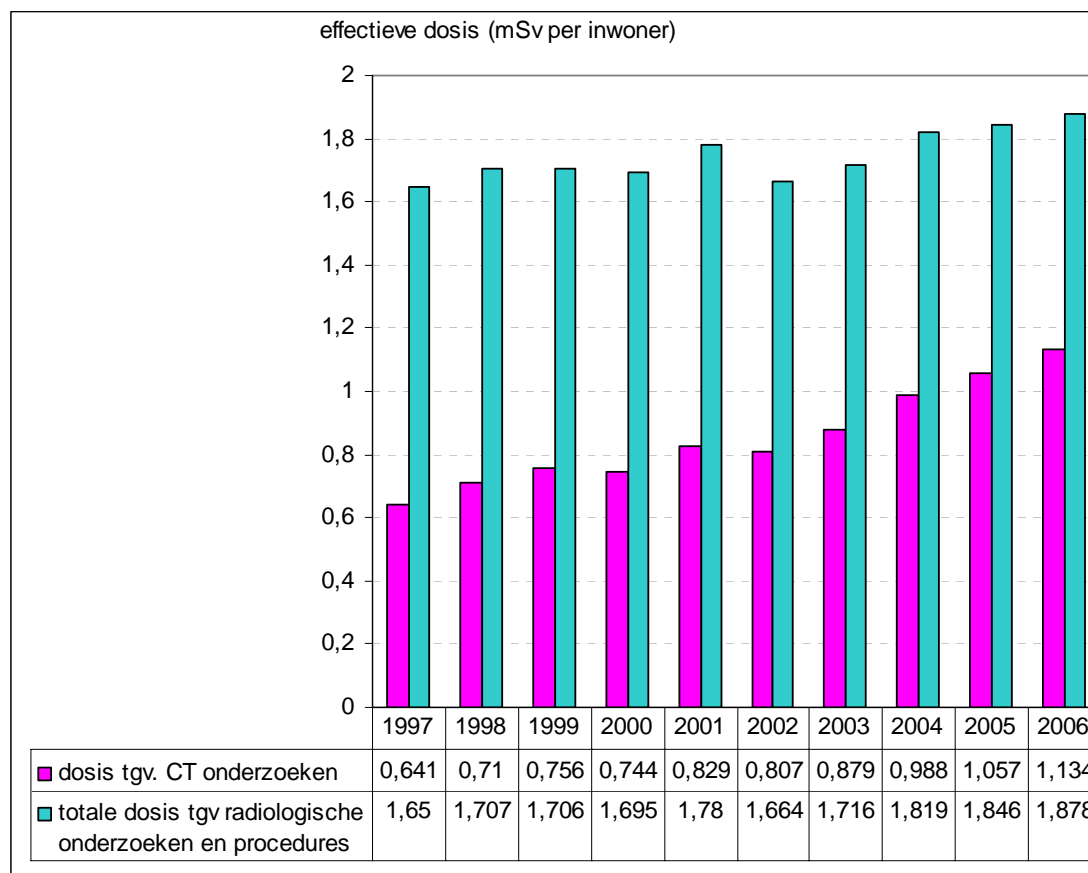
onderzoek	gemiddelde dosis
CT schedel	1,5
CT rotsbeenderen	1,7
CT abdomen en/of thorax	12,7
CT ruggewervels	5,7
CT ledematen, mibv angiografie	1,5

De onderzoeken zijn gegroepeerd volgens RIZIV-nomenclatuur. De effectieve dosis houdt rekening met enerzijds de dosis per scan van het beschouwde lichaamsdeel en anderzijds een typische verdeling in een (universitair) ziekenhuis van het aantal keer dat dit lichaamsdeel gescanned wordt tijdens het onderzoek.

Bron: UNSCEAR, 1993; UNSCEAR, 2000; Mol, 2001; RIVM, 2005; RIVM, 2007; Bogaert, 2007; Bleeser et al., 2007; Dragusin, 2005; Okkalides, 1994.

Figuur 28 toont het verloop van de gemiddelde effectieve dosis die men in België ontvangt ten gevolge van de blootstelling bij radiologische onderzoeken. Deze figuur is afgeleid uit de frequentie van de verschillende onderzoeken en de gemiddelde stralingsdosis (laatste kolom tabel 7a). De gemiddelde jaarlijkse *blootstelling* in België bedroeg in 2006 1,88 mSv per hoofd van de bevolking en in Vlaanderen 1,75 mSv. Het verschil tussen België en Vlaanderen situeert zich ter hoogte van de CT-onderzoeken: een Belg krijgt gemiddeld per jaar 0,155 CT-onderzoeken, een Vlaming krijgt er gemiddeld 0,142.

Figuur 28: Verloop van de gemiddelde effectieve jaardosis tengevolge van radiologische onderzoeken (België, 1997-2006)



Bron: KULeuven op basis van RIZIV, 2007 (aantallen) en tabellen 7a/b (dosisschatting).

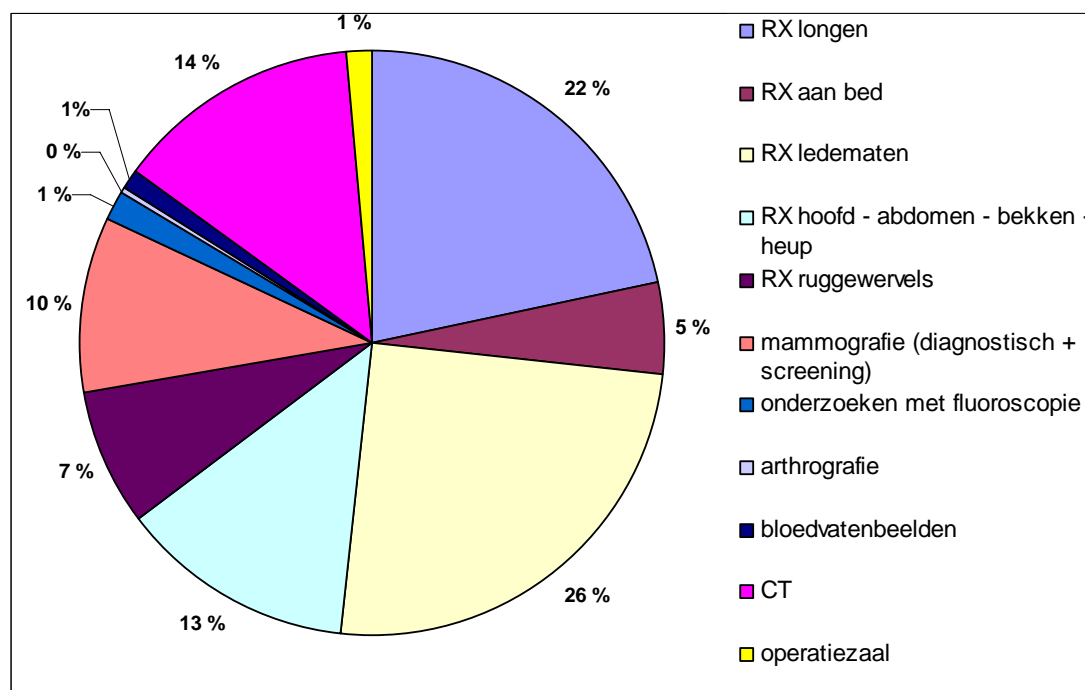
De gemiddelde dosis per inwoner schat UNSCEAR voor de Westerse landen op 1,2 mSv per jaar. In België zien we dat de dosis afkomstig van de meer performante maar ook meer belastende CT-onderzoeken in 10 jaar bijna verdubbeld is tot 1,14 mSv per jaar. CT-onderzoeken leveren nu in België 60 % van de totale stralingsbelasting ten gevolge van het gebruik van X-stralen. Dit laatste is in tegenspraak met de resultaten van een Nederlandse studie, waaruit blijkt dat in Nederland de effectieve dosis voor de bevolking de laatste jaren is teruggelopen van 0,59 mSv naar 0,52 mSv, door een vermindering van de bijdrage van CT-onderzoeken (Brugmans, 2004). Buiten Nederland is er echter geen melding van een ander land waar de bevolkingsdosis vermindert. Een commissie van de Hoge Gezondheidsraad (HGR, 2007) onderzoekt het toenemend gebruik van CT in België. Aan dit onderzoek participeren artsen, medische fysici en experts in fysische controle, naast de overheden die bij dit onderzoek een waarnemende functie vervullen. De werkgroep binnen de HGR stelde vast dat er op de actuele scanners verschillende dosisreducerende opties ter beschikking zijn. Nochtans is het onduidelijk of de dosis per CT-onderzoek verminderd is. Multidisciplinair onderzoek naar effectieve dosis en de mogelijkheden om deze te verminderen met behoud van diagnostische kwaliteit is aangewezen (Tack, 2005).

Op initiatief van het FANC ontwierp een werkgroep in 2004 een plan voor een systematische inventaris van patiëntendoses in de radiologie en nucleaire geneeskunde. Het eerste rapport van deze werkgroep bevatte een overzicht van Belgische onderzoeksresultaten op het gebied van patiëntendosimetrie, een onderverdeling van radiologische onderzoeken in 64 categorieën en een methode om op regelmatige basis patiëntendoses te verzamelen. Deze werkgroep zocht ook contact met een Europees initiatief van een aantal instituten die in 2004 een overleg startten over de problemen die bestaan bij het schatten van de dosis voor de bevolking door medische blootstelling. België was op de eerste vergadering van deze werkgroep (DoseDataMed) als waarnemend lid aanwezig. De voorstellen van de

projectgroep werden door het FANC nog niet opgevolgd. De dosisschatting voor Vlaanderen in het kader van dit MIRA-Achtergronddocument gebeurde met de voorgestelde 64 categorieën onderzoeken. De nationale autoriteiten veronderstellen ondertussen dat de systematische dosiscollectie, conform het Vademecum van de radiologie, de nodige data zal opleveren om de bevolkingsdosis te schatten en om zo de nodige acties te kunnen nemen. Van systematische dosiscollectie of dataverwerking is er vandaag in onze ziekenhuizen echter nog geen sprake.

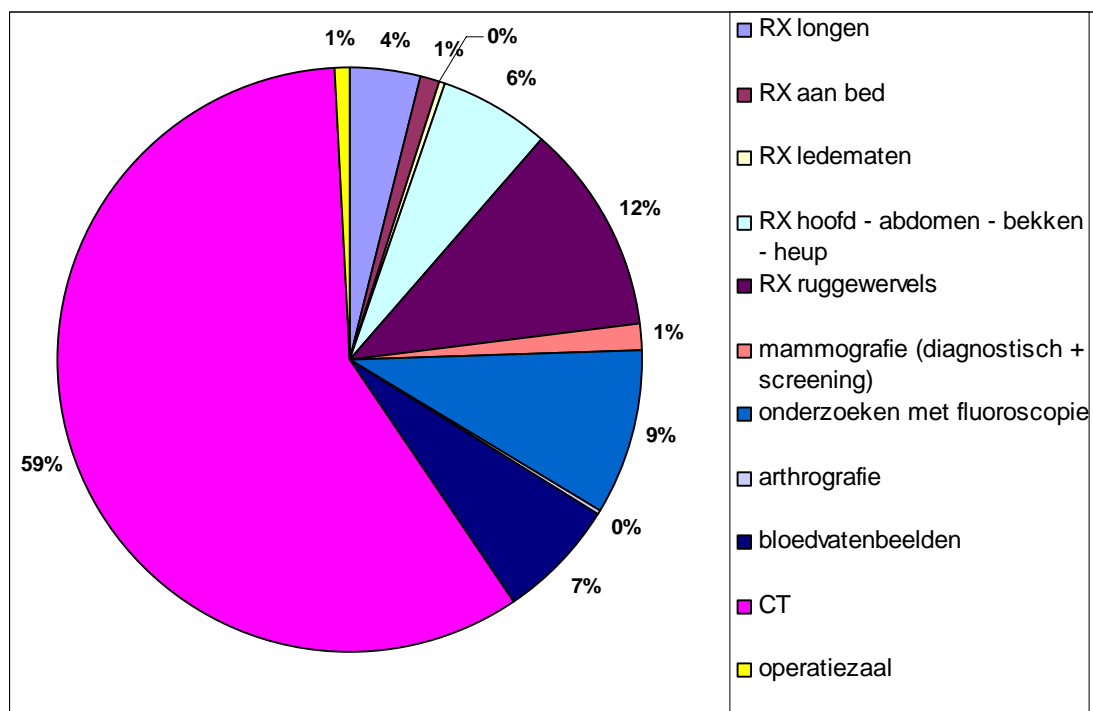
Figuur 29a geeft een overzicht van de relatieve frequentie en figuur 29b toont de samenstelling van de effectieve dosis van de Vlaamse bevolking in 2006 ten gevolge van radiodiagnostische onderzoeken.

Figuur 29a: Verdeling van het aantal radiologische onderzoeken (Vlaanderen, 2006)



Bron: RIZIV, 2007.

Figuur 29b: Verdeling van de effectieve dosis tengevolge radiodiagnostische onderzoeken (Vlaanderen, 2006)



Bron: RIZIV, 2007.

8.2.1.2 / Blootstelling door nucleair geneeskundige onderzoeken

Het totaal aantal onderzoeken in de nucleaire geneeskunde in Vlaanderen bedroeg in 2006, op basis van de RIZIV-cijfers, 245 000. Dit betekent 40 onderzoeken per 1 000 inwoners. Deze frequentie sluit vrij goed aan bij de cijfers voor 2003 (namelijk 42) en 2002 (43 onderzoeken per 1 000 inwoners) (figuur 8). Standaardwaarden voor de effectieve dosis voor patiënten ten gevolge van een aantal representatieve *nucleair geneeskundige onderzoeken* zijn gegeven in tabel 4. Het grootste deel van de onderzoeken gebeurt met een radiofarmaceutische stof gemerkt met technecium-99m. De effectieve dosis voor een dergelijk onderzoek is van de orde 1 tot 10 mSv en de toegediende activiteit 100 tot 900 MBq. Een onderzoek op 19 diensten *nucleaire geneeskunde* in Vlaanderen schat de gemiddelde dosis voor een patiënt op 4,2 mSv (De Geest, 2002). Deze waarde is bijna dezelfde als deze in het UNSCEAR-rapport van 2000 (4,3 mSv). Uit de frequentie en de gemiddelde dosis per onderzoek volgt een jaardosis in Vlaanderen van 0,17 mSv per persoon in 2006.

Een werkgroep van de Hoge Gezondheidsraad onderzocht de optimalisatie, de kwaliteitscontrole en de patiëntinformatie in nucleaire geneeskunde en metabole therapie. Blootstellingsgegevens werden in verschillende ziekenhuizen opgevraagd. Bijzondere zorg is vereist bij de blootstelling van zwangere en zogende vrouwen, bij medisch-juridische procedures en bij biomedische onderzoeksprogramma's.

Positron Emissie Tomografie (PET), waarbij vooral het radionuclide fluor-18 bij patiënten wordt ingespoten, is een relatief nieuwe techniek die onder andere voor het opsporen van tumoren zijn waarde heeft bewezen. Op dit moment staan er een 20-tal PET scanners in België waaronder 4 PET-CT's. De dosis voor de patiënt van een PET onderzoek schommelt tussen 5 en 8 mSv. Bij een PET-CT komt daar nog de dosis voor een CT-onderzoek bij. Dit CT-onderzoek kan ofwel een volwaardig CT-onderzoek zijn – dat in de meeste gevallen een ander CT-onderzoek vervangt – of een onderzoek om de PET beeldreconstructie te verbeteren. In het laatste geval kan de dosis erg beperkt zijn. Een PET-CT behoort in elk geval tot de hoge-dosistechnieken.

Het grote aantal handelingen heeft een zeker *blootstellingsrisico voor het personeel* op de diensten nucleaire geneeskunde als gevolg. De verplichte scholing van het personeel van 10 uur is waardevol, maar beperkt, terwijl een recente Vlaamse studie aantoonde dat doorgedreven training in bepaalde gevallen efficiënter is voor stralingsbescherming, dan aangepaste beschermingsmiddelen. Bij de technologen die de spuiten met fluor-18 manipuleren kan de orgaandosis (geen effectieve dosis) aan vingers en handen immers tot boven de limiet van 500 mSv/j oplopen (Berus, 2004).

De doses die verpleegkundigen ontvangen op een dienst nucleaire geneeskunde tijdens een diagnostische studie verschillen per type onderzoek. Het type onderzoek en de mobiliteit van de patiënt bepalen ook de dosis tengevolge van het verzorgen van deze patiënten. Gezinsleden van patiënten ontvangen een dosis die kan variëren van 5 µSv tot 1 mSv, als men de richtlijnen van de Hoge Gezondheidsraad (1997) in acht neemt: bv. informatie verstrekken aan patiënt over blootstellings- en besmettingsrisico's, patiënt pas uit het hospitaal ontslaan wanneer het dosisdebiet op 1 m afstand van de patiënt niet hoger is dan 20 µSv/h en de residuele activiteit in het lichaam gedaald is tot 400 MBq, specifieke aanvullende maatregelen in acht nemen bij palliatieve toediening van bepaalde radionucliden. Naast stralingsbelasting door uitwendige blootstelling is er tevens risico tot contaminatie of radiologische besmetting. Contaminatie treedt onder andere op indien er enige vorm van contact plaatsvindt met het bloed of excreta (urine, ontlasting, speeksel en zweet) van de patiënt na toediening van het radiofarmacon.

8.2.1.3 / Totale medische blootstelling

Tellen we de cijfers voor gemiddelde blootstelling per persoon ten gevolge van radiologische (1,75 mSv) en nucleair geneeskundige (0,17 mSv) onderzoeken samen, dan komt de *gemiddelde medische blootstelling* in Vlaanderen op 1,92 mSv per jaar. Dit is op 0,02 mSv na dezelfde waarde als in 2003 (MIRA, 2005). Voor alle Vlamingen samen bedroeg de medische blootstelling in 2006 ongeveer 11 000 manSv.

De medische blootstelling in Vlaanderen is hoog in vergelijking met gepubliceerde data uit Nederland, het Verenigd Koninkrijk en Zwitserland (tabel 8). Oorzaken zijn de hogere frequentie van onderzoeken in Vlaanderen en het hoge aandeel van de sterk belastende CT-scans in die onderzoeken. De nucleaire geneeskunde haalt eveneens een zeer hoge frequentie in Vlaanderen in vergelijking met Nederland en het Verenigd Koninkrijk.

Tabel 8: Vergelijking van het aantal onderzoeken in de radiologie en in de nucleaire geneeskunde en van de medische blootstelling in Vlaanderen (1998 en 2002), Nederland (1998), het Verenigd Koninkrijk (2002) en Zwitserland (1998)

	Vlaanderen		Nederland	Verenigd Koninkrijk	Zwitserland
	1998	2002	1998	2002	1998
▪ onderzoeken radiologie (per 1 000 inwoners)	1 158	1 116	630	379	760
▪ aandeel CT (%)	10	10	4,9	7	6
▪ onderzoeken nucleaire geneeskunde (per 1 000 inwoners)	41	43	14,9	9	..
▪ gemiddelde medische blootstelling per inwoner (mSv/j)	1,9	1,9	0,59	0,38	1,00*

* enkel radiologie

Bron: MIRA, 2005; Brugmans, 2002; Hart, 2004; Aroua, 2002.

8.2.2 / Ontwikkeling in de blootstelling

8.2.2.1 / Algemeen

De Europese richtlijn voor medische blootstellingen vraagt speciale aandacht voor zogenaamde 'hogedosistechnieken' en blootstelling van kinderen. Onder hogedosistechnieken verstaat men CT-onderzoeken en interventionele technieken (bv. angiografie en coronarografie). Tabel 7a liet al zien dat dit inderdaad de onderzoeken zijn waarbij de hoogste doses worden ontvangen. In tegenstelling tot andere landen neemt het aantal onderzoeken van bloedvaten in Vlaanderen niet toe (figuur 7). Dit is het gevolg van het feit dat sommige diagnostische onderzoeken vervangen werden door minder invasieve alternatieven. Omdat een aantal diagnostische procedures vervangen werden door CT-angiografie, komt die dosis nu terecht bij de CT-onderzoeken.

Het aantal interventionele procedures neemt wel toe, en precies daarom verdient deze groep van onderzoeken meer dan ooit onze aandacht. Door verbeterde technieken – zowel wat betreft de radiologische beeldkwaliteit als de interventionele mogelijkheden – neemt de complexiteit van de ingrepen toe. Dit betekent dat zowel de gebruikte doorlichtingstijden toenemen, als het aantal radiologische beelden. Dit gaat onvermijdelijk gepaard met een toename van de stralingsdosis voor de patiënt. Deze evolutie is zichtbaar in de gegevens van UNSCEAR waar de gemiddelde dosis voor een onderzoek van bloedvaten (angiografie) opliep van 6,8 mSv in 1993 naar 12 mSv in 2000. Onderzoek in Vlaanderen, gefinancierd door het SCK en in samenwerking met KUL en VUB, heeft deze waarden bevestigd: bv. bij angiografie van de onderste ledematen werd in 6 hospitalen een gemiddelde effectieve dosis van 11,6 mSv bepaald (Struelens, 2005b).

Op advies van de HGR initieerde het FANC in 2003 een eerste nationale multicenter-studie voor inventarisatie van de dosis voor patiënt en medisch personeel bij hoge dosisonderzoeken in België. In dit kader mat Smans voor angiografie van de onderste ledematen een derde kwartiel waarde¹ van 4,6 mSv voor mannen en 6,3 mSv voor vrouwen (Smans, 2007b). Bleeser et al. publiceerden hogere dosissen (Bleeser et al., 2007). Voor diagnostische, respectievelijk therapeutische, procedures van de kransslagaders mat Bogaert 9,6 mSv, respectievelijk 15,3 mSv, (Bogaert, 2007). Zoals al aangegeven in de figuren 25 en 26, bestonden er belangrijke verschillen tussen de verschillende centra. Dank zij de talrijke meetgegevens was een gerichte feedback mogelijk naar de verschillende centra. Na alarmerende publicaties in de internationale literatuur betreffende pediatrie CT heeft het FANC in 2007 besloten om een beperkte multicenter-studie rond dit specifieke onderwerp te financieren.

De huiddosis voor de patiënt kan bij interventionele procedures oplopen tot boven de grens waarbij directe huidschade kan ontstaan (Van de Putte, 2000). Dit is ook het geval bij neuroradiologische interventies (Struelens, 2005a). Struelens berekende ook de waarde van het dosis-oppervlakte product dat geassocieerd is met huiddosissen boven 2 Gy. In de directe toekomst moeten de unieke gegevens die in België werden verzameld aan de medische praktijken worden kenbaar gemaakt.

