

Specifieke vrijgave bij afvalverbranding

Radiologische modellen voor
verbranding van vloeistoffen,
vloeistofhoudende en vaste stoffen

In opdracht van ANVS

auteur(s):	██████████	beoordeeld:	██████████
naam:	19 153604 24446- ANVS_SpecVrijgaveVerbranding.docx	goedgekeurd:	██████████
referentienr.:	2.4446/19.153604		
76 pagina's	18-6-2019		

Inhoudsopgave

Samenvatting		5
1	Inleiding	7
2	Overzicht van het SSK radiologisch model	9
2.1	Algemene beschrijving	9
2.2	Overzicht van de rekensystematiek	10
2.2.1	Blootstellingspaden	10
2.2.2	Dosiscoëfficiënten	11
2.2.3	Secundaire ingestie via water	12
2.2.4	Secundaire ingestie via lucht	15
2.3	Overzicht van de blootstellingsscenario's	15
3	Toetsing aan de IAEA systematiek	16
3.1	Vergelijk van de uitgangspunten	16
3.2	Vergelijk van de blootstellingspaden	16
3.3	Vergelijk van de blootstellingsscenario's	17
3.4	Vergelijk van de parameterwaarden	22
3.4.1	Scenario WL	22
3.4.2	Scenario WF	23
3.4.3	Scenario WO	25
3.4.4	Scenario RL-C en RL-A	27
3.4.5	Scenario RF	27
3.4.6	Scenario RH	28
3.4.7	Scenario RP	30
3.4.8	Scenario RW-C en RW-A	30
3.5	Bevindingen uit de toetsing	31
3.5.1	Uitgangspunten en blootstellingspaden	31
3.5.2	Scenario's en modelparametrisatie	31
3.5.3	Aanbevelingen	32
4	Radiologisch model voor Nederlandse situatie	33
4.1	Beschrijving van het model	33
4.1.1	Uitgangspunten	33
4.1.2	Verwerkingsstappen	33
4.2	Beschrijving van de scenariomodellen	34
4.2.1	Scenario's voor transport	34
4.2.2	Scenario's voor afvalverbranding	35
4.2.3	Scenario's voor hergebruik van restmaterialen	38
4.2.4	Scenario's voor afvoer van restmaterialen naar een deponie	39
4.2.5	Scenario's voor verspreiding naar lucht	40
4.2.6	Scenario's voor verspreiding naar grondwater vanaf deponie	41
4.2.7	Scenario's voor verspreiding naar oppervlaktewater vanaf deponie	42
5	Aanvullende NVS nucliden	43
5.1	Dosiscoëfficiënten	43
5.2	Elementspecifieke parameters	45
5.3	Dochternucliden en activiteitsaandelen	45
6	Bepaling specifieke vrijgavegrenswaarden	47
6.1	Afvoer naar AVI van ZAVIN	47



6.2	Afvoer naar AVI niet zijnde ZAVIN	47
7	Conclusies	49
8	Referenties	50
	Lijst van tabellen	53
	Lijst van figuren	54
Bijlage A	Validatie van de scenariomodellen	55
A.1	Overzicht van de validatie resultaten	55
A.2	Bevindingen uit de validatie	63
A.2.1	Scenariomodellen	63
A.2.2	Radionucliden	66
Bijlage B	Beschrijving van de modelparameters	69
Bijlage C	Overzicht rekenresultaten van de NCS nucliden	71

Samenvatting

Sinds het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming van kracht is, zijn de generieke grenswaarden voor vrijgave over het algemeen lager dan de grenswaarden die onder het voormalige Besluit stralingsbescherming golden. Daarnaast gelden de grenswaarden alleen voor vaste stoffen en niet voor vloeistoffen of vloeistof bevattende materialen. Zodoende is reeds in 2017 een eerste beleidsonderzoek gedaan om te onderzoeken of de specifieke vrijgavegrenswaarden uit de Duitse regelgeving, welke zijn berekend op basis van het radiologisch model van het Duitse Strahlenschutzkommission (SSK) ook in Nederland kunnen worden toegepast. Voordat hier toe kan worden overgegaan is het noodzakelijk aan te tonen in hoeverre het SSK-model gelijkwaardig is aan, dan wel dat de aannames in het model conservatief genoeg zijn ten opzichte van de radiologische modellen en dosisriteria van de Europese Commissie of het IAEA.

Gegeven bovengenoemde achtergrond is het doel van deze studie i. gelijkwaardigheid van het SSK model te toetsen, waar nodig modelparameters aan te passen aan de Nederlandse praktijk en ontbrekende blootstellingspaden of scenario's toe te voegen, ii. operationeel maken van het radiologisch model met bijbehorende aanvullingen voor Nederland, en iii. bepalen van de specifieke vrijgavegrenswaarden voor de gewenste radionucliden.

Toetsing van het SSK radiologisch model aan de uitgangspunten en scenario's van de IAEA systematiek, heeft geresulteerd in een aantal aanbevelingen. Dit omvat o.a. toevoeging van een extra scenario voor hergebruik van verbrandingsresiduen in bouwmaterialen en het aanpassen van verschillende verdunningsfactoren. Met inachtneming van deze aanbevelingen is geconcludeerd dat het radiologisch model van SSK gelijkwaardig is aan de modellen en dosisriteria van de IAEA.

Het radiologisch model van SSK is i.h.k.v. deze studie uitgewerkt voor de Nederlandse situatie en gevalideerd. Het model is opgesteld in de vorm van een Excel© tool en aangevuld met additionele scenario's, radionucliden en opties voor verschillende verwerkingsroutes. Dit omvat o.a. de mogelijkheid te kiezen optie voor verwerking bij de ZAVIN of verwerking bij een afvalverbrandingsinstallatie niet zijnde de ZAVIN. Daarnaast is het radiologisch model aangevuld met in totaal 22 radionucliden uit de door de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie opgestelde lijst van kunstmatige radionucliden die momenteel worden toegepast.

Op basis van het voor Nederland ontwikkelde radiologisch model zijn specifieke vrijgavegrenswaarden opgesteld. De resultaten van de 64 door de NCS geïdentificeerde radionucliden zijn opgenomen in deze rapportage. Een volledig overzicht van de specifieke vrijgavegrenswaarden van alle meer dan 300 radionucliden is beschikbaar in de Excel© rekentool.

1 Inleiding

In 2017 is de Euratom Richtlijn 2013/59 geïmplementeerd in het nieuwe Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (NL, 2017) (Bbs). Het Bbs schrijft een controlestelsel voor handelingen met bronnen van ioniserende straling in geplande blootstellingsituaties voor. In het Bbs, en onderliggende regelgeving, zijn voor radioactieve stoffen grenswaarden opgenomen die bepalend zijn voor het moment waarop een handeling in het controlestelsel terechtkomt (vrijstellingsgrenswaarden) of het moment waarop de controle, vanwege het beperkte risico, niet langer nodig is (vrijgavegrenswaarden).

De generieke (onvoorwaardelijke) grenswaarden voor vrijgave in de richtlijn, zoals geïmplementeerd in het Bbs en onderliggende regelgeving, zijn over het algemeen lager dan de grenswaarden die onder het voormalige Besluit stralingsbescherming golden, en gelden alleen voor vaste materialen. Dit geldt zowel voor kunstmatige als voor natuurlijke radioactieve stoffen. Specifieke grenswaarden voor vloeistoffen en gasen alsmede hogere specifieke grenswaarden voor elke type materiaal kunnen vastgesteld worden bij beschikking of bij verordening. Dat kan voor aangewezen specifieke radioactieve materialen, voor radioactieve materialen afkomstig van daarbij aangewezen specifieke soorten handelingen of voor materialen behorend tot een daarbij aangewezen specifieke categorie (art 3.21 Bbs).

Voor kunstmatige radioactieve stoffen is middels eerder beleidsonderzoek vastgesteld dat de generieke grenswaarden voor vrijgave ook gebruikt kunnen worden voor de verbranding van vloeistoffen of vloeistof houdende vaste materialen, en is als zodanig ook zo in het Bbs geïmplementeerd als specifieke vrijgave. Dit is van belang voor de door de Nederlandse Commissie voor Stralingsdosimetrie (NCS) opgegeven 64 radionucliden (de NCS radionucliden) die momenteel worden gebruikt binnen de zorg-, onderzoeks- en productiesector (NCS, 2017). De afvalstoffen die deze nucliden bevatten worden nu verbrand in een afvalverbrandingsinstallatie (AVI). In dit beleidsonderzoek zijn ook specifieke vrijgave waarden voor de NCS radionucliden uit de Duitse regelgeving aangehaald of berekend op basis van het Duitse radiologische model (het SSK-model). Het Duitse radiologische model is uitgebreid beschreven in een publicatie van Brenk Systemplanung maar vooralsnog niet beschikbaar in het publiekelijke domein. De Duitse wetgever is voornemens de bestaande specifieke vrijgavewaarden voor verbranding en storten ook op te nemen in de nieuwe Strahlenschutzverordnung 2018 (de Duitse basisveiligheidsnormen stralingsbescherming). De Nederlandse Vereniging voor Stralingshygiëne (NVS) heeft in een recent rapport verzocht om de Duitse specifieke vrijgavegrenswaarden voor tritium en ^{14}C op te nemen in de ANVS-verordening, en daarvoor een analyse aangereikt. De basis is een zeer recente studie van Brenk Systemplanung waarin zij voor de Duitse wetgever hebben bevestigd dat de bestaande specifieke vrijgavewaarden ook na implementatie van de Richtlijn 2013/59/Euratom gehandhaafd kunnen blijven.

De opname van de Duitse specifieke vrijgavegrenswaarden in de Nederlandse wetgeving ligt voor de hand. Deze specifieke vrijgavewaarden kunnen echter niet zonder meer in de Nederlandse wetgeving opgenomen worden omdat het SSK-model verschilt van de radiologische modellen van de IAEA en EU-commissie. In de ANVS-verordening is opgenomen dat de methodiek (uitwerking van de blootstellingsroutes, blootstellingsscenario's, de gebruikte parameters en de bepaling van de dosis) voor het bepalen van specifieke vrijgavewaarden gebaseerd is op de aanbevelingen van de Europese Commissie of het



Internationaal Atoomenergieagentschap dan wel een methodiek die naar het oordeel van de Autoriteit daaraan gelijkwaardig is (art 3.10 2e lid onder c). De hamvraag is dus of het SSK-model gelijkwaardig is aan, dan wel dat de aannames in het model conservatief genoeg zijn ten opzichte van de radiologische modellen en dosiscriteria van de Europese Commissie of het IAEA.

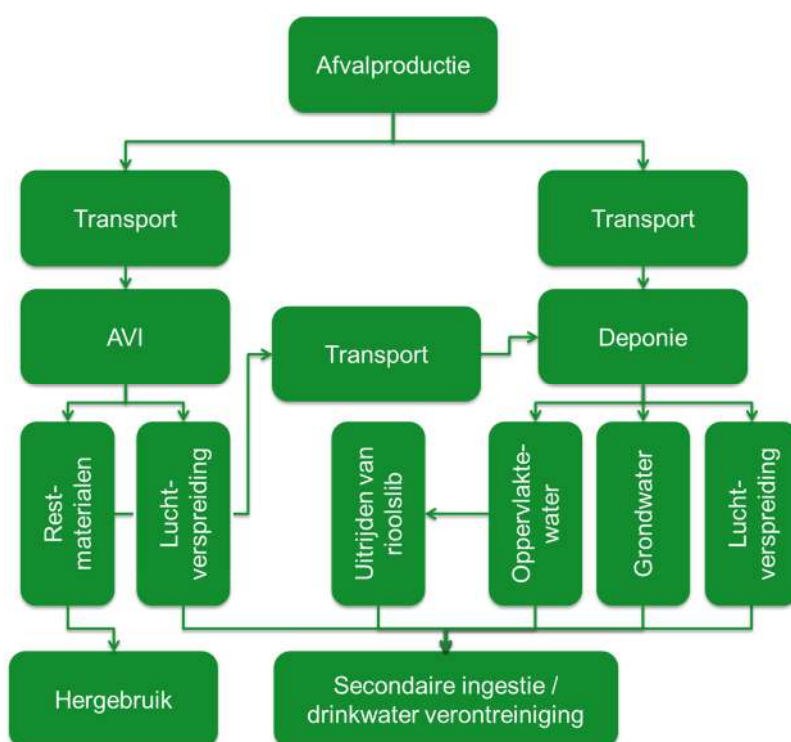
Daarmee is het doel van de hier voorliggende studie i. om de gelijkwaardigheid van het SSK model te toetsen, waar nodig modelparameters aan te passen aan de Nederlandse praktijk en ontbrekende blootstellingspaden of scenario's toe te voegen, ii. operationeel maken van het radiologisch model met bijbehorende aanvullingen voor Nederland, en iii. bepalen van de specifieke vrijgavegrenswaarden voor de SSK en NCS radionucliden middels toepassing van het ontwikkelde radiologisch model.

Het rapport zal als eerste een beschrijving geven van het door Brenk Systemplanung ontwikkelde radiologische model (Hfst. 2). Daarna volgt toetsing van het SSK-model aan de IAEA methodiek voor generieke vrijgave zoals beschreven in het IAEA Safety Report Series no. 44 (IAEA, 2005), welke wordt afgerond met een opsomming van aanbevelingen (Hfst. 3). Hfst. 4 beschrijft de ontwikkeling van het radiologisch model voor de Nederlandse situatie met het voorziene verwerkingsproces en alle bijbehorende scenario's. Hfst. 5 beschrijft de toevoeging van NCS radionucliden die niet zijn opgenomen in het huidige SSK-model. Daarna volgt toepassing van het model met specifieke vrijgavegrenswaarden voor afvoer richting de ZAVIN en separaat voor afvoer naar andere afvalverbrandingsinstallaties niet zijnde de ZAVIN (Hfst. 6). Het rapport wordt afgerond met conclusies.

2 Overzicht van het SSK radiologisch model

2.1 Algemene beschrijving

In opdracht van het Duitse federale ministerie voor Milieu, Natuurbehoud en Nucleaire Veiligheid (BMU) en Federaal Bureau voor Stralingsbescherming (BfS) is in 2004 door de firma Brenk Systemplanung een radiologisch model ontwikkeld voor de afvoer van vrijgegeven materiaal richting stortplaats en afvalverbrandingsinstallatie (Thierfeldt en Wörten, 2004). Het model omvat het verwerkingsproces met bijbehorende blootstellingen zoals schematisch is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 Schematisch overzicht van het SSK radiologisch model.

De SSK uitgangspunten zoals bij het radiologisch model zijn gehanteerd zijn als volgt:

- De bronterm is ingesteld op 1000 Mg radioactiefhoudend materiaal per jaar per stortplaats. Deze massa wordt verondersteld afkomstig te zijn van nucleaire installaties, onderzoeksreactoren en brandstofcyclusinstallaties (85%) en van afvalproducenten (geneeskunde, industrie, onderzoek) die een vergunning hebben.
- Het feit dat de radionuclide-inhoud nooit 100% van het vrijgegeven materiaal kan bereiken tijdens feitelijke vrijgave, wordt in rekening gebracht door een benuttingsfactor in te voeren. Er wordt rekening gehouden met de ervaring van de huidige Duitse ontmantelingsprojecten (gemiddelde waarde van 5 tot 10% gebruik van de vrijgaveniveaus). De omhullende gebruiksfactor is ingesteld op 30% voor materiaal vanuit het nucleaire veld en op 100% voor het andere

materiaal (bijvoorbeeld uit de medische sector). De gemiddelde gebruiksfactor in het model is daarom 40,5%.

- De jaarlijkse doorzet voor een deponie en afvalverbrandingsinstallatie zijn vastgesteld op respectievelijk 40.000 Mg per jaar en 100.000 Mg per jaar. Beide waarden bevinden zich in het lagere bereik van de feitelijke capaciteit voor dergelijke faciliteiten in Duitsland.

De berekeningen worden afzonderlijk uitgevoerd voor alle scenario's, hierin zijn alle relevante blootstellingsroutes afgedekt:

- externe bestraling (scenario specifieke geometrieën en afscherming worden in aanmerking genomen),
- stofinhalatie (een concentratiefactor van 10 voor de inhaleerbare stoffractie wordt aangenomen),
- directe ingestie van stof (voor personeel op stortplaats en afvalverbrandingsinstallatie),
- secundaire ingestie (voor leden van de bevolking, afhankelijk van het scenario).

Dosisbijdragen van meer dan één blootstellingsroute worden alleen toegevoegd als ze van toepassing zijn op dezelfde persoon op hetzelfde moment zoals bijvoorbeeld bij personeel op stortplaats: bijdragen door externe bestraling, onopzettelijke ingestie en stofinhalatie worden opgeteld, aangezien ze gelijktijdig optreden. Bijdragen van emissies naar lucht afkomstig van afvalverbrandingsinstallaties en het grondwaterpad van stortplaatsen worden daarentegen niet toegevoegd omdat ze niet op dezelfde plaats en niet tegelijkertijd voorkomen.

De dosis van $1 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ activiteit in het vrijgegeven materiaal wordt voor elk scenario afzonderlijk berekend, waarna het limiterende scenario leidend is bij de vaststelling van de vrijgavegrenswaarde. Het hierbij gehanteerde dosis criterium bedraagt $10 \mu\text{Sv}$ per jaar.

2.2 Overzicht van de rekensystematiek

2.2.1 Blootstellingspaden

De blootstellingspaden die in het radiologisch model worden beschreven zijn:

- Directe straling
- Inhalatie van besmet stof
- Directe Ingestie van besmet stof via de hand naar mond route
- Indirecte ingestie via consumptie van besmette voedingsmiddelen en drinkwater

Bij de berekening van de nuclidespecifieke vrijgavewaarden wordt rekening gehouden met het radioactieve verval tussen het moment van vrijgave en het daadwerkelijke begin van de blootstelling (t_1) en het verval dat plaatsvindt tijdens de duur van de blootstelling (t_2). Deze correctie is in het algemeen niet van belang voor langlevende radionucliden, maar kan een zeer grote invloed hebben op de vrijgave waarden van nucliden met een halfwaarde tijd van een aantal dagen of minder.

De blootstelling aan directe straling wordt beschreven door de volgende formule:

$$E_{ext,i} = \dot{e}_{ext,i} t_e f_d \frac{f_{av,i}}{f_{mv}} e^{-\lambda_i t_1} \frac{1 - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i t_2}, \quad (1)$$

hierin is naast de reeds genoemde t_1 en t_2 , $E_{ext,i}$ de effectieve dosis in een jaar door externe straling per eenheid van activiteitsconcentratie in het materiaal in (mSv·yr⁻¹) per (Bq·g⁻¹) voor radionuclide i ; $\dot{e}_{ext,i}$ de effectieve dosis in een jaar door externe straling per eenheid van activiteitsconcentratie in het materiaal, afhankelijk van geometrie, afstand, afscherming, leeftijd etc. in (mSv·h⁻¹) per (Bq·g⁻¹); t_e de blootstellingstijd (h·yr⁻¹); f_d is het product van meerdere verdunningsfactoren (-) en λ_i de radioactieve vervalconstante (yr⁻¹). $f_{av,i}$ is de fractie (-) van activiteit die bij verbranding in het desbetreffende residu achterblijft. Deze factor is element specifiek en heeft een waarde tussen de 0 en 1. f_{mv} is massafractie (-) van het desbetreffende residu t.o.v. de originele massa voor verbranding, en is een maat voor de toename in specifieke activiteit t.g.v. de afname in materiaalmassa. Indien het een blootstelling betreft aan het onverbrande materiaal wordt voor $f_{av,i}$ en f_{mv} een waarde van 1 gehanteerd.

De blootstelling via inhalatie wordt beschreven door de volgende formule:

$$E_{inh,i} = \dot{e}_{inh,i} t_{inh} f_d f_c \frac{f_{av,i}}{f_{mv}} C_d \dot{V} e^{-\lambda_i t_1} \frac{1 - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i t_2}, \quad (2)$$

hierin is, $E_{inh,i}$ de effectieve dosis in een jaar via inhalatie per eenheid van activiteitsconcentratie in het materiaal in (mSv·yr⁻¹) per (Bq·g⁻¹); $\dot{e}_{inh,i}$ de leeftijdsafhankelijke dosiscoëfficiënt voor inhalatie in mSv·Bq⁻¹; t_{inh} is de blootstellingstijd voor inhalatie (h·yr⁻¹); f_c een concentratiefactor; C_d de stofconcentratie in de ademplucht (g·m⁻³); \dot{V} het ademdebiet, afhankelijk van de leeftijd in m³·h⁻¹.

De blootstelling via directe ingestie wordt berekend met de volgende formule:

$$E_{ing,i} = \dot{e}_{ing,i} t_{ing} \dot{q} f_d f_c \frac{f_{av,i}}{f_{mv}} e^{-\lambda_i t_1} \frac{1 - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i t_2}, \quad (3)$$

waarin $E_{ing,i}$ de effectieve dosis in een jaar via ingestie per eenheid van activiteitsconcentratie in het materiaal in (mSv·yr⁻¹) per (Bq·g⁻¹); $\dot{e}_{ing,i}$ de leeftijdsafhankelijke dosiscoëfficiënt voor ingestie in mSv·Bq⁻¹; t_{ing} is de blootstellingstijd voor ingestie (h·yr⁻¹); \dot{q} de inname via ingestie (g·h⁻¹). In geval van indirecte ingestie wordt de opname van activiteit uit water, bodem of lucht naar voedsel en gewassen beschouwd. Deze methodiek wordt verderop in het rapport beschreven.

De gehanteerde waarden voor alle bovengenoemde parameters zullen worden overgenomen uit het rapport van Thierfeldt en Wörlén (2004) tenzij expliciet anders vermeld.

2.2.2 Dosiscoëfficiënten

De dosiscoëfficiënten voor externe straling zijn berekend met behulp van standaardsoftware (Microshield). Deze dosiscoëfficiënten zijn afhankelijk van de radionuclide, de geometrie (afstand tot de bron,

brongeometrie, positie van de bron, enz.) en mogelijke afscherming. De dosiscoëfficiënten voor inhalatie en ingestie zijn ontleend aan de EURATOM basisnormen voor stralingsbescherming (EU 1996).

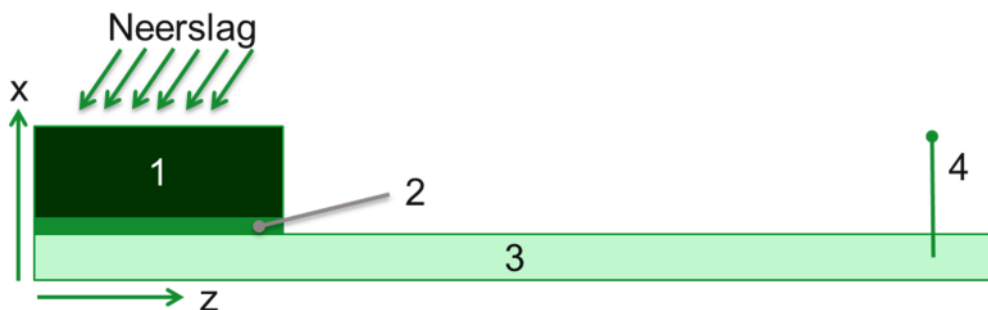
Voor radionucliden met één of meerdere dochternucliden wordt de bijdrage van de dochters als vaste waarde toegevoegd aan de dosiscoëfficiënt van de moeder. Hierbij wordt tevens rekening gehouden met ingroei en abundantie van de dochternucliden.

2.2.3 Secundaire ingestie via water

De methodologie voor berekening van de secundaire ingestie dosis t.g.v. opname van radionucliden in voedsel en drinkwater volgt de methodiek zoals beschreven in het Duitse Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV (AVV, 2005). Hierin wordt zowel de uitloging naar oppervlaktewater als grondwater beschouwd.

Opname van radionucliden in het grondwater

De opname van activiteit in het grondwater wordt middels een systeem van differentiaalvergelijkingen doorgerekend, welke numeriek wordt opgelost. Uitgangspunt hierbij is een transportvergelijking welke wordt toegepast op de deponie, onderliggende geologische barrière en de grondwaterlaag. Voor oplossing van de transportvergelijking wordt een numerieke één-dimensionale rekenmethodiek gehanteerd waarin de verschillende compartimenten zijn opgedeeld in kleinere numerieke elementen. Het systeem van compartimenten is weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Systeem van de compartimenten met: (1) stortplaats, (2) geologische barrière, (3) grondwaterlaag en (4) drinkwaterput.

De transportvergelijking luidt als volgt:

$$\left(\frac{d}{dt} + v_i^k \frac{d}{dx} + \lambda_i \right) c_i^k(x, t) = q_i^k(x, t), \quad (4)$$

en wordt toegepast op alle genoemde compartimenten 1 tot 3, met dien verstande dat voor de grondwaterlaag x worden vervangen door z . Naast de reeds eerder genoemde parameters, is i het betreffende radionuclide (-) en k het compartiment (-). De migratiesnelheid van het radionuclide (v_i^k), de activiteitsconcentratie (c_i^k) en bronterm (q_i^k) zijn als volgt rekenkundig beschreven:

$$c_i^k(x, t) = C_i^k(x, t) \cdot \frac{1}{n^k + \rho^k \cdot K_{D,i}^k}, \quad (5)$$

$$q_i^k(x, t) = Q_i^k(x, t) \cdot \frac{1}{n^k + \rho^k \cdot K_{D,i}^k}, \quad (6)$$

$$v_i^k(x, t) = v_D^k(x, t) \cdot \frac{1}{n^k + \rho^k \cdot K_{D,i}^k}. \quad (7)$$

In bovengenoemde vergelijkingen is C_i^k de activiteitsconcentratie voor radionuclide i in het compartiment k ; Q_i^k de bronterm voor radionuclide i in het compartiment k ; v_D^k de darcy-snelheid van het water in het overeenkomstige compartiment k in ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Voor deponie en geologische barrière is deze parameter tijdsafhankelijk. n^k is de porositeit in het compartiment k ; ρ^k de dichtheid (dry bulk density) van het compartiment k en $K_{D,i}^k$ de K_d waarde voor radionuclide i in het compartiment k in ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}$).

