



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

Over de regulering van *gammastraling* door *bouwmaterialen* in de woning

Onderzoek voor de implementatie
van richtlijn 2013/59/Euratom



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

Over de regulering van gammastraling door bouwmaterialen in de woning

Onderzoek voor de implementatie van richtlijn
2013/59/Euratom

RIVM Rapport 2017-0179

Colofon

© RIVM 2017

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

DOI 10.21945/RIVM-2017-0179

R.C.G.M. Smetsers (auteur), RIVM
J.M. Tomas (auteur), RIVM

Contact:
Ronald Smetsers
Centrum Veiligheid
ronald.smetsers@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS), in het kader van het programma stralingsbescherming.

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Over de regulering van gammastraling door bouwmaterialen in de woning

Onderzoek voor de implementatie van richtlijn 2013/59/Euratom

Een groot deel van de totale hoeveelheid straling die Nederlanders ontvangen komt door straling in de woning. Deze stralingsdosis wordt sterk beïnvloed door de eigenschappen van de gebruikte bouwmaterialen.

Begin 2018 moet Nederland nieuwe Europese voorschriften over straling in de woning in de nationale regelgeving hebben opgenomen. Voor de dosis in de woning door gammastraling uit bouwmaterialen is door Europa een referentieniveau vastgesteld. De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) bereidt de Nederlandse regelgeving momenteel voor. Ook heeft de ANVS een methode op laten stellen om eenvoudig te kunnen toetsen of een bouw materiaal aan het Europese criterium voor gammastraling voldoet. Het RIVM heeft een contra-expertise uitgevoerd op de methodiek die de basis vormde voor de conceptregelgeving van 28 augustus 2017. Op basis daarvan zijn enkele aanbevelingen geformuleerd.

De door de ANVS voorgestelde methode toetst of de stralingsdosis van één bouw materiaal onder het referentieniveau blijft. In de woningbouw is het echter gebruikelijk dat verschillende bouwmaterialen in meerdere bouwlagen worden toegepast. Wanneer elk bouw materiaal individueel wordt getoetst, bestaat het risico dat het referentieniveau door stapeling van bouwlagen alsnog wordt overschreden. Daarom wordt aanbevolen om in de regelgeving een toetsingsmethode op te nemen die rekening houdt met de straling uit alle bouwlagen.

De beoogde regelgeving is uitsluitend gebaseerd op criteria voor gammastraling. Het RIVM signaleert dat sommige, voor gammastraling goedgekeurde bouwmaterialen daar bovenop een niet te verwaarlozen stralingsdosis kunnen veroorzaken vanwege de uitstoot van thoron. In enkele gevallen kan die extra stralingsdosis aanzienlijk zijn.

Met de voorgestelde regelgeving wordt het zogeheten *standstill*-principe, waarbinnen de overheid en de woningbouwindustrie al jaren samenwerken, niet op voorhand gewaarborgd. Dat principe houdt in dat de stralingsdosis in de gemiddelde Nederlandse woningen niet mag toenemen. Mede hierdoor is de stralingssituatie in Nederlandse woningen vergeleken met andere westerse landen momenteel gunstig. Om het *standstill*-principe te kunnen voortzetten, zijn aanvullende afspraken nodig.

Kernwoorden: straling, natuurlijke radioactiviteit, NORM, bouwmaterialen, woningen, Euratom, referentieniveau

Synopsis

Regarding the regulation of gamma radiation from building materials in dwellings

Research to support the implementation of Directive 2013/59/Euratom

A significant proportion of the radiation to which the Dutch population is exposed arises from radiation in dwellings. Construction materials are the dominant source of this radiation.

The latest Euratom directive requires Member States to establish regulations to limit exposure to radiation in dwellings. This includes the introduction of a reference level for radiation received from gamma radiation from construction materials. At present, the Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS) is preparing the implementation of these regulations, which are due to take effect at the beginning of 2018. The ANVS also commissioned the development of a practical method for testing whether construction materials meet the criteria for gamma radiation. RIVM was asked to investigate the validity of this test method, which led to several recommendations.

The preliminary method, as proposed in August 2017, tests whether the amount of radiation received from a single layer of a specific construction material is below the reference level for gamma radiation. However, in the construction of dwellings it is quite common to apply different construction materials in various layers. The combined use of multiple layers of 'permitted' construction materials could still mean that the reference level for gamma radiation in dwellings is exceeded. RIVM therefore recommends improving the proposed test method by taking account of the radiation from all layers of construction materials.

The reference level is based only on the criteria for the amount of radiation received from gamma rays. RIVM would also point out that some of the construction materials that meet these criteria may produce (significant) radiation in dwellings due to the emission of thoron.

The new regulations do not necessarily guarantee that average radiation levels in dwellings in the Netherlands will remain at the current, relatively favourable level. The Dutch government and the construction sector have already agreed upon a so-called *standstill* covenant for the radiation dose in dwellings. Maintaining this *standstill* will require some additional agreements.

Keywords: radiation, natural radioactivity, NORM, building materials, dwellings, Euratom, reference level

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Introductie — 13

- 1.1 Aanleiding van dit onderzoek — 13
- 1.2 Leeswijzer — 14

2 Blootstelling aan natuurlijke straling in Nederland — 15

- 2.1 Natuurlijke achtergrondstraling in het buitenmilieu — 15
- 2.2 Invloed van bouwen en wonen — 16
- 2.3 Effectieve dosis per jaar door natuurlijke straling in de woning — 17

3 Wet- en regelgeving — 19

- 3.1 Huidige regelgeving in Nederland — 19
- 3.2 Nieuwe verplichtingen volgend uit de BSS — 19
- 3.3 Buitenwettelijke afspraken over straling van bouwmaterialen — 21

4 Methodiek regulering bouwmaterialen op hoofdlijnen — 23

- 4.1 Bepaling gammastraling uit bouwmaterialen volgens CEN — 23
- 4.2 NRG-methode voor het toetsen van bouwmaterialen — 24
 - 4.2.1 Introductie — 24
 - 4.2.2 Opzet van de methodiek — 25
 - 4.2.3 Inventarisatie en berekening massieke activiteit huidige bouwmaterialen — 26
 - 4.2.4 Toepassing NRG-methode op categorieën bouwmaterialen — 27
- 4.3 Voorbeeld toepassing CEN-formule en NRG-methode — 27
 - 4.3.1 Een kamer opgetrokken uit beton met een gipslaag — 28
 - 4.3.2 Ruimtelijke verdeling van de effectieve jaardosis — 29

5 Discussie — 33

- 5.1 Externe blootstelling buitenshuis — 33
- 5.2 Validiteit CEN-formule en NRG-methode als alternatief voor de toelating van bouwmaterialen — 34
 - 5.2.1 Enkelvoudige bouwlaag als uitgangspunt — 34
 - 5.2.2 Meerdere bouwlagen — 36
- 5.3 Handhaving *standstill*-beginsel — 37
- 5.4 Andere stralingsrisico's in de woning door bouwmaterialen — 38

6 Conclusies en aanbevelingen — 41

Literatuur — 45

Bijlage 1 Grootheden en eenheden voor externe straling — 47

Bijlage 2 Nadere toelichting uitgebreide CEN-methode — 49

Bijlage 3 Bepaling maximaal percentage NORM indien rekening gehouden wordt met verdringing van het basismateriaal — 52

Bijlage 4 Voorbeeld uitwerking generieke toets bouwmaterialen — 54

Samenvatting

Een groot deel van de stralingsdosis die Nederlanders jaarlijks ontvangen lopen zij op in de woning. Naast inhalatie van radioactieve dochterproducten van radon en thoron gaat het daarbij om externe bestraling door gammastraling afkomstig uit bouwmaterialen. Straling in de woning heeft een natuurlijke oorsprong, maar de dosis die men binnenshuis oploopt wordt sterk beïnvloed door de eigenschappen van de woning. In richtlijn 2013/59/EURATOM, ook wel bekend als de Basic Safety Standards (BSS), wordt daarom expliciet aandacht gegeven aan de regulering van straling in de woning. Ten aanzien van gammastraling schrijft de BSS voor dat de lidstaten een referentieniveau vaststellen voor de dosis die jaarlijks in de woning wordt ontvangen door gammastraling uit bouwmaterialen van 1 mSv per jaar. Dit referentieniveau geldt voor de ontvangen dosis '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*'.

In vergelijking met andere westerse landen is de stralings situatie in Nederlandse woningen relatief gunstig. Daar komt bij dat de overheid en de woningbouwindustrie vele jaren hebben samengewerkt om de stralingsdosis in de woning niet te laten toenemen. Dit gezamenlijke streven werd '*standstill*' genoemd. Dat de situatie momenteel gunstig is geldt zeker voor gammastraling uit bouwmaterialen: de gemiddelde blootstelling in Nederlandse woningen is momenteel ruim een factor tien lager dan het BSS-referentieniveau. De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) bereidt daarom een 'beleidsarme' implementatie voor van de BSS-bepalingen over gammastraling door bouwmaterialen. Daarnaast heeft de ANVS de wens uitgesproken om het *standstill*-principe in Nederland te continueren.

Naast het referentieniveau voor gammastraling uit bouwmaterialen schrijft de BSS voor dat de EU-lidstaten een lijst vaststellen van (grondstoffen voor) bouwmaterialen die vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming speciale aandacht behoeven. Het gaat daarbij om grondstoffen, vaak '*NORM*' genoemd, die relatief veel natuurlijke radioactiviteit bevatten en daarom ook veel gammastraling uitzenden. Bouwmaterialen die deze grondstoffen bevatten mogen uitsluitend in de handel worden gebracht indien de ondernemer met toepassing van een door de ANVS vastgestelde methode heeft kunnen aantonen dat het gebruik van deze materialen niet leidt tot overschrijding van het hierboven genoemde referentieniveau. Als methode kan een in de BSS opgenomen rekenregel worden gebruikt, de zogenoemde *I-index*, maar om die toe te kunnen passen moeten de massieke activiteiten [Bq kg^{-1}] van meerdere radionucliden bekend zijn. Dat kan via metingen, maar die zijn specialistisch en daardoor kostbaar. Een kostbare en arbeidsintensieve regeling verhoudt zich slecht met de gunstige situatie die momenteel geldt inzake gammastraling uit bouwmaterialen. Er is daarom behoefte aan een aanvullende toetsmethode die eenvoudig toepasbaar is.

Op verzoek van de ANVS, en met informatie van het bedrijfsleven, heeft NRG een alternatieve methode ontwikkeld om bouwmaterialen te toetsen aan het BSS-referentieniveau. Deze methode is opgenomen in de ANVS ontwerpverordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming en ministeriële regelingen van 28 augustus 2017. De NRG-methode is niet gebaseerd op individuele metingen aan bouwmaterialen, maar toetst op basis van het gewichtspercentage NORM of het eindproduct voldoet aan het BSS-referentieniveau voor gammastraling. De NRG-methode combineert kennis over de radioactiviteit van reguliere bouwstoffen met een berekeningswijze van de dosis volgens een (concept)procedure van het Europese norminstituut CEN. Het CEN heeft op zijn beurt zijn berekeningswijze (de 'CEN-formule') gebaseerd op een model van de Finse stralingsautoriteit STUK. De door NRG ontwikkelde methode is dus eenvoudig in de toepassing, maar de wetenschappelijke verantwoording ervan is ingewikkeld. De ANVS heeft daarom aan het RIVM gevraagd om de NRG-methode aan een contra-expertise te onderwerpen.

Dit rapport geeft een overzicht van de aannamen en beperkingen van de NRG-methode en de onderliggende modellen en procedures. Met name wordt ingegaan op de volgende vraagstukken:

1. Wat betekent het begrip '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*' voor de Nederlandse situatie?
2. Vormen de NRG-methode en de CEN-formule, die beide opgenomen zijn in de ontwerpverordening van de ANVS, een valide alternatief voor de regulering van gammastraling door bouwmaterialen?
3. Wat betekent de voorgestelde methodiek voor de gewenste handhaving van het *standstill*-beginsel?
4. Kan toepassing van de voorgestelde methodiek leiden tot andere stralingsrisico's in de woning dan door gammastraling van bouwmaterialen?

Na een uitgebreide inhoudelijke beoordeling komt het RIVM met de volgende conclusies en aanbevelingen.

Het begrip '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*' is in de BSS onvoldoende helder omschreven. Het RIVM beveelt aan om in de Nederlandse regelgeving een achtergrond correctiewaarde van $0,3 \text{ mSv j}^{-1}$ te hanteren, die is afgeleid van metingen en berekeningen die specifiek zijn voor de situatie in Nederland. Deze waarde wijkt nauwelijks af van de waarde die CEN hanteert, maar dat is toeval: beide afleidingen verschillen sterk in aannamen en uitgangspunten.

Door CEN en NRG zijn diverse aannamen gemaakt die soms conservatief zijn, maar soms ook niet. De NRG-methode gaat echter impliciet uit van de aanname dat de dosisbijdrage van het oorspronkelijke bouw materiaal gelijk blijft, ongeacht het percentage NORM dat is bijgemengd. Deze aanname is dusdanig conservatief dat de NRG-methode vrijwel altijd een conservatieve waarde geeft van het percentage NORM dat aan een bouw materiaal mag zijn toegevoegd. De NRG-methode levert dus een goed alternatief op voor de CEN-formule. Echter, bij beide methoden kunnen kanttekeningen geplaatst worden vanwege het gekozen uitgangspunt dat de externe stralingsdosis binnenshuis uitsluitend

bepaald wordt door gammastraling uit het te toetsen bouw materiaal. Dat uitgangspunt staat op gespannen voet met de dagelijkse praktijk. In de woningbouw is het namelijk zeer gebruikelijk dat verschillende bouwmaterialen in meerdere bouwlagen worden toegepast, en dat ook nog eens in allerlei varianten. Door de CEN-formule of de NRG-methode toe te passen bestaat het risico van stapeling, ofwel: bouwmaterialen die ieder voor zich voldoen aan een 'enkelvoudige' toetsing kunnen in gangbare praktijksituaties samen een dosis veroorzaken die hoger is dan het BSS-referentieniveau. Die kans wordt extra groot als de aanbieders van de bouwmaterialen zelf de toetscondities (*'intended use'*) mogen bepalen. Ze kunnen dan, specifiek voor hun eigen toepassing, dunne laagdiktes hanteren die een hoog percentage NORM toegelaten. In praktijksituaties kan de stralingsdosis van de combinatie van aanwezige bouwmaterialen dan nog gemakkelijker het BSS-referentieniveau overschrijden. Dit alles kan voorkomen worden door een toetsmethode voor te schrijven die *generiek* borgt dat toepassing in de woning van een toegelaten bouw materiaal, in combinatie met willekeurig welke andere toegelaten bouwmaterialen, tot een jaardosis leidt die niet hoger is dan het BSS-referentieniveau. Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden met de volgende set van randvoorwaarden:

- Er wordt in de toets uitgegaan van de aanwezigheid van meerdere bouwlagen, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen bulklagen (zoals beton of baksteen) en toplagen (zoals gips of leem).
- De wetgever, en dus niet degene die de toets uitvoert, legt de condities vast waaronder het materiaal getoetst moet worden.
- De verschillende lagen krijgen ieder een vast deel van het BSS-referentieniveau toebedeeld.

Een uitgewerkt voorbeeld van zo'n generieke toetsmethode laat zien dat deze aanpak kan leiden tot relatief eenvoudige regelgeving.

Alle methodes die genoemd zijn in de ontwerpverordening van de ANVS zijn bedoeld om in individuele gevallen te toetsen of een bouw materiaal voldoet aan het BSS-referentieniveau. Geen enkele methode bevat echter elementen die bepalend zijn voor de collectieve of gemiddelde stralingsdosis binnenshuis door toepassing van bouwmaterialen. Daar komt bij dat het BSS-referentieniveau in de context van de huidige situatie in Nederland nauwelijks een beperking oplevert. De in de ontwerpverordening genoemde methodes voor de toelating van bouwmaterialen bieden dus geen garantie voor handhaving van het *standstill*-beginsel. Vanwege de toenemende wens tot hergebruik van restmaterialen, in combinatie met de relatief hoge BSS-referentiewaarde die daarvoor ruimte biedt, is het eerder te verwachten dat de gemiddelde stralingsdosis in woningen door gammastraling uit bouwmaterialen in de toekomst zal stijgen. Indien de Nederlandse overheid het *standstill*-principe wil continueren, dan zijn daarvoor dus aanvullende afspraken nodig.

