NRG PALLAS
Nuclear. For Life.

Natuurlijke radioactiviteit in Bouwmaterialen

Resultaten van de meetcampagne 2026

Openbaar

In opdracht van ANVS

Auteur(s)	Goedgekeurd
Handtekening	Handtekening

Referentie	Revisie *[nr.0]*	Status	EU DU classificatie	# pag.	Datum
2.7222/26.351101	2.0	Definitief	n.v.t	56/56	24-aug-2026

Beoordeling

Expertise	Naam	Paraaf	Datum [dd-MMM-jjjj]
Radiologische analyse			
Stralingsbescherming			

Samenvatting

In dit rapport worden de resultaten gepresenteerd van de meetcampagne 2026 naar natuurlijke radioactiviteit in bouwmaterialen, uitgevoerd door NRG PALLAS in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS). De aanleiding voor dit onderzoek is dat de laatste nationale studie uit 2006 dateert en sindsdien belangrijke ontwikkelingen hebben plaatsgevonden, zowel in wet- en regelgeving rond straling en bouwmaterialen als in de toenemende aandacht voor verduurzaming van bouwmaterialen. Het doel van de studie is het vaststellen van de hoeveelheid natuurlijke radioactiviteit in bouwmaterialen en hun grondstoffen, alsmede het bepalen van de daaruit voortvloeiende gammastralingsdosis voor een representatief lid van de Nederlandse bevolking.

Het onderzoek richt zich op de bouwmaterialen in de woningbouw en beperkt zich tot de bepaling van de massieke activiteit van de natuurlijke radionucliden (Radium-226, Thorium-232 en Kalium-40) en de daaruit voortvloeiende gammastralingsdosis voor personen die in gebouwen verblijven. Emissies van radon (Radon-222) en thoron (Radon-220) gas zijn buiten beschouwing gelaten. De resultaten zijn getoetst aan het referentieniveau van 1 mSv per jaar, zoals vastgelegd in de ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming en Europese richtlijn 2013/59/Euratom.

In totaal zijn 218 representatieve materiaalmonsters geanalyseerd, bestaande uit 101 bouwmaterialen en 117 grondstoffen voor bouwmaterialen. De onderzochte materialen omvatten onder meer beton (prefab en mortel), baksteen, kalkzandsteen, cellenbeton en gips, evenals grondstoffen zoals cement, zand, grind, graniet, recyclinggranulaten en diverse industriële reststoffen. De analyses zijn uitgevoerd met behulp van gamma-spectrometrie. Voor biomassa-assen is aanvullend de aanwezigheid van Cesium-137 bepaald.

De meetresultaten, uitgedrukt in massieke activiteit (Bq per kg), laten zien dat natuurlijke radioactiviteit in zand en grind laag is en overeenkomt met waarden die typisch zijn voor de Nederlandse bodem. Cementen en industriële reststoffen vertonen hogere activiteiten dan natuurlijke grondstoffen als gevolg van de gebruikte (natuurlijke) grondstoffen en/of de industriële bewerkingsprocessen. Keramische producten en graniet hebben relatief hogere activiteiten vanwege hun natuurlijke minerale samenstelling. Voor geen van de onderzochte grondstoffen of bouwmaterialen is een activiteit aangetroffen die de geldende vrijstellings- of referentiewaarden overschrijden.

Voor de bouwmaterialen is tevens de zogeheten indexwaarde I berekend, die dient als screeningsinstrument voor gammastraling binnenshuis. Alle onderzochte materialen blijven ruim onder de referentiewaarde van I = 1. Beton, gips, kalkzandsteen en cellenbeton tonen hierbij de laagste indexwaarden, terwijl keramische producten wat hogere waarden vertonen, overigens zonder overschrijding van de norm. Vergelijkingen met eerdere Nederlandse surveys en met gegevens uit België en Duitsland tonen aan dat de resultaten vergelijkbaar zijn.

Op basis van de gemeten massieke activiteiten is de jaarlijkse effectieve gammastralingsdosis berekend voor vijf representatieve woningtypen, waaronder rijtjeswoningen, appartementen en vrijstaande woningen. Daarbij zijn verschillende scenario's beschouwd: de huidige bouwpraktijk, klimaatadaptief bouwen en het gebruik van innovatieve en circulaire materialen. De gemiddelde jaardosis binnenshuis van bouwmaterialen voor de huidige bouwpraktijk bedraagt circa 0,25 mSv. Klimaatadaptief bouwen en de toepassing van innovatieve materialen kunnen leiden tot zowel een toename als een afname van de jaardosis.

Voor de stralingsbelasting van de bouwmaterialen bovenop de achtergrond is een correctie toegepast voor de afschermende werking van deze materialen tegen terrestrische en kosmische straling van buitenaf. Hierdoor sluit de berekende dosis aan bij de wettelijk vastgestelde definitie van de referentiewaarde voor bouwmaterialen. In de berekening is daarom een reductie van 0,25 mSv toegepast. Dit leidt ertoe dat de gemiddelde extra stralingsbelasting door bouwmaterialen bij de huidige bouwpraktijk uitkomt op circa 0 mSv per jaar.

Voor alle type woningen en alle beschouwde scenario's ligt de berekende blootstelling binnenshuis aan gammastraling van bouwmaterialen gecorrigeerd voor de achtergrond ruim onder het geldende referentieniveau van 1 mSv per jaar. Het rapport concludeert dan ook dat de natuurlijke radioactiviteit in zowel traditionele als innovatieve bouwmaterialen in Nederland geen radiologisch risico vormt voor de bevolking.

Inhoudsopgave

Samenvatting 3

1 Introductie 6

2 Ontwikkelingen in materiaalgebruik en bouwpraktijk 8
2.1 Bouwmaterialen en grondstoffen 8
2.1.1 Bouwmaterialen 8
2.1.2 Grondstoffen 9
2.2 Woningbouw 10
2.3 Samenvatting 11

3 Meetcampagne 13
3.1 Lijst van onderzochte materiaalmonsters 13
3.2 Resultaten van de survey 15
3.2.1 Grondstoffen 16
3.2.2 Bouwmaterialen 18
3.3 Vergelijk met voorgaande surveys 19
3.4 Samengestelde materialen 20

4 Gammastraling in woningen 22
4.1 Werkwijze en beschouwde woningtypen 22
4.1.1 Rekenmethodiek 22
4.1.2 Beschouwde woningen 23
4.2 Scenario – Bestaande situatie 23
4.2.1 Beschrijving van het referentiescenario 23
4.2.2 Berekening van de gammastralingsdosis 24
4.3 Scenario – Klimaat adaptief woningontwerp 25
4.3.1 Beschrijving van het klimaat adaptieve scenario 25
4.3.2 Berekening van de gammastralingsdosis 26
4.4 Scenario – Gebruik van innovatieve en circulaire bouwmaterialen 27
4.4.1 Beschrijving van het materiaalinnovatie scenario 27
4.4.2 Berekening van de gammastralingsdosis 27

5 Conclusie 29

Lijst met Tabellen en figuren. 31
Lijst van tabellen 31
Lijst van figuren 32

Referenties 33

1 Introductie

Sinds de jaren 80 is er in Nederland aandacht geweest voor gammastraling afkomstig uit bouwmaterialen en de bijdrage daarvan aan de publieke blootstelling aan ioniserende straling. Het gaat hierbij om van nature aanwezige straling in steenachtige bouwmaterialen. De grondstoffen voor deze materialen zijn – direct of indirect – afkomstig uit de aardkorst en bevatten geringe hoeveelheden uraan, thorium en kalium. Deze zogenoemde primordiale radionucliden zijn al sinds het ontstaan van de aarde, ongeveer 4,55 miljard jaar geleden, in de bodem aanwezig en daarmee ook in de bouwmaterialen. De aanwezigheid van deze radionucliden, evenals de vervalproducten die ontstaan uit uraan en thorium, draagt bij aan de externe stralingsbelasting van de Nederlandse bevolking. Daarnaast worden in de vervalreeksen van uraan en thorium ook isotopen van het edelgas radon gevormd, die zich deels kunnen vrijmaken uit bouwmaterialen en zo bijdragen aan de concentraties van radon (^{222}Rn) en thoron (^{220}Rn) in woningen.

In de afgelopen decennia zijn in Nederland meerdere meetcampagnes uitgevoerd om de stralingsbelasting in woningen in kaart te brengen, waarbij ook specifiek onderzoek is verricht naar de stralingseigenschappen van bouwmaterialen. De meest recente landelijke studie dateert uit 2006 (De Jong et al., 2006) en was gebaseerd op een representatieve steekproef van destijds toegepaste bouwmaterialen. Deze studie is inmiddels bijna twee decennia oud. Met de inwerkingtreding van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming en de nadere uitwerking daarvan in de ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming in 2018 (ANVS, 2017), ter implementatie van Richtlijn 2013/59/Euratom (EC, 2013), is het wettelijke kader aangepast. Daarbij zijn specifieke stralingsbeschermingsregels voor bouwmaterialen geïntroduceerd. Deze regels stellen eisen aan de radiologische veiligheid van bouwmaterialen en schrijven voor dat de bijdrage van natuurlijke radioactiviteit aan de blootstelling van leden van de bevolking – middels toetsing aan een referentieniveau – beperkt moet blijven tot 1 mSv per jaar voor de externe blootstelling aan gammastraling.

Het genoemde referentieniveau voor bouwmaterialen vereist enige toelichting. Het betreft de blootstelling aan gammastraling afkomstig van bouwmaterialen bovenop de achtergrondstraling. De definitie voor de dosis “bovenop de achtergrond” vereist dat er rekening wordt gehouden met de afschermende werking van bouwmaterialen tegen terrestrische en kosmische straling van buitenaf (achtergrondstraling). M.a.w. voor het toetsen aan het referentieniveau dient de externe blootstelling aan gammastraling van bouwmaterialen binnenshuis te worden bepaald, gevolgd door een substractie, welke in dit rapport ook wel correctie wordt genoemd. Hiervoor zal een voor Nederland representatieve waarde voor de afschermende werking van bouwmaterialen tegen straling van buitenaf worden gehanteerd.

Naast de totstandkoming van genoemde regelgeving is er ook sprake van een bredere maatschappelijke ontwikkeling gericht op verduurzaming van zowel het bouwproces als de productie van bouwmaterialen. Dit behelst o.a. ontwikkeling van nieuwe materialen maar ook recycling van industriële restmaterialen als

alternatief voor bijvoorbeeld primaire toeslagmaterialen. Innovaties op dit terrein leiden tot andere keuzes in grondstoffen en toepassingen, wat mogelijk gevolgen heeft voor de radiologische eigenschappen van bouwmaterialen en de bijbehorende stralingsbelasting. Deze ontwikkelingen vormen gezamenlijk de aanleiding voor het uitvoeren van een studie naar natuurlijke radioactiviteit in bouwmaterialen.

Het doel van deze studie is het bepalen van de niveaus van natuurlijke radioactiviteit in bouwmaterialen en hun grondstoffen, en het vaststellen van de stralingsdosis voor een lid van de Nederlandse bevolking. Daarbij wordt zowel gekeken naar het huidige gebruik van bouwmaterialen als naar verwachte toekomstige ontwikkelingen.

Het onderzoek richt zich op het gebruik van bouwmaterialen in de woningbouw, en beperkt zich tot de aanwezigheid van natuurlijke radioactiviteit Radium-226 (^{226}Ra), Thorium-232 (^{232}Th) en Kalium-40 (^{40}K). De emissie van radon en thoron uit bouwmaterialen valt buiten de scope van dit werk. Meer specifiek zijn de doelstellingen van deze studie als volgt gedefinieerd:

1. Het geven van een overzicht van de in omvang belangrijkste steenachtige bouwmaterialen die in Nederland worden toegepast. Dit omvat ook een overzicht van de voornaamste industriële reststoffen en natuurlijke materialen die als (grondstof in) bouwmaterialen worden gebruikt;

2. Het bepalen van de natuurlijke radioactiviteit in bouwmaterialen en de daarbij gebruikte grondstoffen. De focus ligt op de belangrijkste materialen die in Nederlandse woningen worden toegepast. Waar relevant wordt ook het gebruik van biomassa-vliegassen met Cesium-137 (^{137}Cs) activiteit meegenomen;

3. Het bepalen van de bijdrage van gammastraling uit bouwmaterialen aan de stralingsbelasting van inwoners in Nederland:
   a. Deze bijdrage wordt geschat met behulp van de indexmethode uit Annex VIII van richtlijn 2013/59/Euratom en de CEN/TC-351-methode, dan wel een recentere of geactualiseerde CEN-methode;
   b. Inwoners van Nederland worden beschouwd als leden van de bevolking die voldoen aan het begrip *'representative person'* zoals gedefinieerd in de Europese richtlijn 2013/59/Euratom, waarbij de berekende belasting wordt getoetst aan het referentieniveau (zie Bbs art. 9.10, lid 8).

2 Ontwikkelingen in materiaalgebruik en bouwpraktijk

De steenachtige bouwmaterialen zoals we die kennen in de woningbouw worden al vele decennia toegepast. Desondanks zijn er belangrijke ontwikkelingen in het gebruik van grondstoffen en bouwmaterialen. Deze ontwikkelingen komen voort uit de noodzaak om de productie van bouwmaterialen te verduurzamen. Dit betreft onder andere het hergebruik van bouw en sloopafval, de inzet van alternatieve (industriële) grondstoffen, maar ook aanpassingen in bouwpraktijk teneinde de milieubelasting van de woning te reduceren of t.b.v. klimaatadaptatie.

Om te komen tot een goed overzicht van de toegepaste bouwmaterialen en hun grondstoffen, alsmede een juiste schatting van de stralingsbelasting t.g.v. bouwmaterialen, is het van belang de relevante ontwikkelingen in kaart te brengen. Zodoende is in gesprekken met brancheorganisaties geïnventariseerd welke ontwikkelingen er spelen die relevante kunnen zijn voor de stralingsbelasting. De uitkomsten van de inventarisatie zijn samengevat in dit hoofdstuk. Het is belangrijk te benadrukken dat de focus in dit overzicht ligt op ontwikkelingen die relevant zijn vanuit het perspectief van stralingsbelasting. Dit overzicht is dan ook niet bedoeld om een volledig beeld te geven van alle verduurzamingsinitiatieven binnen de sector. Bovendien worden alleen initiatieven benoemd die brede toepassing kennen of dit mogelijk in de toekomst zouden kunnen krijgen.

2.1 Bouwmaterialen en grondstoffen

2.1.1 Bouwmaterialen

Beton

De betonsector zet in op verduurzaming met initiatieven gericht op het verminderen van CO_2-uitstoot en het efficiënter gebruik van grondstoffen. Dit omvat onder andere vermindering van het cementgebruik, bijvoorbeeld door toepassing van alternatieve bindmiddelen en een lager klinkergehalte in cement. Ook wordt ingezet op het gebruik van gerecycled beton en industriële reststoffen als toeslagmateriaal.

Cellenbeton

De markt voor cellenbeton verschuift naar kant-en-klare panelen in plaats van losse blokken, mede vanwege eisen aan snelheid en efficiëntie in de bouw. Verwacht wordt dat de beschikbaarheid van primaire grondstoffen in de komende 5 tot 10 jaar afneemt, wat de focus op secundaire materialen en recycling vergroot.

Kalkzandsteen

De in Nederland toegepaste kalkzandsteen wordt lokaal geproduceerd. Zand wordt meestal lokaal gewonnen of geïmporteerd, terwijl kalk voornamelijk uit Duitsland of België komt. Hergebruik van gebruikte kalkzandsteen vindt op beperkte schaal plaats in de productie van nieuw materiaal, wat bijdraagt aan circulariteit.

Keramische producten

Binnen de keramiekindustrie zijn innovaties gericht op het reduceren van grondstoffengebruik. Voorbeelden zijn poreuze materialen en ultradunne baksteenstrips (ca. 1,5–2,5 cm) voor gevelbekleding aan de buitenzijde van woningen. Ook zijn er systemen waarbij stenen mechanisch worden bevestigd, zodat geen metselspecie nodig is.

Gips

Gipsproducten worden vervaardigd uit natuurlijke afzettingen, recycling, rookgasontzwaveling (FGD-gips) of fosfogips (een bijproduct van de fosfaatproductie). In Nederland bestaat 80–95% van het gebruikte gipsgesteente nog uit natuurlijk gips, maar de aandacht voor circulaire alternatieven neemt toe.