Ter aanvulling, de bronterm Q wordt ingezet voor o.a. vrijzetting van activiteit in de deponie, vorming van dochternucliden tijdens het migratieproces en omzetting van activiteit bij overgang van geologische barrière naar grondwaterlaag.

Opname van radionucliden in het oppervlaktewater

Bij de bepaling van uitloging van radionucliden vanuit de stortplaats richting het oppervlaktewater worden de volgende processen rekenkundig beschouwd:

- Uitloging van radionucliden door het percolaat van de stortplaats en migratie wordt beschreven door een K_D -aanpak. Hierbij wordt verondersteld dat de deponie nog in gebruik is en dat er aan de bovenzijde van de deponie geen afdichting aanwezig is.
- Het percolaat wordt verzameld aan de voet van de stortplaats en afgevoerd naar de afvalwaterzuiveringsinstallatie waar het percolaat zich mengt met ander niet radioactiefhoudend afvalwater. Verondersteld wordt dat minstens één reinigingsstap plaatsvindt alvorens het gefilterde percolaat zich mengt met het oppervlaktewater.
- Vanaf de afvalwaterzuiveringsinstallatie komen de radionucliden het oppervlaktewater binnen (ontvangend water), waarna verdere vermenging met ander water volgt, alvorens het wordt opgenomen in het drinkwaterleidingnetwerk.

Rekenkundig wordt dit proces als volgt beschreven:

$$C_i^{Dw} = f_d f_{p,w} \frac{\rho}{n + \rho K_{D,i}} e^{-\lambda_i t_1} \frac{1 - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i t_2}. \quad (8)$$

Hierin is C_i^{Dw} de drinkwater concentratie ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$) per ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$), $f_{p,w}$ de fractie van activiteit welke bij reiniging in de afvalwaterzuiveringsinstallatie in het afvoerwater achterblijft. Deze factor is gebaseerd op beschikbare K_D waarden voor bodem en zoetwater en varieert tussen de 0 en 1. Voor de elementen H, O, Na, Cl, K, Cr, Mo, Tc, I en Np wordt een fractie van 10% gehanteerd voor het rioolslib ($f_{p,s}$), en 100% voor het afvoerwater ($f_{p,w}$). Voor de element C, P, S, Hg, Tl, Pb, Th, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es en Fm wordt

100% gehanteerd voor het rioolslib en een fractie van 10% voor het afvoerwater. Voor alle andere elementen wordt conservatief veronderstelt dat alle activiteit (100%) zowel naar het rioolslib als afvoerwater gaat. De factor f_d omvat naast verdunning met niet-radioactiefhoudend materiaal voorafgaande aan de stort ook verdunning op de stortplaats, bij de afvalwaterzuiveringsinstallatie en opmenging met ander oppervlaktewater waar het drinkwater uit wordt onttrokken. Bovenstaande systematiek kan ook worden toegepast om de nuclide concentratie in het rioolslib te bepalen.

Opname in het voedsel

Bij opname in grond- en oppervlaktewater wordt aangenomen dat de concentratie van drinkwater gelijk is aan de genoemde waterconcentraties. Na bepaling van de activiteitsconcentratie in het drinkwater C_i^{Dw} in Bq·ltr⁻¹ per Bq·g⁻¹ volgt berekening van de concentratie in bodem (C_i^{Bod}), gewassen (C_i^{Pl}), dierlijke producten (C_i^{Dp}) en moedermelk (C_i^{Mm}) welke volgens onderstaande vergelijkingen bepaald worden.

$$C_i^{Bod} = \dot{a}_i \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i^{Bod,eff} \cdot t_b)}{p^m \cdot \lambda_i^{Bod,eff}} \quad (9)$$

Hier is \dot{a}_i de radionuclide bijdrage in Bq·m⁻²·s⁻¹, door bewatering met drinkwater, maar ook toepassing van rioolslib op landbouwgrond of depositie als gevolg van emissie naar lucht. De effectieve uitspoelconstante in de bodem ($\lambda_i^{Bod,eff}$) is gedefinieerd als $\lambda_i^{Bod,eff} = \lambda_i + \lambda_i^{Bod}$. p^m is de oppervlakte dichtheid van de bodem in kg·m⁻² en t_b is de tijdsduur van de radionuclidebijdrage. λ_i^{Bod} is de elementafhankelijke uitspoelconstante in de bodem.

De activiteit in de verschillende plantsoorten wordt daarna berekend met volgende vergelijking:

$$C_i^{Pl} = \left(\dot{a}_i \cdot f_w \cdot \frac{1 - \exp(-\lambda_i^{Pl,eff} \cdot t_e^n)}{\gamma^n \cdot \lambda_i^{Pl,eff}} + C_i^{Bod} \cdot T_i^n \right) \cdot \exp(-\lambda_i t_i^n), \quad (10)$$

hierin is f_w het aandeel van de op de planten neergeslagen activiteit. Deze bedraagt 1 voor luchtgedragen depositie, 0,3 voor bewatering en 0 voor rioolslib. $\lambda_i^{Pl,eff}$ is de effectieve verval constante voor planten; t_e^n is de tijdsduur in de planten tijdens het groeiseizoen en T_i^n is de transferfactor van bodem naar plant via door de wortel opgenomen activiteit.

De activiteit in dierlijke producten wordt als volgt berekend:

$$C_i^{Dp} = T_i^{Dp} (L \cdot C_i^{Dw} + \dot{M}^{Vo} \cdot C_i^{Pl}), \quad (11)$$

hierbij zijn T_i^{Dp} de transferfactoren (d·kg⁻¹) voor melk en vlees, L door vee geconsumeerde drinkwater (m³·yr⁻¹) en \dot{M}^{Vo} de hoeveelheid geconsumeerde plantaardige voedsel (kg·yr⁻¹). De concentratie aan activiteit in de moedermelk wordt bepaald middels:

$$C_i^{Mm} = T_i^{Mm,Ing} \sum_n U^{n,>17a} C_i^n, \quad (12)$$

hierin is $T_i^{Mm,Ing}$ de transferfactor voor moedermelk ($d \cdot kg^{-1}$); $U^{n,>17a}$ consumptie per jaar voor voedselsoort n en C_i^n de concentratie van radionuclide i in de betreffende voedselsoort n in $Bq \cdot kg^{-1}$ per $Bq \cdot g^{-1}$. Daarna volgt bepaling van de ingestie dosis volgens onderstaande formule.

$$E_{ing,i} = \dot{e}_{ing,i} \sum_n U^n C_i^n, \quad (13)$$

2.2.4 Secondaire ingestie via lucht

De berekeningsmethode voor secundaire ingestie via luchtpaden volgt de rekenmethodiek zoals beschreven in de AVV (2005). Uitgangspunt hierbij is een conservatieve aanname van de relevante factoren die bepalend zijn bij de verspreiding via lucht. Deze factoren omvatten o.a.: schoorsteenhoogte, uitlaatgastemperatuur en de bijbehorende thermische toename, de windsnelheid, windrichting en diffusieklasse. Indien deze factoren conservatief geschat worden, met een emissiehoogte van 50 m, en een windfrequentie van 30% in de meest voorkomende sector, dan bedraagt de dispersiefactor op een afstand van 300 meter van de bron maximaal $2,1 \cdot 10^{-6} s \cdot m^{-3}$ (AVV, 2005). De depositiesnelheid wordt verondersteld als zijnde $1,5 mm \cdot s^{-1}$.

Met genoemde parameters in combinatie met een bronterm voor de lozing ($Bq \cdot yr^{-1}$ per $Bq \cdot g^{-1}$) kan de nucliden concentratie in de lucht als ook de depositie op de grond eenvoudig worden geschat. Daarmee kunnen de blootstelling t.g.v. externe straling (grondstraling), inhalatie en consumptie van lokaal geproduceerd voedsel worden beschouwd. De dosis t.g.v. de verschillende blootstellingen wordt berekend volgens de methodiek zoals reeds eerder in dit hoofdstuk beschreven.

2.3 Overzicht van de blootstellingsscenario's

Het radiologische model bestaat uit de volgende onderdelen:

- Vervoer naar de stortplaats of de afvalverbrandingsinstallatie;
- Stortplaats - werkproces op de stortplaats: ingang van het afval, mechanische biologische behandeling, verwijdering van het afval;
- Afvalverbrandingsinstallatie - werkproces in de fabriek: afvalingangsruimte, afvalput, verbrandingsoven, slakkenopslag, transport van slakken, stofopslag, transport van stof;
- Recycling en verwijdering van de reststoffen van verbranding;
- Nuclidedispersie via luchtweg van de afvalverbrandingsinstallatie (gemalen glans, inhalatie, secundaire inname);
- Nuclidemigratie via oppervlaktewater en daaropvolgende ingestie via verschillende inname-trajecten;
- Nuclidemigratie via grondwater en daaropvolgende ingestie via verschillende inname-trajecten.

3 Toetsing aan de IAEA systematiek

Op grond van artikel 3.20, 2^e lid onder c van de ANVS verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming dient, bij de aanvraag om specifieke vrijgave, de uitwerking van de blootstellingsroutes, blootstellingsscenario's, de gebruikte parameters en de bepaling van de dosis te worden uitgevoerd aan de hand van de methodiek zoals aangegeven in de aanbevelingen van de Europese Commissie of het Internationaal Atoomenergieagentschap dan wel met een methodiek die naar het oordeel van de Autoriteit daaraan gelijkwaardig is. In dit hoofdstuk worden de scenario's zoals gehanteerd door de IAEA in het document SRS-44 (IAEA, 2005), die de basis vormen voor de berekening van de algemene vrijgavegrenswaarden vergeleken met de door Brenk Systemplanung (Thierfeldt en Wörlen, 2004) gehanteerde scenario's voor de berekening van specifieke vrijgavegrenswaarden via deponie en verbranding van relatief kleine hoeveelheden van 1000 ton per jaar radioactieve afvalstoffen afkomstig van ziekenhuizen en onderzoeksinstituten, alsmede de ontmanteling van nucleaire installaties.

3.1 Vergelijk van de uitgangspunten

In het IAEA document SRS-44 worden voor vrijstelling van vergunningsplicht en vrijgave van radioactieve stoffen uit een vergunde situatie algemene grenswaarden berekend, waar onder het risico van blootstelling aan straling verwaarloosbaar wordt verondersteld. Daartoe zijn een aantal blootstellingsscenario's gedefinieerd voor werknemers en leden van de bevolking die afdekkend worden geacht voor het grote scala aan mogelijke blootstellingssituaties aan (vrijgegeven) radioactieve stoffen.

Als dosiscriterium voor verwaarloosbare blootstelling aan straling wordt voor reguliere situaties een dosis van 10 μSv per jaar gehanteerd. Voor minder waarschijnlijke situaties wordt toegepast een maximale dosis van 1 mSv per jaar effectieve dosis en een equivalente huiddosis van 50 mSv in een jaar. De resulterende vrijstellings-, c.q. vrijgave waarden voor activiteitsconcentratie worden gebaseerd op de laagste van de drie aldus bepaalde grenswaarden.

Het dosiscriterium van 10 μSv per jaar dat IAEA hanteert voor de reguliere situaties is consistent met het dosiscriterium dat SSK hanteert. De onwaarschijnlijke situatie met een dosiscriterium van 1 mSv per jaar wordt door SSK niet toegepast, en vraagt ook om een additionele nog conservatievere parametrisatie van de modellen. Daarnaast wordt ook de equivalente huiddosis van 50 mSv in een jaar voor minder waarschijnlijke situaties niet door SSK beschouwd.

3.2 Vergelijk van de blootstellingspaden

De modelbenadering van de IAEA voor bepaling van dosis t.g.v. externe straling, inhalatie en directe ingestie is gelijkwaardig aan de aanpak zoals gehanteerd door SSK. Wel is de parameteraanduiding verschillend en worden daarnaast door SSK soms nog extra verdunnings- en verrijkingsfactoren toegevoegd die specifiek zijn voor het beschouwde verwerkingsproces. Deze toevoegingen doen echter niets af aan de

generieke benadering van genoemde blootstellingspaden zoals geformuleerd in de vergelijkingen (1) tot (3).

Dit is echter anders voor de opname van radionucliden in het grondwater. De door IAEA gehanteerde aanpak is gebaseerd op de computermodellen in de software RESRAD©. Hierbij wordt uitgegaan van een uitgebreide bron van materiaal dat aanwezig is in het stroomgebied van een grondwaterlaag. Het radioactiefhoudend materiaal zou zich kunnen bevinden op een stortplaats of is bijvoorbeeld ingezet in een landschapsconstructie project. Het model veronderstelt conservatief dat de hele inventaris van radionucliden in het materiaal instantaan beschikbaar is voor migratie. De snelheid waarmee de radionucliden worden vrijgegeven, wordt bepaald met behulp van een K_D model. In dit model wordt de concentratie in het drinkwater C_i^{Dw} volgens een aantal algebraïsche formules beschreven:

$$C_i^{Dw} = \frac{\varphi^s}{\varphi^{gw} + \varphi^s} C_i^s e^{\lambda_i t_1}, \quad (14)$$

φ^{gw} is hier het grondwaterdebiet in $m^3 \cdot yr^{-1}$; φ^s is het percolaatdebiet in $m^3 \cdot yr^{-1}$ en C_i^s is de nuclideconcentratie in het percolaat ($Bq \cdot m^{-3}$) welke is bepaald als:

$$C_i^s = \frac{M c_i L_i}{\varphi^s}, \quad (15)$$

waarin M de totale massa (g) is van het beschouwde deponielichaam; c_i de activiteitsconcentratie van het radioactiefhoudend materiaal, en L_i de uitloogsnelheid (yr^{-1}) van het radionuclide welke o.a. is gebaseerd op de K_D waarde. Voor verdere details zie hfst 4.3.4 in SRS-44 (IAEA, 2005). Daarmee is deze aanpak wezenlijk minder verfijnd dan hetgeen door SSK wordt voorgesteld. Zij gebruiken een één-dimensionale tijdsafhankelijk transportvergelijking als uitgangspunt, waarin de volledige levensloop met alle bijbehorende tijdsgebonden variaties worden doorgerekend.

Daarna volgt berekening van de ingestiedosis t.g.v. van consumptie van voedsel en drinkwater. Hiervoor worden enkelvoudige transferfactoren gehanteerd voor groente, fruit en vis. Verder wordt onderscheid gemaakt naar leeftijd, IAEA hanteert hier twee leeftijdsgroepen te weten kinderen (1 tot 2 jaar) en volwassenen (>17 jaar). Daarmee is het voedselopname model niet echt fundamenteel anders, met dat verschil dat SSK's model alle leeftijdsgroepen beschouwd.

Voor oppervlaktewater geldt dat IAEA dezelfde rekenmethodiek hanteert als voor het bovenstaand beschreven grondwater, maar voor eerste genoemde een grotere verdunning veronderstelt. Door deze extra verdunning is de doses via oppervlaktewater per definitie lager en om die reden wordt oppervlaktewater niet beschouwd door de IAEA. De blootstelling t.g.v. rioolslib zoals beschouwd door SSK wordt in de IAEA modellen niet bekeken.

3.3 Vergelijk van de blootstellingsscenario's

In Tabel 1 en Tabel 2 is een overzicht gegeven van de scenario's die door IAEA en SSK worden gehanteerd.

Tabel 1 Overzicht scenario's SRS-44.

Scenario	Beschrijving	Blootgesteld individu	Relevant blootstellingspad
WL	Werker op deponie of andere faciliteit	Werknemer	Externe blootstelling op deponie Inhalatie op deponie Directe ingestie van gecontamineerd materiaal
WF	Werker in smelterij	Werknemer	Externe blootstelling in smelterij van sloop materiaal Inhalatie in smelterij Directe ingestie van gecontamineerd materiaal
WO	Andere werker (bv. vrachtwagenchauffeur)	Werknemer	Externe blootstelling van lading
RL-C	Bewoners nabij deponie of andere faciliteit	Kind (1-2yr)	Inhalatie nabij deponie of andere faciliteit Ingestie van gecontamineerd voedsel verbouwt op gecontamineerd land
RL-A		Volwassene (>17 jr)	Inhalatie nabij deponie of andere faciliteit Ingestie van gecontamineerd voedsel verbouwt op gecontamineerd land
RF	Bewoner nabij smelterij	Kind (1-2yr)	Inhalatie nabij een smelterij
RH	Bewoner in huis met gecontamineerd materiaal	Volwassene (>17 jr)	Externe blootstelling in woning
RP	Bewoner nabij publieke plaats geconstrueerd met gecontamineerd materiaal	Kind (1-2yr)	Externe blootstelling Inhalatie van gecontamineerd stof Directe ingestie van gecontamineerd materiaal
RW-C	Bewoner met drinkwater van eigenwaterbron of consumptie van vis uit gecontamineerde rivier	Kind (1-2yr)	Ingestie van gecontamineerd drinkwater, vis en ander voedsel
RW-A		Volwassene (>17 jr)	

Tabel 2



Overzicht scenario's SSK.

Scenario	Beschrijving	Blootgesteld individu	Relevant blootstellingspad
T1	Vrachtwagenchauffeur voor transport naar AVI	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
D1	Ontvangst van vracht met vrijgegeven materiaal op deponie	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
D2	Verwerking van vrijgegeven materiaal bij compostering	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
D3	Verwerking van vrijgegeven materiaal bij stort op de deponie	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
M1	Ontvangst van vracht met vrijgegeven materiaal bij AVI	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
M2	Verwerking van materiaal in de afvalbunker	Werknemer	Extern
M3	Verwerking en afvoer van slakken uit de slakken-bunker	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
M4	Verwerking en afvoer van vlieggas uit de vlieggas-bunker	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
S1	Toepassing slakken in wegenbouw	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
S2	Toepassing slakken in wegenbouw	Publiek (0 - 17yr)	Extern
S3	Hergebruik metaal schroot	Werknemer	Extern
S4	Toepassing ROI gips in woningbouw	Werknemer	Extern, inhalatie en ingestie
S5	Toepassing ROI gips in woningbouw	Publiek (0 - 17yr)	Extern
L1	Verspreiding via lucht vanaf AVI	Publiek (0 - 17yr)	Externe blootstelling van depositie op bodem
L2	Verspreiding via lucht vanaf AVI	Publiek (0 - 17yr)	Inhalatie
L3	Verspreiding via lucht vanaf AVI	Publiek (0 - 17yr)	Secondaire ingestie
G1-G4	Uitloging naar grondwater vanaf deponie	Publiek (0 - 17yr)	Secondaire ingestie a.g.v. uitloging naar water-voorziening
O1	Uitloging naar oppervlaktewater vanaf deponie	Publiek (0 - 17yr)	Secondaire ingestie a.g.v. uitloging naar water-voorziening
O2	Hergebruik van slib als landbouwgrond	Publiek (0 - 17yr)	Secondaire ingestie a.g.v. opname in voedsel

IAEA Scenario WL – SSK Scenario D3

Een werknemer wordt blootgesteld aan besmet materiaal dat op een stortplaats is gestort. Blootstellingswegen omvatten externe bestraling van het materiaal, de inademing van verontreinigd stof en onbedoelde ingestie van verontreinigd stof (bijvoorbeeld door de hand-tot-mond route). Dit scenario komt overeen met het scenario D3 uit het rapport van Brenk.

IAEA Scenario WF – SSK Scenario M2, M3 en M4

Scenario WF betreft een werknemer in een gieterij waar verontreinigd metaal wordt gesmolten. Externe blootstelling ontstaat als de werknemer in de buurt verblijft van een hoeveelheid gecontamineerd materiaal. Daarnaast wordt de werknemer blootgesteld via inhalatie van stof tijdens het transport- en smeltproces. Dit scenario komt overeen met een combinatie van de scenario's M2, M3 en M4 uit het rapport van Brenk.

IAEA Scenario WO – SSK Scenario T1 en S3

Een werknemer (bijvoorbeeld een vrachtwagenchauffeur) komt op regelmatige basis in contact met verontreinigd materiaal. De werknemer wordt extern aan het materiaal blootgesteld (bijvoorbeeld door de lading op de vrachtwagen). Dit scenario dekt ook de blootstelling af aan een groot stuk apparatuur dat is vrijgegeven van wettelijke controle en op een andere werkplek wordt hergebruikt. Dit scenario komt overeen met het transportscenario T1 uit het rapport van Brenk. Daarnaast kan het scenario ook worden vergeleken met het hergebruikscenario S3 van metalen in een groot stuk equipment.

IAEA Scenario's RL-C en RL-A – SSK Scenario L3

Scenario RL beschouwt personen die in de buurt van een stortplaats of een andere faciliteit wonen (C geeft een kind aan, A een volwassene) en die via inhalatie en indirecte ingestie wordt blootgesteld aan geresuspendeerd stof dat vanaf de stortplaats door de wind wordt verspreid. Er wordt daarbij van uitgegaan dat de bewoners eigen geteelde groenten consumeren die besmet zijn geraakt door de depositie van verontreinigd materiaal. Dit scenario kent in het rapport van Brenk geen directe tegenhanger. Wel wordt de blootstelling via inhalatie en indirecte ingestie na verspreiding vanuit een verbrandingsinstallatie meegenomen via scenario L2 en L3.

IAEA Scenario RF – SSK Scenario L2

Aangezien de blootstellingssituatie door verspreiding van stof vanuit een gieterij anders is dan bij het residentiële scenario RL, wordt hier een scenario van een kind dat via inhalatie wordt blootgesteld aan stof dat vrijkomt uit een gieterij beschreven. In tegenstelling tot scenario RL, dat een algemene situatie beschrijft, wordt hier geen indirecte ingestie via voedselconsumptie beschouwd aangezien dit al wordt

afgedekt door scenario RL-C. Dit scenario kan worden vergeleken met het scenario L2 uit het rapport van Brenk, dat de inhalatie beschrijft van via de schoorsteen van een AVI verspreid stof.

IAEA Scenario RH – SSK Scenario S5

Verontreinigd materiaal zoals bouwafval, slakken, vliegashoudend materiaal kan mogelijk in de constructie van gebouwen als betonaggregaat of cementvervanger worden toegepast. Dit zal leiden tot een externe blootstelling van de bewoners. Dit scenario vertoont overeenkomst met het hergebruikscenario S5 uit het rapport van Brenk met betrekking tot de blootstelling van leden van de bevolking binnenshuis aan geconstrueerde wanden verkregen met gips uit een rookgasontzwavelingsinstallatie (ROI).

IAEA Scenario RP – SSK Scenario S2

Indien besmet materiaal wordt hergebruikt voor het afdekken van openbare plaatsen, kunnen bewoners worden blootgesteld aan externe straling alsmede aan de inademing en inslikken van vervuild stof, bijvoorbeeld door spelende kinderen te spelen. Deze blootstellingssituatie wordt in het rapport van Brenk behandeld in de hergebruik scenario's S1 voor werknemers in de wegenbouw en S2 voor leden van de bevolking.

IAEA Scenario RW-C en RW-A – SSK Scenario G1 tot G4

De aanwezigheid van besmet materiaal op een stortplaats kan leiden tot het vrijkomen van radionucliden in het grondwater. Dit kan van invloed zijn op stroomafwaarts gelegen bronnen, die indien het bronwater wordt gebruikt voor irrigatie kan leiden tot de inname van verontreinigd drinkwater of van besmette voedingsmiddelen die in een privétuin worden geproduceerd. Dit scenario wordt in het rapport van Brenk uitgebreid behandeld in de grondwater scenario's G1 tot G4.

Tabel 3 Kruistabel voor vergelijking van IAEA en SSK scenario's.

IAEA Scenario	SSK Scenario	SSK Scenario	IAEA Scenario
WL	D3	T1	WO
WF	M2, M3, M4	D1	-
WO	T1, S3	D2	-
RL-C	L2, L3	D3	WL
RL-A	L2, L3	M1	-
RF	L2	M2	WF
RH	S5	M3	WF
RP	S2	M4	WF
RW-C	G1 – G4	S1	-
RW-A	G1 – G4	S2	RP
		S3	WO
		S4	-
		S5	RH
		L1	-
		L2	RF, RL-C, RL-A
		L3	RL-C, RL-A
		G1-G4	RW-C, RW-A
		O1	-
		O2	-

Samenvattend kan gesteld worden dat de scenario's uit het IAEA rapport SRS-44 – welke ten grondslag liggen aan de algemene vrijgavegrenswaarden voor onbeperkte hoeveelheden, zoals opgenomen in Tabel A onder Bijlage 3 van het Besluit basisveiligheidsnormen – ook in enige vorm terugkomen in het rapport van Brenk Systemplanung dat de specifieke vrijgavegrenswaarden berekent voor beperkte hoeveelheden vrij te geven materiaal in de orde van 100 tot 1000 ton per jaar. Dit maakt een beperkte vergelijking mogelijk van de in beide studies gebruikte parameterwaarden. Het genoemde vergelijking zal in het volgende hoofdstuk worden behandeld.

3.4 Vergelijking van de parameterwaarden

In dit hoofdstuk wordt per blootstellingsscenario (IAEA lijst) een vergelijking gemaakt tussen de gehanteerde parameters in IAEA rapport SRS-44 en de Brenk studie. Hierbij moet a priori het onderscheid worden gemaakt dat SRS-44 uitgaat van onbeperkte hoeveelheden en blootstellings-scenario's die afdekkend worden geacht voor het brede scala aan situaties die van toepassing kunnen zijn na onvoorwaardelijke vrijgave, waar de Brenk studie uitgaat van beperkte hoeveelheden in de orde van 100 tot 1000 ton per jaar en specifieke afvoerroutes met de daarbij horende specifieke parameters.

