

RIVM rapport 610050 006

**Externe straling van bouwmaterialen:  
Resultaten van MARMER-berekeningen aan  
een referentiewoning**

R.O. Blaauboer en M.J.M. Pruppers

juli 2000

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Directoraat-Generaal Milieubeheer, Directie Stoffen, Afvalstoffen en Straling, in het kader van project 610050 'Ondersteuning Nationaal Beleid straling', mijlpaal 'SPN externe blootstelling'.

## Abstract

The so-called SPN (Stralings Prestatie Norm), a 'radiation performance standard', is being developed within the framework of the radon policy in the Netherlands. The radiation performance of a living area is the result of the calculation of the effective dose rate by external radiation.

The discussion on necessary simplifications in the calculations has pointed to a need for estimates of the actual contribution to the dose rate of external radiation from building materials. Two questions play an important role. How do building type and dimension influence the dose rate? And which parts of a dwelling contribute to the dose rate in specific rooms? Here, the results of using the MARMER model are presented to provide detailed calculations in answer to these questions for several versions of a reference dwelling.

From the calculations, where type and thickness of the dividing wall between two bedrooms is varied, it was found that the wall shields as much radiation from walls in adjacent rooms as it contributes itself. Between 20 and 30% of the dose rate is due to building materials in other rooms. When adjacent dwellings are included in the calculations, it is estimated that for most of the versions of the reference dwelling the dose rate would increase by only 5%. For the version with a timber frame this increase could be considerably higher.

# Inhoud

Samenvatting.....	4
1 Inleiding.....	5
1.1 Probleemstelling.....	5
1.2 Doel en vraagstelling.....	5
1.3 Aanpak en leeswijzer .....	5
2 Referentiewoning en rekenmethodiek .....	6
2.1 Referentiewoning .....	6
2.2 Bouwmaterialen .....	9
2.3 MARMER.....	10
2.3.1 Beschrijving van het model .....	10
2.3.2 Beperkingen en toepassingsdomein van het model .....	10
2.3.3 Effectieve dosis .....	11
2.4 Toepassing van MARMER.....	12
2.4.1 Indeling modelwoning .....	12
2.4.2 Bouwmaterialen en radioactiviteit .....	13
2.4.3 Specifieke modelparameters .....	14
3 Resultaten en discussie .....	15
3.1 Ruimtelijke verdeling van de dosis.....	15
3.2 Dosisbijdrage componenten en bouwmaterialen .....	17
3.3 Invloed van de dikte van een tussenmuur .....	18
3.4 Bijdragen van aangrenzende ruimten.....	21
3.5 Vergelijking met gegevens uit de literatuur .....	22
4 Conclusies.....	24
Referenties .....	25
Bijlage 1 Verzendlijst .....	27

## Samenvatting

In het kader van het Nederlandse radonbeleid wordt de zogenaamde Stralingsprestatienorm (SPN) ontwikkeld. De stralingsprestatie (SP) van een verblijfsruimte of -gebied is het resultaat van een berekening volgens de SPN. Onderdeel van de SPN is een berekening van het dosistempo door externe straling.

In de discussies over noodzakelijke vereenvoudigingen in de berekeningen bestaat er behoefte aan schattingen van de werkelijke bijdrage aan het dosistempo door externe straling afkomstig van bouwmaterialen. Twee vragen spelen daarbij een belangrijke rol. Hoe beïnvloeden het type en de afmetingen van de bouwelementen het dosistempo? En welke onderdelen van de woning dragen wel en welke nauwelijks bij aan het dosistempo in bepaalde ruimten? Dit rapport bevat de resultaten van gedetailleerde berekeningen met het model MARMER voor diverse varianten van een referentiewoning.

Uit berekeningen waarbij het type bouw materiaal en de dikte van een tussenmuur tussen twee slaapkamers is gevarieerd, blijkt dat de tussenmuur ongeveer evenveel straling, afkomstig van wanden uit aangrenzende ruimten, afschermt als de muur zelf aan het totale dosistempo toevoegt. Tussen 20 en 30% van het dosistempo wordt door bouwmaterialen in andere ruimten veroorzaakt. Indien ook naastgelegen woningen zouden worden meegenomen, zou dat voor de meeste varianten slechts een toename van het dosistempo met naar schatting 5% betekenen. Voor de variant waarin veel hout is verwerkt, zou dit echter aanzienlijk meer kunnen zijn.

# 1 Inleiding

## 1.1 Probleemstelling

In het kader van het Nederlandse radonbeleid heeft de overheid besloten om de zogenaamde Stralingsprestatienorm (SPN) te gaan ontwikkelen [1]. Lichtveld Buis & Partners BV (LBP), Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) en Intron hebben in 1998 samen een vooronderzoek uitgevoerd, dat diverse aanbevelingen betreffende deze norm heeft opgeleverd [2]. Onderdeel van de SPN is een berekening van het dosistempo als gevolg van radon in de woning en externe straling afkomstig van bouwmaterialen. Het berekende resultaat dient te worden getoetst aan een grenswaarde, die ook wel Stralingsprestatie-eis (SPE) wordt genoemd. De nog vast te stellen grenswaarde zal waarschijnlijk in het Bouwbesluit worden opgenomen.

Het onderzoek dat in het voorliggende rapport is beschreven, beperkt zich tot het dosistempo als gevolg van externe straling afkomstig van bouwmaterialen. Het voor de SPN voorgestelde en door KVI ontwikkelde model voor het berekenen van de effectieve dosis, verder te noemen het KVI/LBP-model, gaat uit van een sterk vereenvoudigde situatie [2]. Het dosistempo dient in de uiteindelijke SPN volgens het KVI/LBP-model te worden berekend op basis van de in de bouwmaterialen aanwezige activiteitsconcentraties van de verschillende aanwezige radionucliden. Daarbij moet van een homogeen diffuus stralingsveld worden uitgegaan en de invloed van aangrenzende ruimten hoeft niet te worden meegenomen.

## 1.2 Doel en vraagstelling

In de discussies over de voorgestelde vereenvoudigingen is er behoefte aan schattingen van de werkelijke bijdrage van externe straling afkomstig van bouwmaterialen aan de effectieve dosis in een referentiewoning. Twee vragen spelen daarbij een belangrijke rol: hoe beïnvloeden het type en de afmetingen van de bouwelementen het dosistempo, en welke onderdelen van de woning dragen wel en welke nauwelijks bij aan het dosistempo in bepaalde ruimten?

## 1.3 Aanpak en leeswijzer

Na herhaaldelijk overleg met de Projectgroep SPN, bestaande uit vertegenwoordigers van overheid en bedrijfsleven, is een keuze gemaakt van de door te rekenen referentiewoning en de verschillende varianten daarvan (hoofdstuk 2). Vervolgens is met het model MARMER voor deze varianten de effectieve dosis op diverse locaties in diverse ruimten berekend. De resultaten van de berekeningen worden in hoofdstuk 3 gepresenteerd en bediscussieerd.

Voorlopige resultaten van berekeningen van de dosis als functie van de dikte van één van de tussenwanden zijn aan LBP geleverd. LBP heeft vervolgens het KVI/LBP-model aangepast en voor de gekozen varianten de effectieve dosis berekend. LBP zal de resultaten van de berekeningen met het KVI/LBP-model in de definitieve versie van het LBP-rapport 'Gevoeligheidsanalyse SPN' opnemen [3].

## 2 Referentiewoning en rekenmethodiek

### 2.1 Referentiewoning

Gezien de omvang van de berekeningen per woningtype is er voor gekozen om van een beperkte set referentiewoningen uit te gaan. De bouwmaterialen die in de set referentiewoningen, alle van het type tussenwoning, zijn toegepast, worden geacht representatief te zijn voor de verschillende bouwmaterialen die in de praktijk voorkomen. In Tabel 1 is deze lijst weergegeven, met een beknopte omschrijving van de, voor de verschillende bouwdelen specifiek te gebruiken, bouwmaterialen.

*Tabel 1 Samenvatting van de eenentwintig doorgerekende referentiewoningen. Per referentiewoning is tevens de variant volgens LBP [3] gegeven. In alle gevallen behalve variant 10, is het buitenblad van voor- en achtergevel halfsteens baksteen.*

beschouwde vertrekken	bouwdeel	bouwwijze <sup>*)</sup>
woonkamer, slaapkamers (Variant 1)	Woningscheidende wand	230 mm beton
	Binnenblad voor- en achtergevel	90 mm beton
	Begane-grondvloer	Betonnen systeemvloer (250 kg.m <sup>-2</sup> )
	Verdiepingsvloeren	Betonnen systeemvloer (540 kg.m <sup>-2</sup> )
	Binnenwanden	Cellenbeton (65 kg.m <sup>-2</sup> )
woonkamer, slaapkamers (Variant 2)	Woningscheidende wand	230 mm beton
	Binnenblad voor- en achtergevel	100 mm kalkzandsteen
	Begane-grondvloer	Betonnen systeemvloer (250 kg.m <sup>-2</sup> )
	Verdiepingsvloeren	Betonnen systeemvloer (540 kg.m <sup>-2</sup> )
	Binnenwanden	Cellenbeton (65 kg.m <sup>-2</sup> )
woonkamer, slaapkamers (Variant 4)	Woningscheidende wand	300 mm kalkzandsteen massief
	Binnenblad voor- en achtergevel	100 mm kalkzandsteen
	Begane-grondvloer	Betonnen systeemvloer (250 kg.m <sup>-2</sup> )
	Verdiepingsvloeren	Betonnen systeemvloer (540 kg.m <sup>-2</sup> )
	Binnenwanden	Cellenbeton (65 kg.m <sup>-2</sup> )
woonkamer, slaapkamers (Variant 6)	Woningscheidende wand	2x120 mm kalkzandsteen ankerloos
	Binnenblad voor- en achtergevel	100 mm kalkzandsteen
	Begane-grondvloer	Betonnen systeemvloer (250 kg.m <sup>-2</sup> )
	Verdiepingsvloeren	Betonnen systeemvloer (540 kg.m <sup>-2</sup> )
	Binnenwanden	Cellenbeton (65 kg.m <sup>-2</sup> )
woonkamer, slaapkamers (Variant 8)	Woningscheidende wand	2x200 mm cellenbeton
	Binnenblad voor- en achtergevel	150 mm cellenbeton
	Begane-grondvloer	Betonnen systeemvloer (250 kg.m <sup>-2</sup> )
	Verdiepingsvloeren	Betonnen systeemvloer (540 kg.m <sup>-2</sup> )
	Binnenwanden	Cellenbeton (65 kg.m <sup>-2</sup> )
woonkamer, slaapkamers (Variant 10)	Woningscheidende wand	Hsb wand <sup>†)</sup> (2x12,5 mm gips per zijde)
	Binnenblad voor- en achtergevel	Hsb-binnenblad <sup>†)</sup> (12,5 mm gips)
	Begane-grondvloer	Betonnen systeemvloer (250 kg.m <sup>-2</sup> )
	Verdiepingsvloeren	Houten verdiepingvloer <sup>†)</sup> (20 mm) met gipsplafond (10 mm)
	Binnenwanden	Hsb-binnenwanden (12,5 mm gips)
	Buitenblad voor- en achtergevel	10 mm houten beplating (400 kg.m <sup>-3</sup> )

beschouwde vertrekken	bouwdeel	bouwwijze <sup>*)</sup>
Slaapkamers (Variant 1a1)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Beton (10 cm)
slaapkamers (Variant 1a2)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Cellenbeton (10 cm)
slaapkamers (Variant 1a3)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Kalkzandsteen (10 cm)
slaapkamers (Variant 1b1)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Beton (20 cm)
slaapkamers (Variant 1b2)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Cellenbeton (20 cm)
slaapkamers (Variant 1b3)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Kalkzandsteen (20 cm)
slaapkamers (Variant 1c1)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Beton (30 cm)
slaapkamers (Variant 1c2)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Cellenbeton (30 cm)
slaapkamers (Variant 1c3)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Kalkzandsteen (30 cm)
slaapkamers (Variant 1d1)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Beton (1 cm)
slaapkamers (Variant 1d2)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Cellenbeton (1 cm)
slaapkamers (Variant 1d3)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Kalkzandsteen (1 cm)
slaapkamers (Variant 1e1)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Beton (5 cm)
slaapkamers (Variant 1e2)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Cellenbeton (5 cm)
slaapkamers (Variant 1e3)	Als Variant 1, maar: binnenwand	Kalkzandsteen (5 cm)

