



Berekening van de jaarlijkse gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling in België: Methodologie en Evolutie.

FANC - Departement Gezondheid en Leefmilieu
Dienst Bescherming van de Gezondheid

Petra Willems, Phd
Petra.Willems@fanc.fgov.be

Thibault Vanaudenhove, Phd
Thibault.Vanaudenhove@fanc.fgov.be

Berekening van de jaarlijkse gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling in België: Methodologie en Evolutie.

A. Inleiding.

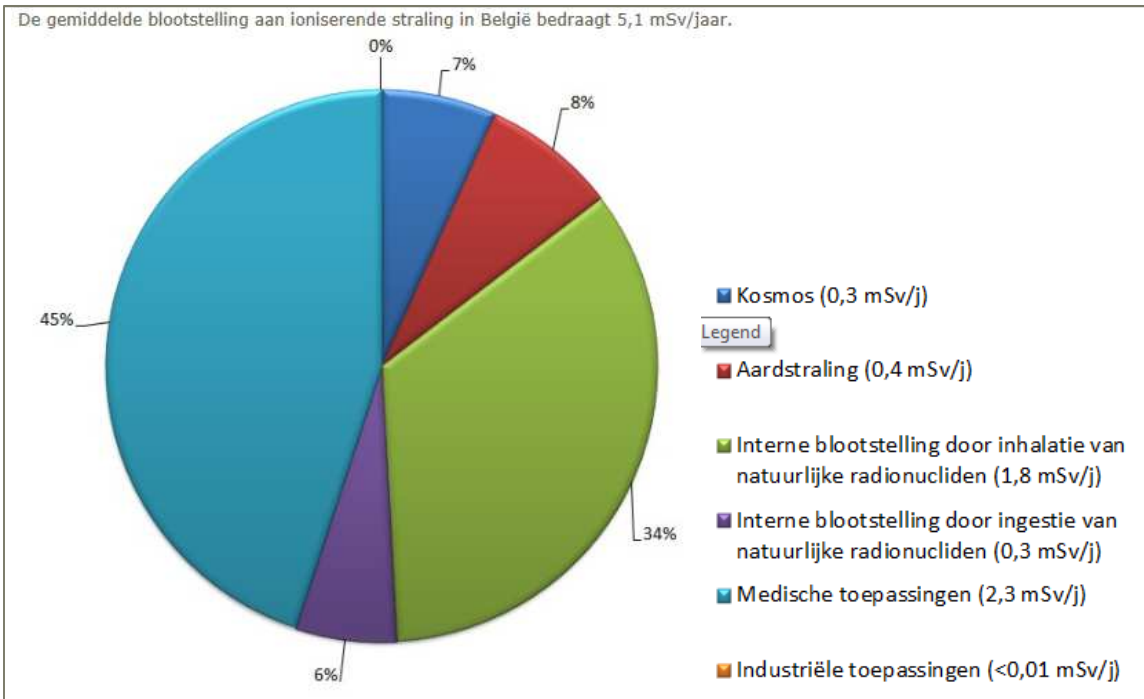
De blootstelling van de bevolking aan ioniserende straling is het gevolg van een scala aan stralingsbronnen. Sommige chemische elementen zijn van nature radioactief en bevinden zich in ons milieu. Andere vormen van ioniserende straling van natuurlijke oorsprong zijn aardsstraling en kosmische straling vanuit de ruimte. Ioniserende straling wordt bovendien ook in verschillende toepassingen gebruikt door de mens waardoor men ook aan artificiële bronnen wordt blootgesteld. De toepassingen van ioniserende straling beslaan een grote waaier van activiteiten, gaande van elektriciteitsproductie in nucleaire installaties, over verschillende industriële toepassingen, tot het gebruik van ioniserende straling voor medische diagnose en behandeling.

Er is een grote spreiding in blootstelling naar individuele leden van de bevolking toe. Sommige bronnen, zoals kosmische straling, zorgen voor een blootstelling aan elk lid van de bevolking, terwijl in het geval van medische blootstellingen, enkel de individuen die een onderzoek met ioniserende straling ondergaan worden blootgesteld. De jaarlijkse effectieve dosis geeft dus niet weer hoeveel dosis elke Belg exact heeft opgelopen. De eigenlijke opgelopen dosis per individu zal sterk variëren afhankelijk van zijn woonplaats, de individuele medische blootstelling, een eventuele beroepsgerelateerde blootstelling, aantal vlieguren tijdens dat jaar en tal van andere factoren. Een overzicht van de jaarlijkse effectieve dosis van de Belgische bevolking, de zogenaamde populatiedosis, is een hulpmiddel bij het bestuderen van de evolutie in de blootstellingen door de jaren heen en het periodiek actualiseren van de populatiedosis maakt het mogelijk om te anticiperen op eventuele tendensen die een bijzondere aandacht vragen.

In dit document tracht Het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle de verschillende bronnen van ioniserende straling te overzien die verantwoordelijk zijn voor de blootstelling van de Belgische Bevolking. Wanneer geen Belgische data voorhanden zijn, wordt verwezen naar de actuele literatuur die het meest representatief is voor de situatie in België.

De dosis die wordt vermeld bij elke bron stelt de 'per caput' dosis voor die op jaarlijkse basis wordt ontvangen, geschat aan de hand van de meest actuele data voorhanden. Deze dosis is een gemiddelde waarde van de som van doses die ontvangen worden door elke individueel blootgestelde persoon, gedeeld door de totale Belgische bevolking. De uiteindelijke waarden vertegenwoordigen een schatting die vele onzekerheden en variaties kent en kunnen niet naar een individuele blootstelling worden herleid, zonder de karakteristieken en omgevingsfactoren van die persoon in rekening te brengen.

De meest recente inschatting van de populatiedosis in België werd in 2012 berekend en geeft een schatting van de dosisbelasting voor de gemiddelde Belg in 2010. Hiervan werd enkel het algemene overzicht gepubliceerd op de website van het FANC onder de vorm van een taartdiagram (1):



Inhoudstabel.

A. Inleiding.....	2
B. Populatiedosis: methodologie voor de berekeningen en de evolutie van de data.	5
1. Blootstelling aan natuurlijke straling.	5
1.1. Externe blootstelling.	5
1.1.1. Blootstelling aan kosmische straling.....	5
1.1.2. Blootstelling afkomstig van de aardse straling	6
1.1.3. Totale externe blootstelling van natuurlijke straling	7
1.1.4. Validatie van de gegevens	8
1.2. Interne blootstelling.....	9
1.2.1. Interne blootstelling ten gevolge van Radon en Thoron	9
1.2.1.1 Blootstelling aan Radon vervalproducten via inhalatie	10
1.2.1.2 Blootstelling aan Radon via inhalatie	11
1.2.1.3 blootstelling aan Radon via ingestie	11
1.2.1.4 Blootstelling aan Thoron en Thoron vervalproducten.....	11
1.2.1.5 Totale blootstelling aan Radon en Thoron via inhalatie.....	11
1.2.2. Interne blootstellingen ten gevolge van natuurlijke radionucliden, andere dan Radon en Thoron.	12
1.2.3. Totale interne blootstelling van natuurlijke straling	12
1.3. Totale blootstelling aan natuurlijke straling:	12
2. Blootstelling aan straling afkomstig van artificiële oorsprong.....	13
2.1. Nucleaire installaties	13
2.1.1. De Belgische nucleaire installaties.	13
2.1.2. Opvolging en impact van de radioactieve lozingen.....	13
2.2. Nucleaire fall-out	15
2.2.1. Blootstelling aan straling afkomstig van Tsjernobyl.....	15
2.2.2. Blootstelling aan straling afkomstig van Fukushima	16
2.3. Blootstelling ten gevolge van artificiële radioactiviteit in de voeding.	16
2.4. Totale blootstelling ten gevolge van industriële toepassingen.	17
2.5. Blootstelling afkomstig uit beroepsactiviteiten.....	17
2.6. Medische blootstellingen.	19
2.6.1. Verdeling en aantallen	20
2.6.2. Dosisbelasting ten gevolge van medische toepassingen	23
C. De dosisbelasting van de Belgische populatie ten gevolge van een blootstelling aan natuurlijke en kunstmatige ioniserende straling in 2015.....	28
D. Evolutie van de Belgische populatiedosis.	29
Bibliografie	31
Overzicht van de figuren.	33

B. Populatiedosis: methodologie voor de berekeningen en de evolutie van de data.

1. Blootstelling aan natuurlijke straling.

Menselijke blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen heeft altijd bestaan. Wereldwijd, vormt blootstelling aan natuurlijke achtergrondstraling, het belangrijkste deel van de totale blootstelling aan straling (2). De methodologie voor de berekening van de natuurlijke stralingsbelasting is gebaseerd op de werkwijze beschreven in het UNSCEAR 2000 rapport (3).

Met uitzondering van kosmische straling, is natuurlijke ioniserende straling, en bijgevolg ook de externe en interne natuurlijke blootstelling van de Belgische bevolking, voornamelijk afkomstig van het verval van enkele belangrijke radionucliden: Uranium-238, Uranium-235, Thorium-232 en Kalium-40 (4).

1.1. Externe blootstelling.

Een dosis voor het publiek wordt zelden rechtstreeks gemeten. Deze dosissen worden geschat op basis van omgevingsmetingen en gebruik makend van modellen en veronderstellingen die verschillende scenario's simuleren.

Zo zal bijvoorbeeld de dosis ten gevolge van kosmische straling binnenshuis verschillen van deze buitenshuis. Algemeen wordt aangenomen dat men 80% van de tijd binnenshuis en 20% van de tijd buitenshuis verblijft (3). Wanneer we dit omzetten in aantal uren, krijgen we (365 dagen * 24 uren * 80% =) 7000 uren binnenshuis en (365 dagen * 24 uren * 20% =) 1760 uren buitenshuis. Personen met een andere leefgewoonte (afwijkend van de 80% binnenshuis) hebben dus een blootstelling aan natuurlijke straling die verschilt van deze hieronder omschreven.

1.1.1. Blootstelling aan kosmische straling.

De aarde wordt voortdurend gebombardeerd door energetische deeltjes die hun oorsprong kennen van de zon of buiten ons zonnestelsel. Deze hoogenergetische deeltjes vallen onder de noemer van kosmische straling. Zij interageren met de kernen van atmosferische componenten en worden voor een groot deel geabsorbeerd in onze atmosfeer. Men kan kosmische straling opdelen in primaire straling (vooral protonen die worden tegengehouden door de atmosfeer) en secundaire straling (gevormd uit de interactie van primaire straling met de atmosfeer). De interacties van kosmische straling met de atmosfeer, produceren ook een aantal radioactieve deeltjes, bekend als cosmogene radionucliden waarvan ^3H en ^{14}C de best gekende voorbeelden zijn (4).

De grootte van de blootstelling ten gevolge van kosmische straling is sterk afhankelijk van de hoogte ten opzichte van het aardoppervlak. De dosis die men op vlieghoogte oploopt ten gevolge van kosmische straling, is beduidend hoger dan deze opgelopen op zeeniveau. Op zeeniveau, is kosmische straling verantwoordelijk voor ongeveer 10% van de totale natuurlijke dosis (2).

De blootstelling aan kosmische straling is, naast de hoogte, ook afhankelijk van het aardmagnetisch veld. Zo zal een dosesdebiet rond de (geometrische) evenaar ongeveer 10% lager liggen dan bij hogere breedtecirkels (2).

Gezien België een land is met relatief kleine hoogteverschillen nabij het zeeniveau zijn de correctiefactoren voor de hoogte klein (5):

- 1,02 voor de direct ioniserende componenten en fotonen,
- 1,1 voor de neutron component.

Het effectieve dosisdebiet op zeeniveau (hoogte = 0) bij een breedtegraad van 50° (Belgische kust) bedraagt (5):

- 32 nSv/u voor de direct ioniserende componenten en fotonen,
- 9 nSv/u voor de neutron component.

Dit resulteert in een effectief dosisdebiet buitenshuis van $(32 * 1,02) + (9 * 1,1) = 42,5$ nSv/u.

Tabel 1: Dosisdebiet ten gevolge van kosmische straling (nSv/u).

Dosisdebiet kosmische straling	Effectief dosisdebiet op zeeniveau (nSv/u) (4)	Correctie voor België (5)	Belgisch gemiddeld effectief dosisdebiet (nSv/u)	Gemiddeld effectief dosisdebiet wereldwijd op zeeniveau (nSv/u) (4).
Direct ioniserende componenten en fotonen	32	1,02	32,64	31
Neutronen	9	1,1	9,9	5,5
Totaal			42,54	36,5

Rekening houdend met een indoor shielding factor van 0,8 (2) en een verblijftijd van 80% binnenshuis, bekomen we volgende gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis afkomstig van kosmische straling (binnen- en buitenshuis):

$$42,5 \cdot 10^{-6} \text{ mSv/u} * (1760 \text{ u/jaar} + 7000 \text{ u/jaar} * 0,8) = \mathbf{0,31 \text{ mSv/jaar}}$$

Bij de jaarlijkse blootstelling dient men ook de dosis ten gevolge van *cosmogene radionucliden* in rekening te brengen. Deze wordt gedomineerd door de ¹⁴C inwendige dosis en is gelijk aan **0,012 mSv/jaar** (4).

Ook de jaarlijkse blootstelling ten gevolge van *vliegvakanties en vakantie op grotere hoogten* (zoals wintersport) hebben een impact op de kosmische dosis. Volgens UNSCEAR varieert deze dosis van 0,0 tot 0,2 mSv per jaar (2; 4; 6), waarbij we voor de gemiddelde Belg een jaardosis van 0,02 tot 0,03 mSv/jaar veronderstellen (5), met een gemiddelde van 0,025 mSv/jaar. Voor de berekening van de dosis hiermee geassocieerd dient men rekening te houden met de vluchtroute, de duurtijd, frequentie en hoogte van de vluchten. Als vuistregel neemt men een blootstelling van 5 µSv per uur in een lijnvlucht. De personen die frequent vliegen, al dan niet op beroepsmatige basis, hun dosis zal uiteraard hoger liggen dan het gemiddelde van 0,025 mSv/jaar.

De totale gemiddelde blootstelling per jaar afkomstig van kosmische straling wordt dus als volgt samengevat:

Tabel 2: De gemiddelde, kosmische blootstelling in België

Kosmische straling:	0,310 mSv
Cosmogene radionucliden:	0,012 mSv
vliegvakantie en vakantie op grotere hoogten:	0,025 mSv
Totaal:	0,347 mSv (gemiddelde wereldwijd (4) = 0,39 mSv)

1.1.2. Blootstelling afkomstig van de aardse straling

Aardse straling is voornamelijk afkomstig van natuurlijke radionucliden van terrestrische oorsprong, ook wel primordiale radionucliden genoemd. Deze zijn in verschillende mate aanwezig in elke omgeving, met inbegrip van het menselijk lichaam. Deze natuurlijke radionucliden zijn sinds het ontstaan van de Aarde aanwezig in de aardkorst.

