




Berekening van specifieke vrijgavewaarden voor NORM uit de geothermie

Verbranding van NORM-
houdend filterafval uit
geothermische installaties

In opdracht van Energie Beheer Nederland

| | | | |
|----------------|--|--------------|---|
| auteur(s): | Govert de With  | beoordeeld: | Ruud Janssen  |
| naam: | 20 189313 24691- ReportGeoTherm-201211.docx | goedgekeurd: | Carla Salet  |
| referentienr.: | 24691/20.189313 | status: | FINAL |
| 43 pagina's | 11-12-2020 | | |

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inleiding | 7 |
| 2 | NORM-houdende geothermiefilters | 9 |
| 2.1 | Beschrijving van de filters | 9 |
| 2.2 | Doorzet van de filters | 12 |
| 2.3 | Radiologische eigenschappen van de filters | 14 |
| 3 | Uitgangspunten specifieke vrijgave | 17 |
| 3.1 | Afvalstroom specificaties | 17 |
| 3.2 | Afvoerroute | 17 |
| 3.3 | Dosiscriterium | 18 |
| 3.4 | NORM nucliden | 18 |
| 4 | Beschrijving en configuratie scenariomodellen | 23 |
| 4.1 | Scenario's voor transport | 23 |
| 4.2 | Scenario's voor afvalverbranding | 24 |
| 4.3 | Scenario's voor hergebruik van restmaterialen | 26 |
| 4.4 | Scenario's voor afvoer van restmaterialen naar een deponie | 27 |
| 4.5 | Scenario's voor verspreiding naar lucht | 28 |
| 4.6 | Scenario's voor verspreiding naar water | 28 |
| 5 | Resultaten en discussie | 30 |
| 5.1 | Toepassing scenariomodellen voor verbranding | 30 |
| 5.2 | Toepassing van de RP-122 II systematiek | 31 |
| 5.3 | Beschouwing van de bevindingen | 32 |
| 6 | Conclusies en aanbevelingen | 34 |
| 7 | References | 35 |

Samenvatting

Energieopwekking uit aardwarmte speelt een belangrijke rol in de verduurzaming van de Nederlandse energievoorziening. Inherent aan deze vorm van energie is de aanwezigheid van radionucliden van natuurlijke oorsprong uit de ondergrond (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th en ^{40}K), en mogelijke accumulatie hiervan in onderdelen van de installatie. Dit betreft o.a. de filters voor het afvangen van vaste deeltjes in het formatiewater ter voorkoming van vervuiling van de installatie. Deze filters dienen onder normaalbedrijf met regelmaat te worden vervangen en bevatten met name ^{210}Pb afkomstig van het primordiale nuclide ^{238}U . De aanwezige concentraties ^{210}Pb liggen tot wel drie ordes magnitude boven de generieke waarden voor vrijstelling en vrijgave van $1 \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ voor nucliden uit de vervalreeks van ^{238}U . Gegeven de daarmee samenhangende kosten voor afvoer is het doel van deze studie om te komen tot een voorstel voor specifieke vrijgavewaarden via afvoer naar een afvalverbrandingsinstallatie. De vrijgavewaarden zijn verkregen met de radiologische rekenmodellen voor verbranding van radioactiefhoudend afval van het Duitse Strahlenschutzkommission (SSK), die in 2019 door NRG zijn aangepast aan de Nederlandse situatie. In deze studie is het NRG model toegepast en geconfigureerd voor filterafval uit de geothermie. Onderdeel van deze configuratie is de aanpassing van de dosislimieten, de gehanteerde nuclidereeksen van ^{238}U , ^{235}U en ^{232}Th , en de dosiscoëfficiënten aan de vrijgave systematiek zoals beschreven in de RP-122(II).

Voor de doorzet van het NORM-houdend afval is een waarde van 600 Mg per jaar gekozen, die is gebaseerd op de verwachte doorzet van filterafval in 2040. Deze doorzet is meer dan een factor 20 hoger dan het huidige filterafval. Verder zijn de modelaanpassingen beperkt tot de parameters welke direct zijn afgeleid uit de voorgestelde afval doorzet. Er zijn geen aanpassingen doorgevoerd aan de eigenschappen van het beschouwde materiaal, die afbreuk zouden kunnen doen aan de conservatieve aard van de radiologische modellen.

De voorgestelde vrijgavewaarden liggen bij benadering twee á drie orde groottes hoger in vergelijking met de generieke vrijgavewaarden voor nucliden van natuurlijke oorsprong. Ter ondersteuning van de verkregen rekenresultaten is op basis van de hier gekozen afval doorzet de systematiek uit de RP-122(II) toegepast. De verkregen vrijgavewaarden zijn enigszins vergelijkbaar en waar afwijkend liggen de grenswaarden uit de RP-122(II) systematiek hoger.

1 Inleiding

Toepassing van energie uit aardwarmte is één van de speerpunten in de Nederlandse transitie naar duurzame energie. Deze energievorm wordt gekenmerkt door een lage CO₂ uitstoot en is een goed alternatief voor aardgas. Zodoende wordt sinds enkele tientallen jaren onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van aardwarmte en de geschiktheid van deze energievorm voor Nederland. Op dit moment zijn er in totaal 14 geothermielocaties met in totaal 17 geothermische installaties – ook wel doubletten genoemd – in bedrijf verspreid over heel Nederland. De gezamenlijke warmteopbrengst hiervan bedroeg in 2019 5,6 PJ. De ondergrondse installatie omvat een systeem van twee putten, één voor het oppompen van warmwater en één voor het terugpompen van het afgekoelde water. De toepassing van zo'n systeem maakt dat ook kleine vaste deeltjes worden opgepompt die vervolgens moeten worden afgevangen om vervuiling van de bovengrondse installatie te voorkomen. De aanwezigheid van natuurlijke radionucliden (NORM) in de deeltjes resulteert in een radioactieve vervuiling van de filters welke dien ten gevolge binnen de kaders vallen van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs). Recentelijk is er een inventarisatie uitgevoerd vanuit de branchevereniging de Dutch Association Geothermal Operators (DAGO) waarbij bij benadering een totale hoeveelheid van 70 Mg (70 ton) aan filterafval is gerapporteerd. Op basis van de algemene vrijstellings- en vrijgavewaarden zoals vastgelegd in het Bbs is 5% hiervan vrijgesteld, 45% registratieplichtig en 50% vergunningplichtig. Gegeven de financiële en maatschappelijke implicaties van met name de afvoer van vergunningplichtig materiaal is het streven vanuit de sector om te komen tot ruimere specifieke vrijgavewaarden voor het NORM-houdend filterafval.

Doel van deze studie is om te komen tot een voorstel voor specifieke vrijgavewaarden voor verbranding van het filterafval in een afvalverbrandingsinstallatie (AVI). Deze waarden vloeien voort uit een rekenkundige doorrekening met daarvoor passende radiologische rekenmodellen conform de geldende eisen in het Bbs. Voor deze studie zal gebruik worden gemaakt van het radiologisch model van het Duitse Strahlenschutzkommission (SSK, 2006) welke in 2019 is aangepast aan de Nederlandse situatie (De With, 2019). De configuratie van de scenariomodellen is overgenomen uit de studie van 2019 en er zijn slechts een beperkt aantal parameters onderbouwd aangepast voor een representatieve doorrekening van de hier beschouwde afvalstroom. Dit betreft de doorzet van het filterafval, waarin is meegenomen de groeiambitie voor geothermie, en alle daaruit voortvloeiende aanpassingen ten aanzien van blootstellingsduur tijdens transport naar de AVI en opmenging met niet NORM-houdend afval in de AVI.

De bevindingen uit de doorrekening met het voor Nederland aangepaste SSK model zullen ook worden vergeleken met de generieke scenariomodellen zoals beschreven in het Europese RP-122 deel II (EC, 2002).



Het rapport is als volgt opgebouwd. In Hoofdstuk 2 zal een uiteenzetting worden gegeven van het NORM-houdend filterafval, dit omvat naast een beschrijving van het afval ook informatie over de jaarlijkse doorzet van dit afval en de aanwezige activiteitsconcentraties. Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van de uitgangspunten zoals deze in de studie zullen worden gehanteerd, gevolgd door Hoofdstuk 4 waarin alle scenariomodellen voor transport, verbranding, stort van restmaterialen op de deponie en emissies naar lucht en water zullen worden beschreven voorzien van een uiteenzetting van de toegepaste modelparameters. In Hoofdstuk 5 worden de rekenresultaten gepresenteerd en besproken. Het rapport wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

2 NORM-houdende geothermiefilters

2.1 Beschrijving van de filters

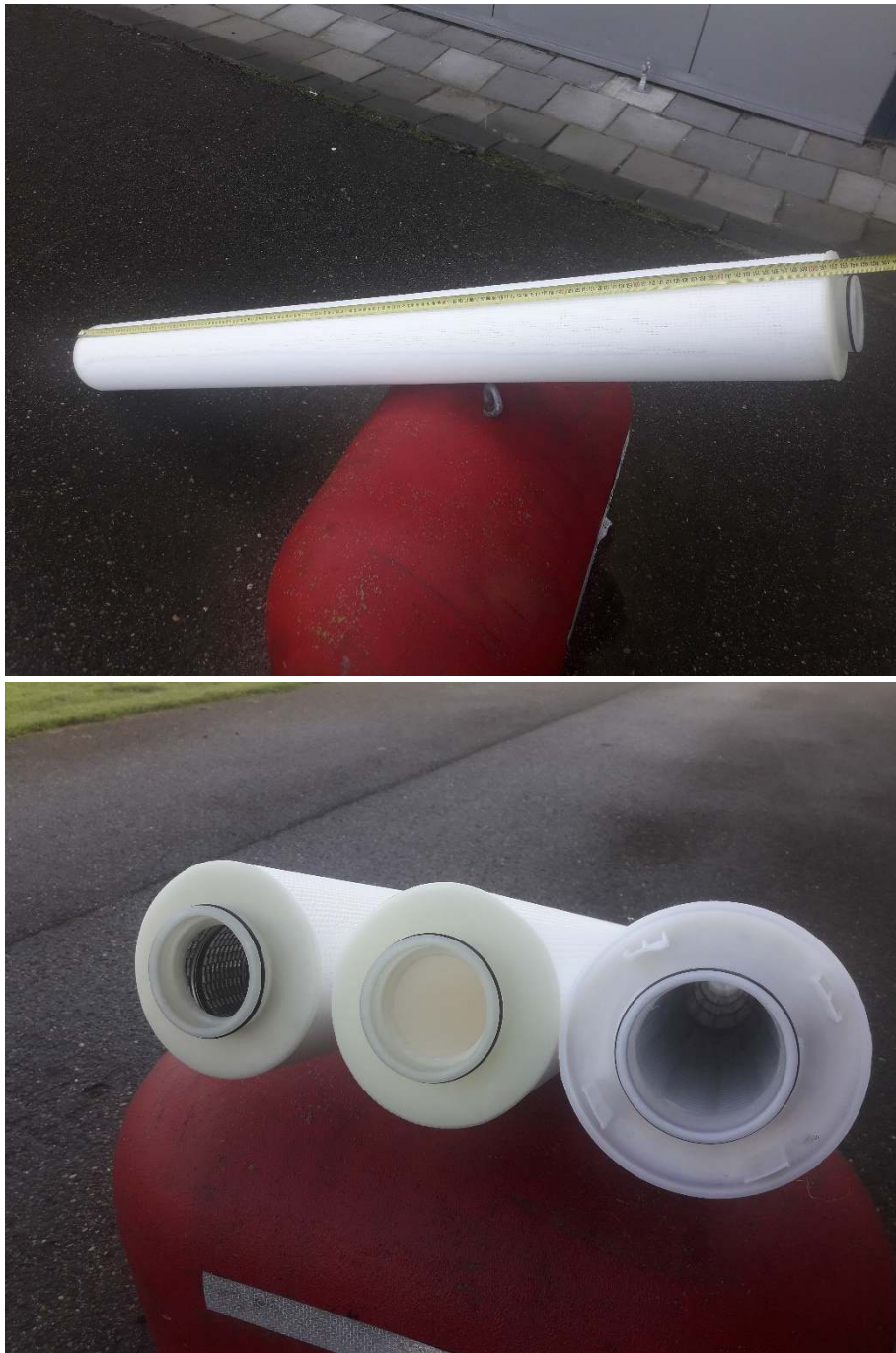
De geothermische installaties zoals toegepast in Nederland bestaan uit twee putten: één voor het oppompen en één voor het terugpompen van water. Op deze putten is een installatie gemonteerd met o.a. een warmtewisselaar voor het onttrekken/overdragen van warmte en een filtersysteem voor het afvangen van aanwezige vaste deeltjes. De filtersystemen bevinden zich zowel aan de warme zijde van de installatie voor de warmtewisselaar als aan de koude zijde voor de retour pompen. De filters voorkomen zo vervuiling van de installatie zoals o.a. de warmtewisselaar als ook de formatie zelf. In de filters worden primair zand- en kleideeltjes aangetroffen afkomstig uit de formatie. Daarnaast bevat het filter metaaldeeltjes bestaande uit ijzer, chroom en zink afkomstig van de verbuizing als ook een kleine hoeveelheid kalk uit het formatiewater of de formatie zelf. Verder kunnen er ook nog in zeer kleine hoeveelheden opgeloste zouten en corrosie inhibitor achterblijven in het filter.

