Straling in het binnenmilieu: bronnen en maatregelen

rivm
Rijksinstituut
voor **Volksgezondheid**
en Milieu

Straling in het binnenmilieu:

bronnen en maatregelen

Auteur: Johan Lembrechts, RIVM

Opdrachtgever: Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

Coördinatie STRATEGO-projectenprogramma:
Nederlandse organisatie voor energie en milieu

Fotografie: Hollandse Hoogte pagina 9, 17, 22, 27, 29, 35, 37, voorzijde omslag
Ton Borsboom pagina 5, 33

Vormgeving: Anne-Claire Alta, BNO, Studio RIVM

Druk: Wilco bv, Amersfoort

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
Postbus 1
3720 BA Bilthoven

Tel.: 030 - 274 91 11
fax: 030 - 274 29 71

Inhoud

1	Inleiding	5
2	Straling in het binnenmilieu: probleemstelling	7
3	Voorgeschiedenis	9
4	Externe straling	11
4.1	Bodem	12
4.2	Brandstoffen, mineralen en reststoffen	12
4.3	Bouwmaterialen	13
4.4	Externe straling	14
5	Ontwijken van radon uit materialen	17
5.1	Bodem	17
5.2	Bouwmaterialen	18
6	Verspreiding van radon in de woning	21
6.1	Te beantwoorden vragen	21
6.2	Hoe hoog zijn de concentraties?	22
6.3	Waar komt het radon vandaan?	23
6.4	Mogelijke maatregelen	24
7	Radondochters en aërosolen	27
8	Woningbouw versus utiliteitsbouw	29
9	Abstraheren	31
10	Gezondheidsrisico's	33
11	Effectiviteit van beleid in het buitenland	35
12	Samenvatting en conclusies	37
Gebruikte afkortingen		39
Literatuur		41

1 Inleiding

Straling in het binnenmilieu kon in de voorbije decennia bogen op een voortdurend groeiende belangstelling van onderzoekers en stralingsbeschermers. Uitvoerig is gediscussieerd over de wenselijkheid en uitwerking van beleid op dit gebied, niet alleen in Nederland maar ook daarbuiten. Over de nieuwste wetenschappelijk inzichten is bij herhaling verslag gedaan in overzichtsrapporten, zowel nationaal als internationaal. Voor Nederland gebeurde dit voor het laatst in 1992. Aanleiding was toen de afronding van het onderzoeksprogramma 'Reguleerbare vormen van natuurlijke achtergrondstraling' dat het Ministerie van VROM financierde.

Het nu voorliggende overzicht beoogt het sinds 1992 uitgevoerde Nederlandse onderzoek naar straling in het binnenmilieu samen te vatten, aangevuld met enkele relevante internationale highlights. In deze periode stonden het effect van bouwmaterialen en van aanpassingen in bouwwijze op blootstelling aan straling in het binnenmilieu en de haalbaarheid van dergelijke aanpassingen centraal. De potentie van maatregelen is dan ook het ultieme thema van dit overzicht, waarbij het accent ligt op maatregelen van belang voor de Nederlandse situatie en voor het actuele standpunt van de overheid (*zie tekstbox 1*). Het hierna beschreven onderzoek is voor een belangrijk deel uitgevoerd in het kader van het programma 'Straling ten aanzien van de gebouwde omgeving' (STRATEGO) waarvan het Ministerie van VROM eveneens initiatiefnemer was en Novem (Nederlandse Organisatie voor Energie en Milieu) wederom de uitvoering van het projectenprogramma coördineerde. Het overzicht is dan ook enigszins te beschouwen als een samenvatting van dit programma. Het is bedoeld als referentiepunt voor betrokkenen bij het evalueren en vooruitblikken. Voor gemeenten, producenten van bouwmaterialen, woningbouwverenigingen en anderen die met mogelijk beleid op dit terrein worden geconfronteerd, wil het achtergrondinformatie bieden.

Tekstbox 1
Overheidsstandpunt straling in het binnenmilieu

Het overheidstandpunt aangaande straling in het binnenmilieu is verwoord in een brief van 19 juni 1997 van de toenmalig staatssecretaris voor de Volkshuisvesting, drs. D.K.J. Tommel, aan de Tweede Kamer, waarin vooral wordt ingegaan op de situatie met betrekking tot radon, de belangrijkste bron van straling in het binnenmilieu. De staatssecretaris stelt: 'De gemiddelde radonconcentratie in Nederland is in vergelijking met de ons omringende landen relatief gunstig. ... Het radonbeleid is er dan ook op gericht om deze gunstige situatie, rekening houdend met kosten en ander beleid, zo veel als mogelijk te behouden. De beste mogelijkheid daartoe biedt de ontwikkeling van een stralings-prestatie-norm op het niveau van verblijfsgebied/-ruimte ...'. (De stralings-prestatie-norm komt aan de orde in hoofdstuk 9).

Een evenwichtig antwoord op de hoofdvraag ‘Hoe beheers ik de blootstelling aan straling binnenshuis?’ is niet denkbaar zonder antwoord op vragen zoals ‘Welke straling?', 'Waar komt ze vandaan?', 'Hoe worden we blootgesteld?', en 'Welke is de mogelijke gezondheidsschade?’. In wat volgt worden achtereenvolgens de stralingsbronnen, de vormen van blootstelling aan deze bronnen en de effecten van blootstelling besproken. Hieraan wordt telkens de vraag gekoppeld in hoeverre het betreffende onderdeel van de keten bron-blootstelling-effect ook is te beïnvloeden.

Wat mag de lezer verwachten? In eerste instantie worden het probleem, straling in het binnenmilieu en de hieraan verbonden risico’s, in algemene termen voorgesteld. Daarna volgt een samenvatting van wat aan de hier gerapporteerde onderzoeksperiode voorafging. Pas dan wordt stap voor stap de wijze waarop we aan straling worden blootgesteld geanalyseerd en aangegeven welke de mogelijke aangrijpingspunten voor maatregelen zijn. Aanvullende hoofdstukken beschrijven de mogelijke gezondheidseffecten en in hoeverre men er in andere landen in slaagt de blootstelling aan straling binnenshuis te reduceren.

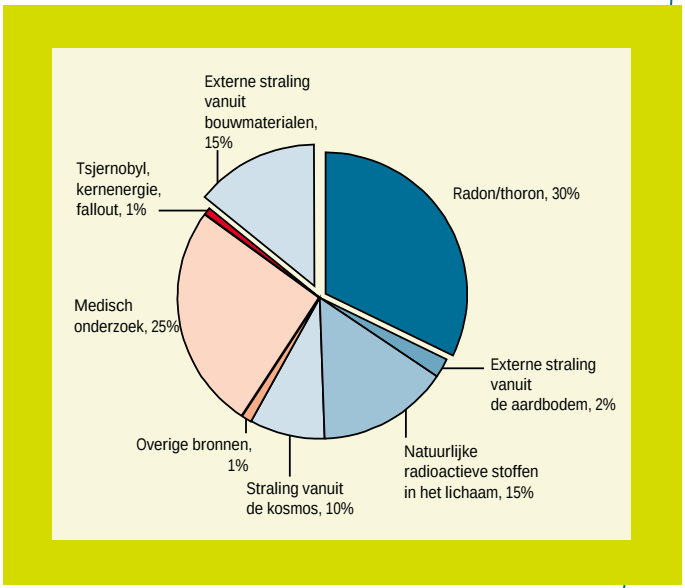
Tekstbox 2

Radonreducerende maatregelen beoordelen

Tal van factoren bepalen of het nemen van een radonreducerende maatregel zinvol is. Voorbeelden zijn: de relatie tussen vereiste en haalbare reductie, de kosteneffectiviteit, eventuele neveneffecten, de fractie van de gebouwen waarin de maatregel uitgevoerd kan worden, en de mate waarin het effect van de maatregel afhankelijk is van gebruikersgedrag. In STRATEGO-verband zijn een beperkt aantal onderzoeken uitgevoerd die maatregelen toetsten aan deze en andere criteria. Echter, hierbij is aangenomen dat het radon dat binnenshuis gevonden wordt, in hoofdzaak afkomstig is uit de kruipruimte, een vooronderstelling die niet in overeenstemming is met de situatie zoals die in nieuw gebouwde woningen heerst. Het is daarom niet mogelijk om voor nieuwbouw op basis van STRATEGO-onderzoek een maatregel evenwichtig en compleet te beoordelen. In wat volgt blijft de discussie over maatregelen dan ook beperkt tot het identificeren van belangrijke beïnvloedende factoren en van de wijze waarop een lagere stralingsbelasting te realiseren is.

2 Straling in het binnenmilieu: probleemstelling

Ioniserende straling en stoffen die deze uitzenden, zijn van nature in het milieu aanwezig, maar ze worden ook door de mens gemaakt of geconcentreerd. In ons land vertegenwoordigen kunstmatige bronnen van straling, zoals röntgenstraling voor medisch onderzoek en fall-out van atoombomproeven, gemiddeld ongeveer 30% van de stralingsbelasting. Aan bouwen en wonen gerelateerde bronnen ('externe straling vanuit bouwmaterialen' en 'radon') zijn verantwoordelijk voor bijna de helft van de doorsnee blootstelling aan straling.



Aandeel van diverse kunstmatige (rood) en natuurlijke (blauw) bronnen van ioniserende straling aan de gemiddelde stralingsbelasting (2,3 mSv per jaar) voor een lid van de Nederlandse bevolking anno 2000.
Bron: RIVM

Blootstelling aan ioniserende straling veroorzaakt, ongeacht de oorsprong, schade in het lichaam, die op termijn onder andere kan leiden tot het ontstaan van tumoren. Het risico verbonden aan straling in het binnenmilieu, en met name radon, is nader toegelicht in hoofdstuk 10.

Wat omvat 'straling in het binnenmilieu'? Enerzijds gaat het om bestraling van het gehele lichaam vanuit de bouwmaterialen, door van nature hierin aanwezige radioactieve stoffen. Men noemt dit uitwendige of externe bestraling. Hiervoor verantwoordelijk zijn vooral de metalen radium (een radioactief vervalproduct van uranium), kalium, en thorium. Daarnaast ontstaat uit radium een vluchtige radioactieve stof, radon (*zie tekstbox 3*). Een deel van het radon komt vrij uit de bodem en de bouwmaterialen, vermengt zich met de lucht en kan zich binnenshuis ophopen. De radioactieve stoffen die vervolgens weer uit het radon ontstaan ('de radondochters') zijn metalen die zich aan stofdeeltjes hechten. Door inademen van deze deeltjes worden de longen, waarin de deeltjes achterblijven, aan straling blootgesteld. We spreken over *inwendige bestraling*. Bouwen op een bodem met een hoog uraniumgehalte of gebruik van materialen waarin dit veel voorkomt, kan leiden tot een uitgesproken verhoging van een van beide of beide componenten van de blootstelling aan straling in gebouwen.

Tekstbox 3
Radon in soorten

Van het element radon komen verschillende isotopen voor. Naast radon-222, dat het meest voorkomt en ontstaat uit uranium-238, is radon-220, afkomstig uit thorium-232, het belangrijkste isotoop. Radon-222 is verantwoordelijk meer dan 85% van de stralingsbelasting door radonisotopen. Woonsituaties waarin radon-220 de stralingsbelasting domineert, zijn uitzonderlijk en komen in Nederland waarschijnlijk niet voor.
In wat volgt staat radon dan ook altijd voor radon-222, tenzij het gaat over de dosis door radon. In dat geval is de dosis afkomstig van alle relevante isotopen bedoeld.

Gezien het aan ioniserende straling verbonden risico is het wenselijk om onnodige blootstelling te voorkomen. Dit geldt niet alleen voor bijvoorbeeld blootstelling aan radioactieve stoffen die bij de productie van kernenergie worden gevormd. Ook door een aangepaste bouwwijze kan de stralingsbelasting gunstig worden beïnvloed. Hoe groot de speelruimte is en hoe realistisch opties om de blootstelling aan radon en bestraling vanuit de bouwmaterialen te reduceren, is essentieel bij het stellen van grenzen aan de stralingsbelasting in het binnenmilieu. Het schetsen van voor de stralingsbelasting cruciale factoren en van mogelijkheden voor de beïnvloeding ervan is onderwerp van dit overzicht.

Tekstbox 4
Grootheden en eenheden

De eenheid voor radioactiviteit is de becquerel (Bq). Eén becquerel komt overeen met het desintegreren, en dus straling uitzenden, van één atoom per seconde.
Hoe groot de schade is die de straling aanricht, is van een aantal factoren afhankelijk zoals het type straling (röntgen, a-straling, enz.), de wijze van blootstelling en waar in het lichaam de stof wordt gebonden of welk deel van het lichaam erdoor wordt getroffen. De dosis in sievert (Sv) is maat voor het effect van blootstelling aan een bepaald type straling. De dosisconversie-coëfficiënt (in Sv/Bq) geeft de stof-specifieke werkzaamheid weer. De gemiddelde dosis die een Nederlander jaarlijks ontvangt van alle stralingsbronnen samen bedraagt circa 2,3 mSv.

