



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

## **Radiologische gevolgen van mogelijke ongevalsscenario's voor Kerncentrale Borssele**

Modelberekeningen voor de  
stralingsbeschermingsstrategie

RIVM-rapport 2021-0047

J.M. Tomas et al.





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

**Radiologische gevolgen van mogelijke  
ongevalsscenario's voor Kerncentrale Borssele**  
Modelberekeningen voor de stralingsbeschermingsstrategie

RIVM-rapport 2021-0047

## Colofon

© RIVM 2021

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

DOI 10.21945/RIVM-2021-0047

J.M. Tomas (auteur), RIVM  
A. Kloosterman (auteur), RIVM  
C.J.W. Twenhöfel (auteur), RIVM  
T. Van Dillen (auteur), RIVM

Contact:

J.M. Tomas

Afdeling Stralingsincidenten, Monitoring en Analyse, Centrum Veiligheid  
jasper.tomas@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming in het kader van de Stralingsbeschermingsstrategie

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven

Nederland

[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

## Publiekssamenvatting

### **Radiologische gevolgen van mogelijke ongevalsscenario's voor Kerncentrale Borssele**

Modelberekeningen voor de stralingsbeschermingsstrategie

Ongevallen met kernenergiecentrales waarbij radioactieve stoffen vrijkomen, vormen een gevaar voor de gezondheid. De gevolgen van zo'n ongeval hangen af van de hoeveelheid radioactiviteit die vrijkomt, de hoeveelheid waar iemand aan blootstaat en de effecten van deze blootstelling op de gezondheid.

Volgens Europese richtlijnen moeten landen in Europa zich voorbereiden op een mogelijk stralingsongeval. In een noodsituatie kunnen ze dan maatregelen nemen die de gezondheidseffecten zoveel mogelijk beperken. Naar aanleiding van de nieuwste Europese richtlijnen werkt ook Nederland aan een nieuwe 'stralingsbeschermingsstrategie' voor verschillende noodsituaties waarbij radioactiviteit kan vrijkomen.

Naar aanleiding daarvan heeft het RIVM berekend tot welke afstand van de kerncentrale in Borssele beschermende maatregelen voor de bevolking nodig kunnen zijn bij een stralingsongeval. De afstanden zijn berekend voor vijf emissiescenario's (van klein tot ernstig) bij verschillende weersomstandigheden. Het weer heeft namelijk veel invloed op de afstand tot waar de radioactieve stoffen zich kunnen verspreiden.

Het RIVM heeft dit in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) gedaan. De resultaten uit dit onderzoek geven een indicatie tot welke afstand deze maatregelen nodig kunnen zijn bij een stralingsongeval met Kerncentrale Borssele. De resultaten kunnen worden gebruikt om de nieuwe stralingsbeschermingsstrategie te ontwikkelen.

Bij een kernongeval zijn, afhankelijk van de ernst ervan, verschillende maatregelen mogelijk. Voorbeelden zijn evacueren, schuilen (binnenblijven met de deuren en ramen dicht) en jodiumtabletten innemen (jodiumprofylaxe). Ook kunnen maatregelen worden genomen om te voorkomen dat voedsel besmet raakt. Denk aan koeien niet laten grazen en kassen sluiten.

**Kernwoorden:** beschermende maatregelen, Borssele, weersomstandigheden, veiligheid, nucleaire rampen



## Synopsis

### **Radiological consequences of possible accident scenarios for the nuclear powerplant Borssele**

Model calculations for the radiation protection strategy

Accidents with nuclear power plants, involving the release of radioactive substances, can be a health hazard. The consequences of such an accident depend on the amount of radioactivity released, the amount to which someone is exposed to and the effects of this exposure on health.

According to European directives, countries in Europe have to prepare for a possible radiation accident. In an emergency, one can then take protective measures to limit the health effects as much as possible. In response to the latest European directives, the Netherlands is working on a new 'radiation protection strategy' for various emergency situations in which radioactivity may be released.

For this purpose, RIVM has calculated the distance from the Nuclear Power Plant in Borssele where protective measures for the population may be required in the event of a radiation accident. The distances were calculated for five emission scenarios (from minor to severe) in different weather conditions. The weather has a large influence on the distance to which the radioactive substances can disperse.

This research was commissioned by the Authority for Nuclear Safety and Radiation Protection (ANVS). The results provide an indication of the distance to which protective measures may be necessary in the event of a radiation accident involving the Borssele Nuclear Power Plant. The results can be used to develop the new radiation protection strategy.

In the event of a nuclear accident, various measures are possible, depending on its severity. Examples are evacuating, taking shelter (staying indoors with the doors and windows closed) and taking iodine tablets (iodine prophylaxis). Measures can also be taken to prevent food from becoming contaminated. For instance, prohibiting the grazing of cattle and closing off greenhouses.

Keywords: protective actions, Borssele, weather, safety, nuclear disasters





## Inhoudsopgave

### Samenvatting — 9

#### 1 Inleiding — 11

- 1.1 De reikwijdte van dit onderzoek — 11
- 1.2 Leeswijzer — 12

#### 2 Methodiek — 13

- 2.1 De probabilistische methode — 13
- 2.2 De modelketen — 13
- 2.3 Het verspreidings- en dosismodel NPK-PUFF — 15
- 2.4 Meteorologische gegevens — 16

#### 3 Interventieniveaus en generieke criteria — 19

- 3.1 Interventieniveaus uit het LCP-S — 19
- 3.2 Generieke criteria uit de literatuur — 20
  - 3.2.1 Generieke criteria ter bescherming tegen deterministische effecten — 21
  - 3.2.2 Generieke criteria ter bescherming van het embryo en de foetus — 22
- 3.3 Beschouwde representatieve persoon — 22
- 3.4 De effectieve dosis in de eerste zeven dagen en in het eerste jaar na de start van de lozing — 23
  - 3.4.1 Blootstellingspaden — 23
  - 3.4.2 De dosisbijdrage van inwendige besmetting door inhalatie van radioactiviteit — 24
  - 3.4.3 De dosisbijdrage door externe bestraling vanuit de radioactieve wolk — 24
  - 3.4.4 De dosisbijdrage door externe bestraling vanaf de bodem — 24