3.4.1 Scenario WL

Zoals hiervoor aangegeven is het scenario WL vergelijkbaar met scenario D3 uit het rapport van Brenk. Tabel 4 vergelijkt de parameters van het scenario WL met de parameters van scenario D3.

Tabel 4 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario WL en SSK Scenario D3.

	WL	D3a	D3b
Algemeen			
Tijdsduur voorafgaand t_1 (d)	30	1	1
Tijdsduur scenario t_2 (d)	365	5	5
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	0,1(inh,ing)-1(ext)	0,41	0,41
Blootstellingsduur			
Externe straling t_e (h·yr ⁻¹)	450	37.5	12.5
Inhalatie t_{inh} (h·yr ⁻¹)	450	37.5	12.5
Ingestie t_{ing} (h·yr ⁻¹)	-	37.5	12.5
Externe straling			
Dichtheid ρ (g·cm ⁻³)	1.5	1	1
Geometrie (m)	Semi-	10x10	10x10
Dikte (m)	oneindig	0,2	0,2
Afscherming (mm)	nee	2 Fe	nee
Afstand (m)	1	1	1
Inhalatie			
Stofconcentratie C_d (mg·m ⁻³)	0,5	0,2	1
Concentratiefactor f_c (-)	4	10	10
Ademdebiet \dot{V} (m ³ ·h ⁻¹)	1,2	1,2	1,2
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{inh,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	5 μ m,W	W	W
Ingestie			
Concentratiefactor f_c (-)	2	-	10
Inname via ingestie \dot{q} (g)	10 g·yr ⁻¹	-	10 mg·h ⁻¹
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{ing,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	W	-	W

De modelopzet van beide scenario's is vergelijkbaar, wel is de parametrisatie van het SSK scenario lichter en daarmee minder conservatief dan het IAEA scenario. Echter, dit verschil in parametrisatie heeft primair betrekking op het specifieke karakter van het hier voorgestelde verwerkingsproces met voorziene doorzet van materiaal. Enige uitzondering is de gehanteerde begintijd t_1 en de doorlooptijd t_2 welke in het IAEA scenario minder conservatief zijn dan de waarden welke door SSK worden gehanteerd. Deze verschillen in tijdsduur zijn vooral van belang bij de korter levende radionucliden.

3.4.2 Scenario WF

Het IAEA scenario WF is hier vergeleken met de scenario's M2, M3 en M4 uit het rapport van Brenk. Een overzicht van de toegepaste parameters is gegeven in Tabel 5. Vergelijk van de IAEA en SSK scenario toont substantiële verschillen in modelkeuzes en parametrisatie van de modellen. Zo is inhalatie



en ingestie door SSK slechts beperkt toegepast en is daarnaast verondersteld dat afscherming is voorzien als ook substantiële opmenging met niet-radioactiefhoudende materialen. Verder hanteert SSK bij blootstelling aan de restmaterialen uit verbranding (M3 en M4) een factor f_{av} voor de fractie van activiteit die bij verbranding in het desbetreffende verbrandingsresidu achterblijft. Daarnaast wordt ook de factor f_{mv} toegepast voor de toename in specifieke activiteit t.g.v. de afname in materiaal massa. Gebruik van beide genoemde factoren past bij de voorziene verwerking. Daarmee zijn de SSK scenario's uiteindelijk lichter ingevuld, maar moet dit wel worden gezien in het licht van het voorziene verwerkingsproces.

Tabel 5 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario WF en SSK Scenario M2, M3 en M4.

	WF	M2	M3	M4
Algemeen				
Tijdsduur voorafgaand t_1 (d)	30	1	7	7
Tijdsduur scenario t_2 (d)	365	5	0,1	0,1
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	0,1(ext,ing)-1(inh)	0,41	0,41	0,41
Verdunningsfactor $f_{d,2}$ (-)	-	0,01	0,01	0,01
Act. fr. na verbranding $f_{av,i}$ (-)*	-	-	0-1	0-1
Massa fr. na verbranding f_{mv} (-)	-	-	0,25	0,01
Blootstellingsduur				
Externe straling t_e (h·yr ⁻¹)	450	1800	1000	300
Inhalatie t_{inh} (h·yr ⁻¹)	450	-	100	50
Externe blootstelling				
Dichtheid ρ (kg·m ⁻³)	1,5	1	1	1
Geometrie (m)	5x2x1	20x20x5	4x2,5x2	4x2,5x2
Afscherming (mm)	nee	1 Fe	2 Fe	2 Fe
Afstand (m)	1	5	1,2	1,2
Inhalatie				
Stofconcentratie C_d (mg·m ⁻³)	0,5	-	1	1
Concentratiefactor f_c (-)	1-70	-	1	1
Ademdebiet \dot{V} (m ³ ·h ⁻¹)	1,2	-	1,2	1,2
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{inh,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	5 μ m,W	-	W	W
Ingestie				
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	0,1	-	-	-
Concentratiefactor f_c (-)	2	-	-	-
Inname via ingestie \dot{q}	10 g·yr ⁻¹	-	-	-
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{ing,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	W	-	-	-

* Deze factor is element specifiek.

3.4.3 Scenario WO

Zoals hiervoor aangegeven is het scenario WO (Other Worker) vergelijkbaar met scenario T1 en S3 uit het rapport van Brenk. Tabel 5 vergelijkt de parameters van het scenario WO met de parameters van scenario T1 en S3.

Tabel 6 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario WO en SSK Scenario T1 en S3.

	WF	T1	S3
Algemeen			
Tijdsduur voorafgaand t_1 (d)	30	1	30
Tijdsduur scenario t_2 (d)	365	0,1	365
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	0,1	0,41	0,41
Verdunningsfactor $f_{d,2}$ (-)	-	1	0,01
Verdunningsfactor $f_{d,3}$ (-)	-	1	0,25
Act. fr. na verbranding $f_{av,i}$ (-)	-	-	0-1
Massa fr. na verbranding f_{mv} (-)	-	-	0,025
Blootstellingsduur			
Externe straling t_e (h·yr ⁻¹)	900	50	2000
Inhalatie t_{inh} (h·yr ⁻¹)	-	5	0
Ingestie t_{ing} (h·yr ⁻¹)	-	0	0
Externe blootstelling			
Dichtheid ρ (kg·m ⁻³)	1.5	1	0,2
Geometrie (m)	5x2x1	4x2,5x2	1x1x1
Afscherming (mm)	nee	2 Fe	nee
Afstand (m)	1	1,2	1
Ingestie			
Concentratiefactor f_c (-)	-	10	-
Inname via ingestie \dot{q}	-	10 mg·h ⁻¹	-
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{ing,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	-	W	-

Een vergelijk van het WF scenario met T1 laat zien dat behalve de blootstellingsduur (t_e) alle andere condities conservatiever zijn verondersteld. Daarnaast wordt in T1 ook meegenomen een beperkte bijdrage t.g.v. ingestie, terwijl dit voor WF niet is voorzien. De blootstellingsduur van 500 uur bedraagt slechts een achttiende van wat wordt verondersteld in scenario WF. Echter, deze beperkte blootstellingsduur is onderbouwd met het gegeven dat de doorzet van afval via deze route beperkt is. Een vergelijk met het IAEA scenario WF laat zien dat de door SSK gehanteerde blootstellingsduur als ook de begintijd t_1 en de doorlooptijd t_2 vergelijkbaar of conservatiever zijn. Wel wordt een extra verdunningsfactor $f_{d,2}$ van 0,01 toegepast die het extra conservatisme in blootstelling t_e en verdunning $f_{d,1}$ meer dan teniet doen. Ook hier geldt dat de keuze voor deze parametrisatie samenhangt met het voorgestelde verwerkingsproces.

3.4.4 Scenario RL-C en RL-A

Onderstaand is het IAEA scenario RL-C en RL-A (Resident landfill) vergeleken met het SSK scenario L2 en L3. Een belangrijk verschil met de IAEA scenario's RL-C en RL-A is dat de scenario's L2 en L3 van SSK inhalatie en secundaire ingestie apart beschouwen, terwijl IAEA deze beide blootstellingen juist combineert. Afgezien van dit fundamentele onderscheid is de parametrisatie van het SSK scenario conservatiever. Tevens kan ook worden meegenomen dat in tegenstelling tot het IAEA scenario de SSK aanpak niet is beperkt tot alleen de leeftijdsgroep van 1 tot 2 jaar, maar dat alle leeftijdsgroepen worden beoordeeld en dat de leeftijdsgroep met de hoogste dosis leidend is. Wel dient nog een belangrijke aanvulling te worden gemaakt. Het IAEA scenario hier heeft betrekking op een deponie, terwijl de scenario's L2 en L3 zijn opgesteld voor emissie naar lucht bij verbranding.

Tabel 7 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario RL-C en RL-A en SSK Scenario L2 en L3.

	RL-C	RL-A	L2	L3
Algemeen				
Tijdsduur voorafgaand t_1 (d)	30	30	1	7
Tijdsduur scenario t_2 (d)	365	365	1	0.1
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	0,01	0,01	0,41	0,41
Act. fr. na verbranding $f_{av,i}$ (-)	-	-	0-1	0-1
Blootstellingsduur				
Inhalatie t_{inh} (h·yr ⁻¹)	1000	1000	1000	-
Inhalatie				
Stofconcentratie C_d (mg·m ⁻³)	0,1	0,1	0,07	-
Concentratiefactor f_c (-)	4	4	1	-
Ademdebiet \dot{V} (m ³ ·h ⁻¹)	0,22	1,2	Publiek (0 - 17yr)	-
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{inh,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	Kind (1-2yr)	>17yr	Publiek (0 - 17yr)	-
Ingestie				
Inname via ingestie U (kg·yr ⁻¹)	68	88	-	270 – 511
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{ing,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	Kind (1-2yr)	>17yr	-	Publiek (0 - 17yr)

3.4.5 Scenario RF

Zoals eerder aangegeven is het scenario RF (Resident foundry) vergelijkbaar met scenario L2. De gehanteerde parameters voor beide scenario's zijn weergegeven in Tabel 8. De gehanteerde factoren voor $f_{d,1}$ en f_c verschillen substantieel; echter, zelfs bij toepassing van een f_c waarde van 70 is de combinatie van f_d en f_c zoals SSK hanteert conservatiever. Zoals reeds genoemd in Hfst. 3.4.4 voegt SSK wel een extra factor toe welke de fractie van activiteit beschrijft die bij verbranding als gas vrijkomt (f_{av}). Daarnaast is de door IAEA gehanteerde stofconcentratie C_d 30% conservatiever in vergelijking met het SSK model. Verder worden door SSK alle leeftijdsgroepen beschouwd.

Tabel 8 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario RF en SSK Scenario L2.

	RF	L2
Algemeen		
Tijdsduur voorafgaand t_1 (d)	30	1
Tijdsduur scenario t_2 (d)	365	1
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	0,002	0,41
Act. fr. na verbranding $f_{av,i}$ (-)	-	0-1
Blootstellingsduur		
Inhalatie t_{inh} ($h \cdot yr^{-1}$)	1000	1000
Inhalatie		
Stofconcentratie C_d ($mg \cdot m^{-3}$)	0,1	0,07
Concentratiefactor f_c (-)	1-70*	-
Ademdebiet \dot{V} ($m^3 \cdot h^{-1}$)	0,22	Publiek (0 - 17yr)
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{inh,i}$ ($Sv \cdot Bq^{-1}$)	Kind (1-2yr)	Publiek (0 - 17yr)

* Deze factor is element specifiek.

Op basis van deze opsomming kan worden gesteld dat de combinatie van parameters exclusief de factor f_v factor resulteert in een conservatievere aanpak voor het SSK scenario. De keuze voor een additionele factor f_v doet dit voor sommige radionucliden teniet, maar is gegeven het hier beschouwde verwerkingsproces een passende toevoeging.

3.4.6 Scenario RH

Zoals hiervoor aangegeven is het scenario RH (Resident house) vergelijkbaar met scenario L5. De gehanteerde parameters voor beide scenario's zijn weergegeven in Tabel 9. Uit het vergelijk is eenduidig op te maken dat de blootstellingsduur zoals gehanteerd door SSK bijna een factor twee hoger ligt. Daarnaast is de gehanteerde begintijd t_1 korter wat gegeven de doorlooptijd t_2 van 365 voor beide scenario's een beperkt effect heeft op de korter levende radionucliden. De gehanteerde geometrie van de ruimte is in beide gevallen met 3×4 m en 2,5 m hoogte identiek. Wel is er verschil in de gekozen materiaaldikte en dichtheid. In het IAEA scenario wordt de bijdrage van het plafond plus twee wanden, allen met een dikte van 20 cm en een dichtheid van $1,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ verondersteld. Het SSK model gaat daarentegen uit van 4 wanden met een dikte van 5 cm en een dichtheid van $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Daarmee is de dosis coëfficiënt van het IAEA model conservatiever. Verder hanteert het SSK model een extra verdunningsfactor $f_{d,2}$ van 0,01 voor opmenging met niet-radioactiefhoudend materiaal in de verbrandingsinstallatie. Als laatste wordt een element afhankelijke factor toegevoegd welke de fractie van activiteit beschrijft die na verbranding in het rookontzwavelingsgips achterblijft. Voor toepassing van ROI gips als bouw materiaal afkomstig uit de AVI is daarmee dit model adequaat, maar het IAEA model is als generiek model conservatiever.

Tabel 9 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario RH en SSK Scenario S5.

	RH	S5
Algemeen		
Tijdsduur voorafgaand t_1 (d)	100	30
Tijdsduur scenario t_2 (d)	365	365
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	0,1	0,41
Verdunningsfactor $f_{d,2}$ (-)	-	0,01
Act. fr. na verbranding $f_{av,i}$ (-)	-	0-1
Massa fr. na verbranding f_{mv} (-)	-	0,001
Blootstellingsduur		
Externe straling t_e (h·yr ⁻¹)	4500	8000
Externe blootstelling		
Dichtheid ρ (kg·m ⁻³)	1,5	1
Geometrie (m)	3x4x2.5 ¹	3x4x2.5 ²
Dikte (cm)	20	5

¹ Plafond met twee wanden worden beschouwd.

² Vier wanden worden beschouwd.

3.4.7 Scenario RP

Zoals hiervoor aangegeven is het scenario RP (Resident place) vergelijkbaar met scenario S5. De gehanteerde parameters voor beide scenario's zijn weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario RP en SSK Scenario S2.

	RP	S2
Algemeen		
Tijdsduur voorafgaand t_1 (d)	100	30
Tijdsduur scenario t_2 (d)	365	365
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	0,1	0,41
Verdunningsfactor $f_{d,2}$ (-)	-	0,01
Blootstellingsduur		
Externe straling t_e (h·yr ⁻¹)	400	2000
Inhalatie t_{inh} (h·yr ⁻¹)	400	-
Externe blootstelling		
Dichtheid ρ (kg·m ⁻³)	1,5	2
Geometrie (m)	Semi-	22,5x22,5
Dikte (m)	oneindig	0,5
Afscherming (cm)	-	10 Beton
Afstand (m)	1	1
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{inh,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	Kind (1-2yr)	Volw.
Inhalatie		
Stofconcentratie C_d (mg·m ⁻³)	0,1	-
Concentratiefactor f_c (-)	4	-
Ademdebiet \dot{V} (m ³ ·h ⁻¹)	0,22	-
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{inh,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	Kind (1-2yr)	-
Ingestie		
Concentratiefactor f_c (-)	2	-
Inname via ingestie \dot{q}	25 g·yr ⁻¹	-
Dosiscoëfficiënt $\dot{e}_{ing,i}$ (Sv·Bq ⁻¹)	Kind (1-2yr)	-

3.4.8 Scenario RW-C en RW-A

Vergelijk van de IAEA en SSK scenario's voor grondwater en daaruit voorvloeiende besmetting van drinkwater en gewassen kan niet worden vergeleken op basis van toegepaste modelparameters. De toegepaste modellen zijn zo principieel verschillend dat een meer generieke benadering geschikter is.

3.5 Bevindingen uit de toetsing

Uit bovenstaande vergelijking van IAEA en SSK scenario's kan het volgende worden geconcludeerd:

3.5.1 Uitgangspunten en blootstellingspaden

- In tegenstelling tot IAEA wordt in de SSK aanpak geen onderscheid gemaakt naar reguliere en minder waarschijnlijke situaties. SSK hanteert alleen conservatieve realistische scenario's in combinatie met een dosiscriterium van 10 μSv per jaar. Deze keuze is consistent met de RP-122 (EC, 2000).
- In tegenstelling tot IAEA is blootstelling van de huid met een bijbehorend dosiscriterium van 50 mSv per jaar equivalente huiddosis niet beschouwd door SSK. IAEA hanteert dit scenario voor de minder waarschijnlijke situaties, en ook RP-122 (EC, 2000) hanteert het dosiscriterium van 50 mSv per jaar voor de huid.
- De rekenmethodiek van IAEA en SSK voor bepaling van de blootstelling via externe straling, inhalatie en directe ingestie zijn gelijkwaardig. Wel zijn er wezenlijke verschillen in de parametrisatie van de modellen.
- De door IAEA en SSK gehanteerde rekenmodellen voor opname van activiteit in het grondwater zijn wezenlijk verschillend. Op basis van een beknopt vergelijking van methodes kan niet eenduidig gesteld worden welke van de twee modellen conservatiever is.

3.5.2 Scenario's en modelparametrisatie

De door SSK gehanteerde scenario's zijn in redelijke mate vergelijkbaar met de generieke scenario's die het IAEA hanteert. Wel moet worden aangemerkt dat het specifieke karakter van het door SSK beschouwde verwerkingsproces resulteert in een andere parametrisatie van de scenario's. Deze kunnen als volgt worden samengevat:

- In vergelijking met de IAEA is de door SSK gehanteerde blootstellingsduur (t_e, t_{inh}, t_{ing}) aan het radioactiefhoudend materiaal voor opmenging met niet-radioactiefhoudend materiaal op stortplaats en AVI korter.
- In tegenstelling tot de IAEA hanteert SSK een verdunningsfactor voor opmenging met niet-radioactiefhoudend materiaal ($f_{d,2}$) op de stortplaats en AVI.
- In tegenstelling tot de IAEA hanteert SSK voor de blootstelling aan verbrandingsresiduen en -gassen een element specifieke factor (f_{av}) waarmee de uitsplitsing van radionucliden naar de verschillende materiaalstromen wordt beschreven.
- De door SSK gehanteerde begintijd (t_1) en doorlooptijd (t_2) zijn korter dan de tijden die door het IAEA worden gehanteerd. Deze verschillen zijn vooral relevant bij de korter levende radionucliden.
- In tegenstelling tot de IAEA beschouwd de door SSK gehanteerde methodiek ook de toename in specifieke activiteit in restmaterialen als gevolg van verbranding (f_{mv}).

- De blootstelling a.g.v. van emissie naar lucht wordt door SSK in drie aparte scenario's beschouwd terwijl IAEA deze blootstellingen combineert.
- In tegenstelling tot de IAEA is de toepassing van restmaterialen uit verbanding als bouw materiaal in het SSK scenario beperkt tot toepassing van rookontzwavelingsgips als bouw materiaal.

3.5.3 Aanbevelingen

- Aanbevolen wordt om de introductie van minder waarschijnlijke situaties zoals wordt gehanteerd door de IAEA niet op te nemen in het radiologisch model van SSK omdat dit afbreuk doet aan de specifieke aard van het hier beschouwde verwerkingsproces.
- Aanbevolen wordt om blootstelling van de huid zoals door IAEA is beschouwd als minder waarschijnlijke situatie niet op te nemen. Reden hiervoor is dat de SSK scenario's waar huidbesmetting plaats kan vinden al reeds een zeer korte blootstellingsduur hanteren voor inhalatie en ingestie, en daarmee de kans op overschrijding van het dosiscriterium van 50 mSv per jaar niet meer realistisch is.
- Aanbevolen wordt de parametrisatie van de scenario's niet te synchroniseren met de IAEA scenario's. Reden hiervoor is tweeledig, i. de parametrisatie is een essentieel onderdeel van het hier beschouwde verwerkingsproces, het synchroniseren daarvan zou het karakter van het model fundamenteel aantasten en ii. de parametrisatie is niet eenduidig lichter dan die van het IAEA en omvat modelparameters waarvan sommige lichter en andere juist conservatiever zijn, daarnaast omvat het ook parameters die element gebonden zijn. Selectief synchroniseren van de parameters is ook niet gewenst omdat dit leidt tot een niet-representatieve benadering van de blootstelling.
- Aanbevolen wordt om gegeven het feit dat het hier verwerking betreft van materialen afkomstig van o.a. ziekenhuizen de omhullende gebruiksfactor $f_{d,1}$ van 0,41 niet toe te passen in het radiologisch model voor Nederland.
- Aanbevolen wordt om de toepassing van restmaterialen als bouw materiaal uit te breiden, en een scenario op te nemen waarin restmateriaal wordt toegepast als toeslagmateriaal in beton.
- Aanbevolen wordt om de verschillende scenario's die betrekking hebben op de emissie naar lucht niet samen te voegen. Reden hiervoor is dat de nu aparte SSK scenario's voor inhalatie en indirecte ingestie reeds conservatiever zijn ingericht. Samenvoeging zou resulteren in een overmatig conservatief scenario.

Met inachtneming van de bovengenoemde aanbevelingen kan worden gesteld dat in het radiologisch model van SSK gelijkwaardig is aan de radiologische modellen en dosiscriteria van de IAEA.

4 Radiologisch model voor Nederlandse situatie

Het hier gepresenteerde radiologisch model voor verbranding van radioactiefhoudend materiaal maakt gebruik van de door SSK beschreven scenariomodellen, welke waar nodig zijn aangevuld met additionele scenario's en/of aangepaste modelparameters. Dit hoofdstuk bevat een gedetailleerde beschrijving van de uitgangspunten, verwerkingsstappen en de toegepaste scenario's. Waar nodig zijn ook de waarden voor alle modelparameters hier beschreven. Deze waarden zijn, tenzij expliciet anders vermeld, afkomstig van Thierfeldt en Wörlén (2004). Verder zijn voorafgaande aan de implementatie van de hier toegepaste rekenwijze de door SSK beschreven scenariomodellen geïmplementeerd en gevalideerd. De bevindingen uit deze validatie zijn beschreven in Bijlage A.

4.1 Beschrijving van het model

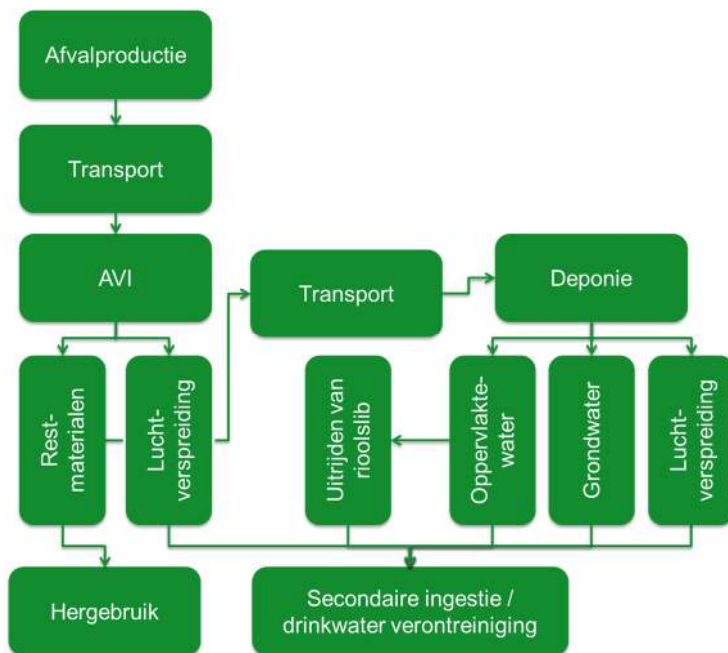
4.1.1 Uitgangspunten

Voor de bepaling van de vrijgavewaarden worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Keuze mogelijkheid voor verbranding in de afvalverbrandingsinstallatie van ZAVIN, en verbranding in een AVI niet zijnde de ZAVIN.
- De reststoffen afkomstig uit verbranding worden hergebruikt in nuttige toepassingen, en het gebonden stof wordt afgevoerd naar een deponie.
- De vrij te geven materialen bevinden zich in een vaste-, vloeibare of gecombineerde vaste/vloeibare vorm.
- De vrij te geven hoeveelheid materiaal is minder dan 1000 Mg per jaar.
- Transport van vloeistoffen vindt plaats in afgesloten verpakkingen en wordt in die verpakkingen van de ondernemer naar de AVI getransporteerd.
- Een dosiscriterium van 10 μ Sv per jaar wordt gehanteerd voor werknemers en leden van de bevolking.

4.1.2 Verwerkingsstappen

Op basis van bovengenoemde uitgangspunten is een verwerkingsproces uitgewerkt welke in Figuur 3 schematisch is weergegeven. Naast verbranding van het afval en de blootstelling richting de direct betrokkenen is ook opgenomen het transport, hergebruik van reststoffen, luchtlozing en afvoer van reststoffen naar een deponie. Voor de twee laatst genoemde processtappen wordt hierin ook meegenomen eventuele blootstelling welke voortvloeit uit verspreiding en accumulatie van radioactiviteit richting het milieu.



Figuur 3 Schematisch overzicht van het radiologisch model voor de Nederlandse situatie.

Aan de hand van bovenstaande figuren kunnen de volgende processtappen met een mogelijke blootstelling aan radioactieve stoffen worden onderscheiden:

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 reststoffen naar afnemer als nuttige toepassing of deponie
7. Hergebruik van reststoffen als nuttige toepassing
8. Deponie van reststoffen
9. Verspreiding van reststoffen vanaf de deponie via oppervlakte- en grondwater

4.2 Beschrijving van de scenariomodellen

Een opsomming van de gehanteerde parameters voor elk van de scenario's is gegeven in de Bijlage B.