3 Voorgeschiedenis

In de periode 1982–1986 werd een eerste, verkennend onderzoeksprogramma uitgevoerd naar alle componenten van de natuurlijke achtergrondstraling in Nederland, het *SAWORA-programma*. Hoofdconclusies over bouwen en wonen waren:

1. Het gehalte aan natuurlijke radioactieve stoffen in de bodem is laag in vergelijking met waarden gemeten in de ons omringende landen. Gezien de overwegend regionale oorsprong van bouwmaterialen zoals baksteen en beton is ook het gehalte van deze stoffen in bouwmaterialen relatief laag. Gebruik van sommige reststoffen, zoals fosfogips en vliegas, waarin wel verhoogde concentraties aan natuurlijke radioactieve stoffen zitten, als toeslagmateriaal voor beton, verhoogt het externe stralingsniveau.
2. De radonconcentratie neemt toe bij afnemende ventilatie en in aanwezigheid van energiebesparende constructies zoals dubbele beglazing. Het feit dat 's zomers, wanneer woningen meer geventileerd worden, lagere concentraties gemeten worden, is hiermee in lijn. Uit een beperkt aantal metingen werd afgeleid dat radon dat vrijkomt uit de bodem en via de kruipruimte de woning binnendringt, vermoedelijk gemiddeld meer bijdraagt aan de radonconcentratie dan radon dat uit de bouwmaterialen ontwijkt.

Aansluitend is tussen 1987 en 1990, in het beleidsvoorbereidende *RENA-programma*, onderzocht hoe drie bronnen van natuurlijke achtergrondstraling beheersbaar kunnen worden gemaakt, te weten: procesindustrieën die radioactiviteit als verontreiniging lozen, radioactiviteit in voedsel, en tenslotte vooral die bronnen die betrekking hebben op bouwen en wonen. Belangrijke wetenschappelijk en beleidsmatige conclusies in aanvulling op de bevindingen uit het voorgaande programma waren:

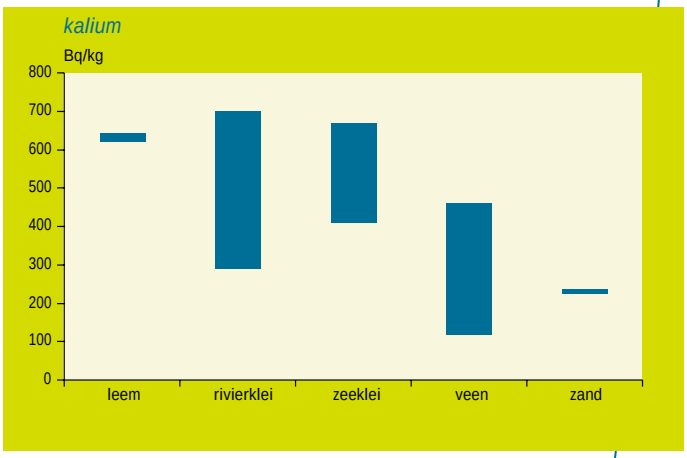
1. Bouwen en wonen, en met name radon, levert de belangrijkste bijdrage aan het reguleerbare deel van de natuurlijke achtergrondstraling. De overheid pleit ervoor niet toe te staan dat bij (vervangende) nieuwbouw het stralingsrisico hoger is dan in een representatieve na-oorlogse woning. Dit zou moeten worden bereikt door grenswaarden vast te stellen voor de stralingseigenschappen van bouwmaterialen.
2. Gebruik van bouwmaterialen met gunstige stralingseigenschappen, ventileren van kruipruimte en afdichten van de begane grondvloer worden geacht kosten-effectieve maatregelen te zijn. In de gemiddelde bestaande woning zouden laatstgenoemde maatregelen alleen gerechtvaardigd zijn als andere overwegingen zoals vochtbestrijding meespelen.
3. Echter, het inzicht in de verspreiding van radon wordt als onvoldoende beschouwd om zekere oplossingen te kunnen aandragen. Daarom wordt aanbevolen aanvullend onderzoek te doen naar transport van radon in de bodem, de doorlatendheid van bouwmaterialen en de verspreiding van radon.

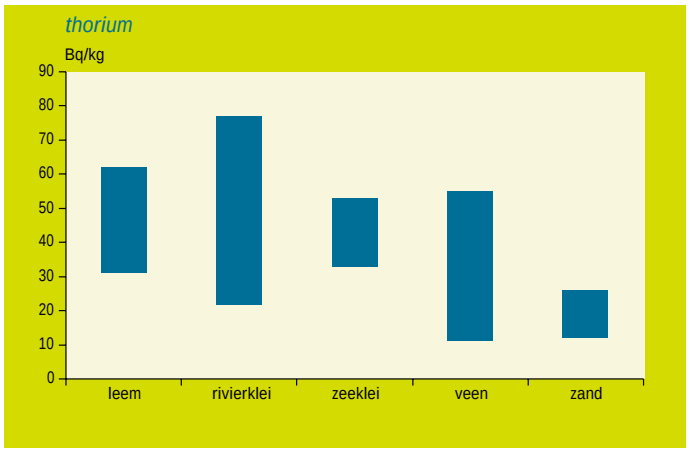
Het laatste en hier behandelde programma ging in 1991 van start. Het beoogde de na RENA nog ontbrekende onderbouwing voor beleid te leveren. Het accent kwam daarom liggen op onderzoek naar de effectiviteit van maatregelen ter voorkoming van hoge radonconcentraties. Bij het definiëren van onderzoek, het schatten van de kosten en het nut van maatregelen, en het formuleren van beleid ging men in eerste instantie uit van de vermeende grote bijdrage van bodem en kruipruimte aan de radonconcentratie in gebouwen. Meer recente, later in dit document beschreven onderzoeken toonden evenwel aan dat het belang van de kruipruimte als bron van radon werd overschat en daarmee ook de effectiviteit van maatregelen op het niveau van de begane grondvloer. Een belangrijk deel van de studies hierover, uitgevoerd in die eerste fase van het *STRATEGO-programma*, zijn bijgevolg minder relevant voor de huidige inzichten in de bronnen en de verspreiding van radon. Zij zullen dan ook beperkt worden behandeld, namelijk alleen daar waar relevant voor een evenwichtige schets van het gedrag van radon. Omdat de meerderheid van de aangehaalde onderzoeken handelt over ‘woningen’ en niet over ‘utiliteitsbouw’, zoals scholen en bedrijfsgebouwen, hebben uitspraken steeds betrekking op woningen, tenzij anders aangegeven.

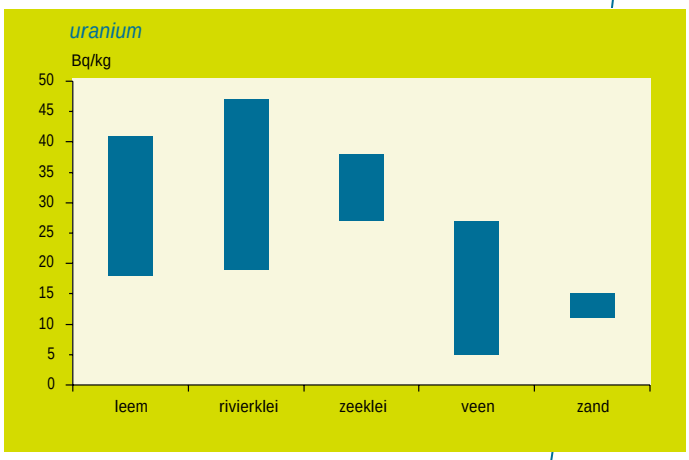
4 Externe straling

4.1 Bodem

Het gehalte aan langlevende natuurlijke radioactieve stoffen in een bodem varieert afhankelijk van het moedergesteente waaruit hij is gevormd. Zo komen hogere concentraties vooral voor in bodems gevormd uit vulkanisch gesteente en lagere in die van sedimentaire oorsprong. Tot deze laatste groep behoren de in Nederland voorkomende bodems. Het gehalte in zandbodems is lager dan in bijvoorbeeld de klei-afzettingen in het rivierengebied en bijgevolg is ook de aanstraling vanuit zandbodems lager. Daarnaast varieert het stralingsniveau in de tijd. Deze schommelingen zijn afhankelijk van factoren zoals luchtdruk, regenval en bodemvochtigheid die van invloed zijn op respectievelijk ontwijking van radioactiviteit uit de bodem in de vorm van radon, uitwassen uit de lucht van de dochternucliden die uit het radon ontstaan, en afscherming van de activiteit die zich in de bodem bevindt.





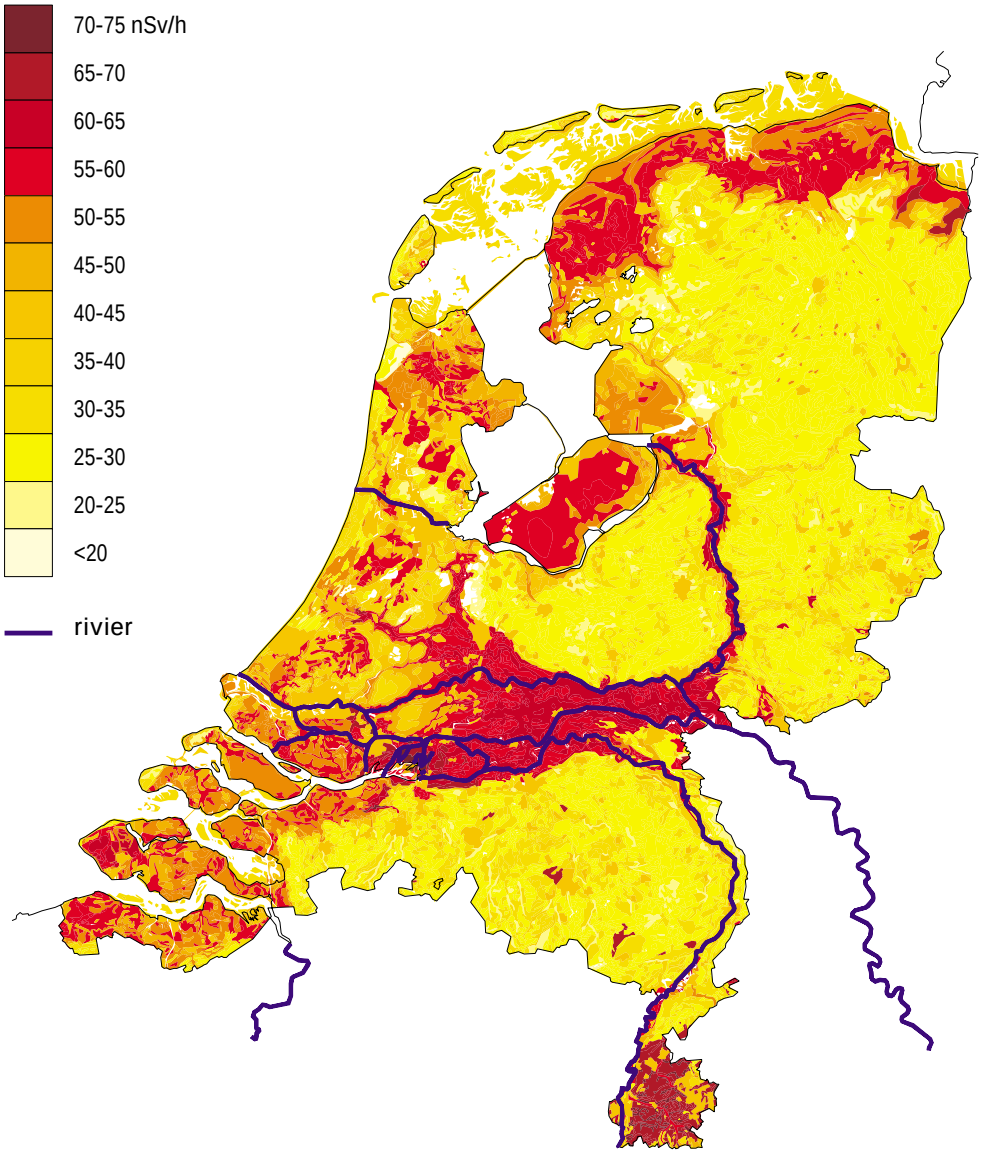


Variatie in het gehalte aan natuurlijke radioactieve stoffen in diverse bodemtypen.
Bron: NRG

Tekstbox 5

Meten is weten

Hoe het gehalte aan radionucliden in de bodem en in bouwmaterialen te meten is door het Nederlands Normalisatie Instituut in enkele voorschriften vastgelegd. De voorschriften hebben betrekking op bemonstering, monstervoorbereiding en meting (NVN 5691, 5695, 5697).
Voorschriften die te maken hebben met het meten van de radonontwijking uit bouwproducten of de radonconcentratie in binnenlucht zijn respectievelijk NVN 5699 en NVN 5693.