8.2.2.2 / Radiologie bij kinderen

Kinderradiologie verdient volgens de Europese Commissie speciale aandacht omdat kinderen een verhoogd risico voor straling lopen. We onderscheiden ook bij kinderen verschillende types onderzoeken: de klassieke radiografische opnames, de interventionele procedures en CT. Het SCK financiert op dit ogenblik een doctoraatsstudie om de dosissen bij prematuur geboren kinderen te evalueren en mogelijks te optimaliseren. Sommige te vroeg geboren baby's krijgen tot 100 radiografiën in het eerste levensjaar (Donadieu, 2006; Vaño, 2007 en metingen in de KUL). Deze opnames kunnen gerechtvaardigd zijn, maar men heeft in het kader van het ALARA-principe daarenboven de plicht om de blootstelling te optimaliseren. De HGR beval het FANC aan om epidemiologische opvolging van deze te vroeg geboren baby's op te starten. Uit een onderzoek bij 15 Vlaamse ziekenhuizen bleek dat de Europese leidraden daaromtrent (EC, 1996b) nauwelijks bekend zijn. Ook bleek dat de stralingsbeschermingstechnieken specifiek voor kleine kinderen in de meerderheid van de pediatrie diensten niet gekend zijn of niet toegepast worden (Bijnens, 2003).

¹ Het derde kwartiel van de dosisverdeling is een dosiswaarde die berekend wordt uit de gemeten dosisverdeling zodat 75 % van de gemeten dosiswaarden beneden dit niveau liggen.

Een groep Gentse onderzoekers mat de stralenbelasting bij kinderen tijdens hartkatheterisatie (Bacher, 2005). Hun conclusie is dat bij kinderen de huiddosis geen problemen oplevert in tegenstelling tot volwassenen waar de limiet voor permanente huidschade soms wordt overschreden. De effectieve dosis is evenwel van dezelfde orde van grootte, wat – gezien de grotere stralingsgevoeligheid van kinderen – een hoger risico tot gevolg heeft. De onderzoekers adviseren daarom om zeker bij kinderen de dosis te bewaken met een dosis-oppervlakte product meter en om met extra filtratie de dosis zo laag mogelijk te houden. Het is belangrijk de dosisresultaten in het patiëntendossier op te nemen en deze te betrekken in de besluitvorming voor verdere klinische opvolging.

Een studie aan de KUL uitgevoerd na de introductie van een nieuwe digitale zaal, toonde derde kwartiel waarden voor diagnostische procedures van 11,3 mSv bij pasgeborenen tot 7 mSv voor kinderen tussen 10 en 15 jaar (Dragusin, 2007). Therapeutische procedures zijn veel complexer. Dit uit zich in hogere effectieve dosissen, met derde kwartiel waarden tussen 13,3 mSv en 34,1 mSv.

In de VUB voerde men een studie uit naar de dosissen van pediatrie CT in 7 centra. Er werden belangrijke verschillen in dosis waargenomen tussen de verschillende centra (Pages, 2003). Sinds april 2007 financiert het FANC een studie in de pediatrie CT waarin 20 centra zullen betrokken worden. In de berekeningen van dit MIRA-Achtergronddocument werd er niet gedifferentieerd tussen kinderen en volwassenen.

8.2.2.3 / Digitale radiologie

Digitale radiologie vervangt in snel tempo de conventionele radiologie met film. De introductie van digitale technieken leidt echter niet automatisch tot lagere doses. Zo bleek uit het DIMOND en SENTINEL project in opdracht van de Europese Commissie (www.dimond3.org) dat er duidelijk nood is aan dosissupervisie om de blootstelling bij digitale radiologie binnen de perken te houden. Een conferentie van de Society of Pediatric Radiology signaleerde een geleidelijke verschuiving van de instelfactoren van röntgentoestellen door de medische beeldvormers naar hogere dosiswaarden. Een hogere dosis leverde in het verleden bij de röntgenfilms, een overbelichte film op. Bij digitale systemen leidt een hogere dosis, binnen bepaalde grenzen tot betere beelden. De Society of Pediatric Radiology pleit daarom voor het opleggen van praktische richtlijnen. Zonder dergelijke richtlijnen kunnen gebruikers een routine ontwikkelen die tegen het ALARA-principe ingaat (Willis, 2004).

Een Belgische studie van het erkend organisme Controlatom toonde aan dat met de omschakeling naar digitale beeld dragers de dosis kan gehalveerd worden op voorwaarde dat de apparatuur strak wordt gecontroleerd. Een belangrijk deel van de gecontroleerde apparatuur werkte niet volgens de opgelegde standaarden (Dierckx, 2005).

8.2.2.4 / Screeningsprogramma's bij specifieke bevolkingsgroepen

In de nabije toekomst kunnen naast de borstkankerscreening nog andere *screeningsprogramma's* gestart worden. Dit kan het gebruik van ioniserende stralen verder doen toenemen. Het is van belang dat erover gewaakt wordt dat bij nieuwe acties de dosis en kwaliteit in goede balans zijn, zodat deze extra onderzoeken bij asymptomatische personen gerechtvaardigd zijn. Zo steunen de kwaliteitszorgacties in het kader van de borstkankerscreening op Europese inzichten en richtlijnen (van Engen, 2006).

Overheid en onderzoeksgroepen doen er goed aan om de internationale evoluties op het vlak van potentiële nieuwe screeningstechnieken van nabij op te volgen. De Hoge Gezondheidsraad heeft in haar CT-rapport van 2006 de voorwaarden voor screening expliciet besproken en ethische bezwaren geuit bij het gebruik van de nieuwe trend van total body screening die zich op een commerciële manier in de Verenigde Staten ontwikkelde.

8.2.3 / Beleid en maatregelen

8.2.3.1 / Beperking van de blootstelling

De blootstelling aan ioniserende straling is in het geval van medische toepassingen veelal gerechtvaardigd, aangezien het stellen van een nauwkeurige diagnose meestal primeert op het blootstellingsrisico. Dit belet echter niet dat de blootstelling zo laag als redelijkerwijze mogelijk moet gehouden worden (ALARA-principe). De Europese medische richtlijn die met het KB van 20 juli 2001 in Belgische reglementering werd omgezet, verscherpt de voorwaarden voor het gebruik van ioniserende straling in de geneeskunde. Het geeft een rol aan de deskundige in de medische stralingsfysica bij radiotherapie, nucleaire geneeskunde en nu ook in de radiologie. Deze moet onder andere toezien op de stralingsdosis voor de patiënt en de kwaliteit van de diagnostische beeldvorming. Volgens de regelgeving dienen zij kwaliteitscontroleprogramma's te coördineren. Het financiële kader is echter zeer beperkend waardoor de wettelijke verplichtingen vaak minimaal worden ingevuld. Gezien de enorme technische ontwikkelingen die de beeldvormingssector nog doormaakt, is er voortdurend onderzoek vereist om relevante optimalisatieschema's te selecteren en te implementeren in de medische praktijk. Er is een belangrijke rol weggelegd voor aanbevelingen en normen. Op dit ogenblik worden nieuwe protocollen op een totaal vrijwillige basis opgesteld onder leiding van de beroepsvereniging van medische fysici. Mits betere omkadering zou de snelle technologische evolutie beter opgevolgd kunnen worden. De betrokken overheden moeten er vooral over waken dat de taken van medische stralingsfysica niet uitgehold worden tot een jaarlijkse kwaliteitscontroletest van de apparatuur. De Europese richtlijn verplicht de overheden immers tot heel wat meer: opstelling van voorschrijfcriteria voor artsen, referentieniveaus voor de patiëntendosis bij standaardonderzoeken, kwaliteitsborgingsprogramma's, een systematische patiëntendosimetrie en een schriftelijk protocol voor elk soort radiologische standaardhandeling en voor elke apparatuuropstelling.

In september 1998 startte in Brussel de eerste Vlaamse dagopleiding voor Technologen Medische Beeldvormers in België. België was het laatste Europese land waar een dergelijke opleiding werd opgestart. Na een aanvankelijke scepsis wordt het belang van deze beroepsopleiding door de meeste diensten erkend. Doordat er lange tijd geen specifieke beroepsopleiding is geweest bestaat er een historisch deficit wat betreft vakkennis op de meeste radiologische diensten. In de huidige radiologische context met een zeer snel veranderende technologie (digitale systemen, introductie van PET, PET-CT, multi snede CT) is een degelijke, brede technologische achtergrond juist erg belangrijk.

Het KB van 20 juli 2001 heeft zeker een dynamiek op gang gebracht in de Vlaamse ziekenhuizen. Het meest concrete gevolg totnogtoe is de verplichte opleiding van de medische beeldvormers. De specialisten radiologie, nucleaire geneeskunde en radiotherapie krijgen inmiddels tijdens hun studie een verplicht studiepakket met kennisproef over de effecten van straling en over stralingsbescherming. Tijdens recente congressen werd herhaaldelijk gewezen op de nood aan gedegen training en continue vorming van al de radiologische werkers in de gezondheidszorg, zowel artsen als assistierend personeel (Mettler, 2004; Teeuwisse, 2004; Wall, 1997; Willis, 2004).

De Belgische vereniging voor nucleaire geneeskunde heeft richtlijnen gepubliceerd over het gebruik van radionucliden en toedieningshoeveelheden voor verschillende onderzoeken (BSNM, 2002). De hoge gezondheidsraad publiceerde eind 2003 een rapport over "Kwaliteitscontrole en stralingsbescherming in de nucleaire geneeskunde". De rol van diverse betrokken beroepsgroepen en de vormingsvereisten werden door een werkgroep onderzocht om de blootstelling van patiënten en medisch personeel te optimaliseren volgens het ALARA-principe. Bijzondere aanbevelingen zijn toegevoegd voor informatie en communicatie, praktische inrichting van lokalen en precisering van de afvalaanpak. In 2006 publiceerde de Hoge Gezondheidsraad een rapport over bijzondere toepassingen in de nucleaire geneeskunde (HGR, 2006). Het bevat praktische aanbevelingen voor heel concrete situaties of vraagstellingen (zoals het gebruik van nucleaire geneeskunde voor screening van gezonde personen en bij gerechtelijke geneeskundige onderzoeken) en een uitgebreide referentielijst.

Op de bijeenkomst van de DoseDataMed-werkgroep in 2004 bleek dat alle betrokken landen werken aan het opstellen van diagnostische referentieniveaus (DRL's) zoals deze door de Europese Commissie zijn gedefinieerd. Vlaanderen en België lijken hier een achterstand te hebben. Het valt ook op dat in de meeste landen de overheid als motor van deze initiatieven fungeert. De eerste Belgische multicenter-studie rond dosis en beeldkwaliteit van hoge dosis

onderzoeken heeft DRL's aangereikt voor een aantal frequente bloedvatenonderzoeken en interventies (tabel 9b). Deze referentiewaarden zijn voor sommige onderzoeken nog preliminair omdat er soms data van minder dan 20 centra gebruikt werden. Eerder werd in opdracht van VMM al het gebied van de eenvoudigere onderzoeken en CT gedeeltelijk bemonsterd (Mol, 2001; tabel 9a). Bij gebrek aan andere Belgische initiatieven wordt een alternatieve weg gevolgd via deelname aan Europese dosisstudies. Dit gebeurde bv. door intensieve samenwerking met de DIMOND en SENTINEL onderzoeksgroepen (Smans, 2007; Michielsen, 2007). Alle studies tot dusver tonen een grote spreiding tussen de centra onderling. Dit relatieveert enigszins de waarde van de dosisschattingen ten gevolge van medische blootstellingen in dit document.

Tabel 9a: Diagnostische referentieniveaus voor radiodiagnostische onderzoeken (in mGy) en voor CT (in mGy.mm) op basis van onderzoek in Vlaanderen en uit de literatuur

onderzoek	Vlaanderen	EC 1996a	NRPB 1995	Johnson 2000	EC 2000
thorax PA	0,2	0,3	0,2	0,3	..
thorax LAT	1,5	1,5	0,7	..	..
lumbale wervelzuil AP/PA	8,0	10	7,0	8,0	..
lumbale wervelzuil LAT	12,5	30	19	24	..
abdomen AP	5,0	10	7,2	6,0	..
CT thorax	2 800	..	..	..	6 500
CT abdomen	5 000	..	..	..	7 800

PA: Posterieur-Anterieur, een foto genomen met de röntgenbron aan de rugzijde van de patiënt
 AP: Anterieur-Posterieur, een foto genomen met de röntgenbron aan de voorkant van de patiënt
 LAT: Laterale opname, de röntgenbron bevindt zich aan de zijkant van de patiënt

Bron: Mol, 2001; EU, 1996a; Hart, 1996; Johnson, 2000; EU, 2000b.

Tabel 9b: Preliminare diagnostische referentieniveaus voor angiografische procedures, verkregen tijdens de eerste Belgische multicenter-studie van hoge dosis onderzoeken

procedure	3 ^{de} kwartiel DAP (Gy.cm ²)	gemiddelde waarde van lokale DRLs (Gy.cm ²)	preliminaire DRL (Gy.cm ²)
AOL	74,6	74,3	75,0
cerebrale angiografie	71,0	78,0	75,0
D/S van de femorale vaten	12,0	16,0	14,00
D/S van de iliacale vaten	84,0 (all)		
	90,0 (R)	105,0 (R)	-
	12,0 (V)	11,0 (V)	

AOL=angiografie van de onderste ledematen; D/S=dilatatie/stenting ; R= radiologie; V=vasculaire chirurgie

Bron: Bleeser et al., 2007.

De Hoge Gezondheidsraad (HGR) stelde al in 1999 aanbevelingen op voor de kwaliteitscontrole en de stralingsbescherming in de radiologie over het volledige radiodiagnostische traject. Ze beogen daarmee een vermindering van het aantal radiologische onderzoeken (voorschrijfcriteria, optimalisering onderzoeksprotocollen), een beter toezicht op de instellingen (koppeling technische controle / terugbetaling), de precisering van de bevoegdheden voor de bescherming van patiënten en werknemers, en een betere opleiding van artsen in de stralingsbescherming. Daarnaast stelde de HGR in 1997 voorwaarden vast voor hospitalisatie en ontslag van patiënten na metabole behandelingen met radionucliden.

De *nieuwe digitale detectoren* zijn doorgaans (iets) performanter dan de klassieke film-scherm combinaties en de technische kwaliteit van de medische beeldvorming kan daarom verbeteren. Bij digitale beeldvorming leidt het gebruik van hogere dosis echter tot beelden die minder ruis vertonen. Het is een uitdaging voor het beleid en de medische wereld om de kracht van de moderne beeldvorming optimaal te benutten. Men moet de dosisniveaus zo kiezen dat de balans tussen dosis en kwaliteit optimaal is voor de beoogde toepassingen. Deze werkwijze vereist een cultuurwijziging bij de artsen. Hieromtrent heerst onwetendheid, mede ook omdat in ons land geen basiswaarden over de dosis per onderzoek ter beschikking zijn uit het verleden. De situatie betreffende de technische kwaliteit is zo mogelijk nog beperkter. Er is een rol weggelegd voor systematische dosis- en beeldkwaliteitsstudies. Idealiter zou men eerst het kwaliteitsniveau in Vlaanderen moeten bepalen en vervolgens met goed onderbouwde argumentatie de kwaliteit bij het invoeren van specifieke, nieuwe apparatuur verder opdrijven of de dosis reduceren tot het algemeen aanvaarde kwaliteitsniveau gehaald wordt. Deze optimalisaties vereisen een multidisciplinaire aanpak van technisch en medisch geschoold personeel. Met een multicenter studie zou men sneller vooruit komen.

Een analyse van de radiologische praktijk in het Verenigd Koninkrijk in de jaren tachtig en negentig leert dat de toename van het aantal onderzoeken en de verschuiving van de keuze van de onderzoekstechniek naar CT gecompenseerd wordt door een reductie van de dosis per onderzoek met ongeveer 50 % (Hart, 2004). Deze dosisreductie in het Verenigd Koninkrijk was onder meer het gevolg van de training van beeldvormers en radiologen, het gebruik van voorschrijfcriteria en de invoering van kwaliteitscontroles. De toepassing van deze maatregelen deed voornamelijk de spreiding in dosis tussen de verschillende centra afnemen. Een vergelijking met dosiswaarden in Vlaanderen leert dat de doses voor vergelijkbare onderzoeken in Vlaanderen twee tot drie keer hoger liggen (Mol, 2001).

Systematische evaluaties zouden de stralingsbelasting van patiënt en personeel drastisch kunnen verminderen. De wettelijke verplichtingen, zoals beschreven in het Vademecum van de radiologie, worden langzamerhand geïmplementeerd. Steeds meer diensten beschikken over DAP-meters maar missen de kennis, de routine of de omkadering om de relevante gegevens te registreren. Een wetenschappelijk onderbouwde centrale gegevensopslag is een deel van de oplossing. Sommige gegevens uit de digitale beelden tonen de dosisniveaus maar kunnen veel ruimer gebruikt worden, als integraal deel van een totaal kwaliteitszorg programma. Het Vademecum laat toe deze mogelijkheden te benutten en als eerste stap is er nu nood aan een pilootproject.

Bovenstaande suggesties naar het beleid toe gelden ook voor tandheelkundige praktijken. Er zijn immers opvallende gelijkenissen: hoge dosistechnieken zoals CT zijn in opmars en digitale detectoren vervangen de klassieke filmpjes. Ook zijn er verschillende opleidingsacties met betrekking tot stralingsbescherming geweest. Tandartsen maken vooral opnamen bij kinderen. De beroepsverenigingen vragen uitdrukkelijk naar zinvolle, betaalbare en concrete acties rond stralingsbescherming.

8.2.3.2 / *Betere dosisbepaling en risico-inschatting*

In de meeste overzichtsrapporten en ook voor UNSCEAR worden effectieve dosissen gerapporteerd. De effectieve dosis kan nochtans niet direct gemeten worden en wordt in de radiologie afgeleid uit meetbare grootheden die de patiëntendosis karakteriseren zoals: de toestelparameters van het onderzoek, de intreedosis, het dosis-oppervlakteproduct (DAP) en de Computed Tomography Dose Index (CTDI). Met behulp van computermodellen kan per verrichting de conversiefactor van een meetbare grootheid naar effectieve dosis worden bepaald. Deze conversiefactoren zijn noodzakelijkerwijze een benadering van de realiteit. Het overzicht van de doses in Vlaanderen ten gevolge van de medische blootstelling zou significant verbeterd kunnen worden indien conversiefactoren zouden vastgelegd worden voor de verschillende onderzoekstypen die het RIZIV definieert. Momenteel werkt een projectgroep (SCK en UGent) met ondersteuning van het FANC aan een volledige en systematische lijst van conversiefactoren voor angiografische onderzoeken en coronarografie. Dragusin heeft conversiefactoren berekend voor pediatrie cardiologie (Dragusin, 2007) en Smans berekende conversiefactoren voor longfoto's en abdominale

foto's bij prematuren (Smans, 2007b). Conversiefactoren voor "eenvoudige" onderzoeken ontbreken, in casu voor kinderen. Zodra de dosimetrie in de centra gestart is – en de vermelde parameters ter beschikking komen – zou een lijst met conversiefactoren, bekrachtigd door Belgische experts, toelaten om de bevolkingsdosis beter in te schatten.

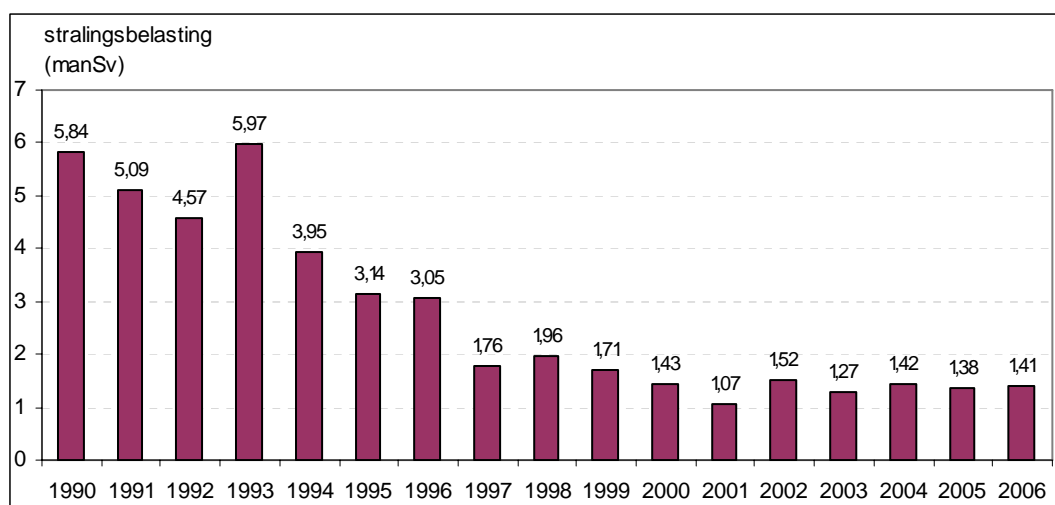
Het gebruik van effectieve dosis als maat voor de stralingsbelasting heeft een aantal beperkingen. Huiddosis en orgaandosis zijn in bepaalde gevallen betere risico-indicatoren en de leeftijdsverdeling van patiënten wijkt af van de standaard bevolkingssamenstelling waarop de ICRP-risicocoëfficiënten zijn gebaseerd (zie tabel 12). De leeftijdsverdeling van de Vlaamse patiënt zou bestudeerd moeten worden en de afwijking met de standaardverdeling zou bepaald moeten worden. In het rapport van de HGR over het gebruik van de CT in België, vinden we de leeftijdsverdeling bij CT-onderzoeken in de universitaire centra. Tot 70 % van de CT-onderzoeken wordt uitgevoerd op een populatie die ouder is dan 45 jaar. Pediatrische CT-onderzoeken vertegenwoordigen 3 % van de onderzoeken; adolescenten en jong volwassenen krijgen 14 % van het totaal aantal CT onderzoeken. Patiënten zijn dus gemiddeld ouder dan de algemene bevolking en lopen dus per eenheid van effectieve dosis minder risico dan uit de ICRP risicocoëfficiënten zou kunnen afgeleid worden (tabel 12). Anderzijds leidt het gebruik van de effectieve dosis onze aandacht af van meer gevoelige risicogroepen zoals prematuren. Ondanks deze beperkingen wordt de effectieve dosis door de meeste auteurs en instellingen gebruikt voor het uitdrukken van patiëntendoses en bij onderlinge vergelijkingen van medische stralingsbelasting.