Verschillende soorten filters worden hiervoor ingezet met een filterdiameter welke kan variëren tussen de 50 en 1 μm . In het algemeen kunnen twee typen filters worden onderscheiden, dit zijn de zakfilters en de kaarsfilters. Beide typen filters variëren sterk in volume en gewicht. Foto's van beide filters zijn getoond in Figuur 1 en Figuur 2. Bij vervanging van de filters worden de oudere verwijderd en verpakt in een stofdichte plastic verpakking. Vanuit de brancheorganisatie is er een dubbelgesloten verpakking voorgeschreven, meestal in de vorm van een Big bag met inliner¹. Daarna wordt de verpakking opgeslagen voor toekomstig transport naar een erkende verwerker.

¹ DAGO (2017) DAGO industrie standaard Geothermie NORM – Def, 20170303.



Figuur 1 Foto's van een zakfilter.

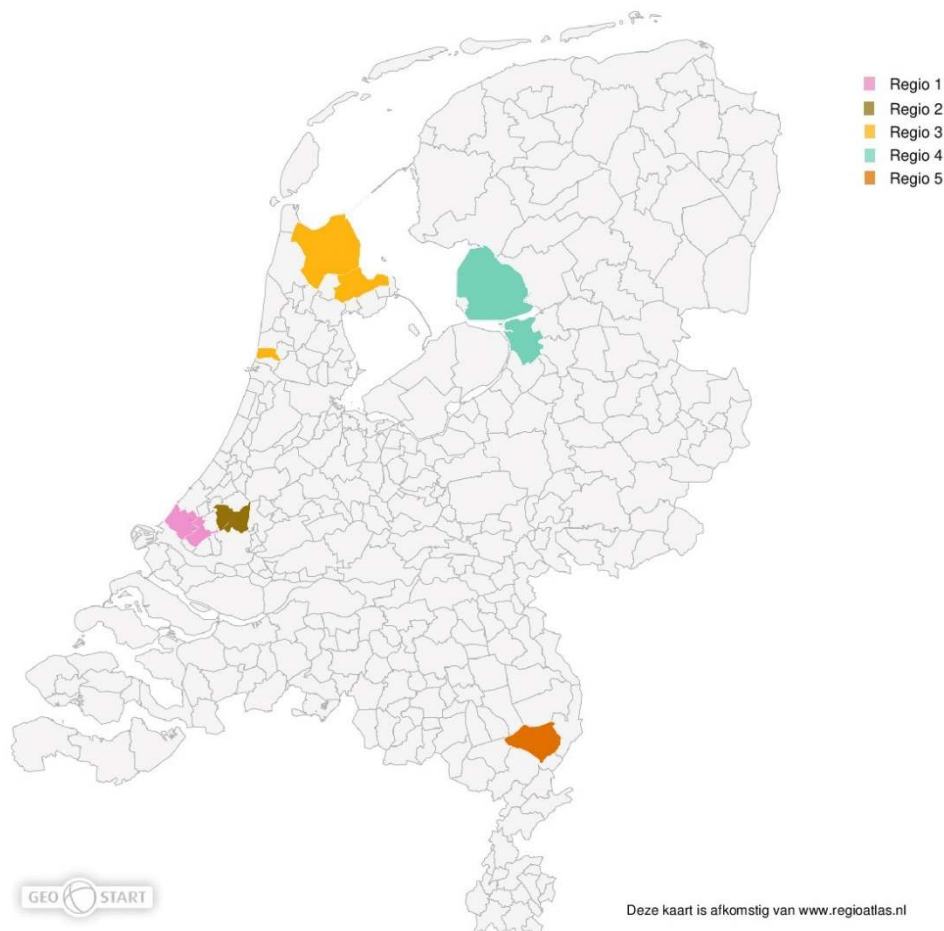


Figuur 2 Foto's van een kaarsfilter.

2.2 Doorzet van de filters

De jaarlijkse doorzet van verontreinigde geothermie filters in Mg per jaar is gebaseerd op een inventarisatie uitgevoerd door de brancheorganisatie van Nederlandse geothermie operators (DAGO) welke is afgenomen onder de DAGO leden (DAGO, 2020). De totale hoeveelheid filterafval verkregen uit de inventarisatie bedroeg 68 Mg met een volume na verpakking van 256 m³. Dit materiaal is afkomstig van 14 geothermie locaties met een totaal van 17 geothermische dubletten. De 14 locaties zijn verdeeld over vijf geologische regio's, deze regio's zijn grafisch weergegeven in Figuur 3. De productie van filterafval per regio, met bijbehorend aantal locaties en type ondergrond is weergegeven in Tabel 1

Tabel 1.



Figuur 3 Vijf geologische regio's in Nederland waar geothermie plaatsvindt; Regio 1 – Boven jura/ onder krijt, Regio 2 – Boven jura / onder krijt, Regio 3 – Rotliegend, Regio 4 – Rotliegend en Regio 5 – Onder carboon.

Uit verdere analyse van de gegevens blijkt dat in het eerste jaar na ingebruikname de productie van filterafval normaliter hoger is; in de daaropvolgende jaren neemt het afval in de filters af waarna het zich stabiliseert. In geval er sprake is van een putinterventie waarbij de put geopend wordt en daarna opnieuw wordt opgestart zal er normaliter ook eerst een toename zijn in filterafval, waarna het zich vervolgens weer stabiliseert. Verder is het pompdebiet van de installatie een belangrijke parameter in de filterproductie. De

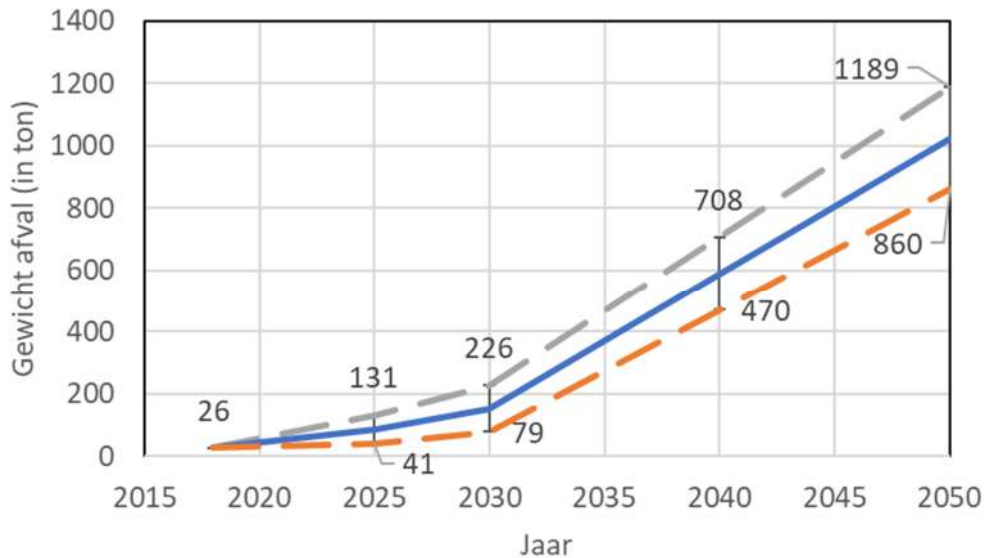
locatie specifieke eigenschappen zoals het type grondlaag en diepte van waaruit het warmwater wordt onttrokken zijn een slechte indicator voor de hoeveelheid filterafval. Zelfs voor naburige installaties die het warmwater onttrekken uit dezelfde grondlaag zijn er soms toch substantiële verschillen in de doorzet van filterafval.

Tabel 1 Details van de DAGO inventarisatie (DAGO, 2020) met aantal geothermie locaties, filterafval, en activiteitsconcentraties voor de vijf regio's in Nederland. Activiteitsconcentraties zijn uitgedrukt in een gemiddelde met onzekerheid (± 1 SD) plus min en max waarden.

| Regio | Play | Aantal | Doorzet | ²²⁶ Ra | ²¹⁰ Pb | ²²⁸ Ra | ²²⁸ Th | ⁴⁰ K |
|-------|-----------------------------|--------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | | (-) | (Mg) | (Bq/g) | (Bq/g) | (Bq/g) | (Bq/g) | (Bq/g) |
| 1 | Boven jura/ onder krijt | 6 | 36,2 | 0,08±0,11 0,02–1,43 | 16,5±25,7 1,38–143 | 0,05±0,08 0,02–0,95 | 0,21±0,38 0,03–4,43 | 0,08±0,09 0,00–0,5 |
| 2 | Boven jura / onder krijt | 2 | 0,7 | - 0,00–0,14 | - 0,05–1,42 | - 0,01–0,05 | - 0,01–0,13 | - 0,00–0,17 |
| 3 | Rotliegend | 3 | 24,9 | 0,15±0,11 0,03–0,33 | 261±359 0,11–956 | 0,09±0,10 0,02–0,38 | 0,16±0,22 0,03–0,76 | 0,16±0,13 0,05–0,63 |
| 4 | Rotliegend | 2 | 5,6 | - 0,05–0,15 | - 0,3–40 | - 0,01–0,06 | - 0,01–0,15 | - 0,07–0,3 |
| 5 | Onder carboon | 1 | 0,9 | 0,44 - | 242 - | 0,4 - | 1,63 - | 0,2 - |

Op basis van de informatie uit de inventarisatie van de DAGO is een schatting gemaakt van de verwachte doorzet van filterafval voor 2025, 2030, 2040 en 2050. De raming is gebaseerd op het combineren van de informatie uit de inventarisatie met de door de sector en de overheid gestelde doelen m.b.t. de gewenste productie van aardwarmte. De sector (DAGO en SPG) heeft in 2018 samen met Energie Beheer Nederland (EBN) en onder toezien van het ministerie van Economische Zaken en Klimaat (EZK) en het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (BZK) het Masterplan Aardwarmte in Nederland ontwikkeld (EBN, 2018). De voorziene groei spreekt over 50 Peta Joule (PJ) in 2030 en 200+ PJ in 2050. Vanuit EZK zijn in 2018 conservatievere doelen gesteld met betrekking tot de groei. Hier wordt uitgegaan van een productie van 15 PJ in 2030 en 110 PJ in 2050 (EZK, 2018). Uitgaande van de huidige

energieproductie van 5,6 PJ² en 14 doubletten met een gemiddelde hoeveelheid van ongeveer 1,9 ton afval per doublet kan een raming worden gemaakt van de toekomstige doorzet van filterafval. In Figuur 4 zijn de ramingen weergegeven.



Figuur 4 Geraamde doorzet van het totale filterafval voor de periode tot 2050 (DAGO, 2020). Bij benadering 50% van het totale filterafval is nu ingedeeld als vergunningplichtig. — Groeienscenario gemiddeld, — Groeienscenario laag – gebaseerd op geraamde energieproductie van de rijksoverheid, — Groeienscenario hoog – gebaseerd op geraamde energieproductie van de sector.

Voor het gemiddelde van de twee groeiscenario's loopt het filterafval op tot 86 Mg in 2030; na 2030 groeit het filterafval verder door tot ongeveer 600 en 1000 Mg per jaar in respectievelijk 2040 en 2050.

2.3 Radiologische eigenschappen van de filters

Een gedetailleerd overzicht van de NORM concentraties in filterafval is reeds weergegeven in Tabel 1 (DAGO, 2020). Dit overzicht toont voor de 5 geologische regio's in Nederland het aantal geothermie locaties met afval doorzet en de bijbehorende activiteitsconcentraties van de NORM nucliden. Uit de tabel blijkt dat de activiteitsconcentratie van ²¹⁰Pb veruit het hoogst is van alle aanwezige radionucliden. Deze concentraties liggen tot 2 à 3 ordes magnitude boven de algemene vrijstellings- en vrijgavewaarde voor ²³⁸U en haar dochternucliden. Voor de andere deelreeksen van ²³⁸U en ²³²Th, te weten ²²⁶Ra, ²²⁸Ra en ²²⁸Th, zijn deze overschrijdingen veel beperkter. Voor het natuurlijke radionuclide ⁴⁰K is geen overschrijding van de algemene vrijstellings- en vrijgavewaarde aangetroffen.