<sup>\*)</sup> Beton (2350 kg.m<sup>-3</sup>), cellenbeton (650 kg.m<sup>-3</sup>), baksteen, kalkzandsteen, dakpannen (1750 kg.m<sup>-3</sup>), gipsplaat (1000 kg.m<sup>-3</sup>), glas (2500 kg.m<sup>-3</sup>), hout (400 kg.m<sup>-3</sup>)

<sup>#)</sup> Bij houtskeletbouw (hsb) wordt bij woningscheidende wanden het oppervlak voor 10% door stijlen van 20 cm dik ondersteund; bij de binnenspouw voor- en achtergevel is dit ook 10%, maar 15 cm dik stijl- en regelwerk; voor de vloer wordt 15% van het oppervlak uitgemaakt door balken met een dikte van 17 cm

De varianten 1a1 t/m 1e3 wijken slechts in zoverre van variant 1 af dat de tussenwanden van de woning op de eerste verdieping in dikte (1, 5, 10, 20, 30 cm) en type bouw materiaal (beton, cellenbeton, kalkzandsteen) verschillen. Deze subvarianten zijn toegevoegd om het effect van bouw materiaal en dikte op het dosistempo te onderzoeken.

Voor de maatvoering is zoveel als mogelijk bij de tekeningen in het LBP-rapport [3] en het originele DHV-rapport [4] aangesloten en zijn overigens aannamen gemaakt die aansluiten op de zogenaamde GBR2-referentiewoning [5] die veel op de 'DHV-referentiewoning' lijkt. Zo is bij gebrek aan gegevens voor de fundering aangenomen dat deze bestaat uit betonnen 'binnen en buiten' muren die tot 82 cm onder het vloeroppervlak doorlopen (GBR2 aanname); de tussenmuren hebben geen gemodelleerde fundering (doorlopende kruipruimte).

Overigens moet hier worden vermeld dat het hier toepassen van sommige combinaties van bouw materiaal en dikte daarvan slechts imaginair is. Voorbeelden zijn de tussenwanden van 1 cm die slechts zo gekozen zijn om de eventuele combinatie van afscherming en bron te kunnen beschouwen als functie van de dikte van de wand.

Een plattegrond van de referentiewoning is weergegeven in Figuur 1 [3].

Bij de hier beschreven berekeningen is een 'leeg' huis als basis genomen. Dat wil zeggen dat geen invloed van meubilair, specifiek behang, aftimmering, betegeling of andere afwerking in de berekeningen is betrokken. Ook de in de plattegrond weergegeven badkameraccessoires en het keukenblok zijn niet in de berekening opgenomen. Wel zijn zowel de externe als interne deuren verdisconteerd, evenals de ruiten. Bij Variant 10 is tevens voor het houten stijl- en regelwerk rekening gehouden met de oppervlaktefractie die uit hout bestaat en met de dikte van stijlen en vloerbalken. Het aantal balken en de positionering in het huis zijn vrij willekeurig gekozen (zie ook paragraaf 2.4). Er wordt echter van deze bouw delen geen grote invloed op het dosistempo verwacht (zie hoofdstuk 3 voor verdere informatie).



*Figuur 1 Schematische weergave van de referentie tussenwoning, zoals die is gehanteerd in dit rapport. De aangegeven maten zijn in mm. Ten behoeve van de dosisberekeningen is het gehele huis gemodelleerd, dosistempi zijn slechts berekend voor de begane grond en eerste verdieping, in beide gevallen op 1 meter boven het vloeroppervlak.*



## 2.2 Bouwmaterialen

De woningen worden alle geacht uit slechts een beperkt aantal bouwmaterialen te zijn opgebouwd. In Tabel 1 is per referentiewoning aangegeven van welk bouw materiaal de verschillende bouwdelen zijn gemaakt en welke hun dikte is. Hierna volgt nadere informatie over de genoemde bouwmaterialen. De toegepaste dichtheden zijn daarbij afgestemd met LBP [3].

### *Beton*

Normaal beton bevat de elementen zuurstof (ca. 50 massa%), silicium (ca. 30%), calcium (ca. 8%) en aluminium (ca. 5%) en geringe hoeveelheden kalium (2%), natrium (1,5%) en ijzer (1%): zie bijvoorbeeld [6]. Voor de dichtheid is  $2350 \text{ kg.m}^{-3}$  aangenomen [6].

### *Baksteen/kleiproducten (dakpannen)*

Voor baksteen (kleiproducten) is de chemische formule van 'average sediment' uit [7] gebruikt:  $\text{SiO}_2$  (ca. 60%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ca. 14%),  $\text{CaO}$  (ca. 6%),  $\text{CO}_2$  (ca. 5%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (ca. 3%),  $\text{H}_2\text{O}$  (ca. 3%) en sporen van diverse andere oxiden (elementaire samenstelling: ca. 50 massa% zuurstof, 27% silicium, 8% calcium, 7% aluminium, 2,4% kalium, 2,1% koolstof, 1,6% magnesium, 1,2% ijzer) en is een dichtheid van  $1750 \text{ kg.m}^{-3}$  aangenomen.

### *Kalkzandsteen*

Voor kalkzandsteen is de chemische formule van 'average sandstone' uit [7] gebruikt:  $\text{SiO}_2$  (ca. 78%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (ca. 5%),  $\text{CaO}$  (ca. 6%),  $\text{CO}_2$  en sporen van diverse andere oxiden (elementaire samenstelling: ca. 52 massa% zuurstof, 37% silicium, 4% calcium, 2,5% aluminium, 1,4% koolstof, 1,1% kalium en 1% ijzer), en is een dichtheid van  $1750 \text{ kg.m}^{-3}$  aangenomen.

### *Cellenbeton*

Voor cellenbeton is een gelijke samenstelling als bij gewoon beton aangenomen. Alleen de dichtheid wijkt af:  $650 \text{ kg.m}^{-3}$ .

### *Gips*

Voor gips is de chemische formule  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (elementaire samenstelling: ca. 56 massa% zuurstof, 23% calcium, 19% zwavel en 2,5% waterstof) gebruikt en een dichtheid van  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$ .

### *Hout*

Voor hout is de chemische formule van cellulose ( $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_x$ ) (elementaire samenstelling: ca. 49 massa% zuurstof, 44% koolstof en 6% waterstof) gebruikt [8] en is een dichtheid aangenomen van  $400 \text{ kg.m}^{-3}$ .

### *Glas*

Glas voor ruiten bestaat voor ongeveer 75% uit  $\text{SiO}_2$  en voor ongeveer 25% uit  $\text{Na}_2\text{O}$  en  $\text{CaO}$  (elementaire samenstelling: ca. 47 massa% zuurstof, 34% silicium, 10,5% Na en 9,5% calcium; volgens [9]) en heeft een dichtheid van  $2500 \text{ kg.m}^{-3}$ .

### *Lucht*

Hoewel het geen bouw materiaal is, speelt lucht een rol in het verstrooien en absorberen van straling. De lucht wordt geacht te bestaan uit stikstof (80%) en zuurstof (20%), met een dichtheid van ca.  $1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ .

## 2.3 MARMER

### 2.3.1 Beschrijving van het model

Om het dosistempo  $D(r_d)$  door externe straling van bouwmaterialen op een specifieke locatie  $d$  op een afstand  $r$  van de bron,  $r_d$ , te kunnen inschatten, is het model MARMER toegepast [10,11,12,13,14]. MARMER maakt gebruik van een zogenaamd point-kernel afschermingsmodel (zie formule [1]).

$$D(\vec{r}_d) = \int_{V_s} \int_0^\infty B(Z, \sum_i (\mathbf{m}_i(E) \cdot r_i), E) \cdot R(E) \cdot S_V(\vec{r}_s, E) \cdot \frac{\exp(-\sum_i (\mathbf{m}_i(E) \cdot r_i))}{4\mathbf{p}(\sum_i r_i)^2} dE d\vec{r}_s \quad [1]$$

Het dosistempo door de niet-verstrooide straling wordt daarbij berekend met een kernel, een functie die het verband met de afstand  $r$  (tussen bron en dosislocatie) en de afschermende werking van de tussenliggende materie beschrijft. De bijdrage van de verstrooide straling wordt hierin verwerkt door een zogenaamde buildup factor  $B$ , die afhankelijk is van het atoomnummer  $Z$  van het afschermende materiaal  $i$ , de weglengte door het materiaal,  $r_i$  (tussen locaties  $\vec{r}_s$  en  $\vec{r}_d$ ), en de energie van de invallende niet-verstrooide straling,  $E$ . De afscherming, door de tussenliggende materie, en verzwakking, door de ruimtelijke uitbreiding, is in de laatste factor (de breuk) ondergebracht. Overigens is het berekende dosistempo natuurlijk functie van de sterkte van de bron,  $S_V$  (aantal gamma emissies per seconde, volume eenheid en energie interval), die op haar beurt (bij inhomogene volume bronnen) weer functie is van locatie  $\vec{r}_s$  en energie  $E$ , en de aangenomen receptor respons,  $R(E)$  (dit kan een detector zijn in het geval van een gemodelleerde meting of de mens in het geval van een dosismodellering voor de mens). Voor de hier beschreven berekeningen is de effectieve dosis voor de volwassen mens volgens ICRP-60 [15] als receptor respons gehanteerd (zie ook paragraaf 2.3.3).