Een persoon die op één en dezelfde plaats zou verblijven, ontvangt in één jaar tijdens zijn verblijf buitenshuis – gemiddeld 20% van de tijd – een stralingsdosis van 0,01 tot 0,15 mSv door externe straling vanuit de bodem. De ruimtelijke verschillen hangen samen met verschillen in bodemtype. Bron: RIVM

4.2 Brandstoffen, mineralen en reststoffen

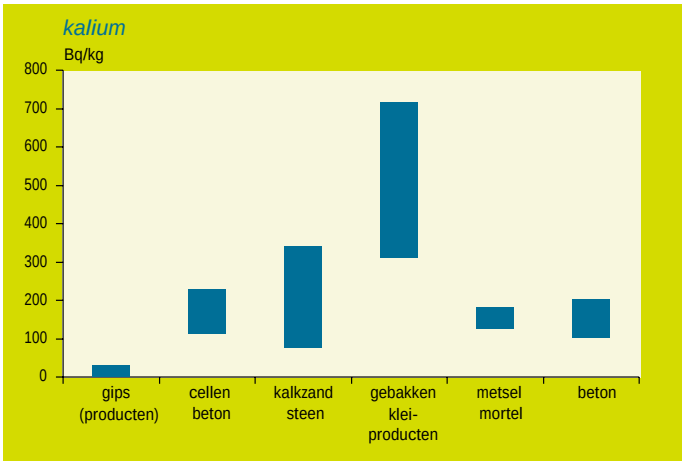
Bij de verwerking van grote hoeveelheden minerale grondstoffen, zoals fosfaat- en ijzererts, kunnen de van nature aanwezige radioactieve stoffen terechtkomen in rest- en afvalstoffen en in emissies naar lucht en water. Bij de productie van staal en elementair fosfor bijvoorbeeld worden hoge temperaturen toegepast, wat vooral leidt tot emissie naar lucht van het vluchtige polonium. In Nederland domineren deze bedrijfsactiviteiten de luchtlozingen van natuurlijke radioactieve stoffen. De bedrijven die met zuren en bij lagere temperaturen fosfaat onttrekken aan fosfaaterts, bepaalden de lozingen van natuurlijke radionucliden naar water, tot ze in 2000 hun activiteiten in Nederland staakten. Bij steenkoolcentrales wordt het grootste deel van de radioactiviteit uit de steenkool geconcentreerd in de as. De lozingen van deze en andere bedrijven waren, zoals eerder aangegeven, reeds onderwerp van onderzoek in het RENA-programma en regulering ervan wordt op dit ogenblik geëvalueerd en bijgesteld.

Het belang van deze bedrijven voor de bouw is gelegen in het feit dat een aantal van de reststoffen gebruikt kunnen worden bij de productie van bouwmaterialen. Zo kunnen vliegas van steenkoolcentrales en hoogovenslakken deels grind vervangen als toeslagmateriaal voor beton. Het risico op een verhoogd stralingsniveau als gevolg van een hoger gehalte aan radionucliden in deze reststoffen kan echter het streven naar hergebruik in de weg staan. Zo bevat gips dat bij behandeling van fosfaaterts met zwavelzuur wordt gevormd, 500 à 1500 Bq radium per kilogram, hoogovenslak afkomstig van de raffinage van ijzererts 40 tot 200 Bq per kilogram, en vliegas 100 tot 300 Bq per kilogram. Anderzijds ontwijkt er bijvoorbeeld weinig radon uit vliegas, door de glasachtige structuur van het materiaal. Kritisch selecteren van grondstoffen is de meest effectieve manier om hergebruik van reststoffen te waarborgen.

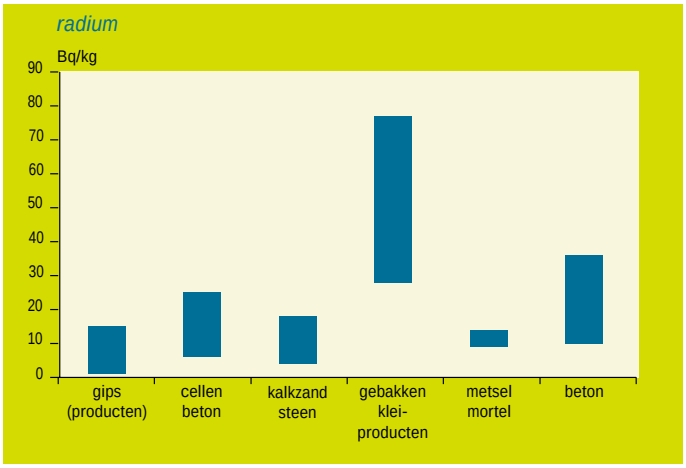
4.3 Bouwmaterialen

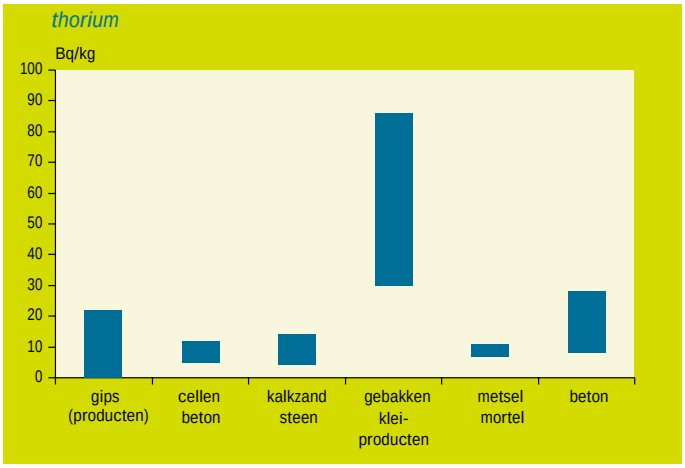
In de loop der jaren is het radioactiviteitsgehalte in een veelheid aan bouwmaterialen bepaald. Waargenomen verschillen zowel tussen als binnen materiaalsoorten kunnen behoorlijk groot zijn. Het hoogste radium- en thoriumgehalte wordt gevonden in beton en baksteen. Deze nucliden dragen, per activiteitseenheid, het meeste bij aan de externe straling. Ook het hoogste kalium-gehalte is te vinden in de materiaalsoort 'gebakken kleiproducten'.

Als er geen metingen zijn van het externe stralingsniveau in gebouwen, kunnen nuclidengehalten gebruikt worden om dit niveau te berekenen. Hiervoor is ook informatie over dichtheid van het materiaal, gebruikte hoeveelheid en plaats van toepassing vereist (zie 4.4).



Variatie in het gehalte aan natuurlijke radioactieve stoffen in courant toegepaste steenachtige bouwmaterialen. Bron: NRG

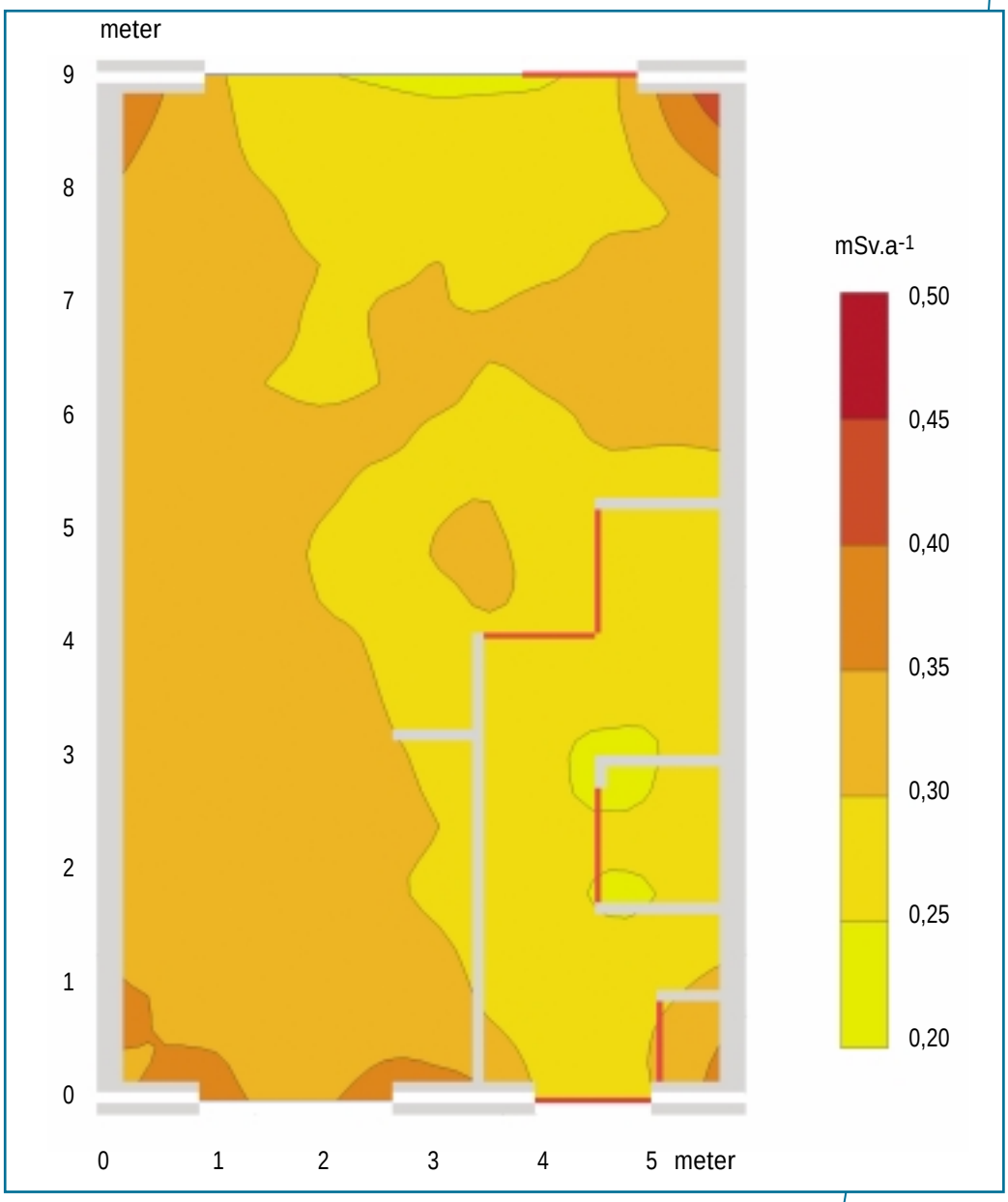




4.4 Externe straling

Tijdens het SAWORA-onderzoek is het externe stralingsniveau in circa 750 woningen, kantoren en bedrijven uitgebreid onderzocht. De gemiddelde jaarlijkse stralingsbelasting die *exclusief* aan bouwmaterialen is toe te schrijven, is toen becijferd op 0,3 mSv per jaar. Sinds die tijd zijn er nog nauwelijks metingen uitgevoerd anders dan in hele specifieke woningtypen, zoals de woningen die deel uitmaken van het Ecolonia-project in Alphen a/d Rijn. Alleen in houtskeletbouwwoningen, dus bij vervanging van minerale grondstoffen door hout, werd toen een afwijkend, circa 30% lager stralingsniveau gemeten. Gebruik van bouwstoffen arm aan radionucliden is immers het enige reële middel om het externe stralingsniveau terug te brengen. Voor zover hier mogelijkheden liggen, moet bij het beoordelen ervan ook rekening gehouden worden met consequenties voor de markt en voor het milieu.

Recent zijn alleen nog berekeningen met computermodellen uitgevoerd om de invloed van bouwmaterialen en bouwwijze op de externe straling meer in detail in beeld te brengen. Vloeren, plafonds en woningscheidende muren leveren de grootste bijdrage aan het externe stralingsniveau binnenshuis. Wanden tussen kamers zullen enerzijds een bijdrage leveren aan de dosis en anderzijds aanstraling vanuit er achter gelegen materialen afschermen. Hierbij is het min of meer regel dat bij toenemende dikte of dichtheid van muren niet alleen de afscherming toeneemt, maar ook de dosisbijdrage vanuit de muur zelf. Die afschermende werking geldt overigens ook voor kosmische straling en voor aanstraling vanuit de bodem onder en rondom het gebouw. Zo is voor kosmische straling het dosistempo binnen gemiddeld 20% lager dan buiten.