8.3 | Blootstelling aan ioniserende straling in en rond kerncentrales S

Doses van meer dan 10 mSv/j zijn zeldzaam in de nucleaire industrie, tenzij voor sommige groepen externe werknemers bij herlading en onderhoud van reactoren. In productiecentrales krijgen externen de hoogste collectieve dosis. Deze wordt in de ons omringende landen op 65 à 80 % van de totale dosis geraamd. In tegenstelling tot onze buurlanden is er in België geen centraal operationeel bestand van de doses die nucleaire werknemers ontvangen.

In 2006 bedroeg de collectieve jaardosis in Doel 1,41 manSv, inclusief externe werknemers. Dit is beduidend lager dan de collectieve dosis uit het begin van de jaren negentig van ongeveer 5 manSv (figuur 30). Omgerekend per eenheid van geproduceerde elektrische energie bedroeg de collectieve werknemersdosis in 2006 0,6 manSv per GWj (1 GWj = 8,76 TWh).

Figuur 30: Evolutie van de collectieve stralingsbelasting voor de werknemers van de kerncentrale van Doel (1990-2006)



Bron: Electrabel, 2007.

Midden 2004 werden de *stoomgeneratoren* van Doel 2 vervangen omwille van toenemende corrosieproblemen met de duizenden buizen waaruit een stoomgenerator bestaat. Omdat de vervanging bij de bouw van de centrale niet voorzien was, heeft men gaten moeten snijden in het omhulsel van het reactorgebouw om de dertig jaar oude stoomgeneratoren eruit te halen en de nieuwe te plaatsen. De collectieve dosis voor de vervanging van de stoomgeneratoren bedroeg 0,195 manSv, dit is honderd keer lager dan de vervanging van de eerste stoomgeneratoren in de Verenigde Staten twintig jaar eerder. Door de betere warmte-uitwisseling is het elektrisch vermogen van Doel 2 met 10 % toegenomen tot 433 MW. De totale investering bedroeg 84 miljoen euro. Electrabel plant de vervanging van de stoomgeneratoren van Doel 1 in november 2009 en dit ondanks de wettelijk bepaalde sluiting van Doel 1 en 2 in 2015. Het FANC leverde eind 2007 een voorlopige vergunning af voor die vervanging. De verwerking en definitieve stockage van de stoomgeneratoren is met akkoord van NIRAS uitgesteld tot bij de ontmanteling van de centrales.

Het United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) evalueert de *wereldwijde impact* van de nucleaire splijtstofcyclus. De UNSCEAR-schattingen voor de collectieve bevolkingsdosis (=som van alle individuele doses) per eenheid van geproduceerde elektrische energie zijn samengevat in tabel 10 (UNSCEAR, 2000). De *lokale en regionale component* die de doses omvat gerelateerd aan de uitbating van de verschillende nucleaire installaties, bedraagt 0,9 manSv/GWj. De voornaamste bijdragen daarin komen van de ontginning van uranium, de atmosferische lozingen van kerncentrales en de opwerking van bestraalde splijtstof. De individuele doses van de lokale bevolking door de industriële activiteiten van de splijtstofcyclus zijn bij normale werking laag, grootteorde 1 $\mu\text{Sv/j}$ of lager (zie ook tabel 5). Accidentele blootstelling en in het bijzonder een kernongeval vormt de grootste bedreiging, maar deze kleine risico's met verstrekkende gevolgen voor de bevolking (vb. ongeval in Tsjernobyl) zijn niet in de UNSCEAR-cijfers verwerkt.

De schatting van de *wereldwijde component* – die de doses afkomstig van radioactieve afvalproducten uit de splijtstofcyclus omvat – is veel groter: 50 manSv/GWj. Dit is de som van alle doses over de ganse wereldbevolking voor de komende 10 000 jaar als gevolg van 1 GWj nucleaire elektriciteitsproductie. De voornaamste bijdragen komen van het geloosde koolstof-14 en van de emissie van het edelgas radon uit de grote hoeveelheden langlevend radiumhoudend afval van de uraniumwinning. UNSCEAR schat de bijdrage voor het bergen van het laag- en middelactief afval van de kerncentrales laag in: respectievelijk 0,00005 en 0,5 manSv/GWj. Voor het hoogactief afval geeft UNSCEAR geen cijfers omdat er bij de publicatie van het rapport in 2000 nog geen enkele geologische berging in gebruik was.

Een continue nucleaire elektriciteitsproductie van 250 GWj² zou op lange termijn resulteren in een toename van de individuele dosis van de wereldbevolking met 1 $\mu\text{Sv/j}$. Voor Vlaanderen zou dit overeenkomen met een toename van de huidige gemiddelde blootstelling met 0,02 % (zie ook figuur 2). Voor een beperkte productieperiode van 100 of 200 jaar wordt de mondiale toename geschat op respectievelijk 0,1 of 0,16 $\mu\text{Sv/j}$.

² Mondiaal werd in 2006 voor 303 GWj elektriciteit opgewekt in kerncentrales. In België bedroeg de nucleaire stroomproductie dat jaar 5,1 GWj (of 44,3 TWh).

Tabel 10: Collectieve bevolkingsdosis door de nucleaire brandstofcyclus per GWj elektrische energie geproduceerd in kerncentrales (Wereld, 1995-1997)

gedeelte van de splijtstofcyclus*	collectieve dosis manSv/GWj
lokale en regionale component tijdens uitbating	
1 ontginning uraniumerts	0,19
verwerking uraniumerts	0,008
mijnafval (emissie van radon over een periode van 5 jaar)	0,04
2&3 verrijking en vervaardiging kernbrandstof	0,003
4 reactorwerking: atmosferische lozingen	0,4
reactorwerking: vloeibare lozingen	0,04
5 opwerking: atmosferische lozingen	0,04
opwerking: vloeibare lozingen	0,09
1&6 vervoer	< 0,1
<i>totaal (afgerond)</i>	<i>0,9</i>
berging vast afval en wereldwijd verspreide radionucliden over 10 000 jaar	
1 mijnafval (emissie van radon)	7,5
2&4 reactorwerking: berging laagactief afval	0,00005
reactorwerking: berging middelactief afval	0,5
reactorwerking: berging hoogactief afval	zie tekst
5 opwerking: berging vast afval	0,05
1&5 wereldwijd verspreide radionucliden (voornamelijk koolstof-14)	40
<i>totaal (afgerond)</i>	<i>50</i>

* nummering zoals in figuur 3

Bron: UNSCEAR (2000)

Bij opwerking van bestraalde brandstof komt het radioactieve edelgas krypton-85 massaal vrij. De achtergrondconcentratie in de lucht is geleidelijk opgelopen van 10^{-8} Bq/m³ vóór 1945 tot 1,4 Bq/m³ in 1999. Sindsdien stagneert de atmosferische concentratie. Deze stagnatie valt samen met een emissiedaling ter hoogte van de opwerkingsfabrieken. Door de preferentiële ZW-windrichting nabij de opwerkingsfabriek in La Hague (Frankrijk) is de krypton-85 concentratie aan onze kust en in de atmosfeer boven Vlaanderen regelmatig verhoogd. Bij ZW-wind meet de Universiteit Gent piekwaarden die kunnen oplopen van 5 tot 30 Bq/m³ (De Clerck, 2003). Het radiologisch risico (hoofdzakelijk ter hoogte van de huid) dat hiermee gepaard gaat, is voor een individu verwaarloosbaar klein. De nucleaire industrie heeft, gezien de geringe gewichtsfactor toegekend aan de huid en de dalende trend in opwerking op mondiaal vlak, afgezien van de invoering van opvangtechnieken voor krypton-85. Deze verhogen immers het accidenteel risico ter plaatse. Anderzijds heeft het accidenteel risico van de niet gebunkerde brandstofbekkens van La Hague door de algemene terrorismebedreiging de nodige aandacht gekregen.

Het SCK en de kerncentrale van Doel hanteren een systematische ALARA-aanpak (As Low As Reasonably Achievable: de dosis zo laag houden als redelijkerwijze mogelijk is) met aandacht voor de kosten-effectiviteit. De collectieve dosis en de maximale individuele dosis van het SCK-personeel bedroegen in 2006 respectievelijk 0,119 manSv en 3,0 mSv.

De uitbatingsvergunningen van de Belgische kerncentrales en nucleaire industrie leggen brongerelateerde dosisbeperkingen voor de omwonenden vast die een fractie zijn van de bevolkingslimiet van 1 mSv/j. De lozingslimieten worden berekend voor de meest blootgestelde groep van personen (kritische groep). De dosisbeperkingen voor de Belgische kerncentrales zijn:

- gasvormige lozingen: voor edelgassen 0,05 mSv/j voor het hele lichaam, voor jodium en aerosolen 0,15 mSv/j voor het hele lichaam;
- vloeibare lozingen: 0,03 mSv/j voor het hele lichaam en 0,1 mSv/j voor elk orgaan.

De dosisbeperking voor lozingen van Belgoproces in de Molse Nete is vastgelegd op 0,25 mSv/j.

Het FANC ziet toe op de naleving van de uitbatingvergunningen. Vanaf september 2001 is ook een vergunning vereist voor ontmanteling van nucleaire installaties en vrijgave van het ontmantelingsafval.

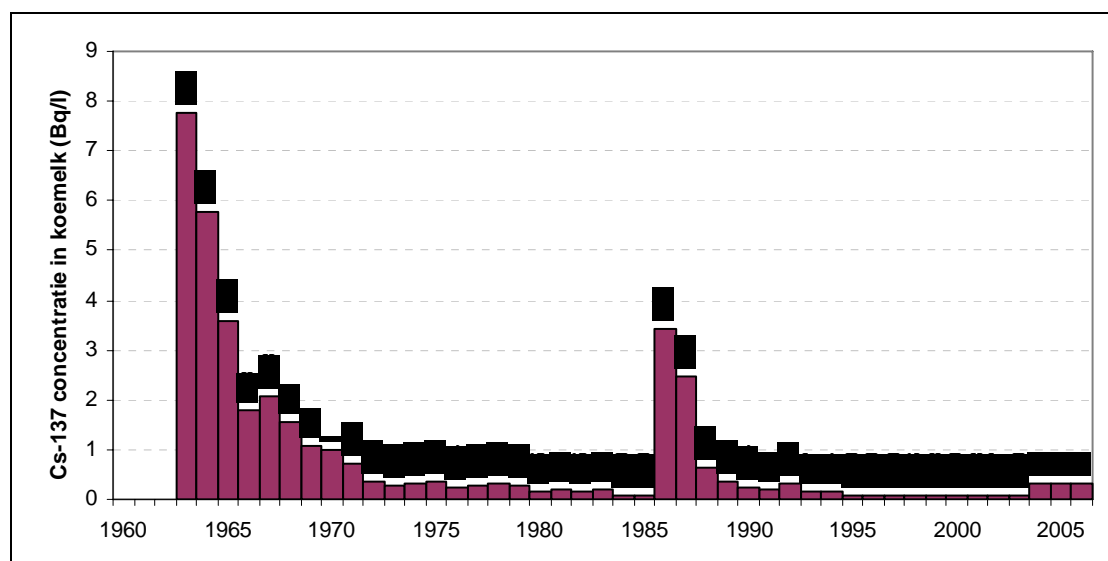
8.4 | Verhoogde blootstelling ten gevolge van kernproeven en het ongeluk in Tsjernobyl S

8.4.1 / Besmetting van koemelk met cesium-137 en strontium-90

De wereldwijde blootstelling door de radioactieve neerslag van de vele bovengrondse kernproeven bereikte zijn hoogtepunt in 1962 en 1963 (figuren 16 en 17) met een gemiddelde bevolkingsdosis van 0,11 mSv/j. Dit komt overeen met 5 % van de natuurlijke stralingsachtergrond. De doses zijn intussen afgenomen tot verwaarloosbare waarden. De belangrijkste radionucliden voor de bevolkingsdosis zijn koolstof-14, cesium-137 en strontium-90.

Het verloop van de cesium-137 en strontium-90 concentratie in melk afkomstig van een boerderij in Dessel is voorgesteld in de figuren 31 en 32. In de beide gevallen komt een piek voor in de jaren 60 te wijten aan de rivaliteit tussen de Verenigde Staten en de Sovjetunie. De cesium-137 concentratie vertoont een tweede piek in 1986 door het ongeval met de kerncentrale van Tsjernobyl. In de strontium-90 figuur komt deze piek niet voor door de beperkte aanwezigheid van strontium-90 in de bronterm van het Tsjernobyl-ongeval.

Figuur 31: Cesiumbesmetting in koemelk van een boerderij in Dessel, provincie Antwerpen (1963-2003; detectielimiet 2004-2006)

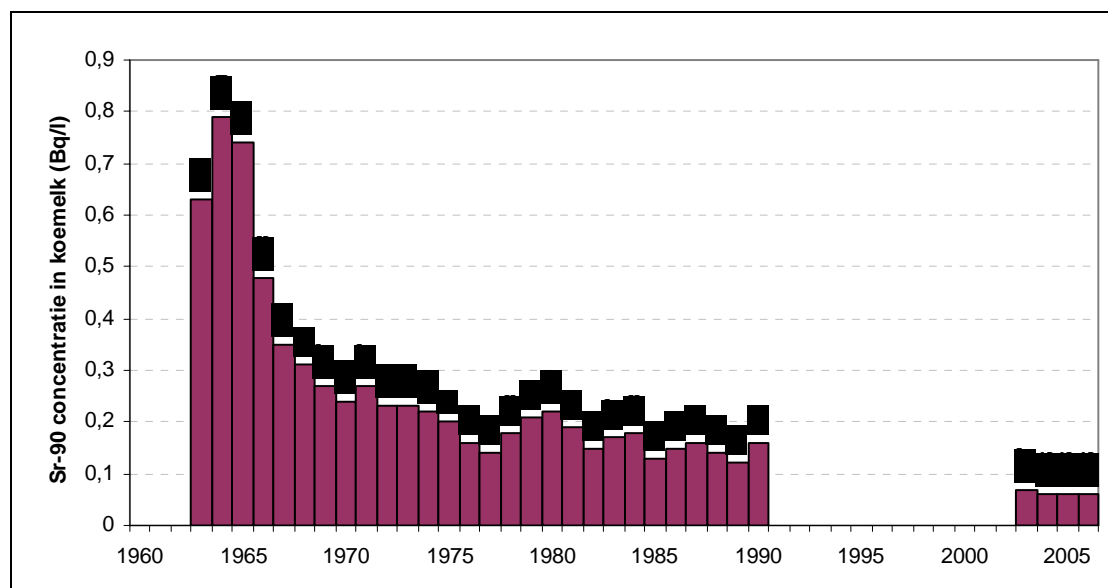


De cesiumconcentratie is vanaf 2004 beneden de detectielimiet van 0,3 Bq/l.

Ter informatie: de concentratie van het natuurlijk radionuclide kalium-40 in melk bedraagt zo'n 45 Bq/l en de radiotoxiciteit van kalium-40 is de helft van cesium-137

Bron: SCK, 2007.

Figuur 32: Strontiumbesmetting in koemelk van een boerderij in Dessel, provincie Antwerpen (1963-1990; 2003; detectielimiet 2004-2006)



Tussen 1991 en 2002 werden geen strontiumanalyses op de melk uitgevoerd. De strontiumconcentratie is vanaf 2004 beneden de detectielimiet van 0,06 Bq/l.

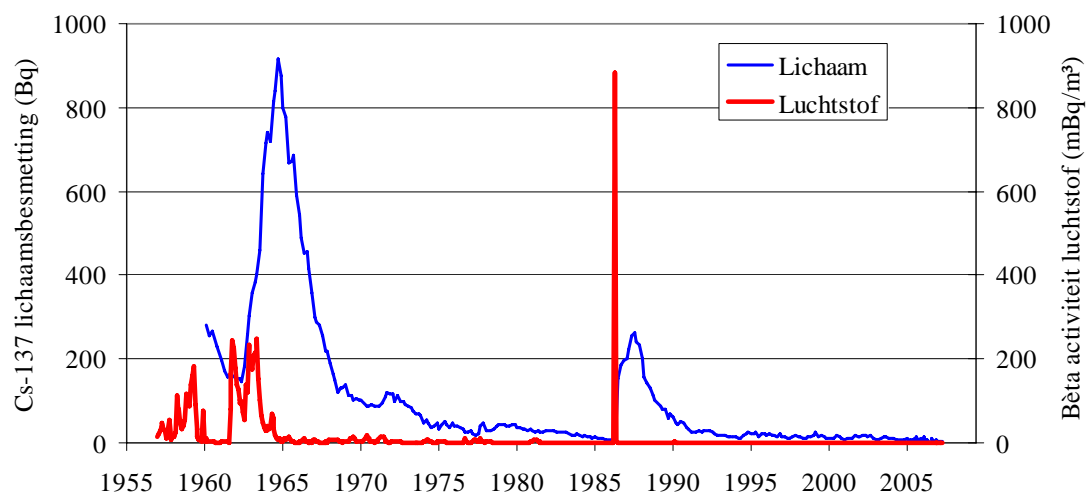
Bron: SCK, 2007.

8.4.2 / Lichaamsbesmetting met cesium-137 bij niet-beroepshalve blootgestelde personen en de maandgemiddelde activiteit van luchtstof

Figuur 33 illustreert de overdracht naar de mens. De figuur toont de gemiddelde hoeveelheid cesium-137 per persoon in de streek Mol-Dessel (provincie Antwerpen) tussen 1959 en 2007. De meetresultaten (Bq/persoon) zijn genormaliseerd voor een persoon met een lichaamsgewicht van 70 kg. De afname van de besmetting na 1963 is sneller dan de fysische halveringstijd van cesium-137 (30 jaar), maar trager dan de zuiveringsprocessen van het lichaam (de biologische halveringstijd van cesium is ongeveer 110 dagen). De inname via de voedselketen neemt immers na verloop van tijd af omdat de neergezette cesium meer en meer in de bodem komt vast te zitten. De maximale cesiumconcentratie in ons lichaam was na het ongeval in Tsjernobyl 4 maal kleiner dan tijdens de kernproeven in de jaren 60.

Figuur 33 toont ook de activiteit van het luchtstof voor de periode 1957 tot 2007. De besmetting van het luchtstof was tijdens het ongeval in Tsjernobyl 4 maal hoger dan na de kernproeven, maar de verhoging duurde slechts één maand, zodat er uiteindelijk minder cesium beschikbaar was voor opname in het lichaam.

Figuur 33: Het verloop van de lichaamsbesmetting met cesium-137 in Bq/persoon bij niet-beroepshalve blootgestelde personen in de streek van Mol-Dessel en de maandgemiddelde activiteit van het luchtstof in Mol in mBq/m³

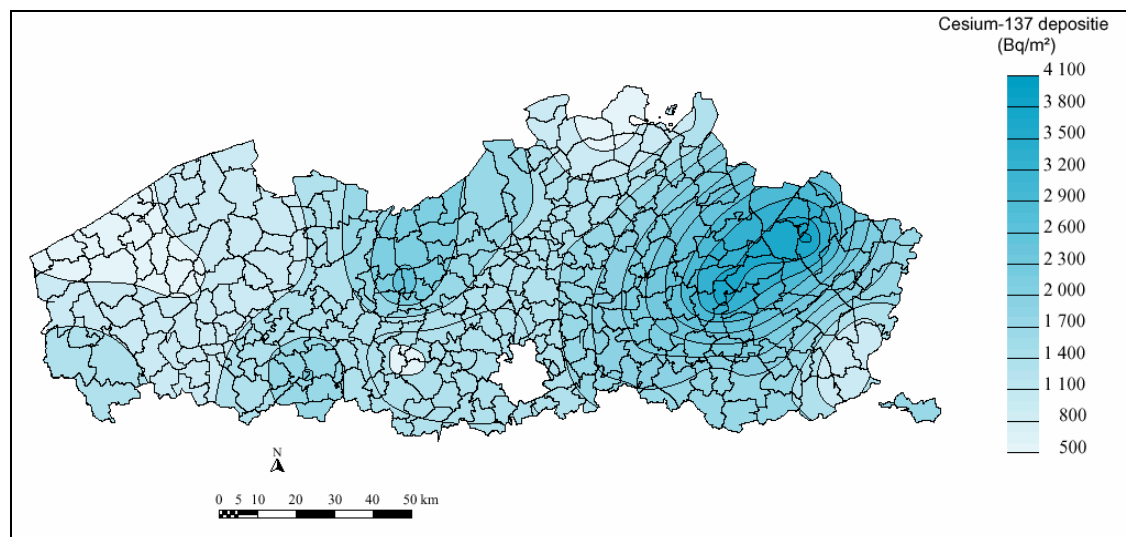


Bron: SCK, 2007.

8.4.3 / Overzichtsk kaart cesium-137 depositie 10 jaar na het ongeval in Tsjernobyl

In figuur 34 wordt de radioactieve depositie van cesium-137 (toestand 1995) in de bodem als gevolg van het ongeval in Tsjernobyl (april 1986) weergegeven. Deze depositie staat in direct verband met de verdeling van de neerslag in Vlaanderen in de week na het ongeval en heeft momenteel een verwaarloosbare jaardosis van 5 μ Sv/j.

Figuur 34: Cesium-137 depositie 10 jaar na het ongeval in Tsjernobyl (Vlaanderen, 1995)



Bron: Uyttenhove, 1997.

8.5 | Reglementering van beroepsactiviteiten waarbij natuurlijke stralingsbronnen aanwezig zijn

De Europese richtlijn basisnormen die met het KB van 20 juli 2001 omgezet werd in onze reglementering, is van toepassing op *beroepsactiviteiten*. Hiermee worden natuurlijke stralingsbronnen bedoeld die niet om hun radioactieve eigenschappen worden gebruikt en

waarvan de dosis vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming niet mag worden verwaarloosd. Centraal in de Belgische regelgeving staat de verplichte dosisevaluatie voor volgende beroepsactiviteiten:

1. De blootstelling aan radon in volgende gebouwen: ondergrondse arbeidsplaatsen, waterbehandelingsinstallaties, onderwijsinstellingen, kinderdagverblijven, verzorgingsinstellingen, openbare gebouwen en elk arbeidslokaal dat zich bevindt in een door het FANC gedefinieerde risicozone. De regelgeving geldt vanaf 3 mSv/j of een jaarlijkse blootstelling aan radon van 800 kBq.h/m³ (of 400 Bq/m³ voor een werkjaar van 2 000 uur);
2. De natuurlijke blootstelling in volgende industrieën: productie van fosfaten, aanwending van zirkoniumzand, tingieterij, extractie van zeldzame aarden, vervaardiging van elektroden voor las- en soldeerwerken die thorium bevatten en elke andere activiteit gedefinieerd door het FANC. De regelgeving geldt vanaf 1 mSv/j voor werknemers;
3. De luchtvaart. De regelgeving geldt vanaf een blootstelling aan kosmische straling van 1 mSv/j.