Externe blootstelling ten gevolge van natuurlijke radionucliden is voornamelijk het gevolg van γ-stralen afkomstig van ²³²Th, ²³⁸U (en in mindere mate ²³⁵U) met hun vervalproducten en ⁴⁰K (4). Ze zijn bijgevolg ook op beperkte wijze aanwezig in de meeste bouwmaterialen. De concentratie van elk van deze isotopen is sterk afhankelijk van de bodem. In de jaren 80 werden in België honderden bodemstalen geanalyseerd op de concentratie van hogervermelde radionucliden (7).

In tabel 3 worden de gemiddelde waarden van deze spectrometrische analyses weergegeven, alsook de dosisconversie coëfficiënten van het UNSCEAR 2000 rapport (4) en de berekende geabsorbeerde dosisdebieten.

Op de plaatsen waar men de bodemonsters nam, werden eveneens directe metingen van het geabsorbeerde dosisdebiet uitgevoerd. Kosmische straling buiten beschouwing gelaten, werd **43 nGy/u** gemeten (7), wat overeenkomt met het gemeten dosisdebiet van de bodemstalen.

Tabel 3: Externe blootstellingsdebieten afgeleid van de gemiddelde concentraties van radionucliden in de Belgische bodem (met het UNSCEAR gemiddelde wereldwijd (4)) en de dosis conversie coëfficiënt zoals gebruikt in het UNSCEAR 2000 rapport (4).

radionuclide	Concentratie in de bodem Bq/kg	Dosis conversie coëfficiënt (nGy/u) / (Bq/kg)	Geabsorbeerd dosisdebiet (nGy/u)
⁴⁰ K	380 (420)	0.0417	16 (18)
²²⁶ Ra (uranium series)	26 (33)	0.462	12 (15)
²³² Th	27 (45)	0.604	16 (27)
Totaal geabsorbeerd dosisdebiet outdoor van bodem metingen:			44 (60)

In dezelfde studie (7) werden metingen uitgevoerd van het (geabsorbeerde) dosisdebiet in enkele honderden woningen, waar men een gemiddelde waarde van **60 nGy/u** vond. De blootstelling aan terrestrische straling binnenshuis wordt voornamelijk bepaald door de gebruikte bouwmaterialen en is inherent groter dan deze in de buitenlucht, voornamelijk door de geometrie van de bron die een omringende configuratie heeft binnenshuis.

De effectieve dosis kan geschat worden op basis van de geabsorbeerde dosis en gebruik makend van een conversiefactor. Bovendien, door de kleinere afmetingen van het lichaam van kinderen gebruikt men verschillende, leeftijdsafhankelijke conversiefactoren (volwassene: 0,7; kind -6 tot 15 jaar-: 0,8; kleuter -0 tot 5 jaar-: 0,9) (3).

De gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis voor aardstraling wordt weergegeven in tabel 4 en is bijgevolg **0,35 mSv/jaar** voor een volwassene.

Tabel 4: De gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis te wijten aan aardstraling.

Gemiddelde, jaarlijkse effectieve dosis	Volwassene (conversiefactor = 0,7) (3)	Kind, 6 – 15 jaar (conversiefactor = 0,8) (3)	Peuter, 0 – 5 jaar (conversiefactor = 0,9) (3)
Binnenshuis (7000h)	$60 \cdot 10^{-6} \cdot 7000 \cdot 0,7$ = 0,30 mSv/jaar	$60 \cdot 10^{-6} \cdot 7000 \cdot 0,8$ = 0,34 mSv/jaar	$60 \cdot 10^{-6} \cdot 7000 \cdot 0,9$ = 0,38 mSv/jaar
Buitenshuis (1760h)	$43 \cdot 10^{-6} \cdot 1760 \cdot 0,7$ = 0,05 mSv/jaar	$43 \cdot 10^{-6} \cdot 1760 \cdot 0,8$ = 0,06 mSv/jaar	$43 \cdot 10^{-6} \cdot 1760 \cdot 0,9$ = 0,07 mSv/jaar
Totaal België (wereldwijd) (4)	0,35 mSv/jaar (0,48)	0,40 mSv/jaar (0,55)	0,45 mSv/jaar (0,62)

De gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis voor de hele Belgische bevolking (inclusief kinderen) te wijten aan aardstraling wordt geschat op **0,4 mSv/jaar**. (met een range van 0,2 tot 0,6 mSv per jaar) (5).

1.1.3. Totale externe blootstelling van natuurlijke straling

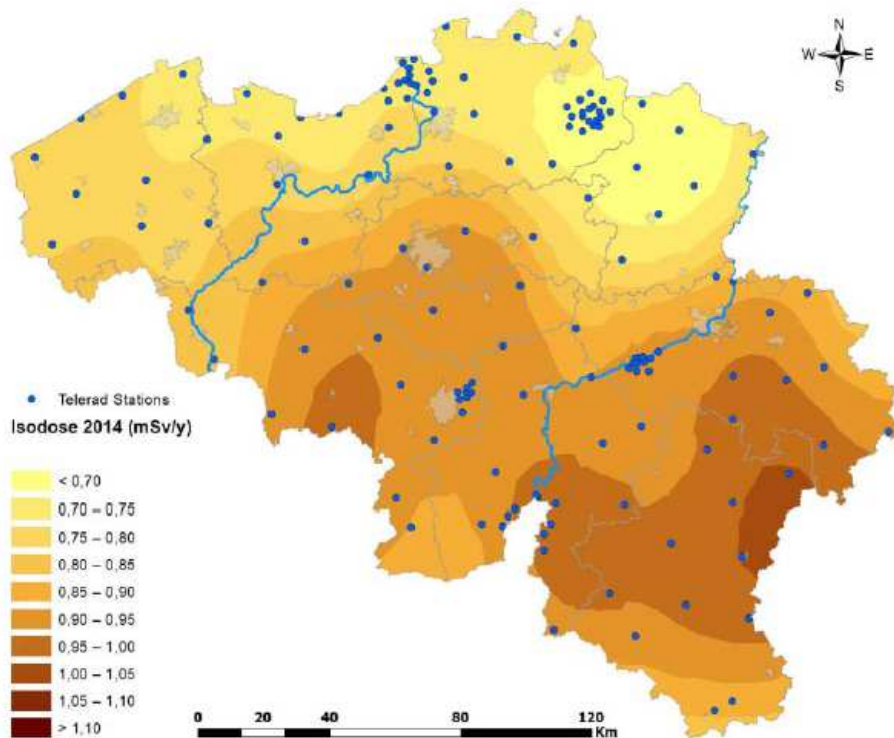
Wanneer we de blootstelling te wijten aan aardstraling en kosmische straling optellen, vinden we:

$$\begin{array}{lcl} \text{kosmische straling} & + & \text{aardstraling} & = & \text{natuurlijke externe blootstelling} \\ 0,35 \text{ mSv/jaar} & + & 0,4 \text{ mSv/jaar} & = & \mathbf{0,75 \text{ mSv/jaar}} \text{ (range } 0,54 - 1,14 \text{ mSv/jaar)} \end{array}$$

1.1.4. Validatie van de gegevens

Deze waarden worden ook bevestigd door het TELERAD (<http://telerad.fgov.be/>) systeem van het FANC. Telerad is een netwerk verspreid over het volledige Belgische grondgebied, van 192 meetstations voor de meting van gammastraling in de omgeving, 8 stations voor de meting van gammastralen in waterlopen en 7 stations voor de meting van aerosol in de lucht (8) (voor een gedetailleerde beschrijving van het TELERAD systeem, zie (9; 10)). Wanneer men de metingen van het jaar 2014 bekijkt (die sterk gelijkaardig zijn aan de metingen van de jaren voordien), zien we een gemiddelde blootstellingdosis aan gammastraling in België van 1 mSv/jaar, ze stijgt van 0,7 mSv/jaar in het Noorden tot ongeveer 0,8 à 0,9 mSv/jaar in Vlaanderen globaal en tot gemiddeld 1,1 mSv/jaar in Wallonië, meer bepaald in de Ardennen (10).

Figuur 2 (10) geeft de gemeten waarden in 2014 in isodosen voor België, opgedeeld in verschillende geografische zones.



Figuur 2: Isodose curve TELERAD metingen 2014.

Uitgaande van deze gegevens kan men veronderstellen dat een gemiddelde Belgische (volwassen) burger $1 \text{ mSv} \cdot 0,7$ (conversiefactor volwassene) = $0,7 \text{ mSv}$ ontvangt. Wanneer men de neutron component (4), die niet gemeten wordt door het TELERAD netwerk, erbij telt, krijgt men:

Neutronen component: $9 \text{ nSv/u} \cdot (1760\text{u} + 7000\text{u} \cdot 0,8 \text{ afscherming binnenshuis})$	= $0,06 \text{ mSv/jaar}$
Externe dosis ten gevolge van natuurlijke gammastraling	= $0,7 \text{ mSv/jaar}$
Totale effectieve, natuurlijke dosis ten gevolge van externe blootstelling	
	= $0,76 \text{ mSv/jaar}$

De $0,76 \text{ mSv}$ per jaar ligt in dezelfde grootteorde als de berekende $0,74 \text{ mSv}$ per jaar.

1.2. Interne blootstelling

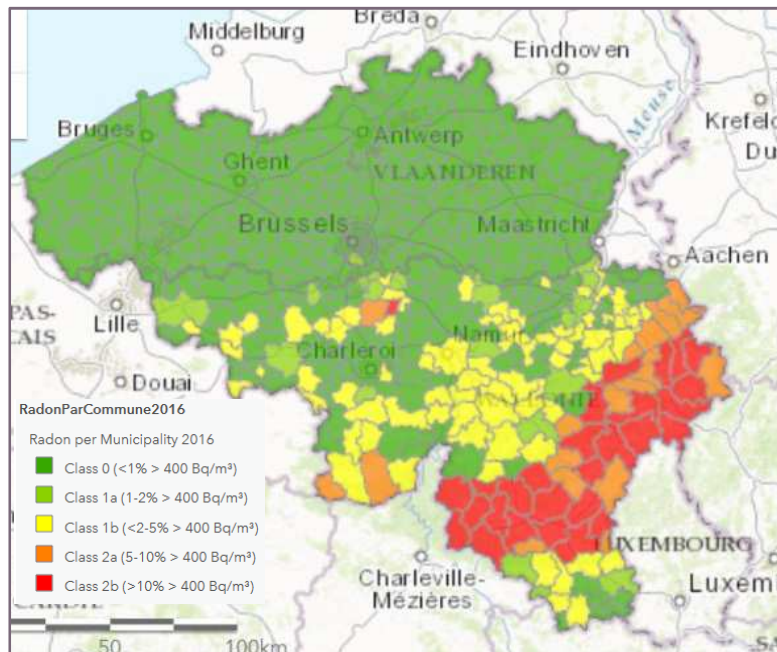
1.2.1. Interne blootstelling ten gevolge van Radon en Thoron

Bij de vervalreeksen van uranium-238 (^{238}U), uranium-235 (^{235}U) en thorium-232 (^{232}Th) wordt steeds een radioactief chemisch inert radongas gevormd. In elk van deze reeksen hebben zij welbepaalde benamingen: radon (^{222}Rn), thoron (^{220}Rn) en actinon (^{219}Rn). Actinon heeft een zeer korte halfwaardetijd, en vertoont dan ook een lage aanwezigheid in het milieu. Gezien het halfleven van radon (3,82 dagen) veel langer is in vergelijking met dat van thoron (55,6 seconden) is de bijdrage van radon tot de blootstelling van de bevolking veel belangrijker.

Door hun gasvormige toestand kunnen radon (^{222}Rn) en thoron (^{220}Rn) doorheen de bodem migreren en komen ze zo in onze omgeving terecht waar we ze inademen. Bovendien, wegens een natuurlijk drukverschil dat bestaat tussen binnen- en buitenlucht wordt het radongas als het ware binnenshuis gezogen door spleten en onvolmaaktheden in de fundamente van gebouwen. Omdat het chemisch inert is, vormt het op het eerste zicht geen probleem. We ademen radon in, maar als edelgas ademen we het ook terug uit. Radon is echter radioactief en ook zijn kortlevende vervalproducten komen dus voor in de lucht. Dit zijn vaste stoffen die daarom achter in de longen blijven bij het uitademen. Gezien de biologische halveringstijd van de vervalproducten in de longen groter is dan enkele uren, is er ook tijd voor verval naar lood-210. Hierbij worden twee alfadeeltjes uitgezonden, afkomstig van polonium-218 en polonium-214. Deze alfadeeltjes beschadigen de basale en secretorische cellen van de luchtwegen waardoor er, na vele jaren, longkanker kan ontstaan. De radon blootstelling is dus eigenlijk van zijn kortlevende vervalproducten afkomstig.

Een verhoogd risico op longkanker door een blootstelling aan radongas en zijn vervalproducten, is gekend uit epidemiologische studies van ondergrondse mijnwerkers en van studies betreffende radon in residentiële woningen (11). Wanneer grote concentraties worden opgebouwd binnenshuis (in woon- of werkplaatsen) kunnen zij dus een gevaar betekenen voor diegene die er lange tijd verblijven.

De gemiddelde concentraties van radon in een bepaald gebied zijn afhankelijk van de ondergrond en kunnen dus sterk verschillen van regio tot regio: In de buitenlucht wordt in België een gemiddelde van 10 Bq/m^3 gemeten (5; 11).



Figuur 3: De geografische verdeling van de blootstelling aan radon in België (40). De radon gevoelige zone is aangeduid in oranie en rood.

Voor meer informatie over de geografische verdeling van de blootstelling aan radon, zie www.fanc.fgov.be → [radon](#).

Tabel 5: De gemiddelde blootstelling aan radon binnenshuis in België (data voor 2010). **(12).**

	Populatie	Woningen	Rekenkundig gemiddelde	Mediaan	Geometrisch gemiddelde
België	10584534	3742000	57 Bq/m ³	44 Bq/m ³	46 Bq/m ³
Wallonië	3435879	1325000	84 Bq/m ³	60 Bq/m ³	75 Bq/m ³
Vlaanderen	6117440	2191000	44 Bq/m ³	37 Bq/m ³	36 Bq/m ³
Brussels	1031215	226000	44 Bq/m ³	37 Bq/m ³	36 Bq/m ³
Radon gevoelige regio	376568	130000	220 Bq/m ³	127 Bq/m ³	137 Bq/m ³

In tegenstelling tot de meeste bronnen van natuurlijke straling, bestaan er methoden om de bevolking beter te beschermen tegen de blootstelling aan radon. Meer informatie over Radon en de beschermingsmaatregelen, zie www.fanc.fgov.be → [radon](#).