2.1.2 Grondstoffen

Zand, grind en graniet

Voor zand en grind wordt een afname van het aantal vergunningen voor de winning van zand en grind in Nederland verwacht, wat kan leiden tot een tekort aan natuurlijke bouwgrondstoffen. Hierdoor kan de afhankelijkheid van import toenemen, vooral uit Duitsland, België en Frankrijk. Echter, ook hier worden deze grondstoffen mogelijk schaarser. Graniet wordt volledig geïmporteerd, vooral uit Noorwegen en Schotland, en de import daarvan zal waarschijnlijk worden geconsolideerd, met beperkte groei mogelijkheden in de komende tien jaar. De gevolgen hiervan voor de natuurlijke radioactiviteit in bouwproducten zijn lastig te voorspellen, maar toenemend gebruik van gerecycled granulaat is waarschijnlijk. Hoewel deze grondstoffen traditioneel een lage natuurlijke radioactiviteit kennen, is hun gewichtsaandeel in de bouwproducten groot, en daarom relevant.

Gerecycled granulaat

Granulaten uit bouw- en sloopafval worden steeds vaker toegepast in nieuw beton. Er zijn twee hoofdgroepen: (i) gemengd granulaat (van baksteen en beton) en (ii) betongranulaat (van schoon beton). Het granulaat wordt ingezet als vervanging van natuurlijk zand en grind. Meestal wordt een mengsel van 80% betongranulaat en 20% gemengd granulaat toegepast. Voor gebruik worden de granulaten gereinigd. De fijne fractie, rijk aan cement, is te reactief om als gewoon toeslagmateriaal te gebruiken, maar wordt onderzocht als toevoeging of bindmiddel. Omdat gerecycled granulaat afkomstig is van bestaande

bouwmaterialen kan dit leiden tot hogere niveaus van natuurlijke radioactiviteit dan bij gebruik van natuurlijk zand of grind.

Cement

In Nederland worden traditioneel Portlandcement (CEM I) en hoogovencement (CEM III) gebruikt. Er is een ontwikkeling richting cementsoorten waarin traditionele componenten deels worden vervangen, zoals gecalcineerde klei (bijv. in LC^3, Limestone Calcined Clay Cement). Een andere ontwikkeling is de toeslag van assen uit de verbranding van biomassa in het vliegas cement (CEM II/B-V), hoewel dit nu beperkt blijft tot niet-constructief beton. Verwacht wordt dat het gebruik van cementtypes als CEM II, IV, V en VI toeneemt. Aangezien cement het hoogste gehalte natuurlijke radioactiviteit bevat van alle grondstoffen voor de productie van beton, zijn deze ontwikkelingen relevant, al is het gewichtsaandeel in beton beperkt.

Innovaties van cement en beton

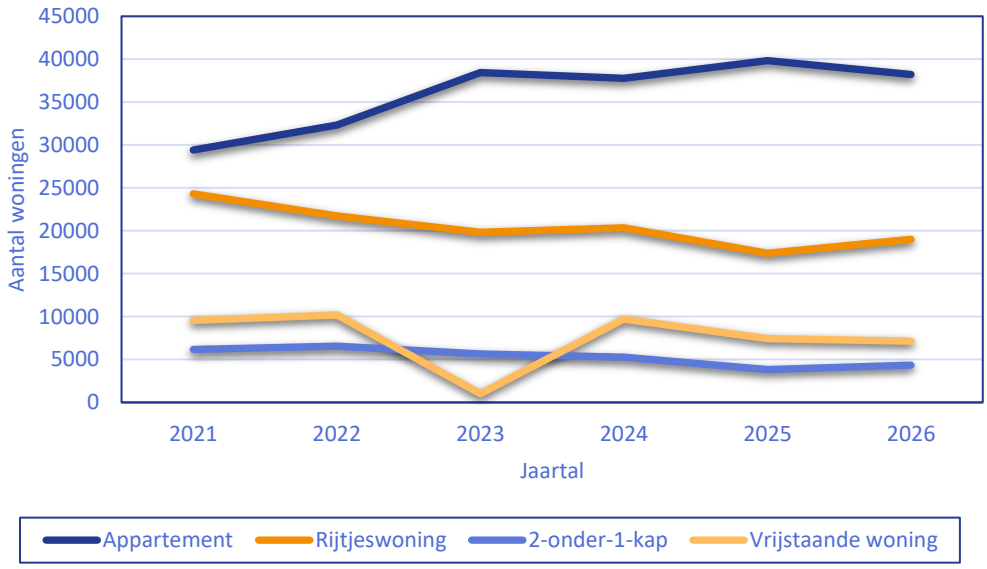
Belietrijk cement, waarbij het aandeel beliet hoger is dan dat van aliet (C_3S), wordt beschouwd als een duurzamer alternatief voor traditioneel portlandcement omdat de productie minder energie vereist en minder CO_2 uitstoot. Daarnaast vormen alkali-geactiveerde bindmiddelen (geopolymeren), gebaseerd op industriële reststromen zoals vliegas en hoogovenslak, een cementvrij alternatief dat gebruikmaakt van alkalische activatie. Ook carbonatatie-uitharding is een relevante ontwikkeling, waarbij tijdens de productie CO_2 in vers beton wordt geïnjecteerd en wordt vastgelegd in de vorm van stabiel calciumcarbonaat, wat zowel bijdraagt aan CO_2-opslag als aan de duurzaamheid van het materiaal. Deze innovaties worden momenteel al op beperkte schaal toegepast in beton en kunnen in de toekomst een belangrijkere rol gaan spelen, waardoor ze relevant zijn voor deze studie.

2.2 Woningbouw

Binnen de woningbouw zijn in recente jaren diverse ontwikkelingen zichtbaar die samenhangen met verduurzaming, veranderend beleid en aanpassingen in het gebruik van bouwmaterialen. Voor de woningbouw vormt het Nationale Klimaatakkoord een belangrijk beleidsmatig kader, waarin wordt toegewerkt naar een lager energiegebruik van gebouwen op de langere termijn (Nationaal Klimaatakkoord, 2019; Jonker et al., 2024). In dat kader wordt verwacht dat energie-efficiëntie, materiaalbesparing en alternatieve bouwconcepten een steeds grotere rol kunnen spelen in ontwerp en uitvoering. Daarnaast wordt in sectoranalyses gewezen op een toenemende aandacht voor circulaire principes, waaronder hergebruik van materialen en het verminderen van bouw- en sloopafval (ING, z.j.).

De recente ontwikkelingen in klimaatadaptieve woningbouw richten zich op het verminderen van energiegebruik, het verbeteren van het binnenklimaat en het verkleinen van de milieu-impact. Zo wordt houtskeletbouw steeds vaker toegepast vanwege het lagere materiaalgewicht, en de goede isolerende eigenschappen. Daarnaast wordt de verhouding tussen raam en gevel oppervlak vaak verlaagd om

warmteverliezen in de winter en ongewenste opwarming in de zomer te beperken. Ook worden gevels en muren dikker uitgevoerd, bijvoorbeeld door extra isolatielagen of door het vergroten van de thermische massa, waardoor gebouwen beter in staat zijn om temperatuurschommelingen te dempen. Het gebruik van meer en hoogwaardig isolatiemateriaal draagt verder bij aan een lagere warmtevraag en verhoogt het comfort voor bewoners. Deze ontwerpkeuzes sluiten aan bij de bredere trend om woningen robuuster te maken tegen klimaatverandering en tegelijkertijd de energieprestatie te verbeteren (BZK, 2025).



Figuur 1 Weergave van de aantallen nieuwbouwwoningen die de afgelopen 5 jaar zijn en worden gebouwd. Er is onderscheid gemaakt per type woning (CBS, 2026).

Ook in de bouw van woningen zijn er duidelijke trends waarneembaar. Op basis van gegevens over afgegeven bouwvergunningen blijkt dat de afgelopen jaren de groei vooral heeft gelegen op de realisatie van appartementen, terwijl andere woningtypen stabiel zijn gebleven of zelfs afgenomen (CBS, 2026). Dit overzicht is te zien in Figuur 1.

2.3 Samenvatting

Uit de inventarisatie zijn twee ontwikkelingen geëxtraheerd die van belang zijn voor de toekomstige stralingsbelasting van bouwmaterialen. Deze zijn als volgt:

Klimaatadaptief bouwen – Eén richting in het klimaatadaptief bouwen is de keuze voor een hoofdconstructie welke is uitgevoerd in een hout- of staalskeletbouw. Deze bouwmethode heeft een lager materiaalgewicht en het verminderde gebruik van massieve minerale materialen kan leiden tot een lagere bijdrage van natuurlijke radionucliden aan de gammastraling binnenshuis. Daar staat tegenover dat de

afschermende werking op de straling buitenshuis minder is. Een andere richting in het klimaatadaptief bouwen is het toepassen van een lagere raam-gevelverhouding eventueel in combinatie met dikkere muren. Deze ontwerpkeuze heeft niet alleen invloed of de thermische eigenschappen van de woning, maar beïnvloed ook de aanwezige gammastraling in de woning.

Gebruik van innovatieve en circulaire bouwmaterialen – Het gebruik van industriële reststoffen en alternatieve cementsoorten in voornamelijk beton maar ook andere bouwmaterialen is van invloed op de aanwezigheid van natuurlijke radioactiviteit. De toepassing van gerecyclede granulaten ter vervanging van primaire toeslagmaterialen zoals zand en grind, is een steeds meer gangbare praktijk. De herkomst en samenstelling van deze granulaten kunnen variëren, wat gevolgen kan hebben voor de natuurlijke radioactiviteit van het betreffende bouwproduct.

Genoemde ontwikkelingen zullen worden meegenomen in de keuze van de materiaalmonsters (Hfst. 3) en bij de dosisberekeningen (Hfst. 4).

3 Meetcampagne

3.1 Lijst van onderzochte materiaalmonsters

Voor de meetcampagne is een lijst samengesteld van materiaalmonsters, die representatief zijn voor de in Nederland toegepaste en beschikbare materialen. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen:

i. industriële reststoffen en grondstoffen voor bouwmaterialen, en
ii. bouwmaterialen zijnde de eindproducten zoals deze in de woningbouw worden toegepast.

Omdat veel bouwmaterialen meerdere grondstoffen bevatten, zijn ook de afzonderlijke grondstoffen in de lijst opgenomen. Deze zijn ingedeeld in categorieën o.a. grind, betongranulaat, graniet, zand, cement en industriële reststoffen. De bouwmaterialen zijn ingedeeld in de categorieën beton, keramische producten, kalkzandsteen, cellenbeton en gips. Daarnaast zijn voor zowel de grondstoffen als bouwmaterialen twee aanvullende categorieën toegevoegd:

- **overige**, voor materialen die niet binnen de hoofdindeling vallen, en
- **innovatieve materialen**, die momenteel nog beperkt worden toegepast maar naar verwachting in belang zullen toenemen.

De selectie is in overleg met vertegenwoordigers uit de sector van bouwgrondstoffenleveranciers tot stand gekomen en vormt een afspiegeling van de belangrijkste materialen op de Nederlandse markt, aangevuld met enkele innovatieve materialen die aansluiten bij actuele trends en ontwikkelingen.

Een overzicht van de materiaalmonsters is weergegeven in Tabel 1. Het totaal aantal monsters bedraagt 218, waarvan 117 betrekking hebben op grondstoffen en 101 op bouwmaterialen, zijnde de eindproducten die in de woningbouw worden toegepast.

Tabel 1 Overzicht van geselecteerde materiaalmonsters uitgesplitst naar productgroep en -materiaal met aantallen onderzochte monsters.

Grondstoffen	No.	Bouwmaterialen	No.
Cement • CEM I • CEM II • CEM III	**20**	**Beton** • Prefab beton • Betonmortel C30/37 met en zonder Betongranulaat	**41**
Zand • Rivierzand, zeezand, zand van freestyle mijn, geïmporteerd zand	**23**	**Keramische producten** • Baksteen • Dakpannen / Vloertegel • Binnenmuursteen	**13**
Grind • Riviergrind, zeegrind, gravel van freestyle mijn, geïmporteerd grind	**19**	**Kalkzandsteen**	**20**
Graniet	**5**	**Cellenbeton**	**10**
Recyclinggranulaten • Betongranulaat, menggranulaten	**12**	**Gips** • Gipsplaten, gipspleister	**8**
Industriële restgrondstoffen • Bodemas • Staalslak • Hoogovenslak • Biomassa-assen, innovatieve vulstof voor toepassing in beton (o.b.v. SVI-vliegassen)	**11**	**Anhydriet** • Anhydriet (voor vloeren): thermisch anhydriet en mix van thermisch, synthetisch en natuurlijk anhydriet	**4**
Grondstoffen voor de keramische industrie • Klei van verschillende oorsprong • Keramiek additieven: zirkoon, Titaan, Mangaan, Lava, Porfier, Mijnsteen, ionenpigmenten	**14**		
Overige • Kalksteen, kalksteenmeel • Calcietkorrels	**4**		
Innovatieve grondstoffen • Innovatief cement • Innovatief granulaat	**9**	**Innovatieve bouwmaterialen** • Beton met innovatief cement • Beton met innovatief granulaat • Klimaatneutrale steen	**5**

3.2 Resultaten van de survey

De materiaalmonsters zijn onderzocht middels een gamma-spectrometrische analyse op de aanwezigheid van de natuurlijk voorkomende radionucliden ^{226}Ra, ^{232}Th en ^{40}K. Deze aanwezigheid is uitgedrukt in de massieke activiteit met de eenheid Bq kg^{-1}. Daarnaast is voor grondstoffen die zijn verkregen uit de verbranding van biomassa ook de massieke activiteit van het radionuclide ^{137}Cs bepaald.

De methode voor het bepalen van de massieke activiteiten is uitgevoerd conform de Europese Norm (EN) EN 17216 (CEN, 2023). Deze Europese norm beschrijft de geharmoniseerde referentiemethode voor het bepalen van de massieke activiteit van de natuurlijke radionucliden ^{226}Ra, ^{232}Th en ^{40}K in bouwproducten door middel van halfgeleider-gammaspectrometrie.

EN 17216 beschrijft de volledige meetprocedure voor de bepaling van de massieke activiteit. De norm omvat de monstervoorbereiding waaronder het vermalen van de monsters tot een minimale korrelgrootte, het bepalen van de drooggewichtsfractie van het materiaal, de energie- en efficiëntiekalibratie van het detectiesysteem, achtergrondcorrectie en spectraalanalyse. Tevens is in de norm vastgelegd de berekening van de activiteiten en de bijbehorende meetonzekerheden, alsmede de rapportage van resultaten. Voor de bepaling van ^{226}Ra en ^{232}Th wordt gebruik gemaakt van een indirecte bepaling middels de dochternucliden welke zich in de vervalreeks van ^{226}Ra, ^{232}Th bevinden. Reden hiervoor is dat een bepaling via de dochternucliden eenvoudiger is dan via een directe bepaling. Dit betekend dat voor ^{232}Th de activiteiten van de dochternucliden ^{228}Ra en ^{228}Th wordt gebruikt. Indien er sprake is van een verschil in massieke activiteit tussen beide nucliden, bv als gevolg van statistische variatie of door chemische of fysische bewerking van het materiaal wordt de hoogste waarde van beide radionucliden gerapporteerd. Daarmee wordt er vanuit het oogpunt van de stralingsbescherming zorggedragen dat er geen onderschatting van de stralingsdosis plaatsvindt. Voor ^{226}Ra wordt gebruik gemaakt van het dochternuclide ^{214}Pb. Voor laatst genoemde is het van belang dat deze in evenwicht is met ^{226}Ra. Zodoende dient het monster in een gasdichte (radondicht) meetbeker verpakt te worden en gedurende een periode van drie weken opgeslagen te worden zodat radioactief evenwicht kan ontstaan tussen ^{226}Ra en de kortlevende radondochters.

De resultaten uit analyses zijn gepresenteerd per type grondstof en bouwmateriaal, zoals getoond in Tabel 1. De volledige dataset inclusief ^{228}Ra en ^{228}Th is te vinden in Bijlage A. Naast een detail overzicht zijn de resultaten ook vergeleken met de uitkomsten van de survey naar straling en bouwmaterialen uit 2006 (De Jong et al., 2006), als mede is een vergelijk gemaakt met beschikbare informatie afkomstig uit de aan Nederland grenzende buurlanden België en Duitsland.

3.2.1 Grondstoffen

De resultaten van de onderzochte grondstoffen zijn getoond in Tabel 2. De tabel toont het aantal monsters dat is onderzocht, massieke activiteit van ^{226}Ra, ^{232}Th en ^{40}K, en waar van toepassing ^{137}Cs, voor de verschillende grondstoffen.