#### 4 Scenario's en brontermen — 27

- 4.1 Scenario's — 27
- 4.2 Inventaris — 28
- 4.3 Afleiding brontermen — 28
  - 4.3.1 Scenario A: Kernsmelt met beperkte emissie — 29
  - 4.3.2 Scenario B en C: Kernsmelt met korte en lange lozingsduur — 29
  - 4.3.3 Scenario D en E: Splitsstofopslagscenario zonder en met filtering. — 30

#### 5 Resultaten — 31

- 5.1 Inleiding — 31
- 5.2 Resultaten scenario A: Kernsmelt met beperkte emissie — 31
- 5.3 Resultaten scenario B: Kernsmelt met korte lozingsduur — 32
- 5.4 Resultaten scenario C: Kernsmelt met lange lozingsduur — 35
- 5.5 Resultaten scenario D: SOB-scenario zonder filtering — 36
- 5.6 Resultaten scenario E: SOB-scenario met filtering — 38
- 5.7 Evaluatie Voorzorgsmaatregel — 38

#### 6 Conclusies — 41

- 6.1 Effectafstanden voor maatregelen ter beperking van de kans op stochastische effecten — 41
- 6.2 Effectafstanden voor maatregelen ter voorkoming van ernstige deterministische effecten — 42
- 6.3 Voorzorgsmaatregel — 42

**7        Aanbevelingen — 43**

**8        Referenties — 45**

**Bijlage 1. Berekening van dosisgrootheden — 49**

**Bijlage 2. Visualisatie effectafstanden en dosisverdelingen — 52**

## Samenvatting

In het kader van een te ontwikkelen *stralingsbeschermingsstrategie* heeft het RIVM in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) de potentiële radiologische gevolgen onderzocht van een aantal ongevalsscenario's voor de Nederlandse kerncentrale in Borssele. De ongevalsscenario's zijn aangereikt door de ANVS en verschillen in lozingsomvang en lozingsduur. Drie scenario's betreffen een zogenoemde kernsmelt en twee het splijtstofopslagbassin. Hiervoor is onderzocht tot welke afstand vanaf Kerncentrale Borssele interventieniveaus voor het nemen van beschermende maatregelen kunnen worden overschreden. De interventieniveaus zijn vastgelegd in het Landelijk Crisisplan Straling (LCP-S, (Rijksoverheid 2021)). Daarnaast is de afstand bepaald tot waar enkele generieke criteria uit de literatuur worden overschreden.

Bovendien heeft de ANVS het RIVM gevraagd te onderzoeken voor welke van de beschouwde ongevalsscenario's de vastgestelde schuilafstand van 3,5 km uit de zogenoemde Voorzorgsmaatregel toereikend is.

Samengevat beantwoordt dit rapport de volgende onderzoeksvragen:

1. *Tot welke afstand worden voor de beschouwde ongevalsscenario's interventieniveaus en generieke criteria overschreden?*
2. *Voor welke van de beschouwde ongevalsscenario's is de Voorzorgsmaatregel toereikend?*

Om de invloed van verschillende weerscondities mee te nemen, is per ongevalsscenario voor circa duizend verschillende momenten in de periode 2015 tot en met 2017 een modelberekening uitgevoerd. In deze modelberekeningen is de verspreiding van radioactiviteit in de lucht gesimuleerd voor de weerscondities die er op dat moment heersten.

Uit het onderzoek kan geconcludeerd worden dat het grote kernsmeltscenario met de korte lozingsperiode de grootste effectafstanden voor overschrijding van de interventieniveaus heeft.

### **Effectafstanden voor maatregelen ter beperking van de kans op stochastische effecten**

In ongeveer 90% van de beschouwde weerssituaties liggen voor het zwaarste kernsmeltscenario de effectafstanden behorende bij de maatregelen Evacuatie en Jodiumprofylaxe voor kinderen binnen de huidige preparatiezones van respectievelijk 10 en 100 km. Bij hetzelfde percentage van 90% van de beschouwde weerssituaties is de effectafstand voor de maatregel Schuilen 42 km. Dit is ruim boven de huidige preparatieafstand voor Schuilen van 20 km. Bij de overige in dit rapport beschouwde scenario's komt minder radioactiviteit vrij. De effectafstanden voor Schuilen, Evacuatie en Jodiumprofylaxe liggen in 95% van de weerssituaties binnen de huidige preparatieafstanden. Voor de zwaardere lozingsscenario's worden de interventieniveaus voor de maatregelen Sluiten kassen en Graasverbod overschreden tot voorbij de grenzen van het beschouwde rekendomein (250 km) en zijn landsgrensoverschrijdend.

### **Effectafstanden voor maatregelen ter voorkoming van ernstige deterministische effecten**

Voor het grootste kernsmeltscenario is onderzocht of er een gebied is waar de blootstelling kan leiden tot ernstige deterministische effecten. Van de RBE-gewogen geabsorbeerde doses voor schildklier, longen, rode beenmerg en dikke darm geeft alleen de schildklierdosis een overschrijding van een IAEA-criterium ter voorkoming van deterministische effecten (hier:  $AD_{th}(30d) = 2 \text{ Gy-eq}$ ). De effectafstanden liggen tussen 1 en 2 km voor volwassenen en tussen 2 en 5 km voor kinderen op basis van respectievelijk 80% en 95% van de beschouwde weerscondities.

Voor de bescherming van het ongeboren kind tegen deterministische effecten zijn twee methoden onderzocht. Overschrijdingen van de criteria komen voor in de methode volgens het IAEA: tot 11-20 km (80-95%) bij een criterium van  $AD_{fetus}(\Delta') = 100 \text{ mGy-eq}$  en tot 2-3 km (80-95%) bij een criterium van  $AD_{fetus}(\Delta') = 1000 \text{ mGy-eq}$ , waarbij  $\Delta'$  de periode van ontwikkeling in de baarmoeder is. Het is op dit moment onduidelijk welke methodiek gevolgd moet worden en welk criterium moet worden gehanteerd.