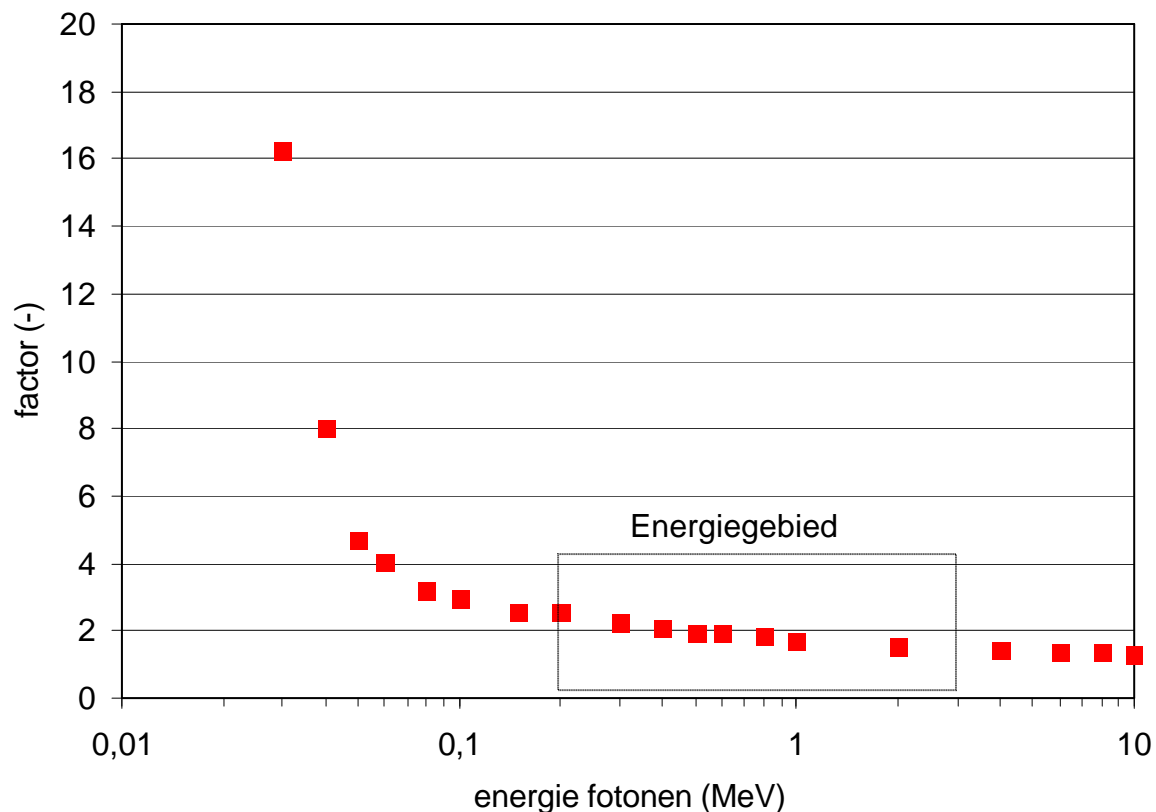
Voor een bron, zoals bijvoorbeeld een muur, die tevens een compleet energiespectrum uitzendt (een scala aan radionucliden zendt een spectrum aan gamma-energieën uit), dient, zoals aangegeven, deze point-kernel functie nog te worden geïntegreerd over het gehele volume  $V_s$  van de muur en over alle voor het specifieke nuclide van belang zijnde gamma-energieën  $E$ .

### 2.3.2 Beperkingen en toepassingsdomein van het model

Het model is in eerste instantie ontwikkeld om berekeningen te doen aan afschermingen in bestralingsruimten en transportcontainers voor gebruikte brandstofstaven. In dergelijke gevallen zijn bronnen en afschermende materialen duidelijk van elkaar te onderscheiden. Bij de hier beschreven woningen zijn de bronnen en de afschermende materialen hetzelfde. Validatie van het model heeft vooral plaatsgevonden met meetdata van bestralingsfaciliteiten en niet met meetdata in woningen. Omdat de berekeningen, zoals die hier worden beschreven, zich in een niet eerder betreden modelgebied bevinden, is in het hoofdstuk 'Resultaten en discussie' nader op de betrouwbaarheid van en onzekerheden in de resultaten ingegaan.

### 2.3.3 Effectieve dosis

Sinds de ontwikkeling van MARMER zijn er wijzigingen in de definitie van de te hanteren dosis doorgevoerd. Daarom is er een kalibratie op de resultaten van het model uitgevoerd. De door MARMER gehanteerde dosis is namelijk gebaseerd op berekeningen met het DOSE programma uit de beginjaren tachtig [16], terwijl de hier gepresenteerde data de effectieve dosis volgens ICRP-60 [15] betreffen. Om een kalibratiefactor vast te stellen, is in Figuur 2 de verhouding tussen het dosistempo volgens MARMER en het effectieve-dosistempo volgens ICRP-60 versus de energie van de gamma-fotonen tegen elkaar uitgezet. In het energiegebied waarin de natuurlijke radionucliden in bouwmaterialen hun gammastraling uitzenden, blijkt er slechts een geringe variatie te bestaan. Omdat in de hier beschreven resultaten een reeks van radionucliden tegelijkertijd aanwezig is, treedt er zelfs nog een zekere middeling op en kan volstaan worden met een kalibratiefactor 2, d.w.z. dat de dosistempi volgens MARMER door 2 gedeeld moeten worden om een effectieve-dosistempo te verkrijgen. Zoals uit de figuur volgt, lopen de dosistempi vooral uiteen bij lage tot zeer lage energieën van de fotonen. Bij dergelijke lage energieën is de effectieve dosis echter ook laag, omdat de fotonen niet of nauwelijks meer in het lichaam doordringen.



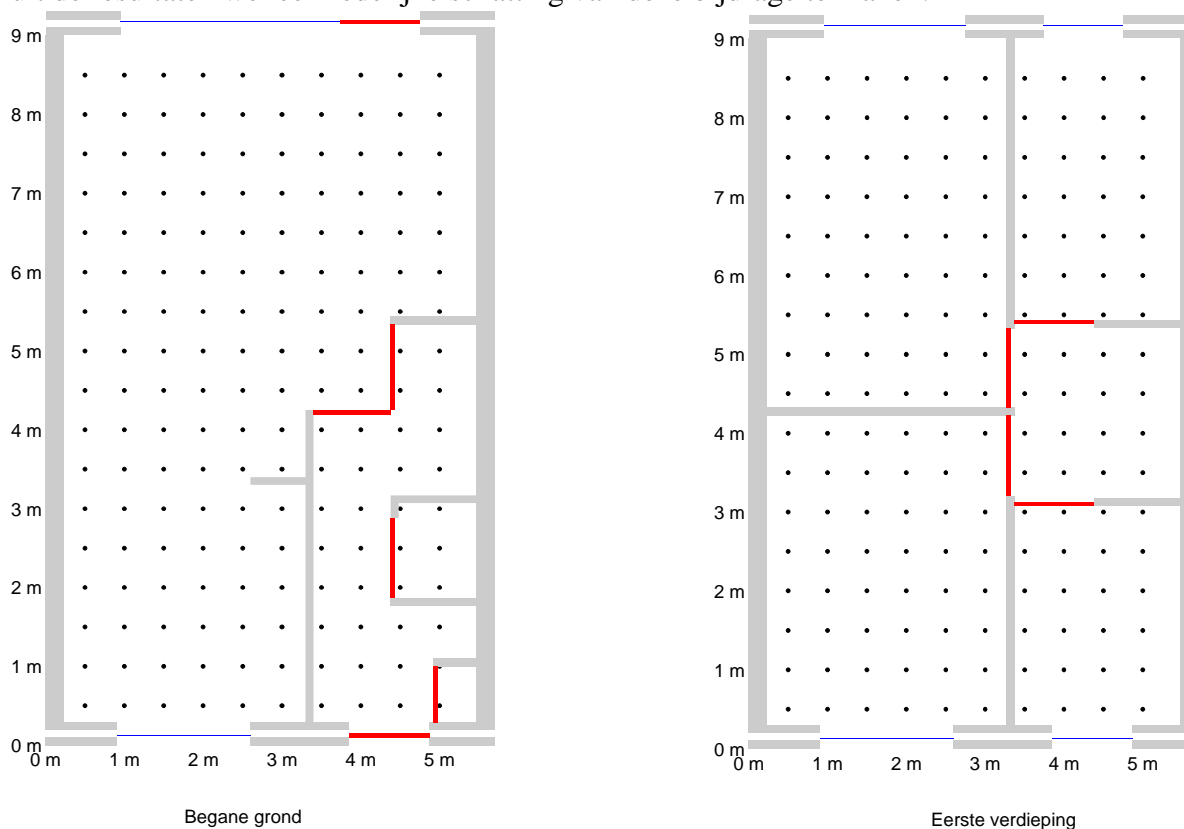
*Figuur 2 Dosistempo volgens MARMER gedeeld door het dosistempo volgens ICRP-60 ([17]). Data zijn voor een isotrope aanstralingsgeometrie. Tevens is het energiegebied aangegeven waarbinnen de hier toegepaste radionucliden hun gammastraling uitzenden.*

## 2.4 Toepassing van MARMER

### 2.4.1 Indeling modelwoning

De referentiewoningen zijn beschreven in invoerbestanden voor het model. Daartoe zijn van alle bouwelementen de afmetingen en het type bouw materiaal opgenomen. Diverse (sub)elementen, zoals ‘achter-binnenmuur onder het raam’, ‘achter-binnenmuur naast het raam’ en ‘achter-binnenmuur boven het raam’, zijn samengebracht in aparte invoerzones, zoals bijvoorbeeld ‘de binnenmuur aan de achterzijde van de woning’. In een dergelijke zone zijn dan de uitsparingen voor ramen en deuren aangebracht en deze zijn op hun beurt als invoerzone toegevoegd. Zo is een referentiewoning opgebouwd uit meer dan honderd deelelementen die in 60 invoerzones zijn samengebracht. Voor referentiewoning 10 bedraagt dit aantal vanwege het extra houtwerk zelfs 72. Het voordeel van een dergelijk groot aantal invoerzones is dat, in de resultaten, ook onderscheid gemaakt kan worden naar de bijdragen afkomstig van deze verschillende zones. Zo kan bijvoorbeeld de bijdrage aan het dosistempo van de buitenmuur aan de voorzijde van het huis worden bepaald, maar ook die van de binnenmuur aan de achterzijde en de invloed van de begane-grondvloer op het dosistempo op de eerste verdieping.

Een woning is van fundament tot en met het dak beschreven. Naastgelegen woningen zijn buiten de modelbeschrijving gelaten. Het is daarom niet zonder meer mogelijk om de invloed van naastliggende woningen op het dosistempo in de modelwoning te bepalen. Overigens is uit de resultaten wel een redelijke schatting van deze bijdrage te maken.