Uit de resultaten blijkt dat de massieke activiteiten van ^{226}Ra en ^{232}Th bij de natuurlijke grondstoffen zand en grind gemiddeld rond de 10 Bq kg^{-1} liggen. Bij deze grondstoffen zijn tevens lage ^{40}K-activiteiten gevonden, met waarden tot maximaal 400 Bq kg^{-1}. Voor andere natuurlijke grondstoffen zoals klei, keramische additieven en graniet zijn hogere massieke activiteiten gevonden. Hierbij dient te worden vermeld dat het in Nederland toegepaste graniet afkomstig is uit het buitenland o.a. Schotland en Noorwegen. Voor de grondstoffen zand, grind en klei kan worden gesteld dat de meetresultaten corresponderen met de activiteiten welke typisch worden aangetroffen in de Nederlandse bodem. Industrieel verkregen grondstoffen waarbij thermische of chemische bewerking heeft plaatsgevonden bevatten in vergelijking met natuurlijke grondstoffen iets hogere massieke activiteiten. Dit geldt voor o.a. cement (CEM I, II en III) alsmede de industriële reststoffen, voor deze grondstoffen zijn activiteiten aangetroffen tot 100 Bq kg^{-1} voor ^{226}Ra en ^{232}Th, en tot 500 a 600 Bq kg^{-1} voor ^{40}K. Gerecyclede granulaten zijn verkregen uit de sloop van gebouwen en civiele constructies en dit betreft de facto bouwmaterialen welke decennia geleden zijn geproduceerd, de gemeten activiteiten in de granulaten corresponderen met eerdere studies naar straling in bouwmaterialen zoals uitgevoerd in de jaren 80 (Ackers 1985). De innovatieve grondstoffen tonen een verhoudingsgewijs grootte variatie in activiteit.

Met uitzondering van zirkoon liggen de massieke activiteiten van ^{226}Ra en ^{232}Th van de onderzochte monsters onder de 1.000 Bq kg^{-1}. Deze waarde geldt als algemene vrijstellingsgrens voor genoemde radionucliden, en materialen met een hogere waarde vallen onder het Bbs. Geen van de monsters heeft een activiteit voor ^{40}K boven de vrijstellingsgrens van 10.000 Bq kg^{-1}. Er dient te worden opgemerkt dat zirkoon in de Regeling basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (ANVS, 2018) reeds is aangemerkt als grondstof welke kan leiden tot een overschrijding van het referentieniveau, waarmee het gebruik van zirkoon binnen het controlestelsel van het Bbs valt. Daarmee wordt zorggedragen voor een verantwoorde toepassing van zirkoon in keramische bouwproducten.

Voor grondstoffen welke zijn verkregen uit de verbranding van biomassa-assen zijn meetbare activiteiten ^{137}Cs gevonden, ter hoogte van 5 Bq kg^{-1}. Aanwezigheid van ^{137}Cs in biomassa is het gevolg van ^{137}Cs opname uit de bodem welke afkomstig is van o.a. het nucleaire ongeval in Tsjernobyl en de atoombom testen in de jaren 50 en 60 van de vorige eeuw. Bij verbranding van de biomassa kan dit leiden tot accumulatie in de assen. De gevonden activiteiten liggen onder de algemene vrijstellingsgrens van 100 Bq kg^{-1}, en kunnen daarmee dus vrij worden toegepast als bouwgrondstof.

Tabel 2 Overzicht van de analyseresultaten (Bq kg^{-1}) van de onderzochte monsters per type grondstof met gemiddelde ± standaard deviatie en de min max waarden.

2026 Resultaten	^{226}Ra (Bq kg^{-1})			^{232}Th (Bq kg^{-1})			^{40}K (Bq kg^{-1})			^{137}Cs (Bq kg^{-1})		
CEM I (5)	28	±	13	14	±	3	192	±	35			
	12	-	49	9	-	18	128	-	230			
CEM II (5)	37	±	15	22	±	7	200	±	67			
	12	-	54	10	-	32	130	-	321			
CEM III (10)	66	±	17	48	±	13	164	±	26			
	35	-	87	26	-	68	114	-	211			
Zand (23)	7	±	2	7	±	2	187	±	69			
	4	-	16	3	-	13	39	-	291			
Grind (19)	10	±	4	11	±	4	157	±	79			
	6	-	22	2	-	21	19	-	345			
Graniet (5)	51	±	4	35	±	1	880	±	88			
	48	-	58	34	-	36	787	-	996			
Recyclinggranulaten (12)	18	±	6	16	±	6	211	±	86			
	0	-	26	0	-	24	2	-	355			
Innovatief recyclinggranulaten (4)	21	±	4	16	±	2	185	±	29			
	17	-	29	13	-	20	159	-	234			
Grondstoffen Keramische Klei (6)	40	±	7	45	±	9	518	±	106			
	34	-	56	32	-	54	332	-	687			
Additieven Grondstoffen Keramiek (7)	17	±	14	21	±	18	387	±	377			
	3	-	46	1	-	55	2	-	904			
Zirkoon (1)	3708	±	251	605	±	41	< 20*					
Innovatief cement (5)	42	±	35	29	±	25	86	±	28			
	18	-	112	15	-	78	41	-	117			
Bodemas (2)	21	±	1	19	±	1	207	±	0			
	19	-	22	18	-	20	207	-	207			
Staalslak (2)	8,7	±	0,4	2,11	±	0,05	1,7	±	0,2			
	8,2	-	9,1	2,06	-	2,15	1,5	-	1,8			
Hoogovenslak (3)	122	±	0	120	±	1	137	±	2			
	122	-	123	118	-	121	134	-	140			
Overige grondstoffen (4)	47	±	31	20	±	18	169	±	223			
	11	-	87	1	-	44	4	-	483			
Biomassa-houdende assen (4)	55	±	44	52	±	43	485	±	78	5	±	1
	23	-	130	18	-	124	367	-	584	4	-	7

* Resultaat onder de minimaal detecteerbare activiteit (MDA).

3.2.2 Bouwmaterialen

De massieke activiteit van de verschillende typen bouwmaterialen zijn weergegeven in Tabel 3. De twee soorten beton, te weten prefab en betonmortel, verschillen enigszins van elkaar. Dit verschil wordt primair veroorzaakt door de keuze van de bindmiddelen (Tabel 10 in Bijlage A). Voor prefab beton wordt overwegend cement met code CEM I (portlandcement) en CEM II gehanteerd, terwijl voor betonmortel CEM III (hoogovencement) wordt ingezet wat iets hoger is in activiteit. Tevens bevat betonmortel ook meer vliegas, dit tezamen maakt dat de activiteiten van ^{226}Ra, ^{232}Th hoger liggen.

De bouwmaterialen gips, kalkzandsteen en cellenbeton liggen in het lagere bereik met een gemiddelde massieke activiteit in de orde grootte van 10 Bq kg^{-1} voor ^{226}Ra, ^{232}Th. De massieke activiteit van ^{40}K binnen deze typen bouwmaterialen varieert met een maximum van enkele honderden Bq kg^{-1}. De massieke activiteit voor keramische materialen is in vergelijking met eerdergenoemde bouwmaterialen iets hoger, wat direct samenhangt met de aanwezigheid van natuurlijke activiteit in de klei (Tabel 2) welke dient als basisgrondstof.

Vijf innovatieve bouwmaterialen zijn onderzocht waarvan één een bovengemiddeld hoge activiteit bevat. Het is belangrijk te benadrukken dat dit type beton niet is voorzien als bouwmateriaal in de woningbouw. Verder dient ook te worden vermeld dat gegeven het beperkte aantal monsters in deze categorie geen conclusies kunnen worden getrokken over mogelijke ontwikkelingen in de massieke activiteit van innovatieve betonsoorten.

In Tabel 3 is ook de index waarde I getoond welke geldt als screeningsindex voor het beoordelen van de door bouwmaterialen uitgezonden gammastraling. De index is beschreven in de ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (ANVS, 2018) en is een gewogen sommering van de drie radionucliden. De vergelijking voor de index I is als volgt:

$$I = \frac{a_1}{300} + \frac{a_2}{200} + \frac{a_3}{3000}, \quad (1)$$

in de vergelijking zijn a_1, a_2 en a_3 de massieke activiteit van respectievelijk ^{226}Ra, ^{232}Th en ^{40}K uitgedrukt in Bq kg^{-1}. Een index waarde van 1 of lager geldt als conservatieve benadering om aan te tonen dat wordt voldaan het referentieniveau van 1 mSv per jaar ten gevolge van de door bouwmaterialen uitgezonden gammastraling. In deze vergelijking is de correctie voor de achtergrondstraling in de weegfactoren 300, 200 en 3000 verdisconteerd.

Uit de berekende index waarden I blijkt dat voor bouwmaterialen waaronder beton, gips, kalkzandsteen en cellenbeton de index waarde zich onder de 0,5 begeeft, dit is met inachtneming van de maximaal waarden. De keramische producten zoals baksteen liggen gemiddeld iets hoger. De hoogste index waarde van 0,81 is gevonden voor één van de vijf monsters in de categorie innovatieve bouwmaterialen. Als laatste

dient te worden benadrukt dat voor geen enkel bouwmateriaal de referentie waarde van 1 is overschreden.

Tabel 3 Overzicht van de analyseresultaten (Bq kg^{-1}) en de index I van de onderzochte monsters per type bouwmateriaal met gemiddelde ± standaard deviatie en de min max waarden.

2026 Resultaten	^{226}Ra (Bq kg^{-1})			^{232}Th (Bq kg^{-1})			^{40}K (Bq kg^{-1})			I (-)		
Prefab Beton (22)	16	±	4	12	±	3	153	±	33	0,16	±	0,02
	12	-	25	6	-	17	90	-	194	0,10	-	0,23
Betonmortel (19)	23	±	5	17	±	3	263	±	104	0,25	±	0,04
	17	-	35	14	-	25	156	-	482	0,18	-	0,40
Gypsum (8)	8	±	8	8	±	18	21	±	11	0,07	±	0,09
	0	-	26	0	-	56	1	-	41	0,00	-	0,38
Kalkzandsteen (20)	12	±	3	13	±	5	261	±	78	0,19	±	0,04
	7	-	17	6	-	24	147	-	426	0,10	-	0,32
Cellenbeton (10)	7	±	2	7	±	1	171	±	22	0,12	±	0,01
	5	-	11	5	-	9	130	-	196	0,09	-	0,15
Baksteen (8)	37	±	4	42	±	8	486	±	132	0,49	±	0,06
	29	-	42	32	-	54	375	-	800	0,38	-	0,68
Overige keramiek (5)	52	±	11	55	±	10	672	±	143	0,67	±	0,08
	40	-	66	45	-	71	530	-	945	0,53	-	0,89
Anhydriet (4)	6	±	1	3	±	3	134	±	30	0,08	±	0,02
	4	-	7	0	-	6	91	-	170	0,04	-	0,11
Innovatieve bouwmaterialen (5)*	34	±	31	27	±	30	181	±	155	0,31	±	0,19
	9	-	93	3	-	85	5	-	469	0,05	-	0,89

* Het monster met de hoogste massieke activiteit voor ^{226}Ra en ^{232}Th is een niet-constructief beton welke geen voorziene toepassing in de woningbouw heeft.

De resultaten van ^{226}Ra, ^{232}Th en ^{40}K vormen de basis voor de schatting van de door het bouwmateriaal veroorzaakte uitwendige stralingsblootstelling, waar in Hoofdstuk 4 nader op zal worden ingegaan.

3.3 Vergelijk met voorgaande surveys

Voor een vergelijking met eerdere surveys alsmede een vergelijking met informatie uit de naburige landen zijn de index waarden I van de onderzochte bouwmaterialen gebruikt. Een vergelijk van de survey resultaten is getoond in onderstaande tabel.

Tabel 4 Overzicht van de survey resultaten uitgedrukt in de index waarde I (-) vergeleken met eerdere gegevens uit Nederland en naburige landen voor de belangrijkste type bouwmateriaal met gemiddelde ± standaard deviatie en de min max waarden.

I (-)	**Nederland - 2026**			**Nederland - 2006**			**België**			**Duitsland**		
Beton	0,21	±	0,04	0,22	±	0,04	0,16			0,28		
	0,10	-	0,40	0,11	-	0,35	0,07	-	0,29	0,14	-	0,51
*Gips**	0,07	±	0,09	0,04	±	0,02	0,28	±	0,17	0,07		
	0,00	-	0,38	0,01	-	0,08	0,04	-	0,47	0,03	-	0,11
Kalkzandsteen	0,19	±	0,04	0,16	±	0,03				0,11		
	0,10	-	0,32	0,05	-	0,24				0,04	-	0,14
Cellenbeton	0,12	±	0,01	0,13	±	0,02	0,09			0,18		
	0,09	-	0,15	0,09	-	0,18	0,07	-	0,10	0,08	-	0,30
Baksteen	0,49	±	0,06	0,51	±	0,04	0,55	±	0,28	0,65		
	0,38	-	0,68	0,37	-	0,61	0,40	-	0,69	0,47	-	1,10

* In tegenstelling tot 2006 bevatten de in 2026 onderzochte producten alle gipssoorten.

Uit het vergelijk komt naar voren dat de verschillen met de vorige Nederlandse survey in 2006 (De Jong et al., 2006), met inachtneming van de bijbehorende standaarddeviatie, statistisch niet significant zijn. Voor het product gips dient een opmerking te worden gemaakt. In 2006 betrof dit een beperkte selectie, terwijl in deze survey alle op de markt toegepaste gipssoorten zijn onderzocht, waaronder natuurlijk gips, gips afkomstig uit de rookontzwaveling bij energie en verbrandingsinstallaties, en gips afkomstig uit de fosfaatproductie. De verschillen tussen de typen bouwmaterialen onderling zijn conform verwachting en het gevolg van de basisgrondstoffen die voor elk van de bouwmaterialen worden gehanteerd.

Een vergelijk met de resultaten uit omringende landen laat zien dat de aanwezigheid van natuurlijke radioactiviteit in alle bouwmaterialen vergelijkbaar is met de in onze buurlanden toegepaste bouwmaterialen. Het betreft een vergelijking met de resultaten afkomstig van de Belgische nucleaire autoriteit FANC (FANC, 2024) en de Duitse nucleaire autoriteit BfS (Gehrcke et al., 2012).

3.4 Samengestelde materialen

Op basis van de in Hoofdstuk 3.2.1 getoonde activiteiten en de betonsamenstelling van de 6 meest gangbare betonsoorten (Bijlage A) is een gewogen gemiddelde bepaald voor de massieke activiteit in het beton zoals toegepast in de Nederlandse woningbouw. De gehanteerde weegfactoren voor elk van de betonsoorten zijn gebaseerd op informatie afkomstig van het Betonhuis.

De resultaten van deze rekenkundige exercitie zijn weergegeven in Tabel 5, en vergeleken met de experimentele resultaten uit deze survey. Als maat voor het verschil in de verkregen resultaten is de z-score gebruikt, welke als volgt is gedefinieerd:

$$z = \frac{\bar{X}_e - \bar{X}_r}{\sqrt{\sigma_{\bar{e}}^2 + \sigma_{\bar{r}}^2}}, \quad (2)$$

$\bar{X}_e$ en $\bar{X}_r$ zijn de gemiddelden voor de experimentele (e) en de rekenkundige (r) resultaten. De z-score beschrijft het verschil in massieke activiteit uitgedrukt in eenheden van de gezamenlijke standaarddeviatie. Een z-score met een waarde hoger dan 3 geldt als statistisch significant. De genoemde standaarddeviatie $\sigma_{\bar{x}}$ betreft de standard error of the mean (SEM) welke is gebaseerd op de standaarddeviatie uit Tabel 2 en Tabel 3. De SEM is gedefinieerd als $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ waarbij n het aantal onderzochte monsters is. Alle z-scores liggen onder de waarde van 3; waarbij de hoogste z-score is gevonden voor de massieke activiteit van ^{40}K in betonmortel. Dit betekent dus dat met gebruikmaking van de individuele meetwaarden van de gebruikte grondstoffen een betrouwbare schatting kan worden gemaakt van de activiteit van de betreffende betonsoort.

Tabel 5 Vergelijking van de experimenteel en rekenkundig bepaalde massieke activiteiten (Bq kg^{-1}) voor prefab beton en betonmortel. De experimentele waarden zijn afkomstig uit Tabel 3, en de rekenkundige waarden zijn verkregen uit Tabel 2 en Bijlage A met daarin de samenstelling van de meest gangbare betonsoorten. De resultaten zijn uitgedrukt in een gemiddelde met SEM.