Ten slotte, de BSS en de ontwerpverordening van de ANVS bevatten voorschriften voor de regulering in woningen van radon en van gammastraling uit bouwmaterialen. Een nadere uitwerking voor de regulering van blootstelling aan (dochterproducten van) *thoron* ontbreekt echter. Dit is niet zonder risico. De voorgenomen regeling laat

namelijk toe dat er bouwmaterialen worden toegelaten die ruimschoots voldoen aan het BSS-referentieniveau voor gammastraling, maar die desondanks grote hoeveelheden thoron exhaleren. De inhalatie van thorondochters die dat teweegbrengt kan in de woning stralingsdoses veroorzaken die vele malen hoger zijn dan het BSS-referentieniveau voor gammastraling. Dit probleem speelt met name bij poreuze oppervlakte afwerkmaterialen met een hoog Th-232 gehalte. Het RIVM vraagt nadrukkelijk beleidsmatige aandacht voor deze problematiek.

1 Introductie

1.1 Aanleiding van dit onderzoek

Eind 2013 heeft de Raad van de Europese Unie de richtlijn 2013/59/EURATOM vastgesteld (EURATOM 2014). Het doel van deze richtlijn, ook bekend onder de naam *Basic Safety Standards* (BSS), is om in alle EU-lidstaten nieuwe internationale inzichten van stralingsbescherming te implementeren. De Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) bereidt momenteel samen met onder andere de ministeries van SZW en VWS een beleidsarme implementatie van deze voorschriften in de Nederlandse regelgeving voor. Het gaat daarbij om een nieuw besluit *Basisveiligheidsnormen stralingsbescherming* met bijlagen, enkele ministeriële regelingen en een verordening. Het geheel aan nieuwe regelgeving moet volgens plan begin 2018 van kracht zijn.

In de voorgenomen regeling zijn ook bepalingen opgenomen over gammastraling binnenshuis, afkomstig van bouwmaterialen. Onder meer is een referentieniveau van 1 mSv j^{-1} opgenomen voor de door bouwmaterialen uitgezonden gammastraling '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*'.¹ Daarnaast is een lijst vastgesteld van grondstoffen '*die aandacht behoeven vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming, vanwege de door deze materialen uitgezonden gammastraling*'.² Het gaat daarbij om grondstoffen die veel natuurlijke radioactiviteit bevatten, vaak aangeduid als '*NORM*'.³ Bouwmaterialen die dergelijke grondstoffen bevatten mogen uitsluitend in de handel worden gebracht indien de ondernemer met toepassing van een door de ANVS vastgestelde methode heeft kunnen vaststellen dat deze materialen voldoen aan het hierboven genoemde referentieniveau.⁴

In de BSS is een methode beschreven voor toetsing aan het referentieniveau, die gebaseerd is op de massieke activiteiten van natuurlijke radionucliden in het te toetsen materiaal.⁵ Het nadeel van deze methode is dat hiervoor metingen nodig zijn. Dit brengt aanzienlijke lasten voor het bedrijfsleven met zich. Om aan deze bezwaren tegemoet te komen heeft NRG, op verzoek van de ANVS en met informatie van het bedrijfsleven, een alternatieve methodiek ontwikkeld om de toepassing van NORM in bouwmaterialen te reguleren. Met deze methodiek wordt het volgende beoogd:

1. Er wordt voldaan aan het referentieniveau voor gammastraling in de woning afkomstig van bouwmaterialen.
2. Er vindt een toetsing plaats op basis van het gewichtsperscentage NORM in het eindproduct, in plaats van via metingen vastgestelde massieke activiteiten in het eindproduct; .

¹ Artikel 6.21, eerste lid van het ontwerpBesluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (ontwerpBbs).

² Bijlage 6.1 bij de ontwerpregeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (ontwerpMrbs).

³ Naturally Occurring Radioactive Material.

⁴ Artikel 6.21, tweede lid, van het ontwerpBbs.

⁵ Deze methode is door de ANVS vastgesteld in Bijlage 9 bij de ontwerpVerordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (ontwerpVbs).

3. Er wordt tegemoet gekomen aan de wens van het beleid om het *standstill*-beginsel inzake straling in de woning te continueren.

Dit laatste element verwijst naar een tienjarig convenant dat de overheid en de woningbouwindustrie in 2004 hebben afgesloten. Doel van dat convenant was om – zonder expliciete regelgeving – de stralingsdosis in de woning niet verder op te laten lopen.

Toepassing van zo'n alternatieve toetsingsmethode betekent veel lastenverlichting voor het bedrijfsleven, terwijl met deze methode toch aan alle beleidsmatige eisen en wensen zou kunnen worden voldaan.

De door NRG ontwikkelde methode is eenvoudig in het gebruik maar de wetenschappelijke verantwoording ervan is tamelijk complex (De With 2017). De ANVS heeft daarom aan het RIVM gevraagd om op deze methodiek een contra-expertise uit te voeren, mede om na te gaan of de stralingsbescherming met deze methode geborgd blijft. Het verzoek was om in het bijzonder aandacht te besteden aan deze twee aspecten:

1. De wetenschappelijke onderbouwing van de methodiek; .
2. Handhaving van het *standstill* beginsel.

Dit rapport doet hiervan verslag.

1.2 Leeswijzer

Bouwmaterialen van minerale oorsprong zijn een natuurlijke bron van ioniserende straling, maar tegelijkertijd schermen ze ioniserende straling van andere bronnen af. Bij de toepassing van het BSS-referentieniveau wordt hier rekening mee gehouden. In hoofdstuk 2 wordt uiteengezet hoe deze twee effecten voor de Nederlandse situatie uitwerken en wat dat concreet betekent voor continuering van het *standstill*-principe. In hoofdstuk 3 vatten we de huidige wet- en regelgeving op dit gebied samen en bespreken we wat er rond de regulering van gammastraling uit bouwmaterialen gaat veranderen als gevolg van implementatie van de BSS. In hoofdstuk 4 beschrijven we de uitgangspunten en aannamen van het rekenmodel dat ten grondslag ligt aan de dosisberekeningen en de daarop gebaseerde NRG-methodiek voor de regulering van NORM in bouwmaterialen. In hoofdstuk 5 gaan we uitgebreid in op de vier belangrijkste discussiepunten binnen deze thematiek. De conclusies en aanbevelingen van dit contra-expertise onderzoek vindt u ten slotte in hoofdstuk 6.

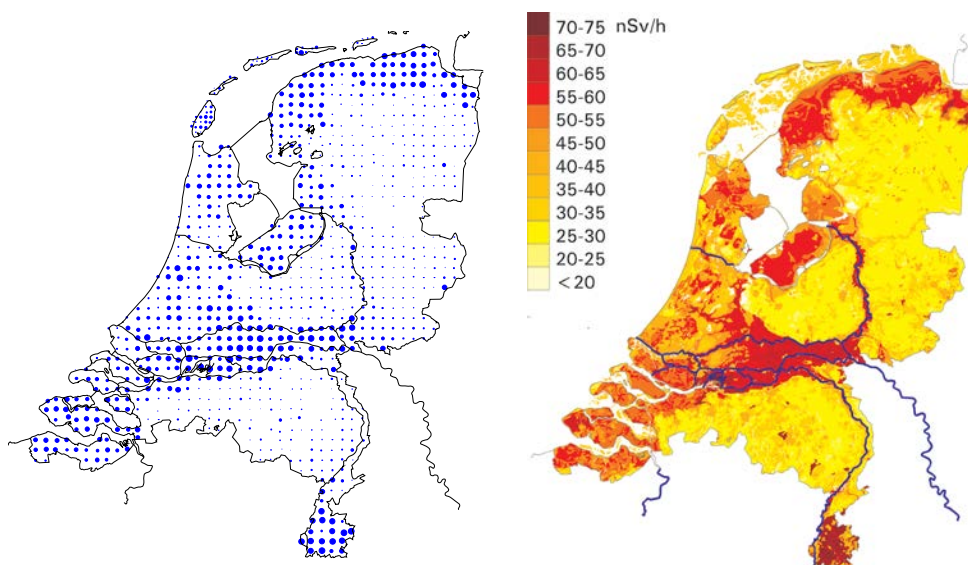
2 Blootstelling aan natuurlijke straling in Nederland

Om te weten in hoeverre Nederlandse burgers blootgesteld worden aan straling uit bouwmaterialen van woningen, is het nodig om eerst te kijken naar de natuurlijke stralingsachtergrond in het buitenmilieu. Dit wordt toegelicht in paragraaf 2.1. Vervolgens beschouwen we de invloed daarop van 'bouwen en wonen' (paragraaf 2.2). De laatste paragraaf van dit hoofdstuk vat samen wat dat volgens de huidige inzichten betekent voor de gemiddelde stralingsdosis die Nederlandse burgers in de woning ontvangen.

Over deze onderwerpen zijn de afgelopen decennia voor de Nederlandse situatie veel reken- en meetresultaten gepubliceerd. Daarbij zijn verschillende grootheden en eenheden gebruikt. In Bijlage 1 worden die in hun onderlinge samenhang beschreven.

2.1 Natuurlijke achtergrondstraling in het buitenmilieu

Begin jaren tachtig van de vorige eeuw is uitvoerig onderzoek gedaan naar natuurlijke (achtergrond)straling in Nederland. Onderdeel van dit zogenoemde SAWORA⁶-programma bestond uit de uitvoering van landsdekkende 'vrije veld' metingen van het exposietempo op een grid⁷ van 6x6 km (Van Dongen et al. 1984, Van Dongen en Stoute 1985). Na aftrek van de kosmische stralingscomponent leverde dat een set van meetwaarden op die inzicht geeft in de ruimtelijke variatie van de terrestrische straling in Nederland (zie Figuur 1, links). Van Dongen et al. vonden (omgerekend) een gemiddelde waarde voor het omgevingsdosisequivalenttempo van 40 nSv.h⁻¹.



Figuur 1 Grafische weergave van de SAWORA meetgegevens (links) en de daarvan afgeleide terrestrische stralingskaart van Nederland (rechts).

⁶ SAWORA staat voor: 'Stralingsaspecten van woonhygiëne en verwante radioecologische eigenschappen'.

⁷ Op de Waddeneilanden is een 3x3 km grid gehanteerd.

Tien jaar later zijn deze data in een GIS-omgeving gecombineerd met gegevens over bodemsoorten in Nederland (Smetsers en Blaauboer 1996). Uit die combinatie is een terrestrische kaart van Nederland geconstrueerd (Figuur 1, rechts). De terrestrische straling in Nederland, uitgedrukt in omgevingsdosisequivalenttempo, varieert als gevolg van verschillen in bodemtype tussen 15 en 75 nSv.h⁻¹. Vanwege de beperkte omvang van ons land en de geringe verschillen in hoogte zien we in Nederland nauwelijks een ruimtelijke variatie in kosmische straling op leefniveau. Wel hebben we te maken met snelle en langzame variaties in de tijd, vanwege verschillen in luchtdruk en de elfjarige zonnecyclus. Maar als gemiddelde waarde kan voor kosmische straling in Nederland een omgevingsdosisequivalenttempo van eveneens 40 nSv.h⁻¹ gehanteerd worden (Smetsers en Blaauboer 1997).⁸

2.2 Invloed van bouwen en wonen

Woningen beïnvloeden op twee manieren de blootstelling van bewoners aan externe straling. Op de eerste plaats zijn bouwmaterialen zelf een bron van straling. Anderzijds schermen bouwmaterialen straling vanuit het buitenmilieu af. Wat we in een woning meten is dus de resultante van deze twee effecten. Als we de bruto of netto bijdrage van bouwmaterialen aan het externe stralingsniveau in de woning willen weten, dan zullen we die waarden dus moeten berekenen uit (1) meetgegevens in de woning, (2) de hoogte van de kosmische en terrestrische stralingsniveaus in het buitenmilieu (zie paragraaf 2.1) en (3) de geschatte mate van afscherming van kosmische en terrestrische straling door de woning.

In 2010 zijn de eindresultaten gerapporteerd van een onderzoek naar de stralingsbelasting in woningen door radon en externe straling (Bader et al. 2010). In dat rapport zijn de resultaten samengevat van metingen van het externe stralingsniveau in onder meer de woonkamer, de slaapkamer en de hal van circa 300 Nederlandse woningen, gebouwd in de periode 1994 tot en met 2003 (De Jong en van Dijk 2009). Voor de woonkamer is toen, uitgedrukt in omgevingsdosisequivalenttempo, een gemiddelde waarde gevonden van 0,89 mSv j⁻¹. Voor de slaapkamer en de hal zijn iets lagere waarden gevonden van 0,87 respectievelijk 0,86 mSv j⁻¹.

In (Bader et al. 2010) is ook beschreven in welke mate de woning afschermt tegen kosmische en terrestrische straling van buiten: kosmische straling wordt voor gemiddeld ca. 60% doorgelaten en terrestrische straling voor circa 10%. Er is geen reden om aan te nemen dat deze transmissiefactoren na die tijd significant zijn veranderd.

Als we deze gegevens toepassen, dan leidt dat tot het overzicht zoals weergegeven in Tabel 1.

⁸ In deze beschouwing wordt een geringe dosis door blootstelling aan neutronen van kosmische oorsprong niet meegenomen.

Tabel 1 Omgevingsdosisequivalent per jaar [mSv j^{-1}] door verschillende natuurlijke bronnen van straling, buiten (linkerkolom) en in de woonkamer (rechterkolom). In alle gevallen is uitgegaan van de gemiddelde situatie in Nederland.

Omgevingsdosisequivalent per jaar [mSv j^{-1}]	Buiten	Binnen
Terrestrische straling	0,35	0,04
Kosmische straling	0,35	0,21
Straling uit bouwmaterialen	0,00	0,64
Totaal	0,70	0,89

2.3 Effectieve dosis per jaar door natuurlijke straling in de woning

In Tabel 1 is voor de gemiddelde situatie in Nederland het over een jaar gesommeerde omgevingsdosisequivalent weergegeven, buiten respectievelijk in de woning (woonkamer). Als we op basis hiervan de effectieve dosis willen bepalen, dan moeten we dus rekening houden met de conversie van omgevingsdosisequivalent naar effectieve dosis. Merk op dat die conversie 1 is voor kosmische straling en circa 0,6 voor terrestrische straling en straling uit bouwmaterialen (zie Bijlage 1). Daarnaast moet rekening gehouden worden met de verblijftijd. Een persoon in Nederland verblijft gemiddeld circa 90% van de tijd binnen en 10% van de tijd buiten.

Tabel 2 Gemiddelde effectieve stralingsdosis per jaar [mSv j^{-1}] voor een persoon als gevolg van externe straling door verschillende natuurlijke bronnen van straling, voor verschillende aannames over de verblijftijd binnen respectievelijk buiten. Ter vergelijking is ook een indicatie gegeven van de effectieve stralingsdosis als gevolg van blootstelling aan radon- en thorondochters. In alle gevallen is uitgegaan van de gemiddelde situatie in Nederland.

Effectieve jaardosis [mSv j^{-1}]	100% buiten	100% binnen	90% binnen, 10% buiten
Vanwege externe straling			
Terrestrische straling	0,21	0,02	0,04
Kosmische straling ¹	0,35	0,21	0,22
Bruto bijdrage bouwmaterialen	0,00	0,39	0,35
Totale jaardosis externe straling	0,56	0,62	0,61
Afscherming door bouwmaterialen	0,00	-0,33	-0,30
Netto bijdrage bouwmaterialen	0,00	0,06	0,05
Vanwege inhalatie²			
Als gevolg van radondochters	0,16	0,50	0,47
Als gevolg van thorondochters	0,00	0,22	0,20
Totale jaardosis inhalatie	0,16	0,72	0,66

¹ De stralingsdosis als gevolg van deelnemen aan vliegverkeer is in deze getallen niet meegenomen.

² Gebaseerd op dosisconversiecoëfficiënten volgens (UN 2006). Onderliggende data zijn ontleend aan (Smetsers en Blaauboer 1996, Smetsers et al. 2015).

De resultaten van de omrekening zijn weergegeven in Tabel 2. Ter vergelijking zijn in die tabel ook schattingen⁹ gegeven van de effectieve dosis door de inhalatie van radon- en thoronochters.

Voor de huidige situatie in Nederland vinden we dus dat bouwmaterialen gemiddeld circa $0,35 \text{ mSv j}^{-1}$ bijdragen aan de stralingsdosis¹⁰, maar ze schermen aan de andere kant circa $0,30 \text{ mSv j}^{-1}$ af aan kosmische en vooral terrestrische straling. De netto bijdrage van bouwmaterialen aan de effectieve stralingsdosis van de Nederlandse burger bedraagt momenteel dus gemiddeld zo'n $0,05 \text{ mSv j}^{-1}$.