8.6 | Radioactief besmette gronden door de niet-nucleaire industrie **S**

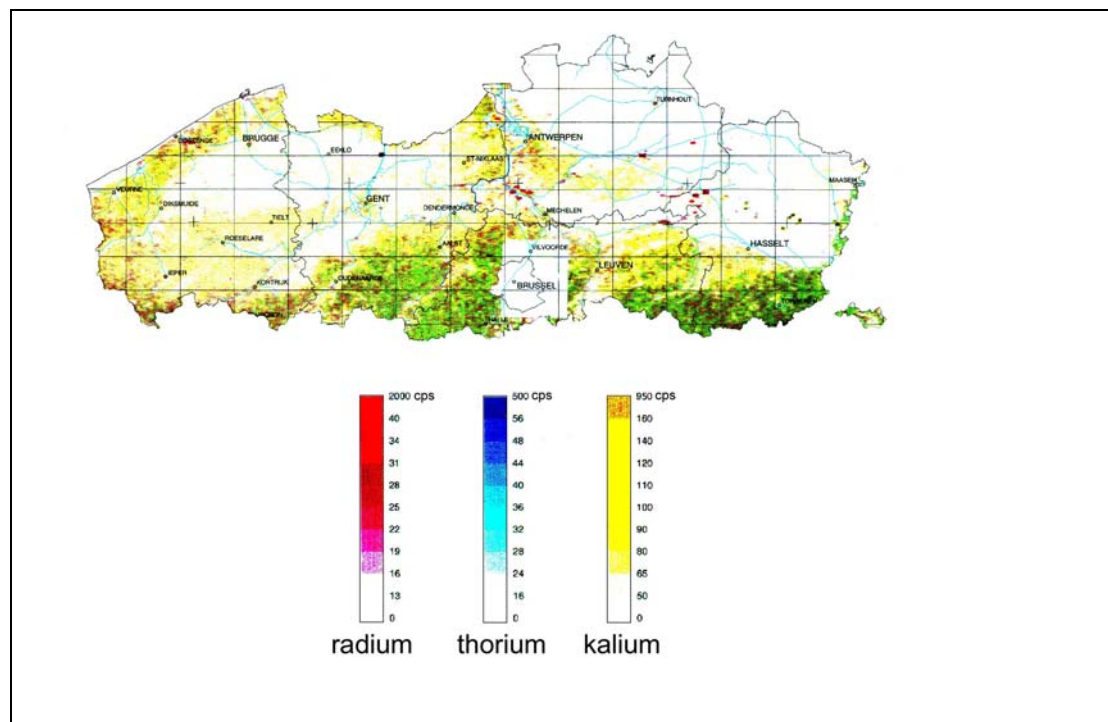
8.6.1 / Inleiding

In 1994 heeft de Belgische Geologische Dienst de gammastraling in België met een vliegtuig laten nameten (figuur 35). Op nogal wat plaatsen in Vlaanderen werden verhoogde radiumconcentraties van industriële oorsprong waargenomen, meestal afkomstig van de fosfaatindustrie door de verwerking van fosfaaterts met hoge uraniumconcentraties (radium-226 is het vervalproduct van uranium-238: figuur 2). De activiteiten van de fosfaatbedrijven zijn duidelijk op de kaart te zien:

- UCB, Oostende: vroegere fosfaatertsverwerking;
- Prayon Rupel, Puurs: vroegere fosfaatertsverwerking;
- Nilefos, Zelzate: fosfaatertsverwerking;
- Tessengerlo Chemie: fosfaatertsverwerking;
- BASF, Antwerpen: fosfaatertsverwerking.

In Olen valt de voormalige radiumfabriek van Umicore (voorheen Union Minière) duidelijk op. Naast de verhoogde radiumconcentraties van industriële oorsprong is op deze kaart ook de natuurlijke achtergrondstraling te zien. Deze neemt stelselmatig toe van noord naar zuid.

Figuur 35: Emissie van ioniserende straling afkomstig van radium-226 (als vervalproduct van uranium), thorium-232 en kalium-40 (Vlaanderen, 1994)

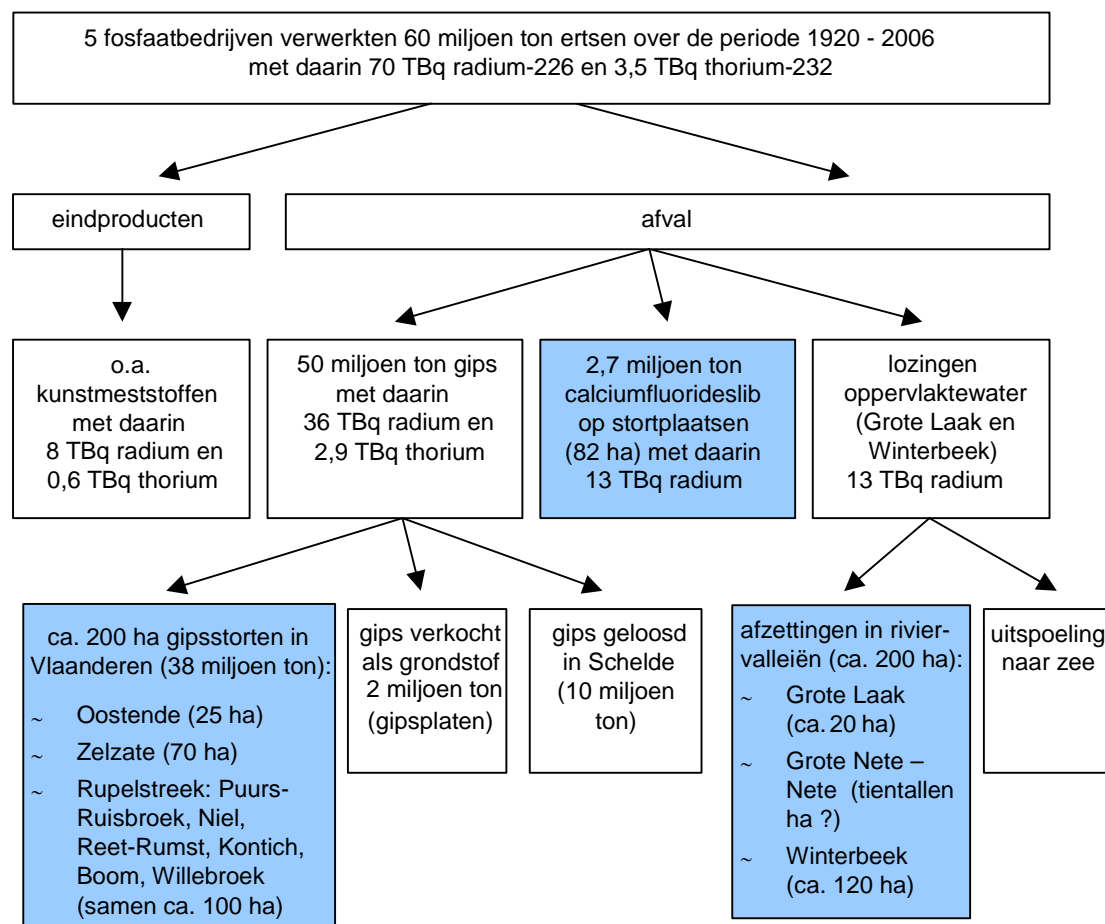


Bron: Belgisch Geologische Dienst, 1997.

8.6.2 / Fosfaatindustrie

De vijf fosfaatbedrijven verwerkten tussen 1920 en 2006 in totaal 60 miljoen ton fosfaaterts (figuur 15), waarin 70 TBq radium en 3,5 TBq thorium vervat zat. Deze radionucliden kwamen naargelang de productieprocessen terecht in de eindproducten (bv. kunstmeststoffen), werden geloosd in het oppervlaktewater of als afval naar stortplaatsen gebracht (figuur 36). In het totaal zijn er in Vlaanderen zo'n 300 ha storten met verhoogde natuurlijke radioactiviteit als gevolg van de fosfaatindustrie. Daarnaast situeert er zich ook nog een omgevingsbesmetting rond de Grote Laak (± 20 ha), de Winterbeek (± 120 ha) en aan de oevers van de Nete bij Lier.

Figuur 36: Verspreiding van radionucliden door de fosfaatindustrie (Vlaanderen, 1920-2006)



Bron: Paridaens (2001, 2002 en 2007).

8.6.3 / Voormalige radiumfabriek

De besmette oppervlakte te Olen en Geel – ten gevolge van de *voormalige radiumfabriek* – bedraagt ongeveer 30 ha (Paridaens, 2000):

- een 9 ha grote stortplaats met ongeveer 120 000 m³ radioactief besmet afval (totale radiumactiviteit ongeveer 10¹² Bq);
- een oppervlakteberging met radiumbronnen en middelactief radiumafval die NIRAS aan het bestuderen is met het oog op een eventuele overname (totale radiumactiviteit 3x10¹³ Bq);
- de oevers en bedding van een 1 400 m lange beek (Bankloop), waarvan de sanering voorzien is tegen eind 2007;
- een 20-tal ha akkerland aan de monding van de Bankloop in de Kleine Nete (op de grens van Geel met Olen);
- een tiental straten met zones besmet wegdek, waarvan de meest besmette ondertussen afgegraven zijn.

8.6.4 / Verwerking coltanerts

Van eind jaren '60 tot begin jaren '70 werd in de Gentse kanaalzone *coltanerts* verwerkt tot het metaal ferroniobium (o.a. gebruikt in micro-elektronica). Dit erts is van nature rijk aan

thorium en in mindere mate uranium. De radioactieve slakken die bij de productie van het metaal werden gevormd, werden op een deel van het eigen bedrijfsterrein gestort.

8.6.5 / Overzicht voor Vlaanderen

Tabel 11 geeft een overzicht van de radioactief besmette gronden die de niet-nucleaire industrie in Vlaanderen heeft voortgebracht door het storten van aangerijkt afval en het lozen van afvalwater.

Tabel 11: Inventaris radioactief besmette gronden (Vlaanderen, 2006)

activiteit	emissievorm	oppervlakte	locatie
fosfaatproductie	gipsafval	ca. 200 ha gipsstorten	- Oostende (25 ha)
			- Zelzate (70 ha)
			- Rupelstreek (ca. 100 ha): Puurs-Ruisbroek, Niel, Reet-Rumst, Kontich, Boom, Willebroek
	calciumfluorideslib	82 ha stortplaatsen	Ham en Tessengerlo
	lozingen op oppervlaktewater	ca. 200 ha afzettingen in riviervalleien	- Grote Laak (ca. 20 ha) - Grote Nete + Nete rond Lier (tientallen ha ?) - Winterbeek (ca. 120 ha)
radiumproductie	storten van afval + lozingen op oppervlaktewater	9 ha stortplaats + ca. 20 ha omgevingsbesmetting	Olen en Geel
verwerking coltanerts	metaalslakken	ca. 5 ha	Gentse kanaalzone

Bron: Paridaens (2001, 2002 en 2007).

Binnen het kader van de tweede inventarisatie van de nucleaire sites in België (2003-2007) werd in opdracht van NIRAS een onderzoek uitgevoerd naar industriële sites besmet met verhoogde concentraties aan natuurlijke radioactieve stoffen (Vanmarcke, 2003). Het onderzoek bouwde voort op de resultaten van de SCK-studies voor MIRA die de fosfaatindustrie en de historische radiumindustrie identificeerden als de belangrijkste industrietakken in Vlaanderen in dit verband (Paridaens & Vanmarcke, 2001 en 2002). Overzicht van de andere industrietakken waar NORM-problemen werden vastgesteld:

- *zirkoonzanden* zijn van nature rijk aan uranium. Ze vinden in België hoofdzakelijk toepassingen als toeslagstof voor de productie van vuurvaste materialen en als vormzand in precisiegieterijen. Deze industrietak ligt aan de basis van een wijde verspreiding van NORM;
- de *staalindustrie* gebruikt op grote schaal grondstoffen met een normale radioactiviteit. Door verhitting concentreren het vluchtige lood en polonium zich in het hoogovenstof, terwijl het radium terecht komt in de hoogovenslakken. Deze laatste fungeren dan weer als grondstof voor de cementindustrie die op haar beurt bijdraagt tot een verdere verspreiding via de bouwindustrie, zij het meestal in een sterk verdunde vorm;
- de situatie in de *kolencentrales* is analoog met die van de staalindustrie. De natuurlijke radioactiviteit concentreert in het vliegias, dat als grondstof wordt ingezet in de cementindustrie, en in het bodemas dat als bouw materiaal wordt gebruikt;
- de *non-ferro industrie* is een vrij uitgebreide industrietak in België die op grote schaal grondstoffen gebruikt met een vrij normale radioactiviteit. Uitzonderingen hierop zijn de kleine hoeveelheden tinconcentraten met als hoofdbestanddeel het mineraal cassiteriet en de doorvoer van coltan via de haven van Antwerpen;
- *thorium* vindt toepassingen in een groot aantal producten en processen, voornamelijk wanneer hoge temperaturen en licht een rol spelen. De radioactiviteit van thorium is

meestal bekend en het afval van deze processen vindt meestal haar weg naar NIRAS. Uitzondering vormen de wolfram laselektroden waaraan thoriumoxide werd toegevoegd en die op grote schaal worden verhandeld en gebruikt. Zowel leveranciers als bedrijven zijn zich niet bewust van de hoge inwendige blootstelling die deze toepassingen onder ongunstige omstandigheden met zich meebrengt. Tegenmaatregelen om het inwendige besmettingsrisico te voorkomen zijn een goede dampafzuiging bij het lassen en het afschuiven van de elektrodepunt met een natslijper;

- bij *drinkwaterproductie* met grondwater werd vastgesteld dat radium zich kan concentreren in het waterwinningslib;
- de *terills van de steenkoolwinning* geven nauwelijks aanleiding tot verhoogde concentraties met natuurlijke radionucliden.

Het FANC heeft de bevoegdheid om de sanering van een NORM-site op te leggen. Omdat deze sites meestal ook niet-radioactief verontreinigende stoffen bevatten, vereist de eventuele sanering ervan een samenwerking tussen de federale overheid voor het nucleair gedeelte en de regionale overheid voor het niet-nucleair gedeelte.

8.6.6 / *Beleid en maatregelen*

De voornaamste blootstellingswegen voor de bevolking in de buurt van een radiumbesmet terrein zijn:

- uitwendige bestraling bij het betreden van het terrein;
- inwendige blootstelling door de consumptie van besmet voedsel en;
- inademing van de vervalproducten van radon (zelf een vervalproduct van radium-226).

Voor het bepalen van de dosisbelasting stelt men blootstellingsscenario's op waarbij men allerlei veronderstellingen moet maken over dosistempo, blootstellingsduur, voedingsgewoonten... De waarden die men voor deze parameters kiest bepalen in belangrijke mate het resultaat. Realistische scenario's voor de meest blootgestelde leden van de bevolking (kritische groep) voor toegankelijke gebieden met radiumbesmettingen van 1 000 tot 10 000 Bq/kg leiden tot uitwendige doses van maximaal enkele mSv/j. Wanneer de besmette gronden ook dienen als groentetuin, afgestemd op de eigen behoeften, kan daar nog enkele mSv/j inwendige stralingsbelasting bij komen. Radonblootstelling in open lucht is door de verdunning meestal geen probleem. Met het omvormen van besmette gebieden tot woonwijken of industriegebieden bestaat evenwel het gevaar dat radongas zich opstapelt in de gebouwen. Radonconcentraties van honderden tot duizenden Bq/m³ zijn dan te verwachten met doses die kunnen oplopen tot enkele tientallen mSv/j.

De radiologische impact van de fosfaatindustrie op de lokale bevolking is nu nog vrij beperkt omdat de meeste besmette terreinen nog als stortplaatsen worden herkend en ontoegankelijk zijn voor de bevolking. De belangrijkste blootstellingswegen, met vooraan de insijpeling van radongas in gebouwen, worden zo vermeden. Uit onderzoek is gebleken dat gipsstorten en besmette terreinen snel één worden met het landschap. Met een inventaris van ongeveer 500 ha besmette terreinen zal de radiologische impact met de tijd toenemen. Maatregelen op het vlak van ruimtelijke ordening dringen zich op, in zoverre het nu al niet te laat is, om bv. via de gewestplannen het toekomstig bodemgebruik te beperken (aanduiding van de radiumbesmette terreinen met vermelding van: niet geschikt voor woningbouw, landbouw, industrie...).

De huidige radiologische impact van de voormalige radiumfabriek in Olen is beperkt tot verhoogde radonconcentraties in enkele woningen in de buurt van het radiumstort en verhoogde dosistempo's boven een aantal besmette plaatsen (bv. aan de monding van de Bankloop). Op 23 april 2004 werd een convenant ondertekend tussen de Vlaamse minister van leefmilieu, OVAM en Umicore voor de sanering van de 4 Vlaamse Umicore vestigingen. De sanering van de Bankloop maakt deel uit van het pakket saneringen buiten de bedrijfsterreinen voor een maximaal bedrag van 3,5 miljoen euro, voor de helft betaald door Umicore en voor de helft door de Vlaamse overheid. De sanering heeft plaats in 2007 volgens de reglementering en procedure van het Vlaamse gewest (Bodemsaneringsdecreet).

Het FANC is enkel bij de radiologische aspecten betrokken. Het afgegraven materiaal van de Bankloop komt terecht op een terrein binnen de bedrijfsomheining van UMICORE. De saneringsopslag is voorzien voor 30 000 m³. Naast het materiaal van de Bankloop zal er ook zo'n 4 000 à 5 000 m³ materiaal van een beperkte sanering binnen UMICORE opgeslagen worden. De sanering van de 9 ha grote stortplaats maakt geen deel uit van het convenant en wordt tot 2013 uitgesteld. Als bewarende maatregel worden een aantal grondwaterstalen onder de stortplaats op chemische contaminanten onderzocht. Voor de vergunde oppervlakteberging met radiumbronnen en middelactief radiumafval kiest Umicore voor het verderzetten van een actief beheer in plaats van overdracht naar NIRAS.

Het bedrijfsterrein in de Gentse kanaalzone waar de slakken van de coltanertsverwerking werden gestort, ligt momenteel braak, waardoor de blootstelling voor de werknemers beperkt blijft. Eventuele bouwwerken of verandering van grondgebruik in de toekomst vereisen wel de nodige voorzorgen, bv. het afgraven van de radioactieve slakken.

Radium-226 heeft een halveringstijd van 1 600 jaar en veel terreinen van de fosfaat- en radiumindustrie die nu ontoegankelijk zijn, zullen binnen enkele generaties een andere bestemming hebben. Mogelijke saneringsmaatregelen om het blootstellingsgevaar in te dijken zijn:

- het afgraven van kleinere besmette zones zoals de oeverbesmetting van de Grote Laak of het besmette wegdek in Olen en Geel. Voor grotere besmette zones zoals de besmette landbouwgronden in Olen en Geel of de overstromingsgebieden van de Winterbeek is afgraven geen haalbare zaak;
- het afdekken van de besmette gebieden of stortplaatsen met een halve meter grond om de *uitwendige stralingsbelasting* te vermijden;
- de omvorming van besmet landbouwgebied tot natuurzone (bv. een bos) om de besmetting van de voedselketen te voorkomen;
- het afdekken van radiumbesmette zones met een kleilaag van minstens een halve meter om de radonexhalatie teniet te doen. Bovenop komen andere lagen om de kleilaag te beschermen tegen uitdrogen, afglijden en bio-intrusie. Aanvullende maatregelen op het vlak van ruimtelijke ordening zijn nodig om de integratie van de terreinen in woon- of industriezones te vermijden, tenzij er duurzame voorzieningen getroffen worden om de insijpeling van radon in gebouwen tegen te gaan.

8.7 | Blootstelling aan natuurlijke radioactiviteit **S**

De natuurlijke achtergrondstraling is in Vlaanderen eerder laag, maar neemt toe naar het zuiden. Ze wordt in hoofdzaak veroorzaakt door drie langlevende isotopen: uranium-238 en thorium-232 met hun vervalproducten en kalium-40. Deze stoffen zijn aanwezig in de verschillende *geologische formaties* en de plaatselijke achtergrondstraling wordt bepaald door de lokale samenstelling van die formaties. Door radioactief verval van radium-226, zelf een vervalproduct van uranium-238, ontstaat het edelgas radon (figuur 2). Meetcampagnes hebben uitgewezen dat de radonconcentratie in woningen in Vlaanderen varieert tussen 10 en 200 Bq/m³. Dit is lager dan de Europese referentiewaarden voor radon van 400 Bq/m³ voor bestaande woningen en 200 Bq/m³ voor nieuwe. Het gebruik van radiumrijk fosforgips, een afvalproduct van de fosfaatverwerkende nijverheid, heeft geleid tot enigszins verhoogde blootstelling in woningen.

Kosmische straling zorgt voor een uitwendige dosis die toeneemt met de hoogte. De dosis voor het vliegend personeel van 1 tot 6 mSv per jaar is niet langer verwaarloosbaar sinds de verlaging van de dosislimieten tot 1 mSv per jaar voor de bevolking — dit is uitgezonderd natuurlijke achtergrondstraling en medische blootstelling — (KB van 20 juli 2001).

8.8 | Radiologisch toezicht en noodplanning voor nucleaire ongelukken **S**

De vele manieren waarop de mens aan bronnen van ioniserende straling kan blootgesteld worden, maken van het *toezichtsprogramma* van het Belgisch grondgebied een complexe zaak. Het FANC dat voor het toezichtsprogramma verantwoordelijk is, werkt voor de

uitvoering samen met het Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid (WIV), het SCK en het Instituut voor Radio-Elementen (IRE). Men volgt de niveaus van natuurlijke en artificiële radioactiviteit op van de lucht, de regen, het oppervlaktewater, het drinkwater, de bodem, de rivierafzettingen, de kustzone en de voedselketen (melk, vlees, vis, groenten, enz.). Elk jaar neemt men ongeveer 2 700 stalen (losstaand van het TELERAD-netwerk dat verderop wordt besproken) waarop men 6 500 analyses uitvoert. In Vlaanderen besteedt men in de eerste plaats aandacht aan de zones rond de kerncentrales van Doel en rond de nucleaire industrie van Mol-Dessel. In het Nete-Demer bekken volgt men de radiumconcentratie als gevolg van de lozingen door Tessenderlo Chemie op. De radiologische toestand van het Belgisch grondgebied is overal normaal te noemen. Alleen de historische radiumbesmetting in de overstromingsgebieden van het Nete- (Laak) / Demer- (Winterbeek) bekken vragen extra aandacht en meer gedetailleerd onderzoek (Sombré, 2003).