2026 Resultaten	**^{226}Ra (Bq kg^{-1})**			**^{228}Ra (Bq kg^{-1})**			**^{228}Th (Bq kg^{-1})**			**^{40}K (Bq kg^{-1})**		
Prefab Beton												
Experimenteel	16,2	±	0,9	11,7	±	0,8	11,8	±	0,7	153	±	7
Rekenkundig	14,0	±	0,5	11,6	±	0,3	12,0	±	0,3	173	±	6
z-score	2,1			0,1			0,2			2,1		
Betonmortel												
Experimenteel	22,6	±	1,2	16,3	±	0,7	17,0	±	0,7	263	±	24
Rekenkundig	20,3	±	0,4	17,3	±	0,4	17,7	±	0,4	192	±	8
z-score	1,8			1,2			0,9			2,8		

4 Gammastraling in woningen

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de dosisberekeningen gepresenteerd, tezamen met een beschrijving van de uitgangspunten, de beschouwde woningtypen en de geselecteerde scenario's voor de berekening. Middels de verschillende scenario's kan de invloed van bouwkundige keuzes en materiaaltoepassingen systematisch worden vergeleken en wordt een representatief beeld gegeven van de externe dosis door bouwmaterialen binnen het Nederlandse woningbestand en de mogelijke toekomstige ontwikkelingen.

4.1 Werkwijze en beschouwde woningtypen

4.1.1 Rekenmethodiek

De berekening van de externe blootstelling binnenshuis door bouwmaterialen is gebaseerd op de methodiek van De Jong (2010), die voortbouwt op het Monte-Carlo-gebaseerde werk van Koblinger (1978) voor externe straling in woningen. Uitgangspunt van de rekenmethodiek is een gestandaardiseerde woninggeometrie met afmetingen van $5 \times 4\,m^2$ en een hoogte van 2,8 m, opgebouwd uit zes constructie-elementen (vloer, plafond en vier wanden) van 20 cm dik beton, zonder ramen, deuren of interne scheidingswanden. Hierbij wordt aangenomen dat de persoon zich in het midden van de kamer begeeft. Voor deze referentieconfiguratie zijn specifieke geabsorbeerde dosistempi in lucht bepaald, uitgedrukt per radionuclide-activiteit concentratie in het bouwmateriaal. Afwijkingen van deze standaardsituatie worden verwerkt via een systeem van correctiefactoren, waarmee rekening wordt gehouden met materiaaleigenschappen, afmetingen, constructieve opbouw en gebouwcontext. Deze aanpak vormt een verfijning van de in EN 17637:2022 (CEN, 2022) geharmoniseerde methodiek voor de dosisbepaling van bouwmaterialen in woningen.

De totale dosis in een woning wordt berekend door de bijdragen van alle constructie-elementen te sommeren en te corrigeren voor onder meer constructiedikte en -dichtheid, elementafmetingen, verzwakking door binnenbladen, aanwezigheid van ramen en deuren, afscherming door niet-dragende binnenwanden en bijdragen van aangrenzende woningen of bouwlagen.

Voor de bepaling van de effectieve jaardosis wordt de aanname gedaan dat een persoon 7000 uur per jaar in de woonkamer verblijft, wat neerkomt op 80 % van de tijd. Deze aanname correspondeert met de aanbevelingen van UNSCEAR (2000), en is dezelfde aanname die door De Jong is gebruikt in 2010.

Na bepaling van de effectieve jaardosis t.g.v. bouwmaterialen, wordt een correctie uitgevoerd voor de door de bouwmaterialen geboden afscherming tegen terrestrische en kosmische straling. De resulterende dosis betreft de gammastraling t.g.v. bouwmaterialen bovenop de externe stralingsdosis buitenshuis.

Voor deze resulterende dosis geldt een referentieniveau van 1 mSv per jaar. Een gedetailleerde beschrijving van de rekenmethodiek is te vinden in Bijlage B.

4.1.2 Beschouwde woningen

Voor de analyse zijn vijf representatieve woningtypen geselecteerd. Deze woningtypen weerspiegelen een groot deel van de bestaande en toekomstige woningvoorraad en verschillen onderling in bouwvorm, schaal en materiaalgebruik. Hierdoor kunnen verschillen in stralingsbelasting tussen woningtypen inzichtelijk worden gemaakt.

a. **Seniorenwoning** – Een gelijkvloerse woning met een compact vloeroppervlak, primair gericht op bewoning door één of twee personen. Door de beperkte omvang en eenvoudige bouwopzet vormt dit woningtype een relevante casus voor vergelijking.
b. **Rijtjeswoning** – Een grondgebonden woning in gesloten bebouwing, met aangrenzende woningen aan beide zijden. Dit woningtype kent relatief weinig buitengevels en een typische bouwkundige opbouw binnen de Nederlandse bouwpraktijk.
c. **Geschakelde woning** – Een grondgebonden woning die aan één zijde is verbonden met een andere woning. Dit woningtype vormt een tussenvorm tussen rijtjeswoningen en vrijstaande woningen, met een gemiddeld aantal buitengevels.
d. **Vrijstaande woning** – Een woning zonder gedeelde bouwmuren, met een relatief groot geveloppervlak en bouwvolume. Door het grotere aandeel buitenconstructies kan dit woningtype een afwijkend stralingsprofiel vertonen.
e. **Appartement** – Een woning binnen een meerlaagse gebouwstructuur. Hierbij wordt rekening gehouden met boven- en onderliggende woningen en gedeelde constructies, wat invloed kan hebben op de verdeling van gammastraling.

Verdere details ten aanzien van de gehanteerde plattegronden en de gekozen modelparameters zijn te vinden in Bijlage C.

4.2 Scenario – Bestaande situatie

Dit scenario fungeert als referentiescenario en beschrijft de huidige gangbare bouwpraktijk. De woningen worden uitgevoerd volgens conventionele ontwerp- en uitvoeringsprincipes die representatief zijn voor de bestaande situatie in de woningbouw.

4.2.1 Beschrijving van het referentiescenario

In het referentiescenario worden alle vijf de woningtypen beschouwd, uitgevoerd met standaard materialen en constructiemethoden. De vloer en wanden bestaan hoofdzakelijk uit minerale

bouwmaterialen, zoals beton, baksteen en cementgebonden afwerkingen. Deze bouwmaterialen zijn toegepast overeenkomstig de in Nederland gebruikelijke bouwmethoden, met een betonnen vloer en plafond en muren die zijn opgebouwd uit kalkzandsteen en baksteen. De laatstgenoemde is, zoals gebruikelijk, aan de buitenzijde geplaatst. Verdere details over de gekozen samenstelling van de woning zijn opgenomen in Bijlage C.1. De raam-gevelverhouding sluit aan bij gangbare ontwerprichtlijnen voor lichttoetreding en ventilatie. Dit scenario vormt een beoordeling van de gammastralingsdosis binnenshuis welke zoveel mogelijk representatief is voor de huidige Nederlandse nieuwbouw. De gegevens voor de berekeningen zijn gebaseerd op bouwplattegronden die zijn beschikbaar gesteld door DevelopInc (https://developinc.nl/). De woningen zijn indicatief voor de typische afmetingen en indeling van nieuwbouwwoningen in Nederland.

4.2.2 Berekening van de gammastralingsdosis

Voor het berekenen van de verschillende effectieve jaardosissen is gekeken naar de woonkamers van 15 verschillende woningen, vervolgens zijn deze woningen per categorie ingedeeld. Er is rekening gehouden met woningen die zich in het midden van een woningblok bevinden en woningen die aan de buitenzijde zijn gevestigd. Het onderscheid omvat de invloed van de aangrenzende buren en de materiaalkeuze van de muren.

De standaarddeviatie in de jaardosis is gebaseerd op de uit de analyses verkregen variaties in massieke activiteit voor elke grondstof en bouwmateriaal zoals getoond in Tabel 2 en Tabel 3. Hierbij zijn de algemene principes voor onzekerheidsvoortplanting toegepast. De standaarddeviatie voor elk van de verkregen dosis is weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6 Overzicht van de verwachte jaardosis t.g.v. externe straling per type woning voor het referentiescenario.

E (mSv jr⁻¹)	**Situatie 2026**			**Situatie 2010 (De Jong, 2010)**		
Seniorenwoning m[a]	0,22	±	0,01			
Seniorenwoning e[a]	0,21	±	0,01			
Rijtjeswoning m[a]	0,23	±	0,02			
Rijtjeswoning e[a]	0,22	±	0,01			
2-onder-1 kap	0,23	±	0,02			
Vrijstaande woning	0,21	±	0,01			
Appartement m[a]	0,27	±	0,02			
Appartement e[a]	0,27	±	0,02			
NL_{NB}[b]	0,25	±	0,02	0,25	±	0,03
NL_{NB_AGSUB}[c]	0,00	±	0,02			

[a] De letter *m* en *e* geven aan of de woning zich in het midden of aan het einde van een rij bevind.
[b] De bijdrage van gammastraling uit bouwmaterialen aan de stralingsbelasting voor een Nederlandse nieuwbouwwoning (NL_{NB}) is berekend op basis van een gewogen gemiddelde van de verschillende type woningen.
[c] De bijdrage van gammastraling uit bouwmaterialen aan de stralingsbelasting bovenop de achtergrond (NL_{NB_AGSUB}) is berekend middels een subtractie van 0,25 mSv.

Uit de resultaten komt naar voren dat de stralingsbelasting van bouwmaterialen tussen de 0,21 en 0,27 mSv bedraagt voor de verschillende woningtypes, uitgaande van een voor nieuwbouwwoningen gangbare bouwconstructie. Voor de bepaling van een gemiddelde stralingsbelasting voor het gehele bestand van nieuwbouwwoningen is een gewogen gemiddelde bepaald (NL_{NB}). De weegfactoren hiervoor zijn gebaseerd op de voor 2026 verwachte aantallen nieuwbouwwoningen per woningtype (CBS, 2026). Voor de rijtjeswoning en het appartement zijn de woning in het midden (*m*) en aan het einde van de rij (*e*) gelijk gewogen, waarmee impliciet is uitgegaan van een rij van vier woningen. De seniorenwoning komt niet voor in de CBS statistieken en is voor de bepaling van het gemiddelde buiten beschouwing gelaten.

Een vergelijking van de gemiddelde jaardosis bepaald in deze studie met de in 2010 bepaalde jaardosis en inachtneming van de statistische variatie laat zien dat de dosis vergelijkbaar is met de resultaten uit 2010.

De stralingsbelasting is de bijdrage van de bouwmaterialen. Om te komen tot een stralingsbelasting van de bouwmaterialen bovenop de achtergrond (NL_{NB_AGSUB}) dient een correctie te worden uitgevoerd voor de door de bouwmaterialen geboden afscherming tegen terrestrische en kosmische straling afkomstig buitenshuis. Hiervoor is een substractie uitgevoerd van 0,25 mSv zoals beschreven in het rapport van Smetsers en Bekhuis (2021), waarmee de stralingsbelasting van de bouwmaterialen bovenop de achtergrond (NL_{NB_AGSUB}) uitkomt op 0 mSv.

4.3 Scenario – Klimaat adaptief woningontwerp

Het hier beschreven scenario onderzoekt de invloed van klimaat adaptieve bouwmaatregelen op de gammastralingsdosis binnenshuis. De focus ligt op bouwkundige keuzes die gericht zijn op energie-efficiëntie en robuustheid, en die tegelijkertijd leiden tot een ander gebruik van de minerale bouwmaterialen.

4.3.1 Beschrijving van het klimaat adaptieve scenario

(a) Toepassing van hout- of staalskeletbouw - In dit scenario wordt de hoofdconstructie uitgevoerd in hout- of staalskeletbouw. Deze bouwsystemen kenmerken zich door een lager materiaalgewicht en een verminderd gebruik van minerale materialen, wat kan leiden tot een lagere bijdrage van natuurlijk voorkomende radionucliden aan de gammastraling binnenshuis. In dit onderzoek is ervoor gekozen om de binnenmuur te vervangen door een gipsachtig plaatmateriaal. Daarnaast is er een betonnen vloer geplaatst en het plafond is opgebouwd uit een houtenbalkvloer voorzien van een cement of anhydriet toplaag voor de daarboven gelegen vloer.

(b) Toepassing van een lage raam-gevelverhouding – In dit scenario is het raamoppervlak met 15% verlaagd en is de muurdikte met 10% verhoogd. Deze verhoudingen zijn gebaseerd op de trend van klimaat adaptief bouwen die zijn beschreven in H2.3.

4.3.2 Berekening van de gammastralingsdosis

De dosisberekening houdt rekening met de aangepaste constructieve opbouw en de gewijzigde materiaalverdeling. De berekende doses worden vergeleken met het referentiescenario om het effect van een klimaat adaptief woningontwerp op de stralingsbelasting binnenshuis zichtbaar te maken.

Tabel 7 Overzicht van de verwachte jaardosis t.g.v. externe straling per type woning voor het klimaat adaptieve scenario.

E (mSv jr⁻¹)	**Bestaande situatie**			**Houtskeletbouw[c]**			**Lage raam-gevel Verhouding**		
Seniorenwoning m[a]	0,22	±	0,01	0,18	±	0,02	0,22	±	0,02
Seniorenwoning e[a]	0,21	±	0,01	0,18	±	0,01	0,22	±	0,01
Rijtjeswoning m[a]	0,23	±	0,02	0,21	±	0,02	0,23	±	0,02
Rijtjeswoning e[a]	0,22	±	0,01	0,20	±	0,02	0,22	±	0,02
2-onder-1 kap	0,23	±	0,02	0,21	±	0,02	0,23	±	0,02
Vrijstaande woning	0,21	±	0,01	0,19	±	0,01	0,22	±	0,01
Appartement m[a]	0,27	±	0,02				0,27	±	0,02
Appartement e[a]	0,27	±	0,02				0,28	±	0,02
NL_{NB}[b]	0,25	±	0,02				0,25	±	0,02

[a] De letter *m* en *e* geven aan of de woning zich in het midden of aan het einde van een rij bevind.
[b] De bijdrage van gammastraling uit bouwmaterialen aan de stralingsbelasting voor een Nederlandse nieuwbouwwoning (NL_{NB}) is berekend op basis van een gewogen gemiddelde van de verschillende type woningen.
[c] Gegeven de beperkte draagcapaciteit van houtskeletbouw is in dit scenario het appartement niet beschouwd.

Uit de resultaten van Tabel 7 blijkt dat de berekende effectieve jaardosis van een huis met een houten skelet lager is dan die voor de bestaande situatie. Dit komt voornamelijk door het ontbreken van een betonnen plafond. Echter, er dient wel te worden benadrukt dat de afschermende werking van de woning tegen de terrestrische en kosmische straling buitenshuis ook lager zal zijn als gevolg van het gebruik van relatief lichte bouwmaterialen. De reductie in afschermende werking bij houtskeletbouw is in deze studie niet nader onderzocht, wel kan worden gesteld dat het verschil in stralingsbelasting bovenop de achtergrond tussen beide bouwstijlen kleiner zal zijn. Gegeven de beperkte draagcapaciteit van houtskeletbouw is in dit scenario het appartement niet beschouwd, en zodoende is er ook geen gemiddelde waarde voor de Nederlandse nieuwbouwwoning bepaald.

Een verandering in de raam-gevel verhouding en het gebruik van dikkere muren resulteert in een niet noemenswaardige toename in effectieve jaardosis. De keuze voor deze bouwstijl zal een gunstige invloed hebben of de afschermende werking van de straling buitenshuis. Echter, ook hier is dit effect niet nader beschouwd.

4.4 Scenario – Gebruik van innovatieve en circulaire bouwmaterialen

Dit scenario richt zich op de toepassing van innovatieve en circulaire bouwmaterialen die bijdragen aan verduurzaming van de bouwsector. Hierbij wordt specifiek gekeken naar de mogelijke invloed van deze materialen op de gammastralingsdosis binnenshuis.

4.4.1 Beschrijving van het materiaalinnovatie scenario

(a) Toepassing van gerecyclede granulaten - In dit scenario worden gerecyclede granulaten ingezet als vervanging van primaire toeslagmaterialen. De herkomst en samenstelling van deze materialen kunnen variëren, wat relevante gevolgen kan hebben voor de natuurlijke radioactiviteit van de toegepaste bouwproducten. In dit onderzoek is ervoor gekozen om het materiaal van alle binnen- en buitenmuren gelijk te houden aan het referentiescenario. Daarnaast is het materiaal waar de plafonds en vloeren van zijn gemaakt vervangen door beton dat voor 30 % uit granulaat bestaat. De samenstelling van dit beton is beschreven in Tabel 10 van Bijlage A.

(b) Toepassing van industriële reststoffen en alternatieve cementsoorten – In dit scenario is al het beton uitgevoerd als innovatief beton. Hierbij zijn alternatieve bindmiddelen gebruikt, zoals alkalisch geactiveerde bindmiddelen (geopolymeren). Daarnaast is ook een klimaatneutrale gevelsteen toegepast en zijn zand en grind deels vervangen door innovatieve gerecyclede granulaten.