⁹ Hierbij is gebruik gemaakt van dosisconversiecoëfficiënten volgens UN (2006). Als vuistregel geldt dan: langdurige blootstelling aan 100 Bq m^{-3} radon of aan een EETC van 10 Bq m^{-3} levert een effectieve jaardosis op van circa 3 mSv. Omdat er momenteel veel discussie is over de daarvoor te hanteren conversiefactoren, zijn deze schattingen onder voorbehoud.

¹⁰ In de aanname dat de persoon in kwestie 90% van de tijd binnenshuis en 10% van de tijd buitenshuis verblijft.

3 Wet- en regelgeving

Dit hoofdstuk beschrijft welke wettelijke voorschriften in Nederland rond gammastraling uit bouwmaterialen momenteel van toepassing zijn, en welke nieuwe verplichtingen voortkomen uit de voorschriften in de EURATOM-richtlijn 2013/59 (EURATOM 2014), ook wel BSS genoemd. De BSS moet begin 2018 zijn ingebed in de nationale regelgeving. Waar van toepassing gaat dit rapport uit van de *conceptversie* van de voorgenoemde implementatie in de Nederlandse regelgeving van 28 augustus 2017 (ANVS 2017).

3.1 Huidige regelgeving in Nederland

Bouwmaterialen moeten, net als alle andere materialen, op basis van hun radiologische eigenschappen zijn vrijgesteld¹¹ voor toepassing zonder melding of vergunning op grond van de Kernenergiewet (Bs 2001). Op dit moment gelden in Nederland geen aanvullende wettelijke criteria voor bouwmaterialen in relatie tot de straling die zij veroorzaken.

3.2 Nieuwe verplichtingen volgend uit de BSS

In de BSS (EURATOM 2014) zijn de bepalingen met betrekking tot gammastraling uit bouwmaterialen beschreven in artikel 75. In dat artikel wordt een *referentieniveau* gepresenteerd voor de externe blootstelling in de woning aan door bouwmaterialen uitgezonden gammastraling. Dit BSS-referentieniveau bedraagt 1 mSv per jaar *'bovenop de externe blootstelling buitenshuis'*.

In de BSS wordt niet gespecificeerd wat *'bovenop de externe blootstelling buitenshuis'* precies betekent, maar in twee belangrijke internationale rapporten wordt dat wel uiteengezet. In een rapport van de Europese Commissie, dat algemeen beschouwd wordt als de basis van de BSS voor dit onderwerp (EC 1999), is een achtergrond correctiewaarde afgeleid van $0,25 \text{ mSv j}^{-1}$. Op dit moment wordt door het *Comité Européen de Normalisation* (CEN) een Europese norm uitgewerkt inzake de emissie van gammastraling door bouwmaterialen (CEN 2017). Dat rapport hanteert een achtergrond correctiewaarde van ruim $0,29 \text{ mSv j}^{-1}$. In paragraaf 5.1 worden deze schattingen van de achtergrond correctie in meer detail toegelicht en vergeleken met de situatie in Nederland.

Omdat de verschillende achtergrond correctiewaarden tamelijk dicht bij elkaar liggen, hanteren we in dit rapport waar nodig een voorlopige, afgeronde waarde voor de achtergrondcorrectie van $0,3 \text{ mSv j}^{-1}$. Dat betekent dus dat de gemiddelde effectieve jaardosis door bouwmaterialen in nieuwe Nederlandse woningen *bruto* niet meer mag bedragen dan $1,3 \text{ mSv j}^{-1}$, en *netto* niet meer dan 1 mSv j^{-1} . Wat hier *netto* genoemd wordt, heet in veel onderliggende stukken *'excess dose'* of *'excess exposure'* (EC 1999, CEN 2017, De With 2017).

¹¹ De grenswaarden voor de gewogen massieke activiteiten van de natuurlijke uranium- en de thoriumreeks in evenwicht zijn volgens de huidige regeling 1000 Bq kg^{-1} . Voor K-40 geldt een waarde van $100.000 \text{ Bq kg}^{-1}$. Een materiaal dat natuurlijke radioactiviteit bevat is vrijgesteld als de gewogen massieke activiteit, $C_{\text{U-238}} [\text{Bq kg}^{-1}]/1000 + C_{\text{Th-232}} [\text{Bq kg}^{-1}]/1000 + C_{\text{K-40}} [\text{Bq kg}^{-1}]/100.000$, ten hoogste 1 bedraagt.

De BSS verplicht de lidstaten verder om een lijst vast te stellen van 'grondstoffen die speciale aandacht behoeven vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming, vanwege de door deze materialen uitgezonden gammastraling'. Hiervoor is een indicatieve lijst opgenomen in bijlage XIII van de BSS. Het betreft:

1. Natuurlijke materialen:
 - A. Aluinschalie.
 - B. Bouwmaterialen of additieven van natuurlijke magmatische oorsprong, zoals:
 - granitoiden (zoals graniet, syeniet en orthogneis);
 - porfier;
 - tuf;
 - puzzolaan;
 - lava.
2. Materialen op basis van restmateriaal uit industrieën die van nature voorkomend radioactief materiaal verwerken, zoals:
 - vliegas;
 - fosfo(r)gips;
 - fosforhoudende slakken;
 - tinslakken;
 - koperslakken;
 - slib van de aluminiumproductie;
 - restmateriaal van de staalproductie.

Deze indicatieve lijst is zonder wijzigingen overgenomen in de ontwerpregelgeving basisnormen stralingsbescherming.¹² NB: Als we in dit rapport praten over NORM ('Naturally Occurring Radioactive Materials'), dan verwijzen we daarmee expliciet naar de grondstoffen zoals genoemd in deze indicatieve lijst.

Voordat bouwmaterialen die NORM bevatten in de handel worden gebracht moeten de lidstaten er voor zorgen dat van die bouwmaterialen de massieke activiteiten zijn bepaald van K-40, de uraniumreeks (U-238 en dochternucliden, waaronder Ra-226) en de thoriumreeks (Th-232 en dochternucliden, waaronder Ra-228). Omdat van beide reeksen verondersteld wordt dat alle radionucliden in die reeks in seculier evenwicht zijn, is het voldoende om de massieke activiteit te kennen van slechts één nuclide uit elke reeks. Vaak zijn dat Ra-226 voor de uraniumreeks en Th-232 (of Ra-228) voor de thoriumreeks. Vervolgens moet op grond hiervan een zogenoemde 'index I voor activiteitsconcentratie' worden bepaald, volgens:

$$I = \frac{C_{Ra-226}}{300} + \frac{C_{Th-232}}{200} + \frac{C_{K-40}}{3000}$$

waarbij C_{Ra-226} , C_{Th-232} en C_{K-40} de massieke activiteiten [$Bq\ kg^{-1}$] zijn van de overeenkomstige radionucliden(reeksen) in het bouw materiaal. De indexwaarde $I=1$ geldt als conservatieve screeningswaarde om materialen te herkennen die tot een overschrijding van het BSS-referentieniveau kunnen leiden.

¹² Bijlage 6.1 bij de ontwerpregelgeving basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (ontwerpMrbs) d.d. 28 augustus 2017. NB: in een meer recente versie zijn alsnog twee extra grondstoffen opgenomen, namelijk zirkoonzand en bodemas.

Voor bouwmaterialen waarvan de stralingsdoses het referentieniveau mogelijk overschrijden, moeten de lidstaten passende maatregelen vaststellen. Het kan daarbij onder meer gaan om specifieke voorschriften in de bouwregelgeving of beperkingen van het beoogde gebruik van deze materialen (EURATOM 2014).

3.3 Buitenwettelijke afspraken over straling van bouwmaterialen

In 2004 is een tienjarig convenant opgesteld waarin het toenmalige ministerie van VROM en VNO-NCW samen hebben afgesproken om te streven naar een *standstill* van de stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen. Dat gold zowel voor de concentratie van radon in woningen als voor de gammastraling uit bouwmaterialen. Eertijds is afgesproken om de situatie periodiek te evalueren door middel van *surveys*. Het in hoofdstuk 2 aangehaalde rapport beschrijft de resultaten van de eerste grootschalige survey die daarna is uitgevoerd (Bader et al. 2010). Er is toen in vele honderden woningen gekeken naar de radonconcentratie, naar de ventilatie tussen kamers in de woning en de uitwisseling met de buitenlucht en naar het stralingsniveau in de woning. Eén van de conclusies was toen dat de dosis door externe straling binnenshuis van $0,35 \text{ mSv j}^{-1}$ niet significant is veranderd ten opzichte van eerdere metingen. Deze door metingen bepaalde waarde komt ook overeen met waarden berekend voor meerdere woningvarianten¹³ met het geavanceerde rekenmodel MARMER (Blaauboer en Pruppers 2000).

Standstill met betrekking tot gammastraling uit bouwmaterialen betekent dus concreet dat de gemiddelde effectieve jaardosis door bouwmaterialen in nieuwe woningen bruto niet meer mag bedragen dan $0,35 \text{ mSv j}^{-1}$, en netto niet meer dan $0,05 \text{ mSv j}^{-1}$. In het laatste cijfer is verdisconteerd dat bouwmaterialen gemiddeld $0,30 \text{ mSv j}^{-1}$ afschermen aan kosmische en vooral terrestrische straling van buiten.

De Nederlandse overheid streeft er naar om het *standstill*-beginsel te continueren.

¹³ Voor vijf woningvarianten zijn toen voor meerdere kamers (aanname: 100% verblijftijd) gemiddelde waarden gevonden voor de effectieve jaardosis tussen $0,3$ en $0,4 \text{ mSv j}^{-1}$. Alleen voor een woningvariant op basis van houtskeletbouw werden significant lagere waarden gevonden.

4 Methodiek regulering bouwmaterialen op hoofdlijnen

Of een bouw materiaal voldoet aan het referentieniveau voor gammastraling kan beoordeeld worden door de index I te bepalen zoals beschreven in hoofdstuk 3. Deze methode gaat uit van de aanname dat er sprake is van één type bouw materiaal, toegepast in een dichte ruimte met afmetingen 5 m x 4 m x 2,5 m en wanden van 20 cm dik. Voor de soortelijke massa van het materiaal wordt de waarde van beton aangenomen. Deze uitgangspunten kunnen in sommige gevallen erg conservatief uitpakken. Toepassing van deze methode is daarnaast arbeidsintensief, omdat van het betreffende materiaal de massieke activiteiten van de uraniumreeks, de thoriumreeks en K-40 bepaald moeten worden. Er is daarom behoefte aan een methodiek die meer verfijnd werkt en minder meetinspanningen met zich brengt. Zo'n methode is ontwikkeld door NRG (De With 2017). Deze methode bouwt voort op de rekenconventies volgens het CEN (CEN 2017). In dit hoofdstuk worden de CEN-formule en de NRG-methode in het kort beschreven en waar nodig van kanttekeningen voorzien.

Het referentieniveau geldt '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*'. Bij berekeningen van de dosis uit bouwmaterialen kan het expliciet of impliciet aftrekken van de achtergrond snel tot misverstanden leiden, vooral als het gaat om berekeningen van de dosis bij toepassing van meerdere bouwlagen. Daarom wordt de achtergrond in dit rapport nergens afgetrokken: berekeningen hebben dus altijd betrekking op de *bruto* jaardosis, zoals gedefinieerd in paragraaf 2.3. Waar nodig wordt de achtergrondwaarde verdisconteerd door voor het BSS-referentieniveau eveneens een *bruto* waarde van $1,3 \text{ mSv j}^{-1}$ te hanteren.

4.1 Bepaling gammastraling uit bouwmaterialen volgens CEN

Het CEN presenteert een rekenmethode waarmee de effectieve dosis ten gevolge van gammastraling afkomstig uit een bouw materiaal kan worden benaderd, die men ontvangt in een kamer met wanden, vloer en plafond die volledig zijn opgebouwd uit dit bouw materiaal. Hiertoe wordt alleen het effect van de aanwezigheid van nucliden uit de uraniumreeks (gekaracteriseerd door Ra-226), de thoriumreeks (gekaracteriseerd door Th-232) en K-40 beschouwd. De kamer die hiervoor wordt beschouwd (vanaf nu '*CEN-kamer*¹⁴' genoemd) heeft de afmetingen 4 m x 3 m x 2,5 m. De methode vereist de volgende invoergegevens:

- per nuclide(reeks) (Ra-226, Th-232, K-40) de massieke activiteit, C_{nuclide} , in het bouw materiaal [Bq kg^{-1}];
- de soortelijke massa van het bouw materiaal, ρ , [kg m^{-3}];
- de (laag)dikte van het gebruikte bouw materiaal, d , [m].

Het product van ρ en d wordt oppervlaktedichtheid [kg m^{-2}] genoemd.

¹⁴ De voor dit doel toegepaste CEN-kamer is qua afmetingen identiek aan de algemene door CEN gedefinieerde referentiekamer, maar hij heeft geen deuren en ramen. Merk op dat de afmetingen van de CEN-kamer anders zijn dan toegepast voor onderbouwing van de I -index.

Met deze invoerwaarden kan de effectieve dosis die gedurende een jaar wordt ontvangen **in het midden van de kamer** worden benaderd met de volgende formule:

$$D = \left[\begin{array}{l} [281 + 16,3\rho d - 0,0161(\rho d)^2] \times C_{Ra-226} \\ + [319 + 18,5\rho d - 0,0178(\rho d)^2] \times C_{Th-232} \\ + [22,3 + 1,28\rho d - 0,00114(\rho d)^2] \times C_{K-40} \end{array} \right] \times 10^{-6} \text{ [mSv]} \quad [1]$$

Hierin wordt aangenomen dat de blootstelling 7000 uur per jaar is (80% verblijftijd) en dat voor de conversie van geabsorbeerde dosis naar effectieve dosis een coëfficiënt van 0,7 [Sv Gy⁻¹] kan worden gebruikt.

Ten slotte wordt aangenomen dat de muren van de ruimte de terrestrische achtergrondstraling volledig afschermen. Dit betekent volgens CEN dat 0,29 mSv j⁻¹ mag worden afgetrokken van de met formule [1] berekende effectieve jaardosis.

Naast de dosisbenadering met behulp van formule [1] heeft CEN ook een uitgebreide methodiek ontwikkeld (CEN 2017) die geschikt is voor de dosisbenadering voor ruimtes met verschillende typen wanden en/of wanden die uit maximaal twee verschillende constructielagen bestaan. Deze uitgebreide methodiek omvat een tabel (*Table 2*) waarin per wand (van de CEN-kamer), per beschouwde nuclide(reeks) en per Bq kg⁻¹ de bijdrage aan de dosis in het midden van de ruimte is berekend. Met deze tabel kan de dosisbijdrage van elke wand apart worden bepaald en opgeteld. Bijlage 2 bevat een beschrijving van deze uitgebreide methodiek. Bovendien bevat het een beschrijving van het onderliggende model waarmee formule [1] is afgeleid. Deze formule [1] ligt ten grondslag aan de NRG-methode.

4.2 NRG-methode voor het toetsen van bouwmaterialen

4.2.1 *Introductie*

De in de vorige paragraaf beschreven rekenmethode van CEN (formule [1]) houdt rekening met de soortelijke massa van het bouw materiaal en de gebruikte laagdikte. Dit zijn variabelen die in de berekening van de index I vast gekozen zijn. Daarom biedt formule [1] uitkomst voor het schatten van de effectieve jaardosis ten gevolge van gammastraling uit bouwmaterialen met een lagere soortelijke massa dan die van beton, of uit bouwmaterialen die in dunnere lagen dan 20 cm worden toegepast.

Bij de '*indicatieve lijst*¹⁵ van grondstoffen die speciale aandacht behoeven' gaat het om grondstoffen met een hoog gehalte aan radionucliden van natuurlijke oorsprong (NORM). Het kan bijvoorbeeld gaan om vlieg-as of hoogovenslakken. Om op bouwmaterialen met dit soort grondstoffen de CEN-formule toe te kunnen passen, moet de massieke activiteit van het uiteindelijk verkregen bouw materiaal worden bepaald. Dat kan via metingen maar ook door te kijken naar de productsamenstelling van het bouw materiaal. Die is bij de fabrikant vaak goed bekend. Hieronder valt ook het gewichtspercentage NORM.

¹⁵ Bijlage 6.1 bij de ontwerpregeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (ontwerpMrbs).