*Figuur 3 Begane grond en eerste verdieping van variant 1 van de referentiewoning. De grijze vlakken en lijnen zijn de muren, de zwarte dikke lijnsegmenten de deuren, de dunnere zwarte segmenten de ramen. De punten zijn de locaties waarvoor het dosistempo is berekend: een grid van 50x50 cm<sup>2</sup>. De voorzijde van de woning is aan de onderzijde van de figuur.*

In de beschrijving van de woning (zie ook Figuur 3) is rekening gehouden met spouwmuren, maar niet met eventueel toegepast isolatiemateriaal in de spouw of onder het dak. Gezien de geringe dichtheid en daarmee geringe afscherming van de hiervoor gebruikte materialen (bv. steenwol) en de veelal lage concentraties van radionucliden van natuurlijke oorsprong in deze materialen en dus ook een geringe dosisbijdrage, wordt geen grote invloed op het dosistempo in de woning verwacht (zie ook nadere onderbouwing in paragraaf 3.2). De deuren worden geacht van 5 cm dik hout te zijn en ze zijn gesloten. De ruiten zijn van 1 cm dik glas. Er is hier voor gekozen om dubbel glas als één laag te modelleren.

Voor variant 10, waarin de zogenaamde houtskeletbouw (hsb) is toegepast, zijn de muren voorzien van stijl- en regelwerk: stijlen van 20 cm x 10 cm in tussenmuren en 15 cm x 7,8 cm in de spouwmuren voor en achter. De vloeren van de eerste en tweede verdieping zijn voorzien van vloerbalken: 17 cm x 10 cm. De dikte van de diverse balken en stijlen is afgestemd met de modelwoningen volgens LBP. De overige maten zijn niet direct gegeven, maar zijn afgestemd op een gemiddeld oppervlak van 10% van de wand (tussenmuren en spouwmuren) en 15% van het vloeroppervlak. Er is voor gekozen om de diverse balken egaal te verdelen over respectievelijk de muren en de vloer. Verder is gekozen voor een positionering van de vloerbalken van voorzijde naar achterzijde van de woning, omdat dit praktischer was voor de berekening. Bij een eventuele invloed van het houtwerk op het dosistempo zou alsnog een meer juiste beschrijving van maatvoering en positionering van het houtwerk gemaakt kunnen worden.

Bij gebrek aan gegevens over de fundering is aangenomen dat deze bestaat uit betonnen binnen- en buitenmuren die tot 82 cm onder het vloeroppervlak doorlopen (GBR2 aanname); de tussenmuren hebben geen gemodelleerde fundering (doorlopende kruipruimte).

## 2.4.2 Bouwmaterialen en radioactiviteit

Per bouw materiaal is er veelal een scala aan mogelijkheden wat betreft de activiteitsconcentratie van natuurlijke radioactieve isotopen. Zo is er bij baksteen een grote afhankelijkheid van de oorsprong van het basismateriaal klei. Voor beton en betonproducten kan naast de basisgrondstoffen ook een bijdrage resulteren van toevoegingen, zoals bijvoorbeeld hoogovenslakken. Om toch een zekere standaard activiteitsconcentratie voor het uitvoeren van verdere berekeningen te hebben, zijn er in SPN-kader voorlopige, zogenaamde forfaitaire, waarden vastgesteld.

*Tabel 2 Voorlopige forfaitaire waarden voor de activiteitsconcentratie van enkele radionucliden van natuurlijke oorsprong in gereed bouw materiaal [3]*

materiaal-soort	forfaitaire waarden (Bq.kg <sup>-1</sup> )		
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
beton en betonproducten	32	25	166
baksteen/klei-producten	81	88	713
kalkzandsteen	21	16	275
cellenbeton	13	9	228
gips(waren)	11	2	16
hout	11	4	26
glas(producten)	12	3	120

In de modelberekening wordt ieder bouw materiaal door een spectrum van 7 radionucliden gedefinieerd; hierbij is de lijst van forfaitaire waarden (Tabel 3.2 uit referentie [3]) aangenomen (zie Tabel 2).

De radionucliden zoals die in de diverse bouwmaterialen vóórkomen, behoren met uitzondering van  $^{40}\text{K}$  tot de  $^{238}\text{U}$  en  $^{232}\text{Th}$  reeksen. In deze reeksen zijn slechts enkele radionucliden vanwege het uitzenden van energetische fotonenstraling verantwoordelijk voor het effectieve-dosistempo door externe bestraling. In de  $^{238}\text{U}$ -reeks, waartoe ook  $^{226}\text{Ra}$  behoort, zijn dat de radionucliden  $^{214}\text{Bi}$  en  $^{214}\text{Pb}$  en in de  $^{232}\text{Th}$ -reeks  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  en  $^{208}\text{Tl}$ . Van deze radionucliden is aangenomen dat deze in seculier evenwicht voorkomen, dat wil zeggen dat ze per reeks dezelfde activiteitsconcentratie hebben. Voor de  $^{238}\text{U}$ -reeks is dat de forfaitaire waarde die voor  $^{226}\text{Ra}$  wordt gegeven en voor de  $^{232}\text{Th}$ -reeks natuurlijk die van  $^{232}\text{Th}$ . De aanname van seculier evenwicht is redelijk, alhoewel nabij het oppervlak van een bouw materiaal exhalatie van  $^{222}\text{Rn}$  en  $^{220}\text{Rn}$  kan optreden, waardoor een overschatting van het dosistempo wordt verkregen. Voor  $^{40}\text{K}$  speelt dit geen rol. De zeven genoemde radionucliden zijn alle meegenomen in de dosisberekening.

### 2.4.3 Specifieke modelparameters

Het berekende effectieve dosistempo wordt uitgedrukt in  $\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$  en kan dan ook worden beschouwd als een jaarlijkse effectieve dosis. Hierbij moet echter wel worden opgemerkt dat er een 100% aanwezigheid is aangenomen. Veelal zal een persoon zich slechts een deel van de tijd op een specifieke locatie in huis of ook daarbuiten bevinden. Er is echter te weinig bekend over dergelijk gedrag voor verwerking in het zo berekende dosistempo. Het dosistempo is daarmee niet zozeer aan een persoon gebonden, maar veeleer aan de referentiewoning zelf.

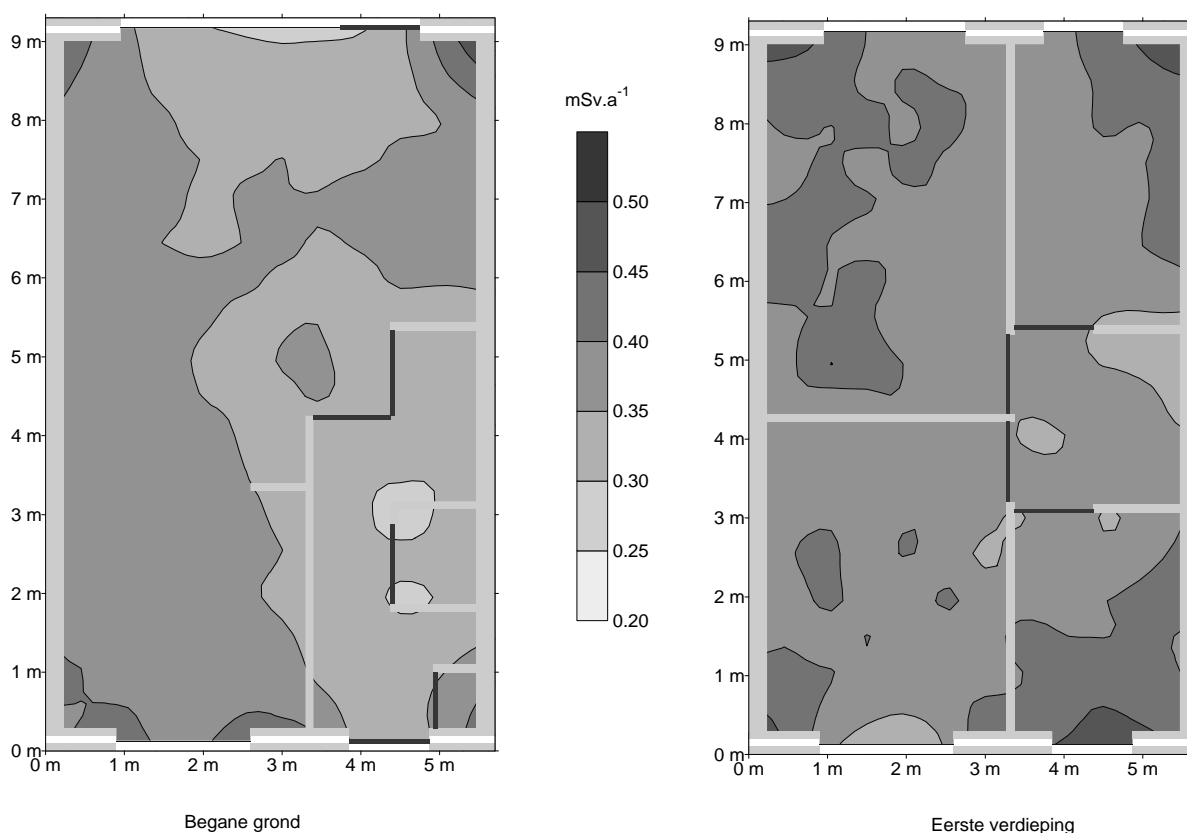
Voor het berekenen van het dosistempo maakt het model MARMER gebruik van sampling, dat wil zeggen dat het voor een groot aantal bronlocaties het dosistempo op een specifieke receptorlocatie berekent. Dit proces maakt gebruik van een Monte-Carlo-achtige methode. Door deze procedure een aantal keren te herhalen kan een standaarddeviatie van deze verschillende trekkingen berekend worden. Als de standaarddeviatie kleiner dan een tevoren gestelde waarde is, wordt de berekening afgebroken. Deze grens is hier gesteld op 2%. Het komt echter voor dat deze grens niet wordt bereikt binnen het aantal tevoren ingestelde 'batches' (aantal trekkingen, dat om praktische redenen op 100 was ingesteld). In dat geval wordt hier met een grotere standaarddeviatie genoeg genomen. Dergelijke 'moeilijk' te berekenen locaties bevinden zich veelal in hoeken, in of nabij een groot aantal verschillende bouwmaterialen.

Zoals in Figuur 3 is weergegeven is zowel op de begane grond als op de eerste verdieping een grid van rekenlocaties aanwezig. Dit grid heeft een stapgrootte van  $50 \times 50 \text{ cm}^2$ . Het aantal gridpunten bedraagt 170 per verdieping. De dosistempi zijn berekend voor een hoogte van 1 m boven de vloer van de betreffende verdieping. Dit is een vrij algemeen gehanteerde hoogte voor het meten van de dosis voor de mens door externe straling [17]. Het grote aantal gridpunten maakt het mogelijk om een ruimtelijk beeld van het dosistempo te verkrijgen. Daarmee is de invloed van deuren en ramen en andere kleine onderdelen zichtbaar te maken.