4.4.2 Berekening van de gammastralingsdosis

In dit scenario wordt de gammastralingsdosis binnenshuis berekend op basis van de specifieke samenstelling en toepassing van de innovatieve bouwmaterialen. De resultaten zijn vergeleken met het referentiescenario om de effecten van circulaire materiaalkeuzes inzichtelijk te maken.

De resultaten uit Tabel 8 laten zien dat bij grondgebonden woningen – alle woningtypen behalve appartementen – de effectieve jaardosis toeneemt. Dit komt doordat de gebruikte betonsoorten een hogere massieke activiteit hebben dan het prefab beton dat in het referentiescenario wordt toegepast. Voor appartementen ligt dit anders. Daar wordt betonmortel gebruikt, en de betonsoorten met 30% gerecyclede granulaten hebben juist een iets lagere massieke activiteit dan in het referentiescenario.

Wanneer een gemiddelde wordt berekend voor de Nederlandse nieuwbouwwoning, waarbij appartementen een wegingsfactor van bijna 50% hebben, blijkt de totale afwijking ten opzichte van de huidige situatie zeer beperkt. De toepassing van innovatief beton met industriële reststoffen en alternatieve cementsoorten leidt tot een marginale toename. Opvallender is echter de grotere spreiding

van 0,04 mSv. Dit geeft aan dat deze innovaties zowel tot een verhoging als tot een verlaging van de massieke activiteit kunnen leiden.

Tabel 8 Overzicht van de verwachte jaardosis t.g.v. externe straling per type woning voor het materiaalinnovatie scenario.

E (mSv jr⁻¹)	**Bestaande situatie**			**Gerecyclede granulaten**			**Reststoffen & alt. cementen**		
Seniorenwoning m[a]	0,22	±	0,01	0,25	±	0,01	0,25	±	0,04
Seniorenwoning e[a]	0,21	±	0,01	0,24	±	0,01	0,23	±	0,04
Rijtjeswoning m[a]	0,23	±	0,02	0,26	±	0,01	0,24	±	0,04
Rijtjeswoning e[a]	0,22	±	0,01	0,25	±	0,01	0,22	±	0,03
2-onder-1 kap	0,23	±	0,02	0,26	±	0,01	0,23	±	0,03
Vrijstaande woning	0,21	±	0,01	0,24	±	0,01	0,23	±	0,04
Appartement m[a]	0,27	±	0,02	0,24	±	0,01	0,25	±	0,04
Appartement e[a]	0,27	±	0,02	0,24	±	0,01	0,25	±	0,04
NL_{NB}[b]	0,25	±	0,02	0,25	±	0,01	0,24	±	0,04

[a] De letter *m* en *e* geven aan of de woning zich in het midden of aan het einde van een rij bevind.

[b] De bijdrage van gammastraling uit bouwmaterialen aan de stralingsbelasting voor een Nederlandse nieuwbouwwoning (NL_{NB}) is berekend op basis van een gewogen gemiddelde van de verschillende type woningen.

5 Conclusie

In dit onderzoek is een actueel en representatief beeld verkregen van de natuurlijke radioactiviteit in bouwmaterialen en de daaruit voortvloeiende gammastralingsdosis voor de Nederlandse bevolking t.g.v. wonen. De meetcampagne omvatte een brede selectie van zowel traditionele als innovatieve bouwmaterialen en grondstoffen, waarmee recht wordt gedaan aan de recente ontwikkelingen in de bouwsector, zoals verduurzaming, circulariteit en het gebruik van alternatieve materialen.

De resultaten tonen aan dat de natuurlijke radioactiviteit in de onderzochte bouwmaterialen overwegend laag is en in lijn ligt met eerdere nationale en internationale studies. Natuurlijke grondstoffen zoals zand en grind bevatten activiteiten die kenmerkend zijn voor de Nederlandse bodem. Materialen zoals cement, industriële reststoffen en keramische producten laten hogere waarden zien, wat verklaarbaar is vanuit hun samenstelling en herkomst. Desondanks blijven alle gemeten waarden ruim onder de geldende vrijstellings- en referentieniveaus. Dit geldt ook voor het aangetroffen ^{137}Cs. Ook innovatieve en circulaire grondstoffen vertonen geen afwijkend gedrag dat aanleiding geeft tot zorg, ondanks de grotere variabiliteit in samenstelling.

Voor alle onderzochte bouwmaterialen is de indexwaarde I berekend als maat voor de bijdrage aan gammastraling binnenshuis. Deze index blijft in alle gevallen onder de grenswaarde van 1, wat bevestigt dat de materialen voldoen aan de eisen uit de ANVS-verordening en de Europese richtlijn. Beton, gips, kalkzandsteen en cellenbeton scoren laag, terwijl keramische producten hogere, maar nog steeds acceptabele, waarden laten zien. Dit betekent dat geen enkel bouwmateriaal uit de studie leidt tot een overschrijding van het referentieniveau voor externe blootstelling.

Uit berekeningen voor representatieve woningtypen blijkt dat de gemiddelde jaarlijkse effectieve dosis als gevolg van bouwmaterialen circa 0,25 mSv bedraagt, afhankelijk van het woningtype. Voor toetsing aan het geldende referentieniveau dient deze dosis te worden gecorrigeerd voor de afschermende werking van bouwmaterialen tegen terrestrische en kosmische straling van buitenaf. Na deze correctie blijkt de netto bijdrage van gammastraling afkomstig van bouwmaterialen aan de effectieve dosis, bovenop de natuurlijke achtergrondstraling, circa 0 mSv te bedragen. Verschillen tussen woningtypen worden voornamelijk verklaard door variaties in materiaalgebruik en bouwkundige configuraties, zoals het aandeel beton en het aantal aangrenzende constructies.

Scenarioanalyses tonen aan dat veranderingen in bouwmethoden en materiaalgebruik een meetbaar, maar beperkt effect hebben op de stralingsbelasting, met waarden die variëren tussen 0,17 en 0,29 mSv. Klimaatadaptieve maatregelen, zoals houtskeletbouw, kunnen leiden tot een lichte afname van de dosis, terwijl een lagere raam-gevelverhouding nauwelijks invloed heeft. Het gebruik van gerecyclede granulaten alsmede het toepassen van alternatieve cementsoorten en industriële reststoffen resulteert niet in een noemenswaardige toename van de dosis. Wel laat het gebruik van beton met alternatieve cementsoorten

en industriële reststoffen een grotere spreiding zien, wat er op duidt dat deze innovaties zowel tot verhoging als tot verlaging van de dosis kunnen leiden. In alle gevallen blijven de verschillen beperkt en ruim binnen veilige grenzen.

Op basis van deze studie kan worden geconcludeerd dat de natuurlijke radioactiviteit in bouwmaterialen in Nederland, zowel in de huidige situatie als in toekomstscenario's met innovatieve en circulaire materialen, geen radiologisch risico vormt voor de bevolking.

Lijst met Tabellen en figuren.

Lijst van tabellen

TABEL 1 OVERZICHT VAN GESELECTEERDE MATERIAALMONSTERS UITGESPLITST NAAR PRODUCTGROEP EN -MATERIAAL MET AANTALLEN ONDERZOCHTE MONSTERS..... 14
TABEL 2 OVERZICHT VAN DE ANALYSERESULTATEN (BQ KG^{-1}) VAN DE ONDERZOCHTE MONSTERS PER TYPE GRONDSTOF MET GEMIDDELDE ± STANDAARD DEVIATIE EN DE MIN MAX WAARDEN..... 17
TABEL 3 OVERZICHT VAN DE ANALYSERESULTATEN (BQ KG^{-1}) EN DE INDEX I VAN DE ONDERZOCHTE MONSTERS PER TYPE BOUWMATERIAAL MET GEMIDDELDE ± STANDAARD DEVIATIE EN DE MIN MAX WAARDEN..... 19
TABEL 4 OVERZICHT VAN DE SURVEY RESULTATEN UITGEDRUKT IN DE INDEX WAARDE I (-) VERGELEKEN MET EERDERE GEGEVENS UIT NEDERLAND EN NABURIGE LANDEN VOOR DE BELANGRIJKSTE TYPE BOUWMATERIAAL MET GEMIDDELDE ± STANDAARD DEVIATIE EN DE MIN MAX WAARDEN. 20
TABEL 5 VERGELIJKING VAN DE EXPERIMENTEEL EN REKENKUNDIG BEPAALDE MASSIEKE ACTIVITEITEN (BQ KG^{-1}) VOOR PREFAB BETON EN BETONMORTEL. DE EXPERIMENTELE WAARDEN ZIJN AFKOMSTIG UIT TABEL 3, EN DE REKENKUNDIGE WAARDEN ZIJN VERKREGEN UIT TABEL 2 EN BIJLAGE A MET DAARIN DE SAMENSTELLING VAN DE MEEST GANGBARE BETONSOORTEN. DE RESULTATEN ZIJN UITGEDRUKT IN EEN GEMIDDELDE MET SEM..... 21
TABEL 6 OVERZICHT VAN DE VERWACHTE JAARDOSIS T.G.V. EXTERNE STRALING PER TYPE WONING VOOR HET REFERENTIESCENARIO. 24
TABEL 7 OVERZICHT VAN DE VERWACHTE JAARDOSIS T.G.V. EXTERNE STRALING PER TYPE WONING VOOR HET KLIMAAT ADAPTIEVE SCENARIO. 26
TABEL 8 OVERZICHT VAN DE VERWACHTE JAARDOSIS T.G.V. EXTERNE STRALING PER TYPE WONING VOOR HET MATERIAALINNOVATIE SCENARIO..... 28
TABEL 9 ANALYSE RESULTATEN VAN DE BOUWMATERIALEN EN GRONDSTOFFEN..... 35
TABEL 10 GLOBALE BETONSAMENSTELLINGEN VAN GANGBARE BETONSOORTEN ZOALS TOEGEPAST IN DE UTILITEITS- EN WONINGBOUW, UITGEDRUKT IN KG M^{-3}..... 37
TABEL 11 ^{222}RN EXHALATIEFACTOR VOOR VERSCHILLENDE BOUWMATERIALEN..... 39
TABEL 12 OVERZICHT VAN DE REGRESSIECOËFFICIËNTEN DIE WORDEN GEBRUIKT BIJ DE BEPALING VAN DE CORRECTIEFACTOR F_{ADJAC} VOOR VERSCHILLENDE WONINGTYPEN, TER BEREKENING VAN DE BIJDRAGE AAN HET GEABSORBEERDE DOSISTEMPO AFKOMSTIG VAN BOUWMATERIALEN IN AANGRENZENDE RUIMTES. DE X-COÖRDINAAT IS DE GEMIDDELDE OPPERVLAKTEDICHTHEID VAN HET PLAFOND EN DE DRAGENDE BINNENWANDEN. 41
TABEL 13 MATERIAALKEUZE EN AFMETINGEN VAN DE RIJTJESWONING MIDDEN SCENARIO: HUIDIGE SITUATIE NIEUWBOUW..... 42
TABEL 14 MATERIAALKEUZE EN AFMETINGEN VAN DE RIJTJESWONING MIDDEN SCENARIO: KLIMAAT ADAPTIEF. 42

TABEL 15 MATERIAALKEUZE EN AFMETINGEN VAN DE RIJTJESWONING MIDDEN SCENARIO: SCENARIO LAGERE GEVEL EN RAAM VERHOUDING. 43
TABEL 16 MATERIAALKEUZE EN AFMETINGEN VAN DE RIJTJESWONING MIDDEN SCENARIO: GERECYCLEDE GRANULATEN. 43
TABEL 17 MATERIAALKEUZE EN AFMETINGEN VAN DE RIJTJESWONING MIDDEN SCENARIO: RESTSTOFFEN & ALTERNATIEVE CEMENTEN. 44
TABEL 18 DOSISBEREKENING HUIDIGE SITUATIE NIEUWBOUW VOOR DE MIDDELSTE RIJTJESWONING. 45
TABEL 19 DOSISBEREKENING VOOR SCENARIO KLIMAAT ADAPTIEF VOOR DE MIDDELSTE RIJTJESWONING. 46
TABEL 20 DOSISBEREKENING VOOR SCENARIO LAGERE GEVEL EN RAAM VERHOUDING VOOR DE MIDDELSTE RIJTJESWONING. 47
TABEL 21 DOSISBEREKENING VOOR SCENARIO GERECYCLEDE GRANULATEN VOOR DE MIDDELSTE RIJTJESWONING. 48
TABEL 22 DOSISBEREKENING VOOR SCENARIO RESTSTOFFEN EN ALTERNATIEVE CEMENTEN DE MIDDELSTE RIJTJESWONING. 49
TABEL 23 GEHANTEERDE BANDBREEDTE VOOR DE WONINGGEOMETRIE EN SCHEIDINGSWANDOPPERVLAK. 50

Lijst van figuren

FIGUUR 1 WEERGAVE VAN DE AANTALLEN NIEUWBOUWWONINGEN DIE DE AFGELOPEN 5 JAAR ZIJN EN WORDEN GEBOUWD. ER IS ONDERSCHEID GEMAAKT PER TYPE WONING (CBS, 2026). 11
FIGUUR 2 PLATTEGROND SENIORENWONING. 51
FIGUUR 3 PLATTEGROND RIJTJESWONING. 52
FIGUUR 4 PLATTEGROND TWEE ONDER ÉÉN KAP WONING. 53
FIGUUR 5 PLATTEGROND VRIJSTAANDE WONING. 54
FIGUUR 6 PLATTEGROND APPARTEMENTENCOMPLEX. 55

Referenties

Ackers J.G. (1985a) Concentratie van radionucliden in bouwmaterialen en grondsoorten. Rapport RD-E/8505-246, TNO.

ANVS (2018) Verordening van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming van 9 januari 2018, nr. ANVS-2018/137, houdende nadere regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming).

ANVS (2017) Besluit van 23 oktober 2017, houdende vaststelling van regels ter bescherming van personen tegen de gevaren van blootstelling aan ioniserende straling (Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming)

BZK (2025) Nationale aanpak Klimaatadaptatie gebouwde omgeving Fase 1, BZK rapport 07-04-2025.

CBS (2026) Steeds meer (en kleinere) appartementen. Centraal Beheer voor de Statistiek. Geraadpleegd op 30 april 2026, van https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2026/17/steeds-meer--en-kleinere---appartementen

CEN (2022) EN 17637: Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Dose assessment of emitted gamma radiation.

CEN (2023) EN 17216: Construction products - Assessment of release of dangerous substances - Determination of activity concentrations of radium-226, thorium-232 and potassium-40 in construction products using semiconductor gamma-ray spectrometry.

De Jong, P., Van Dijk, W., Van der Graaf, E.R., and De Groot, T.J.H. (2006) National survey on the natural radioactivity and 222Rn exhalation rate of building materials in the Netherlands. Health Physics. 91:200-210.

De Jong (2010) Exposure to natural radioactivity in the Netherlands: the impact of building materials. Rijksuniversiteit Groningen, Groningen, Nederland.

EC (2013) Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, Official Journal of the European Union, L 13, 17 January 2014, pp. 1–73.

FANC (2025) Informatiedossier radiologisch toezicht op het grondgebied en de effluentie van nucleaire inrichtingen Klasse I en Klasse IIA 2024, Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle (FANC), Juni 2025.

Gehrcke, K., Hoffmann, B., Schkade, U., Schmidt, V., Wichterey, K. (2012) Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Strahlenexposition Fachbereich Strahlenschutz und Umwelt, Bundesambt für Strahlenschutz (BfS), BfS-SW-14/12, Salzgitter, November 2012.

ING. (z.j.). Facts & figures building & construction – Utiliteitsbouw. Geraadpleegd op 30 april 2026, van https://www.ing.nl/zakelijk/sector/building-and-construction/facts--figures-building--construction-utiliteitsbouw

Jonker, H., Bakker, J., Zweers, N., Klösters, M., Kooger, R. & Van Diemen, J. (2024). Investeringsbeslissingen Utiliteitsbouw. Delft: TNO.

Smetsers, R.C.G.M., Bekhuis, P.D.B.M. (2021) Blootstelling aan natuurlijke bronnen van ioniserende straling in Nederland, RIVM-rapport 2021-0032.

UNSCEAR (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Annex B: Exposures from natural radiation sources, United Nations, New York, 2000.

VRO (2025). Staat van de Volkshuisvesting 2025. Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening. Den Haag, December 2025.

Bijlage A Resultaten van de survey

Tabel 9 Analyse resultaten van de bouwmaterialen en grondstoffen.