NRG heeft een alternatieve methode ontwikkeld om van een bouw materiaal vast te stellen of bij toepassing daarvan in de woning de effectieve jaardosis als gevolg van externe straling onder het BSS-referentieniveau zal blijven. De toets heeft als invoerparameters:

- het gewichtspercentage NORM in het bouw materiaal;
- de soortelijke massa van het bouw materiaal;
- de laagdikte waarmee het bouw materiaal wordt toegepast.

De berekeningsmethode van CEN (formule [1]) ligt aan deze methode ten grondslag.

4.2.2 Opzet van de methodiek

In De With (2017) is allereerst in kaart gebracht in welke mate bouw materialen zonder NORM bijdragen aan de effectieve jaardosis door gammastraling. Daarbij is ook gekeken naar de *maximale* bijdrage van deze bouw materialen aan de jaardosis. Op basis van een uitgebreide data-analyse is geconcludeerd dat deze bijdrage in bijna alle gevallen lager is dan 0,65 mSv per jaar. Dit betekent dat er ongeveer 1,3 mSv – 0,65 mSv = 0,65 mSv overblijft voor de bijdrage van eventueel toe te voegen NORM.

Vervolgens wordt in de berekeningen ter vereenvoudiging aangenomen dat het toevoegen van NORM altijd gebeurt met materiaal van dezelfde samenstelling, door ons nu sNORM genoemd. Voor de verhouding van de nucliden (reeksen) in sNORM is de samenstelling van vlieg as ('fly ash') genomen. Als extra conditie geldt dat de gewogen som van de massieke activiteiten is gemaximeerd op 1 volgens de vergelijking:

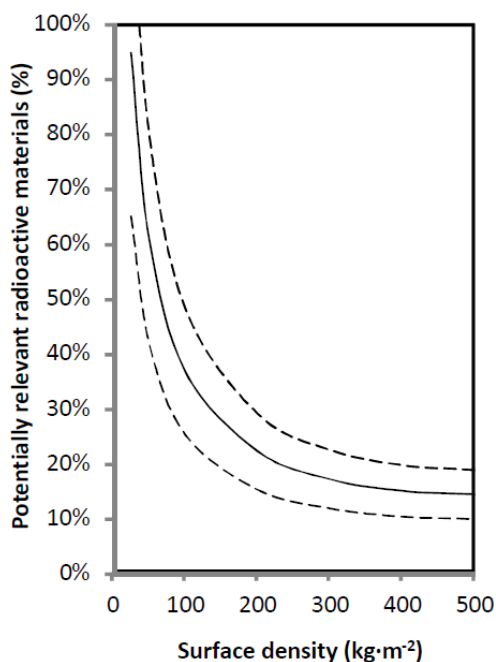
$$\frac{C_{Ra-226}}{1000} + \frac{C_{Th-232}}{1000} + \frac{C_{K-40}}{10.000} \leq 1$$

Het resultaat is sNORM met de volgende massieke activiteiten: $C_{Ra-226} = 500 \text{ Bq kg}^{-1}$, $C_{Th-232} = 300 \text{ Bq kg}^{-1}$ en $C_{K-40} = 2000 \text{ Bq kg}^{-1}$.

Er wordt aangenomen dat het bijmengen van NORM geen invloed heeft op de soortelijke massa van het bouw materiaal. Deze aanname vereenvoudigt de analyse aanzienlijk, omdat hierdoor in formule [1] alleen de massieke activiteit van de nucliden hoeft te worden aangepast, terwijl de oppervlakedichtheid gelijk blijft.¹⁶ Dit betekent dat de methodiek bedoeld is voor toetsing van reeds bestaande bouw materialen, waarvan de effectieve soortelijke massa bekend is.

De NRG-methode is in De With (2017) voor oppervlakedichtheden van 25, 50, 100, 200, 300, 400 en 500 kg m⁻² toegepast voor jaardoses van 0,65, 0,45 en 0,85 mSv. Dit resulteert in dalende curves voor het gewichtspercentage sNORM versus oppervlakedichtheid, zie Figuur 2.

¹⁶ Wanneer de effectieve dichtheid wél afhankelijk is van de hoeveelheid bijgemengde NORM, zou de methodiek complexer zijn. De NRG-methode kan dus niet zonder meer gebruikt worden om vooraf te bepalen hoeveel NORM nog bijgemengd kan worden tot het referentieniveau voor de jaardosis wordt bereikt, omdat door het bijmengen de effectieve dichtheid kan veranderen.



Figuur 2 Het gewichtpercentage sNORM ('Potentially relevant radioactive materials') versus oppervlakedichtheid ('Surface density'). De doorgetrokken lijn komt overeen met een effectieve dosis van $0,65 \text{ mSv j}^{-1}$. De gestreepte lijnen komen overeen met $0,45 \text{ mSv j}^{-1}$ (onderste lijn) en $0,85 \text{ mSv j}^{-1}$ (bovenste lijn). Overgenomen uit De With (2017).

4.2.3

Inventarisatie en berekening massieke activiteit huidige bouwmaterialen
 Bouwmaterialen bevatten vaak meerdere grondstoffen. Per grondstof is in De With (2017) met behulp van een literatuurstudie geïnventariseerd wat in Europa de gemiddelde massieke activiteit is voor iedere nuclide(reeks). Tevens heeft NRG voor veel voorkomende bouwmaterialen, zoals voor cellenbeton, baksteen, kalkzandsteen en beton, in kaart gebracht in welke samenstelling deze bouwmaterialen voorkomen. Met deze gegevens is per bouw materiaal de massieke activiteit voor iedere nuclide(reeks) berekend. Ter verificatie zijn de berekende massieke activiteiten vergeleken met gemeten data. Hiervoor zijn de resultaten uit een Europese literatuurstudie (EC 1997) en een Nederlandse survey (De Jong et al. 2006) gebruikt.

Vergelijking met de Europese dataset

De berekende massieke activiteiten komen tamelijk goed overeen met de Europese data. De grootste verschillen komen voor bij cellenbeton; de berekende waarden zijn daar ongeveer een factor twee *lager* dan de gemeten data. Als mogelijke oorzaak wordt aangedragen dat in de berekening een type beton wordt gehanteerd met maar een beperkte hoeveelheid NORM. Bovendien werd in het verleden aluinschalie toegevoegd aan het beton, wat kan resulteren in hogere activiteiten in de Europese dataset. Bovenal wordt opgemerkt dat de Europese dataset niet per definitie representatief is voor de markt. Er kan een bias bestaan richting bouwmaterialen met hogere massieke activiteiten, vanwege een grotere aandacht voor dat type bouwmaterialen. Voor kalkzandsteen zijn de berekende waarden voor Ra-226 en Th-232 ongeveer een factor twee *hoger* dan de gemeten data. Dit wordt toegeschreven aan een

conservatieve schatting van het aandeel aan zand, de belangrijkste grondstof voor kalkzandsteen.

Vergelijking met resultaten van de Nederlandse survey

De resultaten van de Nederlandse *survey* bevatten naast een gemiddelde waarde ook de standaarddeviatie van de data. Voor de berekeningen is de standaarddeviatie ook bepaald door de variatie in de productsamenstelling en de variatie in de massieke activiteiten mee te nemen in de berekening. De berekende waarden komen goed overeen met de gemeten waarden. Het grootste verschil zit in de resultaten voor baksteen met vliegias, waarvoor de berekeningen de gemeten massieke activiteiten met ongeveer 50% onderschatten. Als reden wordt aangegeven dat er waarschijnlijk variatie zit in het gewichtspercentage vliegias dat wordt toegevoegd.

4.2.4 Toepassing NRG-methode op categorieën bouwmaterialen

Voor gipsgebonden pleister, gipsblokken, gipsplaat, cellenbeton, buitenmuurbaksteen, keramische binnenmuursteen, kalkzandsteen en beton is de NRG-methode toegepast. Hiervoor is de gemiddelde productsamenstelling uit de literatuur gebruikt met random gekozen massieke activiteit, waarbij een log-normale verdeling is gehanteerd met gemiddelde en variatiecoëfficiënt zoals gevonden in de literatuur. Op die manier is de variatie in de massieke activiteit in bouwmaterialen ook meegenomen in de analyse. Naast deze benadering op basis van huidige productsamenstellingen is er per productgroep tevens een conservatieve schatting gemaakt door een 'worst-case'-productsamenstelling te definiëren. Hierbij zijn voor alle grondstoffen uit de indicatieve lijst (paragraaf 3.2) massieke activiteiten bepaald die zorgen voor een gewogen som van de massieke activiteiten van 1, zoals beschreven in paragraaf 4.2.2.

Bij een gehanteerd dosis criterium van $0,65 \text{ mSv j}^{-1}$ (doorgetrokken lijn in Figuur 2) blijkt dat een aantal productsamenstellingen in de productgroep *binnenmuursteen* de toetsingscurve overschrijdt. Hetzelfde geldt voor twee productsamenstellingen van *beton*.

4.3 Voorbeeld toepassing CEN-formule en NRG-methode

Ter illustratie en verduidelijking wordt in deze paragraaf een voorbeeld gepresenteerd van de toepassing van de CEN-formule en de NRG-methode. Daarbij hanteren we modelparameters zoals in (CEN 2017), is de conversiefactor van geabsorbeerde dosis naar effectieve dosis $0,7 \text{ Sv Gy}^{-1}$ en nemen we aan dat men 80% van de tijd in de ruimte aanwezig is. Dit komt overeen met 7000 h j^{-1} ¹⁷. De *bruto* dosisbijdrage van bouwmaterialen wordt beschouwd, dus zonder de afscherming van de achtergrondstraling te verdisconteren. Voor de gedetailleerde dosisberekening, die in de volgende paragraaf wordt gepresenteerd, is het conceptueel model gebruikt dat aan de basis ligt van de CEN-formule (Markkanen 1995). Hiertoe heeft RIVM dat model geïmplementeerd in een computercode. De resultaten uit het CEN-rapport worden met deze computercode binnen enkele procenten nauwkeurig gereproduceerd.

¹⁷ We hebben hiervoor gekozen om conform te zijn met CEN. In Nederland is de verblijftijd binnen echter 90%.

4.3.1

Een kamer opgetrokken uit beton met een gipslaag

In woningen wordt als constructiemateriaal veelal beton gebruikt, terwijl de afwerking van muren (pleisterwerk of raapwerk) vaak met gips/kalk wordt gedaan. In dit voorbeeld wordt uitgegaan van de CEN-kamer waarvan alle wanden bestaan uit een betonlaag van 20 cm dik met daaroverheen een gipslaag van 3 cm dik. We zullen deze bouwmaterialen beschouwen mét en zonder toevoeging van sNORM. In Tabel 3 staan de eigenschappen van de beschouwde bouwmaterialen. De percentages toegevoegd sNORM volgen uit de NRG-methodiek (door Figuur 2 af te lezen); er is aangenomen dat de materialen het maximaal toelaatbare percentage sNORM bevatten. Bij toevoeging van sNORM dragen de massieke activiteiten van het basismateriaal en die van het sNORM proportioneel bij aan de uiteindelijke massieke activiteiten van het bouw materiaal.

Tabel 3 Massieke activiteiten per nuclide voor diverse bouwmaterialen.

Bouw materiaal	Soortelijke massa ρ [kg m ⁻³]	Mass. act. C_{Ra-226} [Bq kg ⁻¹]	Mass. act. C_{Th-232} [Bq kg ⁻¹]	Mass. act. C_{K-40} [Bq kg ⁻¹]
Beton ^{a)}	2350	40	30	400
Gips ^{b)}	900	14	6,4	17
sNORM (vliegas) ^{c)}	n.v.t. ^{d)}	500	300	2000
Beton + 14,6% sNORM	2350	107	69	634
Gips + 92% sNORM	900	461	277	1841

^{a)} Referentiebeton zoals afgeleid in (EC 1999) en toegepast in (CEN 2017).

^{b)} Volgens De With (2016), gebaseerd op conservatieve waarden van natuurgips.

^{c)} De gewogen som van de massieke activiteiten is gelijk aan 1.

^{d)} In de modellering wordt aangenomen dat bijmengen van NORM geen invloed heeft op de soortelijke massa van het uiteindelijke bouw materiaal.

Met behulp van de RIVM computercode kan de effectieve jaardosis in de kamer worden berekend. Tabel 4 toont de bruto effectieve jaardosis in het midden van de kamer voor de situaties zonder en mét toevoeging van sNORM. Er is onderscheid gemaakt in de dosisbijdrage ten gevolge van de gammastraling uit de betonlaag en uit de gipslaag. In de situatie waarbij geen sNORM is toegevoegd draagt de gipslaag nauwelijks bij aan de effectieve jaardosis. Sterker nog, de dosisreductie door de afscherming van de achterliggende betonlaag is groter dan de dosis die de gipslaag zelf toevoegt. Een kamer opgebouwd uit beton zonder gipslaag geeft namelijk een effectieve jaardosis van 0,48 mSv.

Tabel 4 Bruto effectieve dosis per jaar in het midden van de CEN-kamer ten gevolge van gammastraling uit bouwmaterialen, berekend voor bouwmaterialen zonder toegevoegd sNORM (op één na rechterkolom) en mét toegevoegd sNORM (rechterkolom). De gebruikte massieke activiteit per nuclide is gegeven in Tabel 3.

Bouwlaag	Laagdikte D [m]	Oppervlakte-dichtheid ρd [kg m ⁻²]	Zonder sNORM Eff. dosis [mSv j ⁻¹]	Met sNORM Eff. dosis [mSv j ⁻¹]
<i>Drager:</i> Beton	0,20	470	0,43	0,95
<i>Afwerking:</i> Gips	0,03	27	0,01	0,44
Totaal			0,44	1,39

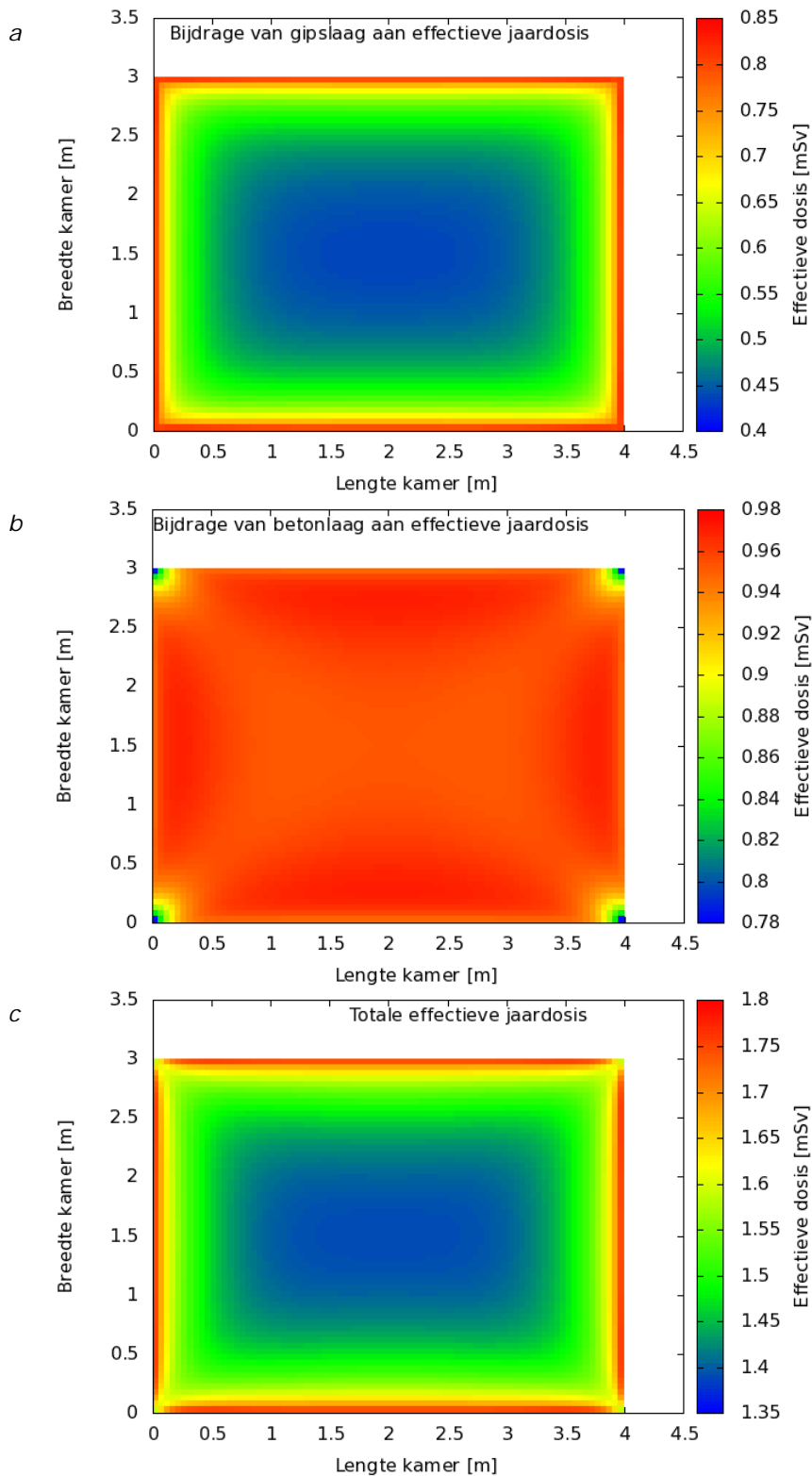
De rechterkolom in Tabel 4 toont de effectieve jaardosis wanneer beide bouwmaterialen een percentage sNORM bevatten die volgens de NRG-methode maximaal is toegestaan. De dosis van de gipslaag met sNORM is aanzienlijk hoger dan die zonder toegevoegd sNORM. Bovendien overschrijdt de totale effectieve jaardosis van 1,39 mSv j⁻¹ het (bruto) referentieniveau van 1,3 mSv j⁻¹.