² DAGO (2020) Forse stijging gebruik aardwarmte in de glastuinbouw. <https://www.dago.nu/forse-stijging-gebruik-aardwarmte-in-de-glastuinbouw>

In een verdere analyse van de meetresultaten zijn geen noemenswaardige correlaties gevonden m.b.t. de aanwezige radioactiviteit en de herkomst van het afval. Wel zijn er een aantal clusters van locaties waar hogere concentraties natuurlijke radioactiviteit worden aangetroffen, maar hoe zich dit verhoudt tot de locatie specifieke eigenschappen en de geothermische installatie is niet duidelijk.

Op basis van de inventarisatie is vastgesteld dat van de genoemde 68 Mg afval bij benadering 5% als vrijgesteld aangemerkt kan worden, 45% als registratieplichtig en 50% als vergunningplichtig. In volumeprocenten zijn de fracties, vrijgesteld, registratieplichtig en vergunningplichtig respectievelijk 7%, 45% en 48%. Deze indeling is primair het gevolg van de aanwezigheid van het ^{210}Pb . Indien ^{210}Pb buiten beschouwing wordt gelaten is het massapercentage registratieplichtig afval beperkt tot minder dan 2%, en in dat geval is er geen sprake van vergunningplichtig afval.

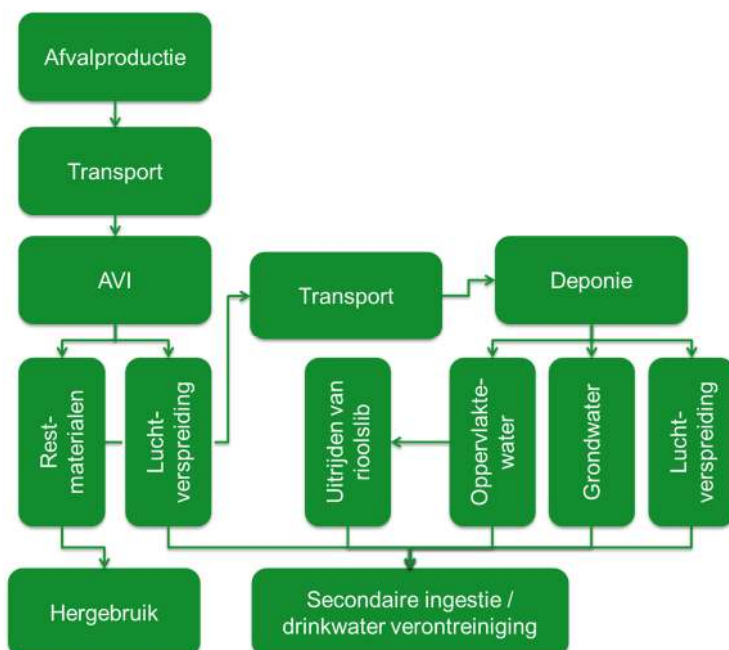
3 Uitgangspunten specifieke vrijgave

3.1 Afvalstroom specificaties

Op basis van een inventarisatie uitgevoerd door DAGO (DAGO, 2020) wordt de huidige doorzet van filterafval geraamd op 26 Mg per jaar. Deze doorzet zal in de toekomst gaan toenemen als gevolg van een groei in het aantal geothermieputten. Uitgaande van de groeiambities voor energie uit geothermie en de daaruit afgeleide productie van filterafval wordt een doorzet van 600 Mg filterafval gehanteerd welke bij benadering correspondeert met de verwachte doorzet in 2040 (Figuur 4).

3.2 Afvoerroute

De hier voorziene afvoerroute van de NORM-houdende filters betreft verbranding in een afvalverbrandingsinstallatie. Het bijbehorende verwerkingsproces welke hoort bij deze afvoerroute is schematisch weergegeven in Figuur 5. Naast verbranding van het afval en de blootstelling richting de werknemers is ook opgenomen het transport, hergebruik van reststoffen, luchtlozing en afvoer van materialen zonder nuttige toepassing naar een deponie. Voor de twee laatstgenoemde processtappen wordt hierin ook meegenomen eventuele blootstelling welke voortvloeit uit verspreiding en accumulatie van radioactiviteit richting het milieu.



Figuur 5 Schematisch overzicht van het radiologisch model voor de Nederlandse situatie.

Aan de hand van bovenstaande figuur kunnen de volgende processtappen worden onderscheiden die kunnen leiden tot blootstelling:

1. Transport van het vrijgegeven materiaal naar de afvalverbrandingsinstallatie
2. Storten van het afval in de afvalbunker
3. Mengen met overige afval en verbranden van het afval
4. Verspreiding van verbrandingsgassen via de lucht
5. Verwijdering van de verbrandingsgassen en overige bij de verbranding ontstane reststoffen
6. Transport van de restmaterialen naar afnemer als nuttige toepassing of deponie
7. Hergebruik van reststoffen als nuttige toepassing
8. Deponie van restmaterialen zonder nuttige toepassing
9. Verspreiding van reststoffen vanaf de deponie via oppervlakte- en grondwater.

De afvoerroute met bijbehorende scenario's is gebaseerd op het in 2006 gepubliceerde rekenmodel voor verbranding van materialen in vaste-, vloeibare of gecombineerde vaste/vloeibare vorm (SSK, 2006), en omvat ook de in 2019 doorgevoerde aanpassingen voor toepassing in de Nederlandse situatie (De With, 2019).

3.3 Dosis criterium

Het dosis criterium welke in deze studie wordt gehanteerd bedraagt 0,3 mSv per jaar. Dit criterium is gebaseerd op de maximale dosistoename zoals genoemd onder het 4^{de} lid van Artikel 3.20 in de ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (ANVS, 2018). Het criterium zal worden toegepast zowel voor de scenario's die betrekking hebben op leden van de bevolking als ook voor de werknemers scenario's.

3.4 NORM nucliden

De vrij te geven materialen bevatten radioactiviteit van natuurlijke oorsprong afkomstig uit de vervalreeksen van ^{238}U , ^{235}U en ^{232}Th , en het radionuclide ^{40}K . Een overzicht van de hier gehanteerde radionucliden en (deel)reeksen zijn weergegeven in Tabel 2, deze zijn consistent met de (deel)reeksen zoals gehanteerd in de RP 122 deel II (EC, 2002).

Tabel 2 Samenvatting van de nucliden en nuclidenketens welke in de modellering zijn gehanteerd.

| (Moeder)nuclide | Moedernuclide in seculair evenwicht met dochternucliden |
|------------------------|--|
| ²³⁸ U-sec | U-238, Th-234, Pa-234m, Pa-234 (0,3%), U-234, Th-230, Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214, Pb-210, Bi-210, Po-210 |
| ²³⁸ U-nat | U-238, Th-234, Pa-234m, Pa-234 (0,3%), U-234, U-235 (4,6%), Th-231 (4,6%) |
| ²³⁰ Th | Th-230 |
| ²²⁶ Ra+ | Ra-226, Rn-222, Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214 |
| ²¹⁰ Pb+ | Pb-210, Bi-210 |
| ²¹⁰ Po | Po-210 |
| ²³⁵ U-sec | U-235, Th-231, Pa-231, Ac-227, Th-227 (98,6%), Fr-223 (1,4%), Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211 (0,3%) |
| ²³⁵ U+ | U-235, Th-231 |
| ²³¹ Pa | Pa-231 |
| ²²⁷ Ac+ | Ac-227, Th-227 (98,6%), Fr-223 (1,4%), Ra-223, Rn-219, Po-215, Pb-211, Bi-211, Tl-207, Po-211 (0,3%) |
| ²³² Th-sec | Th-232, Ra-228, Ac-228, Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212 (64,1%), Tl-208 (35,9%) |
| ²³² Th | Th-232 |
| ²²⁸ Ra+ | Ra-228, Ac-228 |
| ²²⁸ Th+ | Th-228, Ra-224, Rn-220, Po-216, Pb-212, Bi-212, Po-212 (64,1%), Tl-208 (35,9%) |
| ⁴⁰ K | K-40 |

Bij het hanteren van bovenstaande deelreeksen zijn omwille van consistentie de dosiscoëfficiënten (DC's) voor inhalatie en ingestie afkomstig uit RP-122 deel II (EC, 2002) overgenomen. Reden hiervoor is dat de (deel)reeksen zoals gehanteerd in het radiologische model van de SSK (Thierfeldt en Wörlén, 2004) afwijken van de (deel)reeksen die de RP-122 deel II (EC, 2002) hanteert. Daarnaast zijn in het SSK model per categorie de meest conservatieve DC's gekozen, terwijl dit in de RP-122 deel II niet per definitie het geval is. De DC's voor externe straling zijn niet overgenomen uit de RP-122 deel II omdat het SSK model andere blootstellingsgeometrieën hanteert. Wel zijn de DC's gecorrigeerd zodat ze consistent zijn met de hier gehanteerde (deel)reeksen. Verdere details en achterliggende overwegingen over de gekozen DC's en de eventuele correcties zijn te vinden in Bijlage B. De gehanteerde dosiscoëfficiënten voor inhalatie, ingestie en externe straling zijn opgenomen in Tabel 3 tot Tabel 5. Details over de gehanteerde modelgeometrie behorende bij de scenario's A tot J (Tabel 5) zijn beknopt weergegeven in Bijlage A en zijn uitgebreid beschreven in het Duitse rapport van Brenk (Thierfeldt en Wörlén, 2004).

Tabel 3 Dosiscoëfficiënten voor inhalatie (EC, 2002).

| Nuclide | < 1 a (Sv·Bq ⁻¹) | 1-2 a (Sv·Bq ⁻¹) | 2-7 a (Sv·Bq ⁻¹) | 7-12 a (Sv·Bq ⁻¹) | 12-17 a (Sv·Bq ⁻¹) | > 17 a (Sv·Bq ⁻¹) | Workers (Sv·Bq ⁻¹) |
|-----------------------|---|--|--|---|--|--|--|
| ²³⁸ U-sec | 1.91E-04 | 1.66E-04 | 1.09E-04 | 7.07E-05 | 6.15E-05 | 5.70E-05 | 2.91E-05 |
| ²³⁸ U-nat | 6.34E-05 | 5.52E-05 | 3.58E-05 | 2.25E-05 | 1.91E-05 | 1.78E-05 | 1.28E-05 |
| ²³⁰ Th | 4.00E-05 | 3.50E-05 | 2.40E-05 | 1.60E-05 | 1.50E-05 | 1.40E-05 | 7.20E-06 |
| ²²⁶ Ra+ | 3.42E-05 | 2.91E-05 | 1.91E-05 | 1.20E-05 | 1.00E-05 | 9.53E-06 | 2.23E-06 |
| ²¹⁰ Pb+ | 1.84E-05 | 1.83E-05 | 1.12E-05 | 7.33E-06 | 6.01E-06 | 5.69E-06 | 1.16E-06 |
| ²¹⁰ Po | 1.80E-05 | 1.40E-05 | 8.60E-06 | 5.90E-06 | 5.10E-06 | 4.30E-06 | 2.20E-06 |
| ²³⁵ U-sec | 3.95E-04 | 3.49E-04 | 2.33E-04 | 1.62E-04 | 1.45E-04 | 1.33E-04 | 8.30E-05 |
| ²³⁵ U+ | 3.00E-05 | 2.60E-05 | 1.70E-05 | 1.10E-05 | 9.20E-06 | 8.50E-06 | 5.70E-06 |
| ²³¹ Pa | 7.40E-05 | 6.90E-05 | 5.20E-05 | 3.90E-05 | 3.60E-05 | 3.40E-05 | 1.70E-05 |
| ²²⁷ Ac+ | 2.91E-04 | 2.54E-04 | 1.64E-04 | 1.12E-04 | 1.00E-04 | 9.07E-05 | 6.03E-05 |
| ²³² Th-sec | 2.76E-04 | 2.38E-04 | 1.57E-04 | 1.06E-04 | 9.25E-05 | 8.46E-05 | 4.82E-05 |
| ²³² Th | 5.40E-05 | 5.00E-05 | 3.70E-05 | 2.60E-05 | 2.50E-05 | 2.50E-05 | 1.20E-05 |
| ²²⁸ Ra+ | 4.91E-05 | 4.81E-05 | 3.20E-05 | 2.00E-05 | 1.60E-05 | 1.60E-05 | 1.71E-06 |
| ²²⁸ Th+ | 1.73E-04 | 1.40E-04 | 8.83E-05 | 5.97E-05 | 5.15E-05 | 4.36E-05 | 3.45E-05 |
| ⁴⁰ K | 2.40E-08 | 1.70E-08 | 7.50E-09 | 4.50E-09 | 2.50E-09 | 2.10E-09 | 3.00E-09 |