1.2.1.1 Blootstelling aan Radon vervalproducten via inhalatie

De Internationale commissie voor radioprotectie (International commission on radiological protection, ICRP) heeft begin jaren '90 aanbevelingen gepubliceerd voor de bescherming tegen radon-222 thuis en op het werk in de ICRP Publicatie 65 'Protection against Radon-222 at Home and at Work'. (13). In 2007 publiceerde ICRP nieuwe aanbevelingen voor het systeem van stralingsbescherming (14). In het licht van deze nieuwe aanbevelingen en de recente wetenschappelijke gegevens omtrent de gevolgen voor de gezondheid ten gevolge van een blootstelling aan radon en haar vervalproducten, werden de schattingen hieromtrent geüpdatet in de ICRP publicatie 115 (15). Als belangrijke conclusie werd gesteld dat de 'detriment-adjusted nominal risk coëfficiënt' (= de voor schade gecorrigeerde risico coëfficiënt) voor een blootstelling aan radon ongeveer verdubbeld is ten opzichte van wat er tot dan toe werd aangenomen. Dit zal uiteraard een significante impact hebben op de aangepaste berekeningen van de effectieve dosis. De "ICRP Statement on Radon" (15) beveelt een de 'detriment-adjusted nominal risk coëfficiënt' voor een bevolking van alle leeftijden aan van $8 \cdot 10^{-10}$ per Bq·u/m² voor een blootstelling aan radon-222 gas, in evenwicht met zijn vervalproducten. Tot nog toe heeft ICRP echter nog geen nieuwe dosiscoëfficiënten gepubliceerd. Aangezien ICRP in hetzelfde statement stelt dat hun bevindingen in overeenstemming zijn met de schattingen die door UNSCEAR werden gepubliceerd in 2006 (11; 15), werd ervoor gekozen om de dosisconversiefactor beschreven in het 2006 UNSCEAR rapport aan te houden.

Een directe meting van concentraties van kortlevende vervalproducten van radon (zoals ²¹⁸Po, ²¹⁴Pb en ²¹⁴Bi) is niet eenvoudig en wordt daarom geschat aan de hand van het (on)evenwicht met het moederisotoop radon. De evenwichtsfactor (F) is de ratio tussen de evenwichtsequivalente radonconcentratie (C_{EEC}) en de radonconcentratie (C_{Rn}). UNSCEAR (11) stelt afgeronde waarden van evenwichtsfactoren: 0,4 binnenshuis en 0,6 buitenshuis voor.

De blootstelling aan de vervalproducten van radon wordt berekend aan de hand van volgende formule:

$$({}^{in}C_{Rn} * {}^{in}F * 7000 + {}^{out}C_{Rn} * {}^{out}F * 1760) * R_{ndecay_{con}}$$

- ${}^{in}C_{Rn} = 46 \text{ Bq/m}^3$ de geometrisch gemiddelde radonconcentratie indoor Bq/m³ (12).
- ${}^{out}C_{Rn} = 10 \text{ Bq/m}^3$ de gemiddelde radonconcentratie outdoor (5; 11).
- ${}^{in}F = 0,4$ de gemiddelde indoor evenwichtsfactor is (11).
- ${}^{out}F = 0,6$ de gemiddelde outdoor evenwichtsfactor is (11).
- $R_{ndecay_{con}} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ mSv}/(\text{Bq h/m}^3)$ de dosisconversiefactor is voor de vervalproducten (11; 3).

Dit resulteert in een gemiddelde blootstelling voor radonvervalproducten van:
 $(46 * 0,4 * 7000 + 10 * 0,6 * 1760) * 9 \cdot 10^{-6} = \mathbf{1,254 \text{ mSv/jaar}}$.

1.2.1.2 Blootstelling aan Radon via inhalatie

Radon is een gas dat voornamelijk wordt ingeademd, en het vormt de op één na belangrijkste oorzaak van longkanker. Daarnaast is een fractie oplosbaar in het bloed, waarbij het circuleert in heel het menselijk lichaam. De belangrijkste bronnen van blootstelling aan radon zijn de bodem onder de woning, gevolgd door de bouwmaterialen en de buitenlucht. Een beperkte fractie van radon kan ook aanwezig zijn in het grondwater dat, indien het voor huishoudelijk gebruik wordt aangewend, vrijkomt in de lucht binnenshuis wanneer een kraan of douche wordt aangezet (4).

De indoor concentratie van radon gas kan enorm verschillen naargelang de karakteristieken van de woning en de locatie in België (meer informatie: Dehandschutter et al. 2009 (16), www.fanc.fgov.be → [radon](#)).

De blootstelling aan radon via inhalatie wordt berekend aan de hand van volgende uitdrukking:

$$({}^{\text{in}}C_{\text{Rn}} * 0,8 + {}^{\text{out}}C_{\text{Rn}} * 0,2) * R_{\text{ngas}_{\text{con}}}$$

→ ${}^{\text{in}}C_{\text{Rn}} = 46 \text{ Bq/m}^3$ de gemiddelde radonconcentratie indoor is (12).
 → ${}^{\text{out}}C_{\text{Rn}} = 10 \text{ Bq/m}^3$ de gemiddelde radonconcentratie outdoor is (5; 11).
 → $R_{\text{ngas}_{\text{con}}} = 1,5 * 10^{-3} \text{ (mSv/jaar)/(Bq/m}^3)$ de dosisconversie factor voor Rngas (4; 11).

Dit resulteert in een gemiddelde blootstelling voor radongas via inhalatie van:
 $(46 * 0,8 + 10 * 0,2) * 1,5 * 10^{-3} = \mathbf{0,058 \text{ mSv/jaar}}$

1.2.1.3 blootstelling aan Radon via ingestie

Radon in het leidingwater zal een blootstelling veroorzaken, enerzijds door ingestie van het leidingwater, anderzijds door inhalatie van het radon die bij het gebruik van het leidingwater wordt vrijgesteld aan de lucht (4). De aan de lucht vrijgestelde Radon, wordt echter ook gemeten en de bijdrage aan de effectieve dosis is reeds vervat in bovenstaande berekeningen. De blootstelling aan Radon via ingestie wordt geschat op **0,002 mSv** per jaar (4).

1.2.1.4 Blootstelling aan Thoron en Thoron vervalproducten

Door het korte halfleven van Thoron (55,6 sec), blijft de bijdrage van dit isotoop tot de blootstelling van de Belgische bevolking beperkt. Aangezien de halveringstijd korter is dan de tijd die het gas nodig heeft om zich homogeen over een lokaal te verspreiden, is de blootstelling voornamelijk afhankelijk van de afstand tot de bron. Men neemt aan dat de evenwichtsequivalente thoronconcentratie indoor $0,3 \text{ Bq/m}^3$ en outdoor $0,1 \text{ Bq/m}^3$ bedraagt, met een dosis conversiefactor van $40 \text{ (nSv/u)/(Bq/m}^3)$ (4). Bijgevolg wordt de blootstelling op jaarbasis aan thoron en zijn vervalproducten berekend als volgt:

Indoor: $0,3 * 40 * 10^{-6} * 7000 = 0,084 \text{ mSv per jaar}$
 Outdoor: $0,1 * 40 * 10^{-6} * 1760 = 0,007 \text{ mSv per jaar}$
 Totaal $0,091 \text{ mSv per jaar}$.
 De blootstelling aan Thoron en de vervalproducten ervan bedraagt dus **0,09 mSv** per jaar (4).

1.2.1.5 Totale blootstelling aan Radon en Thoron via inhalatie

Tabel 6 toont de gemiddelde, totale blootstelling op jaarbasis aan Radon en Thoron voor een volwassen Belgische burger.

Tabel 6: Totale jaarlijkse blootstelling ten gevolge van Radon en Thoron in België.

	Jaarlijkse effectieve dosis per hoofd.
Blootstelling aan radon en vervalproducten via inhalatie (via longen):	1,254 mSv/jaar
Blootstelling aan radongas via inhalatie (via bloed):	0,058 mSv/jaar
Blootstelling aan radongas via ingestie:	0,002 mSv/jaar
Blootstelling Thoron en vervalproducten via inhalatie:	0,091 mSv/jaar
Totaal:	1,405 mSv/jaar

1.2.2. Interne blootstellingen ten gevolge van natuurlijke radionucliden, andere dan Radon en Thoron.

Interne blootstellingen aan natuurlijke straling, zijn het gevolg van een opname van aardse radionucliden door inhalatie en ingestie. Doses door inademing, zijn voornamelijk het gevolg van aanwezige stofdeeltjes in de lucht die radionucliden bevatten van de uranium-238 en thorium-232 vervalketens. Doses door ingestie zijn voornamelijk te wijten aan kalium-40 (⁴⁰K) en de uranium-238 en thorium-232 vervalreeksen, aanwezig in voedsel en drinkwater (4).

Kalium is onder normale omstandigheden uniform verdeeld is over het lichaam en wordt homeostatisch gecontroleerd. Dit element komt onder meer tussen in de regeling van de fysiologische processen zoals de spijsvertering, hartslag en vochtregulering van de cellen. Bij volwassenen komt ongeveer 0,18% van de lichaamsinhoud voor onder de vorm van kalium; bij kinderen bedraagt dit ongeveer 0,2% (4). Hoewel er enige variabiliteit bestaat tussen verschillende personen, is de dosis die ieder van ons ontvangt van kalium-40, gelijkaardig.

- Gemiddelde dosis volwassenen: 0,165 mSv per jaar (4).
- Gemiddelde dosis kinderen: 0,185 mSv per jaar (4).

Voor wat betreft de dosis ten gevolge van ingestie van de uranium-238 en thorium-232 vervalreeksen, wordt de voornaamste bijdrage geleverd door polonium-210 (²¹⁰Po). UNSCEAR (4; 2) schat de effectieve dosis van ingestie voor uranium en thorium vervalproducten op:

- volwassenen: 0,11 mSv/jaar (²¹⁰Po bijdrage = 0,07 mSv/jaar) (4)
- kinderen: 0,20 mSv/jaar (²¹⁰Po bijdrage = 0,10 mSv/jaar) (4)
- peuter: 0,26 mSv/jaar (²¹⁰Po bijdrage = 0,18 mSv/jaar) (4)

De gemiddelde, wereldwijde interne blootstelling afkomstig van nucliden andere dan Rn en Th wordt geschat op **0,29 mSv/jaar** (4).

1.2.3. Totale interne blootstelling van natuurlijke straling

De totale interne blootstelling afkomstig van natuurlijke straling (Rn, Th en radionucliden) bedraagt in België gemiddeld:

$$1,405 + 0,29 = \mathbf{1,695 \text{ mSv/jaar.}}$$

1.3. Totale blootstelling aan natuurlijke straling:

De totale blootstelling op jaarbasis aan natuurlijke straling wordt geschat op 0,75 (extern) + 1,70 (intern) = **2,45 mSv**. Wereldwijd wordt de blootstelling aan natuurlijke straling geschat op gemiddeld 2,4 mSv per jaar (2; 4).

2. Blootstelling aan straling afkomstig van artificiële oorsprong

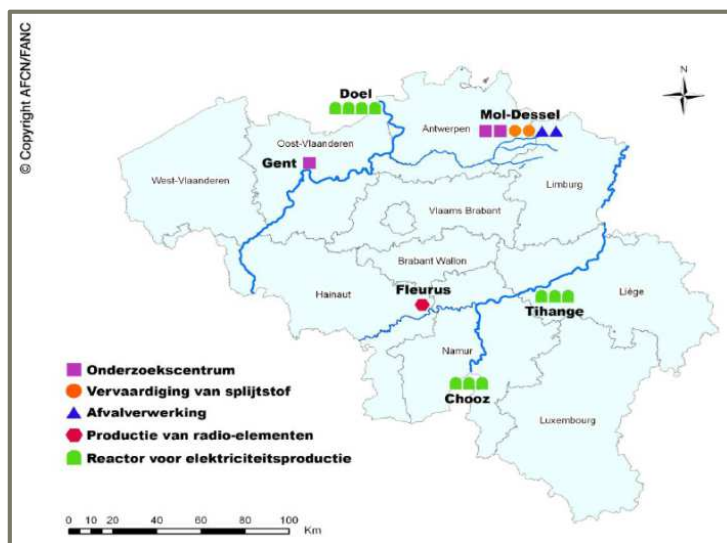
2.1. Nucleaire installaties

In het kader van de normale werking van de nucleaire klasse I inrichtingen zoals kerncentrales, zijn zij vergund om op een gecontroleerde wijze beperkte hoeveelheid radioactiviteit te lozen, zowel onder de vorm van gasvormige lozingen als vloeibare lozingen.

In België bedraagt de dosislimiet voor een lid van de bevolking 1 mSv per 12 glijdende maanden volgens het ARBIS (17). Volgens hetzelfde besluit, dienen jaarlijkse limieten voor lozingen bepaald te worden voor elke nucleaire installatie op een manier dat de resulterende dosis van de bevolking voor alle blootstellingen afkomstig van deze nucleaire installaties samen de limiet niet zal overschrijden. Het ARBIS bepaalt ook dosisbeperkingen volgens het ALARA principe, wat betekent dat de toegelaten lozingslimieten voldoende laag moeten zijn zodat ze aanleiding geven tot slechts een fractie van de wettelijke limiet voor het publiek.

2.1.1. De Belgische nucleaire installaties.

In België, beschikken 5 nucleaire sites over een klasse I inrichting (zie figuur 3): Doel, Tihange, Fleurus, Mol-Dessel en de onderzoeksreactor in Gent die in 2003 werd stilgelegd en ondertussen volledig is ontmanteld. Daarenboven bevindt de Franse nucleaire site Chooz zich vlakbij de Belgische grens (8).



Figuur 4: De nucleaire inrichtingen met een klasse I vergunning in België (8).

Meer gedetailleerde informatie over deze sites kan terug gevonden worden via de websites van het FANC (www.fanc.fgov.be → [Dossier: nucleaire en industriële inrichtingen](#)) of in de gepubliceerde informatiedossiers omtrent radioactieve lozingen, terug te vinden via www.fanc.fgov.be → [publicaties](#)) of de respectievelijke websites van de nucleaire sites.

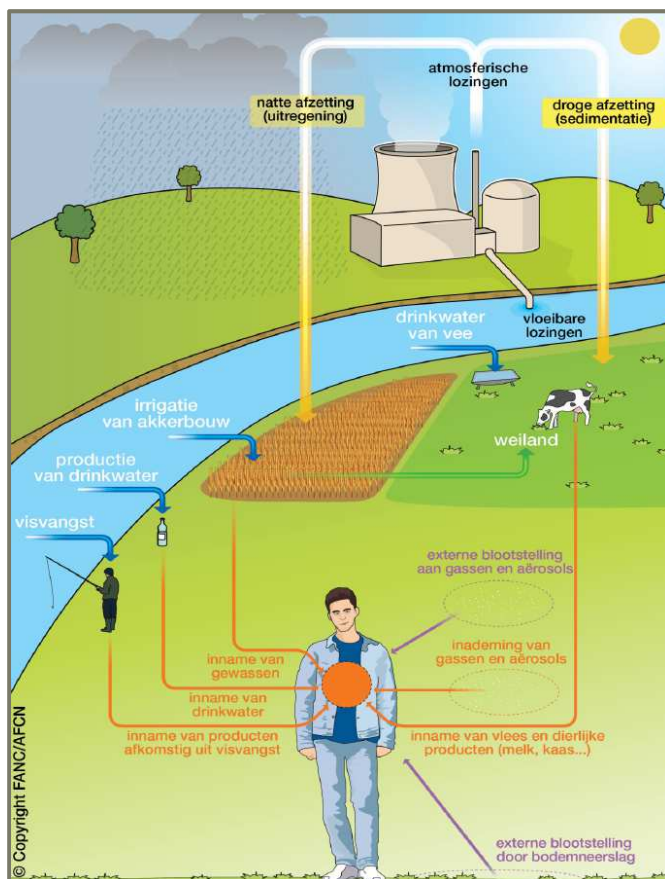
2.1.2. Opmvolging en impact van de radioactieve lozingen.