4.2.1 Scenario's voor transport

Bij transport van vaste 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. Het transport van vloeistoffen en vloeistof-bevattende materialen vindt plaats in (gesloten) containers in kleinere hoeveelheden. Voor transport van een zelfde totale hoeveelheid vloeistoffen per jaar zijn daarom meer transporten nodig, echter met een geringere

externe blootstelling per transport en geen blootstelling via inhalatie en/of ingestie. Per saldo is de blootstelling t.g.v. transport van vloeistoffen kleiner of gelijk aan die van vaste stoffen.

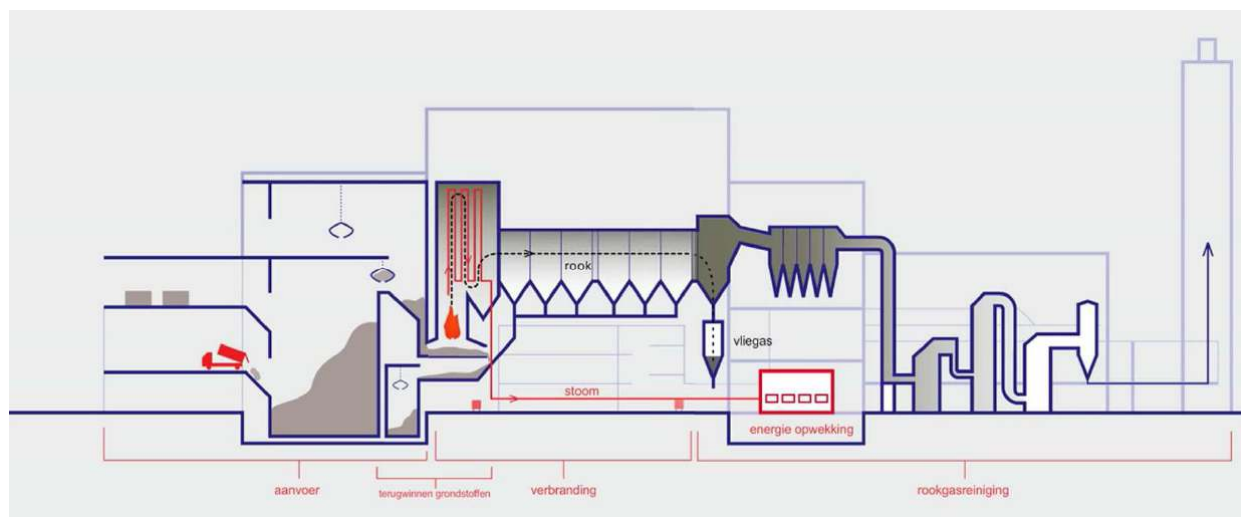
Voor transport van het radioactiefhoudend materiaal vanaf de locatie waar het materiaal is vrijgegeven naar de AVI is één scenario gehanteerd voor blootstelling aan de vrachtwagenchauffeur. Dit scenario is overgenomen uit het SSK model. Het transport scenario dekt ook af eventuele blootstelling bij transport verderop in de keten, zoals bv. transport van restmaterialen naar deponie en productie locatie waar hergebruik plaatsvindt.

- T.1 Transport naar de AVI

In tegenstelling tot de door SSK gehanteerde parametrisatie wordt een doorzet van 1000 Mg per jaar (Vianen, 2018) aangenomen, echter zonder opmenging met niet-radioactiefhoudend materiaal zoals wordt voorgesteld door Thierfeldt en Wörlén (2004). Daarmee komt de verdunningsfactor $f_{d,1}$ van 0,41 zoals door SSK gehanteerd te vervallen. Toepassing van een dergelijke verdunningsfactor wordt door Thierfeldt en Wörlén (2004) alleen opportuun geacht bij afvoer van grootschalig bouwafval uit de nucleaire sector en niet bij materiaal afkomstig vanuit andere sectoren.

4.2.2 Scenario's voor afvalverbranding

Figuur 4 toont het proces van een moderne 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 4 Procesdiagram van een moderne afvalverbrandingsinstallatie.

In de oven wordt het afval bij hoge temperatuur 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 vliegias. De vliegias wordt verzameld in een silo en per tankauto afgevoerd. Vervolgens worden de rookgassen in de rookgasreiniging nog verder ontdaan van schadelijke stoffen (bijv. de NOx 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. Vloeistoffen in vaten of containers worden apart gelost, waarbij inwendige blootstelling via inhalatie vrijwel is uitgesloten.

Mengen van vaste radioactieve afvalstoffen met overig afval vindt bij de AVI plaats door met een grijper uit verschillende batches met afval een greep te nemen en in de stortkoker in te voeren. Bij dit proces dat op afstand plaats vindt wordt stof gevormd dat een blootstelling via inhalatie kan geven. Bij het invoeren van vloeistoffen en vloeistof-bevattende materialen met het overige afval is het waarschijnlijk dat het complete vat of container met ander afval wordt vermengd en in een batch wordt verbrand. De verdunning met ander afval is hierbij derhalve minder efficiënt dan bij het mengen van vast afval. Omdat het vat of container in zijn geheel wordt ingevoerd vindt geen verspreiding van radioactieve stoffen vanuit de stortbunker plaats.

Bij verbranding zullen met name de vluchtige radionucliden (^3H , ^{14}C , halogenen) 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. Aangezien verbranding bij zeer hoge temperatuur plaatsvindt (ca. 1000 °C), waarbij deze radionucliden volledig worden vrijgemaakt, is er geen verschil tussen het verbranden van vaste en vloeibare materialen. Bij sommige vaste afvalstromen (m.n. geactiveerde materialen) zijn de radionucliden sterk verankerd in de matrix van het materiaal. Bij verbranding van vaste materialen zullen deze moeilijker kunnen ontwijken dan bij het verbranden van vloeistoffen. De verwachting is derhalve dat bij verbranding van vloeistoffen minder activiteit terecht komt in de slakken en de vliegias, maar dat de minder vluchtige radionucliden verderop in de rookgasreiniging worden afgevangen. De lozing naar de omgeving is voor de meer vluchtige radionucliden mogelijk hoger dan in het geval van verbranding van vaste stoffen.

Minder vluchtige elementen komen terecht in de bodemassen of worden in elektrostatische filters (AVI vliegias) of natte wassers (ROI gips) afgevangen. Vloeibare of vloeistof-bevattende materialen bevatten minder onverbrandbare stoffen dan de vaste materialen, maar door de menging met ander niet-radioactief afval is het uiteindelijke verschil verwaarloosbaar. Dit geringe verschil tussen de verbrandingsresiduen van vast en vloeibaar radioactief afval geldt ook voor de verdere vervolgstappen richting hergebruik en stort op een deponie.

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 11.

Tabel 11 Massafracties van de verschillende restmaterialen als percentage van het onverbrande materiaal (Thierfeldt en Wörlen, 2004).

Slakken	Schroot	Stof	Gips
---------	---------	------	------

(-)	(-)	(-)	(-)
25%	2.5%	1%	0.1%

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 12, en zijn zodanig conservatief geschat dat de optelling van de fracties normaliter meer dan 100% bedraagt.

Tabel 12 Scheiding van elementen in de slakken, schroot, stof gips en gas (Thierfeldt en Wörlen, 2004).

Element	Slakken (-)	Schroot (-)	Stof (-)	Gips (-)	Gas (-)
H	0%	0%	0%	0%	100%
C	1%	100%	1%	0,005%	100%
O	10%	0%	1%	0,005%	100%
S	10%	0%	10%	100%	1%
F, Na, P, Cl	100%	0%	10%	0,05%	0,05%
Be, Ga, Ge, As, Se, Br, Te, I, Cs, At	100%	0%	100%	0,5%	0,5%
Si, K, Ca, Rb, Sr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm	100%	0%	1%	0,005%	0,005%
Sc, Cu, Y, Zr, Nb, Tc, Ru, Rh, Pd, W, Re, Os, Ir, Pt, Au	100%	1%	1%	0,005%	0,005%
V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Mo	100%	100%	1%	0,005%	0,005%
Zn, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Hg, Tl, Pb, Bi, Po	100%	1%	100%	0,5%	0,5%
Ar, Kr, Xe, Rn	0%	0%	0%	0%	100%

Voor verbranding van het radioactiefhoudend materiaal zijn vier scenario's zoals beschreven in het SSK model gehanteerd. De scenario's zoals beschreven hier hebben betrekking op de blootstelling voor de werknemers bij de AVI. Eventuele blootstelling richting publiek bv. als gevolg van lozingen naar lucht worden afgedekt met de scenario's in Hfst. 4.2.5. 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 vliegaskbunker & vliegastransport

Bij de parametrisatie van de scenario's M.2 tot M.4 is voor afvoer via ZAVIN de verdunningsfactor $f_{d,2}$ van 0,01 aangepast naar 0,1. Reden hiervoor is dat de totale doorzet van afval bij de ZAVIN bij benadering 10.000 Mg per jaar bedraagt (Timmermans en De With, 2017). De doorzet van radioactiefhoudend materiaal naar ZAVIN van speciaal ziekenhuisafval (SZA) wordt geraamd op in totaal 860 m³ per jaar (Vianen, 2017) en op basis van een dichtheid van 1 g·cm⁻³ gesteld op 1000 Mg per jaar. Deze aangepaste verdunningsfactor zal ook worden doorgezet bij de scenario's voor hergebruik, grondwater en oppervlaktewater.

Voor afvoer richting AVI niet zijnde de ZAVIN zal wel een verdunningsfactor van 0,01 worden gehanteerd zoals ook wordt gehanteerd door SSK. Reden hiervoor is dat in Nederland reguliere AVI's voor verwerking van o.a. huisvuil een minimale doorzet hebben van $200.000 \text{ Mg}\cdot\text{yr}^{-1}$ (Timmermans en De With, 2017) en dat de geraamde doorzet van radioactiefhoudend materiaal richting deze installaties 956 m^3 per jaar (Vianen, 2017) bedraagt, welke wordt afgerond op ook 1000 Mg per jaar.

4.2.3 Scenario's voor hergebruik van restmaterialen

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-bodemassen 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 betreffen 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-bodemassen in betonproducten voor de woningbouw (S6). Hierbij is aangenomen dat het bodemas als toeslagmateriaal wordt gehanteerd met een toeslagpercentage van 25%. Eventuele blootstelling voor werknemers bij deze toepassing is reeds adequaat afgedekt met het scenario voor toepassing van bodemas in de wegenbouw. Daarmee 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 resterende reststoffen, waaronder de droge stof en de filterkoek vindt nuttige toepassing in beperkte mate plaats (IM, 2016). Mocht het vliegias een nuttige toepassing vinden in betonproducten als bindmiddel dan vormt dit slechts een zeer beperkte massafractie van slechts enkele tientallen kg 's per m^3 beton (De With, 2018). 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 4.2.1. Reden hiervoor is dat dit scenario conservatief veronderstelt dat alle transport naar de AVI wordt uitgevoerd door één enkel 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 ander materiaal veelal sprake van een afname in de specifieke activiteit t.o.v.

het origineel vrijgegeven materiaal. Bij verbranding in een AVI niet zijnde de ZAVIN is de enige uitzondering hierop de concentratie zwavel in ROI gips. Bij verbranding in de ZAVIN kan er, vanwege de beperkte opmenging met ander materiaal, sprake zijn van een mogelijke toename in specifieke activiteit in het schroot, stof en ROI gips. Echter in al deze gevallen is de hoeveelheid materiaal lager waardoor de totale blootstelling bij transport naar verwachting niet hoger is.

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 is toegevoegd. Dit scenario is in eerste aanzet gebaseerd op het scenario S.5, met dat verschil dat er een ander restmateriaal wordt toegepast. Voor dit scenario zijn de dosiscoëfficiënten voor externe straling zoals toegepast in scenario S.5 gehanteerd en met een factor 2,5 verhoogd. De factor 2,5 is het product van 2 aparte correcties, te weten: toepassing in 2 i.p.v. 4 wanden resulteert in een correctiefactor van 0,5, en verhoging in de oppervlaktedichtheid welke, rekening houdend met een toename in interne absorptie, leidt tot een factor 5. Laatst genoemde correctie is gebaseerd op het verschil in oppervlaktedichtheid ($\rho \cdot d$), deze bedraagt voor een gipswand (scenario S.5) met dikte van 5 cm en een dichtheid van $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, terwijl voor een betonwand (scenario S.6) van 20 cm dikte en een dichtheid van $2350 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ deze ongeveer $475 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ bedraagt. Als gevolg van de toename in interne absorptie bij hogere oppervlaktedichtheid is de correctiefactor bij benadering vijf en dus lager dan de factor 10 toename in oppervlaktedichtheid. Wel moet worden aangemerkt dat de correctie van vijf slechts een benadering is, en afhankelijk is van de energie van het uitgezonden gammafoton en daarmee dus ook nuclide afhankelijk is.

Verder geldt ook de aangepaste verdunningsfactor $f_{d,2}$ naar 0,1 bij afvoer naar ZAVIN zoals reeds besproken in paragraaf 4.2.2.

4.2.4 Scenario's voor afvoer van restmaterialen naar een deponie

Een deel van de restmaterialen uit afvalverbranding vindt geen nuttige toepassing en wordt naar een deponie 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 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. Daarnaast wordt ook aangenomen dat alle droge stof naar een deponie wordt afgevoerd. Dit is een conservatieve aanname waarmee stort van andere restmaterialen ook wordt afgedekt.

De afvoer van het droge stof wordt afgedekt met de twee deponie scenario's zoals gehanteerd in het radiologisch 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. Het is belangrijk te benadrukken dat bij toepassing van beide scenario's de activiteitsfractie ($f_{av,i}$) en massafractie (f_{mv}) zoals reeds eerder beschreven worden toegepast. Het resultaat hiervan is dat voor een groot deel van de nucliden de activiteitsconcentratie lager ligt dan voor de transport en AVI scenario's.

Voor blootstelling tijdens transport van de restmaterialen naar de deponie wordt veronderstelt dat deze reeds adequaat is afgedekt met het transport scenario onder paragraaf 4.2.1. De motivatie hiervoor is reeds beschreven in Hfst. 4.2.3.

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

4.2.5 Scenario's voor verspreiding naar lucht

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 dosis via ingestie wordt consumptie van volgende producten conform Tabel 13 beschouwd:

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

Tabel 13 Gemiddelde jaarconsumptie voor alle leeftijdscategorieën (Thierfeldt en Wörlen, 2004).

Consumptie	0-1 yr MM (kg·yr ⁻¹)	0-1 yr (kg·yr ⁻¹)	1-2 yr (kg·yr ⁻¹)	2-7 yr (kg·yr ⁻¹)	7-12 yr (kg·yr ⁻¹)	12-17 yr (kg·yr ⁻¹)	> 17 yr (kg·yr ⁻¹)
Drinkwater	55	170	100	100	150	200	350
Moedermelk	145	0	0	0	0	0	0
Melk, melkproducten	45	45	160	160	170	170	130
Vis	0.5	0.5	3	3	4.5	5	7.5
Vleesproducten	5	5	13	50	65	80	90
Plantproducten	72	72	132	220	250	250	240
Overige planten	67	67	115	190	215	215	200
<i>Graan, graanproducten</i>	12	12	30	80	95	110	110
<i>Vers fruit, fruit, sap</i>	25	25	45	65	65	60	35
<i>Aardappelen, wortelgroenten, sap</i>	30	30	40	45	55	55	55
Overige groente	5	5	17	30	35	35	40
Bladgroente	3	3	6	7	9	11	13

4.2.6 Scenario's voor verspreiding naar grondwater vanaf deponie

De scenario's voor verspreiding van activiteit naar grondwater worden toegepast op het droge stof dat als restmateriaal wordt afgevoerd naar de deponie. Dit betekent dat eventuele opmenging en verrijking die heeft plaatsgevonden op de AVI wordt meegenomen in de radiologische karakteristieken van het gestorte materiaal. Dit is consistent met de toepassing van de deponiemodellen zoals beschreven in Hfst. 4.2.4. De modellen welke zijn geïmplementeerd in het radiologisch model zijn als volgt:

i. het numerieke rekenmodel voor transport van percolaat door de deponie, afdichting en grondwater (Thierfeldt en Wörlen, 2004),

- G.1 Uitloging naar grondwater (SSK)

In het rekenmodel volgt de infiltratie van het percolaat op de deponie de verschillende bedrijfsfasen en stortplaatsklassen. Hierbij wordt een bedrijfsduur van 50 jaar verondersteld waarin de stortplaats aan de bovenzijde niet is afgedicht, daarna volgt volledige afdichting welke minimaal 50 jaar volledig in tact blijft gevolgd door een derde periode van ook minstens 50 jaar waarin de afdichting lineair van 100% terugloopt naar 0%. Uitloging vanuit het deponielichaam vindt plaats via het percolaat en er zijn afzonderlijke K_D waarden vastgesteld voor de stortplaats, de onderliggende grond en de watervoerende laag (Poschner en Schaller, 1995; Thierfeldt en Wörlen, 2004).

De wateroverdracht van het stortlichaam in de onderliggende bodem is afhankelijk van de dichtheid van de basisafdichting, overeenkomstige benaderingen worden in het model in aanmerking genomen. Analoog aan het modelleren van het falen van de oppervlakteafdichting gelden ook met betrekking tot de basiswaterafdichting van stortplaatsklassen I, II en III volgende drie fasen: i. volledige functie over 100 jaar (retentie-effect 100%), ii. afnemende effectiviteit in de daaropvolgende 100 jaar (vermindering van het retentie-effect van 100% tot 0%) en iii. volledig falen na 200 jaar (retentie 0%).

ii. het IAEA model beschreven in Safety Report Series No. 44 (IAEA, 2005).

- G.1 Uitloging naar grondwater (IAEA)

De blootstelling die volgt uit dit scenario betreft consumptie van drinkwater en secundaire ingestie via gebruik van drinkwater voor irrigatie van gewassen en besproeiing van weidevelden. In de scenario's wordt onderscheid gemaakt naar verschillende leeftijdscategorieën, voor zuigelingen wordt zowel baby- als borstvoeding beschouwd.

Omdat de resultaten verkregen met het grondwatermodel van SSK significant afwijken van de resultaten gerapporteerd door Thierfeldt en Wörten (2004) is bij de bepaling van de vrijgavegrenswaarden het model van de IAEA gehanteerd met bijbehorende aannames. K_D waarden, drinkwatergebruik en voedselconsumptie als ook doorrekening voor verschillende leeftijdsgroepen is gedaan op basis van de SSK aannames.

4.2.7 Scenario's voor verspreiding naar oppervlaktewater vanaf deponie

De scenario's voor verspreiding van uitgeloopte activiteit naar oppervlaktewater en landbouwgrond zijn gebaseerd op de scenario's uit het SSK model. Voor de radiologische karakteristieken van het materiaal wordt zoals bij alle deponie scenario's ook hier rekening gehouden met eventuele opmenging en verrijking in de AVI.

- O.1 Gebruik van oppervlaktewater (bevolking)
- O.2 Hergebruik van slib (secundaire ingestie)

Voor het oppervlaktewater scenario O.1 wordt zowel consumptie van drinkwater als ook ingestie van vast voedsel beschouwd. Dit omvat ingestie van drinkwater door mens en dier, berekening van bladgroente en overige planten welke worden geconsumeerd, berekening van weideplanten en opname in vlees en melk, vis. Hierbij wordt het consumptiegedrag gehanteerd zoals getoond in Tabel 13.

Voor hergebruik van slib als landbouwgrond wordt veronderstelt dat 1,6 Mg rioolslib (droge stof) per hectare landbouwgrond per jaar wordt gebruikt gedurende een periode van 50 jaar. Aangenomen wordt dat de landbouwgrond wordt gebruikt voor het verbouwen van granen en aardappelen, als ook voederplanten voor dieren zoals mais. Daarmee wordt naast de consumptie van granen en aardappelen ook consumptie van zuivel en vlees beschouwd. Toepassing van het slib op gronden waar fruit en groente wordt verbouwd is niet voorzien.

5 Aanvullende NVS nucliden

Het radiologisch model van SSK bevat in totaal meer dan 200 radionucliden. Daarnaast zijn er vanuit de NCS in totaal 64 radionucliden (de NCS radionucliden) opgegeven die momenteel worden gebruikt binnen de zorg-, onderzoeks- en productiesector (NCS, 2018). Een 22-tal van de NCS radionucliden ontbreekt in het bestaande SSK model, en deze nucliden zijn toegevoegd aan het voor Nederland ontwikkelde radiologisch model. Voor deze aanvullingen zijn nuclide en element specifieke parameters toegevoegd om doorrekening mogelijk te maken. Dit betreft o.a. dosiscoëfficiënten voor externe straling, inhalatie en ingestie. Elementafhankelijke parameters voor uitsplitsing van activiteit naar de verschillende restmaterialen bij verbranding en K_D parameters voor uitloging en opname in het milieu. Daarnaast moet voor de radionucliden met vervalreeks de bijdrage van de dochternucliden worden vastgesteld.

5.1 Dosiscoëfficiënten

Dosiscoëfficiënten voor externe straling

De dosiscoëfficiënten voor externe straling zijn rekenkundig bepaald met gebruik van de software Microshield©. De geometrieën met eventuele afscherming en bijbehorend dosispunt voor elk van de geometrieën zijn geconstrueerd op basis van de beschikbare beschrijvingen in het rapport van Brenk Systemplanung (Thierfeldt en Wörlen, 2004). Ter verificatie zijn de dosiscoëfficiënten ook bepaald voor de nucliden ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{137}Cs en ^{192}Ir , en vergeleken met de resultaten uit het rapport van Brenk. De resultaten hiervan zijn gerapporteerd in Bijlage A.2.2 (Tabel 18). In de dosiscoëfficiënten zijn eventuele bijdragen van de dochternucliden ook meegenomen. Tabel 15 toont voor de betrokken nucliden de dochterbijdrages, deze aanpak is consistent met methodiek die SSK gehanteerd. Details over de gebruikte geometrieën zijn te vinden in Tabel 20 op Bijlage B.

Tabel 14 Dosiscoëfficiënten in Sv·h⁻¹ per Bq·g⁻¹ (geometrie A tot I) en Sv·h⁻¹ per Bq·cm⁻² (geometrie J).

Nuclide	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
C-11	5.1E-08	7.5E-08	8.2E-08	2.2E-07	7.9E-08	9.2E-08	1.9E-08	1.1E-08	3.7E-08	4.3E-12
N-13	5.1E-08	7.5E-08	8.2E-08	2.2E-07	7.9E-08	9.2E-08	1.9E-08	1.1E-08	3.7E-08	4.3E-12
Ga-67	6.2E-09	9.0E-09	7.5E-09	2.6E-08	9.8E-09	1.1E-08	1.3E-09	1.3E-09	5.8E-09	8.9E-13
Ga-68	4.8E-08	7.0E-08	7.7E-08	2.1E-07	7.4E-08	8.6E-08	1.9E-08	9.9E-09	3.4E-08	4.0E-12
Ge-68+	4.8E-08	7.0E-08	7.7E-08	2.1E-07	7.4E-08	8.6E-08	1.9E-08	9.9E-09	3.4E-08	4.0E-12
Se-75	1.8E-08	2.6E-08	2.3E-08	7.5E-08	2.7E-08	3.2E-08	4.2E-09	3.7E-09	1.5E-08	2.2E-12
Kr-81	4.1E-11	6.0E-11	5.7E-11	1.8E-10	6.3E-11	7.4E-11	1.1E-11	9.2E-12	3.7E-11	1.2E-14
Kr-81m	5.5E-09	7.9E-09	6.1E-09	2.3E-08	8.5E-09	9.8E-09	9.6E-10	1.1E-09	4.9E-09	7.2E-13
Kr-83m	3.2E-20	3.2E-20	2.7E-20	1.9E-12	4.2E-17	6.2E-17	1.4E-26	1.3E-13	2.3E-12	3.4E-15
Rb-81+	2.5E-08	3.7E-08	4.0E-08	1.1E-07	3.9E-08	4.5E-08	9.9E-09	5.1E-09	1.8E-08	2.1E-12
Rb-82	5.6E-08	8.3E-08	9.1E-08	2.4E-07	8.7E-08	1.0E-07	2.3E-08	1.2E-08	4.0E-08	4.6E-12
Rb-83+	2.4E-08	3.6E-08	4.0E-08	1.1E-07	3.8E-08	4.4E-08	9.6E-09	5.0E-09	1.7E-08	2.0E-12
Y-88	1.6E-07	2.3E-07	2.7E-07	6.2E-07	2.4E-07	2.9E-07	1.2E-07	2.5E-08	9.2E-08	8.8E-12
Zr-88+	3.5E-08	5.1E-08	5.6E-08	1.5E-07	5.4E-08	6.4E-08	2.6E-07	3.0E-07	7.0E-07	2.7E-07
Zr-89	6.7E-08	1.0E-07	1.2E-07	2.8E-07	1.0E-07	1.2E-07	3.8E-08	1.2E-08	4.4E-08	4.6E-12
Sr-82+	5.6E-08	8.3E-08	9.1E-08	2.4E-07	8.7E-08	1.0E-07	2.3E-08	1.2E-08	4.0E-08	4.6E-12
I-124	5.8E-08	8.6E-08	9.8E-08	2.4E-07	9.0E-08	1.1E-07	3.3E-08	1.1E-08	3.9E-08	4.1E-12
Lu-177	1.1E-09	1.6E-09	1.1E-09	4.6E-09	1.7E-09	2.0E-09	1.7E-10	2.3E-10	1.2E-09	1.9E-13
Lu-177m+	3.9E-08	5.7E-08	5.1E-08	1.7E-07	6.1E-08	7.1E-08	9.6E-09	8.3E-09	3.5E-08	5.1E-12
Re-183	2.8E-09	3.9E-09	2.7E-09	1.3E-08	4.7E-09	5.5E-09	4.1E-10	6.1E-10	4.9E-09	8.9E-13
Re-184	4.7E-08	6.9E-08	8.0E-08	1.9E-07	7.3E-08	8.6E-08	2.5E-08	8.6E-09	3.3E-08	3.5E-12
Pt-195m	7.3E-10	9.9E-10	4.4E-10	4.1E-09	1.4E-09	1.6E-09	4.0E-11	1.6E-10	2.2E-09	4.3E-13
Bi-213+	8.1E-09	1.2E-08	1.3E-08	3.5E-08	1.3E-08	1.5E-08	3.5E-09	1.6E-09	5.9E-09	7.0E-13
Ac-225+	9.5E-09	1.4E-08	1.4E-08	4.0E-08	1.5E-08	1.7E-08	3.7E-09	1.9E-09	7.3E-09	9.3E-13

Dosiscoëfficiënten voor ingestie

De dosisconversiecoëfficiënten voor ingestie voor de niet beschikbare radionucliden zijn gebaseerd op de beschikbare gegevens uit ICRP 119 (ICRP, 2012; ICRP, 2013). Eventuele bijdrages van de dochter-nucliden zijn ook meegenomen conform Tabel 15. Voor de zeer kortlevende nucliden waarvoor geen dosisconversiecoëfficiënten beschikbaar zijn in de ICRP is een waarde 0 gehanteerd.