### **Evaluatie Voorzorgsmaatregel**

Ten slotte zijn de berekende schuilafstanden van alle scenario's vergeleken met de schuilafstand van 3,5 km van de Voorzorgsmaatregel. Een 3,5 km schuilafstand is passend voor het kernsmeltscenario met beperkte emissie: bij dit ongeval is bij 77% van de weerscondities de Voorzorgsmaatregel schuilen tot 3,5 km toereikend. Bij scenario's met een grotere emissie dekt de Voorzorgsmaatregel de gewenste schuilafstand niet af.

# 1 Inleiding

Met de introductie van het Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Bbs) (Rijksoverheid 2017) is er een aantal nieuwe uitgangspunten ingevoerd voor onder andere de uitvoering van de optimalisatie van de respons op kernongevallen. Belangrijke vernieuwingen zijn de invoering van het referentieniveau en de vooraf vastgestelde pakketten van maatregelen voor de bescherming van de bevolking. Het referentieniveau voor noodsituaties is in Nederland vastgesteld op 100 mSv effectieve (jaar)dosis. Het referentieniveau vertegenwoordigt een ambitieniveau waaronder blootstelling van de bevolking ten gevolge van een ongeval dient te blijven. Het referentieniveau kan daarom naar beneden worden bijgesteld wanneer dat sociaal wenselijk, technisch mogelijk en economisch haalbaar is. De maatregelpakketten ter bescherming van de bevolking worden in overeenstemming met deze ambitie vastgesteld en gekoppeld aan waarneembare condities in de nucleaire installatie of operationele radiologische meetwaarden in de omgeving tijdens de emissie.

Zowel de vooraf vastgestelde maatregelpakketten en het referentieniveau zijn onderwerp van de nog nader te ontwikkelen *stralingsbeschermingsstrategie* van het LCP-S (Rijksoverheid 2021). In het kader hiervan heeft de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) aan het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) gevraagd de potentiële radiologische gevolgen van een aantal ongevalsscenario's voor Kerncentrale Borssele (KCB) in kaart te brengen. Hiertoe heeft de ANVS vijf mogelijke ongevalsscenario's aangereikt die verschillend zijn in lozingsomvang.

Bovendien heeft de ANVS het RIVM gevraagd te onderzoeken voor welk van de beschouwde ongevalsscenario's de schuilafstand van 3,5 km uit de voorgestelde Voorzorgsmaatregel<sup>1</sup> toereikend is. In het vervolg van dit rapport wordt met 'de Voorzorgsmaatregel' de schuilafstand van 3,5 km tot Kerncentrale Borssele bedoeld.

## 1.1 De reikwijdte van dit onderzoek

De focus van dit onderzoek ligt op de informatie die nodig is voor het nemen van maatregelen in de urgente fase van een kernongeval. Hiertoe zijn de *interventieniveaus* voor beschermende maatregelen uit het LCP-S beschouwd. Daarnaast zijn enkele generieke criteria uit de literatuur meegenomen. De radiologische gevolgen van een kernongeval worden uitgedrukt in de maximale afstand, gemeten vanaf Kerncentrale Borssele, tot waar de interventieniveaus en generieke criteria kunnen worden overschreden.

De opdracht van de ANVS is hiermee vertaald naar de volgende onderzoeksvragen:

1. *Tot welke afstand worden voor de beschouwde ongevalsscenario's interventieniveaus en generieke criteria overschreden?*

<sup>1</sup> Correspondentie ANVS dd. 10 oktober 2019

2. *Voor welke van de beschouwde ongevalsscenario's is de Voorzorgsmaatregel toereikend?*

De beschouwde ongevalsscenario's en lozingsgegevens zijn aangereikt door de ANVS. In hoeverre deze ongevalsscenario's representatief zijn voor een kernongeval met Kerncentrale Borssele valt buiten het kader van dit onderzoek. De methodiek en resultaten uit dit onderzoek kunnen als uitgangspunten dienen voor de ontwikkeling van geoptimaliseerde maatregelpakketten, zoals beoogd in de aanbevelingen van de *International Commission on Radiological Protection (ICRP) (ICRP 2007)*.

## 1.2 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt de methodiek uitgelegd die is gebruikt om tot de resultaten van dit onderzoek te komen. Vervolgens worden in Hoofdstuk 3 de beschouwde interventieniveaus (paragraaf 3.1) en generieke criteria (paragraaf 3.2) beschreven. Paragraaf 3.3 gaat in op de representatieve personen in deze studie. In paragraaf 3.4 wordt de methode beschreven voor de berekening van de effectieve dosis in de eerste week en in het eerste jaar na de start van de lozing. In Hoofdstuk 4 wordt ingegaan op de gehanteerde ongevalsscenario's voor Kerncentrale Borssele. In paragraaf 4.1 zijn de ongevalsscenario's samengevat, waarna in paragrafen 4.2 en 4.3 de bijbehorende lozingsscenario's worden afgeleid. Vervolgens zijn in Hoofdstuk 5 de resultaten gegeven voor elk lozingsscenario (paragrafen 5.2 tot en met 5.6). De resultaten geven onder andere antwoord op de vraag tot welke afstand van Kerncentrale Borssele een overschrijding van interventieniveaus te verwachten is. In paragraaf 5.7 worden de effectafstanden voor de maatregel Schuilen van de scenario's vergeleken met de schuilafstand van 3,5 km uit de Voorzorgsmaatregel. Ten slotte worden de conclusies van het onderzoek samengevat in Hoofdstuk 6 en afsluitend worden in Hoofdstuk 7 enkele aanbevelingen gedaan.

## 2 Methodiek

### 2.1 De probabilistische methode

De ongevalsscenario's zijn doorgerekend met het model NPK-PUFF dat op basis van de lozingsgegevens (de zogenoemde 'bronterm') en de meteorologische condities een prognose geeft van de verspreiding en depositie van radioactiviteit. Op basis van die resultaten worden vervolgens de stralingsdoses bepaald.