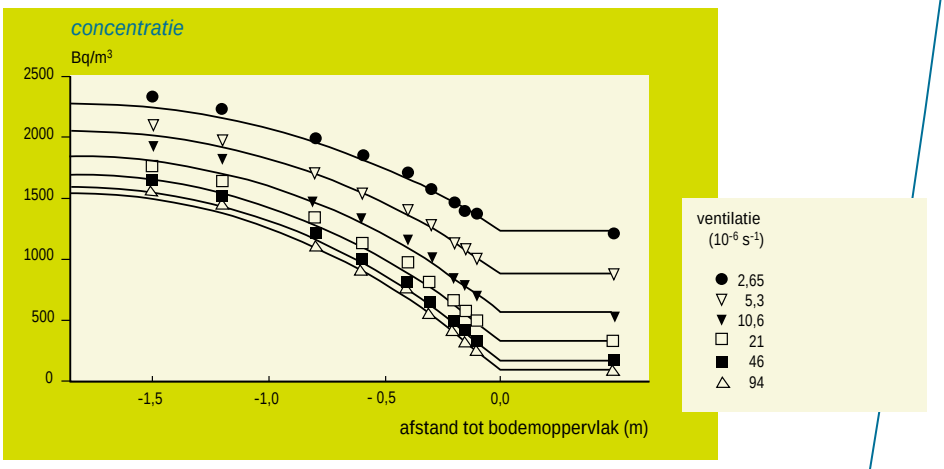


Berekende ruimtelijke variatie in de stralingsbelasting (in mSv per jaar) voor de begane grond van een typische hedendaagse tussenwoning, uitsluitend afkomstig van de materialen waaruit de woning is opgebouwd.
Bron: RIVM

5 Ontwijken van radon uit materialen

5.1 Bodem

Slechts een beperkt deel van het radon kan uit de bodem ontwijken voor het vervalt. Om te beginnen moet het namelijk ontsnappen uit de bodemdeeltjes op het ogenblik dat het door radioactief verval ontstaat, en vervolgens via de poriën in het materiaal naar het oppervlak diffunderen. Alleen radon dat dicht aan het oppervlak van een bodemdeeltje ontstaat, kan er uit onsnappen. Naar schatting ontsnapt hoogstens 30%, en in grof en glad materiaal zoals grind zelfs minder dan 1%. De hoeveelheid radon die vervolgens per tijdseenheid uit de bodem ontwijkt, is afhankelijk van de porie-structuur en het vochtgehalte van de bodem. Zo zal uit een waterverzadigde bodem weinig of geen radon ontwijken omdat het zich veel trager verplaatst in water dan in lucht. Schommelingen in luchtdruk en een hoge windsnelheid werken de ontwijking in de hand.



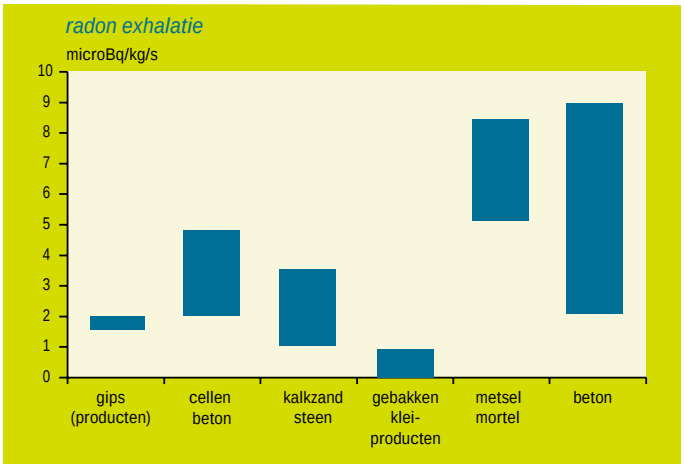
Stijgt de luchtstroom door de kruipruimte, of meer algemeen de windsnelheid boven een bodemoppervlak, dan wordt het radon sneller afgevoerd en verdund. Een groter concentratieverschil tussen de bodemlucht en de lucht aan het oppervlak leidt tot meer ontwijking uit de bodem, een effect dat tot op een diepte van enkele meters waarneembaar kan zijn, zoals hierboven is aangetoond voor een geïsoleerde, 2 meter hoge grondkolom.
Bron: KVI

In gebieden waar zeer hoge radonconcentraties in gebouwen gemeten worden omdat de bodem bijvoorbeeld poreus en rijk aan uranium is, worden vaak met succes maatregelen genomen om de ontwijking van radon uit de bodem te beïnvloeden. In dergelijke gevallen wordt met een pomp, geplaatst in een put in de kruipruimte of aangesloten op een drainagesysteem onder de woning, de bodemlucht weggezogen en naar buiten afgevoerd. Eventueel wordt in aanvulling een radondichte folie op de bodem van de kruipruimte aangebracht. Het radongehalte in de kruipruimte wordt door deze maatregel gereduceerd. In Nederland doen situaties waarin actief afzuigen van bodemlucht een verantwoorde maatregel is, zich naar verwachting niet voor.

5.2 Bouwmaterialen

Combineren van het gemeten radiumgehalte in bouwmaterialen met gegevens over het totale gebruik van de diverse materialen in een gemiddelde woning maakt duidelijk hoeveel radon in een woning kan ontstaan. Slechts een beperkt deel hiervan zal bijdragen aan wat binnen gemeten wordt. Dit hangt af van het feit of het radon kan ontwijken uit het materiaal en van de plaats in de woning waar het ontwijkt.

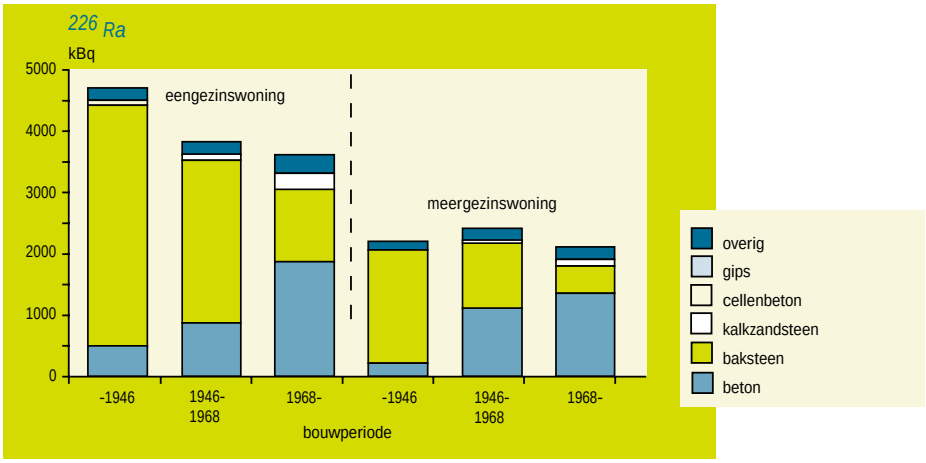
De factoren die het ontwijken van radon uit bouwmaterialen vooral beïnvloeden zijn dezelfde als bij bodems, te weten: vochtgehalte, poriestructuur en korrelgrootte-verdeling. Uit baksteen ontwijkt opvallend minder radon dan uit bijvoorbeeld betonproducten, ondanks het feit dat baksteen meer radium bevat. Omdat in verouderende materialen de hydratatiegraad en poriestructuur wijzigen, zal in de loop van de tijd ook de radonontwijking veranderen.



Bereik van de hoeveelheid radon die per tijdseenheid ontwijkt, zoals gemeten voor een aantal courant toegepaste steenachtige bouwmaterialen. Bron: NRG

Radon dat naar buiten toe ontwijkt – bijvoorbeeld uit het buitenspouwblad – of uit materialen gebruikt in de kruipruimte zal uiteraard slechts beperkt bijdragen aan de concentratie in een gebouw. Ontstaat radon in oudere woningen vooral in de bakstenen muren, in nieuwe woningen zit het meeste radium in de betonnen vloeren en plafonds. Omdat radon bovendien makkelijker uit beton ontwijkt dan uit baksteen, is te verwachten dat de radonconcentratie in recent gebouwde woningen hoger zal zijn dan in oudere woningen. Dat de keuze van de bouwmaterialen de radonconcentratie

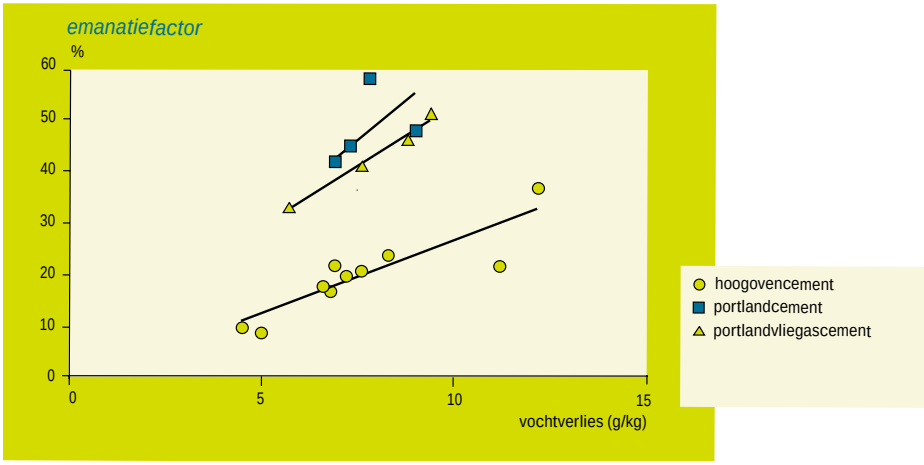
beïnvloedt, blijkt ook uit het feit dat in woningen waarin weinig minerale grondstoffen zijn aangewend (houtskeletbouw) de concentratie significant lager is dan in woningen opgetrokken uit de meer courante materialen.



In de loop van de tijd is de totale hoeveelheid radium in de materialen waaruit een woning wordt opgetrokken, eerder gedaald dan gestegen. De relatieve bijdrage per materiaalsoort en de verdeling van het radium over de woning zijn nadrukkelijk gewijzigd.
Bron: RIVM

Om het ontwijken van radon uit bouwmaterialen te beperken zijn potentieel werkzame maatregelen geïnventariseerd en gescreend. Screening betekende vooreerst dat bekeken werd of een maatregel technisch en economisch haalbaar is, andere milieuhygiënisch effecten dan stralingseffecten heeft en aanvaardbaar is voor de markt. Daarnaast zijn maatregelen concreet uitgetest. Voorbeelden van experimenteel geteste maatregelen zijn het kiezen van andersoortig cement, het aanpassen van het toeslagmateriaal van betonproducten, het anders gieten ervan, het dichtsmeren van drogingsscheurtjes in het betonoppervlak ('vlinderen') of het toepassen van speciale afwerklagen.

Voor sommige maatregelen worden reducties in radonexhalatie van meer dan 90% gerapporteerd. De resultaten zijn evenwel vaak verkregen onder (ideale) laboratoriumomstandigheden of voor losse proefstukken. De persistentie van maatregelen zoals het toepassen van speciale afwerklagen is bovendien erg onzeker. Ook hier is de meest voor de hand liggende maatregel het toepassen van materialen die minder radon vrijgeven. Echter, hierbij moet rekening worden gehouden met mogelijke negatieve consequenties voor de markt en soms ook voor het milieu. Zo zou substitutie van hoogovencement door radium-armer Portlandcement kunnen leiden tot een overschot aan (te storten) hoogovenslak, een verhoogde CO_2-uitstoot en extra problemen met de kalksteenwinning binnen de huidige concessies. In 1993 werden de kosten van een dergelijke substitutie voor de woningbouw geschat op 10 à 20 miljoen gulden per jaar. Anderzijds werden de kosten van het qua effect meer onzekere coaten met primer en polyurethaan een factor vijf hoger ingeschat. Tenslotte moet men zicht bewust zijn van het feit dat wijzigen van de samenstelling van bouwmaterialen de dosis door externe straling – gemiddeld circa 50% van de radondosis – ongunstig kan beïnvloeden.



Het radiumgehalte in cement is hoger dan van dat van de andere grondstoffen van beton. Kiezen van een andere soort cement kan dan ook betekenen dat een andere hoeveelheid radon ontwijkt; Portlandcement met 10 Bq radium per kg, vliegascement met 12 Bq/kg en hoogovencement met 20 Bq/kg. Ook beïnvloeden van het restvochtgehalte in het gerede product heeft nadrukkelijk invloed op de mate waarin radon kan ontwijken.
Bron: TNO

Tekstbox 6

Andere radonbronnen dan bodem en bouwmaterialen

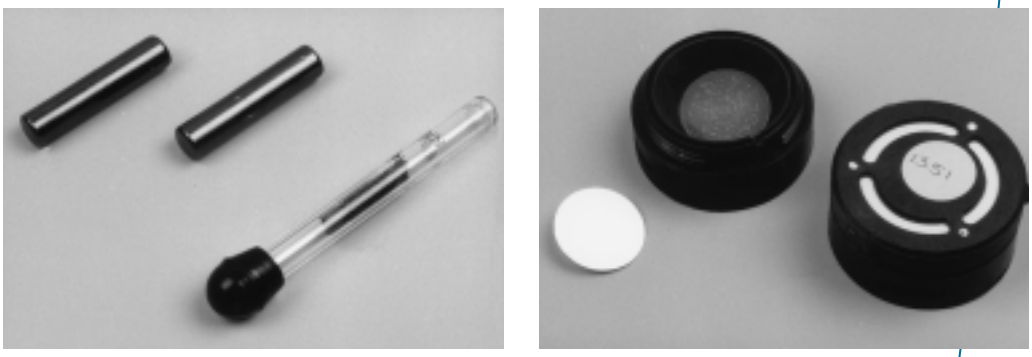
Grondwater en aardgas voeren een deel van het radon dat in de bodem ontstaat, met zich mee. Bij gebruik van grondwater als leidingwater en verbranding van aardgas voor verwarming en koken komt dan ook een beperkte hoeveelheid radon vrij in huis. Gemiddeld dragen beide bronnen samen minder dan 1% bij aan de totale radonconcentratie in het binnenmilieu.