4.3.2 Ruimtelijke verdeling van de effectieve jaardosis

In Figuur 3 is de ruimtelijke verdeling van de effectieve jaardosis weergegeven voor het voorbeeld waarbij de maximale hoeveelheid sNORM is toegevoegd (Tabel 4, rechterkolom). De bijdragen van de gipslaag en de betonlaag worden afzonderlijk getoond (a en b), evenals de gesommeerde effectieve jaardosis (c). In de berekening van de bijdrage van betonlaag is zowel de transmissie in de betonlaag als in de bovenliggende gipslaag meegenomen.

Er valt een aantal dingen op. Allereerst is te zien dat de dosis afkomstig van de gipslaag dicht bij de wanden een stuk hoger is dan in het midden van de kamer. (NB: de CEN-berekening (formule [1]) geldt voor het midden van de kamer.) In dit voorbeeld is de dosis dicht bij de wand ongeveer tweemaal hoger dan in het midden van de kamer. Dit wandeffect zien we ook terug in de samengestelde dosis, maar nu iets minder sterk (verschil circa 30%). In het rapport van CEN (CEN 2017) wordt vermeld dat de dosis ruimtelijk maximaal 10% varieert. Die conclusie kunnen wij in zijn algemeenheid niet onderschrijven. In het gebied tot een halve meter van de wanden kan de dosis dus significant hoger zijn dan in het midden. Omdat bedden of banken vaak dicht bij een wand worden geplaatst, zal de werkelijk opgelopen dosis dus hoger uit kunnen vallen dan zoals berekend door de CEN-formule.

Ten tweede valt op dat de berekende doses in de hoeken lager is dan dicht bij een wand. De oorzaak hiervan is de modellering volgens het CEN-model: in de hoekpilaren van hun referentiekamer zit geen bouw materiaal.



Figuur 3 Berekende effectieve jaardosis op 1,25 m hoogte in de CEN-kamer, voor twee lagen bouw materiaal en 7000 uur blootstelling per jaar. De achterste laag bestaat uit 20 cm beton met 14,6% sNORM, de toplaag uit 3 cm gips met 92% sNORM. De figuren tonen voor alle posities in de kamer de effectieve jaardosis van respectievelijk de gipslaag (boven), het beton (midden) en de beide lagen samen (onder). Merk op dat de kleurschaal per figuur verschilt.

In het CEN-rapport wordt gesteld dat de variatie in de grootte van de kamer weinig (< 6%) invloed heeft op de dosis. Om dit te toetsen is de situatie uit het voorbeeld nogmaals uitgerekend, maar dan voor een kamer met grotere afmetingen. Hiervoor is de maatvoering zoals in het rapport van STUK gebruikt (Markkanen 1995): 12 m x 7 m x 2,8 m. In Tabel 5 zijn de resultaten voor de effectieve jaardosis in het midden van beide ruimten weergegeven. Het blijkt dat voor deze situatie de dosis afkomstig van de toplaag in het midden van ruimte voor de grotere kamer hoger is dan in de CEN referentiekamer: het verschil bedraagt 27%. Dit is aanzienlijk hoger dan de 6% zoals genoemd in het CEN-rapport. Ook voor de samengestelde dosis is het verschil nog altijd zo'n 20%. In Bijlage 2, Figuur 5 wordt de ruimtelijke verdeling van de effectieve jaardosis voor deze kamer getoond. Hierin is wederom onderscheid gemaakt in de dosisbijdrage van de toplaag en de onderliggende betonlaag.

Tabel 5 Bruto effectieve dosis per jaar ten gevolge van bouwmaterialen in het midden van twee kamers met verschillende afmetingen. De gebruikte massieke activiteit per nuclide is gegeven in Tabel 3.

Bouwlaag	Laagdikte d [m]	Oppervlakte-dichtheid ρd [kg m ⁻²]	Afmetingen kamer [m]	
			4 x 3 x 2,5	12 x 7 x 2,8
			Effectieve dosis ^{a)} [mSv j ⁻¹]	Effectieve dosis ^{a)} [mSv j ⁻¹]
<i>Drager:</i> Beton + 14,6% sNORM	0,20	470	0,95	1,00
<i>Afwerking:</i> Gips + 92% sNORM	0,03	27	0,44	0,56
Totaal			1,39	1,57

5 Discussie

In de discussie gaan we in op de volgende vier vraagstukken:

1. Wat betekent het begrip '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*' voor de Nederlandse situatie?
2. Vormen de CEN-formule (CEN 2017) en de NRG-methode (De With 2017), zoals opgenomen in de ontwerpverordening van de ANVS (ANVS 2017), een valide alternatief voor de regulering van gammastraling door bouwmaterialen?
3. Wat betekent de voorgestelde methodiek voor de gewenste handhaving van het *standstill* beginsel?
4. Kan toepassing van de voorgestelde methodiek leiden tot andere stralingsrisico's in de woning dan door gammastraling van bouwmaterialen?

Deze vraagstukken worden in de volgende vier paragrafen behandeld.

5.1 Externe blootstelling buitenshuis

In hoofdstuk 2 hebben we laten zien dat de huidige gemiddelde blootstelling aan externe straling in Nederland, uitgedrukt in effectieve dosis en bij een verblijftijd van 90% binnenshuis, $0,61 \text{ mSv j}^{-1}$ bedraagt. Daarvan is $0,35 \text{ mSv j}^{-1}$ afkomstig van bouwmaterialen. Voor de overige $0,26 \text{ mSv j}^{-1}$ gaat het om het niet door bouwmaterialen afgeschermd deel van de terrestrische ($0,04 \text{ mSv j}^{-1}$) en de kosmische straling ($0,22 \text{ mSv j}^{-1}$). De vermeden dosis vanwege afscherming door bouwmaterialen bedraagt $0,30 \text{ mSv j}^{-1}$ (terrestrisch: $0,17 \text{ mSv j}^{-1}$ en kosmisch: $0,13 \text{ mSv j}^{-1}$). Het begrip '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*' betekent voor de Nederlandse situatie dus dat het (netto) BSS-referentieniveau van 1 mSv j^{-1} verhoogd mag worden met een correctiewaarde van $0,30 \text{ mSv j}^{-1}$. Deze correctiewaarde is gebaseerd op metingen van het gemiddelde externe stralingsniveau binnens- en buitenshuis, vertaling van meetgrootheden naar effectieve dosis en een zo goed mogelijke inschatting van de afscherming van terrestrische en kosmische straling door bouwmaterialen in Nederland.

In de BSS-richtlijn (EURATOM 2014) wordt het begrip '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*' niet nader gespecificeerd. Dat gebeurt wel in andere documenten die in Europees kader zijn opgesteld. In de CEN-methodiek (CEN 2017) wordt uitgegaan van een gemiddeld Europees niveau aan terrestrische straling, uitgedrukt in luchtkermatempo, van 60 nGy h^{-1} . CEN gaat uit van volledige afscherming van de terrestrische straling, een conversiefactor *luchtkerma naar effectieve dosis* van 0,7 en een verblijftijd binnenshuis van 7000 h j^{-1} (80%). CEN houdt echter geen rekening met kosmische straling, of gaat er impliciet van uit dat kosmische straling niet door bouwmaterialen geabsorbeerd wordt. Uit deze aannames volgt een berekende achtergrond correctiewaarde van $0,294 \text{ mSv j}^{-1}$, door CEN afgerond tot $0,29 \text{ mSv j}^{-1}$.

Het document Radiation Protection 112 van de Europese Commissie (EC 1999) hanteert dezelfde methodiek, maar gaat uit van een gemiddeld Europees niveau aan terrestrische straling (uitgedrukt in luchtkermatempo)

van 50 nGy h^{-1} . De daaruit berekende correctiewaarde voor de achtergrond is $0,245 \text{ mSv j}^{-1}$, maar die waarde wordt niet expliciet genoemd in het rapport. Wel is in Annex II van dat document een effectieve jaardosis van beton van $1054 \mu\text{Sv j}^{-1}$ (afgerond $1,1 \text{ mSv j}^{-1}$) berekend. Na aftrek van de achtergrond blijft daar $809 \mu\text{Sv j}^{-1}$ (afgerond $0,8 \text{ mSv j}^{-1}$) van over. De achtergrond correctiewaarde lijkt dus $0,3 \text{ mSv j}^{-1}$ te zijn, maar deze waarde is iets te hoog als gevolg van een niet correcte afronding.

Het is niet duidelijk waarom CEN en Radiation Protection 112 de absorptie van kosmische straling niet meenemen in hun beschouwing: zij lichten hun impliciete keuze niet toe. Het weglaten van de kosmische stralingscomponent leidt tot een onderschatting van hun achtergrond correctiewaarde. Daar staat tegenover dat CEN en Radiation Protection 112 ervan uitgaan dat de terrestrische stralingscomponent volledig door bouwmaterialen wordt geabsorbeerd. Die aanname leidt tot een (geringe) overschatting van de achtergrond correctiewaarde. Andere verschillen met de afleiding van de achtergrond correctiewaarde voor de situatie in Nederland (zie paragraaf 2.3) zijn:

1. Het terrestrische stralingsniveau in Nederland is, uitgedrukt in kermatempo, met 33 nGy h^{-1} significant lager dan het Europees gemiddelde van 50 nGy h^{-1} zoals gehanteerd door PR112, respectievelijk 60 nGy h^{-1} zoals gehanteerd door CEN.
2. De verblijftijd binnenshuis is in Nederland ca. 90% terwijl CEN en Radiation Protection 112 een verblijftijd van 80% aannemen.

5.2 Validiteit CEN-formule en NRG-methode als alternatief voor de toelating van bouwmaterialen

5.2.1 Enkelvoudige bouwlaag als uitgangspunt

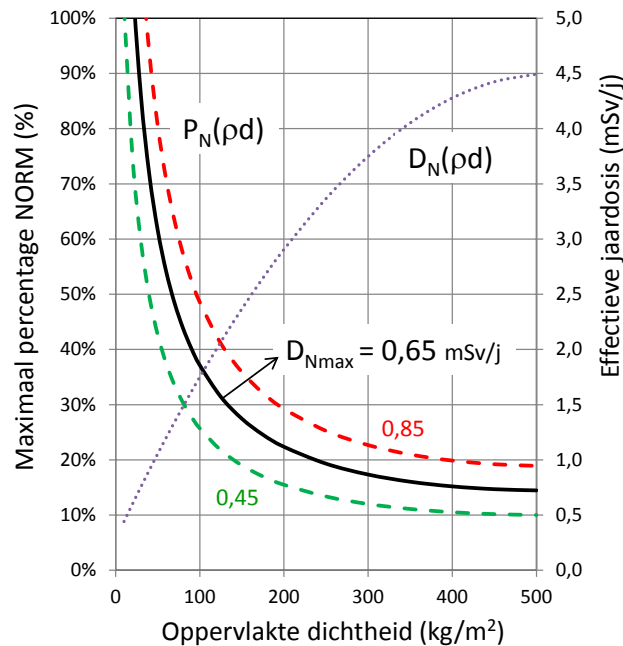
De methode die NRG voorstelt om het gebruik van NORM in bouwmaterialen te reguleren (De With 2017) is gebaseerd op de berekeningswijze van CEN (formule [1]). De toetsing aan het BSS-referentieniveau vindt volgens beide methodes plaats onder de aanname dat er in de woning sprake is van slechts één type bouw materiaal. In essentie gaat het bij de NRG-methode om het volgende principe. Bouwmaterialen leveren van zichzelf een zekere stralingsdosis, D_{Bm} . Daarboven is er ruimte om tot het (bruto) referentieniveau van de BSS, D_{BSS} , NORM toe te voegen. Volgens de NRG-methode mag het toegevoegde NORM een dosis leveren die maximaal D_{Nmax} bedraagt, waarbij geldt: $D_{Nmax} = (D_{BSS} - D_{Bm})$.

NORM van een gegeven samenstelling (door ons sNORM¹⁸ genoemd) levert een stralingsdosis $D_N(\rho d)$ op die afhangt van het product van de *soortelijke massa* (ρ) van het materiaal en de *dikte* (d) bij beoogd gebruik. Het product (ρd) wordt *oppervlakedichtheid* genoemd. In Figuur 4 is de functie $D_N(\rho d)$ geplot voor ρd -waarden tussen 10 en 500 kg m^{-2} . Het toegestane percentage NORM, $P_N(\rho d)$, kan dan op basis van de NRG-methodiek bepaald worden volgens de eenvoudige formule:

¹⁸ De gewogen massieke activiteit is gelijk aan 1 en de nuclidenvrhouding is als in *fly-ash*. sNORM heeft dus de volgende massieke activiteiten: $C_{Ra-226} = 500 \text{ Bq kg}^{-1}$, $C_{Th-232} = 300 \text{ Bq kg}^{-1}$ en $C_{K-40} = 2000 \text{ Bq kg}^{-1}$.

$$P_N(\rho d) = \frac{D_{Nmax}}{D_N(\rho d)} \times 100\% \quad (\text{als } D_N(\rho d) > D_{Nmax})$$

$$\text{en } P_N(\rho d) = 100\% \quad (\text{als } D_N(\rho d) \leq D_{Nmax}) \quad [2]$$



Figuur 4 Bepaling volgens formule [2] van het maximaal toegestane percentage NORM in bouwmaterialen als functie van de oppervlakedichtheid van het materiaal in de beoogde toepassing, voor drie waarden van D_{Nmax} (0,45, 0,65 en 0,85 mSv j^{-1}). De dunne stippellijn toont de jaardosis (formule [1]) als functie van de oppervlakedichtheid van materiaal dat voor 100% uit sNORM bestaat ($C_{Ra-226} = 500 \text{ Bq kg}^{-1}$, $C_{Th-232} = 300 \text{ Bq kg}^{-1}$ en $C_{K-40} = 2000 \text{ Bq kg}^{-1}$).

Dit percentage is geplot in Figuur 4 voor drie waarden van D_{Nmax} , te weten 0,45, 0,65 en 0,85 mSv j^{-1} . De middelste waarde geldt voor de door NRG onderbouwde aanname dat doorsnee bouwmaterialen een dosis leveren van maximaal 0,65 mSv j^{-1} , zodat er $1,3 - 0,65 = 0,65 \text{ mSv j}^{-1}$ overblijft voor toevoeging van NORM.

Zowel CEN als NRG gaan in hun methodiek uit van diverse aannames, die soms conservatief zijn, maar soms ook niet. De belangrijkste zijn, inclusief opmerkingen hierover, opgesomd in Tabel 6. Veel van de bovengenoemde aannames zijn dus niet (volledig) conservatief, maar de belangrijkste aanname die dat wél is blijft onvernoemd. In de NRG-methodiek blijft de bijdrage van het basismateriaal, ongeacht het percentage NORM-bijmenging, namelijk gelijk aan de vast gekozen waarde D_{Nmax} (bijvoorbeeld 0,65 mSv j^{-1}). Het aandeel NORM gaat echter ten koste van het aandeel basismateriaal, dus bij hogere percentages NORM zal de bijdrage van het basismateriaal veel kleiner worden dan D_{Bm} . Als gevolg daarvan blijft de dosis van NORM en basismateriaal samen dus ruim onder het (bruto) BSS-referentieniveau, D_{BSS} .