Dosiscoëfficiënten voor inhalatie

De dosisconversiecoëfficiënten voor inhalatie van de radionucliden welke niet beschikbaar zijn, zijn gebaseerd op beschikbare gegevens uit ICRP 119 (ICRP, 2012; ICRP, 2013). Eventuele bijdrages van de dochternucliden zijn ook meegenomen conform Tabel 15. Voor de zeer kortlevende nucliden waarvoor ICRP geen dosisconversiecoëfficiënten beschikbaar heeft is een waarde 0 gehanteerd. De dosisconversiecoëfficiënten in ICRP 119 voor de Kr isotopen zijn gegeven in Sv·d⁻¹ per Bq·m⁻³. Voor een consistente modelaanpak is deze conversiecoëfficiënt terugerekend naar een coëfficiënt uitgedrukt in Sv·Bq⁻¹. Deze

terugrekening is uitgevoerd op basis van het gehanteerde ademdebiet van $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ voor werknemers. Daarmee bedraagt de dosisconversiecoëfficiënt voor zowel werknemers als leden van het publiek $7,29 \cdot 10^{-13} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$.

5.2 Elementspecifieke parameters

De vanuit de NCS voorgestelde nucliden omvatten drie chemische elementen die niet in de studie door Brenk zijn opgenomen. Het betreft N, O en Kr. Voor deze drie elementen zijn de element specifieke parameters aan het rekenmodel toegevoegd. Voor ^{13}N en ^{15}O zijn de benodigde parameters deels verkregen uit DOVIS-A (Blaauboer, 2002). De resterende parameters zijn conservatief geschat. Gegeven de zeer korte halfwaardetijd van beide nucliden ($^{13}\text{N} = 9,8 \text{ m}$ en $^{15}\text{O} = 122 \text{ s}$) zal de conservatieve schatting geen wezenlijke invloed hebben op de uitkomst. Voor het edelgas Kr is verondersteld dat dit ingesloten naar de AVI wordt getransporteerd en tijdens verbranding in gasvormige toestand zal vrijkomen en zal resulteren in een emissie naar de lucht. Behalve de inhalatie van Kr in de directe omgeving vindt er geen opname in het milieu plaats en zijn verdere element specifieke parameters niet van toepassing.

5.3 Dochternucliden en activiteitsaandelen

Tabel 15 toont de radionucliden met dochternucliden en de bijdrage van de dochternucliden aan het moedernuclide als zijnde de maximale fractie van de startactiviteit van het moedernuclide. Daarmee wordt in de scenarioberekening een vaste verhouding verondersteld tussen de moeder en dochter. Voor de meeste moederdochter relaties is deze vereenvoudiging geen bezwaar. Voor ^{88}Zr leidt de combinatie van halfwaardetijden van de moeder en dochter tot een overschatting van de bijdrage van het dochternuclide ^{88}Y voor de korte termijn scenario's en tot een onderschatting voor de lange-termijn scenario's.

$$F(t) = \frac{\lambda_d}{\lambda_d - \lambda_m} (e^{-\lambda_m t} - e^{-\lambda_d t}) \quad (16)$$

Tabel 15 Nucliden met dochternucliden en bijbehorende fracties als bijdrage van de dochternuclide aan het moeder nuclide.

Nuclide	Dochternucliden	Bijdrage van de dochternucliden					
⁶⁸ Ge	⁶⁸ Ga	1					
⁸¹ Rb	⁸¹ Kr	0					
⁸³ Rb	^{83m} Kr	1					
⁸⁸ Zr	⁸⁸ Y	0,31					
⁸² Sr	⁸² Rb	1					
^{177m} Lu	¹⁷⁷ Lu	0,22					
²¹³ Bi	²¹³ Po ²⁰⁹ Tl ²⁰⁹ Pb	0,98	0,02	0,01			
²²⁵ Ac	²²¹ Fr ²¹⁷ At ²¹³ Bi ²¹³ Po ²⁰⁹ Tl ²⁰⁹ Pb	1	1	1	0,98	0,02	1

6 Bepaling specifieke vrijgavegrenswaarden

6.1 Afvoer naar AVI van ZAVIN

Tabel 16 geeft een overzicht van de vrijgavegrenswaarden voor de 64 radionucliden welke vanuit het NCS platform 'Stralingshygiëne in ziekenhuizen' zijn geïdentificeerd. De waarden in de tabel zijn de logaritmisch afgeronde vrijgavegrenswaarden. De radionucliden zijn doorgerekend voor een doorzet van < 1000 Mg radioactiefhoudend materiaal per jaar via verbranding bij de ZAVIN. In het overzicht is ook opgenomen het limiterende scenario.

De scenario's die betrekking hebben op de verbranding (M.1 tot M.4) zijn tezamen voor ongeveer 60% van de radionucliden het limiterende scenario. Daarna volgen de toepassingsscenario's (S.1 tot S.6) en het transport scenario T.1 welke voor respectievelijk 16 en 10% van de radionucliden het limiterende scenario zijn. Voor de resterende radionucliden zijn het de scenario's met emissie via lucht of water. De vrijgavegrenswaarde van de resterende radionucliden wordt beperkt door de overige scenario's. Voor ^3H en ^{14}C is de secundaire ingestie als gevolg van lozing naar lucht en de opname in gewassen het limiterende secundaire. Een volledig overzicht van alle berekende rekenresultaten voor elk van de individuele scenario's is opgenomen in Bijlage C.

6.2 Afvoer naar AVI niet zijnde ZAVIN

Tabel 16 geeft naast bovenstaand beschreven overzicht ook de vrijgavegrenswaarden bij verbranding in een reguliere AVI voor huisvuil. Hierbij wordt ook uitgegaan van een doorzet van < 1000 Mg radioactiefhoudend materiaal per jaar.

Bij verbanding via deze verwerkingsroute is het transport scenario T.1 voor bijna 40% van de radionucliden het limiterende scenario. Daarna volgen de scenario's die betrekking hebben op de verbranding (M.1 tot M.4) deze tezamen zijn voor bijna 40% van de radionucliden het limiterende scenario. De toepassingsscenario's (S.1 tot S.6) zijn voor nog eens meer dan 14% het limiterende scenario. Het restant waaronder ook ^{14}C wordt begrenst door één van de scenario's voor emissie naar lucht of water.

Voor een aantal scenario's is er geen onderscheid in afvoer naar ZAVIN of naar een andere AVI. Dit betreft o.a. het transport (T.1) en ontvangst (M.1) scenario als ook de lucht emissie (L.1 – L.3). Laatst genoemde is vooral van belang voor ^3H en ^{14}C , omdat voor beide radionucliden de emissie naar lucht het limiterende scenario is. Reden hiervoor is dat bij een emissie naar lucht de bronterm is gebaseerd op de totaal aangeleverde hoeveelheid radioactiefhoudend materiaal. Deze is in beide gevallen 1000 Mg. Eventuele extra verdunning in de AVI heeft zodoende geen invloed op de bronterm en dus ook niet op de vrijgavegrenswaarde. Voor andere scenario's geldt dat de extra verdunning wel leidt tot een afname in blootstelling en daarmee een toename in de vrijgavegrenswaarde.



Tabel 16 Specifieke vrijgavegrenswaarde uitgedrukt in Bq·g⁻¹ en limiterende scenario voor radionucliden in radioactiefhoudende materialen welke worden vrijgegeven via verbranding in de AVI van ZAVIN en via verbranding in een AVI niet zijnde de ZAVIN. De gepresenteerde waarden zijn gebaseerd op een logaritmische afronding waarbij een berekende waarde van 3·10^x tot 3·10^{x+1} wordt afgerond op 10^x.

ZAVIN					AVI (niet ZAVIN)					ZAVIN					AVI (niet ZAVIN)				
Nuclide	Sc	Vrijgave	Sc	Vrijgave	Nuclide	Sc	Vrijgave	Sc	Vrijgave	Nuclide	Sc	Vrijgave	Sc	Vrijgave	Nuclide	Sc	Vrijgave	Sc	Vrijgave
H-3	L3	1E+05	L3	1E+05	Ga-68	T1	1E+07	T1	1E+07	I-131	M4	1E+00	M4	1E+01					
C-11	M1	1E+22	M1	1E+22	Ge-68	M4	1E-01	M4	1E+00	Cs-137	M4	1E-01	M4	1E+00					
C-14	L3	1E+03	L3	1E+03	Se-75	M4	1E-01	M4	1E+00	Eu-152	S6	1E-01	S6	1E+00					
O-15	M1	1E+214	M1	1E+214	Kr-81	M2	1E+03	T1	1E+04	Eu-154	S6	1E-01	S6	1E+00					
N-13	M1	1E+45	M1	1E+45	Rb-81	T1	1E+03	T1	1E+03	Sm-153	M2	1E+02	T1	1E+03					
F-18	T1	1E+05	T1	1E+05	Rb-82	-	-	-	-	Ho-166	M2	1E+02	T1	1E+03					
P-32	O1	1E+03	M1	1E+04	Rb-83	M3	1E+00	T1	1E+01	Er-169	M1	1E+04	M1	1E+04					
P-33	O1	1E+04	M1	1E+04	Y-88	M3	1E-01	T1	1E+00	Lu-177	M3	1E+02	T1	1E+02					
S-35	S4	1E+02	S4	1E+03	Zr-88	S2	1E-01	S2	1E+00	Lu-177m	S6	1E+00	S6	1E+01					
Cr-51	M3	1E+01	T1	1E+02	Zr-89	M2	1E+00	T1	1E+01	Re-183	S6	1E+01	S6	1E+02					
Mn-52	M2	1E-01	T1	1E+00	Sr-82	M3	1E+00	T1	1E+01	Re-184	M3	1E+00	T1	1E+01					
Mn-54	S6	1E-01	S6	1E+00	Sr-85	S1	1E+00	T1	1E+01	Re-186	M2	1E+02	T1	1E+03					
Fe-55	M1	1E+04	M1	1E+04	Sr-89	O1	1E+03	M1	1E+04	Re-188	M2	1E+02	T1	1E+02					
Fe-59	M3	1E+00	T1	1E+00	Y-90	M1	1E+04	M1	1E+04	Pt-195m	M2	1E+02	T1	1E+03					
Co-56	M3	1E-01	T1	1E+00	Tc-99	G1	1E+00	G1	1E+01	Tl-201	M4	1E+01	M4	1E+02					
Co-57	S6	1E+00	S6	1E+01	Tc-99m	T1	1E+03	T1	1E+03	Bi-213	L3	1E+09	L3	1E+09					
Co-58	M3	1E+00	T1	1E+01	Pd-103	M1	1E+03	M1	1E+03	Ra-223	M3	1E+01	M1	1E+01					
Co-60	S6	1E-01	S6	1E+00	In-111	M4	1E+00	M4	1E+01	Ac-225	M3	1E+01	M1	1E+01					
Cu-64	T1	1E+02	T1	1E+02	In-114m	M4	1E+00	M4	1E+01	Ac-227	M1	1E-01	M1	1E-01					
Zn-65	M4	1E-01	M4	1E+00	I-123	T1	1E+02	T1	1E+02	Th-227	M3	1E+01	M1	1E+01					
Zn-69m	T1	1E+02	T1	1E+02	I-124	M4	1E-01	M4	1E+00										
Ga-67	M4	1E+00	M4	1E+01	I-125	O1	1E+00	O1	1E+01										

7 Conclusies

De uitkomsten van deze studie kunnen als volgt worden samengevat:

Het radiologisch model van SSK is getoetst aan de uitgangspunten en scenario's van de IAEA systematiek, en met inachtneming van een aantal aanbevelingen is geconcludeerd dat het model gelijkwaardig is aan de modellen en dosiscriteria van de IAEA.

Het radiologisch model van SSK is i.h.k.v. deze studie geïmplementeerd voor de Nederlandse situatie en gevalideerd. De validatie omvat een vergelijking van de rekenresultaten van alle scenario's met de door Brenk gerapporteerde waarden. Uit de validatie blijkt dat de scenario's die betrekking hebben op de werknemer grotendeels in overeenstemming zijn. Wel zijn er (veelal) beperkte afwijkingen die waarschijnlijk zijn terug te voeren op een onvolledige beschrijving van de gehanteerde modelparameters. Daarnaast zijn er incidenteel een aantal grotere afwijkingen die beperkt zijn tot enkele nucliden. De blootstelling voor leden van de bevolking via emissie naar lucht is ook grotendeels in overeenstemming. Wel is voor de nucliden ^3H en ^{14}C het dispersie model van het Duitse AVV toegepast (AVV, 2005) waarmee de resultaten van Brenk niet konden worden gereproduceerd. Voor de oppervlaktewater scenario's vallen de afwijkingen in bijna alle gevallen binnen de marges van één orde magnitude, hiervoor was het echter wel noodzakelijk, de modelformulering uit te breiden en in het geval van rioolslib de verdunningsfactor te verwijderen. Als laatste zijn er de grondwater scenario's. De verschillen in dit scenario zijn substantieel, ook een vergelijk van de IAEA modellen voor grondwater levert geen coherent beeld op. Vanwege de aard en complexiteit van het model is moeilijk te traceren waar de afwijkingen uit voortkomen, zodoende is het IAEA model voor grondwater in het radiologisch model geïmplementeerd en ingezet.

Het radiologisch model is opgesteld in de vorm van een Excel© tool en aangevuld met additionele scenario's, radionucliden en opties voor verschillende verwerkingsroutes. Dit omvat o.a. de optie voor verwerking bij de ZAVIN of voor verwerking bij een reguliere AVI voor huisvuil niet zijnde de ZAVIN. In totaliteit zijn meer dan 300 radionucliden beschikbaar in het model, dit is inclusief de 64 nucliden die door het NCS zijn geïdentificeerd. Hiervoor zijn ook in totaal 22 radionucliden uit de door NCS opgestelde lijst toegevoegd en voorzien van alle benodigde modelparameters zoals dosiscoëfficiënten voor de verschillende blootstellingspaden en in sommige gevallen element specifieke parameters.

Op basis van het voor Nederland ontwikkelde radiologisch model zijn specifieke vrijgavegrenswaarden opgesteld. De resultaten van de 64 door de NCS geïdentificeerde radionucliden zijn opgenomen in deze rapportage. Een volledig overzicht van de specifieke vrijgavegrenswaarden van alle meer dan 300 radionucliden is beschikbaar in de Excel© rekentool.

8 Referenties

AVV (2005)

Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV in der Fassung vom 21. Januar 2005.

Blaauboer R.O. (2002)

Dosisberekening voor de omgeving bij vergunningverlening ioniserende straling – DOVIS A Lozingen in lucht en water, RIVM rapport 6103100006/2002, Bilthoven.

EC (2000)

Practical use of the concepts of clearance and exemption – Part I – Guidance on General Clearance Levels for Practices, Radiation Protection No. 122, Luxemburg.

EU (1996)

Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation, Off. J. Eur. Union, L 159, 29.6.1996.

EU (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, Off. J. Eur. Union, L 13, 17.1.2014.

IAEA (2005)

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

ICRP (2012)

Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).

ICRP (2013)

Corrigenda to ICRP Publication 119: Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60 [Ann. ICRP 41(s) 2012], ICRP Publication 123. Ann. ICRP 42(4).

IM (2016)

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

NCS (2017)

Vrijgave materialen medische sector die radioactieve vloeistoffen bevatten - Lijst met radionucliden en vloeibaar afvoerstromen, NCS notitie, 4 juli 2017.

Lijst van tabellen

Tabel 1 Overzicht scenario's SRS-44.....	19
Tabel 2 Overzicht scenario's SSK.....	19
Tabel 3 Kruistabel voor vergelijk van IAEA en SSK scenario's.	22
Tabel 4 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario WL en SSK Scenario D3.	23
Tabel 5 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario WF en SSK Scenario M2, M3 en M4.....	25
Tabel 6 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario WO en SSK Scenario T1 en S3.	26
Tabel 7 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario RL-C en RL-A en SSK Scenario L2 en L3.....	27
Tabel 8 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario RF en SSK Scenario L2.	28
Tabel 9 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario RH en SSK Scenario S5.....	28
Tabel 10 Parameter vergelijking IAEA SRS-44 scenario RP en SSK Scenario S2.	30
Tabel 11 Massafracties van de verschillende restmaterialen als percentage van het onverbrande materiaal (Thierfeldt en Wörlen, 2004).....	36
Tabel 12 Scheiding van elementen in de slakken, schroot, stof gips en gas (Thierfeldt en Wörlen, 2004).....	37
Tabel 13 Gemiddelde jaarconsumptie voor alle leeftijdscategorieën (Thierfeldt en Wörlen, 2004).....	41
Tabel 14 Dosiscoëfficiënten in Sv·h ⁻¹ per Bq·g ⁻¹ (geometrie A tot I) en Sv·h ⁻¹ per Bq·cm ⁻² (geometrie J).....	44
Tabel 15 Nucliden met dochternucliden en bijbehorende fracties als bijdrage van de dochternuclide aan het moeder nuclide.....	46
Tabel 16 Specifieke vrijgavegrenswaarde uitgedrukt in Bq·g ⁻¹ en limiterende scenario voor radionucliden in radioactiefhoudende materialen welke worden vrijgegeven via verbranding in de AVI van ZAVIN en via verbranding in een AVI niet zijnde de ZAVIN. De gepresenteerde waarden zijn gebaseerd op een logaritmische afronding waarbij een berekende waarde van 3·10 ^x tot 3·10 ^{x+1} wordt afgerond op 10 ^x	48
Tabel 17 Afwijking in de rekenresultaten tussen NRG en SSK per scenario en per nuclide en rekenkundig bepaald volgens $(C_{NRG} - C_{SSK})/C_{SSK} \cdot 100\%$	57
Tabel 18 Overzicht van de verschillen in externe dosiscoëfficiënten tussen de rekenkundig bepaalde waarden en de waarden in het rapport van Brenk Systemplanung. Het verschil is gedefinieerd als	

$(DC_{NRG}-DC_{SSK})/DC_{SSK} \cdot 100\%$. Een negatieve waarde tot een maximum van -100% betreft een onderschatting, en een positieve waarde tot een maximum van $\infty\%$ betreft een overschatting van de NRG rekenresultaten t.o.v. de SSK resultaten..... 67

Tabel 19 Beschrijving scenarioparameters T1 tot L3..... 69

Tabel 20 Geometrie specificaties voor de bepaling van de dosiscoëfficiënt voor externe straling..... 70

Tabel 21 Volledig overzicht van de rekenresultaten voor de NCS nucliden uitgaande van verbranding bij de ZAVIN AVI. De *log round* waarde is gebaseerd op een logaritmische afronding waarbij een berekende waarde van $3 \cdot 10^x$ tot $3 \cdot 10^{x+1}$ wordt afgerond op 10^x 71

Tabel 22 Volledig overzicht van de rekenresultaten voor de NCS nucliden uitgaande van verbranding bij een AVI niet zijnde ZAVIN. De *log round* waarde is gebaseerd op een logaritmische afronding waarbij een berekende waarde van $3 \cdot 10^x$ tot $3 \cdot 10^{x+1}$ wordt afgerond op 10^x 74

Lijst van figuren

Figuur 1 Schematisch overzicht van het SSK radiologisch model..... 9

Figuur 2 Systeem van de compartimenten met: (1) stortplaats, (2) geologische barrière, (3) grondwaterlaag en (4) drinkwaterput. 12

Figuur 3 Schematisch overzicht van het radiologisch model voor de Nederlandse situatie..... 34

Figuur 4 Procesdiagram van een moderne avalverbrandingsinstallatie..... 35

Bijlage A Validatie van de scenariomodellen

A.1 Overzicht van de validatie resultaten

Voor validatie van de scenariomodellen resultaten vergeleken met de uitkomsten zoals gerapporteerd in Tabel F-4.2 van het rapport van Brenk Systemplanung (Thierfeldt en Wörten 2004). De afwijking in het resultaat is rekenkundig geformuleerd als $(C_{NRG} - C_{SSK}) / C_{SSK} \cdot 100\%$. In de vergelijking is C de specifieke activiteit ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$) op moment van vrijgave uitgaande van een dosiscriterium van $10 \mu\text{Sv}$ per jaar. Een afwijking van meer dan 20% is in onderstaande tabel met oranje gemarkeerd een afwijking van meer dan 50% is met rood gemarkeerd. Een afwijking met een negatieve waarde impliceert een onderschatting van de specifieke activiteit (conservatief) en een positieve waarde impliceert een overschatting van de NRG modellen.



Tabel 17 Afwijking in de rekenresultaten tussen NRG en SSK per scenario en per nuclide en rekenkundig bepaald volgens $(C_{NRG} - C_{SSK})/C_{SSK} \cdot 100\%$.

Nuclide	T1	D1	D2	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	L1	L2	L3	G1	O1	O2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
H-3	0%	0%	-1%	-1%	0%										0%	-100%	-100%	-84%	
Be-7	1%	0%	3%	0%	0%	1%	0%	0%	5%	3%		5%	1%	3%	-7%	10%		-46%	30%
C-14	0%	1%	-1%	-1%	1%		0%	0%	1%			0%			-2%	-100%	-100%	-5%	
Na-22	1%	2%	-2%	2%	2%	1%	1%	1%	0%	1%		0%	0%	-2%	-1%	-4%		12%	-10%
Si-32	-2%	3%	2%	-1%	3%		1%	-2%	1%			0%			-2%	8%	-100%	-47%	17%
P-32	-3%	-1%	9%	-1%	-1%		-2%	1%	11%			9%			-12%	-49%		-78%	70%
P-33	1%	1%	5%	-1%	1%		1%	-1%	6%			6%			-5%	-42%		-80%	41%
S-35	0%	0%	0%	0%	0%		0%	1%	2%			2%			-1%	-22%		-38%	17%
Cl-36	-1%	-1%	-1%	0%	-1%		-1%	-1%	1%			2%			1%	-30%	-100%	-84%	-65%
K-40	1%	0%	-1%	-1%	0%	0%	0%	0%	1%	-1%		-1%	-2%	-1%	0%	-17%	-71%	-32%	-13%
Ca-41	-2%	-2%	-3%	-1%	-2%		0%	-2%	-3%			-35%			-22%	-60%		-60%	-66%
Ca-45	2%	-1%	-1%	-2%	-1%		-2%	-2%	-1%			-6%			-2%	-10%		14%	6%
Sc-46	1%	-1%	1%	-2%	-1%	0%	-1%	0%	1%	5%	-2%	2%	-1%	0%	-3%	-8%		-39%	20%
V-48	0%	-2%	8%	1%	-2%	0%	1%	0%	10%	3%	-2%	10%	-1%	2%	-9%	-2%		-71%	7%
Cr-51	0%	-2%	4%	1%	-2%	0%	1%	0%	5%	0%	-1%	6%	-5%	1%	-8%	-30%		-72%	18%
Mn-53	0%	-1%	-2%	1%	-1%		0%	0%	1%			0%			0%	7%	-43%	-3%	-13%
Mn-54	2%	0%	-1%	0%	0%	1%	2%	0%	-2%	1%	0%	0%	1%	0%	-1%	13%		8%	3%
Fe-55	1%	-1%	0%	1%	-1%		0%	2%	0%			1%			-4%	3%		92%	23%
Fe-59	0%	-1%	6%	1%	-1%	-1%	4%	-1%	0%	-2%	-2%	2%	-2%	0%	-2%	-11%		-36%	15%
Co-56	-1%	0%	1%	-1%	0%	-1%	-1%	1%	3%	5%	4%	2%	4%	4%	-3%	0%		-19%	38%
Co-57	1%	0%	-1%	0%	0%	0%	1%	1%	0%	-2%	0%	1%	1%	-2%	2%	2%		47%	21%
Co-58	0%	-1%	-4%	0%	-1%	-3%	1%	-2%	4%	-4%	-3%	2%	-3%	-1%	-2%	-5%		-30%	16%
Co-60	0%	-4%	0%	3%	-4%	-1%	0%	-1%	0%	0%	0%	1%	0%	1%	0%	3%		96%	25%
Ni-59	-1%	-1%	-1%	2%	-1%		-1%	-1%	-1%			1%			-2%	3%	-30%	72%	24%
Ni-63	-1%	-1%	0%	0%	-1%		-3%	0%	1%			-1%			1%	1%	-78%	81%	24%
Zn-65	3%	-1%	0%	0%	-1%	-2%	-2%	1%	-1%	2%	1%	3%	-1%	-1%	0%	-9%		3%	1%