6 Verspreiding van radon in de woning

6.1 Te beantwoorden vragen

Het radon zal zich vrij in de lucht verspreiden, nadat het is ontweken uit het materiaal waarin het is ontstaan. Waar en in welke mate het zich binnen ophoopt, is functie van de luchtcirculatie in het gebouw en de mate van ventilatie met buitenlucht. Meten van de radonconcentratie en gelijktijdig meten van de luchtstromen kan dan ook informatie verschaffen over de oorsprong van het radon. In de loop van het voorbije decennium is dit in Nederland op grote schaal gebeurd in twee onderzoeken. In opgeteld meer dan 1600 nieuwe woningen is radon gemeten en bepaald hoeveel lucht van buiten naar binnen infiltreert en hoeveel lucht stroomt van woonkamer naar kruipruimte en andersom. Deze onderzoeken moesten antwoord geven op volgende vragen:

1. Hoe hoog is de gemiddelde radonconcentratie in de woonkamer, de kruipruimte en in één van de slaapkamers van nieuw gebouwde woningen, en in de buitenlucht in de omgeving van deze woningen, en hoe groot is de variatie hierin?
2. Hoe groot is de relatieve bijdrage van de belangrijkste bronnen van radon – bodem, bouwmaterialen en buitenlucht – aan de gemiddelde concentratie in de kruipruimte en in de woonkamer?
3. Hoe groot is het effect van twee maatregelen op de infiltratie van radon vanuit de kruipruimte naar de woonkamer, te weten: afdichten van luchtlekken in de begane grondvloer en/of verhogen van de natuurlijke ventilatie van de kruipruimte?



Apparatuur gebruikt om in woningen luchtstromen (links) en radon (rechts) te meten. Bron: RIVM

In beide onderzoeken werd hetzelfde gemeten, namelijk:

1. de radonactviteitsconcentratie, geïntegreerd over een periode van 4 maanden of 1 jaar, met behulp van zogeheten passieve detectoren, en
2. de totale luchtstroom in woonkamer en kruipruimte en de luchtstromen tussen beide ruimten, gemeten over dezelfde perioden. Hiervoor zijn bronnen, waaruit continu een tracergas (fluorkoolwaterstoffen) ontwijkt, en detectoren, die deze gassen adsorberen, in beide ruimten geplaatst.

Omdat het radiumgehalte in de bodem ook iets zegt over de oorsprong van het radon zijn bij een aantal woningen grondmonsters verzameld en onderzocht.

6.2 Hoe hoog zijn de concentraties?

In de woonkamer van nieuwe woningen varieert de radonactiviteitsconcentratie van de lucht tussen 5 en 400 Bq/m^3. Gemiddeld bedraagt de concentratie in de woonkamer 28 Bq/m^3 bij een concentratie in de buitenlucht van ongeveer 3 Bq/m^3. In het landelijk radononderzoek dat in de tachtiger jaren in het SAWORA-progamma is uitgevoerd, is, gemiddeld over de woningen die tot 1970 werden gebouwd, 19 Bq/m^3 gevonden[1]. De concentratie in nieuwe woningen is dus ten opzichte van oudere woningen gemiddeld met circa 50% toegenomen. Deze bevinding is in lijn met de verwachting. Een verhoging van de concentratie werd voorspeld als gevolg van toegenomen isolatie en verminderde ventilatie van woningen en door verschuivingen in het gebruik van bouwmaterialen. Uit de SAWORA-steekproef en het onderzoek aan nieuwe woningen is een gemiddelde voor het volledige woningbestand becijferd van 23 Bq/m^3.

De radonactiviteitsconcentratie van de lucht in de slaapkamer van nieuwe woningen is gemiddeld iets lager dan in de woonkamer. In de kruipruimte is gemiddeld een concentratie van 70 Bq/m^3 gevonden. Dit is beduidend lager dan de schatting van 300 Bq/m^3 waarvan tot op dat ogenblik werd uitgegaan. In de nieuwste steekproef is verder vastgesteld dat een hoog radiumgehalte in de bodem leidt tot een hogere radonconcentratie in de kruipruimte, maar zich niet meer doet gelden in de woonkamer.

Gemiddelde radonconcentratie in woningen in de ons omringende landen.
Bron: UNSCEAR

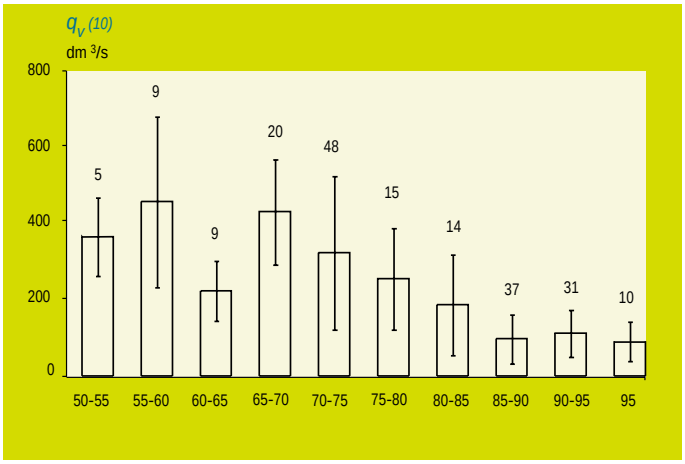
	Bq/m^3		Bq/m^3
Finland	120	Frankrijk en Portugal	62
Luxemburg	110	Denemarken	53
Zweden	108	Duitsland	50
Spanje	86	België	48
Italië	75	Nederland	23
Griekenland en Noorwegen	73	Engeland	20

1 Het gemiddelde van 19 Bq/m^3 is verkregen door herijken van de SAWORA-gegevens op basis van controlemetingen verricht in het kader van de nieuwe onderzoeken.

In vergelijking met de ons omringende landen zijn de in woningen gemeten concentraties echter nog steeds laag te noemen. Ook de concentratie binnenshuis van 39 Bq/m^3 waaraan de gemiddelde wereldburger naar schatting is blootgesteld, is bijna tweemaal hoger dan het Nederlandse gemiddelde.

6.3 Waar komt het radon vandaan?

In nieuwe woningen stroomt per uur gemiddeld 6 m^3 lucht van de kruipruimte naar de woonkamer. Dit is slechts 7% van de totale gemiddelde luchtstroom in de woonkamer (86 m^3 per uur). Combineren van luchtstromen en radonconcentraties leidde tot een geschatte bijdrage vanuit de kruipruimte aan de concentratie in de woonkamer van 15%. Dit is ongeveer even veel als de overal aanwezige 'achtergrond' afkomstig van buiten de woning. De rest van het radon dat in de woonkamer wordt gevonden – circa 70% van het totaal – ontwijkt dus uit de bouwmaterialen.



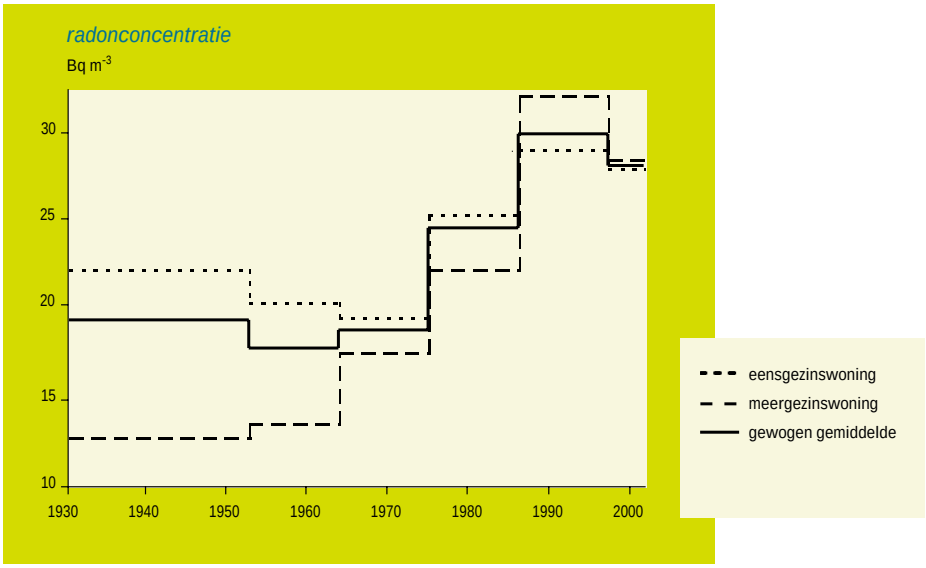
De gemiddelde luchtdoorlatendheid van eengezinswoningen – gemeten bij een bepaalde overdruk in de woning (q_v(10)) – is in de loop der jaren significant afgenomen (getal = aantal waarnemingen; vlag = standaard afwijking).
Bron: TNO-Bouw

Hoe groot het relatieve belang van kruipruimte, buitenlucht en bouwmaterialen is voor de radonconcentratie in oude woningen is nooit goed onderzocht en moeilijk aan te geven. Vroeger is aangenomen dat 60% uit de kruipruimte kwam. Uitgaande van wat we nu weten is 20 tot 50% – wat overeenkomt met 5 à 10 Bq/m^3 – een meer realistische schatting. Dit is nog altijd beduidend hoger dan de bijdrage voor nieuwbouw. Twee groepen waarnemingen leveren samen argumenten voor de geleidelijk afgenomen invloed van de kruipruimte en de toegenomen bijdrage van de bouwmaterialen: 1) metingen van de luchtdichtheid van de bouwschil in woningen van verschillend bouwjaar en 2) radonmetingen in verschillende typen woningen, eveneens van uiteenlopend bouwjaar.

De luchtdichtheid van nieuwe woningen is een factor vier hoger dan die van woningen gebouwd vóór 1970. Dit komt omdat na 1970 isolerende maatregelen zijn toegepast om energie te besparen. Vanaf dat ogenblik is ook de gemiddelde radonconcentratie in nieuwbouwwoningen gaan toenemen. Het feit dat in flatwoningen de radonconcentratie eerst lager was dan in ééngezinswoningen en nu vrijwel even hoog, wekt de suggestie dat door bestrijden van luchtlekken radon dat vrijkomt in de kruipruimte, uit de woning is 'buitengesloten' en radon van de bouwmaterialen is 'ingesloten'. In

eengezinswoningen is de stijging van de radonconcentratie beperkt gebleven omdat beide processen elkaar enigszins hebben gecompenseerd. In flats daarentegen, waar de invloed van de kruipruimte gering is, trad deze compensatie niet op. Dat voor beide woningtypen de concentratie in nieuwbouw vrijwel gelijk is, komt dus omdat de kruipruimte, bron van het vroegere verschil, nog nauwelijks gewicht in de schaal legt.

Gemiddelde radonconcentratie per decade in de woonkamer van twee verschillende woningtypen en gewogen gemiddelde concentratie voor beide typen samen.
Bron: RIVM

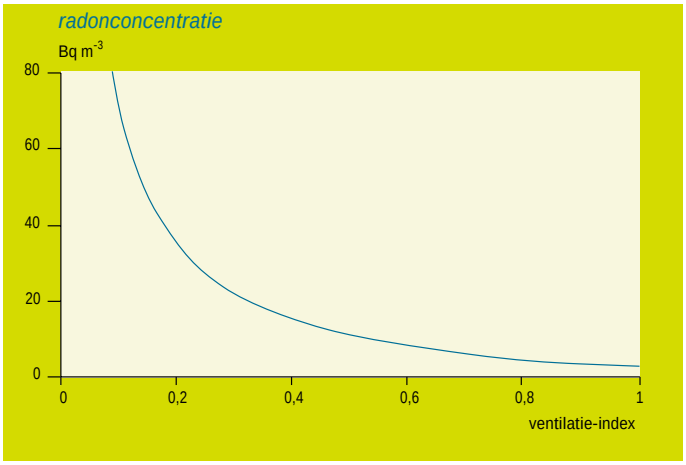


6.4 Mogelijke maatregelen

In woningen gebouwd rond 1990 is de gemeten luchtdoorlatendheid van de begane grondvloer gemiddeld een factor 2 à 3 hoger dan voorgeschreven in het Bouwbesluit. Desondanks draagt de kruipruimte slechts 15% bij aan de radonconcentratie in de woonkamer. Verhogen van de kruipruimteventilatie of afdichten van luchtlekken in de begane grondvloer tot beneden de wettelijke grens hadden een haast niet te meten effect. Theoretisch is met deze maatregelen een reductie van het radon in de woonkamer met 10% het maximaal haalbare.

Wanneer zijn aanvullende, radonwerende maatregelen zoals mechanische ventilatie van de kruipruimte of aanbrengen van folies op de bodem of tegen de begane grondvloer zinvol? Indien voldaan is aan de eisen in het Bouwbesluit ten aanzien van de luchtdichtheid van de begane grondvloer en voorzien is in goede natuurlijke ventilatie van de kruipruimte, is dit, voor de gemiddelde Nederlandse situatie, en in nieuw te bouwen woningen weinig zinvol. Dergelijke maatregelen zijn slechts te verdedigen daar waar zeer veel radon uit de bodem ontwijkt. Toepassing ervan in o.a. Engeland, Duitsland en de Verenigde Staten, in gebieden waar deze situatie voorkomt, resulteerde in het decimeren van de aanvoer van radon uit de kruipruimte. Voor de Nederlandse situatie is de potentie van dergelijke maatregelen aangetoond. Echter, doordat bij de beproevingen de concentraties in de kruipruimte laag waren, konden slechts geringe effecten op de concentratie in de woonkamer worden aangetoond.