Alle nucleaire installaties met een risico op accidentele verspreiding van grote hoeveelheden radioactieve stoffen in de omgeving moeten een noodplan opstellen dat kadert in het *noodplan voor nucleaire risico's* voor het Belgisch grondgebied (KB van 17 oktober 2003). Nucleaire noodplanning valt onder de bevoegdheid van het ministerie van binnenlandse zaken. Het noodplan stelt de federale overheid in staat om bij een ongeval snel te kunnen handelen en aldus de bevolking beter te beschermen.

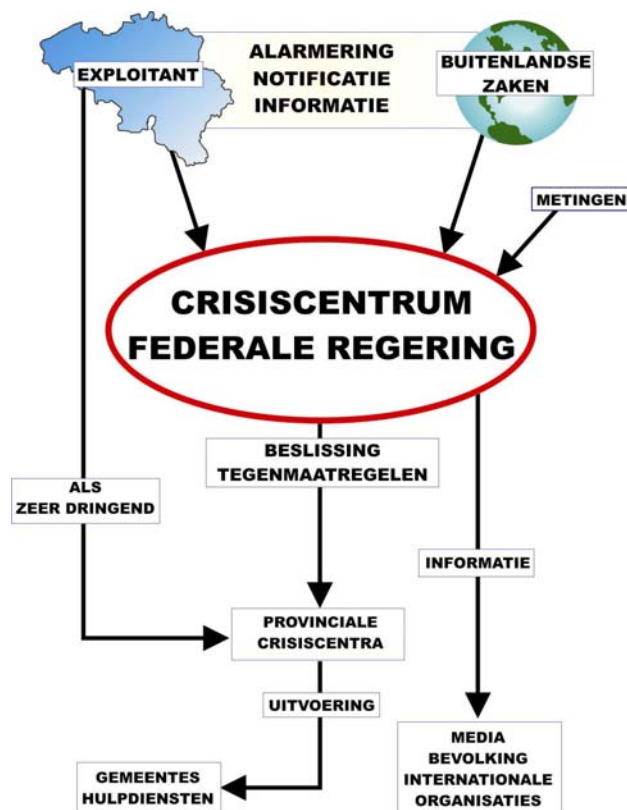
De hoogste activiteiten komen voor in de nucleaire brandstofcyclus. De inventaris aan radioactieve splijtingsproducten van een kerncentrale wordt uitgedrukt in 10^{18} Bq. Bij een ernstig reactorongeval met smelten van de kern en faling van het reactorgebouw komen de radionucliden vrij in functie van hun vluchtigheid (laag smeltpunt en kookpunt): eerst de edelgassen en daarna elementen zoals jodium (I-131) en cesium (Cs-137).

De structuur van het Belgisch noodplan wordt schematisch voorgesteld in figuur 37. Als er zich een ongeval voordoet, moet de exploitant onmiddellijk het crisiscentrum van de federale regering in Brussel op de hoogte brengen. In het crisiscentrum bundelt men alle informatie, aangevuld met meetgegevens, weerprognoses enz. De meest aangewezen tegenmaatregelen die de regering afhankelijk van de ernst van het ongeval kan treffen zijn: schuilen, inname van stabiel jodium, evacuatie en maatregelen naar de voedselketen (landbouw en drinkwater).

Voor ongevallen met een snel verloop, die binnen de 4 uur beschermingsmaatregelen kunnen vereisen, neemt de provinciegouverneur de verantwoordelijkheid over, totdat het nationaal crisiscentrum operationeel is. De gouverneur zal dan automatisch de bevolking in een vooraf bepaalde zone rond de getroffen installatie alarmeren via sirenes en politiewagens, gevolgd door de aanbeveling tot schuilen en het luisteren naar de openbare radio en TV voor verdere informatie en aanbevelingen.

Bij zware ongevallen met kernreactoren wordt ongeveer een derde van de bevolkingsdosis veroorzaakt door radioactief jodium, dat zich opstapelt in de schildklier en vooral bij jonge kinderen schildklierkanker kan veroorzaken. Men kan zich hiertegen beschermen door voor of onmiddellijk na een ongeval stabiel jodium in te nemen. Daarom heeft de Belgische overheid beslist om jodiumtabletten ter beschikking te stellen in de omgeving van de nucleaire sites (Doel, Mol-Dessel...). In de zone 0-20 km worden de inwoners uitgenodigd om de tabletten gratis af te halen in de apotheek. Verderop bestaan er stocks die volgens een bepaald plan worden verspreid naar scholen, kinderkribben en lokale distributiepunten. De voorraden stabiel jodium moeten bij voorrang worden toegewezen aan kinderen, zwangere vrouwen en vrouwen die borstvoeding geven. Onder impuls van het FANC werd in 2007 een akkoord met Frankrijk, Duitsland, Luxemburg en Zwitserland afgesloten die de aanpak van de verstrekking van jodium bij kernongevallen harmoniseert.

Figuur 37: Structuur van het Belgisch nucleair noodplan. Het crisiscentrum van de federale regering in Brussel beslist over de beschermingsmaatregelen en geeft de beslissingen door aan de provinciale crisiscentra voor verdere uitvoering



De kerncentrales van Doel liggen midden in het belangrijkste industriële complex van Vlaanderen, hetgeen aan dit noodplan specifieke eisen stelt. De volcontinue petrochemische bedrijven kunnen meestal niet ineens stilgelegd worden zonder grote economische gevolgen. Bovendien kan de sluiting van de haven van Antwerpen grote problemen opleveren voor de bevoorrading met grondstoffen en de distributie van de afgewerkte producten van de hele regio. Daarom is het aangewezen dat de industrie in de buurt van Doel zich op deze situatie voorbereidt door het opstellen van bedrijfsspecifieke noodplannen die niet enkel rekening houden met radiologische gevolgen maar ook met sociaal-economische gevolgen.

Het FANC volgt de radioactiviteit in België, en in het bijzonder rond de nucleaire installaties, in reële tijd op met het automatisch meetnet TELERAD. Op 189 plaatsen in België meet men de gammastraling:

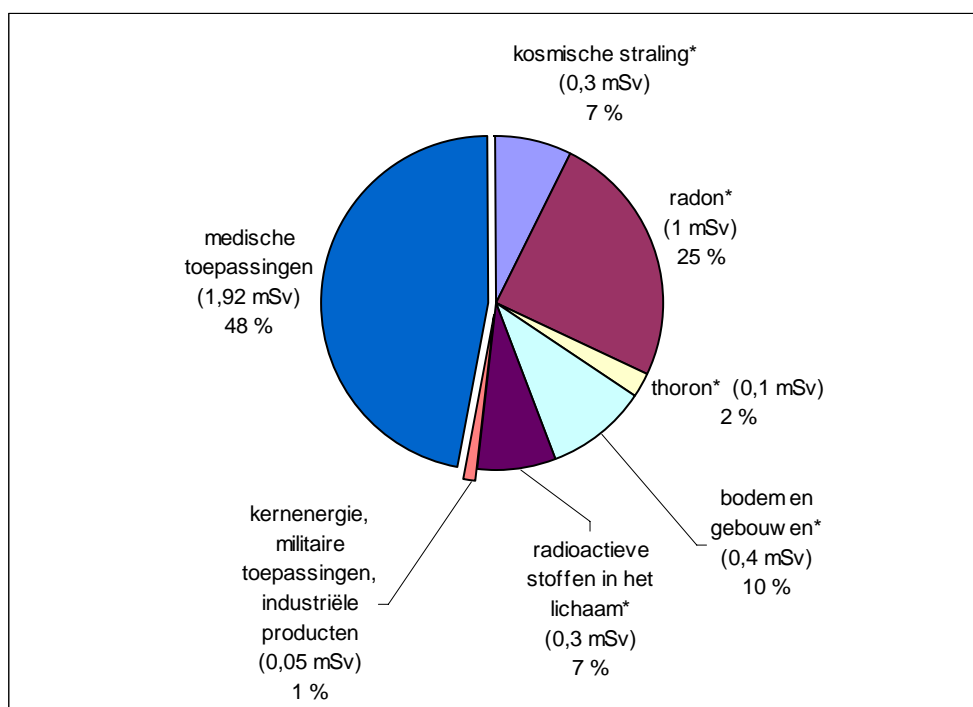
- 81 meetstations maken deel uit van het landsbedekkend net met om de 20 km een monitor;
- 108 meetstations vormen een dubbele ring rond de nucleaire sites met monitoren op de omheining van de nucleaire site en in de voornaamste woonkernen in de omgeving.

Het meetnet bevat ook monitoren om de radioactiviteit van het luchtstof te meten en enkele watermeetstations. TELERAD is in de eerste plaats een waarschuwingsnetwerk dat toelaat een abnormale situatie snel te detecteren. Afhankelijk van de ernst van de situatie kan vervolgens het nucleair noodplan in werking worden gesteld. In de loop van 2007 onderging de werking van het TELERAD diverse belangrijke wijzigingen. Zo werd de meetfrequentie opgevoerd van eens per dag naar eens om de 10 minuten, zijn meetsondes in o.a. de Schelde voorzien en werd de permanente wachtdienst geoperationaliseerd.

8.9 | Aandeel bronnen van ioniserende straling in de effectieve stralingsdosis voor de Vlaamse bevolking **S**

Figuur 38 (zie ook figuur 1 in § 2 van deel 'Beschrijving van de verstoring') toont de samenstelling van de stralingsbelasting in Vlaanderen voor 2006. De gemiddelde effectieve dosis wordt geschat op 4,1 mSv per jaar, waarvan 1,92 mSv afkomstig is van medische toepassingen en 1 mSv van radon. De gemiddelde jaardosis is over de periode 1955-2006 met meer dan 1 mSv toegenomen. Dit is bijna volledig op rekening van één menselijke bron te schrijven: de medische toepassingen. Niet alleen het aantal onderzoeken maar ook de dosis per onderzoek is toegenomen door de snelle evolutie van de radiologische praktijk, bv. door de ontwikkeling van nieuwe en krachtiger CT-scanners, en het gebruik van medische beeldvorming bij chirurgische interventies. Ongeveer 0,1 mSv van de toename is afkomstig van door de mens verhoogde natuurlijke radioactiviteit. Oorzaken zijn de verminderde luchtverversing in woningen (door een betere isolatie) en de verruimde toepassing van bouwproducten waarin fosforgips en vliegassen zijn verwerkt. Deze afvalproducten van de fosfaatnijverheid en de steenkoolverbranding bevatten hogere concentraties aan natuurlijke radioactieve stoffen.

Figuur 38: Aandeel van de verschillende bronnen van ioniserende straling in de gemiddelde effectieve dosis van de bevolking in mSv/j (Vlaanderen, 2006)



* natuurlijke bronnen

Bron: UNSCEAR, 2000 omgerekend naar Vlaanderen.

Er zijn in Vlaanderen naar schatting dertigduizend beroepshalve blootgestelde werknemers, voornamelijk in de nucleaire industrie (splijtstofcyclus en onderzoek), in de ziekenhuizen (medische beeldvorming en radiotherapie) en bij het vliegend personeel van luchtvaartmaatschappijen (verhoogde blootstelling aan kosmische straling). De grootste dosisreducties werden in de nucleaire industrie genoteerd. De collectieve dosis van de werknemers in de kerncentrales van Doel daalde van 5,84 manSv in 1990 tot 1,41 manSv in 2006 (figuur 30). De dosisreducties van het medisch personeel in ziekenhuizen werden grotendeels tenietgedaan door de snelle ontwikkeling van dosisbelastende technieken, voornamelijk in de interventionele radiologie en in de nucleaire geneeskunde. De toename van het luchtverkeer, hogere vlieghoogtes en de toegenomen werktijd zorgen voor een hogere dosisbelasting bij het vliegend personeel.

De reglementering in België steunt op de drievoudige benadering van ICRP-publicatie 60:

- justificatie van ieder gebruik van ioniserende straling (rechtvaardigingsprincipe);
- optimaliseren van de bescherming uitgaande van het ALARA-principe: As-Low-As-Reasonably-Achievable, waarbij men rekening houdt met de sociale en economische gevolgen (optimaliseringsprincipe);
- individuele dosislimieten: garantie voor het individu (werknemer of lid van de bevolking) van de beperking van zijn blootstelling aan de som van alle toepassingen van ioniserende straling.

9 | Risico's m.b.t. ioniserende straling

9.1 | Perceptie van nucleaire risico's |

SCK heeft in november 2002 een peiling in België naar de perceptie van het grote publiek over risico's in het algemeen en nucleaire activiteiten in het bijzonder laten uitvoeren (Carlé, 2003a). Net zoals in Frankrijk stelt men vast dat de technologische risico's niet de belangrijkste bekommernis zijn van de bevolking (Carlé, 2003b). Ondanks de grotere bezorgdheid over terrorisme, onveiligheid, aantasting van het leefmilieu, verslavingen en verkeersongevallen schat de Vlaming de meeste technologische risico's hoog in. Nauwelijks ernstig beoordeelde risico's zijn medische radiografieën en GSM's. Ook radon in woningen geeft geringe zorg, maar het grootste deel (77 %) van de ondervraagde Vlamingen bekent nog nooit over het radonrisico gehoord te hebben. Een discrepantie met de werkelijkheid valt op gezien de medische blootstelling en de radonblootstelling vanuit de belangrijkste bronnen van ioniserende straling voor de bevolking zijn.

Volgens dezelfde peiling zijn de voornaamste spelers in de nucleaire sector weinig bekend bij de Vlaamse bevolking. Het enige organisme dat door de helft van de bevolking gekend is, is het SCK in Mol (55 %), gevolgd door Belgonucleaire (34 %) en Belgoproces (31 %). De autoriteiten, FANC (9 %), de verantwoordelijken voor het afvalbeheer, NIRAS (11 %), en het atoomagentschap in Wenen, IAEA (10 %), zijn slechts door een kleine minderheid gekend. Op de vraag naar argumenten die pleiten tegen het nucleaire kruist men vooral het radioactief afval, het ongeval van Tsjernobyl en de kwetsbaarheid van de nucleaire installaties aan. Binnen de argumenten pro-nucleair duiden ongeveer even grote groepen de elektriciteitsprijs, de afwezigheid van CO₂-emissies en de onafhankelijke energievoorziening aan. Het merendeel van de ondervraagde Vlamingen vindt de vermindering van het aantal kerncentrales een goede zaak omdat ze vrezen voor terroristische aanslagen gericht tegen nucleaire installaties en denken dat de kerncentrales een negatieve invloed hebben op de toekomst van onze kinderen. Men is wel akkoord om het nucleair wetenschappelijk onderzoek verder te zetten. Meer dan de helft (53 %) denkt dat een ramp zoals Tsjernobyl zich ook in België zou kunnen voordoen. 61 % van de Vlamingen weten dat er in de omgeving van nucleaire installaties jodiumtabletten verdeeld zijn en 65 % vinden dit een goede beslissing. Dit aantal stijgt tot 85 % bij de Vlamingen die zelf binnen de jodiumdistributiezone wonen (deelgemeenten op minder dan 20 km van de kerncentrales van Doel, Borsele en Tihange of van de nucleaire installaties van Mol-Dessel). Binnen deze zone is 86 % van de bevolking van de jodiumdistributie op de hoogte en wenst 81 % over jodiumtabletten te beschikken; 80 % weet waar ze verkrijgbaar zijn, maar slechts 44 % beweert er over te beschikken. De resultaten van de SCK-enquête (Carlé, 2003a) komen in grote lijnen overeen met de resultaten van de jaarlijkse peilingen in Frankrijk door het Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (Carlé, 2003b) en door de Europese Commissie in de 25 EU-lidstaten (Europese Commissie, 2005). Volgens de Europese peiling vindt slechts 23 % van de Belgen dat ze goed geïnformeerd zijn over radioactief afval. Anderzijds is de helft voorstander van kernenergie op voorwaarde dat het afvalprobleem wordt opgelost, terwijl dit maar 37 % bedraagt voor het geheel van Europese Unie. Dit verschilt van de eerder vernoemde SCK-peiling van 2002 waar 66 % van de bevolking zich uitsprak voor een reductie van het aantal kerncentrales, wat erop wijst dat de afvalproblematiek de voornaamste maatschappelijke bezorgdheid is bij de discussie over de aanvaardbaarheid van kernenergie. Op dat afvalthema werd dan ook gefocust in de aanloop naar de federale verkiezingen van juni 2007 om de standpunten over kernenergie in te kleuren.

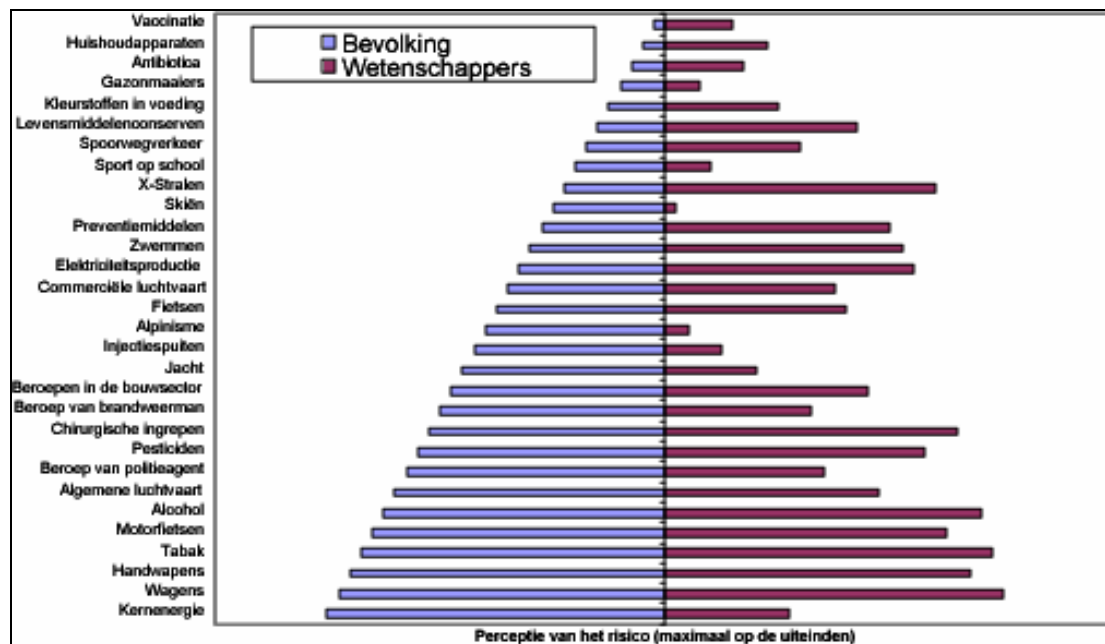
Wanneer we de resultaten van de risicobarometer van SCK in 2006 vergelijken met 2002 doet er zich duidelijk enige verschuiving voor in de vergelijkende risicoperceptie voor chemische en nucleaire installaties die nu net als terrorismedreiging op een gelijkwaardig niveau worden ingeschat door het publiek. De risicoperceptie bij vrouwen ligt hoger, terwijl deze van universitair geschoolden lager ligt. Het risico van het radioactief afval en van ongevallen in nucleaire installaties wordt vier jaar later duidelijk lager ingeschat dan in 2002, maar blijft als hoge risicoactiviteit aanzien in tegenstelling tot medische en natuurlijke blootstelling aan ioniserende straling die gelijkaardig als in 2002 laag wordt ingeschat. Een verklaring kan liggen bij de aard van de vraagstelling die meer individueel dan collectief gericht was in 2006 (Carlé, 2007). Meer dan 50 % van de Belgische ondervraagden uit de SCK-peiling van 2006 blijft menen dat een ongeval zoals in Tsjernobyl ook in België mogelijk is. De enquête onderlijnt dat de perceptie sterk door vrees voor catastrofes bepaald wordt. Het vertrouwen in de juistheid van de informatie over nucleaire risico's blijft laag en is duidelijk beïnvloed door de slechte communicatieaanpak bij het Tsjernobyl-ongeval. Tsjernobyl blijft in het geheugen van meer dan 90 % van de mensen gegrift als één van de ergste catastrofes die ooit gebeurde. Samenvattend zegt de nieuwe risicobarometer dat stralingsrisico's niet hoger dan chemische risico's of terrorismedreiging worden ingeschat. Anderzijds wijst de studie op een gebrek aan vertrouwen in overheden en experts, wat voor een doelgerichte risicocommunicatie en bij crisismanagement nochtans cruciaal is.

Gericht onderzoek naar de publieke opinie in Mol door de Katholieke Hogeschool Kempen toonde eerder al aan dat aversie tegen de inplanting van een radioactieve afvalberging gecorreleerd was met het type activiteit (kernenergie) die dit afval genereerde (MONA, 2002).

In 2003 hebben alle betrokken federale, regionale en gemeenschapsministers het nationaal actieplan leefmilieu-gezondheid 2004-2010 (NEHAP, 2003) aangenomen en werd er een samenwerkingsakkoord afgesloten om het uit te voeren. In het plan wordt de risicoperceptie door de bevolking vergeleken met de evaluatie door wetenschappers (figuur 39). De overheid wordt bij het risicobeheer voor moeilijke keuzes geplaatst als de twee groepen de risico's totaal anders inschatten, zoals het geval is voor kernenergie en medische X-stralen. Verklaringen voor het verschil in risicoperceptie zijn:

- experts drukken technologische risico's eerder eendimensionaal uit (doden per jaar, daling levensverwachting); de risicobeleving van de bevolking wordt door een gevoeligheid voor sociale, psychologische en ethische aspecten van gevaren bepaald; aspecten die niet mee gemodelleerd worden in de gebruikelijke technische risicobeschouwingen (of analyses);
- een individu definieert het risico vanuit referentiekaders, opgebouwde identiteit, verkregen informatie, contacten in sociale netwerken;
- tot slot kan de vertrouwenscrisis tussen de bevolking en experts, industriëlen en overheid het verschil in risicoperceptie helpen verklaren.

Figuur 39: Vergelijking van de risicoperceptie door de bevolking en de evaluatie van risico's door wetenschappers



Bron: NEHAP, 2003 op basis van Pidgeon & Beattie, 1998.