Opmvolging van de radioactieve lozingen gebeurt op verschillende niveaus. De exploitanten zijn verplicht tot het naleven van hun lozingsvergunning en worden aangezet tot het controleren van deze lozingen volgens vooraf bepaalde modaliteiten, gebruik makende van metingen voor en tijdens de lozingen. De lozingen worden bovendien geregistreerd en maandelijks aan zowel het FANC als BelV (het filiaal voor technisch controle van het FANC) doorgegeven (8). Sinds 2011 is de methode voor de registratie van de radioactieve lozingen aangepast als gevolg van een Europese aanbeveling. Waar

voorheen de lozingen onder de detectielimiet gelijk gesteld werden aan 0, wordt vanaf 2011 een forfaitaire waarde gebruikt (18).

Daarnaast worden de gemeten waarden ook gecontroleerd aan de hand van metingen in het leefmilieu, waarvan een deel door de exploitant zelf worden uitgevoerd. Het FANC voert ook zijn eigen metingen in het leefmilieu uit in het kader van het radiologisch toezicht op het grondgebied. Enerzijds gebeuren er metingen op verschillende soorten stalen (water, sediment, gras, lucht, groenten, vlees, melk, vis,...) uit de omgeving van de nucleaire installaties. Bovendien voert het FAVV (Federaal Agentschap voor de Veiligheid van de Voedselketen) ook controles uit in verschillende stadia van de voedselketen (8). De resultaten van deze metingen worden jaarlijks weergegeven in een verslag met betrekking tot het radiologisch toezicht op het grondgebied terug te vinden via www.fanc.fgov.be → [publicaties](#)). Anderzijds houdt het FANC ook permanent toezicht op het grondgebied via het TELERAD-netwerk. De meetresultaten hiervan zijn beschikbaar via de TELERAD-website (<http://telerad.fgov.be/>).

Bij het berekenen van de dosis ten gevolge van deze radioactieve lozingen, houdt men rekening met alle mogelijke blootstellingswegen voor het publiek zoals voorgesteld in figuur 5. De dosis ten gevolge van deze lozingen wordt berekend vanuit een worst-case scenario, rekening houdende met de verschillende manieren van blootstelling, leefgewoontes, voedingsgewoontes, gebruik van water. Daarenboven worden 6 leeftijdscategorieën in aanmerking genomen ($\leq 1j$, 1-2j, 2-7j, 7-12j, 12-17j en $> 17j$), om zo ook de leeftijdsafhankelijkheid van de gevoeligheid voor ioniserende straling in rekening te brengen. Op basis van deze veronderstellingen en parameters kan de blootstelling voor individuele burgers niet onderschat worden (8).



Figuur 5: De blootstellingswegen voor het publiek (8).

Tabel 7 toont de maximale jaarlijkse dosis ten gevolge van de radioactieve lozingen van de Belgische nucleaire installaties sinds 2011. We zien dat deze doorheen de jaren stabiel zijn gebleven en ruim onder de legale publiekslimiet van 1 mSv per 12 glijdende maanden blijven. Deze informatie is terug

te vinden in de informatiedossiers over radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I (www.fanc.fgov.be → [publicaties](#)).

De totale dosis die in onderstaande tabel wordt weergegeven, is de totale blootstelling voor een onbestaande persoon van het publiek. Ondanks de worst-case-scenario berekening, kan men nooit de blootstelling op jaarbasis oplopen van alle sites gelijktijdig. De blootstelling is bijgevolg regio gebonden, en zal enkel opgelopen kunnen worden indien men in de omgeving van een kerncentrale woont. De meerderheid van de Belgische Bevolking zal dan ook geen enkele dosis afkomstig van de nucleaire installaties oplopen. De impact op de totale Belgische bevolking is dus verwaarloosbaar.

Maximale jaarlijkse dosis (mSv/jaar)	2011 (18)	2012 (19)	2013 (20)	2014 (21)	2015 (8)
KC Doel	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
KC Tihange	0,05	0,05	0,049	0,049	0,048
Site Fleurus (IRE)	0,025	0,016	0,017	0,013	0,013
SCK-CEN	<0,001	0,0015	<0,001	<0,001	<0,001
IRMM	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Belgonucléaire	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Belgoprocess	0,009	0,0106	0,0105	0,0085	0,009
FBFC int	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Totaal	0,108	0,1011	0,1005	0,0945	0,094

Tabel 7: de maximale dosis ten gevolge van de radioactieve lozingen van de Belgische nucleaire installaties (8).

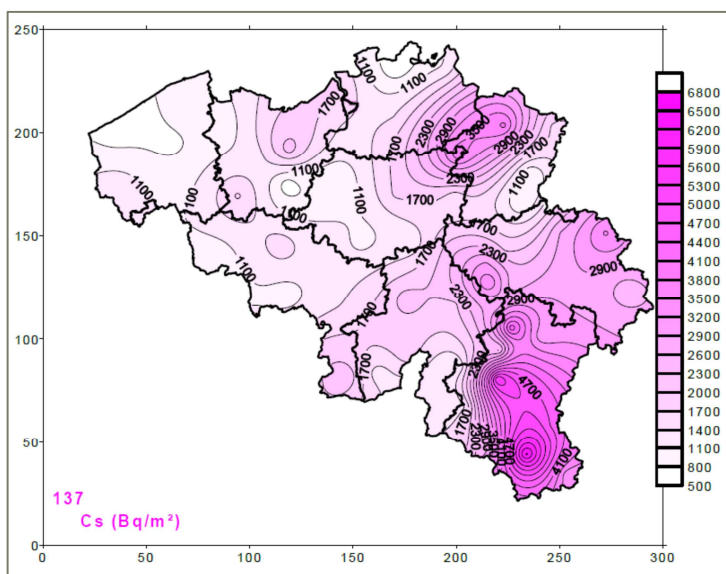
2.2. Nucleaire fall-out

Naast natuurlijke isotopen die in ons milieu aanwezig zijn, vormt cesium-137 een artificiële bron van radioactiviteit die voornamelijk afkomstig is van de nucleaire wapentesten in de jaren '50 en '60, en het ongeval in Tsjernobyl in 1986.

2.2.1. Blootstelling aan straling afkomstig van Tsjernobyl

In figuur 6 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 geeft momenteel een verwaarloosbare dosisbelasting (22).

Figuur 6: Cesium-137 depositie 10 jaar na het ongeval in Tsjernobyl (1995) (22).



2.2.2. Blootstelling aan straling afkomstig van Fukushima

Op 21 maart 2011 werd Japan getroffen door een zware aardbeving, gevolgd door een tsunami. Ten gevolge hiervan ontstond een kernramp in de kerncentrale van de prefectuur Fukushima, waarbij er grote hoeveelheden radioactiviteit vrijkwamen.

Om de eventuele gevolgen in België op te volgen, werd het radiologisch toezichtsprogramma voor het Belgisch grondgebied geïntensifieerd vanaf 21 maart 2011 door de frequentie van bepaalde bemonsteringen van stofdeeltjes in de lucht en van de regen te verhogen en de meetresultaten sneller te bekomen. De resultaten, die regelmatig op de website werden gepubliceerd en werden meegedeeld aan de nationale en internationale autoriteiten, bevestigen dat er voor België geen significante radioactiviteit aanwezig is, gezien de metingen van de radioactiviteitsconcentraties over het algemeen op het niveau van de detectielimieten liggen. De residuele radioactieve deeltjes legden een afstand van ongeveer 10 000 kilometer af alvorens België te bereiken, enkele dagen na het begin van het ongeval. Wanneer de restanten van deze wolk België bereikten, was de concentratie aan radioactieve partikels zeer sterk afgenomen. Bij haar overtocht heeft de radioactieve wolk een gedeelte van haar radioactiviteit verloren (via radioactief verval, fall-out of radioactieve neerslag) en werd ze vermengd met niet-besmette lucht. Eind maart en begin april 2011 werden er lichte verhogingen van de concentratie aan jodium-131 (^{131}I) gemeten in België (van de grootteorde van 3 mBq/m³ in de lucht en 10 tot 15 Bq/m² voor de atmosferische afzetting), zonder enig gezondheidsrisico voor de werknemers, de bevolking of het leefmilieu (23).

2.3. Blootstelling ten gevolge van artificiële radioactiviteit in de voeding.

Binnen het kader van zijn opdrachten initieert het Agentschap programma's voor het radiologisch toezicht op het Belgisch grondgebied. Eén van deze programma's is gericht op de controle van de eetwaren bestemd voor de menselijke consumptie; dit gebeurt via jaarlijkse bemonsteringscampagnes waarbij eetwaren worden verzameld om hun natuurlijke en kunstmatige radioactiviteitsniveaus te analyseren. Een evaluatie van de resultaten van 2000 tot 2009 van deze staalnames kunnen terug gevonden worden in de syntheseverslagen van de gegevens m.b.t. de voedselketen (www.fanc.fgov.be → [Radiologisch toezicht in België - Syntheseverslag van de gegevens m.b.t. de voedselketen](#)), vanaf 2010 werd de evaluatie geïncorporeerd in de Syntheseverslagen van het Radiologisch toezicht in België (www.fanc.fgov.be → [publicaties](#) → [Radiologisch toezicht in België](#)).

De rapporten hebben betrekking op de radiologische kwaliteit van de voedselketen en behandelen vooral de radiologische toestand van de eetwaren zelf, van de melk en van het leidingwater. Hiervoor worden veel geconsumeerde groenten en de meest courant geconsumeerde fruitsoorten verzameld. Ook vlees afkomstig van markten en slachthuizen wordt geanalyseerd en vis afkomstig van vismarkten en vishandels wordt onderzocht.

De kunstmatige radioactiviteit van de eetwaren komt hoofdzakelijk van de eventuele aanwezigheid van splijttingsproducten met lange halveringstijd, zoals strontium-90 (^{90}Sr) en cesium-137 (^{137}Cs) die voornamelijk het gevolg zijn van atmosferische kernproeven die in de jaren '60 gehouden werden. In geval er zich een ongeval (zoals dat van Tsjernobyl of Fukushima) zou voordoen, zou een verhoging van de radioactieve besmetting op korte termijn voornamelijk te wijten zijn aan de eventuele aanwezigheid van jodium-131. Op lange termijn zouden cesium-137, cesium-134 (^{134}Cs), strontium-90 en eventueel rutenium-103 en -106 (^{103}Ru en ^{106}Ru), e.a. een verhoging van radioactieve besmetting veroorzaken.

Het FAVV (Federaal Agentschap voor de Veiligheid van de Voedselketen) heeft sinds 2000 beslist om haar controles op te voeren door bijkomende stalen van eetwaren te nemen, met als doel hun natuurlijke (^{40}K) en kunstmatige ($^{134,137}\text{Cs}$) radioactiviteitsniveaus te bepalen. Deze bijkomende controles viseren vooral geïmporteerde producten, dierlijke eetwaren van slachthuizen en grote distributiecentra. De stalen van het FAVV vormen een aanvulling bij deze die door het FANC worden genomen.

Globaal gezien, na 10-tallen jaren van observaties, bevestigt dit controleprogramma dat de invloed van de nucleaire installaties niet waarneembaar is via metingen van de radioactiviteit in de voedingswaren. Het toont ook aan dat de radiologische toestand van het "boodschappenmandje van de huisvrouw" in België uitstekend is (24). De radiologische impact ten gevolge van kunstmatige radionucliden in onze voeding of drinkwater is dus verwaarloosbaar.

2.4. Totale blootstelling ten gevolge van industriële toepassingen.

De totale populatiedosis ten gevolge van industriële toepassingen, is de som van de dosisbelasting ten gevolge van de radioactieve lozingen in de nucleaire sector, de kunstmatige radionucliden die in onze voeding terecht komen en de dosisbelasting ten gevolge van de nucleaire fall-out. Echter, aangezien de impact op de volledige Belgische bevolking steeds laag tot verwaarloosbaar blijkt, wordt voor de dosisbelasting ten gevolge van nucleaire instellingen voor volledigheid weergegeven aan de hand van een dosis van 0,01 mSv/jaar, naar analogie van de waarden in UNSCEAR 2008, Volume I (zie figuur 17) (2).

2.5. Blootstelling afkomstig uit beroepsactiviteiten

In 2013, werd een studie uitgevoerd op de dosimetrische gegevens van het grootste deel van de professioneel blootgestelde werknemers in België (38594). Tabel 8 toont de geschatte onderverdeling per sector van tewerkstelling voor de Belgische beroepshalve blootgestelde personen in 2013 (25).

Tabel 8: Een studie, uitgevoerd op de dosimetrische gegevens van het grootste deel van de professioneel blootgestelde werknemers in België in 2013 en hun onderverdeling per sector van tewerkstelling (25).

Sector	Aantal BBP	% BBP
Medisch sector	19019	49,3
Industrie	5808	15,0
Nucleaire sector	6545	17,0
Transport	98	0,3
Onderzoek & onderwijs	3455	9,0
Natuurlijke bronnen	3291	8,5
Andere	378	1,0
Alle opgevolgde werknemers	38594	100,0

De gemiddelde, jaarlijkse effectieve dosis (E_j) per opgevolgde werknemer bedraagt 0.28 mSv. Per werknemer met een meetbare dosis, is de gemiddelde, maandelijkse dosis 0.69 mSv (25). Tabel 9 toont de onderverdeling van de dosissen die door beroepshalve blootgestelde personen werden opgelopen in 2013 in België, voor zowel alle werknemers als deze uit de medische sector. De 13 werknemers die een dosis van meer dan 10mSv per jaar hebben opgelopen, zijn allen werkzaam in de medische sector, en meer bepaald in de interventionele radiologie of cardiologie. In de periode van 2010 tot 2015 waren er in totaal 10 overschrijdingen van de wettelijke dosislimiet van 20 mSv/12 glijdende maanden, allen interventionele radiologen of cardiologen (25).