In Bijlage 3 is uitgewerkt hoe formule [2] en de curven van Figuur 4 veranderen als er wel rekening gehouden wordt met verdringing van het oorspronkelijke bouwmaterial.

Tabel 6 Overzicht van de belangrijkste aannamen in de NRG-methodiek voor de regulering van NORM in bouwmaterialen, met opmerkingen van het RIVM over de mate waarin deze aannamen als conservatief mogen worden beschouwd.

Aannamen CEN of NRG	Opmerkingen RIVM
Er wordt uitgegaan van een standaard ruimte met dimensie 3 x 4 x 2,5 m	Realistisch maar niet conservatief; andere afmetingen kunnen de dosis in het midden van de kamer met tientallen % verhogen
De ruimte bevat geen ramen of deuren	Conservatief betreffende de bijdrage van gammastraling door bouwmaterialen, maar niet conservatief betreffende de aanname dat de bouwmaterialen alle straling van buiten 100% afschermen
De dosis wordt bepaald in het midden van de kamer	NIET conservatief, de dosis dicht bij de muur kan significant hoger zijn, tot wel een factor twee (voor dunne lagen)
De verblijftijd in de woning is 80% verondersteld	NIET conservatief, in Nederland bedraagt de gemiddelde verblijftijd 90%
Spectrum uitgezonden gamma-energie wordt benaderd met vier gemiddelde gamma-energiewaarden en bijbehorende gemiddelde parameterconstanten	Realistisch maar niet conservatief; naarmate er meer afscherming is wordt de uittredende straling harder, maar daarvoor wordt niet gecorrigeerd
De gewogen massieke activiteit van het toegevoegde NORM wordt gelijk verondersteld aan 1	Conservatief, want de gewogen massieke activiteit van het NORM mag wel lager zijn dan 1, maar niet hoger
De verhouding van nucliden in het NORM wordt gelijk verondersteld aan die van fly ash	Realistisch maar niet conservatief: bij een andere verhouding kan de dosis hoger uitvallen, tot maximaal 14% extra
De NRG-methode houdt geen rekening met verdringing van bouw materiaal door NORM	Conservatief, vooral bij hoge percentages toegevoegd NORM

5.2.2

Meerdere bouwlagen

De vorige sectie laat zien dat – onder de aanname van toepassing van één type bouw materiaal in de woning – zowel de CEN-formule als de NRG-methode gebruikt kunnen worden om de conformiteit van een bouw materiaal te toetsen aan het BSS-referentieniveau. Maar woningen zijn in de regel opgetrokken uit *meerdere* bouwlagen, waarbij verschillende soorten bouwmaterialen worden toegepast. Het CEN-rapport biedt de optie om meer complexe situaties door te rekenen, maar het gaat dan om uniek gespecificeerde situaties. De echte opgave is dan ook om een *toets* te ontwikkelen *die generiek borgt dat toepassing in de woning van een toegelaten bouw materiaal, in combinatie met willekeurig welke andere toegelaten bouwmaterialen, tot een jaardosis leidt die niet hoger is dan het BSS-referentieniveau.*

De CEN-formule en de NRG-methode voldoen niet a priori aan deze conditie. Dat is gemakkelijk in te zien door nogmaals te kijken naar het voorbeeld uit paragraaf 4.3; een 20 cm dikke laag beton (85,4% referentiebeton, 14,6% sNORM), voorzien van een 3 cm dikke laag gips (92% sNORM). Beide materialen voldoen volgens de NRG-methode ieder op zich aan het BSS-referentieniveau (beton: $0,95 \text{ mSv.j}^{-1}$ en gips: $0,44 \text{ mSv.j}^{-1}$), maar samen leveren ze in het midden van de kamer een effectieve dosis op van $1,39 \text{ mSv.j}^{-1}$ en dicht bij de muur zelfs ruim $1,8 \text{ mSv.j}^{-1}$ (zie Figuur 3).

Generieke borging van de conformiteit van bouwmaterialen aan het BSS-referentieniveau stelt aanvullende eisen aan de toelatingstoets. Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door de volgende set van randvoorwaarden te hanteren:

- er wordt in de toets uitgegaan van de aanwezigheid van meerdere bouwlagen, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen bulklagen (zoals beton of baksteen) en toplagen (zoals gips of leem);
- de wetgever, en dus niet degene die de toets uitvoert, legt de condities vast waaronder het materiaal getoetst moet worden. Het gaat dan met name om de keuze voor de te hanteren laagdikte;
- de verschillende lagen krijgen ieder een vast deel van het BSS-referentieniveau toebedeeld.

In Bijlage 3 is dit bij wijze van voorbeeld uitgewerkt voor een drielagenmodel, bestaande uit twee bulklagen en één toplaag. Als analoog aan de NRG-methode gekozen wordt voor een toets op basis van het maximaal toelaatbare percentage NORM, dan levert zo'n generieke toets één toetscurve op voor bulkmaterialen en een andere toetscurve voor toplagen.¹⁹ De enige door de gebruiker in te voeren parameter is dan de soortelijke massa van het te toetsen materiaal.

NB: Hoewel de I-index toets zoals opgenomen in de BSS niet voldoet aan de hierboven gegeven set van randvoorwaarden, levert die methode toch een soort van generieke toetsing. Dat komt omdat de I-index methode gebaseerd is op een set van harde specifieke toetscondities. Zo zijn in de onderliggende methodiek zowel de dikte (0,2 m) als de soortelijke massa van het te toetsen bouw materiaal (2350 kg/m^3) vastgelegd. Het gevolg is dat elk bouw materiaal dat voldoet aan de I-index toets, in willekeurige combinatie met andere bouwmaterialen die daaraan voldoen, samen een jaardosis opleveren die (in gangbare situaties) niet hoger is dan het BSS-referentieniveau.

5.3 Handhaving *standstill*-beginsel

Alle bovengenoemde methodes, dus ook de methodes zoals genoemd in de ontwerpverordening (ANVS 2017), zijn bedoeld om in individuele gevallen te toetsen of een bouw materiaal wel of niet voldoet aan het BSS-referentieniveau voor gammastraling. Geen enkele methodiek bevat

¹⁹ Afhankelijk van de door de wetgever vast te leggen randvoorwaarden kan deze methodiek twee curven opleveren die erg dicht bij elkaar liggen (zie Bijlage 3). In dat geval kan er desgewenst voor gekozen worden om de toetsing van zowel bulk- als toplaag materialen te baseren op een en dezelfde curve die het verband geeft de tussen soortelijke massa van het bouw materiaal en het maximaal toelaatbare percentage NORM.

echter elementen die bepalend zijn voor de *collectieve* of *gemiddelde* stralingsdosis binnenshuis door gammastraling van bouwmaterialen. Daarnaast kan worden opgemerkt dat het BSS-referentieniveau in de context van de huidige situatie in Nederland nauwelijks een beperking oplevert: de uitwendige stralingsdosis door bouwmaterialen '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*' mag in individuele gevallen immers een factor 20 hoger zijn (1 mSv j^{-1}) dan de huidige gemiddelde waarde in Nederlandse woningen ($0,05 \text{ mSv j}^{-1}$). Dit impliceert dat de methodes die genoemd worden in de ontwerpverordening van de ANVS geen garantie bieden voor handhaving van het *standstill*-beginsel. In tegendeel zelfs, vanwege de toenemende wens tot hergebruik van restmaterialen en het relatief hoge BSS-referentieniveau is het waarschijnlijker dat we in de toekomst in Nederland te maken krijgen met een *stijging* van de gemiddelde stralingsdosis in woningen door gammastraling uit bouwmaterialen. In De With (2017) zijn wat dit betreft enkele worst-case scenario's nader uitgewerkt.

5.4 Andere stralingsrisico's in de woning door bouwmaterialen

Artikel 100 van de BSS-richtlijn verplicht de lidstaten om er op toe te zien dat er '*indien er een aanwijzing is met betrekking tot of een bewijs van blootstellingssituaties die vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming niet kunnen worden verwaarloosd, maatregelen worden getroffen om de bestaande blootstellingssituaties te inventariseren en te beoordelen, rekening houdend met de in bijlage XVII genoemde soorten van bestaande blootstellingssituaties, alsook om de overeenkomstige beroepsmatige blootstelling en blootstelling van de bevolking te bepalen*' (EURATOM 2014). Bijlage XVII van de BSS geeft een indicatieve opsomming van soorten bestaande blootstellingssituaties als bedoeld in artikel 100. In de categorie 'Blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen' worden genoemd:

- blootstelling aan radon en thoron binnenshuis, op werkplekken, in woningen en andere gebouwen;
- uitwendige blootstelling binnenshuis uit bouwmaterialen.

De ontwerpregelgeving (ANVS 2017) bevat – analoog aan de BSS – voorschriften voor de regulering in de woning van radon en van gammastraling uit bouwmaterialen. Deze voorschriften zijn, net als in de BSS, niet gekoppeld. Bovendien ontbreekt, in lijn met de BSS, een nadere uitwerking voor de regulering van blootstelling aan (dochterproducten van) *thoron* (Rn-220). De combinatie van ontkoppelde regelgeving en het ontbreken van expliciete regelgeving voor thoron is niet zonder risico. Het betekent namelijk dat bouwmaterialen kunnen worden toegelaten die weliswaar voldoen aan het toetsingscriterium voor gammastraling, maar die ondanks dat erg veel thoron exhaleren. Voor oppervlakte afwerkmaterialen geldt bovendien dat de NRG-methode zoals opgenomen in de ontwerpverordening (ANVS 2017) in vergelijking met de I-index een hoger percentage thorium toelaat.

Dat dit geen academische situatie is laat het volgende voorbeeld zien. Laten we eens kijken naar de toepassing van een 1 cm dikke laag gips met een massieke Ra-224 activiteit van circa 250 Bq kg^{-1} . Gips van een vergelijkbare samenstelling is in het verleden meerdere malen aangetroffen in Nederland (De Jong et al. 1998, Blaauboer 2010). Op

grond van de NRG-methode voldoet dit materiaal in de beoogde toepassing ruimschoots aan het referentieniveau voor gammastraling uit bouwmaterialen. De exhalatie van thoron uit dit type gips is echter aanzienlijk: uit metingen en berekeningen volgen thoron exhalatiewaarden²⁰ van 1 tot 3 Bq m⁻² s⁻¹ (Blaauboer 2010, Smetsers et al. 2017, De With et al. Submitted). Als alle wanden en het plafond in een ruimte afgewerkt zijn met een 1 cm dikke laag van dit type gips, dan leidt dat tot een (berekende) jaargemiddelde concentratie van thorondochters in de ruimte (uitgedrukt in EETC: *Equilibrium-Equivalent Thoron decayproduct Concentration*) in de orde van 20 Bq m⁻³. Dochterproducten van thoron leveren bij deze concentratie en een verblijftijd van 90% een jaardosis op van ongeveer 6 mSv j⁻¹ (UN 2006). De jaardosis ten gevolge van inhalatie van thorondochters is daarmee vele malen hoger dan de blootstelling die correspondeert met het BSS-referentieniveau voor gammastraling uit bouwmaterialen. Dit voorbeeld maakt duidelijk dat bouwmaterialen, die op basis van een toetsing volgens een in de ontwerpverordening van de ANVS genoemde methode ruimschoots voldoen aan het BSS referentieniveau voor gammastraling, desondanks een significant stralingsrisico kunnen veroorzaken vanwege exhalatie van thoron. Voor die blootstellingsroute is vooralsnog noch op Europees, noch op nationaal niveau specifieke regelgeving vastgelegd of voorgenomen.

²⁰ De spreiding in deze getallen hangt vooral samen met de verschillende mate waarin verflagen de exhalatie van thoron kunnen reduceren (De With et al. Submitted).

6 Conclusies en aanbevelingen

In de ontwerpverordening van de ANVS (ANVS 2017), die gebaseerd is op de BSS (EURATOM 2014), zijn bepalingen opgenomen over de externe straling binnenshuis, afkomstig van bouwmaterialen. Er is een referentieniveau benoemd voor de dosis vanwege gammastraling uit bouwmaterialen in verblijfsruimten en er wordt een regeling voorgesteld voor de toelating van bouwmaterialen die bestanddelen bevatten die zijn opgenomen in een lijst van grondstoffen '*die aandacht behoeven vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming*' (in dit rapport aangeduid met NORM). Aan het RIVM is gevraagd om de wetenschappelijke basis van de voorgenomen regeling te beoordelen. Die beoordeling leidt tot de volgende conclusies en aanbevelingen.

Achtergrond correctie

Het BSS-referentieniveau van 1 mSv j^{-1} is gedefinieerd '*bovenop de externe blootstelling buitenshuis*'. Deze term is onvoldoende helder omschreven. Het RIVM beveelt aan om in de Nederlandse regelgeving een achtergrond correctiewaarde van $0,3 \text{ mSv j}^{-1}$ te hanteren die is afgeleid op basis van metingen en berekeningen die specifiek zijn voor de situatie in Nederland. Deze waarde wijkt nauwelijks af van de waarde die CEN aanbeveelt in hun methodiek, maar dat is toeval: beide afleidingen verschillen sterk in aannames en uitgangspunten.

Toets toelating bouwmaterialen

De ontwerpverordening van de ANVS biedt de mogelijkheid om de toelating van bouwmaterialen te baseren op de CEN-formule (formule [1] in dit rapport) of op een door NRG ontwikkelde methode die uitgaat van het maximaal toelaatbare percentage NORM in het bouw materiaal (De With 2017). Beide methoden gaan uit van de gedachte dat de dosis binnenshuis uitsluitend bepaald wordt door gammastraling van het te toetsen bouw materiaal. De NRG-methode steunt op de rekenmethodiek van CEN. Door CEN en NRG zijn diverse aannames gemaakt die soms conservatief zijn, maar soms ook niet. De NRG-methode gaat echter *impliciet* uit van de aanname dat de dosisbijdrage van het oorspronkelijke bouw materiaal gelijk blijft, ongeacht het percentage NORM dat is bijgemengd. Deze aanname is dusdanig conservatief dat de NRG-methode vrijwel altijd een conservatieve waarde geeft van het percentage NORM dat aan een bouw materiaal mag zijn toegevoegd.

De NRG-methode levert dus een goed alternatief op voor de CEN-formule, maar bij beide methoden kunnen kanttekeningen geplaatst worden vanwege het gekozen uitgangspunt dat de externe stralingsdosis binnenshuis uitsluitend bepaald wordt door gammastraling uit het te toetsen bouw materiaal. In de woningbouw is het immers zeer gebruikelijk dat verschillende bouwmaterialen in meerdere bouwlagen worden toegepast, en dat ook nog eens in allerlei varianten. Door de CEN-formule of de NRG-methode op individuele bouwmaterialen toe te passen bestaat het risico van stapeling, ofwel: bouwmaterialen die ieder voor zich voldoen aan een individuele toetsing kunnen in gangbare praktijksituaties samen een dosis veroorzaken die hoger is dan het BSS-referentieniveau. Die kans wordt extra groot als de aanbieders van de

bouwmaterialen zelf de toetscondities (*'intended use'*) mogen bepalen. Ze kunnen dan, specifiek voor hun eigen toepassing, dunne laagdiktes hanteren die een hoog percentage NORM toegelaten. In praktijksituaties kan het dan eerder gebeuren dat de stralingsdosis van de combinatie van aanwezige bouwmaterialen het BSS-referentieniveau overschrijdt.

Dit alles kan voorkomen worden door een toetsmethode voor te schrijven die *generiek* borgt dat toepassing in de woning van een toegelaten bouw materiaal, in combinatie met willekeurig welke andere toegelaten bouwmaterialen, tot een jaardosis leidt die niet hoger is dan het BSS-referentieniveau. Dit kan bijvoorbeeld gerealiseerd worden door de volgende set van randvoorwaarden te hanteren:

- er wordt in de toets uitgegaan van de aanwezigheid van meerdere bouwlagen, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen bulklagen (zoals beton of baksteen) en toplagen (zoals gips of leem);
- de wetgever, en dus niet degene die de toets uitvoert, legt de condities vast waaronder het materiaal getoetst moet worden (dat betreft met name de keuze voor de te hanteren laagdikte);
- de verschillende lagen krijgen ieder een vast deel van de maximaal toelaatbare dosis toebedeeld.