### 3 Resultaten en discussie

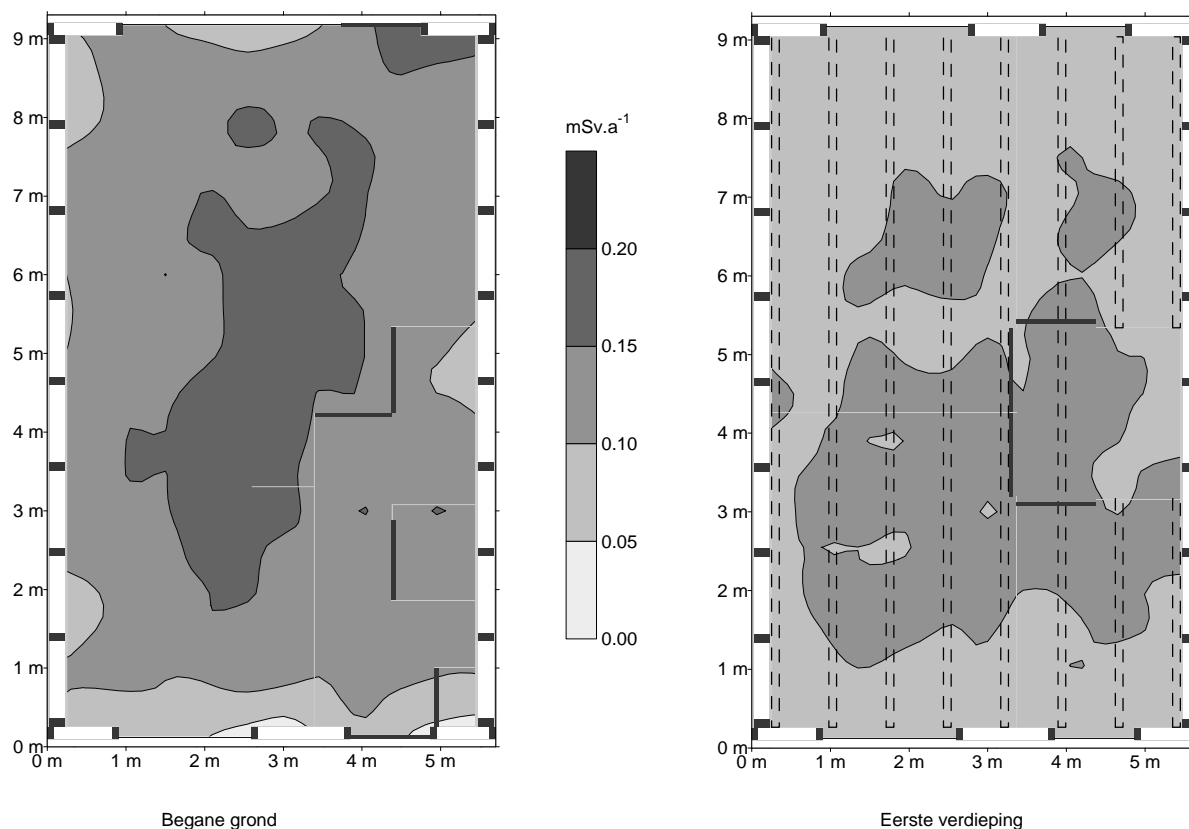
#### 3.1 Ruimtelijke verdeling van de dosis

Bij de grote verscheidenheid aan bouwmaterialen en opties in de verschillende woningvarianten in Tabel 1 blijken variant 1 (Figuur 4) en variant 10 (Figuur 5) representatief te zijn voor de extremen in de berekende dosistempi. Deze extremen worden voor een belangrijk deel door de toegepaste bouwmaterialen bepaald: veel beton in variant 1 en veel hout in variant 10. Alleen een variant waarin ook baksteen voor de binnenmuren zou worden gebruikt, zou naar verwachting hogere dosistempi opleveren. Het berekende gemiddelde effectieve-dosistempo bedraagt voor variant 1 ca.  $0,36 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$  in de woonkamer/keuken, terwijl dit voor variant 10 ca.  $0,14 \text{ mSv}\cdot\text{a}^{-1}$  is.



*Figuur 4 Effectieve-dosistempi ( $\text{mSv}\cdot\text{a}^{-1}$ ) zoals berekend voor referentiewoning variant 1 voor zowel begane grond als eerste verdieping.*

Invloed van vooral de ramen uit zich in een verlaging van het dosistempo nabij het glas. Vooral het effect op de begane grond van het grote raam aan de achterzijde in combinatie met een deur levert een aanzienlijk lagere dosis op. Tevens is het effect van afscherming te zien door de binnenmuren van de keuken en de hal. De genoemde binnenmuren van cellenbeton dragen zelf niet veel bij aan het dosistempo, maar schermen wel de buitenmuur en rechtermuur, en in de hal de linkermuur, af. Een ander opvallend, maar eenvoudig te verklaren resultaat is de verhoging van het dosistempo in de hoeken van een ruimte. De lokaal grotere ruimtehoek waaronder bouw materiaal zichtbaar is, is hiervan de oorzaak. Dit geldt ook voor de verhoging nabij het in verhouding kleine raampje in de badkamer.



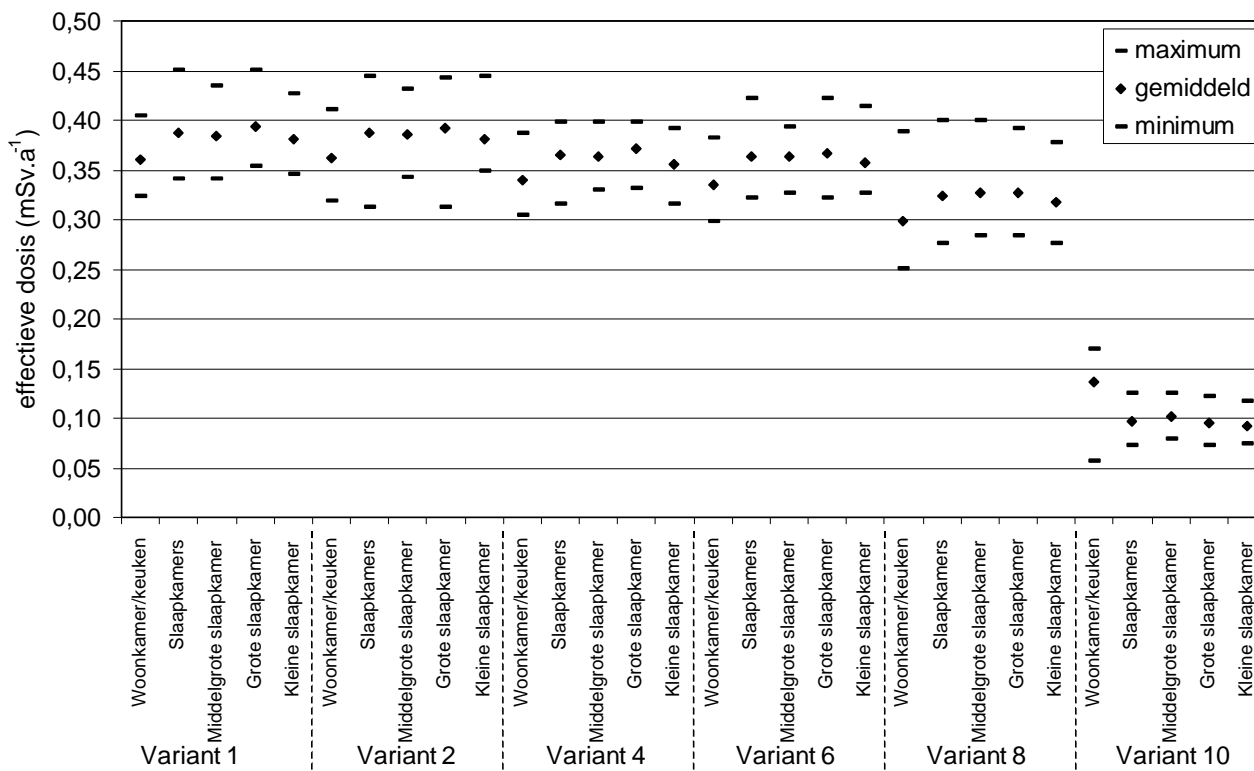
*Figuur 5 Effectieve-dosistemp*o* ( $mSv.a^{-1}$ ) zoals berekend voor referentiewoning variant 10 voor zowel begane grond als eerste verdieping. Let op: de dosistempo schaal is anders dan in Figuur 4. De locaties van de houten stijlen in de muren en de balken in de verdiepingsvloer zijn weergegeven met vierkantjes en gestippelde lijnen.*

Het resultaat dat het effectieve-dosistempo op de eerste verdieping bij alle varianten behalve 10 gemiddeld hoger is dan op de begane grond wordt veroorzaakt door bijdragen aan het dosistempo op de eerste verdieping van zowel begane grond als tweede verdieping, terwijl dit voor de begane grond beperkt blijft tot een bijdrage van alleen de eerste verdieping (zie ook paragraaf 3.4). Het dosistempo in de hsb-variant (Figuur 5) wijkt hier juist vanaf, omdat hier de betonnen vloer op de begane grond een zeer belangrijke dosisbijdrage levert. In dit geval zal door de invloed van de dakpannen het dosistempo op de zolder (de tweede verdieping) ook hoger zijn dan op de eerste verdieping.

Zoals in de gepresenteerde figuren van de varianten 1 en 10 is te zien kunnen, afhankelijk van de locatie, aanzienlijke afwijkingen van het gemiddelde dosistempo optreden. In Figuur 6 zijn voor alle hoofdvarianten naast het gemiddelde de minimum en maximum waarden per verblijfsruimte gegeven. Voor de meeste gemodelleerde ruimten blijkt het gemiddelde dosistempo binnen 10-15% van beide extremen af te liggen. Voor met name de varianten 8 (tot 20%) en 10 (25-50%) zijn deze variaties iets groter. Dit is te verklaren vanuit de relatief geringe afscherming van de buitenmuren van baksteen door cellenbeton binnenmuren in variant 8 en de zelfs vrijwel afwezige afscherming in de houten constructies van variant 10. Overigens ligt de mediane waarde vrij dicht tegen de gemiddelde waarde aan en liggen de meeste waarden binnen enkele procenten van dit gemiddelde. Door deze veel kleinere afscherming kan een relatief grote gradiënt ontstaan in het dosistempo van het raam tot het



midden van een ruimte. Deze variaties zouden waarschijnlijk nog groter zijn als ook naastliggende woningen in de modellering waren betrokken (zie ook paragraaf 3.4).



Figuur 6 Maximum, gemiddelde en minimum van het effectieve-dosistempo voor diverse verblijfsruimten in de zes hoofdvarianten van de referentiewoning

## 3.2 Dosisbijdrage componenten en bouwmaterialen

Gezien de grote verschillen in concentratie van de verschillende radionucliden in de hier beschreven bouwmaterialen, is een effect te verwachten van de verschillende toepassing hiervan. Omdat de referentiewoningen zijn opgedeeld in een groot aantal invoerzones, is het vrij eenvoudig om de invloed van die verschillende invoerzones, zoals deuren, ramen, plafond, vloer en dak, op de berekende dosis vast te stellen. Voor de varianten 1 en 10 is deze uitsplitsing in detail uitgevoerd. Een samenvatting is gegeven in Tabel 3.