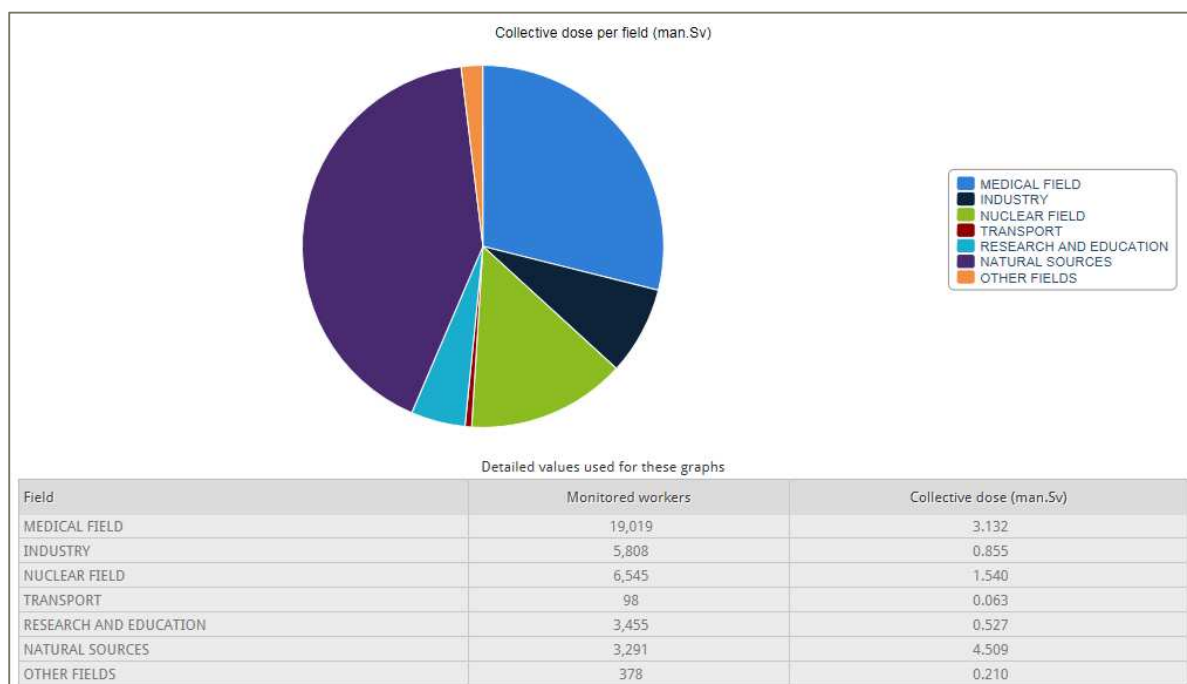
Tabel 9: De verdeling van de opgelopen dosissen van beroepshalve blootgestelde personen in 2013 in België (25).

Aantal BBP ^(a) (%)	$E_m^{(b)} < DL^{(c)}$	$DL \leq E_j^{(d)} < 1mSv$	$1mSv \leq E_i < 5mSv$	$5mSv \leq E_j < 10mSv$	$10mSv \leq E_i < 15mSv$	$15 \leq E_j < 20mSv$	$20mSv \leq E_j$
Alle sectoren	22914 (59,37)	11864 (30,74)	3682 (9,54)	121 (0,31)	12 (0,03)	1 (0,003)	0 (0,00)
Medische sector	12681 (35,92)	5709 (16,17)	550 (1,59)	66 (0,19)	12 (0,03)	1 (0,003)	0 (0,00)

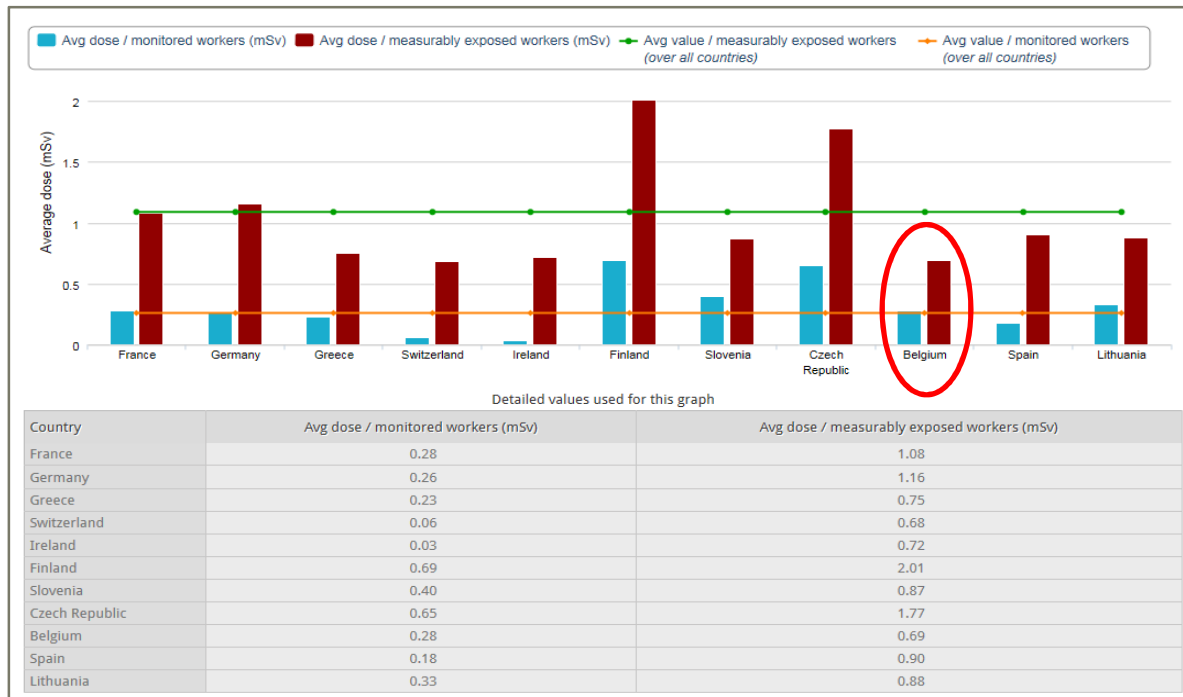
^(a)BBP = Beroepshalve blootgestelde personen
^(b) E_m = maandelijks effectieve dosis
^(c)DL = detectielimiet
^(d) E_i = effectieve dosis/jaar

Wat de dosis betreft, zien we in figuur 7 dat de werknemers die blootgesteld worden aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling, zoals luchtvaartpersoneel, instaan voor de hoogste dosisbelasting van alle beroepshalve blootgestelde personen (4,509 man.Sv), met daaropvolgend de werknemers uit de medische sector (3,132 man.Sv) (26). Figuur 8 toont de werkersdosis in verschillende Europese landen in 2013 (26). Hieruit blijkt dat de beroepshalve dosisbelasting in België als gemiddeld mag beschouwd worden.

Echter, slechts een fractie van de Belgische bevolking loopt beroepshalve een dosis op. In 2013 waren er 38594 beroepshalve blootgestelde personen op een totale Belgische bevolking van 11035948 (27), wat dus neerkomt op slechts 0,3% van de totale bevolking. Dit betekent dat de impact van de beroepshalve blootstellingen op de volledige Belgische bevolking nihil is.



Figuur 7: Verdeling van de dosis opgelopen door beroepshalve blootgestelde personen in 2013 in België (26).



2.6. Medische blootstellingen.

Van alle kunstmatige bronnen van ioniserende straling waaraan de mens wordt blootgesteld, vertegenwoordigt de medische blootstelling het grootste aandeel.

De blootstelling van de bevolking ten gevolge van de medische toepassingen worden geschat op basis van de gegevens van het Rijksinstituut voor Ziekte en Invaliditeit (RIZIV; <http://www.riziv.fgov.be/nl/>), welke bestaan uit de aantallen aangerekende prestaties per RIZIV-nummer. Aan elk RIZIV-nummer werd een dosiscoëfficiënt gelinkt om de dosisbelasting te kwantificeren.

De RIZIV gegevens bevatten enkel data van onderzoeken die worden terugbetaald door de mutualiteiten. Uit een steekproef uitgevoerd in 2005 (28) blijkt dat de getallen van het RIZIV een onderschatting maken van slechts enkele procenten (0,2-3%). De fout op de schatting van de aantal uitgevoerde onderzoeken is dus beperkt.

Een andere tekortkoming van de data is het gevolg van de omschrijving van de RIZIV-nummers. Waar bepaalde RIZIV-nummers duidelijk overeenstemmen met een welbepaalde procedure, zijn andere nummers meer algemeen omschreven wat een betrouwbare dosisschatting bemoeilijkt. De vroegere RIZIV-nomenclatuur van de nucleair geneeskundige onderzoeken bijvoorbeeld laat slechts een heel algemene inschatting van hun dosisbelasting toe. Sinds 2015 is deze nomenclatuur aangepast waardoor men in de toekomst meer gedetailleerde schattingen van de dosisbelasting zal kunnen uitvoeren. Bovendien zit er een grote variatie op de individuele blootstellingen voor éénzelfde onderzoek, de werkelijke variatie qua dosisbelasting voor een groep onderzoeken is uiteraard nog groter.

Daarnaast laten sommige RIZIV-nummers de keuze voor een gebruik van ioniserende straling of niet. Aangezien het onmogelijk is om te oordelen of men effectief gebruik maakt van ioniserende straling, worden deze nummers niet beschouwd voor de dosisbelasting van de Belgische populatie.

Gezien toepassingen van radiotherapie worden uitgevoerd voor curatieve doeleinden waarbij een hoge dosis wordt gebruikt voor behandeling van een maligniteit, wordt het niet opportuun bevonden om deze behandelingen mee in rekening te brengen bij de schatting van de dosis van de bevolking.

Binnen de medische, diagnostische blootstellingen zijn de radiologische onderzoeken verantwoordelijk voor het overgrote deel van de stralingsbelasting. De schatting van de bevolkingsdosis richt zich dus voornamelijk op het in kaart brengen van de diagnostische onderzoeken met behulp van x-straling.

2.6.1. Verdeling en aantallen

Er werd gewerkt met de beschikbare gegevens van 2013 en 2014. In relatie hiermee, aangezien men de blootstelling ten gevolge van medische blootstellingen uitdrukt in aantal per 1000 inwoners, werden de bevolkingsdata genomen van 2013 en 2014 (27).

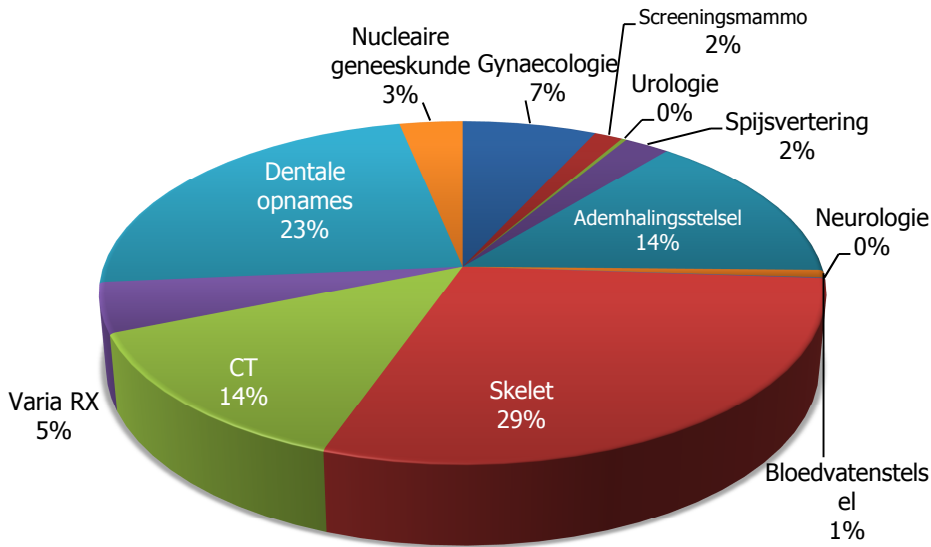
Hieronder kan men de verdeling van de aantallen voorgeschreven onderzoeken in 2013 en 2014 terugvinden (zie tabel 10 en figuur 9). In 2013 werd er een totaal van 15,6 miljoen diagnostische procedures voorgeschreven; in 2014 bedraagt dit aantal 15,1 miljoen.

In Radiation Protection 180: Medical Radiation Exposure of the European Population (29), zien we dat België één van de koplopers is binnen Europa qua aantallen onderzoeken voor wat betreft de radiologische, diagnostische toepassingen (zie figuur 10). Bovendien, toont figuur 11 (29) dat het aandeel hoge dosis procedures in België hoog ligt in vergelijking met de andere landen, wat uiteraard een impact heeft op de populatiedosis.

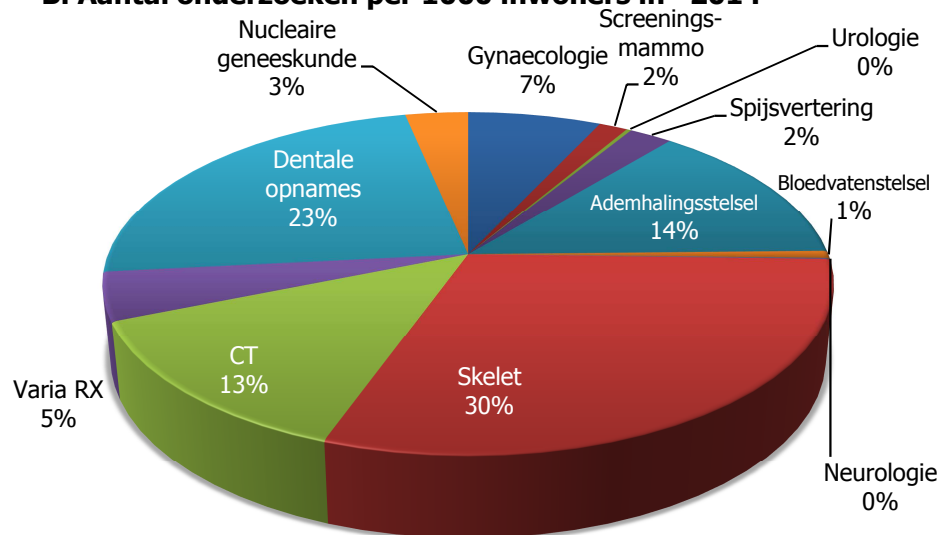
Tabel 10: De verdeling van de aantallen voorgeschreven diagnostische onderzoeken die gebruik maken van ioniserende straling, per 1000 Belgische burgers in 2013, 2014 en 2015.