9.2 | Nucleair terrorisme |

De Belgische kerncentrales behoren bij de best beveiligde gebouwen tegen natuurrampen en zijn bestand tegen de crash van een klein vliegtuig. Ze zijn evenwel niet berekend op een terreuraanslag met een groot volgetankt burgervliegtuig. Toch is een *aanslag met een vliegtuig* onwaarschijnlijk. Een kerncentrale is immers geen gemakkelijk doelwit voor een vliegtuig op hoge snelheid. Ze is niet hoog en men moet het reactorgebouw zoeken tussen de gebouwen er omheen. Het Internationaal Atoomenergie Agentschap in Wenen (IAEA) acht sabotage waarschijnlijker dan een aanslag met een vliegtuig. Terroristen kunnen een kerncentrale binnendringen en er de installaties saboteren.

Het IAEA waarschuwt ook voor nucleair terrorisme. De laatste tien jaar werden er wereldwijd honderden gevallen van *illegale handel* in nucleair materiaal of radioactieve bronnen voor medisch of industrieel gebruik ontdekt. In een klein aantal gevallen was er sprake van beperkte hoeveelheden verrijkt uranium of plutonium, het nucleair materiaal dat nodig is om een atombom te maken. Met radioactieve bronnen kan men wel een zogenaamde 'vuile bom' maken. Dat is een bom waarin radioactieve stoffen vermengd zijn met conventionele springstof. De ontploffing verspreidt de radioactieve stoffen met een inhalatie- en besmettingsrisico tot gevolg en creëert lokaal een zone met mogelijke sterke uitwendige stralingsvelden. De onzekerheid en sociale ontreding in de eerste verwarrende uren na een aanslag bepalen in belangrijke mate de weerslag ervan op de gehele maatschappij, met veelal aanzienlijke economische gevolgen. Onderzoek toont aan dat een aanslag met verspreiding van radioactief materiaal een grotere maatschappelijke impact heeft dan een vergelijkbare aanslag met chemische wapens (Cornelis, 2006).

Ongevallen met weesbronnen van hoge activiteit zijn wereldwijd opgetreden; in bepaalde gevallen met ernstige gezondheidseffecten bij de blootgestelde bevolking en met grote kosten voor het remediëren van de besmette zone achteraf. In 2006 werd de controle op hoogactieve ingekapselde bronnen en weesbronnen in België gevoelig verscherpt door de omzetting van de Europese richtlijn 2003/122/Euratom in Belgische reglementering. Elke hoogactieve ingekapselde bron krijgt een uniek identificatienummer en een levensloopfiche, waarvan een kopie bijgehouden wordt door het FANC.

De Verenigde Staten hebben een project opgezet (Megaports) om het internationale containervervoer per schip te controleren op radioactief materiaal. Dit gebeurt door het installeren van detectiesystemen in de grootste toevoerhavens van container voor de VS. Voor havens die niet meestappen in dit project, zou hun rol als toevoerhaven voor de VS bemoeilijkt worden. Op 24 november 2004 ondertekende de Belgische minister van Financiën een overeenkomst met de Amerikaanse overheid om ook in België deze controles uit te voeren. Hierbij verzorgt de Amerikaanse overheid de installatie van de detectiesystemen en de opleiding van de douanebeambten, dit laatste in samenwerking met het Nucleair Technologisch Centrum van de XIOS Hogeschool Limburg (NuTec, 2007). De uiteindelijke controles zijn gestart in de loop van 2007 in Antwerpen. In een latere fase volgen de havens van Zeebrugge en Gent. In de haven van Antwerpen zouden er, op basis van het NuTec-onderzoek, 400 000 alarmen per jaar moeten verwerkt worden, uitgaande van 6 miljoen containers per jaar. In 95 % van de gevallen worden de alarmen veroorzaakt door NORM-materialen, dit zijn materialen waarin van nature of door productieprocessen een hogere concentratie aan radionucliden aanwezig is. Het aantal NORM-vrachten boven de actiedrempel van het FANC zou 18 000 per jaar bedragen. Boven deze drempel moet het alarm afgehandeld worden door een stralingsdeskundige.

10 | Gezondheidseffecten van ioniserende straling

10.1 | Gezondheidsschade t.g.v. blootstelling aan ioniserende straling |

10.1.1 / Gezondheidseffecten algemeen

De ICRP schat het sterfterisico van kanker door blootstelling van de bevolking aan lage doses ioniserende straling op 5 % per Sv. Radiologie en radon zijn de belangrijkste blootstellingsbronnen aan ioniserende straling in Vlaanderen (figuur 1). Ze kunnen elk afzonderlijk verantwoordelijk zijn voor honderden gevallen van kanker per jaar. Beperking van de blootstelling enerzijds en optimalisering van de beschermingsmiddelen anderzijds zijn mogelijk en noodzakelijk om de hoogste doses af te toppen en de collectieve dosis te beheersen.

De versnippering van de diensten nucleaire geneeskunde, de snelle technologische evolutie en het ontbreken van specifieke informatie over het gebruik van radionucliden in de geneeskunde in Vlaanderen maken het moeilijk om de gevolgen van het gebruik van deze technieken op de stralingsdosis voor de bevolking in te schatten. De initiatieven van de Belgische Vereniging voor Nucleaire Geneeskunde op het gebied van dosisinventarisatie, advies over afvalbehandeling en het gebruik van radionucliden zijn daarom zeer waardevol en verdienen alle steun.

De gezondheidseffecten van ioniserende straling worden onderverdeeld in vroege en late effecten. Zeer hoge kortstondige stralingsdoses (boven drempelwaarden van grootteorde 1 Gy) leiden tot *onmiddellijke effecten* (meestal *deterministische effecten* genoemd). De ernst van deze effecten neemt toe met de dosis. Straling kan cellen beschadigen met celdood of functieverlies tot gevolg. Wanneer de stralingsdosis hoog is en er veel cellen aangetast zijn, zal er klinische weefselschade optreden ter hoogte van bijvoorbeeld de darmen en de bloedvormende weefsels. Grote weefselschade kan de patiënt fataal worden, maar ook meer subtiele effecten kunnen ontstaan (bv. in de ontwikkelende hersenen). Een lichaamsdosis van 4 Gy zonder medische behandeling leidt binnen de 60 dagen tot de dood van de helft van de blootgestelden. Ernstige bestralingsongevallen komen door de goede stralingsbeschermingscultuur en veiligheidsvoorzieningen in Vlaanderen slechts zeer sporadisch voor. De situatie is totaal verschillend in de radiotherapie waar het juist de bedoeling is om vroege effecten in schadelijke weefsels (bv. kanker) te veroorzaken.

Ook beneden de drempelwaarden voor vroege effecten zijn gezondheidseffecten bij de mens waargenomen. Deze effecten die pas jaren later tot uiting komen, worden *stochastisch* genoemd omdat de kans dat ze optreden (en niet de ernst ervan) afhankelijk is van de ontvangen dosis. Het staat vast dat acute blootstellingen van de orde van 0,2 Gy of hoger de kans op allerlei vormen van kanker bij de mens verhogen. Naarmate de dosis en het

dosistempo kleiner worden, neemt de kans op het optreden van een effect af tot op een punt dat de toename van een effect niet meer statistisch kan worden aangetoond. Mutaties veroorzaakt door straling in voortplantingscellen zullen zich meestal niet uitdrukken in een ziekte bij de bestraalde persoon, maar kunnen overgedragen worden op het nageslacht. Straling kan zo aanleiding geven tot ernstige overerfbare ziekten.

Uit voorzorg neemt men in de stralingsbescherming aan dat elke dosis, hoe klein ook, een risico op kanker en erfelijke afwijkingen met zich meebrengt en dat deze kans evenredig is met de grootte van de dosis. Bij lage doses zullen de meeste cellen de bestraling overleven en is er geen weefselschade zichtbaar, maar het DNA van deze cellen kan aangetast zijn (mutaties). Dit is soms zichtbaar op het niveau van de chromosomen. De mutatie van een functioneel gen kan het gedrag van de cel veranderen, bijvoorbeeld in de vorm van een veranderde groeiconrole van de cel. Dit kan na vele jaren leiden tot de ontwikkeling van kanker. Op basis van epidemiologisch onderzoek bij bestraalde populaties (meestal hoge doses) schat de Internationale Commissie voor Stralingsbescherming (ICRP) de kans op de ontwikkeling van een fatale kanker op 5 % per Sv voor de bevolking (alle leeftijden, dus inclusief gevoelige groepen) en op 4 % per Sv voor volwassen werknemers (ICRP, 1991). Dit zou betekenen dat iemand gemiddeld 5 kansen op 1 000 heeft om een fatale kanker te ontwikkelen indien die persoon in zijn leven is blootgesteld aan verschillende kleine doses waarvan de som 100 mSv bedraagt. Het 'schade'-concept van de ICRP is ruimer dan kankerdood en houdt eveneens rekening met niet-fatale kankers, met erfelijke afwijkingen en met het verlies in levensverwachting. In tabel 12 wordt een samenvatting gegeven van de ICRP-*risicocoefficienten*.

Tabel 12: De bijdrage in % per Sv effectieve dosis voor stochastische effecten bij lage doses en lage dosistempo's

	fatale kanker	niet-fatale kanker	ernstige erfelijke afwijkingen	totale schade
werknemers	4,0	0,8	0,8	5,6
algemene bevolking ³	5,0	1,0	1,3	7,3

Bron: ICRP, 1991.

De snelle evolutie van de moleculaire biologie met de ontrafeling van het menselijk genoom geeft ons een beter inzicht in de mechanismen verantwoordelijk voor stralingsgeïnduceerde kanker en erfelijke afwijkingen en zal op termijn leiden tot een betere behandeling van deze aandoeningen.

De *potentiële blootstelling* is bij definitie de blootstelling die niet met zekerheid zal optreden maar waarvan de waarschijnlijkheid van tevoren kan worden geschat. Veel voorkomende incidenten met kleine gevolgen worden bij de normale blootstelling gerekend. Potentiële blootstellingen hebben twee componenten: de kans van optreden en de dosis wanneer de potentiële blootstelling optreedt. Potentiële blootstellingen kunnen dus verminderd worden door ofwel de waarschijnlijkheid op het voorkomen van een ongeval te verlagen als door de gevolgen van een mogelijk ongeval te beperken. De ICRP adviseert de kans op deterministische effecten te begrenzen op 2×10^{-4} per jaar voor beroepshalve blootgestelde personen en op 5×10^{-6} per jaar voor de bevolking (ICRP, 1997).

10.1.2 / Epidemiologisch onderzoek

Vermits stralingsgeïnduceerde kankers niet van andere kankers te onderscheiden zijn, is men aangewezen op het opsporen van een toename van de kankerincidentie of kankermortaliteit in een blootgestelde populatie door middel van epidemiologisch onderzoek.

³ Bij 'bevolking' liggen de risico-inschattingen hoger, omdat deze groep een andere leeftijdsverdeling heeft dan 'werknemers' en o.a. de meer gevoelige groep van kinderen omvat.

De vorming van kankergezwellen tengevolge van ioniserende straling verloopt als een kansspel. Epidemiologische studies beschrijven het resultaat. De bestudeerde populaties voor de evaluatie van het kankerrisico kunnen in 4 grote groepen ingedeeld worden:

- de overlevenden van de atoombomexplosies in Hiroshima en Nagasaki;
- medische blootstellingen;
- historische professionele blootstellingen;
- bevolkingsgroepen in hoge mate blootgesteld aan radioactieve neerslag.

De belangrijkste epidemiologische studie is de *Live Span Study* bij 85 000 overlevenden van de atoombommen in Hiroshima en Nagasaki. Deze studie ondersteunt voor de incidentie van vaste kankers een lineaire drempelloze dosis-effect relatie in het dosisinterval van 0,1 tot 3 Sv. Voor leukemie wordt geen lineair maar een lineair kwadratisch model gebruikt. In het dosisgebied tot enkele honderden mSv is geen verhoging te zien het relatieve leukemierisico van de atoombomslachtoffers. De trend is eerder negatief zonder evenwel statistisch significant af te wijken van een lineair kwadratisch model. De UNSCEAR 2000 schatting van het fatale kankerrisico voor een blootstelling van 1 Sv is:

- 1 % voor leukemie (vrij korte latentieperiode);
- 11 % voor vaste kankers (9 % voor mannen, 13 % voor vrouwen) (lange latentieperiode).

Deze risicoschattingen houden geen rekening met de verminderde effectiviteit van straling bij lage doses en lage dosistempo's. Men voert een correctiefactor in, de DDREF (Dose and Dose Rate Effectiveness Factor), om rekening te houden met de invloed van de efficiëntere biologische herstelmechanismen. Deze afwijking van de lineariteit wordt in het radiobiologisch onderzoek dikwijls beschreven met een lineair kwadratisch model. De DDREF laat toe om het kankerrisico afgeleid bij hoge acute doses (bv. de overlevenden van Hiroshima en Nagasaki) te extrapoleren naar lage doses en lage dosistempo's. UNSCEAR raadt een lage waarde van de effectiviteitsfactor voor de dosis en dosistempo aan ($DDREF < 3$). Wanneer een factor 2 wordt toegepast, zoals gebruikt door de ICRP in publicatie 60, vinden we bij benadering de ICRP-risicoschattingen voor kanker dood uit tabel 12 (ICRP, 1991):

- 5 % per Sv voor de bevolking (alle leeftijden);
- 4 % per Sv voor volwassen werknemers.

De BEIR VII commissie van de Nationale Academie voor Wetenschappen van de Verenigde Staten heeft in 2005 gekozen voor een DDREF van 1,5 en meldt een risico van 5,1 % per Sv voor mortaliteit ten gevolge van vaste kankers gemiddeld over beide seksen (BEIR VII, 2005).

Bij studies van de effecten bij *medische blootstelling* gaat het bijna altijd om selecte populaties die bij therapeutisch gebruik een hoge dosis ontvangen op korte termijn. Een uitzondering vormt de bestraling van zwangere vrouwen om diagnostische redenen. Een prenatale bestraling met dosis van de orde van 10 mGy zou kanker bij ongeveer 1 op 900 kinderen (tot de leeftijd van 15 jaar) kunnen veroorzaken boven op de natuurlijke kankerincidentie van 1 op 600 (Wakeford, 1997).

Het IARC (International Agency for Research on Cancer), een onderzoeksinstituut van de wereldgezondheidsorganisatie, publiceerde in juni 2005 de resultaten van een grootschalige kankersterftestudie bij werknemers uit de nucleaire sector (Cardis, 2005). De dosimetrie- en kankersterftegegevens werden op een uniforme wijze geanalyseerd bij werknemers uit 15 landen, waaronder Australië, Canada, Frankrijk, Japan, Verenigd Koninkrijk, Verenigde Staten en ook België. Het SCK coördineerde het Belgische onderdeel waarbij de werknemers van Belgoprocess, Belgonucleaire, Electrabel (nucleaire sites van Doel en Tihange) en het SCK zelf betrokken waren. Er werd berekend hoe groot de toename van het kankerrisico was in functie van een toenemende stralingsdosis. In de studie werden 407 000 werknemers opgevolgd die minstens 1 jaar in de nucleaire sector werkten. De gemiddelde gecumuleerde stralingsdosis over de volledige beroepsloopbaan was niet zo hoog: 19,4 mSv. Algemeen blijkt uit de studie dat 1 à 2 % van de kankersterfte van de werknemers zou kunnen toegeschreven worden aan straling. Deze risicoschattingen zijn 2 à 3 keer hoger, maar

binnen de statistische onzekerheidsmarges verenigbaar met de risicoschattingen van de Hiroshima-Nagasaki studie die, zoals hogerop gemeld, de wetenschappelijke basis vormt van onze huidige stralingsbeschermingsnormen.

10.1.3 / Gezondheidseffecten van radon

Radon is een radioactief edelgas uit de natuurlijke uraniumreeks dat gekend is als een menselijk carcinogeen. Het zijn vooral de alfadeeltjes van de kortlevende vervalproducten van radon die de stralingsdosis veroorzaken (zie figuur 2). De kans op longkanker is een combinatie van de radonconcentratie met de duur van de blootstelling. De BEIR VI commissie van de Nationale Academie voor Wetenschappen van de Verenigde Staten kwam tot de vaststelling dat de dosis-effect relaties uit studies op mijnwerkers ook toepasbaar waren voor de blootstelling aan radon in het woonmilieu (BEIR VI, 1998). De vertaling van hun risicoschattingen naar de Vlaamse situatie resulteert in 100 tot 700 longkankers per jaar. Vooral rokers lopen een risico omdat roken en blootstelling aan radon elkaar versterken bij het veroorzaken van longkanker.

Al tientallen jaren voert men patiënt-controle onderzoeken naar radon in het woonmilieu uit om het longkankerrisico rechtstreeks te bepalen. De meeste van deze onderzoeken zijn evenwel te klein in omvang om een betrouwbare risicoschatting af te leiden. In 2005 verscheen in de British Medical Journal een artikel met de gezamenlijke analyse van de belangrijkste Europese patiënt-controle studies (Darby, 2005). Daaruit bleek dat radon jaarlijks verantwoordelijk zou zijn voor ongeveer 20 000 longkankerdoden in de Europese Unie. Dit is ongeveer 9 % van het totaal aantal longkankerdoden in de Europese Unie. De resultaten van de Europese studie stemmen overeen met het longkankerrisico afgeleid uit de mijnwerkersstudies (BEIR VI, 1998) en met analoge patiënt-controle studies in Noord-Amerika (Krewski, 2005) en China (Lubin, 2004).

10.1.4 / Ontwerp van nieuwe algemene aanbevelingen van de ICRP

ICRP heeft op 12 januari 2007 het vrijwel definitieve ontwerp van nieuwe algemene aanbevelingen op zijn website gepubliceerd. Deze nieuwe basisprincipes van de stralingsbescherming, die in de plaats komen van ICRP-publicatie 60, werden op 21 maart 2007 aangenomen en zullen in het najaar van 2007 gepubliceerd worden. Het ontwerp kent al een lange voorgeschiedenis. De eerste versies weken sterk af van ICRP 60, bv. door als uitgangspunt de bescherming van het individu te nemen boven de bescherming van de gemeenschap. Onder druk van de stralingsbeschermingswereld werden de voorstellen aangepast, zodat de uiteindelijke tekst eerder een verdere verduidelijking en een evolutie van het huidige systeem is dan een volledig nieuwe aanpak. In tegenstelling tot de vorige algemene aanbevelingen zijn er volgens de ICRP ditmaal geen wetenschappelijke redenen om de normen te verstrengen. Een van de belangrijkste argumenten daartoe is dat de nieuwe risicoschatting voor kanker (*fatale kanker en verminderde levenskwaliteit bij niet-fatale kanker*) nu zo'n 10 % lager ligt dan 16 jaar geleden in ICRP 60 (zie tabel 12):

- 5,5 % in plaats van 6,0 % per Sv voor de bevolking;
- 4,1 % in plaats van 4,8 % per Sv voor werknemers.

Oorzaken voor de iets lagere waarden zijn de betere overlevingskansen van kankerpatiënten en de langere opvolgingsperiode van de epidemiologische studie bij de overlevenden van de atoombommen op Hiroshima en Nagasaki. De risicoschattingen voor de bevolking zijn hoger omdat deze groep een andere leeftijdsverdeling heeft dan de werknemers en onder andere de meer gevoelige groep van kinderen omvat.

In tegenstelling tot de vrijwel onveranderde schatting van het kankerrisico is de nieuwe risicoschatting voor ernstige overerfbare afwijkingen drastisch verlaagd:

- 0,2 % in plaats van 1,3 % per Sv voor de bevolking;
- 0,1 % in plaats van 0,8 % per Sv voor werknemers.

Het grote verschil komt door een andere methodologische benadering van stralingsgeïnduceerde erfelijke ziektes: voortaan beschouwt men enkel nog de risico's tot en met de tweede generatie, in plaats van een 'theoretische' evenwichtswaarde te hanteren die pas na honderden jaren bereikt zou worden.

Het objectief van het ICRP-stralingsbeschermingssysteem is de gezondheid van de mens vrijwaren door deterministische effecten (weefselreacties) te vermijden en door de kans op stochastische effecten (kanker en overerfbare ziektes) op een laag en maatschappelijk aanvaardbaar niveau te beheersen.

ICRP maakt niet langer onderscheid tussen twee soorten menselijke activiteiten die de blootstelling aan ioniserende straling beïnvloeden: handelingen en interventies. In plaats daarvan worden alle beheersbare blootstellingen naargelang de omstandigheden in drie categorieën ingedeeld:

- geplande blootstelling: alle toepassingen van ioniserende straling, inclusief ontmanteling, afvalberging en medische toepassingen;
- blootstelling bij noodsituaties: onverwachte situaties die zich voordoen tijdens geplande blootstellingen of kwaadwillige daden en die onmiddellijke actie vereisen;
- bestaande blootstelling: toestanden die bestaan op het ogenblik dat er een beslissing overwogen wordt om de blootstelling te verminderen, inclusief natuurlijke achtergrondstraling en historische omgevingsbesmettingen.

De ICRP behoudt de drie basisprincipes van de stralingsbescherming. De twee eerste principes zijn brongerelateerd en gelden in alle omstandigheden:

- rechtvaardigingsprincipe: justificatie van ieder gebruik van ioniserende straling;
- optimaliseringsprincipe: is breder dan de ALARA (As-Low-As-Reasonably-Achievable) aanpak uit ICRP-60.

Het derde principe is een garantie voor het individu en geldt enkel voor geplande blootstellingen met uitzondering van medische blootstellingen.

- principe van de individuele dosislimieten: beperken de blootstelling van een werknemer of een lid van de bevolking aan de som van alle door de overheid geregementeerde toepassingen van ioniserende straling. Alle dosislimieten uit ICRP 60 blijven van kracht.

Hoeksteen van het nieuwe stralingsbeschermingssysteem wordt:

- de brongerelateerde dosisbeperking voor een geplande blootstelling;
- het diagnostische referentieniveau voor een medische blootstelling;
- het referentieniveau bij een bestaande blootstelling en bij een noodsituatie.