In oudere woningen is de kruipruimte een relatief grotere bron van radon dan in nieuwe woningen. Hóe groot, is, zoals eerder gesteld, moeilijk aan te geven. Het effect van maatregelen zoals afdichten van luchtlekken in de vloer en waarborgen van een goede ventilatie is dan ook niet te kwantificeren. Wel kan gesteld worden dat isoleren van muren en dak zonder aandacht te besteden aan de begane grondvloer in twee opzichten de radonconcentratie negatief beïnvloedt: de stroom vanuit de kruipruimte wordt dan niet afgesneden en het aangevoerde radon blijft langer in huis. In 1992 werden de kosten voor het dichten van de vloer in 5% van het woningbestand geschat op 1,3 miljard gulden. Gelijktijdig verbeteren van de kruipruimteventilatie met bouwkundige maatregelen zou ca. 200 miljoen per jaar extra kosten.



Theoretisch verloop van de radonconcentratie in de woonkamer van een nieuwbouwwoning als functie van de mate van ventilatie. Bij het schatten van de concentratie zijn de bijdragen van kruipruimte en buitenlucht niet in rekening gebracht. Een ventilatie-index van 1 komt overeen met een ventilatie conform de vereisten van het Bouwbesluit.
Bron: LB&P

Daar waar de begane grondvloer van nieuwbouwwoningen dus minder dicht is dan vereist, is de totale bouwschil gemiddeld een factor twee luchtdichter dan wettelijk voorgeschreven. Daarnaast realiseert de mechanische ventilatie gemiddeld nauwelijks de helft van het voorgeschreven ventilatiecapaciteit. Omdat de radonconcentratie omgekeerd evenredig toeneemt met de mate van ventilatie, is in goed geïsoleerde woningen een lage radonconcentratie juist afhankelijk van een optimaal functionerend ventilatiesysteem. Voorkómen van hoge concentraties in nieuwbouw is naar verwachting dan ook meer gediend met extra aandacht voor de ventilatievoorzieningen dan met aanvullende maatregelen in de kruipruimte.

Samenvattend: niet alleen de eerder genoemde gewijzigde inzet van bouwmaterialen is dus van invloed op de radonconcentratie binnenshuis, ook de wijze waarop isolerende maatregelen en ventilatievoorzieningen zijn uitgevoerd en hoe deze voorzieningen door de bewoners worden gebruikt, is van cruciaal belang. De gepresenteerde trend in de radonconcentratie illustreert duidelijk het negatieve effect van suboptimaal functionerende ventilatievoorzieningen en van het benadrukken van energiebesparende maatregelen op de kwaliteit van de binnenlucht.

7 Radondochters en aërosolen

Hoe hoog de radondochter-concentratie is die zich in een ruimte opbouwt, is niet alleen functie van de hoeveelheid radon die in die ruimte vrijkomt. Ook van invloed zijn de hoeveelheid stofdeeltjes in de lucht, waaraan de nucliden zich binden, de mate van luchtcirculatie en de grootte van het oppervlak van muren, meubilair e.d. waaraan nucliden en stofdeeltjes zich kunnen hechten.

De dochternucliden gebonden aan stofdeeltjes zullen gemiddeld langer in de lucht blijven dan ongebonden radondochters. Zo zal de dochterconcentratie in ruimten waar bijvoorbeeld gerookt of gekookt wordt, hoger zijn dan waar dit niet het geval is. Anderzijds is de deeltjesgebonden fractie minder schadelijk voor de gezondheid dan de ongebonden fractie *(zie hoofdstuk 10)*.

Verhoging van de luchtcirculatie, eventueel in combinatie met een ionengenerator, leidt tot versnelde hechting van deeltjes aan oppervlakken. Toepassing van een plafondventilator leidt globaal tot een halvering van de stralingsbelasting door radon. In combinatie met een ionengenerator is zelfs een reductie met circa 80% haalbaar. Filtratie daarentegen kan contraproductief werken omdat door een lagere concentratie aan stofdeeltjes de meer schadelijke, vrije fractie kan toenemen. Dit alles suggereert dat luchtbehandeling een aantrekkelijke maatregel kan zijn in bestaande gebouwen met een hoge radonconcentratie.

Tegen het toepassen van deze maatregel pleit dat langdurig, feilloos functioneren van het systeem moeilijk is te waarborgen en een intensievere luchtcirculatie en de geluidsbelasting van een behandelsysteem het woonconfort niet ten goede komen. Terughoudend zijn met het toepassen van deze maatregel, zeker bij nieuwbouw, en toch voor andere opties kiezen is aan te bevelen omdat het probleem niet bij de bron bestreden wordt en dus niet voldaan is aan het adagium 'voorkomen is beter dan genezen'.

8 Woningbouw versus utiliteitsbouw

De overgrote meerderheid van de onderzoeken naar radon in het binnenmilieu concentreert zich op woningen. De reden hiervoor is onmiskenbaar het feit dat een meerderheid van de mensen het grootste deel van de tijd binnenshuis doorbrengt. Meten van radon in utiliteitsbouw gebeurt meestal om één van de volgende redenen:

1. Er is aanleiding om te veronderstellen dat het type bedrijfsactiviteit een radonprobleem kan veroorzaken. Voorbeelden zijn opslagen van ertsen met een verhoogd radiumgehalte en ondergrondse waterbehandelinstallaties waar het radon dat uit het water ontwijkt zich ophoopt.
2. De gebouwen staan in gebieden waar de bodem een belangrijke bron van radon is en waar bijgevolg hoge concentraties te verwachten zijn, ongeacht het gebouwtype. In dat geval zal vaak in openbare gebouwen zoals scholen gemeten worden.

Het Nederlands radononderzoek in utiliteitsbouw was er in de eerste plaats op gericht de vraag te beantwoorden of de radonconcentratie er verschilt van die in woningen. Daarnaast is onderzocht of factoren specifiek voor utiliteitsbouw de concentratie en fluctaties hierin bepalen. Gemeten concentraties verschilden niet significant van wat in woningen werd gevonden en het leek erop dat invloeden van kruipruimte en ventilatie vergelijkbaar waren met wat in woningen werd gezien. Voorgestelde maatregelen waren in lijn met suggesties gedaan voor woningen. Verder werd aanbevolen om in gebouwen met air-conditioning een overdruk aan te brengen en extra aandacht te besteden aan de luchtaanzuiging; een en ander om de aanvoer van lucht vanuit te kruipruimte te voorkomen. Bij het beoordelen van radonconcentraties gemeten in utiliteitsbouw en de wenselijkheid van maatregelen moet rekening gehouden worden met het feit dat concentraties gedurende werktijd beduidend lager kunnen zijn dan daarbuiten.

9 Abstraheren

In voorgaande paragrafen is beschreven wat vooral uit metingen en experimenten is afgeleid over de externe straling en het gedrag van radon in het binnenmilieu. Tal van factoren beïnvloeden beide componenten van de stralingsbelasting. Al de gevonden en veronderstelde relaties en onderlinge afhankelijkheden kunnen samengebracht worden in één of meer mathematische beschrijvingen of rekenmodellen. Vergelijken van modelberekeningen en nieuwe metingen leert in hoeverre de beschrijving een aanvaardbare afspiegeling is van de werkelijke situatie. Doorrekenen van een veelheid aan situaties maakt duidelijk welke factoren er wel toe doen en welke niet, veel sneller dan mogelijk is via metingen. Dergelijke berekeningen zijn dan ook van nut bij het sturen van meetprogramma's, maar niet alleen dat. Ook bij het voorspellen van trends zijn dergelijke berekeningen te gebruiken, bij het verder abstraheren van gevonden relaties en dus bij het identificeren van aangrijpingspunten voor regulering.

Tekstbox 7

Voorbeeld van een ruwe toets (het 'KEMA/IBR-model') van de invloed van een bepaald bouwmateriaal op de stralingsbelasting

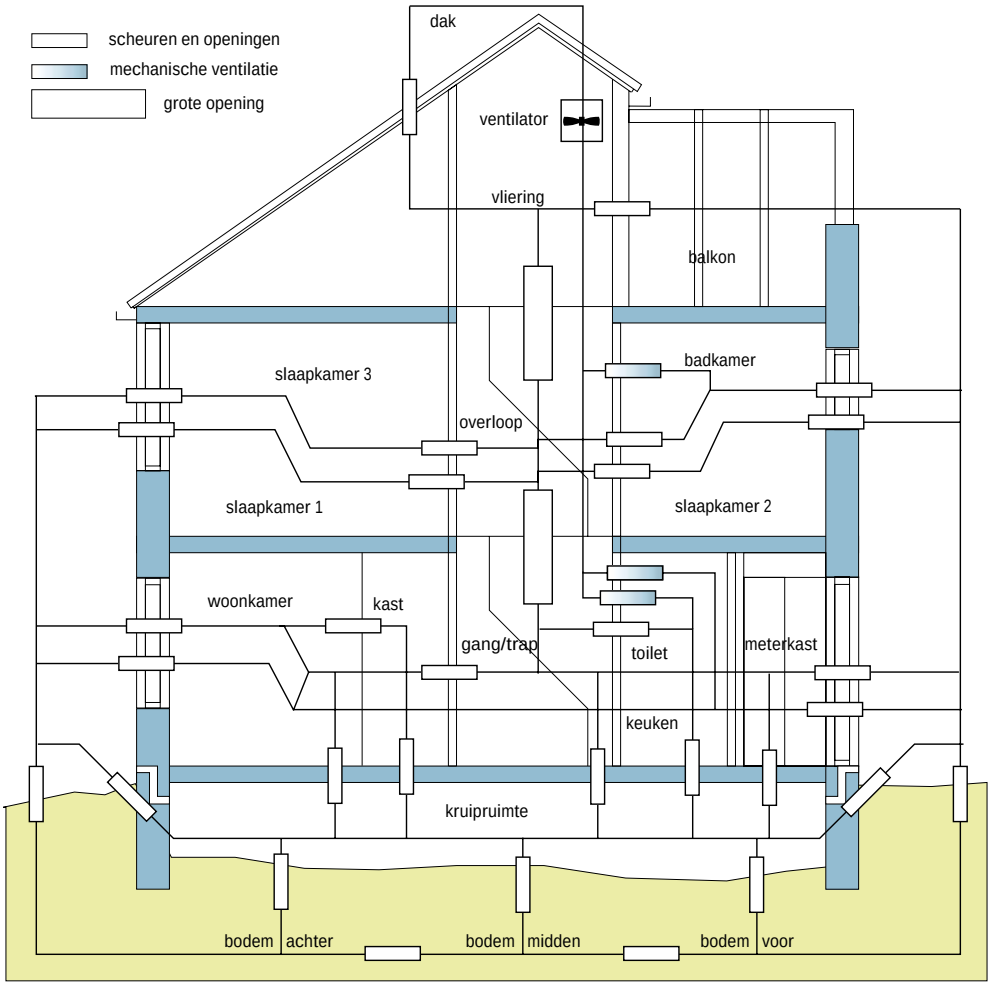
$\{cf_u\ [U] + cf_{th}\ [Th] + cf_k\ [K] + cf_{rn}\ [Rn]\}\ .\ MA$ = dosis in mSv/j

waarin:

cf	:	conversiefactor afhankelijk van dikte en massa
[U, Th, K]	:	activiteit van uranium, thorium en kalium (Bq/kg)
$[R_n]$	:	radonontwijking ($Bq/m^2.h$)
MA	:	marktaandeel

Het zou te ver leiden om alle mogelijke modelbenaderingen te behandelen. Daarom wordt volstaan met enkele voorbeelden. In de meest complexe vorm gaat het om modellen die voor een concrete woning en specifieke weersomstandigheden de luchtdruk-afhankelijke ontwijking van radon per bouwmateriaal becijferen, de drukgestuurde luchtstromen door en tussen alle ruimten in de woning en de plaatsafhankelijke aanstraling vanuit alle aanwezige materialen. Een mogelijk resultaat van een berekening van de externe bestraling is gegeven in hoofdstuk 4.4 en van een schema waarop berekeningen van luchtstromen doorheen een woning zijn gebaseerd is hierna een voorbeeld gegeven.

De sterkst vereenvoudige modellen vertalen activiteitsconcentraties in bouwmaterialen rechtstreeks in een dosis waarbij geometrie-invloeden, materiaalgebruik en factoren die de radonconcentratie bepalen teruggebracht zijn tot eenvoudige conversiefactoren *(zie tektstbox 7)*. Dergelijke eenvoudige rekenregels kunnen worden gebruikt om in algemene zin te toetsen wanneer naar verwachting een gekozen dosislimiet wordt overschreden en bijgevolg aanvullend onderzoek vereist is. In opdracht van het ministerie van VROM is een eenvoudige rekenmethode ontwikkeld *(zie tekstbox 8)* om te toetsen of het stralingsniveau in een te bouwen woning een bepaalde grens dreigt te overschrijden of niet.