Enkele zaken die direct opvallen zijn:

- De houten vloerbalken en het houten stijl- en regelwerk leveren geen noemenswaardige bijdrage aan het dosistempo.
- In de resultaten in Figuur 5 is ook geen gelocaliseerd effect waarneembaar, ofwel de vorige constatering geldt voor alle doorgerekende locaties (340 stuks) in variant 10.
- De bijdrage aan het dosistempo door de vloer wordt in variant 1 voor een groot deel bepaald door de vloer van de verdieping waarop de berekende locatie zich bevindt. Dit geldt ook voor de hoofdvarianten 2, 4, 6 en 8. Voor variant 10 wordt deze volledig bepaald door de vloer van de begane grond. Op de eerste verdieping is hier een reductie van de vloerbijdrage met circa een factor 2 gevonden.

*Tabel 3 Procentuele bijdragen van diverse bouwdelen aan het dosistempo op een viertal locaties voor variant 1 en variant 10*

	variant 1				variant 10			
	midden woonkamer	bij raam achterzijde woonkamer	overloop 1e verdieping	midden grote slaapkamer	midden woonkamer	bij raam achterzijde woonkamer	overloop 1e verdieping	midden grote slaapkamer
buitenmuur	7	17	6	6	1	1	<1	<1
binnenmuur	4	12	4	4	<1	1	<1	1
woningscheidende muren	25	19	35	30	4	5	14	6
plafond(s)	28	20	22	24	1	1	<1	4
vloer(en)	34	29	20	30	81	75	39	35
deure(en)	<1	0	2	0	<1	<1	3	1
ruit(en)	<1	1	<1	<1	<1	2	0	<1
vloerbalken	-	-	-	-	1	1	1	3
stijl- en regelwerk	-	-	-	-	1	1	1	2
dakpannen	<1	0	1	1	10	12	39	47

-: niet berekend, <1: kleiner dan 0,5

- Opvallend is ook de bijdrage door het dak aan het dosistempo in de houtskelbouw woning, zelfs op de begane grond.
- Het effect van de 5 cm dikke houten deuren blijkt (naar verwachting) het grootst op de overloop van de eerste verdieping (vier deuren), maar de totale bijdrage aan het dosistempo bedraagt ook daar slechts enkele procenten.
- De dosisbijdragen door het glas blijken zelfs op locaties nabij een raam zeer gering.
- De gips plafonds (variant 10) leveren slechts een geringe dosisbijdrage. De betonnen plafonds (overige hoofdvarianten) leveren een aanzienlijke dosisbijdrage die vergelijkbaar is met die van de vloer.

Gezien de resultaten voor hout en glas lijkt het gerechtvaardigd dat isolatiemateriaal, zoals dat bijvoorbeeld in de spouw wordt toegepast, niet is meegenomen in de berekening. Vanwege de veelal nog kleinere dichtheid alleen al zullen de dosisbijdrage en afscherming van gering belang zijn. Zie ook paragraaf 3.3 voor het effect van de dichtheid van de verschillende bouwmaterialen op het dosistempo.

### 3.3 Invloed van de dikte van een tussenmuur

In het kader van SPN heeft LBP modelberekeningen met het zogenaamde bolmodel uitgevoerd [3]. LBP heeft een fit gemaakt van de dikte-functie, uitgaande van de resultaten voor het dosistempo in het midden van de kleine slaapkamer aan de achterzijde van het huis voor de varianten 1a1 t/m 1e3. Hiervoor zijn als coördinaten genomen X=4,5 m, Y=7,00 m, Z=3,80 m (i.e. op 1 m boven de vloer, zie ook de figuur in paragraaf 2.4). Tevens is de netto bijdrage aan het dosistempo van de tussenmuur van de beide slaapkamers aan de achterzijde van het huis aangegeven (zie Tabel 4). Netto wil zeggen inclusief de afscherming van bouwmaterialen achter deze tussenmuur.

De resultaten zijn in Figuur 7 weergegeven. De opgegeven 'error bars' geven de standaarddeviatie in het totale effectieve-dosistempo.

Uit deze resultaten worden de volgende conclusies getrokken:

- Beton draagt meer bij aan het dosistempo dan kalkzandsteen en kalkzandsteen meer dan cellenbeton.
- Het dosistempo neemt niet rechtevenredig toe met de dikte van de tussenmuur. Dit is overigens volgens verwachting, want naarmate de muur dikker is, wordt de straling, die dieper in het materiaal wordt uitgezonden, meer afgeschermd.
- Voor beton neemt het dosistempo niet meer toe als de dikte van 20 naar 30 cm wordt vergroot. Hetzelfde geldt voor kalkzandsteen. Voor cellenbeton is er ook bij 30 cm nog een toename van het dosistempo ten opzichte van 20 cm. Dit lijkt verband te houden met de geringere dichtheid van cellenbeton.

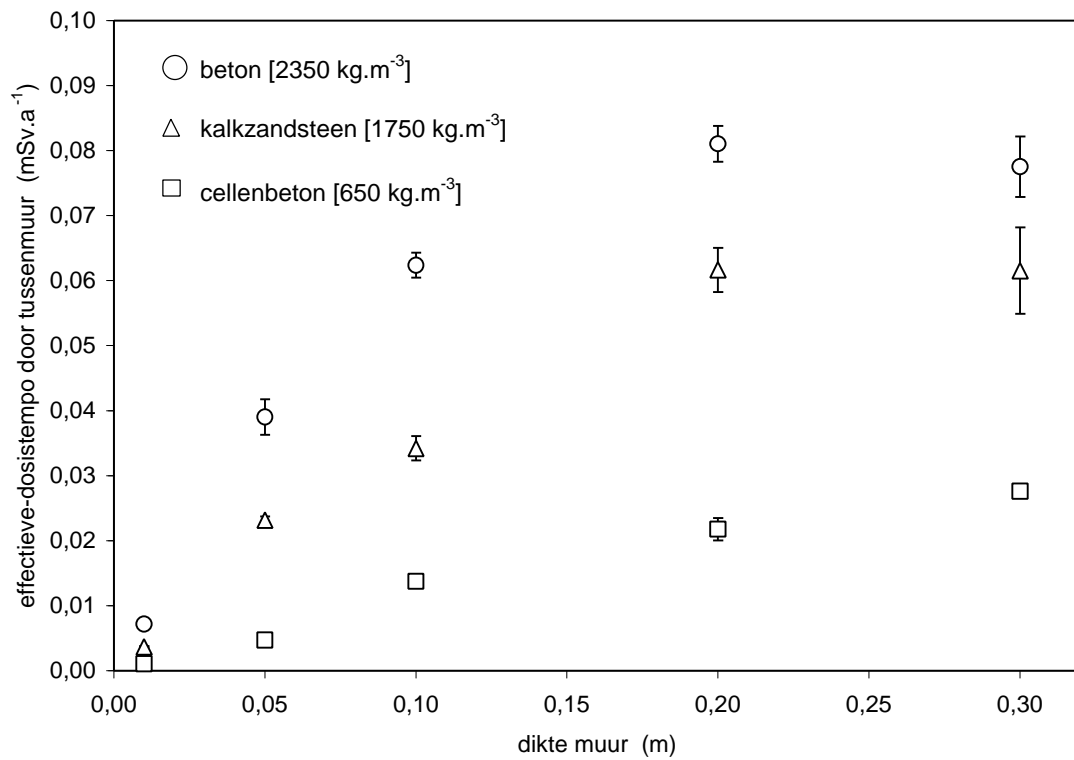
*Tabel 4 Het dosistempo in het midden van de kleine slaapkamer aan de achterzijde van het huis en de netto bijdrage van de tussenmuur.*

variant *)	dikte van de tussenmuur m	effectieve-dosistempo mSv.a <sup>-1</sup>	berekende stand.deviation mSv.a <sup>-1</sup>	netto bijdrage van de tussenmuur aan effectieve-dosistempo mSv.a <sup>-1</sup>
1a1	0,10	0,42	0,013	0,06
1a2	0,10	0,38	0,008	0,014
1a3	0,10	0,39	0,02	0,03
1b1	0,20	0,41	0,014	0,08
1b2	0,20	0,41	0,03	0,02
1b3	0,20	0,40	0,02	0,06
1c1	0,30	0,40	0,02	0,08
1c2	0,30	0,37	0,009	0,03
1c3	0,30	0,42	0,05	0,06
1d1	0,01	0,40	0,009	0,007
1d2	0,01	0,40	0,010	0,0009
1d3	0,01	0,40	0,02	0,004
1e1	0,05	0,43	0,03	0,04
1e2	0,05	0,38	0,010	0,004
1e3	0,05	0,39	0,009	0,02

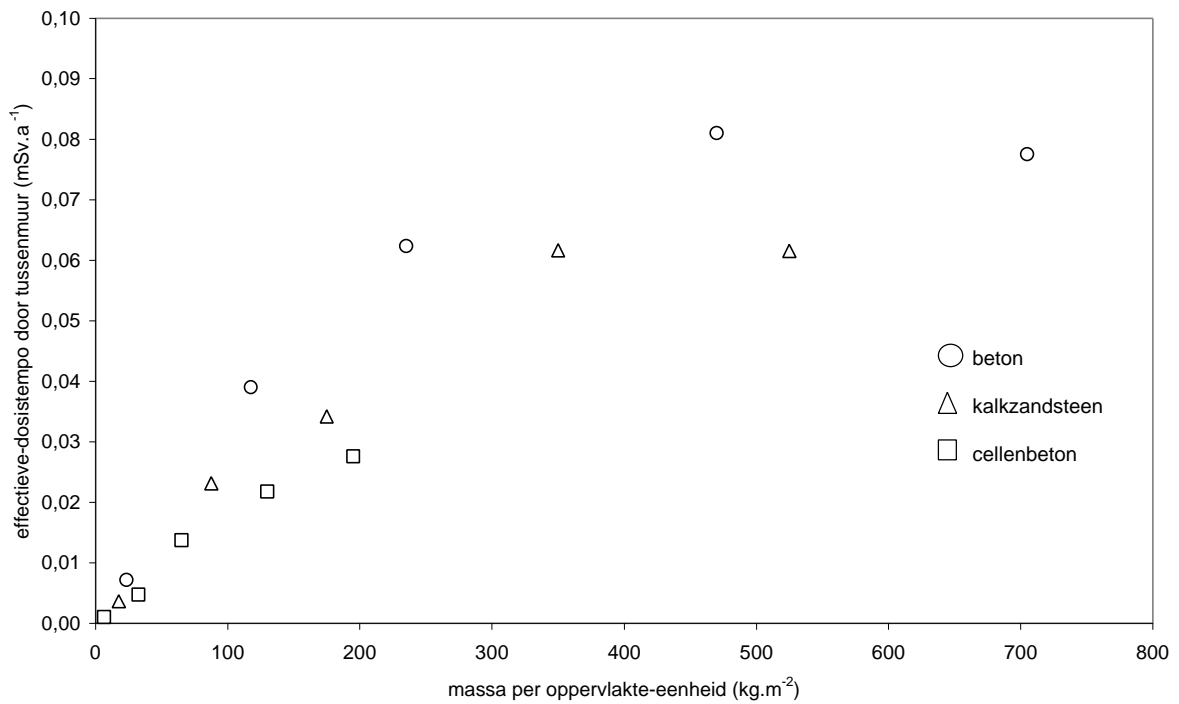
\*: 1x1= beton, 1x2=cellenbeton, 1x3=kalkzandsteen

Omdat de dichtheden van de getoonde bouwmaterialen nogal verschillen, is in Figuur 8 de netto dosis bijdrage tegen de massa per oppervlakte-eenheid van de verschillende tussenmuren uitgezet. Het blijkt dat boven een zekere massa het berekende effectieve-dosistempo niet meer toeneemt. Bij zowel beton als kalkzandsteen ligt dit ergens tussen 250 en 300 kg.m<sup>-2</sup>. Voor cellenbeton zou een dergelijke grenswaarde ook kunnen gelden, maar deze is uit de huidige resultaten niet af te leiden. Een massa per oppervlakte-eenheid van 300 kg.m<sup>-2</sup> komt immers overeen met ruim 46 cm dik cellenbeton en dergelijke diktes zijn niet in de berekeningen toegepast. Overigens blijken de verschillen tussen de bouwmaterialen in de netto bijdrage van de tussenmuur aan het dosistempo bij gelijke massa per oppervlakte-eenheid voornamelijk te worden bepaald door de concentratie van radionucliden in het bouw materiaal (zie ook Tabel 2).