De ICRP verwacht dat er voor elke beheersbare bron van ioniserende straling naargelang de situatie een dosisbeperking, een diagnostisch referentieniveau of een referentieniveau wordt opgelegd. Voor beroepshalve blootstelling in geplande omstandigheden kan dit de uitbater zijn, maar in vrijwel alle andere gevallen is dit een taak voor de bevoegde overheden. De waarden zullen normaal gekozen worden uit volgende te verwachten dosisintervallen:

- 20 - 100 mSv; uitzonderlijke omstandigheden: bv. blootstelling van werknemers in noodsituaties, het evacueren van de bevolking na een ongeval, hoge niveaus van bestaande blootstelling. De betrokken personen moeten informatie over hun stralingsrisico's en over stralingsreducerende maatregelen krijgen en hun blootstelling moet bepaald worden. Met uitzondering voor levensreddende acties en langdurige ruimtevluchten zijn dosisniveaus boven de dosisbeperking niet te verantwoorden;
- 1 - 20 mSv; voorbeelden: beroepshalve blootstelling, schuilen in noodsituaties, radonblootstelling, personen die vrijwillig patiënten bijstaan. De betrokken personen hebben meestal een rechtstreeks of onrechtstreeks voordeel bij de blootstelling en moeten, waar mogelijk, geïnformeerd worden. Bij geplande blootstelling zijn individuele monitoring en opleiding verplicht;

- 0,01 – 1 mSv; voorbeeld: blootstelling van de bevolking aan toepassingen van ioniserende straling. Er is geen persoonlijk, enkel een gemeenschappelijk voordeel aan de blootstelling verbonden.

De brongerelateerde dosisbeperkingen, diagnostische referentieniveaus en referentieniveaus worden aangevuld met de verplichting om de bescherming te optimaliseren. Dit is meestal een iteratief proces met de bedoeling de individuele dosissen en de dosisverdeling te reduceren. De invulling van het optimaliseringsprincipe omvat ook het streven naar een veiligheidscultuur en de deelname van betrokkenen en geïnteresseerden (stakeholders) bij beslissingsprocessen.

De ICRP past de definitie van de effectieve dosis aan de evolutie van de wetenschappelijke kennis aan. De stralingsweegfactor voor laagenergetische neutronen wordt met een factor 2 verlaagd tot 2,5. Voor protonen, die bij ruimtevluchten voor een belangrijke dosis zorgen, is de verlaging nog iets groter, van 5 naar 2. De relatieve stralingsgevoeligheid van de verschillende weefsels worden gewijzigd. Grootste verhoging is voor het borstweefsel van 5 % naar 12 % (borstkankerrisico). Grootste verlaging is voor de gonaden van 20 % naar 8 % door de veel lagere inschatting van stralingsgeïnduceerde overerfbare ziektes.

De ICRP erkent dat er steeds meer aanwijzingen zijn voor een toename van andere aandoeningen dan kanker in bestraalde bevolkingsgroepen. De duidelijkste aanwijzingen voor het optreden van deze niet-kanker effecten bij dosissen van de orde van 1 Sv komen van de epidemiologische studie bij de overlevenden van de atoombommen op Hiroshima en Nagasaki. Voor hartziekte, beroerte, spijsverteringsstoornissen en ademhalingsziekten zijn de resultaten statistisch significant en zowel verenigbaar met een lineaire dosis-effect relatie als met een drempeldosis bij zowat 0,5 Sv. Toch vindt de ICRP deze observaties onvoldoende om de niet-kanker effecten al in de nieuwe risicoschattingen op te nemen. Reden is het feit dat de risicoschattingen voor niet-kanker⁴ effecten (hartziekte, beroerte, spijsverteringsstoornissen en ademhalingsziekten) vooral gebruikt worden in het dosisinterval tot ongeveer 100 mSv, waar de wetenschappelijke bewijsvoering zwak is.

10.1.5 / Actuele thema's in stralingsbescherming

De huidige veronderstelling van een drempeldosis van 5 Gy voor detecteerbare troebelheid van de lens (cataract) bij chronische blootstelling wordt in vraag gesteld door waarnemingen van effecten bij veel lagere blootstellingen, in het bijzonder bij de opruimingswerkers in Tsjernobyl (Worgul et al, 2007) en bij de medische staf in interventionele radiologie. Dit kan op termijn leiden tot een verlaging van de huidige equivalente dosislimiet van 150 mSv/j voor de ooglenzen van werknemers tot waarden vergelijkbaar met de effectieve dosislimiet van 20 mSv/j. Een dergelijke drastische verlaging zou vooral gevolgen hebben voor de manier van werken in de interventionele radiologie.

Voorbij jaren is duidelijk geworden dat een klein deel van de bevolking gevoeliger is aan ioniserende straling omwille van een genetische aanleg. Deze grotere individuele stralingsgevoeligheid is waargenomen bij patiënten na radiotherapeutische behandeling, maar er zijn ook aanwijzingen van effecten bij lage doses. Wellicht zal men deze mensen in de nabije toekomst door screening kunnen identificeren, wat een weerslag kan hebben op de praktijk van de stralingsbescherming en op het dosislimiteringssysteem.

10.2 | Gezondheidseffecten van het ongeluk in Tsjernobyl

De wetenschappelijke wereld onderzocht de voorbij jaren de gezondheidseffecten van de radioactieve besmetting door het ongeval met de kerncentrale van Tsjernobyl in 1986. Sinds 1990 vond men een duidelijke toename van schildklierkanker bij personen die als kind een grote blootstelling aan radioactief jodium opliepen. De toename is het grootst onder de personen die ten tijde van het ongeval jonger waren dan 4 jaar. Men stelde tot nu toe (in de periode 1986-heden) een 4 000-tal gevallen vast en naar verwachting zal het verhoogde

⁴ Voor kanker neemt men in de stralingsbescherming de hypothese van de lineaire drempelloze dosis-effectrelatie aan.

risico nog jaren aanhouden. Van de personen die schildklierkanker kregen zijn er maar enkele overleden. Ervaring in Wit-Rusland heeft geleerd dat de overlevingskans voor deze vorm van kanker tot op heden nagenoeg 99 % bedraagt.

Het is moeilijk om andere gezondheidseffecten wetenschappelijk aan te tonen. Dit wil niet zeggen dat er geen bijkomende kankers of erfelijke afwijkingen zouden zijn, maar dat we niet in staat zijn ze te onderscheiden van het natuurlijke voorkomen. Een beperkende factor voor epidemiologische studies is de barre economische situatie waarin de getroffen gebieden na het uiteenvallen van de Sovjetunie terechtgekomen zijn, met een verslechtering van de gezondheidszorg en een daling van de gemiddelde levensduur. In de gegeven omstandigheden zal het zeer moeilijk zijn om wetenschappelijk zinvolle conclusies te trekken over eventuele erfelijke effecten, aangeboren afwijkingen of andere kankers buiten schildklierkanker.

Het Tsjernobyl-forum, een samenwerking tussen 8 instellingen van de Verenigde Naties en de drie getroffen republieken, heeft een schatting gemaakt van de dodentol onder de meest bestraalde bevolkingsgroepen (Chernobyl Forum, 2005). Het totaal aantal mensen dat al overleden is of in de loop van hun verdere leven aan straling zou kunnen overlijden wordt geschat op 4 000, meer bepaald:

- een 50-tal reddingswerkers die al aan stralingsziekte overleden zijn;
- 15-tal kinderen die al aan schildklierkanker overleden zijn; en
- een 4 000-tal stralingsgeïnduceerde kanker doden die te verwachten zijn onder de 200 000 opruimingswerkers in de periode 1986-1987, de 116 000 personen die in 1986 werden geëvacueerd en de 270 000 bewoners van de meest besmette gebieden. Dit is een toename van ongeveer 3,5 % ten opzichte van de natuurlijke kankersterfte die in deze bevolkingsgroepen (600 000 personen in totaal) wordt verwacht.

De schatting van het aantal kankerdoden door het Internationaal Kankeronderzoeksinstituut (IARC) van de wereldgezondheidsorganisatie (WHO) net voor de 20^{ste} verjaardag van het ongeval geeft voor de meest bestraalde bevolkingsgroepen dezelfde resultaten als het Tsjernobyl-forum. Op basis van de lineaire drempelloze hypothese berekende het IARC ook de dodentol in de ruimere omgeving en voor gans Europa. De 16 000 mogelijke kankerdoden onder de 570 miljoen Europeanen zijn slechts 0,01 % van de verwachte natuurlijke kankersterfte: van alle Europeanen die leefden op het moment van het Tsjernobylongeval, zal 1 op de 10 000 overlijden door kanker toe te wijzen aan dat incident. Ze werden berekend op basis van een gemiddelde blootstelling van 0,5 mSv over het ganse leven (Cardis, 2006). Deze gecumuleerde (Tsjernobyl)dosis komt overeen met een vierde van de gemiddelde jaarlijkse blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen in Vlaanderen.

11 | Gevolgen van ioniserende straling op de natuur

11.1 | Effecten van ioniserende straling op ecosystemen |

De huidige stralingsbescherming is volledig georiënteerd op de gezondheidseffecten van de mens, wat in het dichtbevolkte Vlaanderen waarschijnlijk voldoende bescherming biedt aan de natuur. Geen rekening houden met schade aan de natuur kan problemen opleveren op plaatsen waar de mens afwezig is, zoals op de bodem van de oceaan (zeedumping), in de ondergrond (geologische berging) of in afgelegen gebieden (kernproeven).

Het ontwerp van nieuwe aanbevelingen van de ICRP (zie § 10.1.4) voorziet in een uitbreiding van de stralingsbescherming. Bedoeling is de gezondheidseffecten in dieren en planten te beperken, zodat de impact ervan op de biodiversiteit en op de gezondheidstoestand van natuurlijke leefgemeenschappen (ecosystemen) verwaarloosbaar is. De voorgestelde aanpak is dezelfde als deze voor de mens. Naar analogie met de 'referentie mens' zullen een twaalfstal ruim verspreide dier- en plantensoorten als referentie gekozen worden voor dosisberekeningen en voor het evalueren van de stralingseffecten.

Critici wijzen op het feit dat milieubescherming veel meer is dan het beschermen van planten en dieren. Het omvat ook duurzaamheid, controle op de vervuiling, algemene hygiëne, landgebruik, het beschermen van biotische en non-biotische milieucompartimenten ... De stralingsbescherming integreren met de uitgebreide milieureglementering voor niet-radiologische polluenten met als uitgangspunt de belasting van elk ecosysteem (zee, atmosfeer, rivier, slib...) zou volgens hen een betere benadering zijn,.

12 | Economische implicaties van kernenergie

12.1 | Financiële reserves aangelegd voor de ontmanteling van de kerncentrales en de definitieve berging van de bestraalde splijtstof

De uiteindelijke berging van het radioactief afval zal heel wat kapitaal vereisen. De Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas (CREG) maakte een evaluatie van de aangelegde fondsen voor de financiering van de veilige opruiming van Belgische kerncentrales (CREG, 2001). Daarbij kwam ze tot de volgende bevindingen:

- De ontmanteling en opruiming van de kerncentrales van Doel en Tihange: de elektriciteitsgebruiker betaalt hiervoor 0,002 euro per nucleaire kilowattuur. Door de liberalisering van de elektriciteitsmarkt is er echter onzekerheid over de beschikbaarheid van de fondsen op het ogenblik van de sanering;
- De opslag of opwerking en de berging van de bestraalde splijtstof: de elektriciteitsgebruiker betaalt hiervoor 0,0037 euro per nucleaire kilowattuur. De opbouw van deze provisie is niet geformaliseerd en drie vierden van het bedrag werd als lening ter beschikking gesteld van Electrabel.

De kritische bemerkingen van de CREG-studie werden grotendeels ondervangen door de wet van 11 april 2003 aangaande de te voorziene provisie voor de ontmanteling van de kerncentrales en het beheer van de gebruikte splijtstof. Deze wet voorziet in een nauwere betrokkenheid van de overheid bij het beheer van de fondsen. De wet draagt namelijk de ontmantelingsfondsen aan Synatom over, waar de Belgische Staat over één specifiek aandeel met speciale rechten beschikt, en op het beheer wordt toegezien door een opvolgingscomité. Synatom mag tot maximaal 75 % van deze fondsen teruglenen aan Electrabel, binnen de beperkingen en volgens de controlemodaliteiten voorzien in de wet. Als gevolg van deze wet moet Synatom om de drie jaar een verslag overmaken aan NIRAS die daarover een advies moet geven aan het Fonds.

Eind 2004 bedroegen bovenstaande voorzieningen voor *ontmanteling en opruiming van de kerncentrales van Doel en Tihange* en *opslag of opwerking en de berging van de bestraalde splijtstof* respectievelijk 1,38 miljard euro en 2,54 miljard euro.

De voornaamste provisie zijn midden 2007 aangegroeid tot 4,6 miljard euro, waarvan 3 miljard euro voor het beheer en de berging van de gebruikte brandstof bestemd is en 1,5 miljard euro voor de ontmanteling van de kerncentrales. Tegen 2050 is een bedrag vooropgesteld van 9 miljard euro voor de bestraalde brandstof en tegen 2042 een bedrag van 2,8 miljard euro voor de ontmanteling van de kerncentrales. NIRAS en het toezichtscomité over deze provisie hadden echter twijfels bij het Synatom-rapport van 2007. Het probleem betreft vooral de onzekerheden die werden gehanteerd voor het inschatten van de kosten en de incoherentie met het huidige beleidskader (moratorium opwerking, kernuitstap en financiering van het bergingsonderzoek). Voor ontmanteling laat het rapport de keuze tussen directe ontmanteling 5 à 15 jaar na stopzetting van de kerncentrales en uitstel van ontmanteling met 120 jaar. Het rapport houdt geen rekening met de 3 verschillende reactorontwerpen van de Belgische centrales. Synatom financiert door toepassing van het 'vervuiler betaalt'-principe het grootste deel van het NIRAS-onderzoek. In het kader van het Vast Technisch Comité van NIRAS opteerde Synatom mee voor het nieuwe bergingsconcept voor hoogactief afval (zie § 6.1.2), hoewel het zijn schattingen voor de provisie nog steeds op het oude bergingsconcept baseert. Een berekening van de kost voor het nieuwe concept is aan de gang en door Synatom toegezegd voor het volgende rapport aan NIRAS in 2010.

Referenties

Aroua A. et al. (2002) Nation-wide survey on radiation doses in diagnostic and interventional radiology in Switzerland in 1998, *Health Phys.* 83: 46-55.

Bacher et al (2005) Patient-specific dose and radiation risk estimation in pediatric cardiac catheterisation, *Circulation* 4/11: 83-89.

BEIR VI (1998) Health effects of exposure to radon, US National Research Council Report, National Academy Press, Washington, DC.

BEIR VII (2005) Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR VII-Phase 2, US National Research Council Report, National Academy Press, Washington, DC.

Belgische Geologische Dienst (1997) kaart: Spectrometry of U, Th & K Synthesis Image, Brussel.

Berus D., Covens P., Buls N., Van den Broeck M., Van Holsbeeck G., Vanhavere F. (2004) Extremity doses of workers in nuclear medicine: mapping hand doses in function of manipulation, Proc. IRPA 11, 23-28 May, Madrid.

Bijnens A. (2003) Het toepassen van "Kwaliteitscriteria voor röntgendiagnostiekopnamen bij kinderen" in verschillende ziekenhuizen, Eindwerk EHSAL Hogeschool, opleiding medische beeldvorming, Brussel.

Bleeser F., Hoornaert M-T., Smans K., Struelens L., Buls N., Berus D., Clerinx P., Hambach L., Malchair F., Bosmans H. (2007) Diagnostic reference levels in angiography and interventional radiology: a Belgian multicenter study. Accepted for publication in *Rad. Prot. Dos.*

Bogaert E., Bacher K., Thierens H. (2007) A large scale multicentre study in Belgium of dose area product values and effective doses in interventional cardiology using contemporary equipment. Accepted for publication in *Rad. Prot. Dos.*

Brugmans M. et al. (2002) Population exposure to diagnostic use of ionizing radiation in the Netherlands, *Health Phys.* 82: 500-509.

Brugmans M., Meeuwse E. (2004) Informatiesysteem medische stralingstoepassingen: hernieuwd overzicht van de medische stralingsbelasting in Nederland, *NVS nieuws* 29/4: 14-16.

BSNM (2002) Guidelines for the reference Administered Activities. Belgian Society for Nuclear Medicine. Raadpleegbaar op www.belnuc.be

BSNM (2003a) Absorbed doses and effective doses for standard nuclear medicine procedures. Belgian Society for Nuclear Medicine. Raadpleegbaar op www.belnuc.be

BSNM (2003b) How to treat your radioactive waste, a practical approach. Belgian Society for Nuclear Medicine. Raadpleegbaar op www.belnuc.be

BVS (2000) Aanpak van het nucleair biomedisch ziekenhuisafval in België en Nederland, *Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming*, 25/4, 325-416, Antwerpen.

Carchon R., van der Meer K. (2006) De non-proliferatie van kernwapens en internationale controles, SCK brochure beschikbaar op: <http://www.sckcen.be>

Cardis E., Vrijheid M. et al. (2005) Risk of cancer after low doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries, *British Medical Journal*, 331 (7508), 77.

Cardis et al. (2006) Estimates of the cancer burden in Europe from radioactive fallout from the Chernobyl accident, *International Journal of Cancer*, 119 (6): 1224-1235.

Carlé B., Charron S., Milochevitch A., Hardeman F. (2003b) An inquiry of the opinions of the French and Belgian populations as regards risk. Institute of Energy, report SP.P.03.46, pag. 24-33, Pre-proceedings JRC/ESReDA seminar on Safety Investigation of Accidents, 12-13 May 2003, Petten, The Netherlands.

Carlé B., Hardeman F. (2003a) Veiligheid en risicoperceptie. Resultaten van de opiniepeiling van november 2002 in België. SCK rapport, BLG 938, Mol.

Carlé B., Turcanu C.O. et al. (2007) Risk perception and nuclear emergency management in Belgium, *Advanced Studies on Risk Analysis and Crisis Response*, Vol. 2, Proc. of the First International Conference on Risk Analysis and Crisis Response, Shanghai, China, ed. Atlantis Press Paris.

Caussin J. (2001) L'optimisation de la protection radiologique au sein des cliniques universitaires de l'UCL, *Annalen van de Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming*, 26/1, p 71-90, Brussel.

Chernobyl Forum (2005) De rapporten van het Tsjernobyl forum zijn beschikbaar via de IAEA website: <http://www.iaea.org/NewsCenter/Focus/Chernobyl/index.shtml>

- Clerinx P., Buls N., Bosmans H., de Mey J. (2007) Double dosimetry algorithm for workers in interventional radiology. Accepted for publication in *Rad. Prot. Dos.*
- Commissie Energie 2030 (2007) Belgium's energy challenges towards 2030, eindrapport van de Commissie Energie in opdracht van de federale minister voor energie: <http://www.ce2030.be/>
- Cornelis G.C., Eggermont G. (2006) Nucleaire terreur: reflecteren over voorzorg en ethiek. Academia Press Gent, ISBN 90 382 0953 3, Proceedings lessenreeks VUB in samenwerking met SCK, Brussel.
- Covens P. (1997) Organisatie en beheer van vervalstockage van radioactief afval in VUB en AZ, Vrije Universiteit Brussel, Brussel.
- CREG (2001) Studie over de provisies en fondsen in de nucleaire sector, F010315-CDC-024, Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas, Brussel.
- Darby, S., Hill, D. et al. (2005) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *Br. Med. J.* 330 (7485): 223 (2005).
- De Clerck T., Poffijn A., Eggermont G. (2003) Measurement of atmospheric ⁸⁵Kr in Gent, Belgium: history and perspectives. Poster voor de SFRP-conferentie 'Evaluation et surveillance des rejets radioactifs des installations nucléaires', Straatsburg, 13-14 november 2003.
- De Geest E. (2002) A multi centre study of the administered activity in nuclear medicine departments in Belgium, voordracht op het EANM congres, Wenen.
- Dierckx D., Constales K., Gerardy N., Goegebuer T., Persyn K. (2005) Patient dosimetry measurements in 50 radiology departments in Belgium. *Rad. Prot Dos.* 117(1-3):135-8.
- Donadieu J., Zeghnoun A., Roudier C., Maccia C., Pirard P., Andre C., Adamsbaum C., Kalifa G., Legmann P., Jarreau PH. (2006) Cumulative effective doses radiographs to preterm infants in a neonatal intensive care unit. *Pediatrics* 117(3):882-8.
- Dragusin O., Desmet W., Heidbuchel H., Padovani R., Bosmans H. (2005) Radiation dose levels during interventional cardiology procedures in a tertiary care hospital. *Rad. Prot. Dos.* 117(1-3):231-5.
- Dragusin O., Gewillig M., Desmet W., Smans K., Struelens L., Bosmans H. (2007) Radiation dose survey in a paediatric cardiac catheterization laboratory equipped with flat panel detectors. Accepted for publication in *Rad. Prot. Dos.*
- Eggermont G. et al. (1999) Krypton-85 proceedings of a workshop, SCK, BLG 835, Brussel.
- Electrabel (2007) Persoonlijke communicatie met M. Aerts en E. Thoelen, Doel.
- Europese Commissie (1996a) European guidelines on quality criteria for diagnostic radiographic images, EUR 16260 EN, European Commission, Luxemburg.
- Europese Commissie (1996b) European guidelines on quality criteria for diagnostic radiographic images in paediatrics, EUR 16261. Luxemburg.
- Europese Commissie (2000a) Practical use of the concepts of clearance and exemption – part I, Recommendations of the Group of Experts established under the terms of Article 31 of the Euratom Treaty, Radiation Protection 122, Directorate-General Environment of the European Commission, Luxemburg.
- Europese Commissie (2000b) European guidelines on quality criteria for computed tomography, EUR 16262 EN, European Commission, Luxemburg.
- Europese Commissie (2000c) Richtsnoeren voor verwijzing naar beeldvormend onderzoek. Rapport stralingsbescherming 118: ISBN 92-828-9457-6, Luxemburg.
- Europese Commissie (2005) Special Eurobarometer 227. Radioactive waste.
- Eurostat (2007) European electricity market indicators of the liberalisation process 2005 – 2006. Statistics in focus – Environment and Energy – 88/2007.
- Eyckmans J., Perpermans G. (2003) Is er een toekomst voor kernenergie in België? Center for economic studies, KUL, working paper series 2003-13, Leuven.
- Hart D., Hillier M.C., Wall B.F., Shrimpton P.C., Bungay D. (1996) Doses to Patients from Medical X-ray Examinations in the UK – 1995 Review, *NRPB*, Chilton, Didcot.
- Hart D., Wall B. (2004) UK population dose from medical X-ray examinations, *Eur. J. Radiology* 50, 285-291.
- Hermans J. (2004) Management of radioactive waste, bijdrage aan studiedag 'nuclear medicine and radiation protection, Belgian society for nuclear medicine & Belgian society for radiation protection, 8 mei 2004, Brussel.