De meteorologische condities hebben een grote invloed op de radiologische gevolgen van een ongevalsscenario. Vrijgekomen radioactiviteit zal verspreid worden met de wind, die kan veranderen gedurende de lozing en gedurende de verspreiding. Daarbij is de stabiliteit van de atmosfeer bepalend voor de windsterkte en voor de mate van verspreiding van de radioactiviteit in het milieu. Bovendien kan regen zorgen voor additionele depositie van radioactief stof. Buien kunnen lokaal van aard zijn, met als mogelijk resultaat plaatselijke verschillen in bodembesmetting.

Om de effecten van de variabiliteit van het weer op de radiologische gevolgen van de ongevalsscenario's inzichtelijk te maken, is een *probabilistische methode* gehanteerd. Dit houdt in dat niet één, maar zoveel mogelijk verschillende weerscondities zijn beschouwd, die representatief zijn voor het gebied rondom Kerncentrale Borssele. Hiertoe worden de lozingsscenario's doorgerekend voor de weerscondities die zich in de periode 2015 tot en met 2017 hebben voorgedaan. Hiervoor is gebruikgemaakt van de meteorologische gegevens uit het hoge resolutie weermodel HARMONIE van het KNMI (Bengtsson, Andrae et al. 2017). Door een periode van drie jaar te beschouwen, worden eventuele seizoensinvloeden voldoende meegenomen.

Door deze probabilistische methode kan een uitspraak worden gedaan over de kans op overschrijding van interventieniveaus wanneer één van de beschouwde ongevalsscenario's met Kerncentrale Borssele zich op een willekeurig moment in de toekomst voordoet.

### 2.2 De modelketen

Voor elk van de scenario's beschreven in Hoofdstuk 4 is een reeks van 1008<sup>2</sup> lozingen gesimuleerd. De lozingen behorend bij één scenario zijn identiek qua geloosde radioactiviteit en lozingsduur, maar het tijdstip waarop een lozing plaatsvindt is gevarieerd. In de periode 2015 tot en met 2017 is elke 26 uur een lozing gesimuleerd. Voor elke lozing is de verspreiding van de vrijgekomen radionucliden gemodelleerd voor weerscondities die op dat moment heersten. Vervolgens zijn, voor elke lozing, doses en nuclidenconcentraties berekend en is bepaald of interventieniveaus en/of generieke criteria<sup>3</sup> (beschreven in Hoofdstuk 3, paragrafen 3.1 en 3.2) worden overschreden. Wanneer dit het geval is, is de maximale afstand bepaald tot waar de overschrijding plaatsvindt.

<sup>2</sup> Voor Scenario C zijn 1002 onafhankelijke lozingen gesimuleerd.

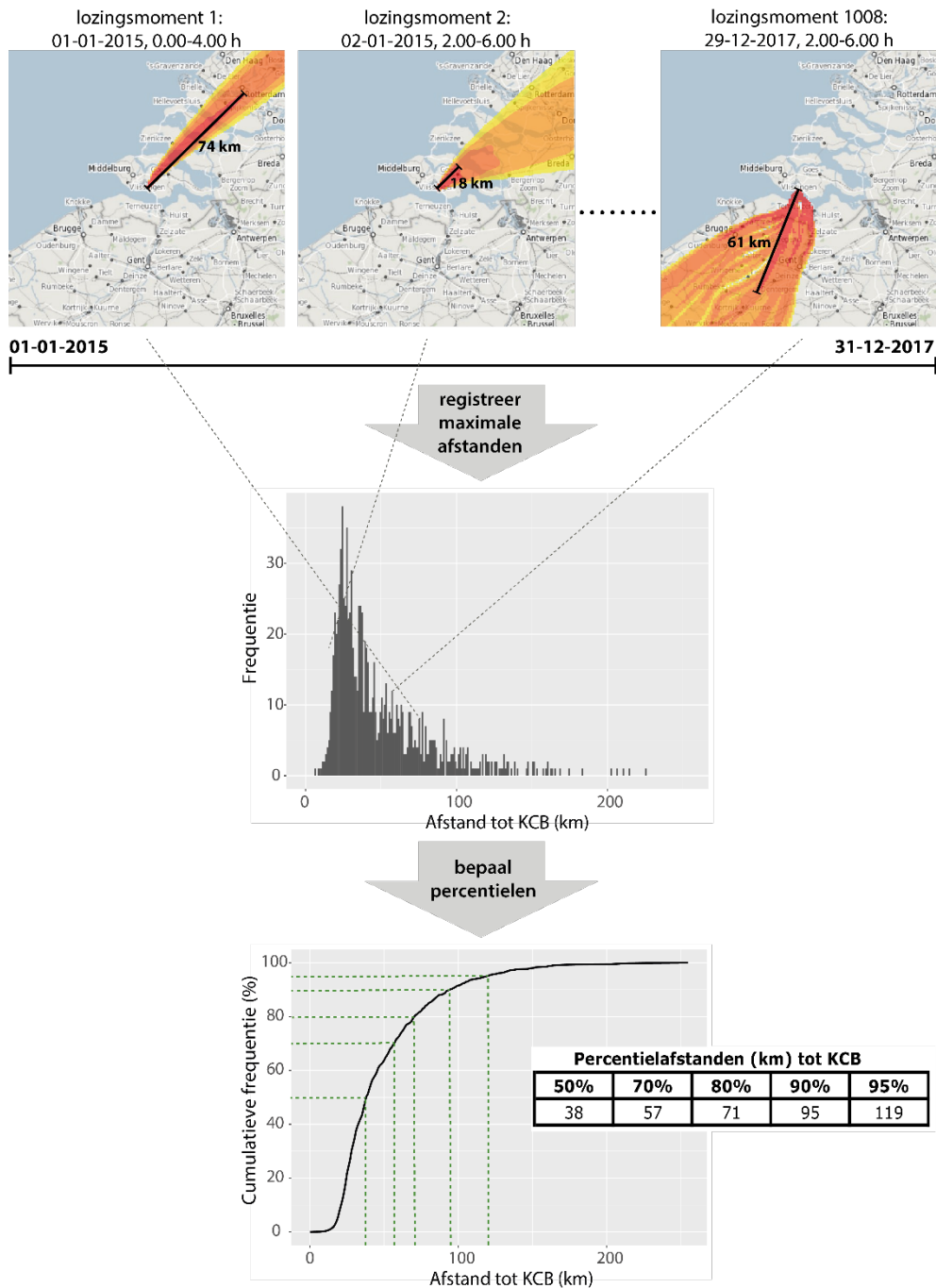
<sup>3</sup> In de rest van dit hoofdstuk wordt met 'interventieniveaus' zowel de beschouwde interventieniveaus als de beschouwde generieke criteria bedoeld.