Veronderstelde verbindingen met de buitenwereld en tussen de onderscheiden ruimten van een eengezinswoning die worden beschreven in een model waarmee luchtstromen doorheen de woning worden berekend. Variëren van de grootte van de verbindingen, het volume van de ruimten en de grootte van de radonbron per ruimte bieden de mogelijkheid te bepalen welke schakels in de gehele keten essentieel zijn.
Bron: TNO-Bouw

Tekstbox 8

Toetsen van het stralingsniveau in te bouwen woningen

Om te toetsen of het stralingsniveau in een te bouwen woning het maximaal toelaatbare niveau niet overschrijdt, is een norm in ontwikkeling (NEN 7181). De norm is gebaseerd op een rekenmethodiek waarmee de stralingsprestatie kan worden berekend op basis van het ontwerp van de woning, de toegepaste bouwmaterialen en de ventilatiestromen. Tevens kan met deze methodiek de specifieke radontoevoer vanuit de kruipruimte worden berekend.

10 Gezondheidsrisico's

Blootstelling aan ioniserende straling veroorzaakt, ongeacht de oorsprong, schade in het lichaam. Het belangrijkste, mogelijke lange-termijn effect is het ontstaan van kanker. In het geval van uitwendige bestraling vanuit de bodem of bouwmaterialen gaat het om doordringende gammastraling. Het gehele lichaam wordt dan vrijwel uniform blootgesteld. De kans dat dit resulteert in tumorvorming verschilt per orgaan. Organen die gevoeliger zijn voor straling dan andere zijn bijvoorbeeld het rode beenmerg en de darm.

Bij radon worden vooral de longen blootgesteld, omdat de ingeademde radondochters nauwelijks over de rest van het lichaam verdeeld worden en het meest schadelijke deel van de straling, de alfa-deeltjes, niet diep in het weefsel doordringen. Radondochters gebonden aan grote deeltjes blijven in neus, keel of bovenste luchtwegen achter en zullen minder schade veroorzaken dan ongebonden dochternucliden die diep in de longen doordringen. De schattingen van de stralingsdosis door blootstelling aan radon zoals de laatste jaren gepubliceerd door ICRP, NRC, UNSCEAR en anderen verschillen een factor 2 à 3 van elkaar.

Schattingen van de kans op longkanker door blootstelling aan radon zijn gebaseerd op onderzoek aan bevolkingsgroepen blootgesteld aan heel hoge radonconcentraties. Het schadelijke effect van radon kwam naar voren uit de uitkomsten van 11 onderzoeken onder in totaal bijna 68.000 mijnwerkers, die bij het werk aan radonconcentraties tot vele tienduizenden Bq/m^3 waren blootgesteld, en bij wie 2.700 sterfgevallen door longkanker werden vastgesteld. Recent bevolkingsonderzoek naar longkanker in relatie tot de blootstelling aan radon liet zien dat niet alleen blootstelling aan hoge concentraties risico's inhoudt. Uit de combinatie van onderzoek aan mijnwerkers en aan de algemene bevolking zou volgen dat een rechtlijnig verband tussen blootstelling aan radon en de kans op longkanker mag worden verondersteld bij concentraties van 150 Bq/m^3 of meer.

Op dit ogenblik lopen nog een aantal internationale epidemiologische onderzoeken waarin naar een verdere bevestiging voor deze laatste stelling wordt gezocht. Bij het vaststellen van veilige grenzen wordt aangenomen dat het gevonden rechtlijnig verband ook geldt bij lagere blootstellingsniveaus. Dit betekent dat ook lage dose een – weliswaar geringe – invloed kunnen hebben op het krijgen van kanker.

De kans op longkanker door blootstelling aan radon is, zoals gezegd, slechts met een ruime marge in te schatten. De Gezondheidsraad schatte in 2000, op basis van de meest recente inzichten, dat in Nederland 100 tot 1200 gevallen van longkanker per jaar toe te schrijven zijn aan radon. De meest waarschijnlijke schatting zou 800 bedragen, of circa 10% van het totale aantal van bijna 9.000 nieuwe gevallen per jaar. Vooral rokers lopen een risico omdat roken en blootstelling aan radon elkaar lijken te versterken bij het teweegbrengen van longkanker. De overige gevallen van longkanker zijn in hoofdzaak het directe gevolg van roken.

11 Effectiviteit van beleid in het buitenland

ICRP heeft in 1993 indicatief radonconcentraties vastgesteld waarboven het nemen van maatregelen om de blootstelling te beperken wordt aanbevolen. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen woningen, met een actieniveau te situeren tussen 200 en 600 Bq/m^3, en werklokaties, met 500 à 1500 Bq/m^3. Dit onderscheid wordt gemaakt vanwege het verschil in gemiddelde verblijfsduur. Met betrekking tot de categorie werklokaties wordt wel speciale aandacht gevraagd voor intensief gebruikte gebouwen zoals scholen. De Europese Commissie heeft in 1997 de aanbevelingen van ICRP op hoofdlijnen overgenomen.

Uit een inventarisatie in 15 EU lidstaten en 17 niet-EU staten uitgevoerd door het Zweedse stralingsbeschermingsinstituut blijkt dat in 1998 acht landen een concentratielimiet hanteren waarboven, in bestaande woningen, maatregelen genomen móeten worden. Elf landen hebben een dergelijke grens vastgesteld voor radon in nieuwbouw. De meeste van andere geënquêteerde landen hadden advieswaarden vastgesteld. Enkele landen hebben in hun bouwvoorschriften richtlijnen voor maatregelen tegen radon opgenomen. Zo is het in Ierland vereist voorzieningen te treffen die 'geactiveerd' kunnen worden als na voltooien van de woning de radonconcentratie te hoog blijkt te zijn. In Engeland gelden reeds sinds 1991 voor bepaalde gebieden bouwvoorschriften die vereisen dat beschermende maatregelen worden voorzien in nieuwe woningen. In 1999 is het aantal gebieden waarvoor deze voorschriften gelden uitgebreid.

De inventarisatie maakt verder duidelijk dat alleen waar metingen en maatregelen wettelijk verplicht worden gesteld programma's om de blootstelling aan radon terug te brengen, succesvol zijn. De enige uitzondering hierop vormen de USA waar uitgebreide informatie- en opleidingscampagnes worden georganiseerd. Zo werden in de USA in 1998 radonreducerende voorzieningen aangebracht in 43% van de nieuwe woningen in gebieden met een grote kans op hoge radonconcentraties. Verschillende landen besteden bijzondere aandacht aan radon in scholen, conform de aanbeveling van ICRP en

hebben zelfs limieten specifiek voor dit type lokaties. Voorbeelden zijn de VS, Israël, Zwitserland en Ierland. Zo moeten in Ierland aan het einde van 2001 alle scholen zijn doorgemeten en maatregelen genomen worden bij concentraties hoger dan 200 Bq/m^3.

Over de effectiviteit van voorschriften om de externe straling in gebouwen te beoordelen en te beheersen, is geen informatie gevonden. De EU heeft in 1999 een leidraad uitgebracht met prinicipes op basis waarvan de uitwendige stralingsdosis kan worden gecontroleerd. In het document is een formule voorgesteld om de uitwendige stralingsdosis te becijferen uit het gehalte aan nucliden in de materialen, en zijn doses gegeven waaronder geen regulering noodzakelijk is (0,3 mSv per jaar) of waarboven dit heel nadrukkelijk wel het geval zou moeten zijn (1,0 mSv per jaar). Oostenrijk heeft een normvoorschrift dat op een dergelijke formule gebaseerd is.

In Nederland komt slechts in een beperkt aantal woningen een hoge radonconcentraties voor en is ook de gemiddelde dosis door uitwendige bestraling relatief laag. De overheid heeft er voor gekozen om deze gunstige situatie ten opzichte van het buitenland zoveel als mogelijk te behouden *(zie tekstbox 1)*. Voor nieuwbouw gebeurt dit door een grens te stellen aan het stralingsniveau in het binnenmilieu. Voor bestaande bouw wordt gezond ventilatiegedrag gestimuleerd naast radonreducerende maatregelen die in lijn zijn met het streven naar duurzaam bouwen.

12 Samenvatting en conclusies

In Nederland is bijna de helft van de gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling gerelateerd aan ‘bouwen en wonen’. De aard en samenstelling van de gebruikte bouwmaterialen, en de toegepaste ventilatievoorzieningen en de wijze waarop deze voorzieningen worden gebruikt, bepalen het stralingsniveau. Gedurende het voorbije decennium zijn nieuwe inzichten ontstaan met betrekking tot het samenspel tussen de factoren die de stralingsbelasting beïnvloeden, en in de mogelijkheden die er zijn om de stralingsbelasting te reduceren. In dit document zijn deze nieuwe inzichten overzichtelijk samengebracht.

De jaargemiddelde stralingsbelasting door externe straling vanuit de bouwmaterialen van 0,3 à 0,4 mSv/j is in de loop der jaren naar schatting nauwelijks gewijzigd. Voortdurend beter isoleren van onze woningen, ontoereikende ventilatievoorzieningen en een verschuiving in toegepaste bouwmaterialen hebben wel geresulteerd in een stijging van de radonconcentratie. De gemiddelde radonconcentratie in recent gebouwde woningen is met bijna 30 Bq/m^3 50% hoger dan in woningen gebouwd vóór 1970. De toename ging gepaard met een verschuiving in het aandeel van de diverse bronnen van radon in de totale radonconcentratie. De hoeveelheid radon die vanuit de bodem en de kruipruimte de woning binnendringt, werd kleiner en de fractie uit bouwmaterialen nam significant toe. Een toename in het gebruik van beton, waaruit het radon makkelijker ontwijkt, heeft ook bijgedragen aan de stijging van de radonconcentratie.

In andere landen is de bodem over het algemeen veruit de grootste bron van radon en zijn maatregelen in nieuwbouwwoningen geheel gericht op het afsnijden van de radontoevoer uit de kruipruimte. In Nederland, waar bouwmaterialen de belangrijkste bron van radon zijn, dient een andere filosofie gevolgd te worden, wil men de blootstelling aan radon terugbrengen. Goede ventilatie is dan essentieel voor het garanderen van een lage radonconcentratie, en overigens ook belangrijk voor een goede

binnenluchtkwaliteit in het algemeen. Dit streven kan strijdig zijn met de wens om een energiezuinige woning te realiseren. Gebruik van andere bouwmaterialen of samenstellende bestanddelen ervan biedt de mogelijkheid om zowel het externe stralingsniveau als de blootstelling aan radon te reduceren.

Bij het renoveren van bestaande woningen dient men verdacht te zijn op de aanwezigheid van grote luchtlekken in de begane grondvloer. Bij isoleren van de woning dienen deze gedicht te worden, wil men voorkómen dat het radon uit de kruipruimte zich aanzienlijk meer ophoopt in de woning.

Gebruikte afkortingen

ICRP	International Commission on Radiological Protection
NRC	National Research Council, in deze 'Committee on Health Risks of Exposure to Radon (BEIR VI)'
RENA	Onderzoeksprogramma 'Reguleerbare vormen van natuurlijke achtergrondstraling'
SAWORA	Onderzoeksprogramma 'Stralingsaspecten van woonhygiëne en verwante radio-ecologische problemen'
STRATEGO	Onderzoeksprogramma 'Straling ten aanzien van de gebouwde omgeving'
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
VROM	Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer

Literatuur

1991

Hol G, J van Hulst, R van Heyningen & P de Jong
Stralingsaspecten van geïmporteerde gebroken natuursteen.
RWS-WW, rapport P-DWW-92-901, december 1991

van den Ham ER, RA de Heer & GHP Hol
De mogelijkheden voor en consequenties van verbetering van de kruipruimteventilatie als middel om de radonconcentratie in woningen te beperken.
DHV Bouw BV, Amersfoort, Maart 1991

1992

Ackers JG
Meting van de radonemissie uit bouwmaterialen.
Raadschap, rapport 92R01, Leersum, maart 1992

Ackers JG
Methoden voor het meten van radonconcentraties in lucht.
Raadschap, rapport 92R02, Leersum, maart 1992

Ackers JG
Methoden voor het bepalen van de radoninfiltratie in woningen.
Raadschap, rapport 92R03, Leersum, september 1992

Bosmans G
Inventarisatie mogelijke stralingsreductie door middel van het afdekken van bouwmaterialen.
Intron, rapport 92173, Sittard, september 1992

de Jong P
De experimentele mogelijkheden van een laboratoriumwoning.
TNO Radiologische Dienst, rapport RD-E/9202-303, Arnhem, februari 1992

de Meijer RJ & C Stapel
Radondoorlatendheid van (bouw)materialen.
KVI, rapport R-33, Groningen, maart 1992

Koopmans M & LW Put
Radon-relevante parameters.
KVI, rapport R-35, Groningen, april 1992

Pietersen HS & G Bosmans
Consequenties van binnenshuis stralingsreductie door middel van toepassing van portlandcement.
Intron, rapport 92376, Houten, december 1992

van den Ham ER
Meetstrategieën voor het bepalen van het effect van maatregelen ter beperking van de natuurlijke achtergrondstraling in woningen.
DHV Bouw BV, Amersfoort, april 1992

van Loon AJ
Achtergrondstraling op de voorgrond. Eindrapport van het onderzoekprogramma "Reguleerbare vormen van natuurlijke achtergrondstraling"(RENA).
Novem, Utrecht, 1992