2026 Resultaten	^{226}Ra (Bq kg^{-1})			^{228}Ra (Bq kg^{-1})			^{228}Th (Bq kg^{-1})			^{40}K (Bq kg^{-1})		
Prefab Beton	16	±	4	12	±	4	12	±	3	153	±	33
	12	-	25	5	-	17	6	-	17	90	-	194
Betonmortel	23	±	5	16	±	3	17	±	3	263	±	104
	17	-	35	13	-	24	14	-	25	156	-	482
Gypsum	8	±	8	8	±	18	7	±	15	21	±	11
	0	-	26	0	-	56	0	-	46	1	-	41
Kalkzandsteen	12	±	3	12	±	4	13	±	5	261	±	78
	7	-	17	5	-	19	6	-	24	147	-	426
Cellenbeton	7	±	2	6	±	1	7	±	1	171	±	22
	5	-	11	4	-	8	5	-	9	130	-	196
Baksteen	37	±	4	40	±	8	42	±	8	486	±	132
	29	-	42	30	-	54	32	-	54	375	-	800
Overige keramiek	52	±	11	54	±	9	55	±	10	672	±	143
	40	-	66	44	-	67	45	-	71	530	-	945
Anhydriet	6	±	1	3	±	3	3	±	3	134	±	30
	4	-	7	1	-	6	0	-	6	91	-	170
Innovatieve bouwmaterialen[1]	34	±	31	26	±	29	27	±	30	181	±	155
	9	-	93	3	-	82	3	-	85	5	-	469
CEM I	28	±	13	14	±	3	14	±	3	192	±	35
	12	-	49	10	-	17	9	-	18	128	-	230
CEM II	37	±	15	21	±	7	22	±	7	200	±	67
	12	-	54	10	-	32	10	-	32	130	-	321
CEM III	66	±	17	45	±	14	48	±	13	164	±	26
	35	-	87	24	-	67	26	-	68	114	-	211
Zand	7	±	2	7	±	2	7	±	2	187	±	69
	4	-	16	3	-	15	3	-	13	39	-	291

2026 Resultaten	^{226}Ra (Bq kg^{-1})			^{228}Ra (Bq kg^{-1})			^{228}Th (Bq kg^{-1})			^{40}K (Bq kg^{-1})		
Grind	10	±	4	10	±	4	11	±	4	157	±	79
	6	-	22	1	-	19	2	-	21	19	-	345
Graniet	51	±	4	34	±	2	35	±	1	880	±	88
	48	-	58	32	-	36	34	-	36	787	-	996
Recyclinggranulaten	18	±	6	16	±	6	16	±	6	211	±	86
	0	-	26	0	-	24	0	-	24	2	-	355
Innovatief recyclinggranulaten	21	±	4	16	±	2	16	±	2	185	±	26
	17	-	29	14	-	20	13	-	20	159	-	234
Grondstoffen Keramische Klei	40	±	7	45	±	9	45	±	9	518	±	106
	34	-	56	32	-	54	32	-	54	332	-	687
Additieven Grondstoffen Keramiek	17	±	14	21	±	18	21	±	18	387	±	377
	3	-	46	1	-	53	1	-	55	2	-	904
Zirkoon	3708	±	251	598	±	41	605	±	41	< 20[2]	±	
											-	
Innovatief cement	42	±	35	28	±	25	29	±	25	86	±	28
	18	-	112	13	-	77	15	-	78	41	-	117
Bodemas	21	±	1	18	±	1	19	±	1	207	±	0
	19	-	22	17	-	20	18	-	20	207	-	207
Staalslak	9	±	0	2	±	0	2	±	0	2	±	0
	8	-	9	2	-	2	2	-	2	2	-	2
Hoogovenslak	122	±	0	118	±	1	120	±	1	137	±	2
	122	-	123	117	-	119	118	-	121	134	-	140
Overige grondstoffen	47	±	31	20	±	18	10	±	12	169	±	223
	11	-	87	1	-	44	1	-	27	4	-	483
Biomassa-houdende assen	55	±	44	52	±	43	46	±	44	485	±	78
	23	-	130	18	-	124	17	-	122	367	-	584

[1] Het monster met de hoogste massieke activiteit voor ^{226}Ra en ^{232}Th is een niet-constructief beton welke geen voorziene toepassing in de woningbouw heeft.

[2] Resultaat onder de minimaal detecteerbare activiteit (MDA).

Tabel 10 Globale betonsamenstellingen van gangbare betonsoorten zoals toegepast in de utiliteits- en woningbouw, uitgedrukt in kg m^{-3}.

Grondstoffen	**Prefab beton**			**Betonmortel C30/37 met en zonder granulaat**		
	Aardvochtig	Traditioneel	ZVB	Beton Graniet	Betongranulaat 0%	Betongranulaat 30%
Weegfactor	*6*	*10*	*6*	*1*	*10*	*4*
Grind	1010	1000	910		1050	840
Graniet				1050		
Betongranulaat						210
Zand	990	920	820	850	850	850
CEM I		310				
CEM II/B-S	280					
CEM III/A			330			
CEM III/B				290	190	310
Vliegas	30	20	30	40	60	40
Kalksteenmeel			160			
Plastificeerder		1.5	3	1,5	1,5	1,5
Water						
Total	2310	2252	2253	2232	2152	2252

Bijlage B Methodiek voor dosisberekening

De methodiek voor de dosisberekeningen is gebaseerd op werkwijze zoals beschreven in studie van De Jong (2010). Deze werkwijze bouwt voort op de eerdere studies van Koblinger (1978) waarin de dosis van externe straling in woningen afkomstig van bouwmaterialen is bepaald middels een Monte Carlo code.

De standaardgeometrie zoals gedefinieerd door Koblinger (1978) wordt als uitgangspunt genomen voor ons rekenmodel. Deze geometrie heeft (inwendige) afmetingen van 5 × 4 m^2 en een hoogte van 2,8 m, waarbij elk van de zes constructie-elementen (dat wil zeggen vloer, wanden en plafond) is uitgevoerd in 20 cm dik beton en geen deuren of ramen aanwezig zijn. Voor deze configuratie zijn de specifieke geabsorbeerde dosistempi (eenheid: nGy h^{-1} per Bq kg^{-1}) bepaald. Deze gegevens hebben betrekking op het midden van de standaardgeometrie, vervalreeksen die verondersteld worden in seculier evenwicht te zijn, en een ruimte zonder interne scheidingswanden.

Correctiefactoren worden toegepast voor alternatieve situaties, waarmee het geabsorbeerde dosistempo in lucht in een specifieke woning $\dot{D}$ als volgt wordt berekend:

$$\dot{D} = \left\{\sum_{i=1}^{6}\left[F_{dose} \cdot F_{constr} \cdot F_{dimens} \cdot F_{leave} \cdot F_{do/wi}\right]_i\right\} F_{zoning} \cdot F_{adjac} \quad (3)$$

waarbij i de index is van een constructie-element van de beschouwde verdieping van de woning (vloer, plafond en elk van de vier wanden) en F_{dose} is de zogenoemde dosisfactor (nGy h^{-1}) waarin de specifieke geabsorbeerde dosistempi zijn verwerkt. De overige correctiefactoren zijn:

- F_{constr} : corrigeert voor de dikte en dichtheid van een constructie-element;
- F_{dimens} : houdt rekening met de afmetingen van een constructie-element;
- F_{leaf} : corrigeert voor de verzwakking van gammastraling door het binnenblad;
- $F_{do/wi}$: compenseert voor de aanwezigheid van deuren en ramen;
- F_{zoning} : schatting van afscherming door niet-dragende binnenwanden;
- F_{adjac} : correctiefactor voor een bijdrage van andere bouwlagen en/of aangrenzende woningen.

B.1 Dosisfactor

De activiteitconcentraties van de bouwmaterialen vormen de primaire factoren die het geabsorbeerde dosistempo in lucht bepalen. Deze activiteitconcentraties worden gecombineerd met de specifieke geabsorbeerde dosistempi volgens:

$$F_{dose} = k_1 a_1 (1 - F_{Rn}) + k_2 a_2 + k_3 a_3 \quad (4)$$

In deze formule zijn k_1, k_2 en k_3 de specifieke geabsorbeerde dosistempi in nGy h^{-1} per Bq kg^{-1} voor respectievelijk de ^{238}U-vervalreeks (^{226}Ra), de ^{232}Th-vervalreeks en ^{40}K; en zijn a_1, a_2 en a_3 de overeenkomstige massieke activiteiten in Bq kg^{-1}. Voor k_1 tot en met k_3 zijn de waarden 0,090, 1,10 en 0,080 nGy h^{-1} per Bq kg^{-1} toegepast, zijnde afgeronde gemiddelden op basis van literatuurgegevens (De Jong, 2010).

De ^{222}Rn exhalatiefactor van een monster, F_{Rn}, wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de hoeveelheid ^{222}Rn-gas die aan het milieu wordt afgegeven en de hoeveelheid die binnen het materiaal wordt geproduceerd. In formulevorm:

$$F_{Rn} = \frac{E}{\lambda_{Rn} a_i}, \quad (5)$$

waarbij E de ^{222}Rn-exhalatiesnelheid is in Bq $(kg\ s)^{-1}$, λ_{Rn} de vervalconstante van ^{222}Rn is ($2{,}1 \times 10^{-6}\ s^{-1}$) en a_1 de activiteitconcentratie van ^{226}Ra is (Bq kg^{-1}). Per materiaalcategorie is uit eerdere studies naar de ^{222}Rn-exhalatiesnelheid uit bouwmaterialen een gemiddelde met standaardafwijking van F_{Rn} afgeleid. Deze zijn weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11 ^{222}Rn exhalatiefactor voor verschillende bouwmaterialen.

Materiaal	F_{Rn} (-)
Beton	0,14±0,06
Kalkzandsteen	0,10±0,03
Gips	0,13±0,05
Baksteen	0,00±0,00
Cellenbeton	0,13±0,13

B.2 Constructie elementen en afmetingen

Hoe dikker en dichter een constructie-element is, des te meer activiteit is in de constructie aanwezig en daarom spelen deze parameters een belangrijke rol bij de bepaling van de waarde van het geabsorbeerde dosistempo. Beide variabelen worden gecombineerd in de oppervlaktedichtheid, zijnde het product van dikte en dichtheid.

Met behulp van de MARMER-code zijn deze parameters destijds gevarieerd door de dichtheid te veranderen van 500 tot 3000 kg m^{-3} bij een vaste wanddikte van 20 cm, overeenkomend met oppervlaktedichtheden van 100 tot 600 kg m^{-2}. Aanvullende berekeningen (met MicroShield) zijn uitgevoerd bij een vaste dichtheid van 2350 kg m^{-3} (beton), waarbij de constructiedikte wordt gevarieerd van 0 tot 30 cm (oppervlaktedichtheden van 0 tot 705 kg m^{-2} (De Jong, 2010).

Het specifieke geabsorbeerde dosistempo neemt toe met toenemende dikte, maar als gevolg van zelfabsorptie neemt dit effect af bij de hogere waarden. Het maakt geen verschil of de oppervlaktedichtheid wordt gevarieerd door de dikte of door de dichtheid. De beste benadering wordt verkregen door regressieanalyse, wat resulteert in de volgende uitdrukking:

$$F_{constr,i} = 3 \cdot 10^{-9} m_i^3 - 6 \cdot 10^{-6} m_i^2 + 0{,}0043 m_i + 0{,}0013 \quad (6)$$

With $m_i = \rho_i \cdot d_i$.

In deze vergelijkingen is $F_{constr,i}$ de correctiefactor als functie van de oppervlaktedichtheid m_i van constructie-element i in kg m^{-2}, dat wil zeggen het product van de dichtheid ρ_i (kg m^{-3}) en de dikte d_i (m) van constructie-element i. Deze factor wordt gelijkgesteld aan één voor een oppervlaktedichtheid van 470 kg m^{-2}, overeenkomend met 20 cm beton met een dichtheid van 2350 kg m^{-3}.

Afmetingen van de constructie

De invloed van een geometrie die afwijkt van de standaardgeometrie wordt gecorrigeerd met de volgende functie:

$$F_{dimens,i} = -0{,}135 A_i^{rel} + 9{,}40 \left(A_i^{rel}\right)^2 - 15{,}9 \left(A_i^{rel}\right)^3, \quad (7)$$

waarbij $F_{dimens,i}$ de relatieve dosisbijdrage van een constructie-element i is en A_i^{rel} het relatieve oppervlak vertegenwoordigt dat door dat constructie-element wordt ingenomen (beide dimensieloos). Merk op dat in deze vergelijking het kamervolume indirect in rekening is gebracht.

Buitenblad

In Nederland is het gebruikelijk dat de buitenwanden van een woning uit twee elementen bestaan met daartussen een spouw. Het buitenblad is doorgaans opgebouwd uit metselwerk waarvan de bijdrage aan de dosis – ondanks de afscherming van het binnenblad – in het binnenshuis niet a priori worden verwaarloosd. Zodoende dient de verzwakkingsfactor F_{leaf} te worden toegepast voor het buitenblad.

De berekening is vergelijkbaar met die voor de overige constructie-elementen, met uitzondering van het feit dat hierbij rekening wordt gehouden met de verzwakking door het binnenblad. De verzwakkingsfactor F_{leaf} wordt bepaald als functie van de oppervlaktedichtheid van het binnenblad. De beste benadering luidt:

$$F_{leaf} = 1 - 3{,}14 \cdot 10^{-3} m_{leaf} + 3{,}48 \cdot 10^{-6} m_{leaf}^2 - 1{,}30 \cdot 10^{-9} m_{leaf}^3 \quad (8)$$

waarbij m_{leaf} de oppervlaktedichtheid van het binnenblad is (kg m^{-2}). De drie natuurlijke radionucliden vertonen een vergelijkbaar gedrag, zodat het niet nodig is deze afzonderlijk te behandelen.

Deuren en ramen

Deuren en ramen dragen zelf niet bij aan het geabsorbeerde dosistempo. De oppervlakken van de verschillende constructie-elementen worden gecorrigeerd volgens:

$$F_{do/wi,i} = \frac{A_i - A_{wi/do,i}}{A_i} = 1 - A^{rel}_{wi/do,i}, \quad (9)$$

waarin A_i het oppervlak is van constructie-element i (m^2) en $A_{do/wi,i}$ het oppervlak van deuren en ramen in dat constructie-element (m^2).

B.3 Aangrenzende verdiepingen en woningen

Hoe dichter en dikker de constructie-elementen van de woning zijn, des te hoger zal het door de bouwmaterialen veroorzaakte geabsorbeerde dosistempo zijn, maar des te kleiner zal ook de dosisbijdrage van aangrenzende verdiepingen en woningen worden. In de dosisberekeningen wordt per type woning hiervoor gecorrigeerd middels de correctiefactor F_{adjac}:

$$F_{adjac} = a_0 + a_1 \cdot m_{av} + a_2 \cdot m_{av}^2 + a_3 \cdot m_{av}^3 + a_4 \cdot m_{av}^4 \quad (10)$$

De coëfficiënten a_0 tot a_4 zijn specifiek per woning en weergegeven in Tabel 12.

Tabel 12 Overzicht van de regressiecoëfficiënten die worden gebruikt bij de bepaling van de correctiefactor F_{adjac} voor verschillende woningtypen, ter berekening van de bijdrage aan het geabsorbeerde dosistempo afkomstig van bouwmaterialen in aangrenzende ruimtes. De x-coördinaat is de gemiddelde oppervlaktedichtheid van het plafond en de dragende binnenwanden.

Type woning	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
Twee verdiepingen vrijstaand	1,32	$-1{,}45\cdot10^{-3}$	$2{,}43\cdot10^{-6}$	$-1{,}51\cdot10^{-9}$	$1{,}09\cdot10^{-13}$
Drie verdiepingen geschakeld	1,85	$-5{,}09\cdot10^{-3}$	$1{,}35\cdot10^{-5}$	$-1{,}74\cdot10^{-8}$	$8{,}80\cdot10^{-12}$
Drie verdiepingen einde van rij	1,96	$-6{,}17\cdot10^{-3}$	$1{,}77\cdot10^{-5}$	$-2{,}47\cdot10^{-8}$	$1{,}34\cdot10^{-11}$
Drie verdiepingen rij	2,51	$-1{,}02\cdot10^{-2}$	$3{,}10\cdot10^{-5}$	$-4{,}49\cdot10^{-8}$	$2{,}50\cdot10^{-11}$
Meerdere verdiepingen appartement	3,30	$-1{,}57\cdot10^{-2}$	$4{,}66\cdot10^{-5}$	$-6{,}57\cdot10^{-8}$	$3{,}56\cdot10^{-11}$

Bijlage C Scenario details

C.1 Volledige uitwerking rijtjeswoning midden.

Tabel 13 Materiaalkeuze en afmetingen van de rijtjeswoning midden scenario: huidige situatie nieuwbouw.