Deze afstand is gerekend vanaf Kerncentrale Borssele. Dit geeft voor elk scenario een reeks van ongeveer duizend berekende effectafstanden per interventieniveau. Per scenario en interventieniveau worden van deze effectafstanden het 50<sup>e</sup>-, 70<sup>e</sup>-, 80<sup>e</sup>-, 90<sup>e</sup>- en 95<sup>e</sup>-percentiel berekend. Deze methodiek is schematisch weergegeven in Figuur 1.

### **Een voorbeeld van de resultaten**

Voor één van de beschouwde ongevalsscenario's is voor het interventieniveau Schuilen het 80<sup>e</sup>-percentiel gelijk aan een afstand van 4 km. Dit betekent dat als dit ongevalsscenario op een willekeurig moment zou plaatsvinden, er een kans is van 80% dat het interventieniveau Schuilen niet wordt overschreden op afstanden groter dan 4 km vanaf Kerncentrale Borssele. Er is dus een kans van 20% dat het interventieniveau Schuilen wél wordt overschreden op afstanden groter dan 4 km van Kerncentrale Borssele.





Figuur 1 Tussen 2015 en 2017 wordt elke 26 uur een lozing gesimuleerd waarvoor de maximale afstanden worden berekend waar een overschrijding van een interventieniveau plaatsvindt. Van deze afstanden worden vervolgens percentielen berekend. Het onderliggende scenario in deze figuur heeft een lozingsduur van vier uur

### 2.3 Het verspreidings- en dosismodel NPK-PUFF

De verspreidings- en dosisberekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd met het model NPK-PUFF, versie 8.2.1. NPK-PUFF is hiervoor het operationele model voor kernongevallenbestrijding in Nederland. Het wordt gebruikt door de Ongevalseorganisatie Straling van het RIVM en

het Radiologisch en Gezondheidskundig Expertise Netwerk (in het CETsn)<sup>4</sup> tijdens een radiologisch ongeval waarbij radioactiviteit kan vrijkomen in de atmosfeer. NPK-PUFF is daartoe geïmplementeerd in het in EU-verband ontwikkelde 'Decision Support System' JRODOS. NPK-PUFF wordt ontwikkeld en beheerd door het RIVM en is in meerdere internationale vergelijkingsstudies toegepast (Tomas, van Dijk et al. 2017, Tomas and Twenhöfel 2019, Korsakissok, Périllat et al. 2020, Tomas, Peereboom et al. 2021). Het maakt gebruik van meteorologische gegevens van numerieke weermodellen die door het KNMI 24/7 geleverd worden aan de Ongevalsorganisatie Straling van het RIVM in het kader van de crisisrespons op stralingsongevallen.

NPK-PUFF heeft als invoer lozingsgegevens (de bronterm) en meteorologische gegevens. Daarmee berekent het model hoe vrijgekomen radioactief materiaal verspreid wordt met de wind. Hierbij wordt rekening gehouden met lokale effecten, zoals meteorologische stabiliteit en regen. Het radioactieve materiaal kan terechtkomen op de bodem door het neerslaan van stofdeeltjes ('droge depositie') en door regen ('natte depositie').

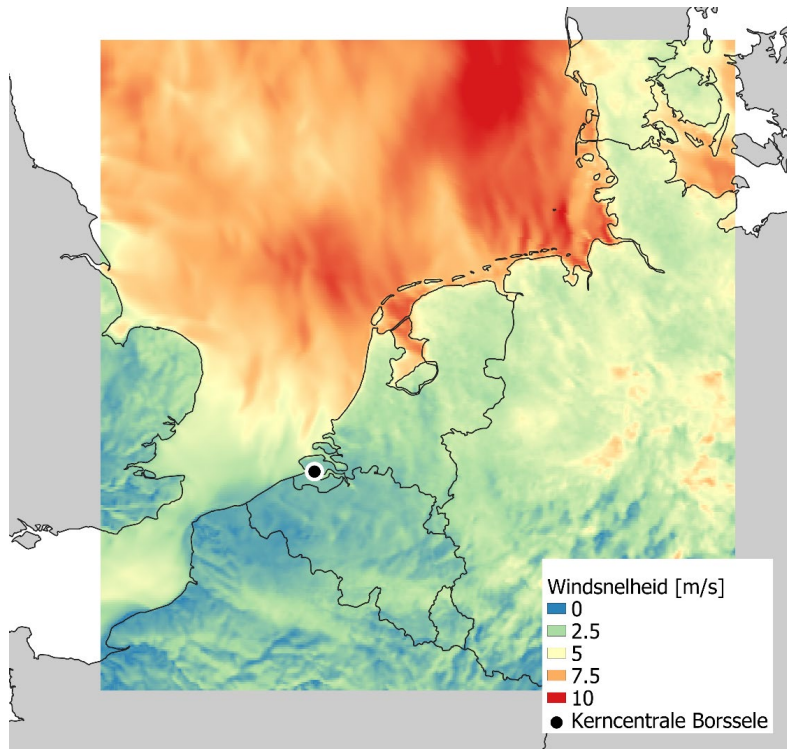
Op basis van de berekende luchtconcentratie en de berekende bodembesmetting bepaalt NPK-PUFF vervolgens stralingsdoses. De beschouwde dosisgrootheden en representatieve personen worden behandeld in Hoofdstuk 3, waar dieper ingegaan wordt op de beschouwde interventieniveaus. Voor de dosisberekeningen in NPK-PUFF worden de dosisconversiecoëfficiënten uit de database van JRODOS gebruikt (versie: JRODOS 2019), die zijn gebaseerd op recente publicaties van de ICRP.