- HGR-Hoge Gezondheidsraad (1997) Aanbevelingen met betrekking tot de voorwaarden en de criteria voor de hospitalisatie en het ontslag van patiënten die langs metabole weg behandeld werden met radionucliden, Ministerie van Sociale Zaken, Volksgezondheid en Leefmilieu, Brussel.
- HGR-Hoge Gezondheidsraad (2003) Kwaliteitszorg en stralingsbescherming in de nucleaire geneeskunde, rapport 7221.
- HGR-Hoge gezondheidsraad (2006) Optimalisatie binnen de nucleaire geneeskunde: toepassing van de nucleaire geneeskunde in bijzondere omstandigheden, rapport 8099.
- HGR-Hoge gezondheidsraad (2007) Evaluation de l'exposition croissante des patients aux radiations par tomodynamométrie (CT) et optimisation de la radioprotection, rapport 8080.
- IAEA (1999) Near surface disposal of radioactive waste, IAEA Safety Requirements, IAEA Safety Standard Series No. WS-R-1, Vienna.
- ICRP (2000) Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste, Publication 81, Ann. ICRP 28.
- ICRP International Commission on Radiological Protection (1991) 1990 recommendations of the ICRP, Publication 60, Ann. ICRP 21.
- ICRP International Commission on Radiological Protection (1997) Protection from potential exposures: application to selected radiation sources, Publication 76, Ann. ICRP 27.
- Johnson D. (2000) Reference levels for patients undergoing common diagnostic examinations in Irish hospitals, *B. J. Radiol.*, 73, 396-402.
- Jones P., Reyckler H., Engels H., Wambersie A. (2007) Blootstelling aan röntgenstralen van de tandheelkundige patiënt: vergelijking van de doses bij verschillende technieken. *Belgisch Tijdschrift voor Tandheelkunde*, volume 1.
- Krewski D., Lubin J.H., Zielinski J.M. et al. (2005) Risk of lung cancer in North America associated with residential radon, *Epidemiology* 16: 137-145.
- Lubin J.H., Wang Z.Y., Boice Jr. J.D. et al. (2004) Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled analyses of two studies. *Int. J. Cancer* 109: 132-137.
- Marivoet J., Weetjens E. (2006) Impact of advanced fuel cycles on geological disposal in a clay formation, Proc. 11th IHLRWM conference, Las Vegas, 30 april – 4 mei 2006.
- Mettler F.A. (2004) Training of users of medical radiation, Proc. IRPA 11, 23-28 May, Madrid.
- Michielsen K., Jacobs J., Lemmens K., Nens J., Bosmans H. (2007) Results of a European dose survey for mammography. Accepted for publication in *Rad. Prot. Dos.*
- Mol H. (2001) Dosisinventarisatie Radiodiagnostiek in Vlaanderen, VUB-studie in opdracht van MIRA, VMM, www.milieurapport.be
- MONA (2002) Studie naambekendheid MONA, Katholieke Hogeschool Kempen, Geel.
- NEHAP (2003) Belgisch nationaal milieu-gezondheidsplan 2004-2010.
- NIRAS (2007) Persoonlijke communicatie met P. De Preter, Brussel.
- NRPB (1990) Patient dose reduction in diagnostic radiology, National Radiological Protection Board & Royal College of Radiologists, ISBN 0 85951 327 0, London, HMSO.
- NuTec (2005) Opsporing en preventie van radioactieve bronnen / radiologische contaminatie in de afvalcyclus, eindrapport EFRO-project door Schreurs S., Bergans N. en Eyckmans S. van het Nucleair Technologisch Centrum van de Xios Hogeschool Limburg, Diepenbeek.
- NuTec (2007) Megaports project, eindrapport ondersteuning Belgische douane door Fias P., Bergans N. en Schreurs S. van het Nucleair Technologisch Centrum van de Xios Hogeschool Limburg, Diepenbeek.
- Okkalides D., Fotakis M. (1994) Patient effective dose resulting from radiographic examinations, *Br. J. Radiol.* 67, 564-572.
- Pages J., Buisson N., Osteaux M. (2003) CT doses in children: a multicentre study; *Br. J. Radiol.* 76(911): 803-11.
- Paridaens J., Vanmarcke H. (2000) Overzicht van de besmetting met radium-226 van de voormalige overstromingsgebieden van de Bankloop gelegen ten noorden van de Roerdompstraat en ten zuiden van de Kleine Nete, SCK-studie in opdracht van de Vlaamse Landmaatschappij, R 3475, Mol.

- Paridaens J., Vanmarcke H. (2001) Inventarisatie en karakterisatie van verhoogde concentraties aan natuurlijke radionucliden van industriële oorsprong in Vlaanderen, SCK-studie in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, BLG 884, Mol. Raadpleegbaar op www.milieurapport.be
- Paridaens J., Vanmarcke H. (2002) Aanvulling op de inventarisatie en karakterisatie van verhoogde concentraties aan natuurlijke radionucliden van industriële oorsprong in Vlaanderen, SCK-studie in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij, BLG 916, Mol. Raadpleegbaar op www.milieurapport.be
- Pidgeon N.F., Beattie J. (1998) The psychology of risk and uncertainty. In "Handbook of Environmental Risk Assessment and Management" P. Calow Ed. Blackwell Science 3820 Ltd., Oxford, UK.
- RIVM (2005) Informatiesysteem medische stralingstoepassingen, raadpleegbaar op www.rivm.nl/ims
- RIZIV (2000, 2004, 2007) Gegevens geneeskundige verzorging (persoonlijke communicatie), Brussel.
- Smans K., Tapiovaara M., Cannie M., Struelens L., Vanhavere F., Smet M., Bosmans H. (2007b) Calculation of organ doses in X-ray examinations of premature babies. Resubmitted after revision to Medical Physics.
- Smans K., Vaño E., Sanchez R., Schultz F., Zoetelief J., Kiljunen T., Maccia C., Järvinen H., Bly R., Kosunen A., Faulkner K., Bosmans H. (2007a) Results of a European survey on patient doses in paediatric radiology. Accepted for publication in Rad. Prot. Dos.
- Sombré L., Lambotte J.M. (2003) Overview of the Belgian programme for the surveillance of the territory and the discussion on the implications of the international recommendations or directives on the monitoring programme. Rapport FANC, Brussel.
- Struelens L., Vanhavere F., Bosmans H., Van Loon R., Mol H. (2005a) Skin dose measurements on patients for diagnostic and interventional neuroradiology: a multicentre study. Rad. Prot. Dos. 114(1-3): 143-6.
- Struelens L., Vanhavere F., Bosmans H., Van Loon R. (2005b) Effective doses in angiography and interventional radiology: calculation of conversion coefficients for angiography of the lower limbs. Br. J. Radiol. 78(926): 135-42.
- Tack D. (2005) Réduction de la dose d'irradiation en tomодensitométrie de l'adulte. Doctoraatsthesis aan de ULB, Brussel.
- Teeuwisse W., Geleijns K., Veldkamp W. (2004) Dosimetrie in de radiologie, ervaringen van het demonstratieproject patiëntendosimetrie, NVS nieuws 29/7; 17-21.
- Tessengerlo Chemie (2007) Persoonlijke communicatie met J. Houtmeyers en G. Boven, Tessenderlo.
- Torfs R. (1999) Overzicht van de elektronucleaire industrie: geactualiseerde cijfers 1998, VITO, Mol.
- UNSCEAR (1993) Sources and effects of ionizing radiation, Publication No. E.94.IX.2, United Nations, New York.
- UNSCEAR (2000) Sources and effects of ionizing radiation, Publication No. E.00.IX.3, United Nations, New York.
- Uyttenhove J., Pommé S., Van Waeyenberge B., Hardeman F., Buysse J., Culot J.-P. (1997) *Health Physics*, 73, nr.4, blz. 644-646.
- Van de Putte S., Verhaegen F., Taeymans Y., Thierens H. (2000) Correlation of patient skin doses in cardiac interventional radiology with dose-area product, British J. Radiology, 73, 504-513.
- van Engen R., Young K., Bosmans H., Thijssen M. (2006) The European protocol for the quality control of the physical and technical aspects of mammography screening, in the 4th Edition of the European Guidelines for Breast Cancer Screening. Printed by the European Commission.
- Vanmarcke H., Paridaens J., Froment P., Van Cauteren J., Timmermans C. (2003) Overzicht van de NORM problematiek in de Belgische industrie, SCK, NRG en AV-Controlocom studie in opdracht van NIRAS, R-3775, Mol.
- Vaño E. (2003) Conclusie van de discussie tijdens de 2de internationale conferentie: radiation protection training: future strategies, 17-19 september, Madrid.
- Vaño E. (2007) Persoonlijke communicatie, Madrid.
- Verbruggen A. (2007) Addressing climate change & nuclear risks, University of Antwerp: <http://www.ua.ac.be/main.aspx?c=aviel.verbruggen&n=51929>
- VITO (2007) Persoonlijke communicatie met K. Aernouts, Mol.

viWTA (2004) Kernenergie en maatschappelijk debat, SCK (E. Laes, G. Meskens en G. Eggermont) en VUB (L. Chayapathi), rapport in opdracht van het Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek van het Vlaams Parlement, Brussel.

Wakeford R. et al. (1997) The risk of childhood cancer from low doses of ionising radiation received in utero, Proc. Int. Conf. Seville, 1997, IAEA-CN-67/123.

Wall B.F., Hart D. (1997) Revised radiation doses for typical X-Ray examinations, British J. Radiology, 70, 437-439.

Willis C., Slovis T. (2004) The ALARA concept in pediatric CR and DR: dose reduction in pediatric radiographic exams - A white paper conference, Executive summary, *Pediatr. Radiol.*, 34 (suppl. 3), S162-S164.

Worgul et al. (2007) Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures, *Radiation Research*, 167, 233-243.

World Nuclear Association (2007) www.world-nuclear.org

Lijst met relevante websites

p.m.

Auteurs voorgaande MIRA-rapporten

Deze personen werkten mee aan voorgaande MIRA-publicaties en onderschrijven niet noodzakelijk de informatie in dit achtergronddocument:

Johan Brouwers, MIRA, VMM (MIRA-T 1999, MIRA-S 2000, MIRA-T 2001, MIRA-T 2002, MIRA-T 2003, MIRA-T 2004, MIRA-T 2005, MIRA-T 2007)

N. Buls, L. Chayapathi, P. Covens, W. Goossens, W. Kusters, Afdeling Stralingsbescherming VUB (MIRA-T 1998)

Gilbert Eggermont, Vakgroep Menselijke Ecologie, VUB en Afdeling Stralingsbescherming SCK (tot 2006) (MIRA-T 1998, MIRA-T 1999, MIRA-S 2000, MIRA-T 2001, MIRA-T 2002, MIRA-T 2003, MIRA-T 2004, MIRA-T 2005, MIRA-T 2007)

Harrie Mol, Quarad-radiologie, VUB (MIRA-T 1998, MIRA-T 1999, MIRA-S 2000, MIRA-T 2001, MIRA-T 2002, MIRA-T 2003, MIRA-T 2004, MIRA-T 2005)

Johan Paridaens, Afdeling Stralingsbescherming, SCK (MIRA-T 2001, MIRA-T 2002, MIRA-T 2003)

Koen Schoeters, Vlaamse Gezondheidsinspectie (MIRA-T 2003)

Hans Vanmarcke, Afdeling Stralingsbescherming, SCK (MIRA-2, MIRA-T 1998, MIRA-T 1999, MIRA-S 2000, MIRA-T 2001, MIRA-T 2002, MIRA-T 2003, MIRA-T 2004, MIRA-T 2005, MIRA-T 2007)

Pierre Van Iseghem, SCK (MIRA-T 2007)

MIRA-referenties voor dit hoofdstuk

- MIRA-2: pp. 369-376, 484;
- MIRA-T 1998: pp. 111-129;
- MIRA-T 1999: pp. 135-149;
- MIRA-S 2000: pp. 293-308, 546-547;
- MIRA-T 2001: pp. 221-234;
- MIRA-T 2002: pp. 163-171;
- MIRA-T 2003: pp. 191-201;
- MIRA-T 2004: pp. 209-218;
- MIRA-T 2005: indicatorfiches op de website www.milieurapport.be;
- MIRA-T 2007 : Focusrapport pp. 238-256 & Indicatorrapport pp. 68-69.

Begrippen

Absorptie: (chemie) verschijnsel dat een gas of een vloeistof in het volume van een vaste stof of een vloeistof wordt opgenomen en vastgehouden; (natuurkunde) opname van de energie van een fysisch systeem door een ander systeem, bv. absorptie van geluid, absorptie van straling.

Activiteit: aantal desintegraties per tijdseenheid. De eenheid van activiteit is de becquerel (Bq).

Alfastraling (α -straling): straling bestaande uit alfadeeltjes, dit zijn positief geladen kernen van helium-4.

Becquerel: eenheid van activiteit. 1 becquerel (Bq) = 1 desintegratie per seconde.

Berging radioactief afval: langetermijnbeheer door isolatie van het radioactief afval van mens en milieu zodat er geen actieve tussenkomst van toekomstige generaties meer nodig is.

Bètastraling (β -straling): straling bestaande uit bètadeeltjes, dit zijn negatief geladen elektronen of positief geladen positronen.

Bio-intrusie: planten en dieren die afsluitende lagen doordringen, waardoor bv. radioactieve gassen kunnen vrijkomen.

Bitumen (aardhars, asfalt): materiaal o.a. gebruikt om bepaalde types radioactief afval in te sluiten. Dit geldt zowel voor vast als vloeibaar afval, zelfs voor slib afkomstig van de behandeling van radioactieve vloeistoffen.

Blootstelling: de mate waarin de mens of het ecosysteem in contact komt met verontreiniging of verontreinigende stoffen opneemt.

Carcinogenese: het proces van het ontstaan van kanker.

Carcinoom: kwaadaardig (kanker)gezwel dat ontstaat uit de woekering van epitheelcellen.

Conditioneren: behandelen van afvalstoffen, waarbij schadelijke bestanddelen in de afvalstoffen worden omgezet of omgevormd, verwijderd of vastgelegd.

CT-scan: Computed Tomography scan. Radiodiagnostische techniek waarbij het beeld met behulp van een computer wordt berekend uit een veelheid van radiologische projecties.

Deterministisch effect: gezondheidseffect dat zich pas manifesteert wanneer een bepaalde drempeldosis wordt overschreden. De ernst van het gezondheidseffect neemt toe met de dosis.

Diagnostische referentieniveau: het dosisniveau in de medische radiodiagnostiek dat voor een patiënt van standaardafmetingen en voor standaardprocedures niet zou mogen worden overschreden wanneer ten aanzien van diagnostische en technische prestaties goede en normale praktijken in acht worden genomen (voor nucleaire geneeskunde betreft het de hoeveelheid radiofarmacon).

Dosistempo: dosis per eenheid van tijd.

Echografie: onderzoek dat gebruik maakt van teruggekaatste ultrasone geluidsgolven om beelden te maken.

Effectieve dosis: maat voor de gezondheidseffecten te wijten aan ioniserende straling beneden de drempelwaarden voor deterministische effecten. Eenheid van effectieve dosis is de sievert (Sv). Een vaak gebruikt voorvoegsel is milli (mSv of 10^{-3} Sv).

Effluent: geloosd afvalwater, al dan niet gezuiverd.

Fusie: nucleaire reactie waarbij twee of meer lichte kernen versmelten tot een zwaardere kern.

Gammastraling (γ -straling): hoog-energetische elektromagnetische straling die ontstaat bij de desintegratie van een atoomkern.

Geabsorbeerde dosis: hoeveelheid stralingsenergie afgezet per eenheid van massa. Eenheid van geabsorbeerde dosis is de gray (Gy).

Gray: eenheid van geabsorbeerde dosis. 1 gray (Gy) = 1 joule (J) per kg.

Halveringstijd: tijd waarop de activiteit van een radionuclide met de helft vermindert. De halveringstijd is karakteristiek voor een radionuclide.

Interventionele radiologie: diagnostische of therapeutische ingrepen onder geleiding van radiologische beelden (of beelden verkregen met ioniserende straling).

Ionisatie: proces waarbij een neutraal atoom of neutrale atoomgroep een elektrisch geladen deeltje opneemt of afstoot (vorming van ionen).

Ioniserende straling: straling die in de materie ionisatie veroorzaakt. Voorbeelden van ioniserende straling zijn α -, β -, γ - en röntgenstraling en neutronen.

Isotopen: atomen van hetzelfde chemisch element (gelijk aantal protonen) maar met verschillende aantallen neutronen in de kern.

Magnetische resonantie: onderzoek dat gebruik maakt van magnetische velden om beelden te maken.

MOX: kernbrandstof bestaande uit een mengsel van uranium- en plutoniumoxide.

Neutron: bouwsteen van de kern, vergelijkbaar met een proton maar zonder lading.

Nucleaire energie: energie die vrijkomt bij splijting van zware atoomkernen of fusie van lichte atoomkernen wat gepaard gaat met de omzetting van een hoeveelheid massa in energie.

Nucleaire geneeskunde: de toepassing van ioniserende straling voor diagnostische of therapeutische doeleinden, waarbij een radioactief preparaat aan de patiënt wordt toegediend.

Opslag radioactief afval: stockage van radioactief afval in een installatie (bv. gebouw) met de bedoeling het later te recupereren. Opslag is per definitie een tijdelijke maatregel.

Patiëntendosimetrie: bepaling van de dosis die patiënten oplopen bij medische toepassingen van ioniserende straling.

Radioactiviteit: fysisch verschijnsel, waarbij onstabiele atoomkernen vervallen. Deze desintegraties gaan gepaard met het uitzenden van ioniserende stralingen.

Radiofarmaca: radioactieve producten die gebruikt worden voor diagnostische of therapeutische doeleinden.

Radiologie: de uitwendige toepassing van röntgenstraling (een vorm van ioniserende straling) voor diagnostische doeleinden in de geneeskunde.

Radionuclide: een instabiele nuclide (atoomkern) die spontaan ioniserende straling of deeltjes uitzendt, waarbij het element van massa en/of atoomnummer verandert. Er zijn natuurlijke en kunstmatige radionucliden.

Radon: radioactief edelgas uit de natuurlijke uraniumreeks.

Röntgenstraling: elektromagnetische straling die ontstaat als elektronen, die zich in een aangeslagen toestand rond een atoomkern bevinden, naar een meer normale toestand terugkeren (X-stralen).

Sievert (Sv): eenheid van effectieve dosis. Maat voor de gezondheidseffecten door ioniserende straling.

Splijstofcyclus: de verschillende stadia die nodig zijn voor de productie van elektriciteit via kernenergie.

Stochastisch effect: gezondheidseffect waarvan de waarschijnlijkheid van optreden (en niet de ernst ervan) afhangt van de dosis en waarvoor geen drempeldosis bestaat.

Transuranen: chemische elementen met een atoomnummer hoger dan dat van uranium (92).

Vermogen: de hoeveelheid geleverde arbeid per tijdseenheid of het tempo waarin arbeid geleverd wordt.

Vervalopslag: kortlevende radioactieve stoffen opslaan tot de radioactiviteit door radioactief verval vrijwel verdwenen is.

Vliegias: de fijne as van de verbranding van de afvalstoffen die wordt opgevangen bij de ontstopping of een andere behandeling van de rookgassen.

Afkortingen

ALARA: as low as reasonably achievable

AMPERE: commissie voor de Analyse van de Middelen voor Productie van Elektriciteit en de Reëvaluatie van de Middelen voor Productie van Energievectoren

ARBIS: Algemeen Reglement op de Bescherming van de Bevolking en de werknemers tegen het gevaar van Ioniserende Straling

ARCELOR: ARbed, ACEraLia en UsinOR

BEIR: Biological Effects of Ionizing Radiation (Verenigde Staten)

BSNM: Belgian Society for Nuclear Medicine

CREG: Commissie voor de Regulering van de Elektriciteit en het Gas

CT: Computed Tomography

DNA: desoxyribonucleïnezuur
 EDF: Electricité de France
 EEG: Europese Economische Gemeenschap
 EPR: European Pressurized water Reactor
 EURATOM: European Atomic Energy Community
 FANC: Federale Agentschap voor Nucleaire Controle
 FBFC: Franco-Belge de Fabrication de Combustibles (gevestigd te Dessel)
 HGR: Hoge Gezondheidsraad
 IAEA: International Atomic Energy Agency
 IARC: International Agency for Research on Cancer
 ICRP: International Commission on Radiological Protection
 IRE: Instituut voor Radio-Elementen (gevestigd te Fleurus)
 ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor
 KB: Koninklijk Besluit
 MONA: Mols Overleg Nucleaire Afval
 MOX: Mixed Oxide
 NIRAS: Nationale Instelling voor Radioactief Afval en Splijtstoffen
 NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials
 OVAM: Openbare Afvalstoffenmaatschappij voor het Vlaamse Gewest
 PALOFF: Partenariat Local Fleurus-Farciennes
 PET: Positron Emission Tomography
 PWR: Pressurized Water Reactor
 RIZIV: Rijksinstituut voor Ziekte- en Invaliditeitsverzekering (België)
 SAFIR: Safety Assessment and Feasibility Interim Report (NIRAS rapport voor de overheid)
 SCK: Studiecentrum voor Kernenergie (gevestigd te Mol)
 SPR: Society of Pediatric Radiology
 STOLA: Studie en Overleggroep Laagactief Afval Dessel
 STORA: Studie- en Overleggroep Radioactief Afval Dessel
 UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
 WIV: Wetenschappelijk Instituut Volksgezondheid

Eenheden

becquerel (Bq): eenheid van radioactiviteit. 1 Bq = 1 desintegratie per seconde

gray (Gy): eenheid voor de geabsorbeerde dosis ioniserende straling

GWj: Giga Watt jaar; 1 GWj = 8,76 TWh. De totale stroomproductie in België bedroeg 81,4 TWh in 2006 of omgerekend 9,3 GWj

manSievert (manSv): eenheid voor een collectief ontvangen dosis ioniserende straling

MWd: Mega Watt dagen = 10^6 Watt dagen

sievert (Sv): eenheid voor de effectieve dosis ioniserende straling

TWh: Tera Watt uur = 10^{12} Watt uur

Voorvoegsels eenheden

10^{-1} = da (deca) 10^{-1} = d (deci)

10^2	= h	(hecto)	10^{-2}	= c	(centi)
10^3	= k	(kilo)	10^{-3}	= m	(milli)
10^6	= M	(mega)	10^{-6}	= μ	(micro)
10^9	= G	(giga)	10^{-9}	= n	(nano)
10^{12}	= T	(tera)	10^{-12}	= p	(pico)
10^{15}	= P	(peta)	10^{-15}	= f	(femto)

[Terug naar Inhoudsopgave](#)