	Constructie element	Bouwmateriaal huidige situatie	Dichtheid (kg m^{-3})	Dikte (m)	Oppervlakte (m^2)	Relatieve oppervlakte (-)	oppervlakte deur/raam (m^2)
Vloer	Binnen	Zandcement	1820	0,07	56	0,27	0
	Buiten	Prefabbeton	2350	0,12	56	0,27	0
Plafond	Binnen	Prefabbeton	2350	0,20	56	0,27	4
	Buiten	Zandcement	1820	0,05	56	0,27	4
Noord	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	31	0,15	8
	Buiten	Baksteen	1670	0,10	31	0,15	8
Zuid	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	31	0,15	4
	Buiten	Baksteen	1670	0,10	31	0,15	4
Oost	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
	Buiten	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
West	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
	Buiten	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
Som					207	1,00	
Niet dragende muren			825	0,10	21		

Tabel 14 Materiaalkeuze en afmetingen van de rijtjeswoning midden scenario: klimaat adaptief.

	Constructie element	Bouwmateriaal klimaat adaptief	Dichtheid (kg m^{-3})	Dikte (m)	Oppervlakte (m^2)	Relatieve oppervlakte (-)	oppervlakte deur/raam (m^2)
Vloer	Binnen	Zandcement	1820	0,07	56	0,27	0
	Buiten	Prefabbeton	2350	0,12	56	0,27	0
Plafond	Binnen	Anhydriet	2950	0,01	56	0,27	4
	Buiten	Zandcement	1820	0,04	56	0,27	4
Noord	Binnen	Gips	900	0,01	31	0,15	8
	Buiten	Baksteen	1670	0,10	31	0,15	8
Zuid	Binnen	Gips	900	0,01	31	0,15	4
	Buiten	Baksteen	1670	0,10	31	0,15	4
Oost	Binnen	Gips	900	0,01	16	0,08	0
	Buiten	Gips	900	0,01	16	0,08	0
West	Binnen	Gips	900	0,01	16	0,08	0
	Buiten	Gips	900	0,01	16	0,08	0
som					207	1,00	
Niet dragende muren			825	0,10	21		

Tabel 15 Materiaalkeuze en afmetingen van de rijtjeswoning midden scenario: scenario lagere gevel en raam verhouding.

	Constructie element	Bouwmateriaal huidige situatie	Dichtheid (kg m^{-3})	Dikte (m)	Oppervlakte (m^2)	Relatieve oppervlakte (-)	oppervlakte deur/raam (m^2)
Vloer	Binnen	Zandcement	1820	0,07	56	0,27	0
	Buiten	Prefabbeton	2350	0,13	56	0,27	0
Plafond	Binnen	Prefabbeton	2350	0,22	56	0,27	4
	Buiten	Zandcement	1820	0,05	56	0,27	4
Noord	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,13	31	0,15	7
	Buiten	Baksteen	1670	0,11	31	0,15	7
Zuid	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,13	31	0,15	4
	Buiten	Baksteen	1670	0,11	31	0,15	4
Oost	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,13	16	0,08	0
	Buiten	Kalkzandsteen	1820	0,13	16	0,08	0
West	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,13	16	0,08	0
	Buiten	Kalkzandsteen	1820	0,13	16	0,08	0
Som					207	1,00	
Niet dragende muren			825	0,10	21		

Tabel 16 Materiaalkeuze en afmetingen van de rijtjeswoning midden scenario: gerecyclede granulaten.

	Constructie element	Bouwmateriaal gerecyclede granulaten	Dichtheid (kg m^{-3})	Dikte (m)	Oppervlakte (m^2)	Relatieve oppervlakte (-)	oppervlakte deur/raam (m^2)
Vloer	Binnen	Zandcement	1820	0,07	56	0,27	0
	Buiten	Beton granulaat 30%	2350	0,12	56	0,27	0
Plafond	Binnen	Beton granulaat 30%	2350	0,20	56	0,27	4
	Buiten	Zandcement	1820	0,05	56	0,27	4
Noord	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	31	0,15	8
	Buiten	Baksteen	1670	0,10	31	0,15	8
Zuid	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	31	0,15	4
	Buiten	Baksteen	1670	0,10	31	0,15	4
Oost	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
	Buiten	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
West	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
	Buiten	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
som					207	1,00	
Niet dragende muren			825	0,10	21		

Tabel 17 Materiaalkeuze en afmetingen van de rijtjeswoning midden scenario: reststoffen & alternatieve cementen.

	Constructie element	Bouwmateriaal Restoffen & alternatieve cementen	Dichtheid (kg m^{-3})	Dikte (m)	Oppervlakte (m^2)	Relatieve oppervlakte (-)	oppervlakte deur/raam (m^2)
Vloer	Binnen	Zandcement	1820	0,07	56	0,27	0
	Buiten	Innovatief beton	2350	0,12	56	0,27	0
Plafond	Binnen	Innovatief beton	2350	0,20	56	0,27	4
	Buiten	Zandcement	1820	0,05	56	0,27	4
Noord	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	31	0,15	8
	Buiten	CO_2 neutrale steen	1670	0,10	31	0,15	8
Zuid	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	31	0,15	4
	Buiten	CO_2 neutrale steen	1670	0,10	31	0,15	4
Oost	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
	Buiten	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
West	Binnen	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
	Buiten	Kalkzandsteen	1820	0,12	16	0,08	0
Som					207	1,00	
Niet dragende muren			825	0,10	21		

Tabel 18 Dosisberekening huidige situatie nieuwbouw voor de middelste rijtjeswoning.

	Constructie element	Oppervlakte dichtheid (kg m^{-2})	F_{dosis} (nGy h^{-1})	F_{constr} (-)	F_{dimens} (-)	F_{muur} (-)	$F_{deur/raam}$ (-)	Dosis tempo (nGy h^{-1})
Vloer	Binnen	127	0,17	0,47	0,34	1,00	1,00	0,03
	Buiten	282	0,19	0,80	0,34	0,65	1,00	0,03
Plafond	Binnen	470	0,19	1,00	0,34	1,00	0,94	0,06
	Buiten	91	0,17	0,35	0,34	0,16	0,94	0,00
Noord	Binnen	218	0,22	0,69	0,14	1,00	0,75	0,02
	Buiten	167	0,58	0,57	0,14	0,47	0,75	0,02
Zuid	Binnen	218	0,22	0,69	0,14	1,00	0,86	0,02
	Buiten	167	0,58	0,57	0,14	0,47	0,86	0,02
Oost	Binnen	218	0,22	0,69	0,04	1,00	1,00	0,01
	Buiten	218	0,22	0,69	0,04	0,47	1,00	0,00
West	Binnen	218	0,22	0,69	0,04	1,00	1,00	0,01
	Buiten	218	0,22	0,69	0,04	0,47	1,00	0,00
Som								0,21
F_{zoning}							x	0,97
F_{adjac}							x	1,13
Totaal								0,23

Tabel 19 Dosisberekening voor scenario klimaat adaptief voor de middelste rijtjeswoning.

	Constructie element	Oppervlakte dichtheid (kg m^{-2})	F_{dosis} (nGy h^{-1})	F_{constr} (-)	F_{dimens} (-)	F_{muur} (-)	$F_{deur/raam}$ (-)	Dosis tempo (nGy h^{-1})
Vloer	Binnen	127	0,17	0,47	0,34	1,00	1,00	0,03
	Buiten	282	0,19	0,80	0,34	0,65	1,00	0,03
Plafond	Binnen	37	0,11	0,16	0,34	1,00	0,94	0,01
	Buiten	73	0,17	0,29	0,34	0,89	0,94	0,01
Noord	Binnen	11	0,14	0,05	0,14	1,00	0,74	0,00
	Buiten	167	0,58	0,57	0,14	0,97	0,74	0,03
Zuid	Binnen	11	0,14	0,05	0,14	1,00	0,86	0,00
	Buiten	167	0,58	0,57	0,14	0,97	0,86	0,04
Oost	Binnen	11	0,14	0,05	0,04	1,00	1,00	0,00
	Buiten	11	0,14	0,05	0,04	0,97	1,00	0,00
West	Binnen	11	0,14	0,05	0,04	1,00	1,00	0,00
	Buiten	11	0,14	0,05	0,04	0,97	1,00	0,00
Som								0,15
F_{zoning}							x	0,97
F_{adjac}							x	1,40
Totaal								0,21

Tabel 20 Dosisberekening voor scenario lagere gevel en raam verhouding voor de middelste rijtjeswoning.

	Constructie element	Oppervlakte dichtheid (kg m^{-2})	F_{dosis} (nGy h^{-1})	F_{constr} (-)	F_{dimens} (-)	F_{muur} (-)	$F_{deur/raam}$ (-)	Dosis tempo (nGy h^{-1})
Vloer	Binnen	127	0,17	0,47	0,34	1,00	1,00	0,03
	Buiten	310	0,19	0,85	0,34	0,65	1,00	0,04
Plafond	Binnen	517	0,19	1,03	0,34	1,00	0,94	0,06
	Buiten	91	0,17	0,35	0,34	0,13	0,94	0,00
Noord	Binnen	240	0,22	0,73	0,14	1,00	0,78	0,02
	Buiten	184	0,58	0,61	0,14	0,43	0,78	0,02
Zuid	Binnen	240	0,22	0,73	0,14	1,00	0,88	0,02
	Buiten	184	0,58	0,61	0,14	0,43	0,88	0,02
Oost	Binnen	240	0,22	0,73	0,04	1,00	1,00	0,01
	Buiten	240	0,22	0,73	0,04	0,43	1,00	0,00
West	Binnen	240	0,22	0,73	0,04	1,00	1,00	0,01
	Buiten	240	0,22	0,73	0,04	0,43	1,00	0,00
Som								0,21
F_{zoning}							x	0,97
F_{adjac}							x	1,12
Totaal								0,23(5)

* *Het verschil tussen het totaal van het middelste rijtjeshuis scenario Lage raam- gevel verhouding met de overzichtstabel 7 op pagina 16 komt voort uit de afronding.*

Tabel 21 Dosisberekening voor scenario gerecyclede granulaten voor de middelste rijtjeswoning.

	Constructie element	Oppervlakte dichtheid (kg m^{-2})	F_{dosis} (nGy h^{-1})	F_{constr} (-)	F_{dimens} (-)	F_{muur} (-)	$F_{deur/raam}$ (-)	Dosis tempo (nGy h^{-1})
Vloer	Binnen	127	0,17	0,47	0,34	1,00	1,00	0,03
	Buiten	282	0,25	0,80	0,34	0,65	1,00	0,04
Plafond	Binnen	470	0,25	1,00	0,34	1,00	0,94	0,08
	Buiten	91	0,17	0,35	0,34	0,16	0,94	0,00
Noord	Binnen	218	0,22	0,69	0,14	1,00	0,74	0,02
	Buiten	167	0,58	0,57	0,14	0,47	0,74	0,02
Zuid	Binnen	182	0,22	0,61	0,14	1,00	0,86	0,02
	Buiten	167	0,58	0,57	0,14	0,54	0,86	0,02
Oost	Binnen	218	0,22	0,69	0,04	1,00	1,00	0,01
	Buiten	218	0,22	0,69	0,04	0,47	1,00	0,00
West	Binnen	218	0,22	0,69	0,04	1,00	1,00	0,01
	Buiten	218	0,22	0,69	0,04	0,47	1,00	0,00
Som								0,24
F_{zoning}							x	0,97
F_{adjac}							x	1,13
Totaal								0,26

Tabel 22 Dosisberekening voor scenario reststoffen en alternatieve cementen de middelste rijtjeswoning.

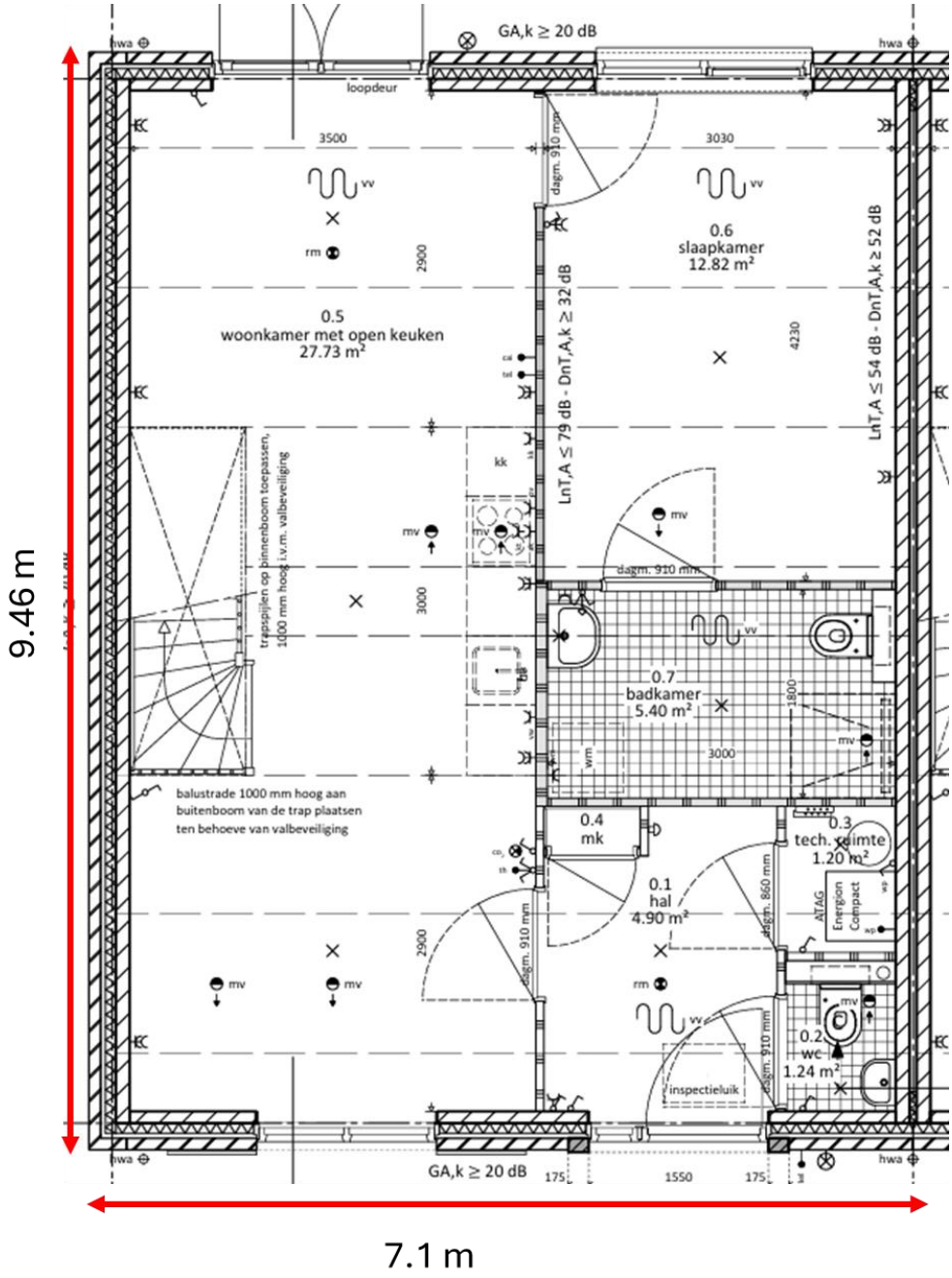
	Constructie element	Oppervlakte dichtheid (kg m^{-2})	F_{dosis} (nGy h^{-1})	F_{constr} (-)	F_{dimens} (-)	F_{muur} (-)	$F_{deur/raam}$ (-)	Dosis tempo (nGy h^{-1})
Vloer	Binnen	127	0,17	0,47	0,34	1,00	1,00	0,03
	Buiten	282	0,27	0,80	0,34	0,65	1,00	0,05
Plafond	Binnen	470	0,27	1,00	0,34	1,00	0,94	0,09
	Buiten	91	0,17	0,35	0,34	0,16	0,94	0,00
Noord	Binnen	218	0,22	0,69	0,14	1,00	0,74	0,02
	Buiten	167	0,06	0,57	0,14	0,47	0,74	0,00
Zuid	Binnen	218	0,22	0,69	0,14	1,00	0,86	0,02
	Buiten	167	0,06	0,57	0,14	0,47	0,86	0,00
Oost	Binnen	218	0,22	0,69	0,04	1,00	1,00	0,01
	Buiten	218	0,22	0,69	0,04	0,47	1,00	0,00
West	Binnen	218	0,22	0,69	0,04	1,00	1,00	0,01
	Buiten	218	0,22	0,69	0,04	0,47	1,00	0,00
Som								0,22
F_{zoning}							x	0,97
F_{adjac}							x	1,13
Totaal								0,24