Nuclide	T1	D1	D2	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	L1	L2	L3	G1	O1	O2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Ge-71	0%	-1%	11%	1%	-1%		1%	1%	19%			21%			-12%	-50%		-49%	344%
As-73	0%	4%	-1%	0%	4%	0%	2%	2%	3%	-1%		4%	-1%	2%	-2%	10%		-80%	20%
As-74	0%	1%	6%	-1%	1%	2%	1%	2%	8%	-1%		9%	3%	3%	-7%	-1%		-86%	10%
Se-75	-47%	-50%	-49%	-10%	-50%	-51%	-46%	-47%	19%	-37%		-7%	-11%	23%	-3%	-19%		-22%	8%
Rb-86	0%	1%	6%	0%	1%	-2%	2%	2%	9%	-3%		8%	-2%	3%	-9%	-43%		-85%	12%
Sr-85	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	4%	1%		5%	2%	0%	-2%	-3%		-18%	24%
Sr-89	-1%	0%	1%	0%	0%	-1%	0%	-1%	6%	2%		4%	1%		-4%	-9%		-27%	27%
Sr-90	0%	0%	-3%	0%	0%		2%	0%	-1%			0%			1%	4%	-98%	-11%	-13%
Y-91	-1%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	3%	0%	0%	2%	0%	0%	-5%	10%		-36%	22%
Zr-93	-67%	-63%	-46%	-64%	-63%		-67%	-67%	-63%			44%	0%	0%	-2%	8%	168930%	2382%	31%
Zr-95	0%	0%	-3%	-1%	0%	-3%	-2%	-2%	3%	-4%	-3%	1%	-4%	-3%	-6%	-13%		37%	16%
Nb-93m	1%	0%	-2%	0%	0%		2%	-1%	0%			1%	-2%	-12%	-2%	-1%		103%	11%
Nb-94	0%	-1%	-1%	0%	-1%	3%	0%	0%	0%	-1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	348%	104%	26%
Nb-95	-2%	0%	2%	0%	0%	0%	0%	0%	3%	-1%	0%	1%	-1%	0%	-4%	-40%		-56%	62%
Mo-93	-3%	1%	1%	0%	1%		2%	-3%	-2%			11%	0%	2%	-4%	4%	-63%	29%	-13%
Tc-97	-2%	-2%	0%	0%	-2%		2%	-2%	-2%			-3%	0%	1%	-2%	-10%	-100%	-76%	-66%
Tc-97m	0%	-1%	-1%	-1%	-1%	1%	-1%	-2%	1%	-3%	-4%	-2%	-4%	-2%	-1%	-14%		-60%	-24%
Tc-99	-4%	0%	-1%	-1%	0%	0%	1%	5%	-1%	1%	0%	-17%	1%	-2%	-2%	-11%	-100%	-75%	-66%
Ru-103	-2%	-1%	3%	0%	-1%	1%	1%	0%	6%	5%	6%	4%	2%	3%	-2%	4%		-46%	34%
Ru-106	0%	-1%	-1%	-1%	-1%	0%	0%	1%	1%	-1%	0%	0%	1%	-4%	-1%	6%		12%	-7%
Pd-103	-3%	0%	9%	-2%	0%	-2%	2%	2%	11%	-1%	2%	10%	1%	4%	-8%	-46%		-61%	26%
Ag-105	0%	0%	1%	0%	0%	0%	-1%	1%	2%	-5%	-7%	2%	-6%	-1%	-5%	-39%		-50%	13%
Ag-108m	1%	-1%	-2%	1%	-1%	1%	0%	-4%	0%	-1%	-1%	-1%	-3%	-10%	-4%	-5%	-92%	-11%	-20%
Ag-110m	0%	2%	0%	1%	2%	0%	1%	0%	0%	-1%	0%	0%	1%	-3%	-1%	-10%		12%	-2%
Ag-111	1%	1%	15%	2%	1%	-4%	-1%	-1%	13%	-12%	-9%	13%	-10%	6%	-18%	-51%		17%	83%
Cd-109	3%	0%	0%	-2%	0%	1%	-2%	1%	1%	-1%	2%	2%	2%	2%	3%	6%		2%	-2%
Cd-115m	0%	3%	0%	-1%	3%	1%	0%	0%	3%	-3%	-4%	3%	-4%	-5%	-5%	-4%		-52%	14%
In-114m	0%	0%	4%	1%	0%	0%	3%	-1%	3%	5%	5%	4%	2%	5%	-5%	3%		856%	32%



Nuclide	T1	D1	D2	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	L1	L2	L3	G1	O1	O2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Sn-113	1%	2%	-1%	1%	2%	1%	0%	0%	1%	-2%	-2%	2%	-4%	-4%	-1%	-15%		-69%	24%
Sn-125	-1%	4%	10%	-1%	4%	0%	0%	-1%	10%	-6%	-7%	14%	-6%	5%	-14%	-48%		-73%	29%
Sb-124	1%	1%	1%	2%	1%	0%	0%	0%	3%	1%	4%	4%	4%	3%	-3%	-7%		-43%	30%
Sb-125	-1%	0%	-2%	0%	0%	1%	1%	0%	-1%	-1%	-1%	3%	-1%	-1%	3%	7%		28%	-10%
Te-123m	-1%	1%	1%	-1%	1%	1%	0%	-1%	2%	2%		2%	1%	1%	-1%	-14%		-12%	17%
Te-125m	0%	0%	1%	0%	0%	-1%	-1%	-1%	3%	1%		2%	5%	3%	-5%	-25%		-33%	39%
Te-127m	0%	0%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	3%	0%		6%	1%	-1%	-2%	-15%		-16%	17%
Te-129m	1%	0%	3%	-1%	0%	-1%	-1%	1%	5%	-3%		4%	0%	1%	-5%	-34%		-46%	44%
I-125	0%	-1%	3%	0%	-1%	0%	0%	0%	5%	7%		4%	4%	5%	-5%	-12%		-63%	10%
I-126	0%	0%	12%	1%	0%	0%	1%	1%	10%	6%		14%	2%	5%	-10%	-43%		-42%	56%
I-129	0%	-1%	-1%	-1%	-1%	1%	0%	0%	0%	1%		2%	1%	0%	-1%	0%	-100%	-69%	-66%
I-131	1%	4%	20%	-3%	4%	0%	0%	0%	20%	-3%		21%	-6%	7%	-16%	-47%		-12%	0%
Cs-131	0%	0%	9%	0%	0%	0%	-1%	-2%	11%	-9%		11%	-9%	4%	-15%	-48%		-75%	-7%
Cs-134	0%	-1%	0%	1%	-1%	-1%	0%	-4%	0%	0%		-1%	3%	1%	-1%	2%		-36%	28%
Cs-135	-1%	-1%	-2%	0%	-1%		0%	-1%	0%			2%			-5%	2%	82%	-18%	22%
Cs-136	-1%	3%	12%	0%	3%	0%	0%	-3%	11%	-3%		12%	-3%	3%	-11%	-46%		-81%	16%
Cs-137	-3%	0%	-4%	0%	0%	-1%	0%	1%	2%	3%		1%	0%	-3%	0%	2%	-100%	-22%	23%
Ba-131	0%	0%	11%	3%	0%	0%	0%	1%	17%	0%		16%	2%	9%	-13%	-21%		-71%	2%
Ba-133	-1%	1%	-1%	4%	1%	0%	1%	-1%	0%	-1%		0%	0%	-1%	-2%	15%	-100%	-10%	-15%
Ba-140	0%	-1%	9%	1%	-1%	0%	1%	-1%	10%	-1%		12%	-2%	5%	-10%	-22%		-67%	-3%
Ce-139	0%	-1%	-2%	1%	-1%	-1%	-1%	0%	2%	-1%		0%	0%	0%	-1%	11%		-12%	26%
Ce-141	0%	2%	2%	1%	2%	0%	1%	-1%	5%	0%		6%	-2%	0%	-3%	5%		-60%	15%
Ce-144	-1%	-1%	1%	0%	-1%	0%	-1%	0%	2%	-1%		4%	1%	-1%	-2%	10%		16%	25%
Pr-143	-2%	3%	7%	-2%	3%		0%	0%	11%			10%			-9%	-10%		-57%	-8%
Nd-147	3%	0%	12%	-1%	0%	-2%	-1%	-1%	13%	-3%		13%	-4%	6%	-13%	-13%		7%	-15%
Pm-147	0%	-1%	-3%	-1%	-1%	1%	1%	0%	1%	-1%		0%	1%		-3%	4%		100%	24%
Sm-151	1%	1%	-1%	2%	1%	1%	-1%	1%	0%			0%	0%	-1%	-2%	5%		106%	24%
Eu-152	0%	0%	-1%	0%	0%	1%	-3%	1%	2%	0%		-1%	0%	-6%	-2%	6%		123%	19%



Nuclide	T1	D1	D2	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	L1	L2	L3	G1	O1	O2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Eu-154	-1%	-1%	-1%	0%	-1%	-4%	0%	-3%	0%	-1%		0%	-1%	1%	-2%	6%		116%	26%
Eu-155	0%	1%	-1%	-1%	1%	-2%	0%	-2%	-1%	1%		0%	0%	4%	-5%	7%		113%	31%
Gd-153	0%	0%	0%	0%	0%	2%	3%	1%	-1%	0%		1%	-1%	0%	-1%	9%		56%	24%
Tb-160	0%	2%	1%	-1%	2%	2%	-1%	-1%	3%	0%		2%	1%	3%	-5%	7%		-4%	28%
Er-169	-1%	-2%	11%	0%	-2%	-1%	-2%	-1%	7%	-13%		9%	-12%		-15%	-14%		12%	-34%
Tm-170	-1%	-1%	2%	-1%	-1%	0%	0%	1%	2%	0%		1%	-5%	-1%	-6%	9%		23%	23%
Tm-171	-1%	2%	-2%	-2%	2%	0%	0%	0%	0%	-1%		1%	0%	-5%	-1%	5%		100%	22%
Hf-181	1%	-1%	4%	1%	-1%	-1%	0%	1%	5%	1%		2%	3%	4%	-4%	-38%		-47%	72%
Ta-182	0%	2%	0%	1%	2%	2%	0%	-1%	2%	2%		1%	-2%	-1%	-2%	-21%		-4%	29%
W-181	0%	2%	1%	1%	2%	0%	-3%	1%	0%	0%	-1%	0%	2%	1%	0%	-10%		-24%	14%
W-185	0%	0%	-1%	0%	0%	-1%	0%	1%	3%	0%	0%	2%	2%		-2%	-16%		-38%	29%
Os-185	0%	1%	-1%	1%	1%	-2%	-2%	0%	1%	1%	3%	5%	2%	5%	-3%	-22%		-11%	36%
Os-191	0%	1%	8%	0%	1%	3%	0%	1%	10%	-5%	-2%	10%	-2%	4%	-9%	-50%		-54%	172%
Ir-190	1%	4%	12%	3%	4%	1%	1%	1%	14%	3%	6%	20%	3%	7%	-11%	-44%		-51%	21%
Ir-192	0%	0%	-1%	1%	0%	1%	0%	-2%	3%	-2%	-3%	3%	-2%	-1%	0%	-16%		-38%	17%
Ir-194m	0%	-3%	-1%	0%	-3%	0%	0%	-2%	0%	-1%	-1%	1%	-1%	-2%	-1%	-5%		3%	22%
Hg-203	0%	1%	3%	-1%	1%	-1%	1%	2%	4%	2%	3%	4%	2%	2%	-3%	-36%		-64%	63%
Tl-202	-1%	-1%	12%	1%	-1%	0%	-1%	-1%	12%	-6%	-6%	9%	-7%	2%	-12%	-46%		-74%	17%
Tl-204	0%	0%	1%	0%	0%	-3%	-1%	1%	2%	1%	0%	-1%	-2%	0%	3%	1%		-15%	25%
Pb-210	-1%	-1%	0%	0%	-1%	0%	-3%	-1%	0%	0%	-3%	96%	-1%	-1%	1%	5%		9912%	24%
Bi-207	0%	0%	-1%	1%	0%	-3%	0%	-4%	0%	1%	0%	0%	-3%	5%	-3%	9%	-100%	56%	31%
Po-210	-2%	0%	-2%	-1%	0%	-2%	-1%	1%	1%	-3%	2%	358%	-1%	0%	-3%	6%		56%	27%
Ra-223	1%	0%	13%	0%	0%	3%	0%	4%	11%	-5%		12%	-5%	6%	-14%	-39%		-11%	-13%
Ra-225	1%	0%	10%	2%	0%	1%	2%	0%	11%	-1%		12%	1%	3%	-6%	-35%		-39%	2%
Ra-226	0%	1%	0%	0%	1%	0%	0%	-1%	-1%	-1%		13%	3%	-1%	0%	5%	145%	201%	25%
Ra-228	-1%	0%	0%	-1%	0%	0%	-1%	0%	-1%	1%		2%	-2%	-2%	1%	2%		100%	27%
Ac-227	0%	0%	-1%	-2%	0%	0%	0%	1%	1%	1%		0%	1%	-1%	-1%	7%		90%	25%
Th-227	2%	-3%	8%	0%	-3%	-4%	0%	-4%	8%	-4%		8%	-3%	2%	-7%	3%		6176%	-2%



Nuclide	T1	D1	D2	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	L1	L2	L3	G1	O1	O2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Th-228	0%	-1%	0%	3%	-1%	0%	0%	0%	0%	0%		1%	-3%	-2%	-3%	3%		64%	29%
Th-229	0%	1%	-3%	4%	1%	0%	0%	0%	-3%	1%		0%	-1%	0%	0%	6%	1206%	2278%	33%
Th-230	-1%	-1%	-1%	1%	-1%	2%	2%	-4%	0%	0%		4%	0%	2%	-2%	3%	3247608%	113985%	32%
Th-232	2%	4%	-2%	1%	4%	-1%	0%	1%	0%	-1%		1%	0%	-2%	0%	5%	1363016%	699245%	32%
Th-234	1%	0%	3%	2%	0%	4%	0%	-3%	6%	-1%		6%	0%	0%	-8%	10%		-34%	5%
Pa-230	-2%	-1%	8%	1%	-1%	2%	-1%	1%	9%	-1%		10%	-2%	4%	-8%	-5%		375%	3%
Pa-231	-1%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%	1%	0%		-1%	-1%	-3%	-5%	4%	390%	203%	24%
Pa-233	0%	-1%	4%	2%	-1%	-2%	-1%	-3%	6%	-1%		6%	-3%	1%	-7%	1%		-62%	16%
U-230	1%	0%	5%	-1%	0%	-1%	1%	1%	6%	-1%		12%	-1%	0%	-7%	-8%		-29%	4%
U-232	1%	0%	-2%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	1%		1%	-2%	-1%	-6%	9%	-85%	147%	25%
U-233	-1%	0%	0%	-4%	0%	0%	1%	-1%	1%	0%		-2%	-1%	-2%	0%	5%	14%	109%	24%
U-234	-1%	-1%	-1%	-4%	-1%	0%	-1%	-1%	-1%	2%		-2%	-2%	-1%	-2%	2%	-5%	89%	27%
U-235	0%	2%	-2%	0%	2%	-2%	-3%	-2%	-1%	-1%		-1%	-1%	-1%	-2%	5%	-35%	3%	22%
U-236	0%	0%	0%	-3%	0%	-1%	0%	0%	2%	0%		3%	1%	-2%	-2%	6%	55%	126%	26%
U-238	-1%	-2%	-4%	-2%	-2%	2%	-1%	1%	-2%	0%		-3%	0%	0%	-2%	7%	55%	115%	25%
Np-237	2%	0%	-2%	0%	0%	0%	0%	-1%	0%	-1%		-2%	0%	-3%	-3%	6%	34%	107%	26%
Pu-236	0%	0%	-2%	1%	0%	-1%	-2%	-1%	0%	0%		0%	1%	-2%	-2%	4%	59636%	2214%	24%
Pu-237	4%	0%	1%	1%	0%	1%	2%	0%	3%	-4%		2%	-5%	-2%	-4%	7%		-26%	10%
Pu-238	0%	0%	-1%	1%	0%	-3%	0%	0%	0%	3%		0%	0%	-3%	0%	7%	-96%	143%	34%
Pu-239	-1%	-1%	-1%	1%	-1%	3%	-1%	-1%	-1%	1%		1%	-1%	-1%	-2%	6%	1585%	143%	31%
Pu-240	-1%	-1%	-1%	1%	-1%	4%	-1%	-1%	-1%	1%		1%	0%	-2%	-2%	6%	1464%	143%	31%
Pu-241	-2%	3%	-1%	0%	3%	-1%	-1%	-2%	3%	0%		3%	0%	-5%	-1%	7%	40%	-82%	27%
Pu-242	-1%	-1%	-2%	-1%	-1%	1%	-3%	-1%	1%	-2%		0%	0%	-3%	-4%	6%	1661%	143%	31%
Pu-244	0%	0%	2%	-1%	0%	0%	1%	2%	0%	1%		4%	1%	-1%	-3%	5%	2676%	125%	32%
Am-241	-4%	0%	-2%	-2%	0%	0%	1%	-4%	0%	1%		-1%	0%	-2%	-2%	5%	-37%	138%	29%
Am-242m	0%	0%	-1%	-1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		-2%	1%	-1%	-3%	5%	52%	43%	32%
Am-243	0%	0%	-2%	0%	0%	1%	1%	0%	-1%	0%		2%	0%	-1%	0%	5%	32638%	131%	33%
Cm-242	0%	0%	0%	-1%	0%	-3%	-4%	-1%	1%	0%		1%	0%		-4%	10%		-20%	30%



Nuclide	T1	D1	D2	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	L1	L2	L3	G1	O1	O2
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Cm-243	0%	0%	-1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	1%		0%	2%	-1%	-3%	5%	1811%	128%	28%
Cm-244	2%	0%	-2%	0%	0%	2%	3%	3%	3%	0%		0%	4%	-2%	-4%	6%	-94%	141%	30%
Cm-245	0%	0%	-1%	0%	0%	0%	0%	0%	-1%	2%		1%	1%	-2%	-4%	3%	111093%	67%	30%
Cm-246	3%	1%	-1%	0%	1%	0%	-1%	3%	0%	0%		-1%	0%	-1%	-2%	5%	968%	138%	34%
Cm-247	-1%	0%	-2%	0%	0%	-1%	-1%	-1%	0%	0%		1%	0%	-1%	-1%	5%	95211%	121%	33%
Cm-248	1%	-2%	-3%	1%	-2%	0%	-1%	1%	2%	1%		1%	-2%	-1%	-2%	6%	49858%	136%	31%
Bk-249	0%	-1%	0%	2%	-1%	0%	0%	0%	0%	2%		0%	-1%	-2%	-2%	6%		-79%	23%
Cf-248	1%	1%	2%	1%	1%	-2%	0%	0%	-1%	0%		1%	-1%		-2%	4%		-39%	29%
Cf-249	1%	1%	-4%	2%	1%	0%	1%	1%	2%	1%		2%	0%	-1%	1%	5%	3951%	100%	29%
Cf-250	-1%	0%	-2%	1%	0%	-1%	0%	-1%	1%	0%		0%	0%	-2%	-4%	2%	10349%	122%	31%
Cf-251	0%	-1%	-1%	3%	-1%	1%	0%	0%	1%	0%		-1%	3%	-1%	0%	5%	-13%	137%	31%
Cf-252	-1%	4%	2%	0%	4%	0%	-1%	0%	-3%	0%		1%	1%	-4%	-2%	3%	45947970%	115%	24%
Cf-253	-2%	3%	7%	1%	3%	-3%	-1%	-1%	10%	-2%		10%	-1%		-7%	3%		68%	2%
Cf-254	2%	0%	3%	1%	0%	0%	0%	0%	3%			4%	3%		-3%	5%		-10%	30%
Es-253	-1%	1%	5%	0%	1%	0%	0%	2%	9%	-1%		5%	-1%	2%	-6%	2%		-13%	0%
Es-254	0%	1%	-1%	0%	1%	1%	-2%	-2%	-1%	1%		0%	-1%	-1%	-2%	5%		156%	27%

A.2 Bevindingen uit de validatie

A.2.1 SCENARIOMODELLEN

T.1 Transport

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model.

D.1 Deponie ontvangst vracht vrijgeven materiaal

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model. Wel dient daarbij te worden aangemerkt dat er geen directe ingestie van stof is veronderstelt, terwijl in de samenvatting van het Brenk rapport wordt gesteld dat voor personeel op de deponie en de verbrandingsinstallatie directe ingestie wel is opgenomen.

D.2 Deponie MBV

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model. Hierbij is ook conform de rekensystematiek zoals beschreven in het rapport van Brenk de inhalatiedosis voor ^3H en ^{14}C bepaald op basis van een gasvormige verspreiding van de genoemde nucliden in de directe omgeving.

D.3 Deponie storten van vrijgegeven materiaal

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model.

M.1 AVI ontvangst vracht vrijgeven materiaal

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model. Wel dient ook hier te worden aangemerkt dat er geen directe ingestie van stof is veronderstelt, terwijl in de samenvatting van het Brenk rapport wordt gesteld dat voor personeel op de deponie en de verbrandingsinstallatie directe ingestie wel is beschouwd.

M.2 AVI Afvalbunker

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model.

M.3 AVI Slakkenbunker & slakkentransport

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model. Hierbij dient wel te worden aangemerkt dat een blootstelling aan externe straling van 1000 uur per jaar is gehanteerd. Deze blootstellingsduur correspondeert met de algemene beschrijving van het scenario (Thierfeldt en Wörlén, 2004 – Hfst. 4.5.5), maar niet met de samenvattende tabel (Thierfeldt en Wörlén, 2004 – Tabel 4.9) waarin een tijdsduur van 1800 uur per jaar wordt vermeld. Verder is er sprake van stofinhalatie, maar wordt er geen ingestie van stof verondersteld, terwijl dit volgens de samenvatting (Thierfeldt en Wörlén, 2004 – Samenvatting) wel wordt beschouwd.

M.4 AVI Vliegaskunker & vliegastransport

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model. Wel is er sprake van stofinhalatie, maar wordt er geen ingestie van stof verondersteld, terwijl dit volgens de samenvatting (Thierfeldt en Wörlén, 2004 – Samenvatting) wel wordt beschouwd. Het door Brenk gerapporteerde rekenresultaat voor ^{194m}Ir behoort waarschijnlijk tot ^{192}Ir .

S.1 Toepassing bodemas in wegenbouw (werknemers)

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model.

S.2 Toepassing bodemas in wegenbouw (bevolking)

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model.

S.3 Hergebruik metaal schroot

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model. Wel wordt daarbij verondersteld dat er een opmenging plaatsvindt van het radioactiefhoudende materiaal in een verhouding van 1:5. Om tot identieke resultaten te komen dient een verhouding van 1:4 te worden gehanteerd.

S.4 Toepassing ROI gips in woningbouw (werknemer)

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model. Alleen de nucliden ^{71}Ge , ^{93}Zr , ^{131}I , ^{210}Pb en ^{210}Po , tonen een afwijking van meer dan 20%.

S.5 Toepassing ROI gips in woningbouw (bevolking)

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model.

L.1 Verspreiding via lucht (extern bodem)

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model. Echter dit verondersteld dat de dosiscoëfficiënten voor externe straling zoals toegepast in dit scenario (Thierfeldt en Wörlén, 2004 – Tabel A-4.3) zijn uitgedrukt in ($\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) per ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$). De tekst in het rapport is hier tegenstrijdig en verificatie van de dosiscoëfficiënten suggereert een eenheid van ($\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) per ($\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$). Daarmee zou de gedeponeerde activiteit met een factor 10^4 verminderd moeten worden wat leidt tot een zelfde afname in dosis per eenheid van activiteit.

L.2 Verspreiding via lucht (inhalatie)

De resultaten van NRG corresponderen met de resultaten van het originele SSK model.

L.3 Verspreiding via lucht (secundaire ingestie)

Op een totaal van 150 nucliden zijn er ongeveer 30 nucliden met een afwijking van meer dan 20%. In alle gevallen geldt hierbij dat de resultaten uit deze studie conservatiever zijn dan de resultaten zoals gerapporteerd door Brenk. Voor de nucliden ^3H en ^{14}C is de afwijking meerdere ordes magnitude. Hierbij dient te worden gesteld dat gegeven het gasvormige karakter van ^3H en ^{14}C een alternatieve reken-

methodiek voor verspreiding en opname in de gewassen moet worden gehanteerd. Deze methodiek is niet in het rapport van Brenk beschreven. Echter, hiervoor is de systematiek gekozen zoals beschreven in Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung (AVV, 2005). Mogelijkerwijs is voor ^3H vergeten de bronterm mee te nemen en voor ^{14}C is mogelijk een belangrijke omgevingsparameter niet opgenomen.

G.1 Uitloging naar grondwater (DK 0)

Voor uitloging naar grondwater is het numerieke rekenmodel zoals beschreven door Brenk Systemplanung geïmplementeerd. Daarnaast is ook het eenvoudigere grondwatermodel zoals beschreven in het IAEA Safety Report Series No. 44 (IAEA, 2005) geïmplementeerd. Dit laatste model kan worden toegepast met de standaard modelinstellingen van de IAEA als ook met de modelinstellingen die corresponderen met de door Brenk voorgestelde parameterwaarden. Zowel het SSK model als ook in het IAEA model houdt rekening met de vorming van dochternucliden.

De resultaten van NRG laten grote afwijkingen zien bij vergelijking met de originele resultaten van het SSK model. Dit betreft de resultaten afkomstig van het nieuw geïmplementeerde SSK model als ook die verkregen met het IAEA model. Het IAEA model met Brenk instellingen lijkt over de gehele linie het meest conservatief. De resultaten van het Brenk model tonen in algemene zin voor de enkelvoudige nucliden een onderschatting van de vrijgave waarden, terwijl er juist sprake is van een overschatting voor de nucliden met vervalreeks. Voor het IAEA model met IAEA instellingen is de conclusie vergelijkbaar.

O.1 Gebruik van oppervlaktewater (bevolking)

De resultaten van NRG uit scenario O.1 tonen afwijkingen die variëren tot een grote van één orde magnitude. Dit betreft zowel overschattingen als onderschattingen. Voor ongeveer 7 nucliden, op een totaal van 150 nucliden, is de afwijking groter dan één orde magnitude.