Aantal voorgeschreven onderzoeken	per 1000 in 2013	per 1000 in 2014	per 1000 in 2015
Gynaecologie	96,78	95,40	93,70
Screeningsmammografie	20,56	20,43	20,94
Urologie	3,48	3,34	3,25
Spijsvertering	32,88	30,96	29,75
Ademhalingsstelsel	200,93	188,43	193,63
Bloedvatenstelsel	9,80	9,45	9,89
Neurologie	0,88	1,08	0,64
Skelet	411,33	412,10	407,61
CT	188,11	183,46	189,57
Varia RX	66,19	62,29	64,79
Dentaal	325,06	320,48	328,44
Nucleaire geneeskunde	45,55	44,97	44,71
Totaal:	1356,01	1327,43	1342,22

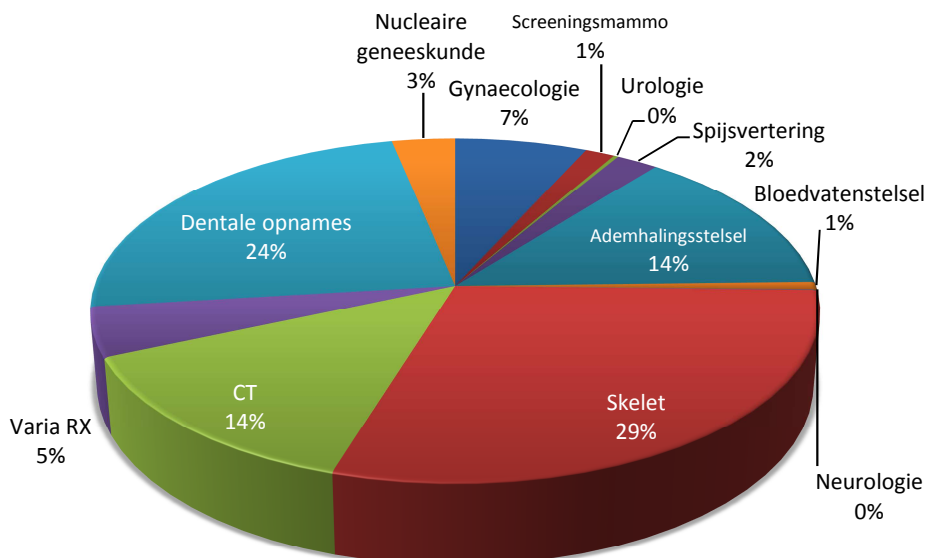
A. Aantal onderzoeken per 1000 inwoners in 2013



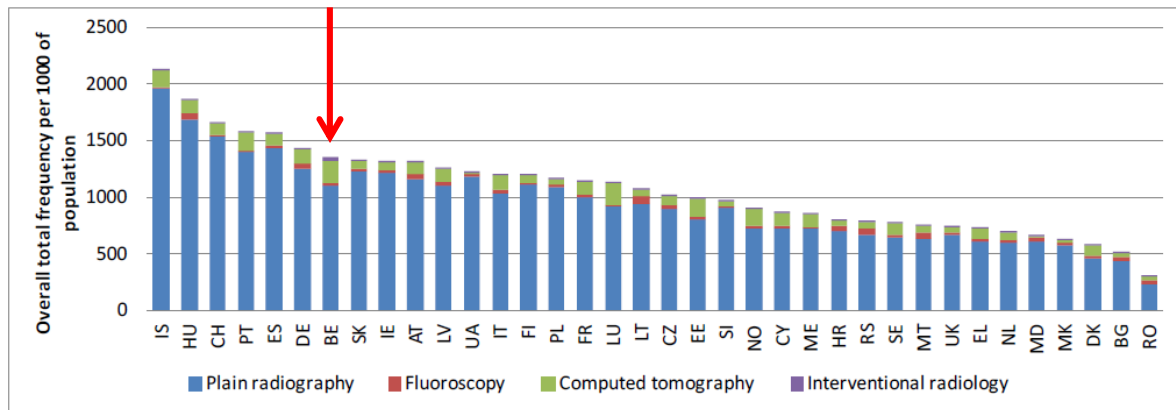
B. Aantal onderzoeken per 1000 inwoners in 2014



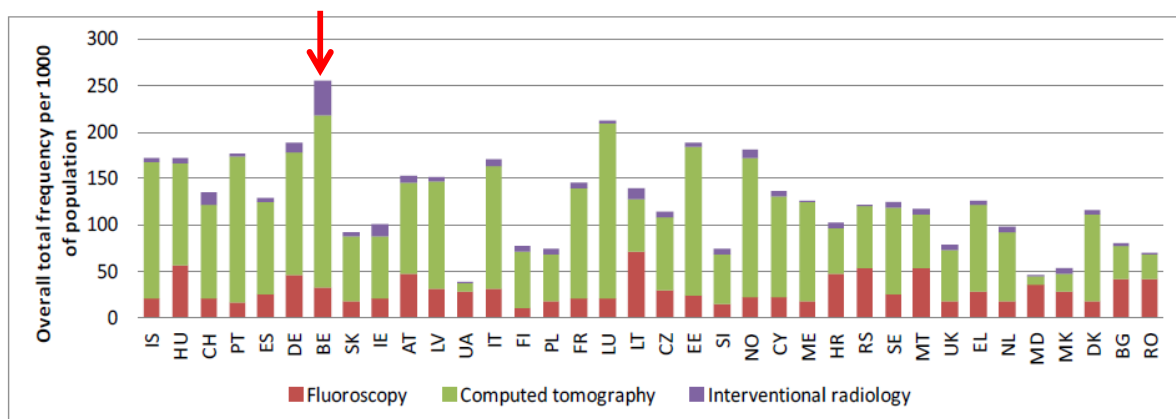
C. Aantal onderzoeken per 1000 inwoners in 2015.



Figuur 9: De percentuele verdeling van de aantallen voorgeschreven diagnostische onderzoeken die gebruik maken van ioniserende straling in 2013 (A), 2014 (B) en 2015 (C).

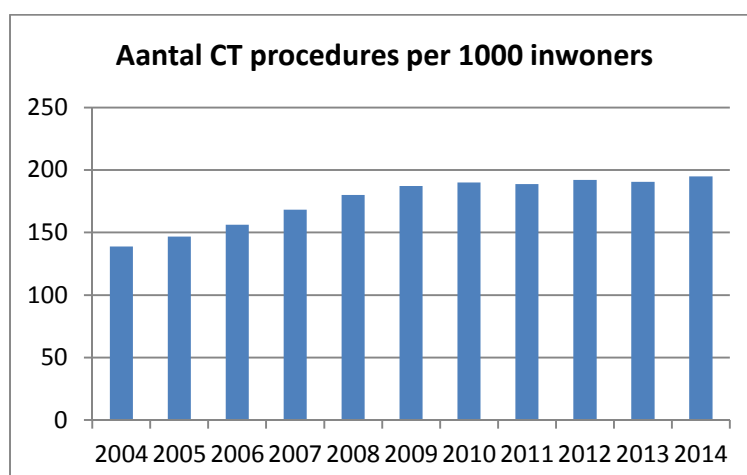


Figuur 10: Aantal diagnostische, radiologische onderzoeken per 1000 inwoners voor de verschillende landen. De relatieve bijdrage van de vier hoofdgroepen (conventionele radiologie, inclusief tandheelkunde; fluoroscopie; CT en interventionele radiologie) worden ook getoond (29).



Figuur 11: Aantal onderzoeken per 1000 inwoners voor de verschillende landen voor wat betreft fluoroscopie; CT en interventionele radiologie (29).

Over de jaren heen, is er een duidelijk stijgende trend voor wat betreft het aantal computertomografie (=CT) procedures. De laatste jaren is deze stijging echter minder uitgesproken (zie figuur 12, gebaseerd op de gegevens van het RIZIV).



Figuur 12: Aantal computertomografie onderzoeken per 1000 Belgen vanaf het jaar 2004 tot 2014.

2.6.2. Dosisbelasting ten gevolge van medische toepassingen

De opgelopen dosis per onderzoek werd geschat aan de hand van verschillende wetenschappelijke bronnen, waarvan de voornaamste de UNSCEAR rapporten zijn van 2008 (30), de Europese publicatie 'Radiation Protection 180 - Part 1: Medical Radiation Exposure of the European Population' (31), het Vlaams milieurapport 'Milieurapport Vlaanderen (MIRA) - Achtergronddocument, thema ioniserende straling' (2007) (32) en de studies van patiëntendosimetrie uitgevoerd door het FANC (33). Waar mogelijk, werden de dosiscoëfficiënten aangepast aan de meest actuele, Belgische waarden. In tabel 11 worden de dosiscoëfficiënten voor de CT onderzoeken weergegeven. Gezien de snelle technische evolutie van de toestellen, waarbij nieuwere toestellen vaak dezelfde beeldkwaliteit verkrijgen bij een lagere patiëntendosis, verwacht men een lichte daling van de dosisbelasting door de geleidelijke vernieuwing van het toestellenpark.

Tabel 11: Overzicht van de verschillende dosiscoëfficiënten (DC) uit de literatuur voor verschillende CT onderzoeken. De dosiscoëfficiënt die werd gebruikt die werden gebruikt voor de berekening van de is onderlijnd. Voor 2014 wordt ook het aantal voorgeschreven procedures en de dosis per hoofd vermeld.

Onderzoek	PatDosim 2015 (33)	MIRA 2007 (32)	UNSCEAR 2008 (30)	Mettler et al. 2008 (34)	PR 180 Part 1 (29)	DC (mSv)	2014 Aantal per 1000	2014 Jaarlijkse dosis per hoofd (mSv)
CT hoofd	<u>1,74</u>	1,5	2,4		1,3*	1,7	505594	0,079
CT rotsbeenderen	...	<u>1,7</u>	...		...	1,7	50435	0,008
CT hals	<u>2,37</u>	...	...	3,0	2,9*	2,4	63833	0,014
CT wervels	<u>2,37</u>	5,7	5,0	...	...	2,4	9925	0,002
CT ledematen	...	<u>1,5</u>	3,8	...	...	1,5	132971	0,019
CT thorax	<u>3,61</u>	...	4,14*	...	4,2*	3,6	264161	0,086
CT abdomen	<u>8,9</u>	...	11,3*	8,0	8,6*	8,9	457781	0,365
CT hals & thorax	...	...	<u>3,8</u>	...	...	3,8	8378	0,003
CT thorax & abdomen	<u>10,16</u>	12,7	...	...	14,8	10,2	142554	0,130
CT hals, thorax & adomen	...	...	...	6,0	<u>10,1*</u>	10,1	34378	0,031

* Data afkomstig uit de literatuur, specifiek voor België

In realiteit zit er echter binnen een welbepaald onderzoek een grote spreiding op de verschillende individuele doses. De spreiding is te wijten aan verschillende factoren, zoals:

- de gebruikte technologie (bv detectortechnologie, filtering,...)
- de instellingen van de toestellen (bv grootte van de regio die men in beeld brengt, beeldkwaliteit die men wenst te beogen,...)
- de karakteristieken van de patiënt (bv omtrek, gewicht, orgaangrootte,...)

Onderstaande tabel 12 en figuur 13 geven de schatting weer van de dosisbelasting van de Belgische bevolking, ten gevolge van medische toepassingen van ioniserende straling in mSv/jaar en per caput, wat betekent dat men een jaarlijkse dosis weergeeft voor de onbestaande 'gemiddelde Belg'. De werkelijke dosisbelasting van een individuele Belg zal uiteraard bepaald worden door de onderzoeken die hij of zij al dan niet heeft ondergaan.

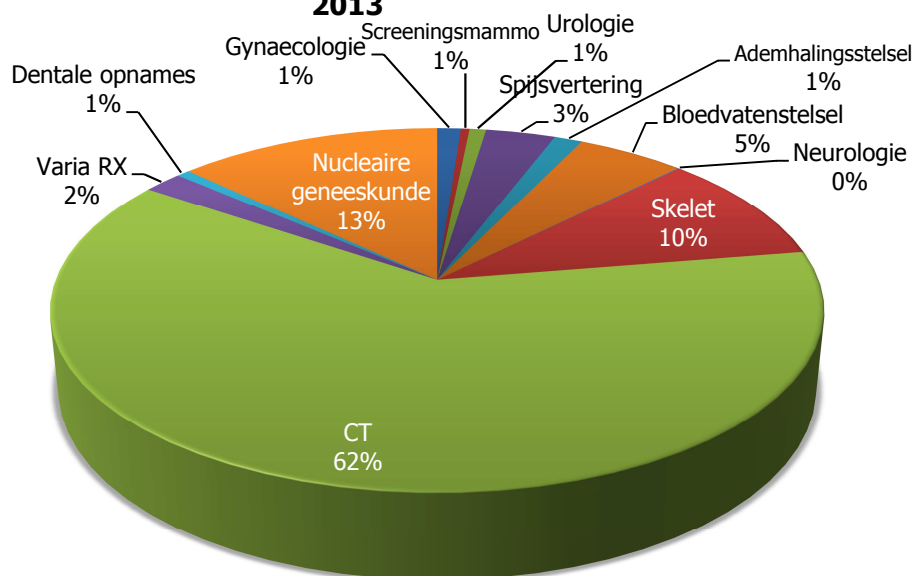
Computertomografie is duidelijk verantwoordelijk voor het grootste aandeel van de dosisbelasting, nl 62% van de dosis in 2013 en 63% in 2014 van de dosis ten gevolge van medische blootstellingen (zie figuur 13). Dit terwijl het aantal CT onderzoeken slechts instaat voor 14% (2013 en 2014) van alle voorgeschreven onderzoeken (zie figuur 9).

Omgekeerd stellen we vast dat conventionele x-stralen foto's van het skelet en dentale opnames in grote aantallen worden voorgeschreven; 29% (2013) en 30% (2014) van de voorgeschreven onderzoeken zijn conventionele skelet foto's en 23% (2013 en 2014) van alle procedures zijn dentale opnames (zie figuur 9). Toch hebben zij slechts een beperkte bijdrage aan de totale dosisbelasting. Conventionele x-stralen foto's van het skelet zijn verantwoordelijk voor 10% van de totale dosisbelasting, dentale opnames vormen slechts 1% van de totale dosisbelasting (zie figuur 13).

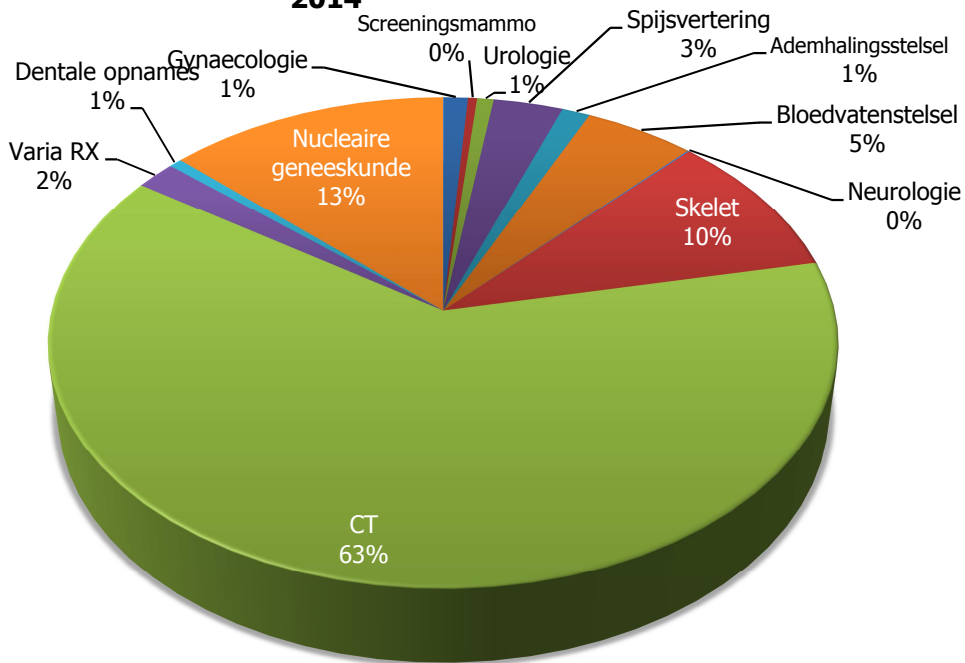
Tabel 12: De verdeling van de gemiddelde jaarlijkse dosisbelasting ten gevolge van een medische blootstelling aan ioniserende straling, per hoofd van de Belgische bevolking in 2013, 2014 en 2015.