## 2.4 Meteorologische gegevens

De meteorologische gegevens die zijn gebruikt voor de verspreidings- en dosisberekeningen in deze studie zijn afkomstig van het numerieke weermodel HARMONIE van het KNMI (Bengtsson, Andrae et al. 2017). HARMONIE is toegespitst op het domein van Nederland, zie Figuur 2. Het biedt meteorologische modelgegevens zoals windsnelheden, temperatuur, regen en menglaaghoogte, die worden gebruikt in de verspreidingsmodellering door NPK-PUFF.

De gebruikte meteorologische modelgegevens hebben een resolutie van 2,5 km in de horizontale richtingen en zijn gegeven op vijf verticale niveaus: 10, 50, 100, 200, 300 meter vanaf de grond. De gegevens van de jaren 2015 tot en met 2017 zijn gebruikt in de berekeningen. De data is beschikbaar in het domein zoals weergegeven in Figuur 2. De minimale afstand van de Kerncentrale Borssele tot de domeingrens is 250 kilometer. Daarom zullen in deze studie geen uitspraken worden gedaan over effecten die mogelijk verder reiken dan deze afstand.

<sup>4</sup> Zie het LCP-S voor de beschrijving van de Nederlands crisisorganisatie bij stralingsincidenten.



*Figuur 2 In kleur is voor een willekeurig moment de windsnelheid op 10 meter hoogte getoond voor het domein van het meteorologische weermodel HARMONIE. De zwarte stip toont de locatie van Kerncentrale Borssele*



## 3 Interventieniveaus en generieke criteria

### 3.1 Interventieniveaus uit het LCP-S

In het LCP-S (Rijksoverheid 2021) zijn interventieniveaus beschreven voor beschermende maatregelen tijdens een radiologische noodsituatie. Op verzoek van de ANVS zijn in dit onderzoek de interventieniveaus voor directe maatregelen voor de bevolking (Onmiddellijke evacuatie, Evacuatie, Schuilen en Jodiumprofylaxe) beschouwd, evenals de interventieniveaus voor twee landbouwmaatregelen: Graasverbod en Sluiten van kassen. Deze interventieniveaus zijn weergegeven in Tabel 1.

De interventieniveaus Onmiddellijke evacuatie, Evacuatie en Schuilen zijn gedefinieerd op basis van de potentiële effectieve dosis,  $E$ . Voor de maatregel Jodiumprofylaxe is het interventieniveau gebaseerd op de potentiële equivalente dosis van de schildklier,  $H_{th}$ . De interventieniveaus voor de maatregelen Graasverbod en Sluiten van kassen zijn gebaseerd op de verwachte bodembesmetting met  $^{131}\text{I}$ , respectievelijk luchtbesmetting met jodiumisotopen. In de berekeningen van de luchtbesmetting zijn de isotopen van de jodiumgroep beperkt tot  $^{131}\text{I}$ .

In Tabel 1 en verder in dit rapport wordt onderscheid gemaakt in interventies ter voorkoming van ernstige deterministische effecten en interventies ter vermindering van de kans op stochastische effecten. Deze twee soorten effecten van de blootstelling aan ioniserende straling zijn als volgt gedefinieerd (Rijksoverheid 2021):

#### **Deterministische effecten:**

Door straling veroorzaakte gezondheidseffecten die optreden boven een bepaalde drempeldosis. Ook wel schadelijke weefselreacties genoemd. Boven deze drempeldosis neemt de ernst van het effect toe met de blootstelling. Ernstige deterministische effecten zijn fataal of levensbedreigend of resulteren in blijvende schade die de kwaliteit van leven vermindert.

#### **Stochastische effecten:**

Door straling veroorzaakte gezondheidseffecten waarvan de kans van optreden toeneemt met de dosis, maar waarvan de ernst van het effect (als het optreedt) onafhankelijk is van de dosis.

Tabel 1 De Interventieniveaus voor beschermende maatregelen uit het LCP-S

Interventie ter voorkoming van ernstige deterministische effecten	Tijd <sup>a)</sup>	Grootheid	Interventieniveau voor Representatief persoon	
			eenjarig kind	volwassene
Onmiddellijke evacuatie	48 uur	$E^{b) c)}$	1 Sv	1 Sv
<b>Interventie ter vermindering van de kans op stochastische effecten</b>				
Evacuatie	zeven dagen	$E^{b)}$	100 mSv	100 mSv
Schuilen	zeven dagen	$E^{b)}$	10 mSv	10 mSv
Jodiumprofylaxe	zeven dagen	$H_{th}^{b) e)}$	50 mSv	250 mSv <sup>f)</sup>
Tijdelijke relocatie	één jaar	$E^{d)}$	100 mSv	100 mSv
Graasverbod	Bodembesmetting $^{131}\text{I}$		5000 Bq/m <sup>2</sup>	
Sluiten van kassen	Luchtbesmetting jodium-isotopen m.n. $^{131}\text{I}$		1000 Bq/m <sup>3</sup>	

<sup>a)</sup> Tijd is de periode direct na aanvang van de lozing waarover een potentiële dosis wordt berekend.

<sup>b)</sup> Op basis van blootstelling buiten, zonder bescherming.

<sup>c)</sup> Dit is een benadering, aangezien de effectieve dosis geen maat is voor deterministische effecten, maar voor de kans op stochastische effecten.

<sup>d)</sup> Op basis van gemiddelde 'normale' leefcondities: 80% binnen/20% buiten, inclusief bijdragen door passage radioactieve wolk.