Tabel 4 Dosiscoëfficiënten voor ingestie (EC, 2002).

| Nuclide | < 1 a (Sv·Bq ⁻¹) | 1-2 a (Sv·Bq ⁻¹) | 2-7 a (Sv·Bq ⁻¹) | 7-12 a (Sv·Bq ⁻¹) | 12-17 a (Sv·Bq ⁻¹) | > 17 a (Sv·Bq ⁻¹) | Workers (Sv·Bq ⁻¹) |
|-----------------------|---|--|--|---|--|--|--|
| ²³⁸ U-sec | 4.64E-05 | 1.43E-05 | 7.90E-06 | 5.83E-06 | 5.48E-06 | 2.57E-06 | 2.57E-06 |
| ²³⁸ U-nat | 7.71E-07 | 2.84E-07 | 1.87E-07 | 1.53E-07 | 1.49E-07 | 1.00E-07 | 1.00E-07 |
| ²³⁰ Th | 4.10E-06 | 4.10E-07 | 3.10E-07 | 2.40E-07 | 2.20E-07 | 2.10E-07 | 2.10E-07 |
| ²²⁶ Ra+ | 4.70E-06 | 9.62E-07 | 6.21E-07 | 8.01E-07 | 1.50E-06 | 2.80E-07 | 2.80E-07 |
| ²¹⁰ Pb+ | 8.42E-06 | 3.61E-06 | 2.20E-06 | 1.90E-06 | 1.90E-06 | 6.91E-07 | 6.91E-07 |
| ²¹⁰ Po | 2.60E-05 | 8.80E-06 | 4.40E-06 | 2.60E-06 | 1.60E-06 | 1.20E-06 | 1.20E-06 |
| ²³⁵ U-sec | 5.20E-05 | 5.70E-06 | 4.00E-06 | 2.96E-06 | 2.46E-06 | 1.97E-06 | 1.97E-06 |
| ²³⁵ U+ | 3.54E-07 | 1.33E-07 | 8.62E-08 | 7.17E-08 | 7.04E-08 | 4.73E-08 | 4.73E-08 |
| ²³¹ Pa | 1.30E-05 | 1.30E-06 | 1.10E-06 | 9.20E-07 | 8.00E-07 | 7.10E-07 | 7.10E-07 |
| ²²⁷ Ac+ | 3.86E-05 | 4.27E-06 | 2.81E-06 | 1.97E-06 | 1.59E-06 | 1.21E-06 | 1.21E-06 |
| ²³² Th-sec | 4.12E-05 | 7.25E-06 | 4.36E-06 | 4.62E-06 | 5.86E-06 | 1.06E-06 | 1.06E-06 |
| ²³² Th | 4.60E-06 | 4.50E-07 | 3.50E-07 | 2.90E-07 | 2.50E-07 | 2.30E-07 | 2.30E-07 |
| ²²⁸ Ra+ | 3.00E-05 | 5.70E-06 | 3.40E-06 | 3.90E-06 | 5.30E-06 | 6.90E-07 | 6.90E-07 |
| ²²⁸ Th+ | 6.55E-06 | 1.09E-06 | 6.04E-07 | 4.31E-07 | 3.07E-07 | 1.43E-07 | 1.43E-07 |
| ⁴⁰ K | 6.20E-08 | 4.20E-08 | 2.10E-08 | 1.30E-08 | 7.60E-09 | 6.20E-09 | 6.20E-09 |

Tabel 5 Dosiscoëfficiënten voor externe straling.

| Nuclide | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·g ⁻¹)] | [(Sv·h ⁻¹)/ (Bq·cm ⁻²)] |
| ²³⁸ U-sec | 9.74E-08 | 1.47E-07 | 1.55E-07 | 4.96E-07 | 1.22E-07 | 1.67E-07 | 1.12E-07 | 4.07E-08 | 6.35E-08 | 6.81E-12 |
| ²³⁸ U-nat | 9.65E-10 | 1.41E-09 | 1.44E-09 | 8.96E-09 | 1.18E-09 | 1.58E-09 | 1.14E-09 | 4.30E-10 | 1.04E-09 | 1.51E-13 |
| ²³⁰ Th | 5.67E-12 | 8.01E-12 | 5.63E-12 | 2.97E-11 | 9.98E-12 | 1.16E-11 | 8.64E-13 | 1.30E-12 | 1.17E-11 | 2.12E-15 |
| ²²⁶ Ra+ | 9.27E-08 | 1.40E-07 | 1.48E-07 | 4.70E-07 | 1.16E-07 | 1.59E-07 | 1.07E-07 | 3.87E-08 | 6.02E-08 | 6.42E-12 |
| ²¹⁰ Pb+ | 1.25E-12 | 1.41E-12 | 5.07E-13 | 5.58E-11 | 7.37E-12 | 9.00E-12 | 3.02E-15 | 1.96E-12 | 5.30E-11 | 1.06E-14 |
| ²¹⁰ Po | 4.63E-13 | 7.02E-13 | 7.32E-13 | 2.42E-12 | 5.56E-13 | 7.50E-13 | 5.02E-13 | 2.04E-13 | 3.15E-13 | 3.35E-17 |
| ²³⁵ U-sec | 1.67E-08 | 2.38E-08 | 2.93E-08 | 1.94E-07 | 1.97E-08 | 2.54E-08 | 2.13E-08 | 8.21E-09 | 2.02E-08 | 3.07E-12 |
| ²³⁵ U+ | 3.47E-09 | 4.56E-09 | 5.74E-09 | 5.81E-08 | 4.06E-09 | 5.13E-09 | 4.98E-09 | 1.72E-09 | 5.66E-09 | 9.45E-13 |
| ²³¹ Pa | 1.14E-09 | 1.69E-09 | 2.06E-09 | 1.16E-08 | 1.34E-09 | 1.73E-09 | 1.47E-09 | 5.66E-10 | 1.20E-09 | 1.87E-13 |
| ²²⁷ Ac+ | 1.26E-08 | 1.83E-08 | 2.24E-08 | 1.30E-07 | 1.49E-08 | 1.93E-08 | 1.55E-08 | 6.18E-09 | 1.39E-08 | 2.02E-12 |
| ²³² Th-sec | 1.30E-07 | 1.95E-07 | 2.10E-07 | 6.53E-07 | 1.66E-07 | 2.30E-07 | 1.56E-07 | 5.28E-08 | 8.24E-08 | 8.81E-12 |
| ²³² Th | 1.62E-12 | 2.21E-12 | 1.18E-12 | 1.10E-11 | 3.35E-12 | 3.90E-12 | 1.36E-13 | 4.23E-13 | 6.09E-12 | 1.16E-15 |
| ²²⁸ Ra+ | 4.91E-08 | 7.42E-08 | 7.73E-08 | 2.57E-07 | 5.99E-08 | 8.16E-08 | 5.52E-08 | 2.11E-08 | 3.32E-08 | 3.56E-12 |
| ²²⁸ Th+ | 8.02E-08 | 1.19E-07 | 1.31E-07 | 3.91E-07 | 1.04E-07 | 1.46E-07 | 1.00E-07 | 3.13E-08 | 4.87E-08 | 5.19E-12 |
| ⁴⁰ K | 8.90E-09 | 1.36E-08 | 1.37E-08 | 3.79E-08 | 1.14E-08 | 1.56E-08 | 1.01E-08 | 3.57E-09 | 5.23E-09 | 5.06E-13 |

4 Beschrijving en configuratie scenariomodellen

4.1 Scenario's voor transport

Beschrijving

Bij transport van de vrijgegeven afvalstoffen wordt ervan uitgegaan dat de vrachtwagen geladen is met los gestort materiaal. De blootstelling kan daarmee plaatsvinden via externe straling tijdens het transport en via inhalatie van stof tijdens het laden en lossen. Voor transport van het afval vanaf de locatie waar het materiaal is ontstaan naar de AVI is één scenario gehanteerd voor blootstelling aan de vrachtwagenchauffeur. Het transport scenario dekt ook af eventuele blootstelling bij transport verderop in de keten, zoals bv. transport van restmaterialen voor hergebruik en vervoer van materiaal zonder nuttige toepassing naar de deponie.

- T.1 Transport naar de AVI

Parametrisatie

De blootstellingsduur voor het transport is op basis van de informatie uit de Brenk studie (Thierfeldt en Wörlen, 2004) geschat op een vrachtrit van 1 uur per 10 Mg afval voor externe straling en 0,1 uur per 10 Mg afval voor ingestie en inhalatie. Hierbij wordt conservatief verondersteld dat alle transport wordt uitgevoerd door één chauffeur, en uitgegaan van een centraal gelegen AVI. In de door Brenk (Thierfeldt en Wörlen, 2004) gehanteerde aannames wordt verondersteld dat het transport door 2 chauffeurs wordt uitgevoerd. Zodoende ligt de blootstelling per Mg afval in deze studie tweemaal zo hoog als bij Brenk. Reden voor deze aanname is dat de doorzet van afval met 600 Mg kleiner is dan de 1000 Mg die Brenk hanteert.

Er wordt verondersteld dat de container volledig is gevuld met afval. Rekenkundig is er geen verschil in blootstelling indien de container slechts gedeeltelijk is gevuld met niet NORM-houdend afval, waardoor meer vrachtritten nodig zijn met lagere blootstelling. Hierbij wordt de aanname gedaan dat het afval uniform verdeeld is in de container. Met deze aannames wordt ook conservatief verondersteld dat het filterafval zich achter de cabine bevindt. In de praktijk wordt soms ook gebruik gemaakt van een aanhanger waarmee de eigenlijke blootstelling lager zal zijn.

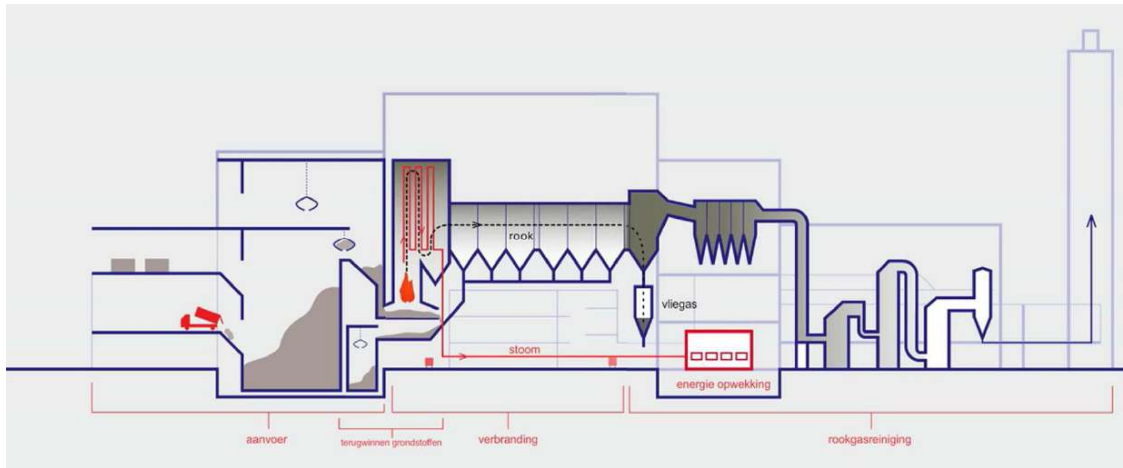
In het scenario wordt verondersteld dat het materiaal als losse stort in de container wordt geladen. Dit zal normaliter een conservatieve aanname zijn omdat de filters na verwijdering uit de installatie dubbel verpakt worden. Daarmee is de blootstelling voor inhalatie en ingestie welke is toegepast een conservatieve aanname.

Voor de verdunningsfactor $f_{d,1}$ wordt een waarde 1 gehanteerd waarmee geen verdunning van het materiaal wordt verondersteld. Deze aanname is consistent met de werkwijze om bij analyse een representatief monster te nemen inclusief een deel van het dragermateriaal (filter zelf) welke geen radioactiviteit bevat.

4.2 Scenario's voor afvalverbranding

Beschrijving

Figuur 6 toont het proces van een afvalverbrandingsinstallatie. Het met de vrachtauto aangevoerde afval wordt gestort in de afvalbunker. Met een grijper wordt het afval vervolgens in de stortkoker van de verbrandingsoven gestort. Verpakkingen met vast of vloeibaar afval kunnen in de afvalbunker worden gestort of rechtstreeks met een grijper in de stortkoker van de verbrandingsoven worden gebracht.