Een voorbeeld van zo'n generieke toetsmethode (zie Bijlage 3) laat zien dat deze aanpak kan leiden tot relatief eenvoudige regelgeving. Op basis van bovenstaande adviseert het RIVM om de in de ontwerpverordening genoemde toetsingsmethoden op bovengenoemde punten aan te scherpen.

Handhaving *standstill*

Alle methodes die genoemd zijn in de ontwerpverordening van de ANVS zijn bedoeld om in individuele gevallen te toetsen of een bouw materiaal voldoet aan het BSS-referentieniveau. Geen enkele methode bevat echter elementen die bepalend zijn voor de over Nederland gemiddelde stralingsdosis in de woning door toepassing van bouwmaterialen. Daar komt bij dat het BSS-referentieniveau in de context van de huidige situatie in Nederland nauwelijks een beperking oplevert: de dosis door gammastraling van bouwmaterialen *'bovenop de externe blootstelling buitenshuis'* mag in individuele gevallen immers een factor 20 hoger zijn dan de huidige gemiddelde waarde in Nederlandse woningen. De in de ontwerpverordening genoemde methodes voor de toelating van bouwmaterialen bieden dus geen garantie voor handhaving van het *standstill*-beginsel. Vanwege de toenemende wens tot hergebruik van restmaterialen, in combinatie met het relatief hoge BSS-referentieniveau, is het eerder te verwachten dat de gemiddelde stralingsdosis in woningen door gammastraling uit bouwmaterialen in de toekomst zal stijgen. Indien de Nederlandse overheid het *standstill* principe wil continueren, dan zijn daarvoor aanvullende afspraken nodig. Verificatie op de effectuering van het *standstill* principe kan vervolgens op de zelfde wijze plaatsvinden als nu de praktijk is, namelijk via periodieke evaluaties gebaseerd op landelijke meetcampagnes en aanvullende dosisberekeningen.

Andere stralingsrisico's in de woning door bouwmaterialen

De BSS vraagt uit stralingsbeschermingsoogpunt aandacht voor de blootstelling aan natuurlijke stralingsbronnen en noemt daarbij de volgende bronnen:

- blootstelling aan radon en thoron binnenshuis, op werkplekken, in woningen en andere gebouwen;
- uitwendige blootstelling binnenshuis uit bouwmaterialen.

De BSS en de ontwerpverordening van de ANVS bevatten voorschriften voor de regulering in woningen van radon en van gammastraling uit bouwmaterialen. Deze voorschriften zijn niet aan elkaar gekoppeld. Een nadere uitwerking voor de regulering van blootstelling aan (dochterproducten van) *thoron* ontbreekt. De combinatie van ontkoppelde regelgeving en het ontbreken van expliciete regelgeving voor thoron is niet zonder risico. In de voorgenomen regeling voldoen bouwmaterialen, en dan met name oppervlakte afwerkmaterialen, vrij gemakkelijk aan het toelatingscriterium voor gammastraling, maar deze materialen kunnen desondanks een hoeveelheid thoron exhaleren die leidt tot stralingsdoses als gevolg van inhalatie van thorondochters die vele malen hoger zijn dan de BBS referentiewaarde voor gammastraling. Dit probleem speelt met name bij poreuze oppervlakte afwerkmaterialen met een hoog Th-232 gehalte. Het RIVM vraagt nadrukkelijk beleidsmatige aandacht voor deze problematiek.

Literatuur

ANVS (2017). Ontwerp ministeriële regeling basisnormen stralingsbescherming en ontwerp ANVS verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming - Versie d.d. 28 augustus 2017. Den Haag.

Bader, S., S. Dekkers en R. Blaauboer (2010). Stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen : Eindrapport ventilatie- en radononderzoek. Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), RIVM Rapport 610790009, Bilthoven.

Blaauboer, R. (2010). Meting van ^{220}Rn en consequenties voor eerdere ^{222}Rn surveys. Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), RIVM Report 610790011, Bilthoven.

Blaauboer, R. en M. Pruppers (2000). Externe straling van bouwmaterialen: Resultaten van MARMER-berekeningen aan een referentiewoning. Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), RIVM rapport 610050006, RIVM.

Bs (2001). Besluit van 16 juli 2001, houdende vaststelling van het Besluit stralingsbescherming (Geldend van 11-10-2016 t/m heden).

CEN (2017). Construction products: Assessment of release of dangerous substances — Radiation from construction products — Dose assessment of emitted gamma radiation. CEN, TC 351 WI 00351020.3.

De Jong, P. en J. van Dijk (2009). Analyse van het externe dosistempo in woningen. NRG, NRG-rapport NRG-K5098/09.97299.

De Jong, P., W. Van Dijk en H. P. Burger (1998). 226Ra and 228Ra concentrations in gypsum plasters and mortars used in the Netherlands. . Second Int. Symp. on Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM II), Krefeld, Germany.

De Jong, P., W. Van Dijk, E. R. Van der Graaf, et al. (2006). "National survey on the natural radioactivity and ^{222}Rn exhalation of building materials in the Netherlands." Health Physics **91**(3): 200-210.

De With, G. (2017). "Development of an Assessment Method for Building Materials Under Euratom Scope." Health Phys **113**(5): 392-403.

De With, G., R. Smetsers, H. Slaper, et al. (Submitted). "Thoron Exposure in Dutch Dwellings - An Overview." J Environ Radioact.

EC (1997). Enhanced radioactivity of building materials. European Commission, Radiation protection 96, Luxembourg.

EC (1999). Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. European Commission, Radiation protection 112, Luxembourg.

EURATOM (2014). RICHTLIJN 2013/59/EURATOM van de Raad van 5 december 2013 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling. Euratom, L 13.

ICRP (1996). Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. New York, Pergamon Press. **ICRP Publication 74**.

ICRP (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford, Pergamon Press. **ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4)**.

Markkanen, M. (1995). Radiation Dose Assessments for Materials with Elevated Natural Radioactivity. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, STUK-B-STO 32, Helsinki.

Smetsers, R. en R. Blaauboer (1996). Variations in Outdoor Radiation Levels in the Netherlands (thesis). Bilthoven, Rijksuniversiteit Groningen: 264.

Smetsers, R. en R. Blaauboer (1997). "Source-Dependent Probability Densities Explaining Frequency Distributions of Ambient Dose Rate in the Netherlands." Radiation Protection Dosimetry **69(1)**: 33-42.

Smetsers, R., R. Blaauboer, F. Dekkers, et al. (2017). Radon and Thoron Progeny in Dutch Dwellings. Third East-European Radon Symposium (TEERAS 2017), Sofia, Bulgaria, Oxford University Press.

Smetsers, R., R. Blaauboer, F. Dekkers, et al. (2015). Radon en thoron in Nederlandse woningen vanaf 1930 - Resultaten RIVM-meetcampagne 2013-2014. Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), RIVM Report 2015-0087, Bilthoven.

UN (2000). UNSCEAR 2000 Report - Annex A - Dose assessment methodology. United Nations, New York.

UN (2006). UNSCEAR 2006 REPORT Vol. II - Effects of Ionizing Radiation - ANNEX E - Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. United Nations, UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes - Volume II, New York.

Van Dongen, R., C. Potma en J. Stoute (1984). Natuurlijke Achtergrondstraling in Nederland - Deel 1: Vrije veld metingen. Dutch National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), RIVM Rapport 248108001, Bilthoven.

Van Dongen, R. en J. Stoute (1985). "Outdoor natural background radiation in the Netherlands." Sci. Total Environ. **45**: 381-388.

Bijlage 1 Grootheden en eenheden voor externe straling

Metingen van het externe stralingsniveau werden vroeger uitgedrukt in *exposietempo*, met als oude eenheid²¹ voor achtergrondwaarden: *microröntgen per uur* ($\mu\text{R/h}$). Dat gold bijvoorbeeld voor de metingen in het buitenmilieu die uitgevoerd zijn in het kader van SAWORA, begin jaren tachtig van de vorige eeuw (Van Dongen et al. 1984, Van Dongen en Stoute 1985). *Exposie* is gedefinieerd als de hoeveelheid lading (van één teken) die door ioniserende straling geproduceerd wordt per eenheid luchtmassa. Omdat de gemiddelde energie, nodig voor de productie van een elektron-ion paar, bekend is, kan *exposie* rechtstreeks vertaald worden naar de grootheid *luchtkerma*, die gedefinieerd is als de som van alle kinetische energie die wordt vrijgemaakt door ioniserende straling. *Luchtkerma* wordt uitgedrukt in de eenheid *gray* (Gy). Het verband tussen *exposie* en *luchtkerma* luidt als volgt: 1R komt overeen met 8,73 mGy.

Rond 1990 werd het gebruikelijk om externe stralingsniveaus uit te drukken in *omgevingsdosisequivalent*, $H^*(10)$. Dit is per definitie de geabsorbeerde dosis op 10 mm diepte in een weefsel-equivalente kunststof bol van 30 cm doorsnede, geplaatst in een uitgebreid evenwijdig stralingsveld. $H^*(10)$ wordt uitgedrukt in *sievert* (Sv). Meetapparatuur voor externe straling geeft sinds die tijd vrijwel altijd het *omgevingsdosisequivalenttempo* aan. Bij typische achtergrondwaarden wordt die uitgedrukt in nSv/h. Het verband tussen $H^*(10)$ en *exposie* is energieafhankelijk.²² Zowel voor de SAWORA metingen, uitgevoerd met Reuter-Stokes detectoren, als voor de eerste metingen van het Landelijk Meetnet voor Radioactiviteit is de volgende een kalibratie coëfficiënt bepaald: 1 μR komt overeen met 10,8 nSv (Smetsers en Blaauboer 1996). *The International Commission on Radiation Units & Measurements* (ICRU) geeft voor de energie van Cs-137 het volgende verband tussen $H^*(10)$ en *luchtkerma*: 1 nGy komt overeen met 1,21 nSv²³ (ICRP 1996).

Als we praten over blootstelling van burgers aan straling, dan bedoelen we in de regel de *effectieve stralingsdosis* zoals gedefinieerd door de ICRP (ICRP 2007). Vaak hebben we het dan over de (effectieve) jaardosis, uitgedrukt in mSv j^{-1} . Het verband tussen effectieve dosis en omgevingsdosisequivalent is ingewikkeld. Het hangt onder meer af van de leeftijd van de persoon en de stralingsenergie en karakteristieken van het stralingsveld (evenwijdig, isotroop, rotatie-invariant etc.) waaraan die persoon is blootgesteld. Voor gammastraling (bijvoorbeeld terrestrische straling en straling uit bouwmaterialen) in een isotroop of rotatie-invariant stralingsveld geldt bij benadering dat een omgevingsdosisequivalent van 1 mSv overeen komt met een effectieve stralingsdosis (voor een

²¹ De correcte SI-eenheid van *exposie* is C kg^{-1} , waarbij geldt dat $1\text{R} = 2,54 \cdot 10^{-4} \text{ C kg}^{-1}$.

²² Het is gebruikelijk om bij de conversie gebruik te maken van een kalibratie op de energie van Cs-137.

Alternatief is dat een gemiddelde conversiewaarde wordt afgeleid uit een kalibratie bij meerdere energieën. Dat laatste is gedaan voor de eerste generatie monitoren van het Landelijk Meetnet voor Radioactiviteit (LMR).

²³ Op basis van deze theoretische coëfficiënt vinden we het volgende verband tussen *exposie* en omgevingsdosisequivalent: 1 μR komt overeen met 10,6 nSv. Deze theoretische waarde is circa 2% lager dan de kalibratiewaarde die eertijds bepaald is voor de in Nederland gebruikte meetinstrumenten.

volwassen referentiemens) van 0,6 mSv. Voor secundaire kosmische straling (op zeeniveau) worden deze grootheden aan elkaar gelijk gesteld.

Voor terrestrische straling (en straling uit bouwmaterialen) kan op analoge wijze een verband worden afgeleid tussen de grootheden *kerma in lucht* en *effectieve dosis*. Dat leidt tot een omrekeningscoëfficiënt van 0,7 Sv/Gy (UN 2000).

Bijlage 2 Nadere toelichting uitgebreide CEN-methode

Wanden samengesteld uit lagen met verschillende bouwmaterialen

Wanneer een wand is opgebouwd uit meerdere lagen dient de bijdrage van iedere laag afzonderlijk te worden berekend. Een extra factor hierbij is de mate van afscherming van straling uit een onderliggende laag door de bovenliggende laag of lagen. Dit effect kan worden uitgedrukt in een transmissiefactor die het samengestelde effect van zowel afscherming als energieopbouw beschrijft. In (CEN 2017) is deze informatie per nuclide(reeks) en oppervlaktedichtheid getabelleerd voor beton als achterliggende bouwlaag (Table 2). Deze factor heeft in het CEN-rapport de verwarrende naam '*shielding factor*' gekregen, terwijl het juist de transmissiefactor betreft.

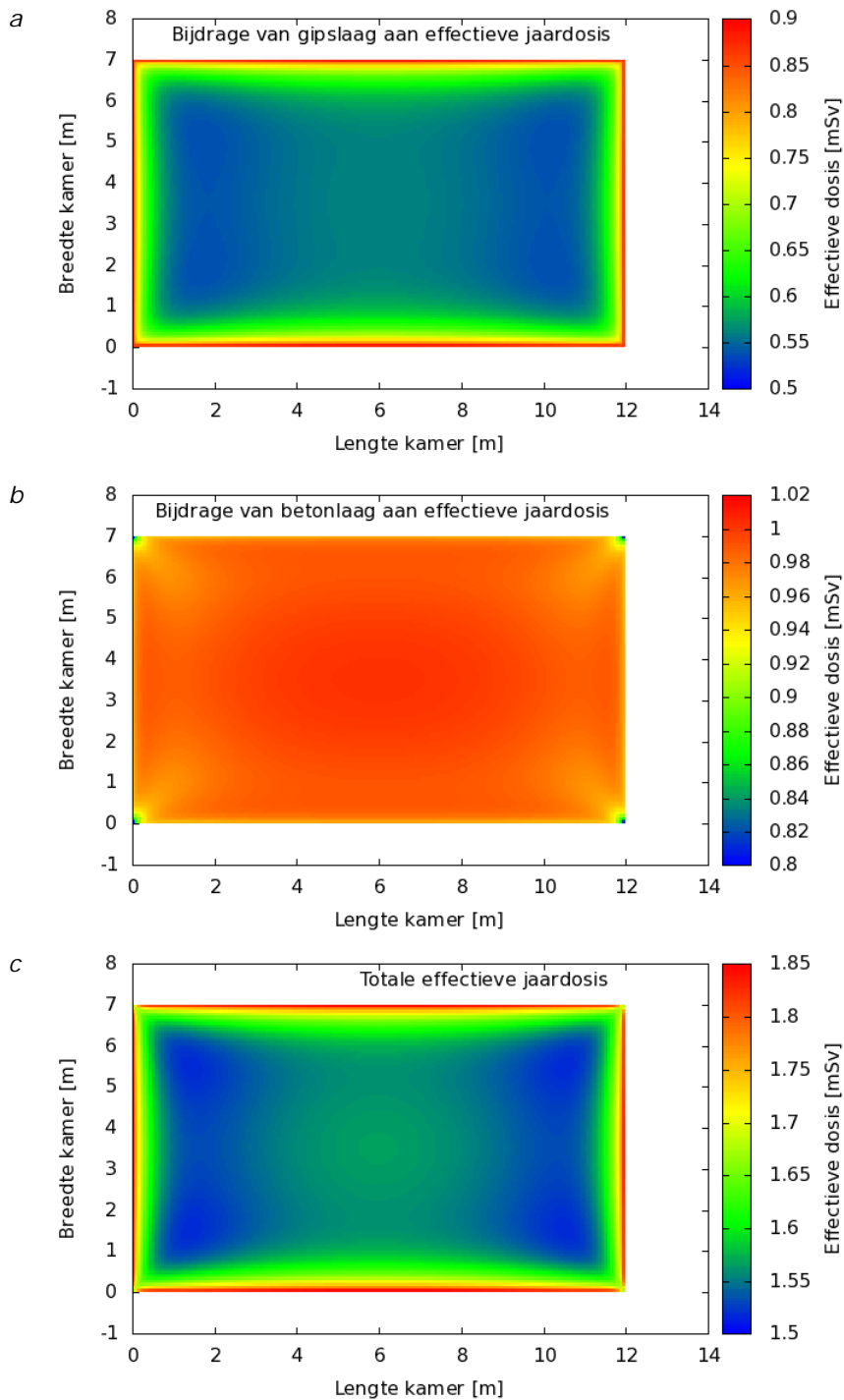
In geval van een dunne laag (toplaag) bouw materiaal wordt aangenomen dat er een dragende structuur van 20 cm dik beton achter deze laag zit. De bijdrage aan de ontvangen dosis ten gevolge van deze betonlaag is volgens CEN $0,48 \text{ mSv j}^{-1}$ en deze dient te worden opgeteld bij de dosis ten gevolge van de toplaag. Hierbij is aangenomen dat *referentiebeton*²⁴ is toegepast en dat de toplaag niet of nauwelijks de gammastraling uit de betonlaag afschermt. Een bouw materiaal wordt beschouwd als een toplaag wanneer laagdikten van minder dan 30 mm worden gebruikt als afwerking.