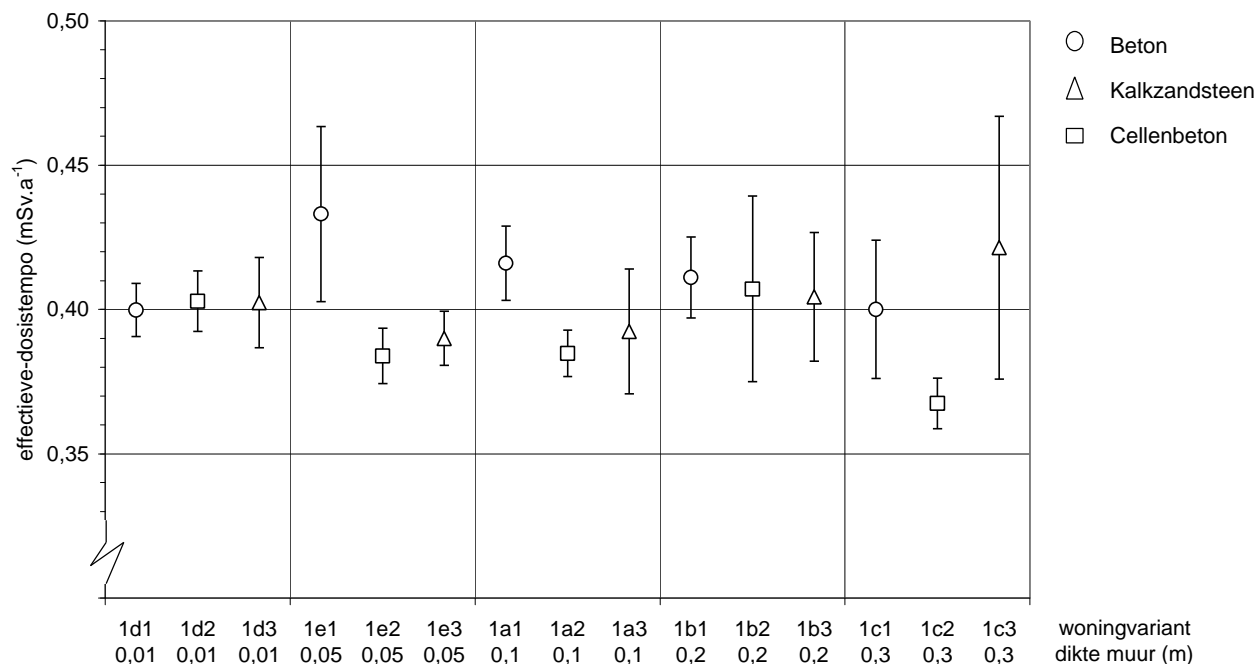
In Figuur 7 is de netto bijdrage van de tussenmuur aan het effectieve-dosistempo in het midden van de kleine slaapkamer gegeven. Als echter het totale effectieve-dosistempo in beschouwing wordt genomen (Figuur 9), dan blijkt er geen significante correlatie met het toegepaste bouw materiaal danwel de dikte daarvan te bestaan. Kennelijk schermt het bouw materiaal de straling van wanden uit aangrenzende ruimten evenveel af als het zelf toevoegt.



Figuur 7 Invloed van het type en de dikte van de tussenmuur op de netto bijdrage aan het effectieve-dosistempo.



Figuur 8 Invloed van de massa per oppervlakte-eenheid op de netto bijdrage van de tussenmuur aan het effectieve-dosistempo.



*Figuur 9 Het totale effectieve-dosis tempo in het midden van de kleine slaapkamer per variant. Voor de duidelijkheid zijn type bouw materiaal en dikte van de tussenmuren aangegeven*

### 3.4 Bijdragen van aangrenzende ruimten

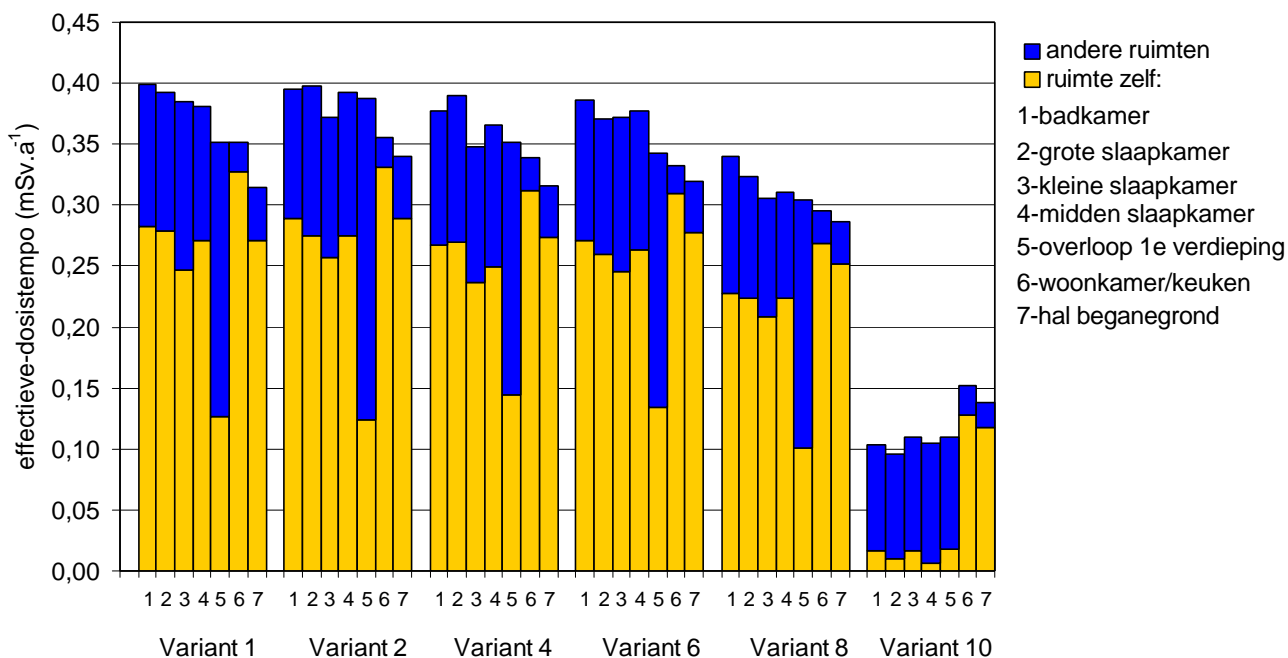
De berekeningen zijn niet uitgevoerd met het doel ook kwantitatieve uitspraken te doen over de invloed van aangrenzende ruimten in het algemeen, maar de resultaten zijn daarvoor tot op zekere hoogte wel te gebruiken.

In paragraaf 3.3 bleek voor tussenmuren van verschillend bouw materiaal en dikte dat, ondanks de toename van de netto dosisbijdrage afkomstig van die tussenmuur, het totale dosis tempo niet significant toe te nemen. Kennelijk neemt de dosisbijdrage van aangrenzende ruimten toe als de dikte van de tussenmuren afneemt. Dit is in feite ook naar verwachting. Hoe groot is nu die dosisbijdrage van aangrenzende ruimten? In Figuur 10 is voor zeven ruimten het berekende dosis tempo nabij het midden van elke ruimte uitgesplitst. Weergegeven zijn de bijdragen aan het dosis tempo van de bouw materialen behorende tot de ruimte zelf en afkomstig van bouw materialen in andere ruimten. Omdat op de begane grond in de berekeningen de vloer en het plafond als afzonderlijke objecten zijn beschouwd en dus niet zijn opgedeeld naar ruimte, zijn de bijdragen daarvan in beide gevallen volledig toegerekend aan respectievelijk de woonkamer/keuken en hal. Daarom is er voor deze twee ruimten sprake van een overschatting van de bijdrage van bouw materialen uit de ruimte zelf. In iets mindere mate geldt dit ook voor de overige ruimten en dus zijn de bijdragen van andere (aangrenzende) ruimten iets onderschat.

Ondanks de mogelijke onderschatting van de bijdrage van andere ruimten op het dosis tempo in een specifieke ruimte, kan worden vastgesteld dat 20-30% van het dosis tempo wordt veroorzaakt door bouw materialen in andere ruimten. Dit geldt voor alle varianten, met

uitzondering van variant 10 (houtskeletbouw). Vooral op de eerste verdieping wordt het dosistempo in variant 10 door de begane-grondvloer en het dak bepaald.

De invloed van naastgelegen woningen is niet in de berekening betrokken. Gezien de bijdrage van de vloer op de eerste verdieping aan het dosistempo in de woonkamer (slechts ca. 5%) voor de varianten 1 t/m 8 en de relatief dikke woningscheidende muren (veelal dikker dan het plafond op de begane-grond), zal de bijdrage van andere (naastgelegen) woningen vermoedelijk ook slechts een geringe verhoging van het totale dosistempo opleveren. Voor variant 10 zou echter, gezien de geringe afschermende werking van de houten woningscheidende tussenwanden en de relatief belangrijke bijdragen van dakpannen en begane-grondvloer op de eerste verdieping (zie Tabel 3), een aanzienlijk hoger effectieve-dosistempo mogelijk zijn. Hiermee zou woningvariant 10 nog steeds de laagste dosistempipi van alle beschouwde varianten hebben, maar een beduidend hoger dosistempo dan op basis van alleen de bouwmaterialen rondom een specifieke ruimte zou mogen worden verwacht.