Figuur 6 Procesdiagram van een moderne afvalverbrandingsinstallatie.

In de oven wordt het afval bij een temperatuur van circa 1000°C verbrand. De niet-brandbare elementen in het afval komen terecht in de slak op de bodem van de oven. Na afkoelen worden de slakken verzameld in de slakkenbunker. De slak wordt eerst ontdaan van de bruikbare metalen en het restant wordt afgevoerd voor hergebruik.

De met de rook meegenomen deeltjes worden afhankelijk van de deeltjesgrootte in verschillende stappen in cyclonen afgevangen. De grotere deeltjes worden teruggevoerd naar de slakkenbunker; de kleinste deeltjes komen terecht in de vliegas. De vliegas wordt verzameld in een silo en per tankauto afgevoerd, o.a. voor verdere nuttige toepassing. Vervolgens worden de rookgassen in de rookgasreiniging nog verder ontdaan van schadelijke stoffen (bijv. de NO_x en ontzwaveling) voordat ze via de schoorsteen worden geloosd.

Bij het storten van afval in de afvalbunker komt stof vrij. Medewerkers van de AVI maar ook de vrachtwagenchauffeur worden hierbij via inhalatie blootgesteld aan stof. Daarna volgt het mengen van het radioactiefhoudend materiaal met het overig afval. Dit vindt in de AVI plaats door met een grijper uit verschillende batches met afval een greep te nemen en in de stortkoker in te voeren.

Bij verbranding zullen met name de vluchtige radionucliden via de lucht worden verspreid. Hiervoor worden alle reguliere blootstellingspaden die van belang zijn meegenomen, waaronder: externe straling en inhalatie, als ook ingestie via consumptie van bladgroente en opname in melk en vlees. Minder vluchtige elementen komen terecht in de bodemmassen of worden in elektrostatische filters (AVI vliegas) of natte wassers (ROI gips) afgevangen.

Genoemde processen resulteren in de vorming van verschillende verbrandingsresiduen en –gassen welke in termen van massafracties (f_{mv}) van het onverbrande materiaal zijn uitgedrukt, zoals weergegeven in Tabel

6. Tevens vindt er ook scheiding van activiteit plaats over de verschillende verbrandingsresiduen en –gassen welke element afhankelijk is (f_{av}). Deze zijn weergegeven in Tabel 7, en zijn destijds door de Duitse auteurs zodanig conservatief geschat dat de optelling van de fracties normaliter meer dan 100% bedraagt.

Tabel 6 Massafracties (f_{mv}) van de verschillende restmaterialen als percentage van het onverbrande materiaal.

| Slakken | Schroot | Stof | Gips |
|---------|---------|------|------|
| (-) | (-) | (-) | (-) |
| 25% | 2.5% | 1% | 0.1% |

Tabel 7 Scheiding van elementen (f_{av}) in de slakken, schroot, stof, gips en gas.

| Element | Slakken | Schroot | Stof | Gips | Gas |
|----------------------|---------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| | (-) | (-) | (-) | (-) | (-) |
| K, Ra, Ac, Th, Pa, U | 100% | 0% | 1% ² | 0,005% | 0,005% |
| Tl, Pb, Bi, Po | 100% | 1% ¹ | 100% ³ | 3% ⁴ | 3% ⁴ |

¹ Dit zijn elementen die mogelijk ook gedeeltelijk in metaalvorm in het afval aanwezig kunnen zijn, zodoende wordt uitgegaan van een activiteitsfractie f_{av} van 1% in het schroot.

² Dit zijn elementen waarbij wordt verondersteld dat geen verdamping plaatsvindt die leidt tot verrijking van activiteit in het stof. Uitgaande van een massafractie f_{mv} van 1% bedraagt daarmee de activiteitsfractie f_{av} ook 1%.

³ Dit zijn elementen die onder de omstandigheden van afvalverbranding mogelijk verdampten of gasvormige verbindingen kunnen vormen, zodoende wordt uitgegaan van een activiteitsfractie f_{av} van 100% in het stof.

⁴ Aangenomen wordt dat het ROI gips 3% van het stof bevat, dit is tevens ook het percentage waarvan wordt verondersteld dat dit als gas via de schoorsteen wordt afgevoerd. Dit is een conservatieve aanname gebaseerd op het werk van Kunze et al. (2019).

Voor verbranding van het radioactiefhoudend materiaal zijn vier scenario's gehanteerd. De scenario's hebben betrekking op de blootstelling voor de werknemers bij de AVI. Eventuele blootstelling richting publiek als gevolg van emissies naar lucht worden afgedekt met de scenario's L.1 t/m L.3 en verderop in het rapport besproken. De vier scenario's zijn onderstaand opgesomd:

- M.1 AVI ontvangst vracht vrijgeven materiaal
- M.2 AVI verwerking in de afvalbunker
- M.3 AVI slakkenbunker & slakkentransport
- M.4 AVI vliegasbunker & vliegastransport.

Parametrisatie

Uitgangspunt voor de parametrisatie van de bovengenoemde scenario's zijn de modelparameters welke ook in de eerdere studie van NRG zijn toegepast (De With, 2019). Uitzondering daarop is de blootstellingsduur bij ontvangst (M.1) en de verdunningsfactor $f_{d,2}$ van het NORM-houdend afval met het niet NORM-houdend afval.

De blootstellingsduur bij ontvangst van het vrijgegeven materiaal is in analogie met het SSK model bepaald op 0,01 uur per Mg afval. Voor afvoer richting de AVI is een verdunningsfactor $f_{d,2}$ gehanteerd welke is gebaseerd op afval doorzet van het NORM-houdend afval en een totale doorzet van 100.000 Mg afval per jaar bij de AVI. De in Nederland reguliere AVI's voor verwerking van o.a. huisvuil hebben een minimale doorzet van 200.000 Mg per jaar (Timmermans en De With, 2017). Daarnaast zijn de element specifieke fracties van Pb en Po voor gips en gas conservatief bijgesteld van 0,5% naar 3% op basis van de publicatie van Kunze et al. (2019). Alle andere parameters zijn ongewijzigd.

4.3 Scenario's voor hergebruik van restmaterialen

Beschrijving

Na verbranding zijn er vier typen restmateriaal geïdentificeerd. Dit betreft de i. bodemas, ii. ferro en non-ferro houdend schroot, iii. stof waaronder vliegias en iv. rookontzwavelingsgips. Voor elk van deze restmaterialen geldt dat er in meer of minder mate sprake is van hergebruik.

De in Nederland geproduceerde bodemassen vinden bijna volledig een nuttige toepassing (IM, 2016). Dit betreft toepassing in de grond-, weg- en waterbouw, daarnaast vindt er ook toepassing van AVI-bodemas in betonproducten plaats als toeslagmateriaal. Stort van bodemas op een deponie vindt in Nederland nauwelijks plaats. Om genoemde nuttige toepassingen af te dekken zijn er drie scenario's opgesteld. De eerste twee scenario's betreft toepassing in de wegenbouw voor werknemer en publiek. Deze scenario's zijn identiek aan de scenario's S1 en S2 in het SSK model. Het derde scenario betreft toepassing van AVI-bodemas in betonproducten voor de woningbouw (S6). Hierbij is aangenomen dat het bodemas als toeslagmateriaal wordt gehanteerd met een toeslagpercentage van 25% (De With, 2019). Eventuele blootstelling voor werknemers bij deze toepassing is reeds adequaat afgedekt met het scenario voor toepassing van bodemas in de wegenbouw. Daarom beperkt deze toepassing zich tot publieke blootstelling.

Ferro en non-ferro houdend materiaal wordt na verbranding afgescheiden en daarna als grondstof hergebruikt. In het radiologisch model van SSK wordt hiervoor een scenario voorgesteld welke is overgenomen.

Gips welke wordt gevormd in de rookgasontzwavelingsinstallatie van de AVI vindt zijn toepassing in de woningbouw als bouw materiaal, dit betreft o.a. gipsblokken. Voor deze toepassing biedt het SSK model reeds twee scenario's waarmee de blootstelling voor werknemer en publiek is afgedekt. Beide scenario's zijn overgenomen in deze studie.

Van de andere reststoffen, waaronder de droge stof en de filterkoek vindt nuttige toepassing in beperkte mate plaats. Mocht het vliegias een nuttige toepassing vinden in betonproducten als bindmiddel dan vormt dit slechts een zeer beperkte massa van slechts enkele tientallen kg's per m³ beton wat bij benadering correspondeert met een massafractie van 2 à 3%. Eventuele blootstelling richting het publiek is in dat geval adequaat afgedekt met de reeds beschreven scenario's voor hergebruik in bouwmaterialen. Om die reden wordt voor hergebruik van dit type restmateriaal geen apart scenario voorgesteld.

Voor blootstelling tijdens transport van de restmaterialen naar een verdere verwerker wordt verondersteld dat deze reeds adequaat is afgedekt met het transport scenario onder paragraaf 4.1. Reden hiervoor is dat dit scenario conservatief veronderstelt dat alle transport naar de AVI wordt uitgevoerd door één persoon. Omdat er als gevolg van het verbrandingsproces geen toename is in de totaal te transporteren activiteit wordt aangenomen dat er ook geen sprake is van toename in de blootstelling. Daarnaast is er als gevolg van opmenging met andere materialen altijd sprake van een afname in de specifieke activiteit t.o.v. het origineel vrijgegeven materiaal.

Daarmee zijn de scenario's voor hergebruik van restmaterialen als volgt:

- S.1 Toepassing bodemas in wegenbouw (werknemers)
- S.2 Toepassing bodemas in wegenbouw (bevolking)
- S.3 Hergebruik metaal schroot

- S.4 Toepassing ROI gips in woningbouw (werknemer)
- S.5 Toepassing ROI gips in woningbouw (bevolking)
- S.6 Toepassing bodemas in beton (bevolking).

In aanvulling op de gehanteerde scenario's in het SSK model is scenario S.6 toegevoegd. Dit scenario is in eerste aanzet gebaseerd op het scenario S.5, met dat verschil dat er een ander restmateriaal wordt toegepast. Tevens zijn de dosiscoëfficiënten voor externe straling met een factor 2,5 verhoogd om zo rekening te houden met de hogere oppervlakte dichtheid van de wanden.

Parametrisatie

De parametrisatie van de bovengenoemde scenario's is ongewijzigd en komt overeen met de modelparameters zoals in de eerdere studie van NRG zijn toegepast (De With, 2019). Wel dient te worden vermeld dat de aanpassing in de verdunningsfactor $f_{d,2}$ ook doorwerkt in de scenario's voor hergebruik.

4.4 Scenario's voor afvoer van restmaterialen naar een deponie

Beschrijving

Een deel van de restmaterialen uit afvalverbranding vindt geen nuttige toepassing, en betreft feitelijk afval welke naar een deponie wordt afgevoerd, dit zijn o.a. het droge stof, sproeidroogzout en filterkoek (IM, 2016). Omdat het droge stof meer dan 60% bedraagt van het totaal van de afgevoerde reststoffen naar de deponie wordt voor de deponie scenario's veronderstelt dat alleen het droge stof vanaf de AVI wordt afgevoerd naar een stortplaats. Tevens wordt aangenomen dat alle droge stof naar een deponie wordt afgevoerd. Dit is een conservatieve aanname waarmee stort van andere materialen zoals sproeidroogzout en filterkoek ook wordt afgedekt.

De afvoer van het droge stof wordt afgedekt met de twee deponie scenario's zoals gehanteerd in het radiologische model van SSK. Dit betreft de ontvangst van het restmateriaal (D.1) en het uitrijden van restmateriaal (D.3) door deponie personeel. Het SSK scenario D.2 voor biologische compostering wordt niet meegenomen in deze analyse.

Voor blootstelling tijdens transport van de restmaterialen naar de deponie wordt verondersteld dat deze reeds adequaat is afgedekt met het transport scenario onder paragraaf 4.1. De motivatie hiervoor is reeds beschreven.

Samengevat zijn de scenario's voor afvoer naar een deponie als volgt:

- D.1 Deponie ontvangst vracht vrijgeven materiaal
- D.3 Deponie storten van vrijgegeven materiaal.

Parametrisatie

De parametrisatie van de scenario's voor de deponie is ongewijzigd en overeenkomstig de modelparameters zoals in de eerdere studie van NRG zijn toegepast (De With, 2019). Wel dient te worden vermeld dat de verdunningsfactor ($f_{d,2}$) en de element specifieke fracties (f_{av}) van Pb en Po ook weer doorwerken richting de deponie scenario's.