Vrins E
Radonconcentraties in gebouwen anders dan woningen. Inventarisatie.
Woon|Energie, Gouda, mei 1992

1993

BB&H
Onderzoek financieel economische gevolgen reductiescenario's radon-222. Consequenties in woningen.
BB&H, Naarden, juli 1993

Blaauboer RO & R Heling
Trends en reductiescenario's voor Rn-222-concentraties in woningen.
RIVM, rapport 749231.001, Bilthoven, juli 1993

de Vries LJ & HARM van den Heiligenberg
Definitiestudie RAGE. Een systeem voor registratie en verwerking van RAdon GEgevens.
RIVM, rapport 749218.001, Bilthoven, juni 1993

International Commission on Radiological Protection
Protection against radon-222 at home and at work.
ICRP-Publication 65, Elsevier Science, Oxford, 1993

Kal HB, P de Jong & JC Phaff
Reductie van de stralingsdosis ten gevolge van radondochters door luchtbehandelingssystemen.
TNO Medisch Biologisch Laboratorium, rapport MBL 1993-22, Rijswijk, juni 1993

Koopmans M & RJ de Meijer
Radondoorlatendheid van bouwmaterialen. Een pilotstudie.
KVI, rapport R-46, Groningen, mei 1993

Phaff JC, HJM Cornelissen & W Kornaat
Effecten van maatregelen ter beperking van de natuurlijke achtergrondstraling in woningen. Onderzoek aan de druksluisvloer. Fase 1.
TNO-Bouw, rapport 93-BBI-R0532, april 1993

van Hulst JGA, GJH Beusen & P de Jong
Verandering van stralingseigenschappen van beton(producten). Een verkenning van de beïnvloedingsmogelijkheden.
DHV Bouw BV, rapport vH/Gbe/MTB-374, Amersfoort, december 1993

1994

de Meijer RJ, ER van der Graaf
Naar een radon-arm binnenhuismilieu.
Bouwfysica 5, 22–24, 1994

Donze G, E Vrins & A van Arkel
Radonconcentratie in gebouwen anders dan woningen. Verkennende metingen.
Woon|Energie, rapport 490, Gouda, januari 1994

Koopmans M
Meetstrategieën voor een landelijk onderzoek naar radonconcentraties in Nederlandse woningen.
KVI, rapport R-67, Groningen, juli 1994

NEN
Radioactiviteitsmetingen;Monsterneming van bodem.
NVN 5691, Delft, 1994

Nieboer NET
Haalbaarheid en effectiviteit van beleidsinstrumenten voor radonbeleid.
Research voor Beleid bv, Leiden, juli 1994

Phaff JC, PJ de Jong, HJM Cornelissen & LLM van Schijndel
Praktijktest van de druksluisvloer in een proefwoning.
TNO-Bouw, rapport 94-BBI-R0761, oktober 1994

Vierveijzer PLM
Radonreducerende maatregelen in niet-woongebouwen.
DHV AIB BV, Amersfoort, december 1994

Winder C, Jan Veeken, S Harris, B Greib, E Borremans & O de Vitry
Radon beleid in enkele omringende landen: concrete maatregelen bij overschrijding van actiewaarden.
ERM Nederland B.V., project 93.119, Zoetermeer, maart 1994

1995

Bosmans G, HS Pieterse, TJG Zwartkruis
Stralingsaspecten van geïmporteerde gebroken natuurgesteenten als grof toeslagmateriaal voor beton.

RWS/Dienst Weg- en waterbouwkunde, Grondstoffenreeks nr. 1995/11, Delft, 1995

de Jong P & W van Dijk
ECOLONIA: radonmetingen.
TNO Radiologische Dienst, rapport RD-E/9406-338, Arnhem, maart 1995

de Jong P, FAI Busscher & W van Dijk
ECOLONIA: dosistempometingen.
TNO Radiologische Dienst, rapport RD-E/9406-339, juni 1995

de Jong P & W van Dijk
Laboratoriumwoning: het effect van ventilatie en luchtdoorlatendheid op de radonconcentratie.
TNO Radiologische Dienst, rapport RD-I/9506-354, september 1995

NEN
Radioactiviteitsmetingen; Monstervoorbereiding van bodem, waterbodem en zuiveringsslib.
NVN 5695, Delft, 1995

Roelofs LMM & RB Wiegers
Eenvoudige vertaalslag van stralingseigenschappen van bouwmaterialen naar stralingsdosis.
KEMA Nucleair, rapport 49799-NUC 95-5358, Arnhem, december 1995

van der Spoel WH, ER van der Graaf, JG Messchendorp & RJ de Meijer
Final report: radon transport in soil, phase 2b, period until June 1995.
KVI, rapport R85, Groningen, 1995

1996

Albering HJ, JA Hoogewerff & JCS Kleinjans
Survey of Rn-222 concentrations in dwellings and soils in the Dutch Belgian border region.
Health Phys. 70, 64-69, 1996

Blaauboer RO & Smetsers RCGM
Variations in outdoor radiation levels in the Netherlands.
Proefschrift, Rijksuniversiteit Groningen, 1996

Bosmans G
Stralingsaspecten van gangbare bouwmaterialen: samenvattend rapport.
Intron, rapport 95373, Sittard, juli 1996

Colgan PA & J Gutierrez
National approaches to controlling exposure to radon
Environment International 22 Suppl. 1: 1083-1092, 1996

de Jong P, W van Dijk & JC Phaff
ECOLONIA: aanvullend onderzoek in woningen van het ontwerp Alberts & Van Huut.
TNO Radiologische Dienst, rapport RD-I/9611-375, Arnhem, november 1996

de Jong P, W van Dijk, JGA van Hulst & RJJ van Heijningen
The effect of the composition and production process of concrete on the 222Rn exhalation rate.
Environm. Int. 22, Suppl. 1, S-287-S293, 1996

NEN
Radioactiviteitsmetingen; Monsterneming en de bepaling van de over de tijd gemiddelde radonconcentratie in binnenlucht met behulp van vaste-stof kernspoordetectoren.
NVN 5693, Delft, 1996

Nieman HM, LEJJ Schaap & RAP van Herpen
Inventarisatie-onderzoek luchtdoorlatendheid begane grondvloeren van woningen.
Adviesbureau Nieman BV, rapport 951265-1, Utrecht, december 1996

Put LW, van der Graaf ER
Invoerparameters voor radontransportmodellen: een literatuurstudie.
KVI, rapport R92, Groningen, 1996

Schaap LEJJ
Effecten van maatregelen ter beperking van de natuurlijke achtergrondstraling in woningen.
Lichtveld Buis & Partners, rapport R43029A3.LS, Utrecht, februari 1996

VROM
Normstelling ioniserende straling voor arbeid en milieu.
Brief van de Staatssecretaris van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Tweede Kamer, Vergaderjaar 1996–1997, 21 483, nr. 21

Wiegers RB & LMM Roelofs
Uitwerken van het vertaalslagmodel ter vergroting van het inzicht in de relatie tussen verschillende parameters en de berekende dosisbijdrage.
IBR, rapport 96.21, Haelen, juli 1996

1997

Bosmans G
Radonexhalatie van 6 typen baksteen.
Intron, rapport 97122, Sittard, april 1997

Bosmans G
Optionele maatregelen ter reductie van de stralingseigenschappen van praktijkbeton.
Intron, rapport 96173, Sittard, december 1997

Cornelissen HJM & WF de Gids
Overzicht luchtdoorlatendheidsgegevens eengezinswoningen.
TNO, Rapport 97-BBI-R1295, Rijswijk, december 1997

Europese Commissie
Recommendations for the implementation of Title VII of the European Ba-sic Safety Standards concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources.
Ratiation Protection 88, Luxemburg, 1997

Hiemstra Y, P Stoop & J Lembrechts
The second Dutch survey on radon in dwellings: set-up of the project.
RIVM, Rapport 610058.005, Bilthoven, maart 1997

Lugg A & D Probert
Indoor radon gas: a potential health hazard resulting from implementing energy-efficiency measures.
Applied Energy 56, 93–196, 1997

Naismith S
Durability of radon remedial actions.
Radiation Protection Dosimetry 71, 215–218, 1997

van der Graaf ER, RJ de Meijer & LW Put
Toepassing van een folie op de bodem van de kruipruimte in combinatie met een bodemafzuigsysteem als maatregel tegen radoninfiltratie in woningen.
KVI, rapport R95, Groningen, juli 1997

1998

Janssen MPM, L de Vries, JC Phaff, ER van der Graaf, RO Blaauboer, P Stoop & J Lembrechts
Modelling radon transport in Dutch dwellings.
RIVM, rapport 610050.005, Bilthoven, december 1998

Schaap LEJJ, ER van der Graaf & G Bosmans
Stralingsprestatienorm. Vooronderzoek.
Lichtveld Buis & Partners, rapport R43 111A0.LS, Utrecht, juni 1998

Schaap LEJJ, G Bosmans, ER van der Graaf & ChF Hendriks
De Stralingsprestatienorm. Een prestatiemodel voor ioniserende straling in het woonmilieu.
AEneas, Best, 1998

Stoop P, P Glastra, Y Hiemstra, L de Vries & J Lembrechts
Results of the second Dutch national survey on radon in dwellings.
RIVM, Rapport 610058.006, Bilthoven, april 1998

van der Spoel WH, ER van der Graaf & RJ de Meijer
Foil coverage of a crawl-space floor: measurements and modelling of radon entry.
Health Phys. 74, 581–593, 1998

van der Spoel WH
Radon transport in sand: a laboratory study.
Proefschrift, Universiteit Groningen, maart 1998

1999

Åkerblom G
Radon legislation and national guidelines.
Statens strålskyddsinstitut, Rapport 99:18, Stokholm, Zweden, 1999

Committee on Health Risks of Exposure to Radon
Health effects of exposure to radon: BEIR VI.
National Academy Press, Washington, 1999

Europese Commissie
Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials.
Radiation Protection 112, Luxemburg, 1999

Steger F & K Grün
Radioactivity in building materials. ÖNORM S 5200: a standard in Austria to limit natural radioactivity in building materials (revised and definite version).
In: 'Radon in the living environment', Athene, April 1999, abstract 027

van der Graaf ER, I Cozmuta & RJ de Meijer
The influence of 1) dimensions and 2) effectiveness of four-sided cover-age of concrete test cubes on the determination of their exhalation rates.
KVI, rapport R110, Groningen, mei 1999

Versteeg H & LEJJ Schaap
Onderzoek woningventilatie en radonconcentratie.
Lichtveld, Buis & Partners, rapport R43 113A2.hv, Utrecht, april 1999

2000

Blaauboer RO & MJM Pruppers
Externe straling van bouwmaterialen: resultaten van MARMER-berekeningen aan een referentiewoning.
RIVM, rapport 610050.006, Bilthoven, juli 2000

Gezondheidsraad
Radon: toetsing rapport 'BEIR IV'
Den Haag: gezondheidsraad, 2000; publicatie nr. 2000/05.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
Sources and effects of ionizing radiation. Exposure from natural radiation sources.
Volume 1, Annex B, United Nations, New York, Publicatie E.00.IX.3, 2000

van der Graaf ER & R ten Have
Bepaling van het gehalte aan 226Ra, 228Th, 228Ra en 40K in 43 monsters bouwmateriaal en van de radonexhalatie van 54 monsters bouwmateriaal.
KVI, rapport S70, Groningen, 2000

2001

de Jong P, JFB van Gellecum, W van Dijk, JB Dijkstra, ER van der Graaf, TJH de Groot, R ten have & M Swinkels
Bepaling van de stralingseigenschappen van bouwmaterialen.
NRG, rapport K5002/01.IM260, Arnhem, juli 2001

de Jong P & W van Dijk
Factors affecting the radiation dose to inhabitants in a small new housing-estate in the Netherlands.
Science of the total Environment 272, 141-142, 2001

Lembrechts J, M Janssen & Stoop P
Ventilation and radon transport in Dutch dwellings: computer modelling and field measurements.
Science of the total Environment 272, 73–78, 2001

NEN
Radioactiviteitsmetingen - Bepaling van de natuurlijke radioactiviteit in steenachtige bouwproducten met behulp van halfgeleider-gammaspectro-metrie.
NEN 5697, Delft, augustus 2001

NEN
Radioactiviteitsmetingen - Methode voor de bepaling van de radonexhalatiesnelheid van steenachtige bouwproducten.
NEN 5699, Delft, augustus 2001

NEN
Stralingsprestatie van een woonfunctie – Bepalingsmethode
NEN 7181, Delft, augustus 2001

van der Graaf ER, I Cozmuta & RJ de Meijer
Moisture dependence of radon release from concrete.
Proc. 3e Eurosymp. 'Protection against radon', Luik, 10-11 mei 2001, pp. 95–100

van der Graaf ER, LEJJ Schaap & G Bosmans
Radiation performance index for Dutch dwellings: consequences for some typical situations.
The Science of the Total Environment 272, 323–335, 2001

Wichers Hoeth AW
Regeleffecttoets SPN.
DHV, rapport PM-MM20010122, Amersfoort, maart 2001