Figuur 10 Het effectieve-dosistempo in zeven ruimten, uitgesplitst naar bijdrage van bouwmaterialen behorende tot de ruimte zelf en bouwmaterialen in andere ruimten (excl. aangrenzende woningen) (zie ook de tekst).

### 3.5 Vergelijking met gegevens uit de literatuur

Ondanks het feit dat de forfaitaire activiteitsconcentraties (zie Tabel 2) zeker niet de meest extreme concentraties representeren van radioactiviteit in bouwmaterialen die in Nederland worden toegepast (zie bijvoorbeeld [18, 19] voor een uitgebreide lijst) kan nog worden aangetekend dat meer specifieke producten in de forfaitaire lijst niet worden genoemd. Voorbeelden zijn zowel vloer- als wandtegels (badkamer, keuken, toilet, hal, maar ook woonkamer), vensterbanken, maar ook meer specifieke producten zoals schoorsteenmantels. Omdat dergelijke producten veelal van natuursteen zijn en deze veelal aanzienlijk hogere activiteit van radionucliden uit de natuurlijke reeksen (bijvoorbeeld [20]) bevat, kunnen deze ook invloed op het dosistempo hebben.

Wat het effectieve-dosistempo betreft, is in Nederland in de jaren tachtig een survey uitgevoerd [21]. In die survey is een gemiddelde dosis voor leden van de bevolking vastgesteld van  $95 \text{ nGy.h}^{-1}$ . Van dit dosistempo wordt 70% aan de bouwmaterialen toegewezen. Uitgaande van een coëfficiënt van  $0,7 \text{ Sv.Gy}^{-1}$  voor de conversie van geabsorbeerde dosis naar effectief dosisequivalent [22] en aannemende dat bij de onderhavige fotonenergieën de effectieve dosis ongeveer gelijk is aan het effectief dosisequivalent [17] wordt een gemiddeld effectieve-dosistempo van bijna  $0,4 \text{ mSv.a}^{-1}$  (100% verblijf binnenshuis) berekend. Dit is van vergelijkbare grootte orde als het hier berekende effectieve-dosistempo (dat ook voor 100% verblijf binnenshuis is) voor vrijwel alle varianten behalve de houtskeletbouw (variant 10). Dit is echter een relatief nieuw type woning en zeker niet representatief voor de gemiddelde Nederlandse woning.

## 4 Conclusies

De in dit rapport weergegeven berekeningen en resultaten van de externe straling door bouwmaterialen beperken zich tot enkele specifiek omschreven tussenwoningen. Dat wil zeggen dat een eenvoudige generalisatie naar bijvoorbeeld vrijstaande woningen of appartementen niet zonder meer mogelijk is. Tevens is het toegepaste model MARMER niet ontwikkeld voor de hier beschreven toepassing. Het is daarvoor ook niet gevalideerd. Desondanks blijken de resultaten van het berekende effectieve-dosistempo redelijk overeen te stemmen met de resultaten van metingen.

De extremen in het dosistempo op verschillende locaties in de woning worden voor een belangrijk deel bepaald door de toegepaste bouwmaterialen: veel beton in variant 1 en veel hout in variant 10 en in de tussenvarianten met kalkzandsteen en cellenbeton. Het houtwerk (vloerbalken, stijl- en regelwerk, maar ook deuren) levert geen noemenswaardige bijdrage aan het dosistempo in de woning. Hetzelfde geldt voor de ruiten in de woning en de gips plafonds. Gezien de resultaten voor hout en glas lijkt het gerechtvaardigd dat isolatiemateriaal, zoals dat bijvoorbeeld in de spouw wordt toegepast, niet is meegenomen in de berekening. Het berekende gemiddelde dosistempo bedraagt voor variant 1 afhankelijk van de verblijfsruimte ca. 0,32-0,40 mSv.a<sup>-1</sup>, terwijl dit voor variant 10 slechts ca. 0,10-0,15 mSv.a<sup>-1</sup> is.

Het dosistempo op de eerste verdieping is bij alle varianten behalve variant 10 gemiddeld hoger dan op de begane grond vanwege bijdragen aan het dosistempo op de eerste verdieping van zowel begane grond als tweede verdieping, terwijl dit voor de begane grond beperkt blijft tot een bijdrage van de eerste verdieping. Voor variant 10 draagt het pannendak belangrijk bij aan het dosistempo op de begane grond. In de meeste gemodelleerde ruimten blijkt een variatie rond het gemiddelde dosistempo mogelijk van 10-15%. Voor vooral de varianten 8 (tot 20%) en 10 (25-50%) zijn deze variaties, vanwege de relatief geringe afscherming, iets groter. Overigens bedraagt de standaardafwijking in de berekende resultaten per locatie slechts enkele procenten.

Het blijkt dat boven een zekere massa per oppervlakte-eenheid van een tussenmuur het berekende dosistempo, als gevolg van deze tussenmuur, niet meer toeneemt. Bij zowel beton als kalkzandsteen ligt dit ergens tussen 250 en 300 kg.m<sup>-2</sup>. Overigens blijkt de netto bijdrage van de tussenmuur aan het dosistempo bij gelijke massa per oppervlakte-eenheid voornamelijk te worden bepaald door de concentratie van radionucliden in het bouw materiaal.

Het bouw materiaal dat toegepast wordt in een tussenmuur blijkt ongeveer evenveel straling van wanden uit aangrenzende ruimten af te schermen als het zelf aan het totale dosistempo toevoegt.

Ondanks de mogelijke onderschatting van de bijdrage van andere ruimten op het dosistempo in een specifieke ruimte, kan worden gesteld dat 20-30% van het dosistempo wordt veroorzaakt door bouwmaterialen in andere ruimten. Dit geldt voor vrijwel alle varianten. Voor variant 10 is deze bijdrage beduidend groter. Indien ook naastgelegen woningen zouden worden meegenomen in de berekening zou dat voor de meeste varianten slechts een toename van het dosistempo met ca. 5% betekenen. Voor variant 10 zou dit echter aanzienlijk meer kunnen zijn.



## Referenties

- [1] Brief van de Staatssecretaris van VROM aan de Voorzitter van de Tweede Kamer der Staten Generaal van 19 juni 1997. DGM/SVS/97108493, 1997.
- [2] Schaap LEJJ, Graaf ER van der en Bosmans G. Stralingsprestatienorm. Vooronderzoek. LBP-rapportnr. R43 111A0.LS, KVI-rapportnr. KVI-R107 en INTRON-rapportnr. G713070. Lichtveld, Buis & Partners BV. Utrecht, juni 1998.
- [3] Schaap LEJJ Gevoeligheidsanalyse SPN. LBP-rapportnr. R43 111A1.LS, 1<sup>e</sup> CONCEPT. Lichtveld, Buis & Partners BV. Utrecht, 6 mei 1999.
- [4] Actualiseren referentiewoningen. NOVEM N1377-01-001, DHV/AIB BV, Inbo-rapport, 20 mei 1998.
- [5] Janssen MPM, Vries L de, Phaff JC, Graaf ER van der, Blaauboer RO, Stoop P, Lembrechts J – Modelling radon transport in Dutch dwellings. RIVM-Report No. 610050005. Bilthoven, December 1998.
- [6] Radiation Hygiene Handbook, H. Blatz (ed.), 1<sup>st</sup> ed., McGraw-Hill Book Company, Inc.. New York, 1959.
- [7] Handbook of Chemistry & Physics, 70th ed., page F-166, Chemical Rubber Company.
- [8] Handbook of Chemistry & Physics, 70th ed., page C-200, Chemical Rubber Company.
- [9] Data volgens <http://chemistry.miningco.com/library/blglassc.htm>, 31 januari 2000.
- [10] Kloosterman JL - MARMER, a flexible point-kernel shielding code. Proc. of Seventh International Conference on Radiation Shielding. Bournemouth, U.K., September 12-16, 1988.
- [11] Kloosterman JL - Gamma Benchmark Calculations on the TN12 Spent Fuel Shipping Cask. Interfacultair Reactor Instituut, Report IRI-131-89-11. Delft, november 1989.
- [12] Kloosterman JL - MARMER, a flexible point-kernel shielding code. User manual, version 2.0, Interfacultair Reactor Instituut, Report IRI-131-89-03/2. Delft, 1990.
- [13] Kloosterman JL, Hoogenboom JE - Gamma Benchmark Calculations on the TN12 Spent Fuel Shipping Cask by the Point-Kernel Shielding Code MARMER. Proc. of European Nuclear Conference '90. Lyon, France, September 23-28, 1990.
- [14] Kloosterman JL, Hoogenboom JE - MARMER, a flexible point-kernel shielding code. RAMTRANS, Vol.1, pp. 117-125, 1990.
- [15] 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. International Commission on Radiological Protection (ICRP), ICRP Publication 60 ; Annals of the ICRP 21 no 1-3. Pergamon Press, Oxford, 1991.
- [16] Knight JR, Westfall RM – DOSE: AMPX Module for producing neutron and gamma-ray dose factors NUREG/CR-0200, Volume 2, Section F12, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R2. Oak Ridge National Laboratory, 1984.
- [17] Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation International Commission on Radiological Protection (ICRP), ICRP Publication 74. Pergamon Press, Oxford, 1997.
- [18] Ackers JG – Concentratie van radionucliden in bouwmaterialen en grondsoorten. Radiologische Dienst TNO, Rapportnr. RD-E/8505-246. Arnhem, 1985.
- [19] Ackers JG, Den Boer JF, De Jong P, Wolschrijn RA – Radioactivity and radon exhalation rates of building materials in the Netherlands. The Science of the Total Environment 45: 151-156, 1985.
- [20] Bruzzi L, Baroni M, Mazzotti G, Mele R, Righi S – Radioactivity in raw materials and end products in the Italian ceramics industry. Journal of Environmental Radioactivity 47: 171-181, 2000.

- [21] Julius HW, Van Dongen R – Radiation doses to the population in the Netherlands, due to external natural sources. *The Science of the Total Environment* 45: 449-458, 1985.
- [22] United Nations. *Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1982 report to the General Assembly, with annexes. United Nations sales publication No. E.82.IX.8, New York, 1982.

## **Bijlage 1      Verzendlijst**

- 1-10    Directeur van de Directie Stoffen, Afvalstoffen en Straling
- 11     Plaatsvervangend Directeur-Generaal Milieubeheer
- 12     Depot Nederlandse Publikaties en Nederlandse Bibliografie
- 13     Directie RIVM
- 14     Directeur Sector Risico's, Milieu en Gezondheid
- 15     Hoofd van het Laboratorium voor Stralingsonderzoek
- 16     Hoofd van de afdeling Modellen en Processen
- 17-18   Auteurs
- 19     Hoofd Voorlichting & Public Relations
- 20     Bureau Rapportenregistratie
- 21     Bibliotheek RIVM
- 22     Bibliotheek LSO
- 23-37   Bureau Rapportenbeheer
- 38-62   Leden SPN-normcommissie en SPN-projectgroep
- 63-70   Reserve-exemplaren LSO