4.5 Scenario's voor verspreiding naar lucht

Beschrijving

Voor blootstelling in de omgeving afkomstig van een lozing naar lucht zijn drie scenario's gehanteerd. Met de drie scenario's wordt separaat de blootstelling aan externe straling, inhalatie en secundaire ingestie afgedekt. De drie scenario's zijn overgenomen uit het radiologisch model van SSK.

Samengevat zijn de scenario's voor verspreiding naar lucht als volgt:

- L.1 Verspreiding via lucht (extern bodem)
- L.2 Verspreiding via lucht (inhalatie)
- L.3 Verspreiding via lucht (secundaire ingestie).

Voor de verspreiding naar lucht wordt een bronterm gehanteerd welke is gebaseerd op de totaal aangeboden activiteit van het desbetreffende nuclide vermenigvuldigd met de activiteitsfractie f_{av} in het gas (Tabel 4). Voor de dosis via ingestie (L.3) wordt consumptie van de volgende producten beschouwd:

- bladgroenten en andere planten,
- melk, via consumptie van weideplanten door vee,
- vlees, via consumptie van weideplanten door vee.

Parametrisatie

De parametrisatie van de scenario's voor luchtverspreiding is ongewijzigd en overeenkomstig de modelparameters zoals in de eerdere studie van NRG zijn toegepast (De With, 2019). Wel dient nogmaals te worden vermeld dat de emissiebron is gebaseerd op de veronderstelde jaarlijkse doorzet van het NORM-houdend afval, deze wijkt af van de 1000 Mg zoals gehanteerd door Brenk. Hierbij wordt de emissie bepaald door hoeveelheid activiteit in het NORM vermenigvuldigd met de element specifieke lozingsfractie. De toevoeging van 100.000 Mg niet verontreinigd materiaal heeft zodoende geen invloed op de bronterm.

De element specifieke parameters voor Po, Pb en Tl waarmee de geloosde fractie activiteit (f_{av}) wordt bepaald (Tabel 6 en Tabel 7) zijn aangepast. Voor deze elementen wordt verondersteld dat 97% van het stof als vlieggas wordt afgevangen en het restant (3%) in het ROI gips terecht komt of als gas wordt afgevoerd. Deze aanpassing is vooral van belang voor de emissie van ^{210}Po en in iets mindere mate ^{210}Pb . Dit komt enerzijds door de betrekkelijk hoge dosisconversie factor van de genoemde radionucliden en anderzijds het feit dat bij verbranding het ^{210}Po met een kookpunt van 962°C vervluchtigd. ^{210}Pb is ook vluchtig in processen op hoge temperatuur, maar in mindere mate vanwege het hogere kookpunt (1744°C).

4.6 Scenario's voor verspreiding naar water

Beschrijving

Voor blootstelling in de omgeving ten gevolge van uitloging naar water vanaf de deponie worden drie scenario's gehanteerd. Het betreft hierbij blootstelling via secundaire ingestie voor leden van de bevolking. De scenario's zijn als volgt:

- G.1 Uitloging naar het grondwater (drinkwater, secundaire ingestie)

- O.1 Gebruik van oppervlaktewater (drinkwater, secundaire ingestie)
- O.2 Hergebruik van rioolslib als landbouwgrond (secundaire ingestie)

De rekenmodellen voor het oppervlaktewater (O.1 en O.2) zijn overgenomen uit het radiologisch model van SSK. Het rekenmodel voor het grondwater scenario is niet gebaseerd op het SSK model. Reden voor deze keuze is dat bij de validatie van het SSK model (De With, 2019) de modelresultaten significant afweken van de resultaten gerapporteerd door Thierfeldt en Wörlén (2004). Zodoende is hier gekozen voor het IAEA model beschreven in Safety Report Series No. 44 (IAEA, 2005). Meer details over de modellen voor lozing naar water zijn beschreven in de studie van Thierfeldt en Wörlén (2004) en De With (2019).

Parametrisatie

De parametrisatie van de scenario's voor luchtverspreiding is ongewijzigd en overeenkomstig de modelparameters zoals in de eerdere studie van NRG zijn toegepast (De With, 2019). Wel dient te worden vermeld dat aanpassingen in de verdunningsfactor ($f_{d,2}$) en de element specifieke fracties (f_{av}) van Pb en Po ook weer doorwerken naar de modellen voor waterverspreiding, dit omvat zowel het oppervlakte- als grondwater.

5 Resultaten en discussie

5.1 Toepassing scenariomodellen voor verbranding

Uitgangspunt in de scenariomodellen is een jaarlijkse doorzet aan filterafval van 600 Mg zoals voorzien in 2040 (Figuur 4). Met deze aanname is gekozen voor een horizon van 20 jaar waarmee tot na 2035 de doorzet van filterafval lager ligt dan wat nu op basis van de verschillende groeiambities wordt verwacht.

Aangenomen wordt dat deze afvalproductie als geheel naar één afvalverbrandingsinstallatie wordt afgevoerd – niet zijnde de ZAVIN – met een conservatief geschatte totale afval doorzet van 100.000 Mg. Op basis van deze gegevens kunnen de parameters voor blootstellingsduur bij transport (T1) en ontvangst (M1) als ook de verdunningsfactor voor de resterende scenario's worden bepaald. De gehanteerde parameters zijn weergegeven in Tabel 8. Alle andere parameters, exclusief het dosis criterium en de gehanteerde dosiscoëfficiënten zoals besproken in Hoofdstuk 3, zijn ongewijzigd. Een volledig overzicht van de gehanteerde model input is te vinden in Bijlage A.

Tabel 8 Modelparameters voor de situatie 2040.

| | T1 | M1 | M2-4 |
|---|----|----|-------|
| Blootstellingstijd | | | |
| Extern t_e (h·yr ⁻¹) | 60 | 6 | - |
| Inhalatie t_e (h·yr ⁻¹) | 6 | 6 | - |
| Ingestie (direct) t_e (h·yr ⁻¹) | 6 | 6 | - |
| Gebruik, verdunning en verrijking | | | |
| Verdunningsfactor met afval $f_{d,2}$ (-) | - | - | 0,006 |

Met de bovenstaand beschreven modelinvoer zijn de rekenresultaten verkregen voor de natuurlijke radionucliden van ²³⁸U, ²³⁵U en ²³²Th (deel)reeksen en ⁴⁰K zoals weergegeven in Tabel 9. Uit de resultaten blijkt dat het transport scenario T1 veelal het beperkende scenario is gevolgd door het toepassingsscenario S6. Voor deze beide scenario's geldt dat de bijdrage van externe straling dominant is. Voor de nucliden ²¹⁰Pb en ²¹⁰Po betreft het de ingestie en inhalatie die dominant is, zodoende is hier het lucht emissie scenario L3 beperkend. In dit scenario vormt indirecte ingestie de belangrijkste blootstellingsroute. Een meer gedetailleerd overzicht van de resultaten is weergegeven in Bijlage C.

Tabel 9 Samenvatting van de rekenresultaten voor de NORM nucliden en deelreeksen met beperkende scenario en afronding op basis van IAEA en RP-122 II systematiek.

| Nuclide | Scenario | Resultaat | Afronding IAEA ¹ | Afronding RP-122 II ² |
|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| | (-) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) |
| ²³⁸ U-sec | T1 | 3.2·10 ¹ | 1·10 ¹ | 5·10 ¹ |
| ²³⁸ U-nat | T1 | 2.9·10 ² | 1·10 ² | 5·10 ² |
| ²³⁰ Th | T1 | 4.7·10 ² | 1·10 ³ | 5·10 ² |
| ²²⁶ Ra+ | S6 | 4.2·10 ¹ | 1·10 ² | 5·10 ¹ |
| ²¹⁰ Pb+ | L3 | 3.4·10 ² | 1·10 ³ | 5·10 ² |
| ²¹⁰ Po | L3 | 8.7·10 ¹ | 1·10 ² | 1·10 ² |
| ²³⁵ U-sec | T1 | 3.7·10 ¹ | 1·10 ² | 5·10 ¹ |
| ²³⁵ U+ | S6 | 4.4·10 ² | 1·10 ³ | 5·10 ² |
| ²³¹ Pa | T1 | 1.7·10 ² | 1·10 ² | 1·10 ² |
| ²²⁷ Ac+ | T1 | 5.2·10 ¹ | 1·10 ² | 5·10 ¹ |
| ²³² Th-sec | T1 | 2.5·10 ¹ | 1·10 ¹ | 5·10 ¹ |
| ²³² Th | T1 | 3.0·10 ² | 1·10 ² | 5·10 ² |
| ²²⁸ Ra+ | S6 | 8.1·10 ¹ | 1·10 ² | 1·10 ² |
| ²²⁸ Th+ | T1 | 4.1·10 ¹ | 1·10 ² | 5·10 ¹ |
| ⁴⁰ K | S6 | 4.8·10 ² | 1·10 ³ | 5·10 ² |

¹ IAEA procedure: $3 \cdot 10^{n-1} < x < 3 \cdot 10^n \rightarrow 1 \cdot 10^n$.

² RP-122 II procedure: $7,07 \cdot 10^{n-1} < x < 2,24 \cdot 10^n \rightarrow 1 \cdot 10^n$ en $2,24 \cdot 10^n \leq x \leq 7,07 \cdot 10^n \rightarrow 5 \cdot 10^n$.

5.2 Toepassing van de RP-122 II systematiek

Voor toepassing van de vrijgave systematiek conform RP-122 II is gebruik gemaakt van de in 2018 door NRG in opdracht van de ANVS ontwikkelde rekentool (Görts en Timmermans, 2018). Hierbij zijn alle beschikbare blootstellingsscenario's voor werkers en publiek beschouwd, en is als materiaal gekozen voor As. Uitgangspunt is het gebruik van de standaard modelparameters. Alleen voor de werkersscenario's W.1, W.2 en W.3b waar met het onverdunde NORM wordt gewerkt is de blootstellingsduur aangepast, en voor de resterende scenario's is de NORM fractie bijgesteld. De aanpassingen zijn gedaan conform de modelparameters zoals beschreven in Hoofdstuk 5.1. De afwijkende modelparameters zijn weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10 Aangepaste modelparameters zoals gehanteerd in de RP-122 II rekentool.

| | W.1 & W.2 | W.3b | Rest scenario's |
|--|-----------|------------|-----------------|
| Blootstellingstijd | | | |
| Rijden (h·yr ⁻¹) | 60 | - | - |
| (af)laden (h·yr ⁻¹) | 6 | - | - |
| Bewerken en opslag (h·yr ⁻¹) | - | 6 / 1800* | - |
| Gebruik, verdunning en verrijking | | | |
| Norm fractie (-) | - | 1 / 0.006* | 0.006 |

* Voor bewerking van het onverdunde NORM wordt een blootstellingsduur van 6 uur gehanteerd, en voor opslag wordt het verdunde NORM gehanteerd met een standaard blootstellingsduur van 1800 uur per jaar.

De uitkomsten van de berekeningen met de RP-122 II rekentool, zoals getoond in Tabel 11, zijn in veel gevallen qua grote vergelijkbaar met de resultaten verkregen uit het radiologische model voor verbranding. Daar waar sprake is van een verschil betreft dit in alle gevallen een vrijgavewaarde welke lager is wanneer berekend met het radiologische model voor verbranding.

Tabel 11 Samenvatting van de rekenresultaten verkregen met de RP-122 II rekentool met beperkende scenario en afronding op basis van IAEA en RP-122 II systematiek. De resultaten welke afwijken van de in Tabel 9 gerapporteerde waarden zijn rood gemarkeerd.

| Nuclide | Scenario | Resultaat | Afronding IAEA ¹ | Afronding RP-122 II ² |
|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| | (-) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) |
| ²³⁸ U-sec | W.1 – W.2 | 5.5·10 ¹ | 1·10 ² | 5·10 ¹ |
| ²³⁸ U-nat | W. 3b | 8.1·10 ² | 1·10 ³ | 1·10 ³ |
| ²³⁰ Th | W.3b | 1.3·10 ³ | 1·10 ³ | 1·10 ³ |
| ²²⁶ Ra+ | W.1 – W.2 | 5.9·10 ¹ | 1·10 ² | 5·10 ¹ |
| ²¹⁰ Pb+ | W.3b | 2.0·10 ³ | 1·10 ³ | 1·10 ³ |
| ²¹⁰ Po | P.1 | 1.1·10 ³ | 1·10 ³ | 1·10 ³ |
| ²³⁵ U-sec | W.3b | 1.1·10 ² | 1·10 ² | 1·10 ² |
| ²³⁵ U+ | W.6 | 9.7·10 ² | 1·10 ³ | 1·10 ³ |
| ²³¹ Pa | W.3b | 5.1·10 ² | 1·10 ³ | 5·10 ² |
| ²²⁷ Ac+ | W.3b | 1.6·10 ² | 1·10 ² | 1·10 ² |
| ²³² Th-sec | W.1 – W.2 | 3.7·10 ¹ | 1·10 ² | 5·10 ¹ |
| ²³² Th | W.3b | 8.2·10 ² | 1·10 ³ | 1·10 ³ |
| ²²⁸ Ra+ | W.1 – W.2 | 1.1·10 ² | 1·10 ² | 1·10 ² |
| ²²⁸ Th+ | W.1 – W.2 | 5.6·10 ¹ | 1·10 ² | 5·10 ¹ |
| ⁴⁰ K | W.1 – W.2 | 6.0·10 ² | 1·10 ³ | 5·10 ² |

¹ IAEA procedure: $3 \cdot 10^{n-1} < x < 3 \cdot 10^n \rightarrow 1 \cdot 10^n$.