C.2 Plattegronden van de type woningen

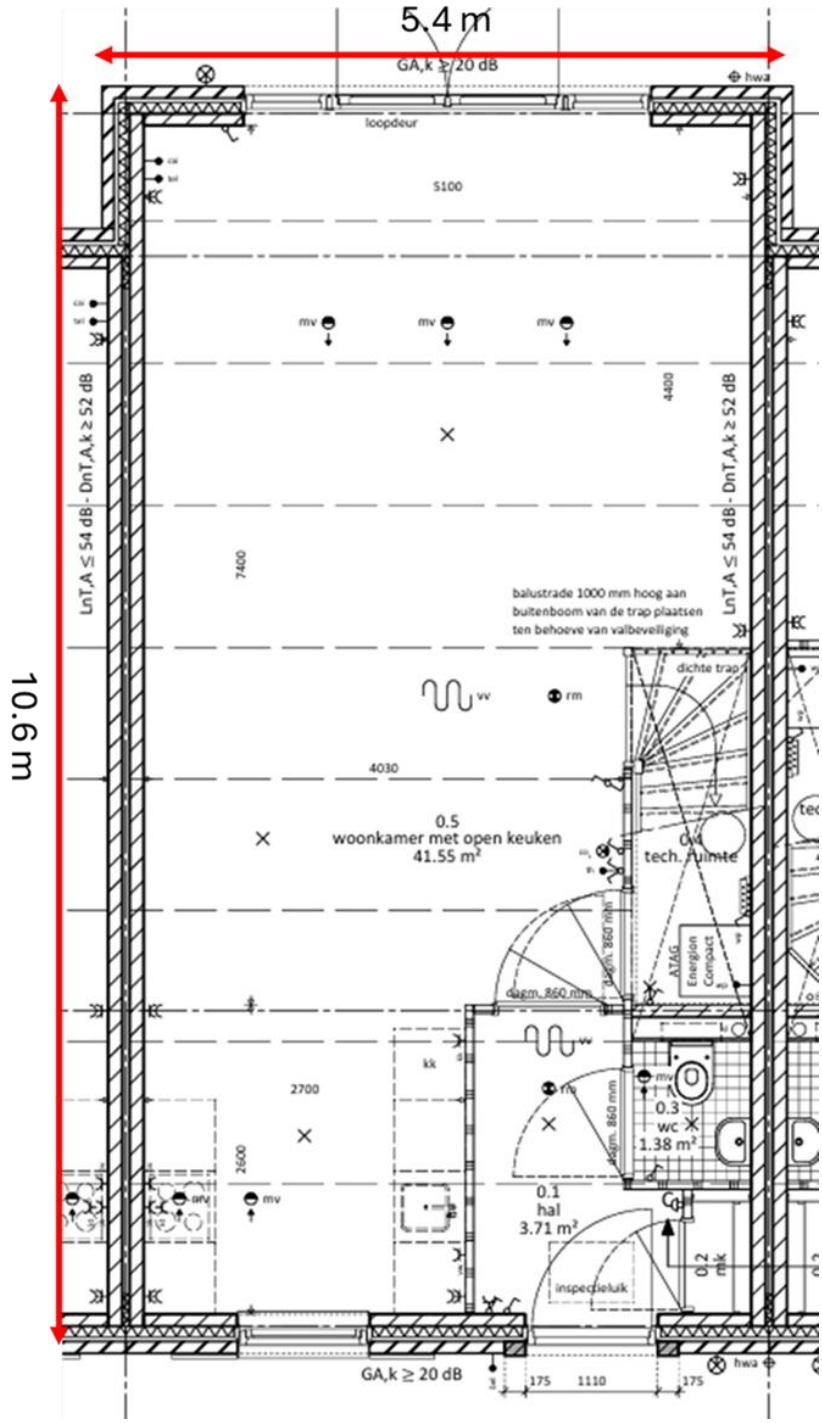
In deze paragraaf zijn de plattegronden getoond voor de verschillende type woningen. Uit deze plattegronden zijn de afmetingen, scheidingswanden, toegepaste bouwmaterialen en aanwezige ramen en deuren bepaald. Om variaties in de dosis als gevolg van de woninggeometrie te kunnen meenemen, zijn de afmetingen binnen een beperkte bandbreedte gevarieerd. Het gekozen bereik voor de verschillende woningtypen is weergegeven in Tabel 23.

Tabel 23 Gehanteerde bandbreedte voor de woninggeometrie en scheidingswandoppervlak.

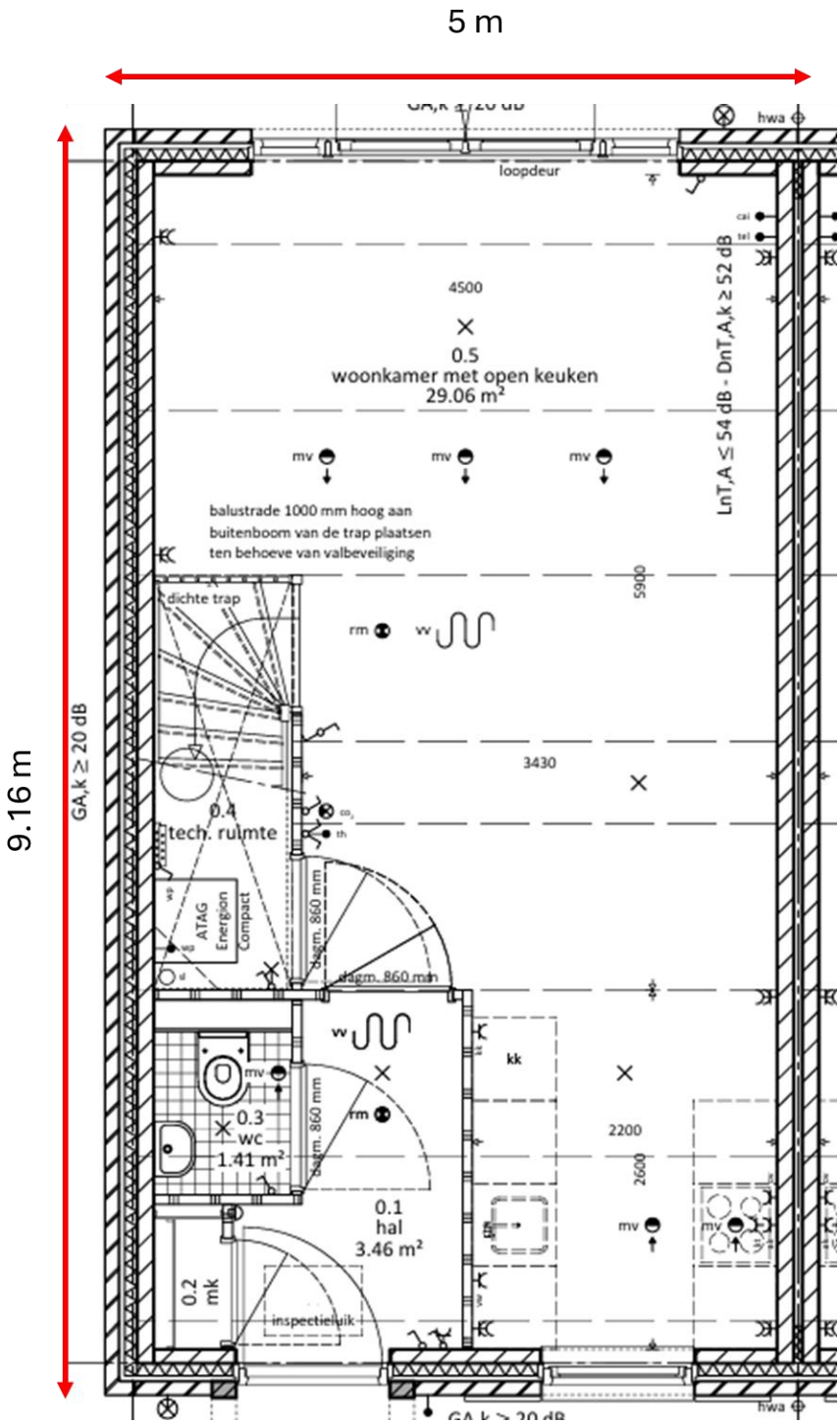
Range maten	**Lengte (m)**	**Breedte (m)**	**Hoogte (m)**	**Scheidingswand (m^2)**
Seniorenwoning	9-11	5-7	3	23-37
Rijtjeswoning	8-12	4-6	3	13-32
2-onder-1 kap	9-11	6-9	3	13-32
Vrijstaande woning	9-11	4-6	3	31-36
Appartement	7-9	6-8	3	29-43



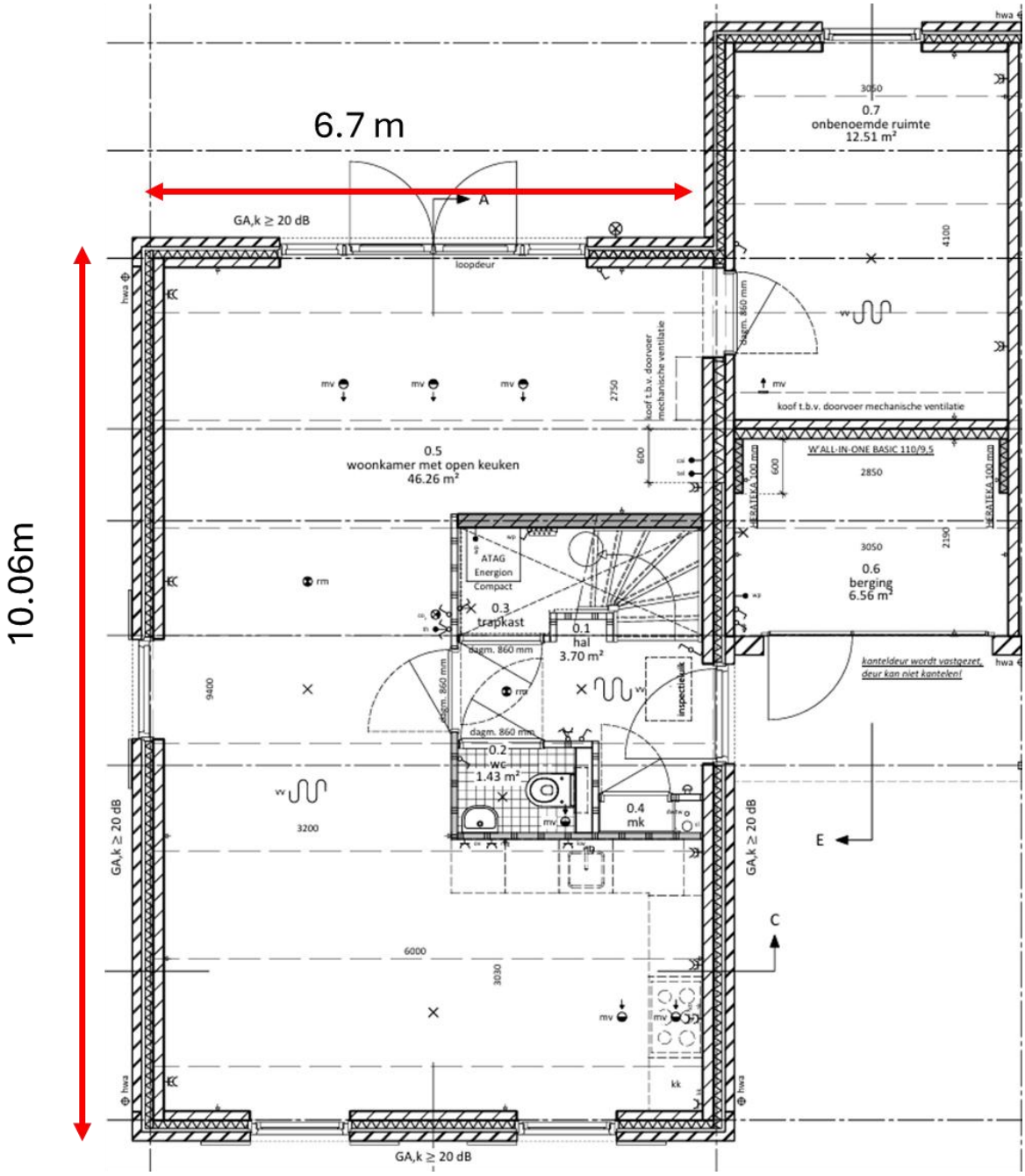
Figuur 2 Plattegrond seniorenwoning.



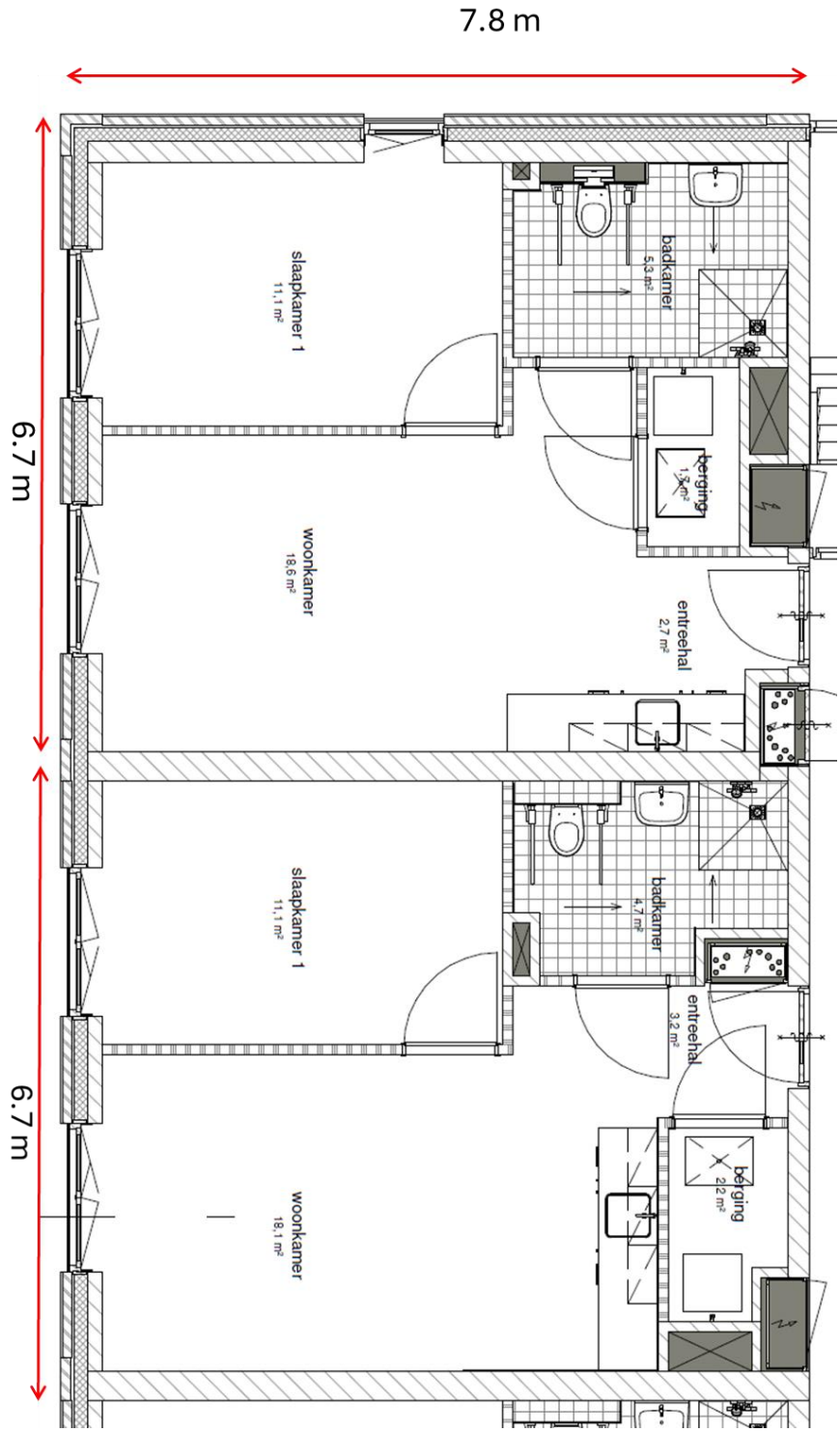
Figuur 3 Plattegrond rijtjeswoning.



Figuur 4 Plattegrond twee onder één kap woning.



Figuur 5 Plattegrond vrijstaande woning.



Figuur 6 Plattegrond appartementencomplex.

NRG PALLAS B.V.
Westerduinweg 3
NL-1755 LE PETTEN

NRG PALLAS B.V.
Utrechtseweg 310 B01
NL-6812 AR ARNHEM

PALLAS Programme
Comeniusstraat 8
NL-1817 MS ALKMAAR