Dosis per caput in mSv/jaar.	2013	2014	2015
Gynaecologie	0,018	0,017	0,017
Screeningsmammografie	0,006	0,006	0,006
Urologie	0,012	0,012	0,012
Spijsvertering	0,052	0,049	0,046
Ademhalingsstelsel	0,021	0,020	0,020
Bloedvatenstelsel	0,080	0,077	0,080
Neurologie	0,001	0,001	0,001
Skelet	0,149	0,144	0,138
CT	0,936	0,937	0,978
Varia RX	0,029	0,028	0,029
Dentaal	0,010	0,009	0,009
Nucleaire geneeskunde	0,195	0,195	0,194
Totaal:	1,508	1,494	1,529

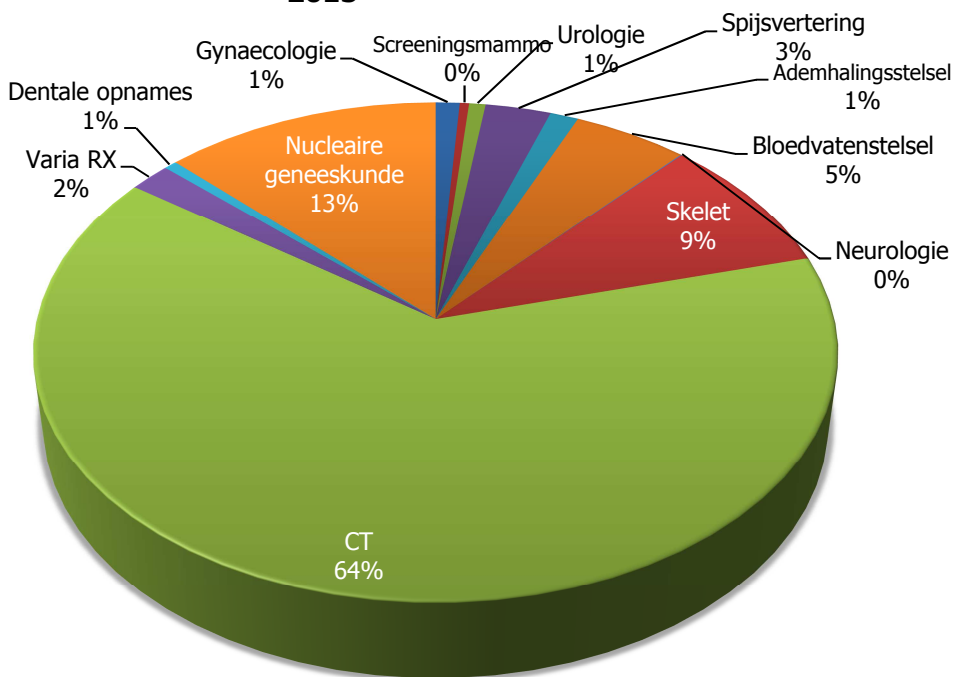
A. Gemiddelde individuele, effectieve dosis in België in 2013



B. Gemiddelde individuele, effectieve dosis in België in 2014



C. Gemiddelde individuele, effectieve dosis in België in 2015



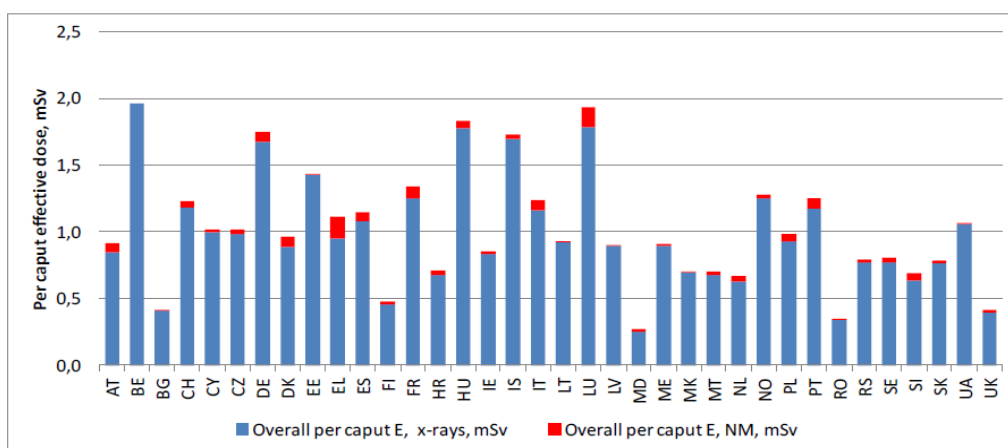
Zoals hierboven reeds werd vermeld, introduceert het gebruik van een dosiscoëfficiënt een zekere variabiliteit en onzekerheid in de berekeningen van de dosisbelasting. Op basis van verschillende gegevens uit enerzijds de literatuur en anderzijds de resultaten van de studies van patiëntendosimetrie uitgevoerd door het FANC (33), wordt er een 'best estimate' gekozen. Echter, om de variabiliteit ten gevolge van de gekozen dosiscoëfficiënt te illustreren, werd de totale dosisbelasting ook berekend met laagste en de hoogste dosiscoëfficiënt. Deze waarden geven een idee van de complexiteit en de onzekerheden waaraan een evaluatie van de effectieve populatiedosis als gevolg van medische blootstelling onderhevig is.

Tabel 13: De spreiding van medische, diagnostische dosisbelasting per hoofd in België, ten gevolge van het gebruik van verschillende dosiscoëfficiënten, nl. de beste schatting, de laagste en hoogste.

Dosiscoëfficiënt (=DC)	2013 (mSv/jaar)	2014 (mSv/jaar)	2015 (mSv/jaar)
Laagste DC:	1,14	1,11	1,14
Hoogste DC:	2,24	2,23	2,29
Beste schatting DC:	1,51	1,49	1,53

In vergelijking met de populatiedosis van 2010, is de medische blootstelling gedaald van 2,3 mSv/jaar in 2010 naar ongeveer 1,5 mSv/jaar in 2013 en 2014. Hoewel dit een significante daling lijkt van de dosisbelasting, is deze vooral het gevolg van een aanpassing van de RIZIV-nomenclatuur in 2010. De nomenclatuur van de CT onderzoeken werd namelijk verfijnd door een meer algemene omschrijving die zowel een CT van de hals, de thorax, het abdomen of een combinatie ervan kon omvatten, te vervangen door afzonderlijke RIZIV nummers die duidelijk weergeven welke regio van het lichaam in beeld wordt gebracht. Dit laat uiteraard een correctere inschatting van de dosisbelasting toe. Daarnaast werden ook de dosiscoëfficiënten geactualiseerd, wat eveneens een verlaging van de geschatte dosisbelasting veroorzaakt.

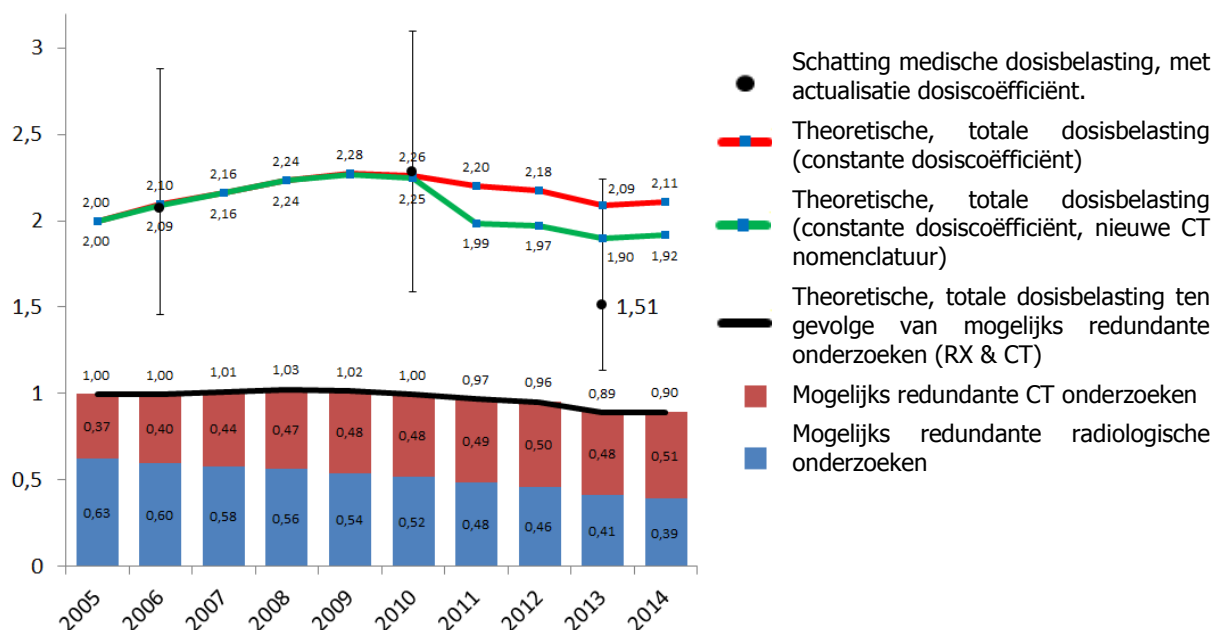
De laatste vergelijking op Europees niveau toont (29), dat de Belgische medische blootstelling hoog is in vergelijking met andere landen (figuur 14). Figuur 15 geeft een overzicht van de relatieve, theoretische dosisbelasting ten gevolge van diagnostische medische toepassingen in België. Voor het bepalen van de curves (rood, groen en zwart), werd een vaste dosiscoëfficiënt gebruikt om de evolutie van de theoretische, effectieve dosis doorheen de jaren op te volgen. Deze theoretische dosisbelasting laat echter enkel een kwalitatieve analyse toe, aangezien de werkelijk gebruikte patiëntendosis doorheen de jaren verlaagt als gevolg van optimalisatie enerzijds en door een geleidelijke vernieuwing van de radiologische toestellen anderzijds.



Figuur 14: Europese populatiedosis ten gevolge van medische beeldvorming (België: gegevens 2006) (29).

De rode curve toont de totale, theoretische dosis, waarbij de oude CT nomenclatuur wordt gebruikt voor het bepalen van de theoretische dosisbelasting, terwijl de groene curve gebruik maakt van de nieuwe CT nomenclatuur. Het invoeren van de nieuwe CT nomenclatuur veroorzaakt een duidelijke verlaging van ongeveer 10% van de theoretische dosisbelasting. De zwarte punten geven de best

mogelijke inschattingen van de medische dosisbelasting weer, met actualisatie van de gebruikte dosisfactoren. De foutenvlaggen hierbij, geven geen statistische fouten weer, zij komen overeen met de range van medische dosisbelasting, gebruik makend van de laagste en hoogste dosiscoëfficiënt, zoals hierboven beschreven (zie tabel 13).



Figuur 15: De evolutie van de theoretische dosisbelasting ten gevolge van diagnostische toepassingen in België (mSv/jaar). De foutenvlaggen bij de schatting van de medische blootstelling met actualisatie van de dosiscoëfficiënt, is de range van medische dosisbelasting, gebruik makend van de laagste en hoogste dosisfactor.

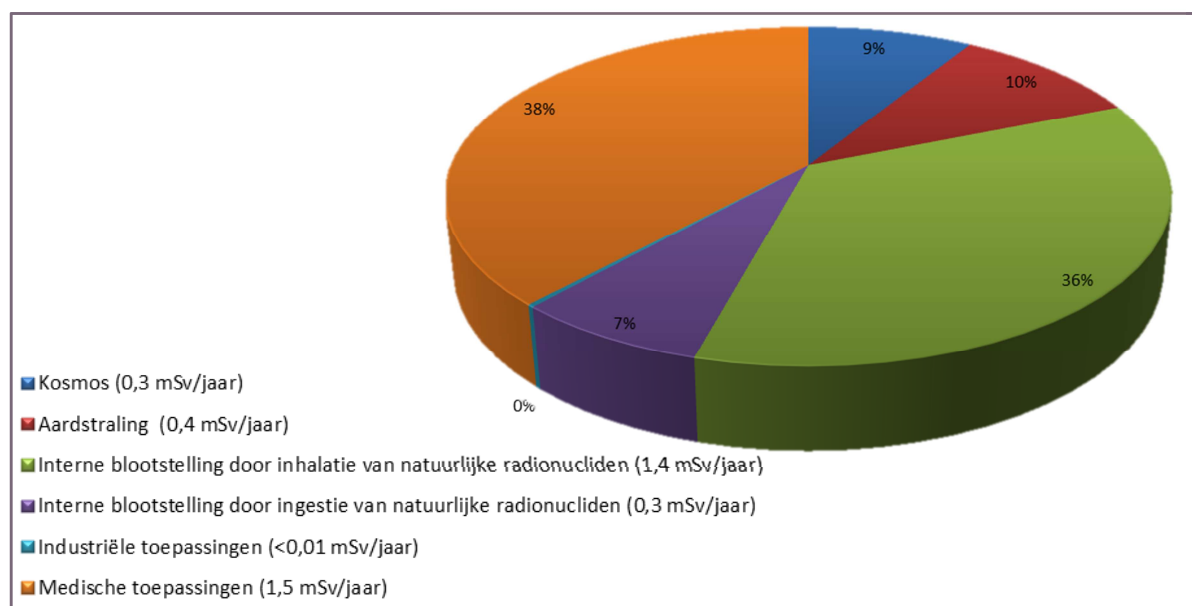
De vastgestelde verlaging van de medische dosisbelasting betekent echter niet dat medische beeldvormingstechnieken op een correcte manier worden gebruikt. In het kader van een sensibilisatiecampagne van het RIZIV in 2010 over rationeel voorschrijven van medische beeldvorming, werden verschillende onderzoeken met zeer beperkte indicaties geïdentificeerd (35). De zwarte curve in figuur 14 toont de dalende evolutie van de theoretische dosisbelasting ten gevolge van deze mogelijks overbodige onderzoeken. Echter, de waargenomen daling van de theoretische dosis door redundante onderzoeken (-13%) is niet zo groot als verwacht en laat nog ruimte tot verbetering. Bovendien zien we dat vooral de mogelijks overbodige radiologische onderzoeken dalen, terwijl de dosis ten gevolge van eventueel redundante CT onderzoeken blijft stijgen.

C. De dosisbelasting van de Belgische populatie ten gevolge van een blootstelling aan natuurlijke en kunstmatige ioniserende straling in 2015.

Bovenstaande informatie geeft een gemiddelde jaarlijkse dosisbelasting van 4 mSv per gemiddelde Belg in 2015. Samengevat zien we volgende dosissen ten gevolge van natuurlijke en kunstmatige blootstellingen aan ioniserende straling:

Tabel 14: Inschatting van de dosisbelasting van de gemiddelde Belg ten gevolge van natuurlijke en kunstmatige ioniserende straling in 2015.