² RP-122 II procedure: $7,07 \cdot 10^{n-1} < x < 2,24 \cdot 10^n \rightarrow 1 \cdot 10^n$ en $2,24 \cdot 10^n \leq x \leq 7,07 \cdot 10^n \rightarrow 5 \cdot 10^n$.

5.3 Beschouwing van de bevindingen

De rekenresultaten uit deze studie tonen voor de hier beschouwde afvalstroom van 600 Mg per jaar, specifieke vrijgavewaarden welke substantieel hoger liggen dan de algemene vrijgave- en vrijstellingswaarden. Met een specifieke vrijgavegrenswaarde van 1000 Bq·g⁻¹ voor ²¹⁰Pb en 100 Bq·g⁻¹ voor ²¹⁰Po zoals bepaald in deze studie tezamen met de specifieke vrijgavewaarde voor de andere radionucliden kan bij benadering 80% van het totale filterafval naar een verbrandingsinstallatie worden afgevoerd.

De rekenresultaten verkregen uit het radiologisch model voor verbranding laten zien dat er binnen de geldende algemene criteria voor vrijgave ruimte is voor verhoging van de vrijgavewaarden. Deze verhoging kan volledig worden toegeschreven aan de gehanteerde blootstellingsduur voor transport en ontvangst van het onverdunde NORM, en de toegepaste verdunningsfactor als gevolg van opmenging met regulier niet NORM-houdend afval. Beide parameters zijn onlosmakelijk verbonden met de hier beschouwde doorzet van het filterafval. Daarmee zijn de gepresenteerde vrijgavewaarden niet verkregen uit bijstelling van

modelparameters die afbreuk doen aan de conservatieve aard van de radiologische modellen. Voorbeelden hiervan zijn de keuze voor het handhaven van de blootstellingsroutes via ingestie en inhalatie ondanks dat is voorzien in dubbeldichte verpakking, maar ook de blootstelling via uitloging naar oppervlakte- en grondwater ondanks dat de geldende eisen op een deponie veel scherper zijn dan in de modelberekening wordt verondersteld.

Met de keuze voor doorzet van 600 Mg filterafval per jaar is gekozen voor een afvalstroom welke correspondeert met de verwachte doorzet over 20 jaar. Op basis van de huidige groeiverwachtingen ligt tot ruim na 2035 de gekozen doorzet hoger dan wat in het sterkste groeiscenario wordt verwacht. Tevens ligt de doorzet meer dan een factor 20 hoger dan de huidige afvalproductie. Daarmee zit er in de gekozen doorzet, voor de overzienbare toekomst, een substantiële overschatting. Een verdere verhoging van de doorzet zal niet wegnemen eventuele onzekerheden die mogelijk worden gezien in de hier gekozen aanpak. Het is daarom ook van belang te benoemen de juridische middelen voor het monitoren en handhaven van deze afvalstromen door de overheid. Zo kan worden voorgesteld dat de beheerder van de AVI wordt gehouden aan het bijhouden van een administratie van het filterafval dat onder specifieke vrijgave wordt aangeboden. Via deze administratie kan de overheid controlerend en handhavend optreden om te borgen dat de doorzet van 600 Mg per jaar niet wordt overschreden.

6 Conclusies en aanbevelingen

De uitkomsten uit de hier voorliggende studie kunnen als volgt worden samengevat:

- Het radiologische model voor verbranding van radioactiefhoudend afval is ingezet om te komen tot specifieke vrijgavewaarden voor NORM-houdend filterafval afkomstig uit geothermische installaties.
- De vrijgavewaarden zijn bepaald voor de radionucliden van natuurlijke oorsprong (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th en ^{40}K) en de bijbehorende (deel)reeksen. De gehanteerde (deel)reeksen zijn in overeenstemming met de RP-122(II). Tevens is conform de RP-122(II) een dosislimiet van 0,3 mSv per jaar voor werkers en leden van de bevolking gehanteerd, en zijn de DC's voor inhalatie en ingestie overgenomen.
- De toegepaste doorzet van filterafval is 600 Mg per jaar. Dit is een raming op basis van het verwachte filterafval voor 2040. Deze raming is tot ruim na 2035 een conservatieve aanname van het verwachte filterafval. Op basis van deze doorzet is de blootstellingsduur voor transport en ontvangst, en een verdunningsfactor voor opmenging met niet NORM-houdend afval afgeleid.
- De berekende specifieke vrijgavewaarden liggen bij benadering twee à drie orders magnitude hoger dan de algemene vrijgave- en vrijstellingswaarden uit het Bbs.
- Ter verificatie is voor dezelfde doorzet van NORM afval de RP-122(II) rekentool toegepast. De hieruit verkregen rekenresultaten komen enigszins overeen met de berekende vrijgavegrenswaarden voor verbranding.

7 References

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).

DAGO (2020)

DAGO inventarisatie van filterafval, DAGO notitie, The Netherlands, 2020.

EBN (2018)

Masterplan Aardwarmte in Nederland - Een brede basis voor een duurzame warmtevoorziening, Energie Beheer Nederland, Mei 2018.

EC (2002)

Practical use of the concepts of clearance and exemption - Part II Application of the concepts of exemption and clearance to natural radiation sources, Radiation protection 122, European Commission, Luxemburg, 2002.

EZK (2018)

Ministerie van Economische Zaken en Klimaat, Beleidsbrief geothermie, 8 februari 2018, Den Haag, DGETM-EO / 18010306, 2018.

Görts P.C., Timmermans C.W.M. (2018)

Specific clearance of NORM - A calculation tool based on RP-122 part II for regulatory purposes, 5th European IRPA congress, The Hague, The Netherlands.

IAEA (2005)

Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance, Safety Report Series No. 44, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

IM (2016)

Afvalverwerking in Nederland – gegevens 2015. Ministerie van Infrastructuur en Milieu – Rijkswaterstaat – Werkgroep Afvalregistratie, ISBN 978-94-91750-13-7, Utrecht, The Netherlands, 2018.

Kunze C., Schulz H., Ettenhuber E., Schellenberger A., Dilling J. (2019)

Discharges of dust from NORM facilities: Key parameters to assess effective doses for public exposure, J. Sustain. Min., Vol 18(1), pp. 31-37.

SSK (2006)

Freigabe von Stoffen zur Beseitigung – Empfehlung der Strahlenschutzkommission, Verabschiedet in der 213. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 06. Dezember 2006.

Thierfeldt S., Wörten S. (2004)

Fortentwicklung des radiologischen Modells für die Berechnung von Freigabewerten für die Freigabe zur Beseitigung, Bericht zum BMU-Vorhaben StSch 4279, Brenk Systemplanung, Aachen, 2004.



Timmermans C., De With G. (2017)

Vrijgave van radioactieve afvalstoffen via afvalverbranding, NRG notitie, datum 29 augustus 2017.

De With (2019)

Specifieke vrijgave bij afvalverbranding - Radiologische modellen voor verbranding van vloeistoffen, vloeistofhoudende en vaste stoffen, NRG rapport 2.4446/19.153604, Arnhem, The Netherlands, 2019.

Lijst van tabellen

| | |
|---|----|
| Tabel 1 Details van de DAGO inventarisatie (DAGO, 2020) met aantal geothermie locaties, filterafval, en activiteitsconcentraties voor de vijf regio's in Nederland. Activiteitsconcentraties zijn uitgedrukt in een gemiddelde met onzekerheid (± 1 SD) plus min en max waarden..... | 13 |
| Tabel 2 Samenvatting van de nucliden en nuclidenketens welke in de modellering zijn gehanteerd. | 19 |
| Tabel 3 Dosiscoëfficiënten voor inhalatie (EC, 2002). | 20 |
| Tabel 4 Dosiscoëfficiënten voor ingestie (EC, 2002)..... | 20 |
| Tabel 5 Dosiscoëfficiënten voor externe straling. | 21 |
| Tabel 6 Massafracties (f_{mv}) van de verschillende restmaterialen als percentage van het onverbrande materiaal. | 25 |
| Tabel 7 Scheiding van elementen (f_{av}) in de slakken, schroot, stof, gips en gas. | 25 |
| Tabel 8 Modelparameters voor de situatie 2040. | 30 |
| Tabel 9 Samenvatting van de rekenresultaten voor de NORM nucliden en deelreeksen met beperkende scenario en afronding op basis van IAEA en RP-122 II systematiek. | 31 |
| Tabel 10 Aangepaste modelparameters zoals gehanteerd in de RP-122 II rekentool. | 31 |
| Tabel 11 Samenvatting van de rekenresultaten verkregen met de RP-122 II rekentool met beperkende scenario en afronding op basis van IAEA en RP-122 II systematiek. De resultaten welke afwijken van de in Tabel 9 gerapporteerde waarden zijn rood gemarkeerd..... | 32 |
| Tabel 12 Beschrijving scenarioparameters T1 tot L3..... | 39 |
| Tabel 13 Geometrie specificaties voor de bepaling van de dosiscoëfficiënt voor externe straling. | 40 |
| Tabel 14 Individuele rekenresultaten voor alle blootstellingsscenario's en NORM nucliden uitgaande van een doorzet van 600 Mg per jaar filterafval..... | 43 |

Lijst van figuren

| | |
|---|----|
| Figuur 1 Foto's van een zakfilter..... | 10 |
| Figuur 2 Foto's van een kaarsfilter..... | 11 |
| Figuur 3 Vijf geologische regio's in Nederland waar geothermie plaatsvindt; Regio 1 – Boven jura/ onder krijt, Regio 2 – Boven jura / onder krijt, Regio 3 – Rotliegend, Regio 4 – Rotliegend en Regio 5 – Onder carboon. | 12 |
| Figuur 4 Geraamde doorzet van het totale filterafval voor de periode tot 2050 (DAGO, 2020). Bij benadering 50% van het totale filterafval is nu ingedeeld als vergunningplichtig. — Groeiscenario gemiddeld, — Groeiscenario laag – gebaseerd op geraamde energieproductie van de rijksoverheid, — Groeiscenario hoog – gebaseerd op geraamde energieproductie van de sector..... | 14 |
| Figuur 5 Schematisch overzicht van het radiologisch model voor de Nederlandse situatie..... | 17 |
| Figuur 6 Procesdiagram van een moderne avalverbrandingsinstallatie..... | 24 |

Tabel 12 Beschrijving scenarioparameters T1 tot L3.

| Scenario | T1 | M1 | M2 | M3 | M4 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | D1 | D3 | L1 | L2 | L3 | |
|---|-----|-----|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------|---------|---------|
| Algemene parameters | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Begin van het scenario t_1 (d) | 1 | 1 | 1 | 7 | 7 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Tijdsduur van het scenario t_2 (d) | 0.1 | 0.0 | 5.0 | 0.1 | 0.1 | 5.0 | 365 | 365 | 5.0 | 365 | 365 | 0.0 | 5.0 | - | 1.0 | - | |
| Blootstellingstijd | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Extern t_e (h·yr ⁻¹) | 60 | 6 | 1800 | 1000 | 300 | 200 | 2000 | 2000 | 200 | 8000 | 8000 | 10 | 50 | 1000 | 0 | 0 | |
| Inhalatie t_e (h·yr ⁻¹) | 6 | 6 | 0 | 100 | 50 | 200 | 0 | 0 | 200 | 0 | 0 | 10 | 50 | 0 | 1000 | 0 | |
| Ingestie (direct) t_e (h·yr ⁻¹) | 6 | 6 | 0 | 100 | 50 | 200 | 0 | 0 | 200 | 0 | 0 | 10 | 50 | 0 | 0 | 0 | |
| Gebruik, verdunning en verrijking | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Verdunningsfactor met afval $f_{d,2}$ (-) | - | - | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Verdunningsfactor met mat. $f_{d,3}$ (-) | - | - | - | - | - | 1 | 1 | 0.25 | 1 | 1 | 0.25 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Verrijkingfactor (-) | - | - | - | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 6 en 7 | Tabel 7 | Tabel 7 | Tabel 7 |
| Externe straling | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Geometrie code (-) ¹ | A | B | F | A | A | D | G | H | I | I | I ² | B | C/D ³ | J | - | - | |
| Inhalatie en ingestie | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Stofconcentratie C_d (mg·m ⁻³) | 1 | 1 | - | 1 | 1 | 1 | - | - | 0.1 | - | - | 1 | 0.2/1 ³ | - | - | - | |
| Concentratiefactor stof f_c (-) | 10 | 10 | - | 1 | 1 | 1 | - | - | 1 | - | - | 10 | 10 | - | - | - | |

¹ Details met betrekking tot de blootstellingsgeometrie zijn opgenomen in Tabel 13.