Om tot deze resultaten te komen is wel veronderstelt dat er sprake is van een tijdsvertraging voor dat het uitloogwater vanaf de deponie het oppervlaktewater bereikt. Deze tijdsduur wordt op basis van de resultaten in het rapport van Brenk geschat op één maand. Daarnaast wordt veronderstelt dat de afname van drinkwater uit het oppervlaktewater plaatsvindt gedurende een periode van nogmaals één maand waarbij de gemiddelde concentratie gedurende deze maand wordt gehanteerd. Rekenkundig is dit proces als volgt aan het scenario toegevoegd.

$$C_{wo,i} = C_{wl,i} e^{-\lambda_i t_1} \frac{1 - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i t_2}. \quad (\text{A.1})$$

In bovenstaande vergelijking is $C_{wo,i}$ de activiteitsconcentratie (Bq ltr^{-1}) in het water bij onttrekking uit het oppervlaktewater, $C_{wl,i}$ is de activiteitsconcentratie op direct na uitloging met eventuele opmenging van schoon uitloog- en oppervlaktewater (Bq ltr^{-1}), λ_i de vervalconstante is van het betreffende nuclide, t_1 is de tijdsduur voordat het uitloogwater het oppervlaktewater bereikt en t_2 de tijdsduur waarover drinkwater uit het oppervlaktewater plaatsvindt. Op basis van de door Brenk gerapporteerde resultaten wordt voor t_1 en t_2 een tijdsduur van één maand gehanteerd.

O.2 Hergebruik van slib (secundaire ingestie)

De resultaten van het scenario O.2 zijn bij benadering gereproduceerd. De afwijkingen liggen grotendeels allemaal binnen de 50% en de hoogst aangetroffen afwijking bedraagt een factor 5. Wel is hiervoor een toevoeging aan het model gedaan die niet in het Brenk rapport is beschreven. Daarnaast is veronderstelt dat er geen opmenging is met ander afval op de deponie en dat er bij de waterzuiveringsinstallatie geen aanvoer is van schoon slib afkomstig van andere afvoerbronnen, terwijl juist deze parameters wel expliciet worden benoemd in de rapportage. Het lijkt zodoende waarschijnlijk dat voor laatst genoemde het een fout betreft waarmee het scenario onnodig conservatief wordt gemaakt. De aanvulling op het model betreft de accumulatie van het slib bij de waterzuiveringsinstallatie gedurende een periode van één jaar alvorens het slib wordt uitgestort als landbouwgrond. Dit proces is als volgt rekenkundig beschreven:

$$C_{su,i} = C_{sl,i} \frac{1 - e^{-\lambda_i t_2}}{\lambda_i t_2}. \quad (\text{A.2})$$

In bovenstaande vergelijking is $C_{su,i}$ de activiteitsconcentratie ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) in het slib tijdens het uitrijden op de landbouwvelden, $C_{sl,i}$ is de activiteitsconcentratie in het slib op de waterzuiveringsinstallatie ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$) met eventuele opmenging van schoonslib, λ_i de vervalconstante is van het betreffende nuclide en t_2 de tijdsduur waarover het slib wordt geaccumuleerd. Op basis van de door Brenk gerapporteerde resultaten wordt aangenomen dat het hier een periode van 1 jaar betreft.

Het lijkt erop dat er in dit proces geen rekening is gehouden met het gegeven dat er een vertraging is voordat het slib de waterzuiveringsinstallatie bereikt. Dit in tegenstelling tot hierboven beschreven scenario O.1 waar waarschijnlijk wel rekening is gehouden met een dergelijke vertraging.

A.2.2 RADIONUCLIDEN

Dosiscoëfficiënten voor externe straling

De dosiscoëfficiënten voor externe straling zijn steekproefsgewijs geverifieerd middels Microshield© berekeningen. Voor de meeste scenario's is het verschil minder dan een factor twee (verschil ligt tussen de -50% en 100%). Uitzondering hierop zijn de scenario's D, G en H, waar een grotere afwijking is aangetroffen. Details van dit vergelijk zijn weergegeven in Tabel 18. Het is niet herleidbaar waar deze verschillen van afkomstig zijn.

Tabel 18 Overzicht van de verschillen in externe dosiscoëfficiënten tussen de rekenkundig bepaalde waarden en de waarden in het rapport van Brenk Systemplanung. Het verschil is gedefinieerd als $(DC_{NRG} - DC_{SSK}) / DC_{SSK} \cdot 100\%$. Een negatieve waarde tot een maximum van -100% betreft een onderschatting, en een positieve waarde tot een maximum van $\infty\%$ betreft een overschatting van de NRG rekenresultaten t.o.v. de SSK resultaten.

Geo.	Beschrijving	⁵⁷ Co	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs	¹⁹² Ir
A	Transport, chauffeur 0,2 cm afscherming	37%	2%	0%	-6%	18%
B	Ontvangst deponie/vuilverbranding	61%	0%	-2%	-8%	17%
C	Deponie, medewerker in cabine met 0,2 cm afscherming	-22%	9%	14%	-2%	-2%
D	Deponie, buiten cabine, geen afscherming	-78%	-20%	-10%	-28%	-37%
E	Composteerinstallatie, 0,1 cm afscherming	91%	32%	24%	23%	57%
F	MVA bunker, afscherming 0.1 cm ijzer	71%	16%	8%	8%	41%
G	Slaktoepassing wegenbouw, bevolking 10 cm beton afsch.	-94%	-53%	-38%	-62%	-67%
H	Hergebruik afgescheiden metalen, machine	-51%	-56%	-59%	-58%	-48%
I	Hergebruik ROI gips, vier wanden 4x3x0,05 m	-13%	0%	2%	-7%	1%
J	Directe straling bodem	-12%	-2%	-1%	-8%	-2%

De nucliden ⁷³As en ⁷⁴As staan tweemaal vermeld in de tabel (Thierfeldt en Wörlen, 2004 – Tabelle A-4.3) met verschillende dosiscoëfficiënten. De waarden welke leiden tot een correct vergelijk met de door Brenk gerapporteerde resultaten zijn gehandhaafd (Thierfeldt en Wörlen, 2004 – Tabelle F-4.2). De tweede serie getallen voor ⁷³As betreft waarschijnlijk de dosiscoëfficiënten van het nuclide ⁷⁵Se. De dosiscoëfficiënten voor dit nuclide ontbreken in de tabellen van Brenk (Thierfeldt en Wörlen, 2004 – Tabelle A-4.3), en de dosiscoëfficiënten berekend middels Microshield© bevestigen dat het hier waarschijnlijk de dosiscoëfficiënten voor ⁷⁵Se betreft. Het is onduidelijk op welk nuclide de tweede serie getallen van ⁷⁴As betrekking hebben.

Dosiscoëfficiënten voor inhalatie

In de dosiscoëfficiënten voor ⁹³Zr lijkt de bijdrage van ^{93m}Nb te ontbreken.

Dosiscoëfficiënten voor ingestie

In de dosiscoëfficiënten voor ⁹³Zr lijkt de bijdrage van ^{93m}Nb te ontbreken.

Bijlage B Beschrijving van de modelparameters

Tabel 19 Beschrijving scenarioparameters T1 tot L3.

Scenario	T1	D1	D2	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	L1	L2	L3
Algemene parameters																	
Begin van het scenario t_1 (d)	1	1	2	1	1	1	7	7	30	30	30	30	30	30	1	1	1
Tijdsduur van het scenario t_2 (d)	0.1	0.0	91.3	5.0	0.0	5.0	0.1	0.1	5.0	365	365	5.0	365	365	-	1.0	-
Blootstellingstijd																	
Extern t_e (h·yr ⁻¹)	50	10	1800	50	10	1800	1000	300	200	2000	2000	200	8000	8000	1000	0	0
Inhalatie t_e (h·yr ⁻¹)	5	10	1800	50	10	0	100	50	200	0	0	200	0	0	0	1000	0
Ingestie (direct) t_e (h·yr ⁻¹)	0	10	1800	50	10	0	100	50	200	0	0	200	0	0	0	0	0
Tijd(fractie 2)/Tijd(total) (%)	-	-	-	25%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gebruik, verdunning en verrijking																	
Verdunningsfactor $f_{d,1}$ (-)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Verdunningsfactor met afval $f_{d,2}$ (-) <u>Zavin</u>	1	1	0.1	1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	1	1	1
Verdunningsfactor met afval $f_{d,2}$ (-) AVI	1	1	0.01	1	1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1	1	1
Verdunningsfactor met mat. $f_{d,3}$ (-)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.25	1	1	0.25	1	1	1
Verrijksfactor $f_{d,4}$ (-)	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Externe straling																	
Geometrie code 1 (-)	A	B	E	C	B	F	A	A	D	G	H	I	I	I	J	-	-
Geometrie code 2 (-)	-	-	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Correctie DCC 1 (-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5	-	-	-
Correctie DCC 2 (-)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Inhalatie en ingestie																	
Stofconcentratie 1 C_d (mg·m ⁻³)	1	1	0.1	0.2	1		1	1	1	0	0	0.1	0	0	-	-	-
Stofconcentratie 2 C_d (mg·m ⁻³)	-	-	-	1	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Concentratiefactor stof f_c (-)	10	10	1	10	10		1	1	1	0	0	1	0	0	-	-	-
Dispersiefactor (d·m ⁻³)	-	-	1.2E-8	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabel 20 Geometrie specificaties voor de bepaling van de dosiscoëfficiënt voor externe straling.

Geometrie	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
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 C Overzicht rekenresultaten van de NCS nucliden

Tabel 21 Volledig overzicht van de rekenresultaten voor de NCS nucliden uitgaande van verbranding bij de ZAVIN AVI. De *log round* waarde is gebaseerd op een logaritmische afronding waarbij een berekende waarde van $3 \cdot 10^x$ tot $3 \cdot 10^{x+1}$ wordt afgerond op 10^x .

Nuclide	T1	D1	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	L1	L2	L3	G1	O1	O2	Scenario	Level	Log Round
	(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)
H-3	4.1E+06			2.1E+05											2.6E+06	4.1E+04				L3	4.1E+04	1E+05
C-11	3.0E+22	1.9E+173	5.0E+174	2.9E+22	2.7E+23	1.3E+151	1.8E+150							2.4E+32	5.6E+29	7.8E+24				M1	2.9E+22	1E+22
C-14	2.9E+05	1.5E+06	1.2E+06	1.5E+04		3.8E+06	3.1E+05	1.9E+06			1.7E+06				7.3E+04	3.9E+02	3.0E+03	2.8E+05		L3	3.9E+02	1E+03
O-15	1.0E+215			2.9E+214	1.1E+216									7.6E+224						M1	2.9E+214	1E+214
N-13	1.0E+45			5.9E+44	9.6E+45	1.3E+305	1.7E+304							8.5E+54						M1	5.9E+44	1E+45
F-18	5.5E+04	5.8E+33	2.7E+34	1.3E+05	3.2E+05	3.4E+27	4.6E+27	5.6E+119	2.4E+121		3.8E+121	6.9E+121	1.4E+121	4.4E+17	3.9E+14	2.5E+09		1.1E+152	2.6E+279	T1	5.5E+04	1E+05
P-32	5.5E+04	5.3E+04	4.4E+04	3.8E+03		1.3E+04	1.0E+04	2.2E+04			2.0E+05				9.4E+07	3.2E+04		1.0E+03	2.0E+06	O1	1.0E+03	1E+03
P-33	1.2E+05	3.1E+05	2.1E+05	2.5E+04		7.4E+04	5.9E+04	7.4E+04			9.5E+05				2.0E+08	2.6E+05		3.7E+03	1.0E+06	O1	3.7E+03	1E+04
S-35	1.3E+05	1.2E+05	8.5E+04	1.1E+04		2.9E+05	2.3E+04	1.7E+05			8.2E+01				1.0E+07	3.8E+03	1.5E+03	1.2E+03	2.1E+04	S4	8.2E+01	1E+02
Cr-51	1.7E+02	7.1E+04	5.9E+03	5.9E+02	3.4E+01	2.5E+01	3.4E+02	2.6E+01	1.7E+02	1.6E+02	2.0E+04	4.2E+03	8.5E+01	3.8E+13	7.5E+10	1.4E+08		1.9E+06	8.6E+12	M3	2.5E+01	1E+01
Mn-52	1.2E+00	9.5E+02	1.6E+02	4.0E+00	2.7E-01	3.2E-01	4.3E+00	7.7E+00	1.1E+02	1.2E+02	4.6E+03	3.9E+03	7.8E+01	2.6E+12	2.3E+09	6.1E+07		1.4E+06	1.3E+12	M2	2.7E-01	1E-01
Mn-54	4.5E+00	1.5E+03	1.9E+02	1.5E+01	7.8E-01	5.8E-01	7.7E+00	5.9E-01	4.1E-01	4.0E-01	3.6E+02	1.3E+01	2.6E-01	1.6E+11	1.9E+09	7.9E+06	1.2E+35	6.3E+03	5.6E+05	S6	2.6E-01	1E-01
Fe-55	4.5E+05	2.7E+06	2.0E+06	2.7E+04		6.7E+04	5.4E+05	3.4E+04			3.1E+06				7.5E+09	4.1E+06	4.8E+102	3.6E+04	2.5E+07	M1	2.7E+04	1E+04
Fe-59	3.1E+00	1.1E+03	1.6E+02	1.0E+01	5.2E-01	4.2E-01	5.6E+00	6.9E-01	1.5E+00	1.7E+00	4.1E+02	5.6E+01	1.1E+00	9.0E+11	8.1E+08	1.9E+06		2.1E+04	1.6E+09	M3	4.2E-01	1E+00
Co-56	1.0E+00	3.5E+02	4.7E+01	3.3E+00	1.6E-01	1.3E-01	1.8E+00	1.8E-01	2.3E-01	2.8E-01	1.1E+02	9.3E+00	1.9E-01	1.7E+11	6.3E+08	2.0E+06		1.9E+04	1.3E+08	M3	1.3E-01	1E-01
Co-57	1.1E+02	4.5E+04	1.6E+03	4.4E+02	2.0E+01	1.3E+01	1.8E+02	3.0E+00	6.8E+00	9.3E+00	2.6E+03	9.8E+01	2.0E+00	7.6E+11	5.4E+09	1.3E+07		1.1E+05	9.6E+07	S6	2.0E+00	1E+00
Co-58	4.0E+00	1.4E+03	1.7E+02	1.3E+01	7.1E-01	5.3E-01	7.1E+00	6.3E-01	1.1E+00	1.1E+00	4.0E+02	3.5E+01	7.1E-01	6.1E+11	1.8E+09	7.0E+06		7.0E+04	5.6E+08	M3	5.3E-01	1E+00
Co-60	1.4E+00	4.7E+02	6.3E+01	4.7E+00	2.3E-01	1.8E-01	2.4E+00	2.0E-01	8.5E-02	9.3E-02	1.2E+02	3.2E+00	6.3E-02	9.9E+09	3.0E+08	5.9E+05	1.5E+54	5.0E+03	4.3E+05	S6	6.3E-02	1E-01
Cu-64	8.8E+01	2.7E+08	1.8E+08	2.8E+02	9.9E+01	2.9E+04	3.8E+05	1.7E+18	7.1E+19	6.7E+21	1.1E+21	2.0E+21	4.1E+19	1.4E+15	1.6E+11	1.3E+09		4.4E+27	6.5E+49	T1	8.8E+01	1E+02
Zn-65	6.2E+00	2.1E+01	2.8E+00	2.0E+01	1.0E+00	7.9E-01	1.1E-01	9.2E-01	6.2E-01	6.5E+01	5.4E+00	2.2E-01	4.4E-01	3.3E+09	1.5E+07	2.4E+03	6.0E+40	3.2E+00	2.4E+02	M4	1.1E-01	1E-01
Zn-69m	3.8E+01	5.8E+05	3.4E+05	1.2E+02	4.1E+01	6.8E+03	9.1E+02	3.2E+16	1.5E+18	1.4E+20	2.3E+17	4.1E+17	8.2E+17	5.0E+12	4.4E+08	1.0E+06		3.9E+22	1.5E+44	T1	3.8E+01	1E+02



Nuclide	T1	D1	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	L1	L2	L3	G1	O1	O2	Scenario	Level	Log Round
	(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)
Ga-67	4.0E+01	6.1E+02	1.5E+02	1.4E+02	9.9E+00	1.8E+01	2.4E+00	4.5E+03	4.2E+05		1.6E+04	2.0E+04	3.9E+04	6.8E+11	1.7E+08	2.8E+06		1.2E+07	6.4E+17	M4	2.4E+00	1E+00
Ga-68	1.9E+07	2.9E+52	2.6E+53	3.9E+07	1.2E+08	6.7E+44	9.0E+43	8.7E+193	7.1E+195		4.2E+194	7.7E+194	1.5E+195	2.2E+19	1.7E+16	1.2E+09		8.7E+242		T1	1.9E+07	1E+07
Ge-68	4.2E+00	1.5E+01	1.9E+00	1.4E+01	6.5E-01	5.3E-01	7.1E-02	6.6E-01	1.1E+00		3.2E+00	1.2E-01	2.4E-01	1.5E+09	2.3E+06	7.1E+02		9.1E+00	2.8E+02	M4	7.1E-02	1E-01
Se-75	9.3E+00	3.2E+01	3.8E+00	3.0E+01	1.6E+00	1.2E+00	1.6E-01	1.3E+00	1.5E+00		7.9E+00	4.7E-01	9.4E-01	8.1E+09	1.9E+07	1.7E+03	3.5E+83	2.9E+00	4.4E+02	M4	1.6E-01	1E-01
Kr-81	4.9E+03			1.7E+04	7.6E+02										2.2E+08					M2	7.6E+02	1E+03
Rb-81	3.5E+02	1.2E+16	2.7E+16	1.1E+03	8.5E+02	1.3E+11	1.7E+12	4.9E+48	5.1E+49		8.2E+51	1.5E+52	3.0E+50	1.8E+12	7.9E+12	3.4E+09		1.7E+65	1.1E+120	T1	3.5E+02	1E+03
Rb-82																				#N/A	0.0E+00	#NUM!
Rb-83	8.3E+00	3.0E+03	3.9E+02	2.8E+01	1.3E+00	1.1E+00	1.4E+01	1.5E+00	5.1E+00		7.4E+02	5.6E+01	1.1E+00	9.3E+11	3.6E+09	1.5E+06	2.3E+119	3.1E+03	2.8E+07	M3	1.1E+00	1E+00
Y-88	1.3E+00	4.5E+02	6.0E+01	4.3E+00	1.9E-01	1.7E-01	2.2E+00	2.5E-01	3.2E-01	6.4E+01	1.3E+02	8.6E+00	1.7E-01	1.7E+11	6.8E+08	6.0E+06		4.4E+04	1.2E+09	M3	1.7E-01	1E-01
Zr-88	3.0E+00	1.1E+03	1.4E+02	1.0E+01	4.6E-01	3.9E-01	5.2E+00	5.9E-01	2.4E-01	4.6E+01	1.1E+03	8.7E+01	1.7E+00	4.5E+07	6.1E+08	5.6E+06		4.7E+05	2.4E+10	S2	2.4E-01	1E-01
Zr-89	3.7E+00	5.5E+03	1.1E+03	1.2E+01	9.0E-01	1.7E+00	2.2E+01	4.2E+02	1.5E+04	1.8E+06	2.1E+05	2.5E+05	5.1E+03	1.3E+13	6.4E+09	3.3E+08		6.0E+09	1.6E+19	M2	9.0E-01	1E+00
Sr-82	3.7E+00	1.5E+03	2.1E+02	1.2E+01	6.0E-01	5.4E-01	7.2E+00	1.2E+00	1.2E+01		6.0E+02	1.4E+02	2.8E+00	1.4E+12	2.8E+08	1.2E+06		2.9E+03	8.2E+06	M3	5.4E-01	1E+00
Sr-85	8.5E+00	3.0E+03	3.2E+02	2.8E+01	1.6E+00	1.1E+00	1.5E+01	1.1E+00	2.6E+00		7.6E+02	7.4E+01	1.5E+00	1.1E+12	4.4E+09	7.1E+06	2.0E+158	9.4E+03	3.9E+06	S1	1.1E+00	1E+00
Sr-89	2.3E+04	3.9E+05	2.6E+05	3.5E+03	4.8E+03	2.7E+03	3.1E+04	3.1E+03	1.2E+04		5.0E+05	3.9E+05	7.9E+03	6.4E+15	1.6E+09	1.8E+06	5.3E+201	2.5E+03	1.7E+06	O1	2.5E+03	1E+03
Y-90	1.4E+05	2.8E+06	3.8E+06	4.5E+03		5.4E+04	4.3E+05	1.9E+07			1.6E+09				2.4E+09	9.2E+07		1.7E+09	1.3E+19	M1	4.5E+03	1E+04
Tc-99	4.3E+04	8.0E+05	5.2E+05	8.0E+03	7.3E+06	2.0E+04	1.6E+05	9.9E+03	1.9E+06	2.5E+08	1.2E+06	1.4E+07	2.7E+05	3.5E+15	7.3E+08	4.0E+05	2.9E+00	4.1E+01	2.5E+03	G1	2.9E+00	1E+00
Tc-99m	1.6E+03	1.5E+14	7.6E+13	5.8E+03	3.6E+03	3.2E+09	4.2E+10	3.8E+37	3.7E+39	5.0E+41	3.4E+40	6.2E+40	1.2E+39	1.3E+16	6.4E+12	8.3E+10		9.0E+50	3.7E+92	T1	1.6E+03	1E+03
Pd-103	4.3E+04	2.9E+05	8.4E+05	2.2E+03	9.6E+03	7.1E+03	9.2E+04	4.8E+03	1.2E+05	1.2E+07	7.6E+05	2.7E+05	5.3E+03	3.0E+14	8.3E+09	1.2E+07		7.7E+04	2.1E+10	M1	2.2E+03	1E+03
In-111	2.4E+01	4.7E+02	5.0E+01	8.4E+01	7.8E+00	1.3E+01	1.8E+00	2.6E+03	1.3E+05	1.4E+07	2.1E+04	2.7E+04	5.4E+04	3.4E+11	1.6E+08	8.0E+06		2.0E+08	6.2E+15	M4	1.8E+00	1E+00
In-114m	4.0E+01	1.4E+02	1.5E+01	1.2E+02	7.3E+00	5.4E+00	7.2E-01	5.4E+00	1.7E+01	1.7E+03	3.6E+01	4.6E+00	9.1E+00	6.0E+10	4.3E+06	1.6E+04		1.7E+02	1.5E+05	M4	7.2E-01	1E+00
I-123	2.1E+02	4.8E+06	1.5E+06	7.5E+02	2.4E+02	4.9E+04	6.5E+03	3.0E+17	2.4E+19		2.5E+18	4.5E+18	9.0E+18	1.1E+13	1.1E+09	3.9E+06		1.6E+23	6.9E+46	T1	2.1E+02	1E+02
I-124	4.1E+00	4.3E+01	8.3E+00	1.4E+01	9.1E-01	1.4E+00	1.8E-01	1.1E+02	3.4E+03		5.5E+02	5.7E+02	1.1E+03	1.1E+11	4.0E+06	1.1E+04	7.5E+45	1.1E+03	4.1E+11	M4	1.8E-01	1E-01
I-125	2.3E+04	6.1E+02	4.0E+02	5.7E+02	4.5E+04	1.7E+03	1.4E+02	2.4E+02	6.9E+07		3.0E+02	4.6E+01	9.3E+01	2.1E+11	4.3E+06	3.5E+03	7.3E+01	8.7E-01	1.1E+05	O1	8.7E-01	1E+00
I-131	1.4E+01	7.8E+01	9.3E+00	4.3E+01	3.1E+00	2.9E+00	3.9E-01	1.7E+01	2.9E+02		1.2E+02	7.6E+01	1.5E+02	1.2E+11	2.2E+06	4.2E+03	8.2E+22	1.7E+01	3.4E+08	M4	3.9E-01	1E+00
Cs-137	7.1E+00	2.3E+01	2.7E+00	2.3E+01	1.2E+00	8.9E-01	1.2E-01	7.9E-01	4.2E-01		4.9E+00	1.3E-01	2.5E-01	9.5E+07	7.0E+06	2.5E+03	6.4E+08	6.0E+00	2.5E+02	M4	1.2E-01	1E-01
Eu-152	3.4E+00	1.1E+03	1.4E+02	1.1E+01	5.7E-01	4.3E-01	5.7E+00	4.1E-01	2.0E-01		2.5E+02	6.5E+00	1.3E-01	8.1E+09	7.6E+07	2.3E+06	2.2E+203	1.9E+04	4.4E+06	S6	1.3E-01	1E-01
Eu-154	3.1E+00	1.0E+03	1.3E+02	1.0E+01	5.1E-01	3.8E-01	5.1E+00	3.8E-01	1.8E-01		2.3E+02	6.0E+00	1.2E-01	1.1E+10	6.1E+07	1.5E+06		1.2E+04	4.2E+06	S6	1.2E-01	1E-01