Dosisbelasting per caput in 2015 (mSv/jaar).	
Kosmos	
Kosmische straling:	0,310
Cosmogene radionucliden:	0,012
vliegvakantie en vakantie op grotere hoogten:	0,025
Totale dosisbelasting ten gevolge van kosmische straling:	0,347
Aardstraling	0,400
Interne blootstelling door inhalatie van natuurlijke radionucliden	
Blootstelling aan radon en vervalproducten via inhalatie:	1,254
Blootstelling aan radongas via inhalatie:	0,058
Blootstelling Thoron en vervalproducten via inhalatie:	0,091
Totale blootstelling ten gevolge van inhalatie natuurlijke radionucliden:	1,403
Interne blootstelling door ingestie van natuurlijke radionucliden	
Blootstelling aan radongas via ingestie:	0,002
Natuurlijke radionucliden, andere dan Radon en Thoron.	0,290
Totale blootstelling ten gevolge van ingestie natuurlijke radionucliden:	0,292
Industriële toepassingen	<0,01
Medische toepassingen	1,529
Totaal:	3,981



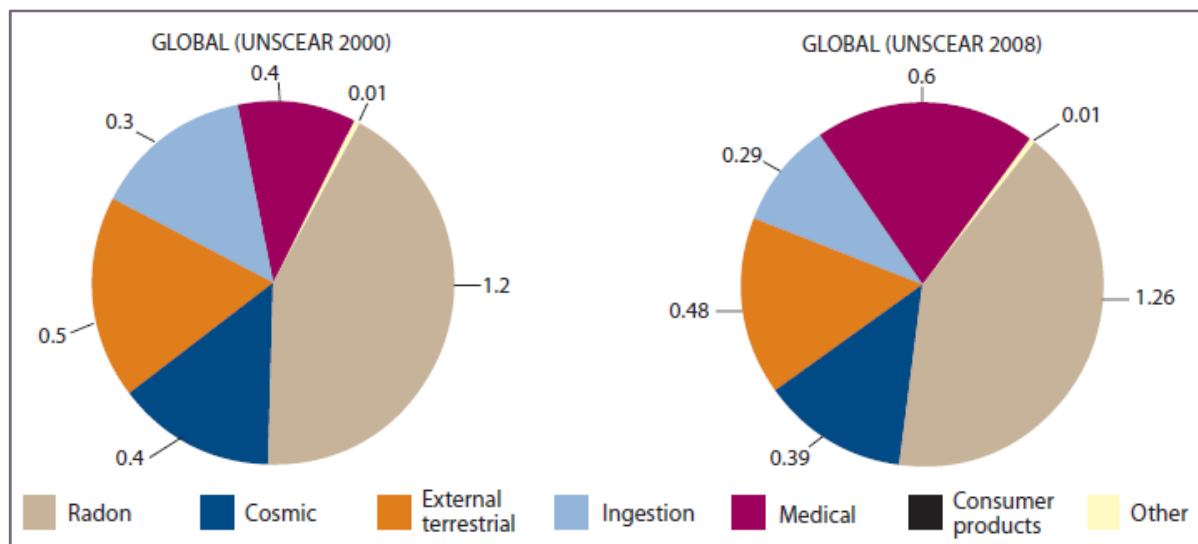
D. Evolutie van de Belgische populatiedosis.

In het verleden werd de Belgische bevolkingsdosis op verschillende tijdstippen bepaald (Tabel 14). In 2001 en 2006 werden deze uitgevoerd in het kader van het MIRA rapport (Milieurapport Vlaanderen) in opdracht van de Vlaamse Milieumaatschappij.

Evoluties in de populatiedosis ten gevolge van natuurlijke blootstellingen zijn vooral het gevolg van een actualisatie van de blootstellingsdata aan Radon en Thoron. De evaluaties van 2001 en 2006 vertrekken van een gemiddelde, Belgische radonconcentratie binnenshuis van 48 Bq/m³ (6, 37). Voor de evaluatie van 2010 werd een gemiddelde concentratie van 59 Bq/m³ (36), terwijl de evaluatie voor 2015 gebruik maakt van 46 Bq/m³ de gemiddelde concentratie, gewogen voor de bevolkingsdichtheid (12).

Tabel 15: Populatiedosis per caput in mSv/jaar.

Populatiedosis per caput in mSv/jaar	2001 (5)	2006 (37)	2010 (1)	2015
Natuurlijke blootstelling				
Kosmische straling	0,4	0,4	0,3	0,3
Aardstraling	0,4	0,4	0,4	0,4
Inhalatie van natuurlijke radionucliden (Radon en Thoron)	1,5	1,5	1,7	1,4
Ingestie van natuurlijke radionucliden	0,3	0,3	0,3	0,3
Totaal natuurlijk	2,5	2,5	2,8	2,4
Kunstmatige blootstellingen				
Medische blootstellingen	2,0	2,1	2,3	1,5
Andere kunstmatige blootstellingen	< 0,05	< 0,05	< 0,01	< 0,01
Totaal kunstmatig	2,0	2,1	2,3	1,5
Totaal	4,5	4,6	5,1	4,0



Figuur 17: Schatting van de bijdragen aan wereldwijde gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling van het publiek uit verschillende bronnen (2).

De evolutie van de kunstmatige blootstelling wordt bepaald door de medische blootstellingen ten gevolge van diagnostische, medische beeldvorming. Figuur 17 toont de wereldwijde blootstelling aan ioniserende straling in 2000 en 2008 (2). Wanneer men de dosis ten gevolge van medische applicaties vergelijkt met de Belgische waarden, blijkt dat in België inderdaad veel gebruik wordt gemaakt van medische blootstellingen. Waar men tot 2010 in België een stijgende trend zag voor wat betreft de medische blootstelling, zien we een gedaalde dosisbelasting in 2015. Dit is enerzijds het gevolg van een vernieuwde RIZIV-nomenclatuur voor CT onderzoeken die een betere inschatting van de medische dosisbelasting toelaat. Anderzijds daalt de patiëntendosis door optimalisatie en een geleidelijke vernieuwing van het toestellenpark. Er wordt echter nog steeds een overconsumptie van de medische beeldvorming gezien (zie figuur 15). Blijvende inspanningen omtrent sensibilisatie en optimalisatie van de medische dosisbelasting zijn dus nodig om de populatiedosis verder te doen dalen.

Bibliografie

1. FANC, Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle. De gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling in België. [Online] <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/gemiddelde-blootstelling-aan-ioniserende-stralingen-in-belgie/963.aspx>.
2. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *2008 Report to the General Assembly, Annex B: Exposures of the public and workers from various sources of radiation*. 2008.
3. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.. *2000 Report to the General Assembly, Volume I: Sources, Annex A, Dose Assessment Methodologies, 63 pages*. 2000.
4. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.. *2000 Report to the General Assembly, Volume I: Sources, Annex B, Exposures from Natural Radiation Sources*. 2000.
5. *Exposure of the Belgian population to ionizing radiation*. Vanmarcke, H, et al., et al. 2004, Proc. IRPA 11 congress May 23-28, Madrid, Spain.
6. Watson S., Jones A., Oatway W., Hughes J. *Ionising radiation exposure of the UK population: 2005 review*. 2005.
7. Gillard J., Flémal J.M., Deworm J.P., Slegers W. *Measurement of the natural radiation of the Belgian territory*. sl : Report of SCK•CEN, BLG 607, 1988.
8. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: Informatiedossier voor het jaar 2015*. 2016.
9. *TELERAD: the radiological surveillance network and early warning system in Belgium*. Sonck M, Desmedt M, Claes J, Sombre L. 2008. IRPA 12 Buenos Aires (FP 0691).
10. Sombrière L, Claes J, Bouchonville M. *Radiologisch toezicht in België: syntheseverslag 2014*. FANC . september 2015.
11. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *UNSCEAR 2006, Report to the General Assembly - Annex E: Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces*. 2006.
12. council, Superior Health. *Advisory report of the superior health council No. 8794: Indoor air quality in Belgium*. In Press.
13. ICRP, International commission on radiological protection. *ICRP Publication 65 - Protection against Radon-222 at Home and at Work. Ann. ICRP 23 (2)*. 1993.
14. ICRP, International Commission on Radiological Protection. *ICRP Publication 103 - The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. ICRP 37 (2-4)*. 2007.
15. ICRP, International commission on radiological protection. *ICRP Publication 115 - Lung cancer risk from radon and statement on radon. Ann. ICRP 40(1), 2010*.
16. *The application of radon measurements in the radon action plan in Belgium*. . Dehandschutter B., Noel E., Pépin S., Pofijn A., Sonck M. 1, 2009, Annales de l'Association belge de Radioprotection, Vol. 34, pp. 89-110.
17. ARBIS: koninklijk besluit van 20 juli 2001 houdende algemeen reglement op de bescherming van de bevolking, van de werknemers en het leefmilieu tegen het gevaar van de ioniserende stralingen.
18. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: informatiedossier voor het jaar 2011*. 2012.
19. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle.. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: Informatiedossier voor het jaar 2012*. 2013.
20. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle.. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: Informatiedossier voor het jaar 2013*. 2014.
21. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. *Radioactieve lozingen van de nucleaire inrichtingen van klasse I: Informatiedossier voor het jaar 2014*. 2015.
22. *Survey of the 137Cs contamination in Belgium by in-situ gamma spectrometry, a decade after the Chernobyl accident*. Uyttenhove J, Pommé S, Van Wayenberge B, Hardeman F, Buysse J, Culot J-P. 4, 1997, Health Physics, Vol. 37, pp. 644-646.
23. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. *FUKUSHIMA - één jaar later*. 2012.
24. FANC, Federal agency for nuclear control. *Radiologisch toezicht in België - Syntheseverslag 2014*. 2015.
25. Vanaudenhove, T. Personal communication. 2015.

26. ESOREX. ESOREX Platform: European Platform for Occupational Radiation Exposure. [Online] https://esorex-platform.org/charts/g2?field_country_target_id=11548&field_year_value=2013&=Apply.
27. National Institute for Statistics - Belstat. [Online] 2016. <http://statbel.fgov.be>.
28. Van Dam, Bosmans, Mol, De Geest, Wambersie. *Inventaris van de bevolkingsdosis tengevolge van radiologische activiteiten, verslag werkjaar 2005*. 2005.
29. European Commission. *Radiation Protection 180: Medical Radiation Exposure of the European Population*. 2014.
30. UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *2008 Report to the General Assembly, Volume I: Sources, Annex A, Medical radiation exposures*. 2008.
31. Commission, European. *Radiation Protection 180 - Part 1: Medical Radiation Exposure of the European Population*. 2014.
32. milieumaatschappij, Vlaamse. *Milieurapport Vlaanderen (MIRA) - Achtergronddocument, thema ioniserende straling*. 2007.
33. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. Patiëntendosimetrie in radiologie. [Online] <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/patientendosimetrie-in-radiologie/1196.aspx>.
34. *Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: a catalog*. Mettler FA Jr, Huda W, Yoshizumi TT, Mahesh M. 1, 2008, Radiology, Vol. 248, pp. 254-63.
35. RIZIV, Rijksinstituut voor Ziekte- en Invaliditeitsverzekering. *Medische Beeldvorming: rationeel voorschrijven: Sensibilisering voor het blootstellingsrisico aan ioniserende straling - Een selectie van onderzoeken met zeer beperkte indicaties*. 2010.
36. *The application of radon measurements in the radon action plan in Belgium*. Dehandschutter B, Noel E, Pépin S, Poffijn A, Sonck M. 1, 2009, Annales de l'Association belge de Radioprotection, Vol. 34, pp. 89-110.
37. *Ionizing radiation exposure of the Belgian population in 2006*. Vanmarcke H., Hilde B., Gilbert E. 2010. Proceedings of the Third European IRPA congress, Helsinki, Finland, 14-18 June 2010 .
38. *Stimulating radon safe building in radon prone areas by detailed scale radon hazard mapping*. Poffijn A. Dehandschutter B., Noel E., Pépin S., Sonck M. 2009. AARST 2009 conference, St. Louis MO.
39. FANC, Federaal agentschap voor nucleaire controle. Persoonlijke communicatie op basis van verwerking van de gegevens in de database professionele blootstellingen.
40. FANC. Radon in België. [Online] [Citaat van: 21 March 2017.] <http://fanc.fgov.be/nl/page/646.aspx>.
41. *Human Population Exposure to Cosmic Radiation*. Bouville A, Lowder W.M. 1998, Radiation Protection & Dosimetry, Vol. 24, pp. 293-299.

Overzicht van de figuren.

Figuur 1: De gemiddelde blootstelling aan ioniserende stralingen in België in 2010.	3
Figuur 2: Isodose curve TELERAD metingen 2014.	8
Figuur 3: De geografische verdeling van de blootstelling aan radon in België (41). De radon gevoelige zone is aangeduid in oranje en rood.	9
Figuur 4: De nucleaire inrichtingen met een klasse I vergunning in België (9).	13
Figuur 5: De blootstellingswegen voor het publiek (9).	14
Figuur 6: Cesium-137 depositie 10 jaar na het ongeval in Tsjernobyl (1995) (23).	15
Figuur 7: Verdeling van de dosis opgelopen door beroepshalve blootgestelde personen in 2013 in België (27).	18
Figuur 8: De werkersdosis in verschillende Europese landen in 2013 (27).	19
Figuur 9: De procentuele verdeling van de aantallen voorgeschreven diagnostische onderzoeken die gebruik maken van ioniserende straling in 2013 (A), 2014 (B) en 2015 (C).	21
Figuur 10: Aantal diagnostische, radiologische onderzoeken per 1000 inwoners voor de verschillende landen. De relatieve bijdrage van de vier hoofdgroepen (conventionele radiologie, inclusief tandheelkunde; fluoroscopie; CT en interventionele radiologie) worden ook getoond (30).	22
Figuur 11: Aantal onderzoeken per 1000 inwoners voor de verschillende landen voor wat betreft fluoroscopie; CT en interventionele radiologie (30).	22
Figuur 12: Aantal computertomografie onderzoeken per 1000 Belgen vanaf het jaar 2004 tot 2014.	22
Figuur 13: De procentuele verdeling van de gemiddelde jaarlijkse dosisbelasting ten gevolge van een medische blootstelling aan ioniserende straling, per hoofd van de Belgische bevolking in 2013 (A), 2014 (B) en 2015 (C).	24
Figuur 14: Europese populatiedosis ten gevolge van medische beeldvorming (België: gegevens 2006) (30).	26
Figuur 15: De evolutie van de theoretische dosisbelasting ten gevolge van diagnostische toepassingen in België (mSv/jaar). De foutenvlaggen bij de schatting van de medische blootstelling met actualisatie van de dosiscoëfficiënt, is de range van medische dosisbelasting, gebruik makend van de laagste en hoogste dosisfactor.	27
Figuur 16: Inschatting van de dosisbelasting van de gemiddelde Belg ten gevolge ioniserende straling in 2015 (totale dosis = 4 mSv/jaar).	28
Figuur 17: Schatting van de bijdragen aan wereldwijde gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling van het publiek uit verschillende bronnen (2).	29