² Een correctiefactor van 2,5 is toegepast t.o.v. de originele conversiecoëfficiënten om zo rekening te houden met de hogere oppervlakte dichtheid van de wanden.

³ De totale blootstellingsduur is verdeeld over beide situaties met 3 delen voor situatie 1 en 1 deel voor situatie 2.

Tabel 13 Geometrie specificaties voor de bepaling van de dosiscoëfficiënt voor externe straling.

| Geometrie | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J |
|---------------------------------|-------------|-------------|---------|---------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|----------|
| Toegepast in scenario | T1, M3, M4 | M1, D1 | D3 | D3, S1 | D2 | M2 | S2 | S3 | S4, S5, S6 | L1 |
| Geometrie (m) | 2 x 2,5 x 4 | 2 x 2,5 x 4 | 10 x 10 | 10 x 10 | 10 x 10 x 4 | 20 x 20 x 5 | 22,5 x 22,5 | 1 x 1 x 1 | 4 x 3 x 2,5 | oneindig |
| Dikte (m) | - | - | 0,2 | 0,2 | - | - | 0,5 | - | 0,05 | vlak |
| Dichtheid (g·cm ⁻³) | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 | 1 | 2 | 0,2 | 1 | - |
| Afstand (m) | 1,2 | 1,2 | 1 | 1 | 2 | 5 | 1 | 1 | midden | 1 |
| Afscherming Fe (mm) | 2 | - | 2 | - | 1 | 1 | - | - | - | - |
| Afscherming beton (cm) | - | - | - | - | - | - | 10 | - | - | - |

Bijlage B Aanvullingen bij de ontwikkeling en evaluatie van de radiologische modellen

B.1 Radiologisch rekenmodel SSK

De dosiscoëfficiënten voor inhalatie en ingestie zijn overgenomen uit de RP-122 II, en zijn als aparte nucliden toegevoegd aan de rekentool. De dosiscoëfficiënten zijn inclusief bijbehorende dochterproducten. In de berekening wordt verondersteld dat de gehele (deel)reeks het moedernuclide volgt gedurende alle bewerkingen. Dit is in de meeste gevallen een adequate veronderstelling. Echter, in een enkele situatie is dit niet adequaat. Bij verbranding hebben de elementen Ra, Ac, Th, Pa en U andere scheidingsfactoren dan Tl, Pb, Bi en Po. Voor nucliden uit de vervalreeksen van ^{235}U en ^{232}Th is dit niet bezwaarlijk omdat hier de laatstgenoemde elementen een zeer korte halfwaardetijd hebben. Voor de vervalreeks van ^{238}U -sec is dit anders vanwege de aanwezigheid van ^{210}Pb met een halfwaardetijd van 22,3 jaar. Dit nuclide tezamen met de dochters ^{210}Bi en ^{210}Po kan zich door een grotere scheidingsfractie in schroot, stof, gips en gas in verschillende materiaalstromen en emissies manifesteren, welke op basis van het moedernuclide ^{238}U zullen worden onderschat. Om deze onderschatting te voorkomen is voor ^{238}U -sec de dosisbijdrage van ^{210}Pb plus dochters (^{210}Pb , ^{210}Bi en ^{210}Po) toegevoegd. Deze toevoeging is toegepast in de volgende scenario's: M4, S3, S4, S5, L1, L2, L3, G1, O1 en O2.

De dosiscoëfficiënten voor externe straling zijn primair verkregen uit het optellen en aftrekken van de reeds beschikbare dosiscoëfficiënten. Voor een aantal radionucliden was deze bepaling niet adequaat en zijn de dosiscoëfficiënten opnieuw berekend, dit betreft de radionucliden ^{230}Th , $^{210}\text{Pb}+$ en ^{232}Th .

Bijlage C Scenario specifieke rekenresultaten

Tabel 14 Individuele rekenresultaten voor alle blootstellingsscenario's en NORM nucliden uitgaande van een doorzet van 600 Mg per jaar filterafval.

| Nuclide | T1 | D1 | D3 | M1 | M2 | M3 | M4 | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | L1 | L2 | L3 | G1 | O1 | O2 | Scenario | Level | Round - 1 | Round - 2 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (-) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) | (Bq·g ⁻¹) |
| ²³⁸ U-sec | 3.2E+01 | 3.4E+02 | 2.2E+02 | 6.5E+01 | 1.7E+02 | 1.2E+02 | 3.5E+02 | 1.1E+02 | 5.6E+01 | 1.2E+08 | 4.5E+02 | 3.0E+02 | 3.9E+01 | 1.4E+10 | 2.5E+04 | 6.8E+01 | 5.9E+02 | 1.0E+02 | 4.1E+06 | T1 | 3.2E+01 | 1E+01 | 5E+01 |
| ²³⁸ U-nat | 2.9E+02 | 3.0E+04 | 1.5E+04 | 3.0E+02 | 1.8E+04 | 4.8E+03 | 4.5E+04 | 2.5E+03 | 5.5E+03 | | 2.3E+05 | 2.0E+04 | 2.4E+03 | 7.0E+11 | 1.5E+06 | 4.0E+05 | 3.5E+04 | 3.3E+05 | 1.0E+09 | T1 | 2.9E+02 | 1E+02 | 5E+02 |
| ²³⁰ Th | 4.7E+02 | 4.7E+04 | 2.5E+04 | 4.7E+02 | 2.4E+06 | 1.2E+04 | 9.3E+04 | 5.8E+03 | 7.2E+06 | | 2.8E+05 | 1.8E+06 | 2.1E+05 | 5.0E+13 | 1.9E+06 | 7.9E+04 | 7.3E+05 | 6.3E+07 | 1.1E+11 | T1 | 4.7E+02 | 1E+03 | 5E+02 |
| ²²⁶ Ra+ | 5.1E+01 | 2.6E+04 | 4.1E+03 | 2.6E+02 | 1.7E+02 | 1.3E+02 | 1.8E+03 | 1.3E+02 | 5.8E+01 | | 1.3E+04 | 3.5E+02 | 4.2E+01 | 1.7E+10 | 2.8E+06 | 4.2E+04 | 7.1E+03 | 4.5E+04 | 6.8E+07 | S6 | 4.2E+01 | 1E+02 | 5E+01 |
| ²¹⁰ Pb+ | 6.0E+02 | 6.0E+02 | 4.4E+02 | 6.0E+02 | 3.1E+06 | 1.5E+04 | 1.2E+03 | 7.5E+03 | 2.1E+09 | 1.3E+08 | 1.2E+03 | 4.0E+03 | 4.8E+04 | 2.0E+11 | 4.7E+04 | 3.4E+02 | 2.9E+124 | 2.8E+04 | 7.1E+06 | L3 | 3.4E+02 | 1E+03 | 5E+02 |
| ²¹⁰ Po | 3.4E+02 | 3.6E+02 | 2.6E+02 | 3.4E+02 | 3.8E+07 | 8.8E+03 | 7.1E+02 | 5.0E+03 | 3.2E+07 | 3.1E+09 | 8.0E+02 | 1.7E+06 | 2.0E+07 | 2.9E+15 | 6.0E+04 | 8.7E+01 | | 1.1E+02 | 2.5E+07 | L3 | 8.7E+01 | 1E+02 | 1E+02 |
| ²³⁵ U-sec | 3.7E+01 | 4.1E+03 | 1.9E+03 | 4.1E+01 | 1.1E+03 | 4.4E+02 | 4.6E+03 | 2.0E+02 | 2.9E+02 | | 1.7E+04 | 1.0E+03 | 1.2E+02 | 3.4E+10 | 2.0E+05 | 5.9E+03 | 5.2E+02 | 4.9E+03 | 1.5E+07 | T1 | 3.7E+01 | 1E+02 | 5E+01 |
| ²³⁵ U+ | 4.6E+02 | 6.4E+04 | 2.1E+04 | 6.4E+02 | 5.4E+03 | 3.0E+03 | 3.6E+04 | 9.6E+02 | 1.3E+03 | | 1.2E+05 | 3.7E+03 | 4.4E+02 | 1.1E+11 | 3.1E+06 | 8.6E+05 | 7.7E+04 | 7.2E+05 | 2.2E+09 | S6 | 4.4E+02 | 1E+03 | 5E+02 |
| ²³¹ Pa | 1.7E+02 | 1.8E+04 | 9.6E+03 | 1.8E+02 | 1.6E+04 | 3.2E+03 | 2.9E+04 | 1.6E+03 | 4.3E+03 | | 8.1E+04 | 1.7E+04 | 2.1E+03 | 5.7E+11 | 7.9E+05 | 2.4E+04 | 1.8E+03 | 1.7E+04 | 6.2E+07 | T1 | 1.7E+02 | 1E+02 | 1E+02 |
| ²²⁷ Ac+ | 5.2E+01 | 5.8E+03 | 2.7E+03 | 5.8E+01 | 1.4E+03 | 5.9E+02 | 6.3E+03 | 2.9E+02 | 4.1E+02 | | 2.5E+04 | 1.5E+03 | 1.8E+02 | 1.0E+11 | 2.9E+05 | 8.4E+03 | 1.5E+127 | 6.1E+03 | 4.3E+07 | T1 | 5.2E+01 | 1E+02 | 5E+01 |
| ²³² Th-sec | 2.5E+01 | 6.0E+03 | 1.7E+03 | 6.0E+01 | 1.2E+02 | 9.2E+01 | 1.2E+03 | 8.7E+01 | 4.0E+01 | | 8.4E+03 | 2.5E+02 | 3.0E+01 | 1.2E+10 | 3.2E+05 | 7.8E+03 | 6.7E+04 | 6.2E+06 | 1.1E+10 | T1 | 2.5E+01 | 1E+01 | 5E+01 |
| ²³² Th | 3.0E+02 | 3.2E+04 | 1.6E+04 | 3.2E+02 | 7.1E+06 | 7.5E+03 | 6.0E+04 | 3.7E+03 | 4.6E+07 | | 2.2E+05 | 3.4E+06 | 4.1E+05 | 9.1E+13 | 1.1E+06 | 7.0E+04 | 6.0E+05 | 5.6E+07 | 1.0E+11 | T1 | 3.0E+02 | 1E+02 | 5E+02 |
| ²²⁸ Ra+ | 8.6E+01 | 3.1E+04 | 6.8E+03 | 3.1E+02 | 3.4E+02 | 2.5E+02 | 3.3E+03 | 2.4E+02 | 1.2E+02 | | 2.1E+04 | 6.7E+02 | 8.1E+01 | 1.8E+11 | 1.7E+06 | 7.0E+03 | 1.2E+50 | 7.8E+03 | 6.8E+07 | S6 | 8.1E+01 | 1E+02 | 1E+02 |
| ²²⁸ Th+ | 4.1E+01 | 9.2E+03 | 2.8E+03 | 9.1E+01 | 1.9E+02 | 1.5E+02 | 1.9E+03 | 1.5E+02 | 7.7E+01 | | 1.6E+04 | 5.3E+02 | 6.3E+01 | 3.7E+11 | 5.9E+05 | 5.3E+04 | | 4.3E+07 | 1.6E+12 | T1 | 4.1E+01 | 1E+02 | 5E+01 |
| ⁴⁰ K | 5.6E+02 | 3.5E+05 | 5.0E+04 | 3.5E+03 | 1.8E+03 | 1.4E+03 | 1.9E+04 | 1.6E+03 | 6.2E+02 | | 1.6E+05 | 4.0E+03 | 4.8E+02 | 2.1E+11 | 6.8E+09 | 3.7E+05 | 2.3E+03 | 2.4E+04 | 3.7E+07 | S6 | 4.8E+02 | 1E+03 | 5E+02 |