<sup>e)</sup> Op basis van inhalatie van isotopen uit de jodiumgroep.

<sup>f)</sup> Voor een zwangere vrouw dient hetzelfde interventieniveau als voor kinderen te worden gehanteerd ter bescherming van het embryo/de foetus.

### 3.2 Generieke criteria uit de literatuur

Naast de interventieniveaus, weergegeven in Tabel 1, zijn voor het grootste beschouwde ongevalsscenario (Scenario B, beschreven in Hoofdstuk 4) ook enkele generieke criteria van de IAEA (IAEA 2015) doorgerekend. Deze generieke criteria zijn weergegeven in Tabel 2 en worden in de volgende paragrafen besproken. Een aantal generieke criteria is gedefinieerd op basis van RBE-gewogen geabsorbeerde dosis  $AD_T$ , of RBE-gewogen geabsorbeerde volg dosis  $AD_T(\Delta)$  (voor weefsel of orgaan T). Hierin is de geabsorbeerde dosis gewogen met de zogenoemde 'relatieve biologische effectiviteit'. In Bijlage 1 zijn de volledige definities van deze grootheden gegeven.

Tabel 2 Generieke criteria uit de literatuur: (SSK 2014, Walter, Gering et al. 2014, IAEA 2015, Johansson, Kock et al. 2017)

Generieke criteria voor maatregelen om ernstige deterministische effecten door acute blootstelling te voorkomen	Grootheid	Overschrijdingswaarde voor representatief persoon	
		eenjarig kind	volwassene
<i>Blootstelling aan externe straling (&lt;10 uur):</i>			
Rode beenmerg	$AD_{RBM}$	1 Gy-eq	1 Gy-eq
Foetus	$AD_{fetus}$	-	0,1 Gy-eq of 1 Gy-eq <sup>a)</sup>
<i>Blootstelling aan inwendige straling door acute inhalatie (&lt;10 uur):</i>			
Schildklier	$AD(30d)_{thyroid}$	2 Gy-eq	2 Gy-eq
Rode beenmerg	$AD(30d)_{RBM}$	2 Gy-eq	2 Gy-eq <sup>b)</sup>
Longen	$AD(30d)_{lung}$	30 Gy-eq	30 Gy-eq
Dikke darm	$AD(30d)_{colon}$	20 Gy-eq	20 Gy-eq
Foetus	$AD(\Delta')_{fetus}$ <sup>c)</sup>	-	0,1 Gy-eq of 1 Gy-eq <sup>a)</sup>
Volgens (SSK 2014, Walter, Gering et al. 2014) en (Johansson, Kock et al. 2017) <sup>d)</sup> :			
Embryo (2-7 weken)	$D(2-7w)_{fetus}$ <sup>e)</sup>	-	0,1 Gy
Foetus (8-15 weken, hersenen)	$D(8-15w)_{fetus,brain}$ <sup>e)</sup>	-	0,3 Gy
<b>Generieke criteria voor maatregelen om de kans op stochastische effecten te verminderen</b>			
Foetus <sup>f)</sup>	$H_{fetus}$ in zeven dagen	-	100 mSv
Foetus <sup>g)</sup>	$H_{fetus}$ in $\Delta'$ <sup>c)</sup>	-	100 mSv

<sup>a)</sup> zie (IAEA 2015), Tabel II.1, voetnoot b.

<sup>b)</sup> Voor radionucliden met atoomnummer  $Z \geq 90$  geldt 0,2 Gy-eq als dosiscriterium.

<sup>c)</sup>  $\Delta'$  is de periode van ontwikkeling in de baarmoeder.

<sup>d)</sup> Gehanteerde criteria in (Walter, Gering et al. 2014) en (Johansson, Kock et al. 2017) op basis van ICRP-publicatie 103 (ICRP 2007) en (SSK 2014).

<sup>e)</sup> De integratieperiode is gegeven ten opzichte van het moment van conceptie.

<sup>f)</sup> Criterium voor het nemen van urgente maatregelen.

<sup>g)</sup> Criterium voor het nemen van vroege maatregelen.

### 3.2.1

#### *Generieke criteria ter bescherming tegen deterministische effecten*

De interventieniveaus voor directe maatregelen, zoals beschreven in het LCP-S, kunnen worden beschouwd als een invulling van de generieke criteria zoals voorgeschreven in de 'Safety Standards' van het IAEA

(IAEA 2015). Een uitzondering hierop is het interventieniveau voor de maatregel Onmiddellijke evacuatie. In principe is dit een maatregel ter voorkoming van ernstige deterministische effecten, waarvoor het IAEA andere generieke criteria hanteert. Deze generieke criteria zijn weergegeven in Tabel 2. In Bijlage 1 zijn de bijbehorende gezondheidseffecten en RBE-waarden samengevat.

### 3.2.2

#### *Generieke criteria ter bescherming van het embryo en de foetus*

In het LCP-S is voor de bescherming van het embryo/de foetus<sup>5</sup> enkel de maatregel Jodiumprofylaxe voor zwangere vrouwen opgenomen. Deze maatregel is ter vermindering van de kans op stochastische effecten bij het nageslacht door inhalatie van jodiumisotopen door de moeder. Voor andere blootstellingspaden wordt de foetus niet specifiek beschouwd. Bovendien zijn er geen interventies gedefinieerd ter voorkoming van ernstige deterministische effecten bij de foetus.

Het IAEA heeft in de *Safety Standards* generieke criteria beschreven voor de bescherming van de foetus, zowel ter voorkoming van ernstige deterministische effecten (op basis  $AD_{\text{fetus}}$  en  $AD(\Delta')_{\text{fetus}}$  met  $\Delta'$  de periode van ontwikkeling in de baarmoeder), als ter vermindering van de kans op stochastische effecten (op basis van  $H_{\text{fetus}}$ ). Deze generieke criteria zijn eveneens weergegeven in Tabel 2.