Nuclide	T1	D1	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	L1	L2	L3	G1	O1	O2	Scenario	Level	Log Round
	(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)
Sm-153	7.4E+02	3.1E+06	2.1E+05	2.5E+03	2.6E+02	7.9E+02	1.0E+04	8.9E+05	1.2E+08		5.7E+08	8.7E+08	1.7E+07	3.5E+14	7.8E+09	4.4E+08		3.8E+11	6.9E+22	M2	2.6E+02	1E+02
Ho-166	3.5E+02	7.9E+06	3.2E+06	1.0E+03	1.7E+02	1.8E+03	2.4E+04	7.5E+09	2.8E+11		4.2E+12	7.5E+12	1.5E+11	2.2E+15	8.7E+09	3.9E+08		7.1E+15	5.3E+30	M2	1.7E+02	1E+02
Er-169	1.8E+05	3.7E+06	3.1E+06	2.2E+04	2.3E+06	8.3E+04	6.7E+05	2.5E+05	9.5E+07		2.8E+07	1.1E+09	2.3E+07	1.8E+18	3.1E+09	1.9E+08		5.4E+06	2.9E+13	M1	2.2E+04	1E+04
Lu-177	2.9E+02	2.1E+05	1.5E+04	1.0E+03	6.9E+01	6.7E+01	9.0E+02	3.1E+02	1.0E+04		2.4E+05	1.8E+05	3.6E+03	1.4E+14	3.0E+09	1.9E+08		1.6E+07	3.3E+14	M3	6.7E+01	1E+02
Lu-177m	5.1E+00	1.8E+03	2.6E+02	1.8E+01	8.0E-01	6.6E-01	8.8E+00	8.6E-01	2.9E+00		3.3E+02	1.6E+01	3.2E-01	2.0E+11	1.8E+08	2.4E+06		2.4E+04	2.7E+08	S6	3.2E-01	1E+00
Re-183	7.3E+01	2.7E+04	4.1E+03	2.6E+02	1.0E+01	9.6E+00	1.3E+02	1.3E+01	1.5E+02	4.1E+03	2.8E+03	2.6E+02	5.1E+00	2.6E+12						S6	5.1E+00	1E+01
Re-184	4.4E+00	1.7E+03	2.2E+02	1.5E+01	6.9E-01	6.1E-01	8.1E+00	1.2E+00	5.7E+00	6.7E+02	5.5E+02	8.8E+01	1.8E+00	1.2E+12	1.6E+09	3.5E+06	2.0E+267	2.1E+03	2.5E+06	M3	6.1E-01	1E+00
Re-186	8.8E+02	8.8E+05	6.8E+04	2.4E+03	2.4E+02	3.4E+02	4.5E+03	7.6E+03	5.3E+05	6.8E+07	5.9E+06	6.6E+06	1.3E+05	4.1E+14	3.2E+09	1.5E+07		3.5E+06	1.1E+13	M2	2.4E+02	1E+02
Re-188	2.6E+02	7.9E+07	3.5E+07	8.3E+02	2.2E+02	1.2E+04	1.6E+05	1.9E+14	9.9E+15	1.0E+18	1.3E+17	2.5E+17	4.9E+15	2.1E+15	1.4E+10	7.4E+07		1.1E+20	4.4E+37	M2	2.2E+02	1E+02
Pt-195m	3.3E+02	3.8E+05	8.7E+04	1.1E+03	6.0E+01	1.2E+02	1.5E+03	8.1E+03	3.5E+06	3.6E+07	1.2E+06	1.3E+06	2.5E+04	1.1E+14	1.2E+10	1.7E+07		1.4E+08	4.1E+14	M2	6.0E+01	1E+02
Tl-201	3.5E+02	6.7E+03	3.0E+02	1.4E+03	9.0E+01	1.7E+02	2.3E+01	7.6E+03	9.3E+05	1.0E+08	5.3E+04	6.6E+04	1.3E+05	1.2E+12	5.9E+08	3.6E+06		2.3E+07	2.0E+15	M4	2.3E+01	1E+01
Bi-213	1.7E+11	1.0E+78	1.4E+79	2.8E+11	1.3E+12	2.4E+67	3.2E+66	7.0E+287	5.0E+289	4.4E+291	3.3E+288	6.0E+288	1.2E+289	2.3E+23	7.1E+16	3.7E+08				L3	3.7E+08	1E+09
Ra-223	1.2E+01	1.5E+03	5.2E+02	9.9E+00	4.6E+00	3.6E+00	4.5E+01	8.5E+00	1.5E+02		5.9E+03	3.3E+03	6.6E+01	1.0E+13	4.2E+05	3.0E+04		2.1E+03	3.2E+09	M3	3.6E+00	1E+01
Ac-225	1.2E+01	1.7E+03	7.5E+02	1.1E+01	4.1E+00	3.9E+00	5.0E+01	2.4E+01	6.8E+02		1.1E+04	6.9E+03	1.4E+02	1.8E+13	3.6E+05	2.2E+06		3.5E+04	1.9E+11	M3	3.9E+00	1E+01
Ac-227	2.6E-01	1.3E+01	6.3E+00	1.3E-01	2.9E+00	2.7E-01	2.3E+00	1.4E-01	8.2E-01		9.7E+01	1.8E+01	3.7E-01	1.3E+10	5.7E+03	1.0E+03	1.9E+124	7.3E+00	1.4E+03	M1	1.3E-01	1E-01
Th-227	9.1E+00	7.0E+02	3.0E+02	5.4E+00	5.4E+00	3.4E+00	4.1E+01	4.2E+00	5.5E+01		2.6E+03	1.2E+03	2.4E+01	7.1E+12	2.2E+05	2.8E+04		2.7E+05	1.2E+11	M3	3.4E+00	1E+01



Tabel 22 Volledig overzicht van de rekenresultaten voor de NCS nucliden uitgaande van verbranding bij een AVI niet zijnde ZAVIN. De *log round* waarde is gebaseerd op een logaritmische afronding waarbij een berekende waarde van $3 \cdot 10^x$ tot $3 \cdot 10^{x+1}$ wordt afgerond op 10^x .

Nuclide	T1	D1	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	L1	L2	L3	G1	O1	O2	Scenario	Level	Log Round
	(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)
H-3	4.1E+06			2.1E+05											2.6E+06	4.1E+04				L3	4.1E+04	1E+05
C-11	3.0E+22	1.9E+173	5.0E+174	2.9E+22	2.7E+24	1.3E+152	1.8E+151							2.4E+32	5.6E+29	7.8E+24				M1	2.9E+22	1E+22
C-14	2.9E+05	1.5E+06	1.2E+06	1.5E+04		3.8E+07	3.1E+06	1.9E+07			1.7E+07				7.3E+04	3.9E+02	3.0E+04	2.8E+06		L3	3.9E+02	1E+03
O-15	1.0E+215			2.9E+214	1.1E+217									7.6E+224						M1	2.9E+214	1E+214
N-13	1.0E+45			5.9E+44	9.6E+46		1.7E+305							8.5E+54						M1	5.9E+44	1E+45
F-18	5.5E+04	5.8E+33	2.7E+34	1.3E+05	3.2E+06	3.4E+28	4.6E+28	5.6E+120	2.4E+122		3.8E+122	6.9E+122	1.4E+122	4.4E+17	3.9E+14	2.5E+09		1.4E+153	2.6E+280	T1	5.5E+04	1E+05
P-32	5.5E+04	5.3E+04	4.4E+04	3.8E+03		1.3E+05	1.0E+05	2.2E+05			2.0E+06				9.4E+07	3.2E+04		1.1E+04	2.0E+07	M1	3.8E+03	1E+04
P-33	1.2E+05	3.1E+05	2.1E+05	2.5E+04		7.4E+05	5.9E+05	7.4E+05			9.5E+06				2.0E+08	2.6E+05		3.9E+04	1.0E+07	M1	2.5E+04	1E+04
S-35	1.3E+05	1.2E+05	8.5E+04	1.1E+04		2.9E+06	2.3E+05	1.7E+06			8.2E+02				1.0E+07	3.8E+03	1.5E+04	1.3E+04	2.1E+05	S4	8.2E+02	1E+03
Cr-51	1.7E+02	7.1E+04	5.9E+03	5.9E+02	3.4E+02	2.5E+02	3.4E+03	2.6E+02	1.7E+03	1.6E+03	2.0E+05	4.2E+04	8.5E+02	3.8E+13	7.5E+10	1.4E+08		1.9E+07	8.6E+13	T1	1.7E+02	1E+02
Mn-52	1.2E+00	9.5E+02	1.6E+02	4.0E+00	2.7E+00	3.2E+00	4.3E+01	7.7E+01	1.1E+03	1.2E+03	4.6E+04	3.9E+04	7.8E+02	2.6E+12	2.3E+09	6.1E+07		1.4E+07	1.3E+13	T1	1.2E+00	1E+00
Mn-54	4.5E+00	1.5E+03	1.9E+02	1.5E+01	7.8E+00	5.8E+00	7.7E+01	5.9E+00	4.1E+00	4.0E+00	3.6E+03	1.3E+02	2.6E+00	1.6E+11	1.9E+09	7.9E+06	1.2E+36	6.7E+04	5.6E+06	S6	2.6E+00	1E+00
Fe-55	4.5E+05	2.7E+06	2.0E+06	2.7E+04		6.7E+05	5.4E+06	3.4E+05			3.1E+07				7.5E+09	4.1E+06	4.8E+103	3.6E+05	2.5E+08	M1	2.7E+04	1E+04
Fe-59	3.1E+00	1.1E+03	1.6E+02	1.0E+01	5.2E+00	4.2E+00	5.6E+01	6.9E+00	1.5E+01	1.7E+01	4.1E+03	5.6E+02	1.1E+01	9.0E+11	8.1E+08	1.9E+06		2.1E+05	1.6E+10	T1	3.1E+00	1E+00
Co-56	1.0E+00	3.5E+02	4.7E+01	3.3E+00	1.6E+00	1.3E+00	1.8E+01	1.8E+00	2.3E+00	2.8E+00	1.1E+03	9.3E+01	1.9E+00	1.7E+11	6.3E+08	2.0E+06		2.0E+05	1.3E+09	T1	1.0E+00	1E+00
Co-57	1.1E+02	4.5E+04	1.6E+03	4.4E+02	2.0E+02	1.3E+02	1.8E+03	3.0E+01	6.8E+01	9.3E+01	2.6E+04	9.8E+02	2.0E+01	7.6E+11	5.4E+09	1.3E+07		1.1E+06	9.6E+08	S6	2.0E+01	1E+01
Co-58	4.0E+00	1.4E+03	1.7E+02	1.3E+01	7.1E+00	5.3E+00	7.1E+01	6.3E+00	1.1E+01	1.1E+01	4.0E+03	3.5E+02	7.1E+00	6.1E+11	1.8E+09	7.0E+06		7.1E+05	5.6E+09	T1	4.0E+00	1E+01
Co-60	1.4E+00	4.7E+02	6.3E+01	4.7E+00	2.3E+00	1.8E+00	2.4E+01	2.0E+00	8.5E-01	9.3E-01	1.2E+03	3.2E+01	6.3E-01	9.9E+09	3.0E+08	5.9E+05	1.5E+55	5.0E+04	4.3E+06	S6	6.3E-01	1E+00
Cu-64	8.8E+01	2.7E+08	1.8E+08	2.8E+02	9.9E+02	2.9E+05	3.8E+06	1.7E+19	7.1E+20	6.7E+22	1.1E+22	2.0E+22	4.1E+20	1.4E+15	1.6E+11	1.3E+09		4.7E+28	6.5E+50	T1	8.8E+01	1E+02
Zn-65	6.2E+00	2.1E+01	2.8E+00	2.0E+01	1.0E+01	7.9E+00	1.1E+00	9.2E+00	6.2E+00	6.5E+02	5.4E+01	2.2E+00	4.4E+00	3.3E+09	1.5E+07	2.4E+03	6.0E+41	3.4E+01	2.4E+03	M4	1.1E+00	1E+00
Zn-69m	3.8E+01	5.8E+05	3.4E+05	1.2E+02	4.1E+02	6.8E+04	9.1E+03	3.2E+17	1.5E+19	1.4E+21	2.3E+18	4.1E+18	8.2E+18	5.0E+12	4.4E+08	1.0E+06		4.1E+23	1.5E+45	T1	3.8E+01	1E+02
Ga-67	4.0E+01	6.1E+02	1.5E+02	1.4E+02	9.9E+01	1.8E+02	2.4E+01	4.5E+04	4.2E+06		1.6E+05	2.0E+05	3.9E+05	6.8E+11	1.7E+08	2.8E+06		1.2E+08	6.4E+18	M4	2.4E+01	1E+01
Ga-68	1.9E+07	2.9E+52	2.6E+53	3.9E+07	1.2E+09	6.7E+45	9.0E+44	8.7E+194	7.1E+196		4.2E+195	7.7E+195	1.5E+196	2.2E+19	1.7E+16	1.2E+09		8.8E+243		T1	1.9E+07	1E+07
Ge-68	4.2E+00	1.5E+01	1.9E+00	1.4E+01	6.5E+00	5.3E+00	7.1E-01	6.6E+00	1.1E+01		3.2E+01	1.2E+00	2.4E+00	1.5E+09	2.3E+06	7.1E+02		9.2E+01	2.8E+03	M4	7.1E-01	1E+00



Nuclide	T1	D1	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	L1	L2	L3	G1	O1	O2	Scenario	Level	Log Round
	(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)
Se-75	9.3E+00	3.2E+01	3.8E+00	3.0E+01	1.6E+01	1.2E+01	1.6E+00	1.3E+01	1.5E+01		7.9E+01	4.7E+00	9.4E+00	8.1E+09	1.9E+07	1.7E+03	3.5E+84	3.0E+01	4.4E+03	M4	1.6E+00	1E+00
Kr-81	4.9E+03			1.7E+04	7.6E+03										2.2E+08					T1	4.9E+03	1E+04
Rb-81	3.5E+02	1.2E+16	2.7E+16	1.1E+03	8.5E+03	1.3E+12	1.7E+13	4.9E+49	5.1E+50		8.2E+52	1.5E+53	3.0E+51	1.8E+12	7.9E+12	3.4E+09		1.7E+66	1.1E+121	T1	3.5E+02	1E+03
Rb-82																				#N/A	0.0E+00	#NUM!
Rb-83	8.3E+00	3.0E+03	3.9E+02	2.8E+01	1.3E+01	1.1E+01	1.4E+02	1.5E+01	5.1E+01		7.4E+03	5.6E+02	1.1E+01	9.3E+11	3.6E+09	1.5E+06	2.3E+120	3.2E+04	2.8E+08	T1	8.3E+00	1E+01
Y-88	1.3E+00	4.5E+02	6.0E+01	4.3E+00	1.9E+00	1.7E+00	2.2E+01	2.5E+00	3.2E+00	6.4E+02	1.3E+03	8.6E+01	1.7E+00	1.7E+11	6.8E+08	6.0E+06		4.4E+05	1.2E+10	T1	1.3E+00	1E+00
Zr-88	3.0E+00	1.1E+03	1.4E+02	1.0E+01	4.6E+00	3.9E+00	5.2E+01	5.9E+00	2.4E+00	4.6E+02	1.1E+04	8.7E+02	1.7E+01	4.5E+07	6.1E+08	5.6E+06		4.7E+06	2.4E+11	S2	2.4E+00	1E+00
Zr-89	3.7E+00	5.5E+03	1.1E+03	1.2E+01	9.0E+00	1.7E+01	2.2E+02	4.2E+03	1.5E+05	1.8E+07	2.1E+06	2.5E+06	5.1E+04	1.3E+13	6.4E+09	3.3E+08		6.0E+10	1.6E+20	T1	3.7E+00	1E+01
Sr-82	3.7E+00	1.5E+03	2.1E+02	1.2E+01	6.0E+00	5.4E+00	7.2E+01	1.2E+01	1.2E+02		6.0E+03	1.4E+03	2.8E+01	1.4E+12	2.8E+08	1.2E+06		3.1E+04	8.2E+07	T1	3.7E+00	1E+01
Sr-85	8.5E+00	3.0E+03	3.2E+02	2.8E+01	1.6E+01	1.1E+01	1.5E+02	1.1E+01	2.6E+01		7.6E+03	7.4E+02	1.5E+01	1.1E+12	4.4E+09	7.1E+06	2.0E+159	1.0E+05	3.9E+07	T1	8.5E+00	1E+01
Sr-89	2.3E+04	3.9E+05	2.6E+05	3.5E+03	4.8E+04	2.7E+04	3.1E+05	3.1E+04	1.2E+05		5.0E+06	3.9E+06	7.9E+04	6.4E+15	1.6E+09	1.8E+06	5.3E+202	2.7E+04	1.7E+07	M1	3.5E+03	1E+04
Y-90	1.4E+05	2.8E+06	3.8E+06	4.5E+03		5.4E+05	4.3E+06	1.9E+08			1.6E+10				2.4E+09	9.2E+07		1.7E+10	1.3E+20	M1	4.5E+03	1E+04
Tc-99	4.3E+04	8.0E+05	5.2E+05	8.0E+03	7.3E+07	2.0E+05	1.6E+06	9.9E+04	1.9E+07	2.5E+09	1.2E+07	1.4E+08	2.7E+06	3.5E+15	7.3E+08	4.0E+05	2.9E+01	6.0E+02	2.5E+04	G1	2.9E+01	1E+01
Tc-99m	1.6E+03	1.5E+14	7.6E+13	5.8E+03	3.6E+04	3.2E+10	4.2E+11	3.8E+38	3.7E+40	5.0E+42	3.4E+41	6.2E+41	1.2E+40	1.3E+16	6.4E+12	8.3E+10		1.3E+52	3.7E+93	T1	1.6E+03	1E+03
Pd-103	4.3E+04	2.9E+05	8.4E+05	2.2E+03	9.6E+04	7.1E+04	9.2E+05	4.8E+04	1.2E+06	1.2E+08	7.6E+06	2.7E+06	5.3E+04	3.0E+14	8.3E+09	1.2E+07		8.1E+05	2.1E+11	M1	2.2E+03	1E+03
In-111	2.4E+01	4.7E+02	5.0E+01	8.4E+01	7.8E+01	1.3E+02	1.8E+01	2.6E+04	1.3E+06	1.4E+08	2.1E+05	2.7E+05	5.4E+05	3.4E+11	1.6E+08	8.0E+06		2.0E+09	6.2E+16	M4	1.8E+01	1E+01
In-114m	4.0E+01	1.4E+02	1.5E+01	1.2E+02	7.3E+01	5.4E+01	7.2E+00	5.4E+01	1.7E+02	1.7E+04	3.6E+02	4.6E+01	9.1E+01	6.0E+10	4.3E+06	1.6E+04		1.7E+03	1.5E+06	M4	7.2E+00	1E+01
I-123	2.1E+02	4.8E+06	1.5E+06	7.5E+02	2.4E+03	4.9E+05	6.5E+04	3.0E+18	2.4E+20		2.5E+19	4.5E+19	9.0E+19	1.1E+13	1.1E+09	3.9E+06		2.4E+24	6.9E+47	T1	2.1E+02	1E+02
I-124	4.1E+00	4.3E+01	8.3E+00	1.4E+01	9.1E+00	1.4E+01	1.8E+00	1.1E+03	3.4E+04		5.5E+03	5.7E+03	1.1E+04	1.1E+11	4.0E+06	1.1E+04	7.5E+46	1.6E+04	4.1E+12	M4	1.8E+00	1E+00
I-125	2.3E+04	6.1E+02	4.0E+02	5.7E+02	4.5E+05	1.7E+04	1.4E+03	2.4E+03	6.9E+08		3.0E+03	4.6E+02	9.3E+02	2.1E+11	4.3E+06	3.5E+03	7.3E+02	1.3E+01	1.1E+06	O1	1.3E+01	1E+01
I-131	1.4E+01	7.8E+01	9.3E+00	4.3E+01	3.1E+01	2.9E+01	3.9E+00	1.7E+02	2.9E+03		1.2E+03	7.6E+02	1.5E+03	1.2E+11	2.2E+06	4.2E+03	8.2E+23	2.5E+02	3.4E+09	M4	3.9E+00	1E+01
Cs-137	7.1E+00	2.3E+01	2.7E+00	2.3E+01	1.2E+01	8.9E+00	1.2E+00	7.9E+00	4.2E+00		4.9E+01	1.3E+00	2.5E+00	9.5E+07	7.0E+06	2.5E+03	6.4E+09	6.1E+01	2.5E+03	M4	1.2E+00	1E+00
Eu-152	3.4E+00	1.1E+03	1.4E+02	1.1E+01	5.7E+00	4.3E+00	5.7E+01	4.1E+00	2.0E+00		2.5E+03	6.5E+01	1.3E+00	8.1E+09	7.6E+07	2.3E+06	2.2E+204	1.9E+05	4.4E+07	S6	1.3E+00	1E+00
Eu-154	3.1E+00	1.0E+03	1.3E+02	1.0E+01	5.1E+00	3.8E+00	5.1E+01	3.8E+00	1.8E+00		2.3E+03	6.0E+01	1.2E+00	1.1E+10	6.1E+07	1.5E+06		1.3E+05	4.2E+07	S6	1.2E+00	1E+00
Sm-153	7.4E+02	3.1E+06	2.1E+05	2.5E+03	2.6E+03	7.9E+03	1.0E+05	8.9E+06	1.2E+09		5.7E+09	8.7E+09	1.7E+08	3.5E+14	7.8E+09	4.4E+08		3.9E+12	6.9E+23	T1	7.4E+02	1E+03
Ho-166	3.5E+02	7.9E+06	3.2E+06	1.0E+03	1.7E+03	1.8E+04	2.4E+05	7.5E+10	2.8E+12		4.2E+13	7.5E+13	1.5E+12	2.2E+15	8.7E+09	3.9E+08		7.1E+16	5.3E+31	T1	3.5E+02	1E+03
Er-169	1.8E+05	3.7E+06	3.1E+06	2.2E+04	2.3E+07	8.3E+05	6.7E+06	2.5E+06	9.5E+08		2.8E+08	1.1E+10	2.3E+08	1.8E+18	3.1E+09	1.9E+08		5.4E+07	2.9E+14	M1	2.2E+04	1E+04



Nuclide	T1	D1	D3	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4	S5	S6	L1	L2	L3	G1	O1	O2	Scenario	Level	Log Round
	(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)
Lu-177	2.9E+02	2.1E+05	1.5E+04	1.0E+03	6.9E+02	6.7E+02	9.0E+03	3.1E+03	1.0E+05		2.4E+06	1.8E+06	3.6E+04	1.4E+14	3.0E+09	1.9E+08		1.6E+08	3.3E+15	T1	2.9E+02	1E+02
Lu-177m	5.1E+00	1.8E+03	2.6E+02	1.8E+01	8.0E+00	6.6E+00	8.8E+01	8.6E+00	2.9E+01		3.3E+03	1.6E+02	3.2E+00	2.0E+11	1.8E+08	2.4E+06		2.4E+05	2.7E+09	S6	3.2E+00	1E+01
Re-183	7.3E+01	2.7E+04	4.1E+03	2.6E+02	1.0E+02	9.6E+01	1.3E+03	1.3E+02	1.5E+03	4.1E+04	2.8E+04	2.6E+03	5.1E+01	2.6E+12						S6	5.1E+01	1E+02
Re-184	4.4E+00	1.7E+03	2.2E+02	1.5E+01	6.9E+00	6.1E+00	8.1E+01	1.2E+01	5.7E+01	6.7E+03	5.5E+03	8.8E+02	1.8E+01	1.2E+12	1.6E+09	3.5E+06	2.0E+268	2.8E+04	2.5E+07	T1	4.4E+00	1E+01
Re-186	8.8E+02	8.8E+05	6.8E+04	2.4E+03	2.4E+03	3.4E+03	4.5E+04	7.6E+04	5.3E+06	6.8E+08	5.9E+07	6.6E+07	1.3E+06	4.1E+14	3.2E+09	1.5E+07		4.5E+07	1.1E+14	T1	8.8E+02	1E+03
Re-188	2.6E+02	7.9E+07	3.5E+07	8.3E+02	2.2E+03	1.2E+05	1.6E+06	1.9E+15	9.9E+16	1.0E+19	1.3E+18	2.5E+18	4.9E+16	2.1E+15	1.4E+10	7.4E+07		1.4E+21	4.4E+38	T1	2.6E+02	1E+02
Pt-195m	3.3E+02	3.8E+05	8.7E+04	1.1E+03	6.0E+02	1.2E+03	1.5E+04	8.1E+04	3.5E+07	3.6E+08	1.2E+07	1.3E+07	2.5E+05	1.1E+14	1.2E+10	1.7E+07		1.4E+09	4.1E+15	T1	3.3E+02	1E+03
Tl-201	3.5E+02	6.7E+03	3.0E+02	1.4E+03	9.0E+02	1.7E+03	2.3E+02	7.6E+04	9.3E+06	1.0E+09	5.3E+05	6.6E+05	1.3E+06	1.2E+12	5.9E+08	3.6E+06		2.3E+08	2.0E+16	M4	2.3E+02	1E+02
Bi-213	1.7E+11	1.0E+78	1.4E+79	2.8E+11	1.3E+13	2.4E+68	3.2E+67	7.0E+288	5.0E+290	4.4E+292	3.3E+289	6.0E+289	1.2E+290	2.3E+23	7.1E+16	3.7E+08				L3	3.7E+08	1E+09
Ra-223	1.2E+01	1.5E+03	5.2E+02	9.9E+00	4.6E+01	3.6E+01	4.5E+02	8.5E+01	1.5E+03		5.9E+04	3.3E+04	6.6E+02	1.0E+13	4.2E+05	3.0E+04		2.1E+04	3.2E+10	M1	9.9E+00	1E+01
Ac-225	1.2E+01	1.7E+03	7.5E+02	1.1E+01	4.1E+01	3.9E+01	5.0E+02	2.4E+02	6.8E+03		1.1E+05	6.9E+04	1.4E+03	1.8E+13	3.6E+05	2.2E+06		3.5E+05	1.9E+12	M1	1.1E+01	1E+01
Ac-227	2.6E-01	1.3E+01	6.3E+00	1.3E-01	2.9E+01	2.7E+00	2.3E+01	1.4E+00	8.2E+00		9.7E+02	1.8E+02	3.7E+00	1.3E+10	5.7E+03	1.0E+03	1.9E+125	7.3E+01	1.4E+04	M1	1.3E-01	1E-01
Th-227	9.1E+00	7.0E+02	3.0E+02	5.4E+00	5.4E+01	3.4E+01	4.1E+02	4.2E+01	5.5E+02		2.6E+04	1.2E+04	2.4E+02	7.1E+12	2.2E+05	2.8E+04		2.7E+06	1.2E+12	M1	5.4E+00	1E+01