Het onderliggende rekenmodel is afkomstig van STUK (Markkanen 1995). Het biedt de mogelijkheid om twee lagen in de wand toe te passen. Het CEN-rapport geeft ook voorbeelden van situaties met twee constructielagen (waarvan de onderste van beton), waarmee de transmissiefactor is berekend afhankelijk van de oppervlaktedichtheid van de toplaag.

Het model van STUK (Markkanen 1995)

Formule [1] is een benadering van de resultaten van het rekenmodel van STUK, toegepast op de CEN-kamer die volledig is opgetrokken uit het betreffende bouw materiaal. De effectieve jaardosis die zo berekend wordt geldt voor het middelpunt van de kamer. Dit rekenmodel houdt rekening met zowel de effecten van interne afscherming als de opbouw door verstrooiing in de muren ('*buildup*'). Voor de vergelijkingen (A.1) en (A.5) in het CEN-rapport die deze effecten beschrijven bestaan geen analytische oplossingen, dus de oplossingen worden benaderd door numerieke integratie over het volume van de muren. In ieder punt in de kamer kan het dosistempo worden bepaald door de muren op te delen in kleine volume-elementen die ieder als puntbron worden beschouwd. De ontvangen dosis is de optelsom van de bijdrage van alle volume-elementen. Voor een volledige analyse zou de berekening moeten worden toegepast voor elke uitgezonden gamma-energie. Er is een vereenvoudiging toegepast door voor elk beschouwde nuclide(reeks)

²⁴ Referentiebeton heeft in de definitie van CEN de volgende massieke activiteiten: $C_{\text{Ra-226}} = 40 \text{ Bq kg}^{-1}$, $C_{\text{Th-232}} = 30 \text{ Bq kg}^{-1}$, $C_{\text{K-40}} = 400 \text{ Bq kg}^{-1}$



Figuur 5 Berekening van de effectieve jaardosis in een kamer met afmetingen 12 m x 7 m x 2,8 m (Markkanen 1995), in het vlak op 1,4 m hoogte, uitgaande van twee lagen bouw materiaal en een blootstelling van 7000 uur per jaar. De achterliggende laag bestaat uit 20 cm dik beton met 14,6% sNORM, de toplaag bestaat uit 3 cm dik gips met 92% sNORM. De figuren tonen voor alle posities in de kamer de bijdrage aan de effectieve jaardosis van respectievelijk de gipslaag (boven), het beton (midden) en beide lagen samen (onder). Merk op dat de kleurtoedeling per figuur verschilt.

een gemiddelde gamma-energie te bepalen op basis van de emissiewaarschijnlijkheid per uitgezonden gamma-energie. K-40 zendt maar één gamma uit, maar de uraniumreeks en de thoriumreeks zenden vele tientallen gamma's uit, met verschillende energieën. Voor de uraniumreeks (vaak aangeduid met Ra-226) is een gemiddelde waarde bepaald die het totale effect van alle binnen deze reeks uitgezonden gamma-energieën benadert. Voor de thoriumreeks is op dezelfde wijze een gemiddelde waarde van de gamma-energie bepaald, maar de gamma-energie van 2.615 keV (door Tl-208) is apart beschouwd (en dus niet meegenomen in de berekening van de gemiddelde energie). Deze gamma-energie draagt namelijk voor meer dan 40% bij aan de totale dosis van de thoriumreeks.

Voorbeeldberekening: kamer met grotere afmetingen dan de CEN-kamer
In Figuur 5 wordt voor de kamer met grotere afmetingen, zoals beschreven in paragraaf 4.3.2, de ruimtelijke verdeling van de effectieve jaardosis getoond.

Bijlage 3 Bepaling maximaal percentage NORM indien rekening gehouden wordt met verdringing van het basismateriaal

Formule [2] van het hoofdrapport laat zien hoe het maximale percentage NORM in een bouw materiaal, $P_N(\rho d)$, berekend kan worden op basis van de aannamen zoals gegeven in De With (2017). Bij die berekening wordt geen rekening gehouden met het feit dat het toegevoegde NORM de plaats inneemt van het oorspronkelijke basismateriaal. De berekening volgens de NRG-methode is daarom conservatief.

De onderstaande formule laat zien hoe het maximaal toegestane percentage NORM berekend kan worden als er wél rekening gehouden wordt met de extra dosisruimte die ontstaat door vervanging van basismateriaal door NORM:

$$P_N(\rho d) = \frac{D_{Nmax}}{(D_N(\rho d) + D_{Nmax} - D_{BSS})} \times 100\% \quad (\text{als } D_N(\rho d) > D_{BSS})$$

$$\text{en } P_N(\rho d) = 100\% \quad (\text{als } D_N(\rho d) \leq D_{BSS}) \quad [3]$$

In deze formule is D_{BSS} het (bruto) BSS-referentieniveau, D_{Nmax} de maximale dosis van het toegevoegde NORM en $D_N(\rho d)$ de stralingsdosis van 100% NORM van een gegeven samenstelling (door ons sNORM²⁵ genoemd). De laatste term is afhankelijk van het product van de *soortelijke massa* (ρ) van het materiaal en de *dikte* (d) bij beoogd gebruik.

In formule [3] is aangenomen dat opgevuld mag worden tot aan het BSS-referentieniveau, ofwel: $D_{Nmax} = D_{BSS} - D_{Bm}$ waarbij D_{Bm} de dosis voorstelt van het oorspronkelijke basismateriaal. Formule [3] kan dus herschreven worden tot:

$$P_N(\rho d) = \frac{(D_{BSS} - D_{Bm})}{(D_N(\rho d) - D_{Bm})} \times 100\% \quad (\text{als } D_N(\rho d) > D_{BSS})$$

$$\text{en } P_N(\rho d) = 100\% \quad (\text{als } D_N(\rho d) \leq D_{BSS}) \quad [4]$$

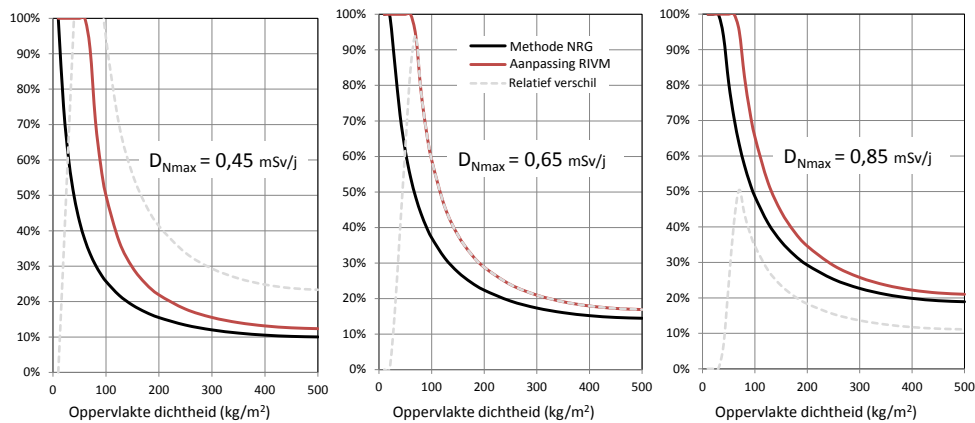
Desgewenst kan men voor D_{BSS} een andere (lees: kleinere) maximale dosiswaarde kiezen. Dat maakt voor de berekeningswijze niets uit.

Figuur 6 laat voor drie keuzes van D_{Nmax} de verschillen zien tussen de berekeningswijze van NRG en formule [4]. Vooral bij lagere oppervlakte dichtheden zijn de verschillen tussen beide berekeningswijzen aanzienlijk. De verschillen worden groter naarmate er voor D_{Nmax} een lagere waarde gekozen wordt, wat impliceert dat de activiteit van het basismateriaal hoog is (of zou kunnen zijn). In het theoretische geval dat het

²⁵ De gewogen activiteitsconcentratie is gelijk aan 1 en de nuclidenvrhouding is als in *fly-ash*. sNORM heeft dus de volgende massieke activiteiten: $C_{Ra-226} = 500 \text{ Bq kg}^{-1}$, $C_{Th-232} = 300 \text{ Bq kg}^{-1}$ en $C_{K-40} = 2000 \text{ Bq kg}^{-1}$.

basismateriaal geen radioactiviteit bevat zijn beide berekeningswijzen exact gelijk aan elkaar.

De berekeningswijze van NRG is gebaseerd op aannamen die niet allemaal conservatief zijn, maar omdat bij de berekening geen rekening gehouden wordt met verdringing van het basismateriaal door NORM kan de uiteindelijke uitkomst beschouwd worden als afdoende conservatief. Indien uitgegaan wordt van de berekeningswijze volgens het RIVM (formule [3] of [4]) is het eindresultaat niet op voorhand conservatief. Als men toch van deze berekeningswijze gebruik zou willen maken, dan dient men eerst op andere punten in de onderbouwende systematiek voldoende conservatieve ruimte te genereren.



Figuur 6 Bepaling van het maximaal toegestane percentage NORM in bouwmaterialen als functie van de oppervlakedichtheid van het materiaal in de beoogde toepassing, volgens de NRG-methode (blauw) en volgens de RIVM formule (rood). De stippellijn toont het relatieve verschil tussen beide bepalingen.

Bijlage 4 Voorbeeld uitwerking generieke toets bouwmaterialen

Een generieke toets die borgt dat toepassing in de woning van een toegelaten bouw materiaal, in combinatie met willekeurig welke andere toegelaten bouwmaterialen, tot een jaardosis leidt van maximaal het BSS-referentieniveau, moet voldoen aan een aantal extra voorwaarden. De onderstaande set van condities voorziet hierin:

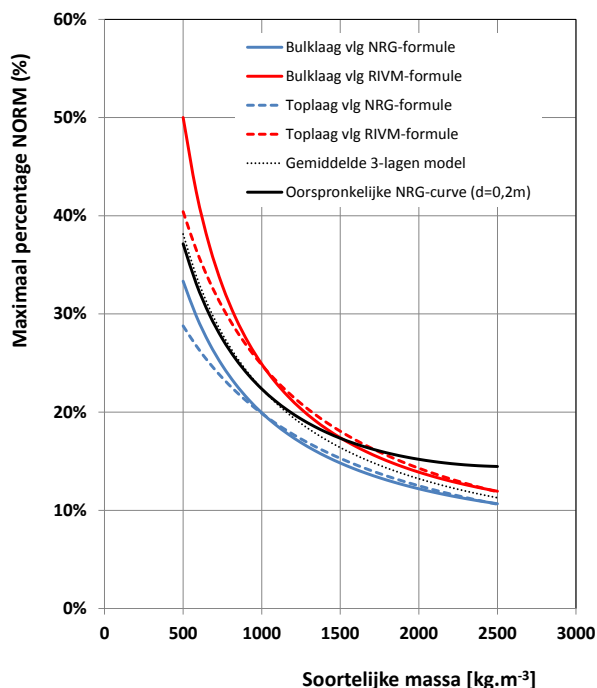
1. er wordt in de toets uitgegaan van de aanwezigheid van meerdere bouwlagen, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen bulklagen (zoals beton of baksteen) en toplagen (zoals gips of leem);
2. de wetgever, en dus niet degene die de toets uitvoert, legt de condities vast waaronder het materiaal getoetst moet worden. Het gaat dan met name om de keuze voor de te hanteren laagdikte;
3. de verschillende lagen krijgen ieder een vast deel van het BSS-referentieniveau toebedeeld.

In deze bijlage is dit bij wijze van voorbeeld uitgewerkt voor een drielagenmodel, bestaande uit twee bulklagen (zeg 'steensdik') en één toplaag. (NB: één dikke bulklaag, bijvoorbeeld 20 cm beton, kan beschouwd worden als een combinatie van twee bulklagen.) In het model zitten enkele parameters die eenmalig door de wetgever moeten worden vastgelegd. Deze parameters worden opgesomd in Figuur 7. De daar genoemde waarden zijn door ons gekozen en dienen slechts als voorbeeld. Bij de toepassing rest dan voor de gebruiker nog één vrije parameter, namelijk de soortelijke massa van het te toetsen product.

	Bulklaag 1	Bulklaag 2	Top
Dikte, d [m]:	0,12	0,12	0,03
Aandeel referentiewaarde, D_{Nmax} [mSv/j]:	0,80	0,80	0,30
Dosis bouw materiaal zonder NORM, D_{Bm} [mSv/j]:	0,35	0,35	0,15
Nominale absorptie door bulklaag 2:	0,6	-	-
Nominale absorptie door toplaag:	0,1	0,1	-

Figuur 7 Schematische voorstelling van het drielagenmodel voor de generieke toetsing van bouwmaterialen aan het BSS-referentieniveau. De waarde van de links genoemde parameters dienen vastgesteld te worden door de wetgever. De hier genoemde getallen dienen slechts als voorbeeld van parameterwaarden die bij gezamenlijke toepassing voldoen aan het BSS-referentieniveau.

In het voorbeeld van Figuur 7 is, analoog aan De With (2017), uitgegaan van de aanname dat het bouw materiaal zonder NORM in iedere laag al de helft van de toegelaten dosis levert (of kan leveren). Zowel voor de bulklaag als voor de toplaag kan nu, op dezelfde manier als bij de NRG-methode gedaan is, berekend worden welk percentage NORM maximaal is toegestaan (formule [2]). Desgewenst kan ook de aangepaste RIVM-formule gebruikt worden zoals gegeven in Bijlage 3 (formule [3] of [4]). Maar omdat de nominale diktes van de lagen in de methode al vast liggen, dient de gebruiker niet de oppervlaktedichtheid van het te toetsen bouw materiaal in te voeren, maar de soortelijke massa. Het resultaat is een curve die voor bulkmaterialen en voor toplaagmaterialen het toelaatbare percentage NORM aangeeft als functie van de soortelijke massa. In Figuur 8 zijn de curven weergegeven die volgen uit de parameterkeuzes als gegeven in Figuur 7.



Figuur 8 Toegelaten percentage NORM als functie van de soortelijke massa van het bouw materiaal, voor bulkmaterialen (getrokken lijnen) en toplaagmaterialen (gestreepte lijnen). De blauwe lijnen zijn berekend met de NRG-methode (formule [2]), de rode lijnen met de RIVM-formule (formule [3] of [4]). De zwarte stippelij is daarvan het gemiddelde. De doorgetrokken zwarte lijn toont de oorspronkelijke NRG-curve indien voor de dikte 0,2 m gekozen wordt.

De curven berekend met de RIVM-formule vallen zoals verwacht hoger uit dan de curven volgens de NRG-formule, maar bij hogere dichtheden zijn de verschillen niet groot. Ook is er relatief weinig verschil in de resultaten voor bulkmaterialen en voor toplaagmaterialen. Als men een kleine onzekerheid voor lief neemt, kan desgewenst gekozen worden voor één curve die op alle materialen van toepassing is (de zwart gestippelde tussenlijn bijvoorbeeld). Merk op: bij dichtheden lager dan 1500 kg.m^{-3} valt deze stippelij vrijwel samen met de oorspronkelijke NRG-curve

(Figuur 2), toegepast voor een laagdikte van 0,2m. Bij hogere dichtheden loopt het verschil op tot maximaal 25% bij 2500 kg.m^{-3} .

Als de massieke activiteiten van het bouw materiaal bekend zijn, kan de generieke toets ook uitgevoerd worden met de CEN-formule (formule [1]). Wel moeten bij de toepassing daarvan voor zowel de laagdikte als het referentieniveau dezelfde waarden verplicht gesteld worden als de waarden die ten grondslag liggen aan de curven die het verband leggen tussen soortelijke massa en maximaal toelaatbaar percentage NORM.

.....
R.C.G.M. Smetsers | J.M. Tomas
.....

RIVM rapport 2017-0179

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

december 2017

De zorg voor morgen
begint vandaag