Uit de literatuurstudie uitgevoerd binnen dit onderzoek blijkt dat er geen eenduidige methode is voor het bepalen van  $AD(\Delta')_{\text{fetus}}$ . In Bijlage 1 is de methode beschreven die in dit onderzoek is gebruikt. Bovendien blijkt dat in vergelijkbare studies (Walter, Gering et al. 2014, Johansson, Kock et al. 2017) twee criteria worden gehanteerd die afwijken van de generieke criteria volgens het IAEA. Die twee criteria zijn gebaseerd op de richtlijnen van de ICRP (ICRP 2007), waarin twee perioden van ontwikkeling van de foetus worden genoemd die gevoelig zijn voor verstoring door ioniserende straling: de ontwikkeling van de organen (de periode twee tot zeven weken na conceptie) en de ontwikkeling van de hersenen (de periode acht tot vijftien weken na conceptie). Deze twee additionele criteria zijn ook weergegeven in Tabel 2.

### 3.3

#### **Beschouwde representatieve persoon**

In ICRP-publicatie 101 is de zogenoemde representatieve persoon geïntroduceerd voor stralingsbeschermingsdoeleinden (ICRP 2006). In 2018 is de representatieve persoon geïmplementeerd in de huidige Nederlandse regelgeving voor stralingsbescherming en wel in de ANVS-verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming (Rijksoverheid 2020). De definitie van de representatieve persoon is: *'een persoon die blootstaat aan een dosis die representatief is voor die van de meest aan ioniserende straling blootgestelde personen van de bevolking, met uitsluiting van personen met extreme of zeldzame gewoonten'*.

Het uitgangspunt hierbij is dat als de representatieve persoon voldoende wordt beschermd tegen ioniserende straling, alle leden van de bevolking adequaat worden beschermd. Een dosisraming voor een representatief persoon kan getoetst worden aan een dosisrestrictie en alle leden van de bevolking zijn dan adequaat beschermd als aan de geldende dosisrestrictie wordt voldaan. Deze aanpak geldt ook voor

<sup>5</sup> In de tekst hierna wordt met 'de foetus' zowel het embryo als de foetus bedoeld.



dosisramingen voor scenario's in noodsituaties, zoals beschouwd in het kader van een stralingsbeschermingsstrategie.

In dit onderzoek zijn voor de dosisramingen meerdere personen beschouwd die als representatief persoon kunnen dienen in de ontwikkeling van een stralingsbeschermingsstrategie. Dit zijn:

- eenjarig kind;
- volwassene;
- zwangere vrouw (voor de maatregel Jodiumprofylaxe ten behoeve van de bescherming van de foetus).

### 3.4 De effectieve dosis in de eerste zeven dagen en in het eerste jaar na de start van de lozing

De interventieniveaus volgens het LCP-S (Rijksoverheid 2021) zullen de interventieniveaus zoals beschreven in het NCS Responsplan (Rijksoverheid 2016) vervangen. Eén van de verschillen is de beschouwde blootstellingsperiode in de interventieniveaus voor de maatregelen Schuilen en Evacuatie. In het LCP-S zijn hiervoor de interventieniveaus gebaseerd op de potentiële effectieve dosis in de eerste zeven dagen vanaf de start van de lozing, terwijl in de interventieniveaus in het NCS Responsplan de beschouwde blootstellingsperiode de eerste 48 uur na de start van de lozing is.

Omdat niet eerder is beschreven hoe de potentiële effectieve dosis voor de eerste zeven dagen bepaald moet worden, wordt in deze paragraaf specifiek aandacht besteed aan de gehanteerde methode in dit onderzoek. Tevens wordt beschreven hoe de potentiële effectieve dosis in het eerste jaar na de start van de lozing wordt bepaald. Dit is de grootheid waar het interventieniveau voor de maatregel Tijdelijke relocatie in het NCP-S op is gebaseerd.

#### 3.4.1 Blootstellingspaden

Alle beschouwde ongevalsscenario's in deze studie betreffen emissies naar de lucht. Hiervoor wordt een verspreidingsberekening uitgevoerd met een duur van  $\Delta t_d$  die 48 of 120 uur bedraagt, afhankelijk van het scenario. De deposities en tijdsgéïntegreerde luchtconcentraties ( $\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ) van de geloosde radionucliden worden vervolgens gebruikt om de effectieve dosis (Sv) ten gevolge van de pluimpassage te berekenen. Deze dosis is opgebouwd uit drie componenten:

1. inwendige besmetting door inhalatie van activiteit  $E_{\text{inh}}^{\Delta t_v}(\Delta t_d)$ ;
2. externe bestraling vanuit de radioactieve wolk  $E_{\text{ext,wolk}}(\Delta t_d)$ ;
3. externe bestraling vanuit radioactieve depositie op de grond  $E_{\text{ext,grond}}(\Delta t_b)$ ,

waarbij  $\Delta t_v$  de in de volgdosis beschouwde (interne) blootstellingsperiode is. Dit is vijftig jaar voor een volwassene en tot de leeftijd van zeventig jaar voor een kind. Daarnaast is  $\Delta t_b$  de beschouwde periode van blootstelling aan straling door depositie op de bodem. Voor de in Tabel 1 weergegeven interventieniveaus is dit zeven dagen (168 uur) of één jaar (8760 uur).

### 3.4.2 De dosisbijdrage van inwendige besmetting door inhalatie van radioactiviteit

De effectieve volgdoos voor een persoon in de leeftijdscategorie  $j$  ten gevolge van de inhalatie van radionucliden wordt als volgt berekend:

$$E_{\text{inh},j}^{\Delta t_v}(\Delta t_d) = \sum_i DC_{i,j}^{\text{inh}}(\Delta t_v) \dot{V}_j \int_0^{\Delta t_d} C_i(t) dt,$$

waarbij  $DC_{i,j}^{\text{inh}}(\Delta t_v)$  (in Sv per Bq inname) de dosiscoëfficiënt is voor de volgdoos in de periode  $\Delta t_v$  voor radionuclide  $i$  en leeftijdscategorie  $j$ ,  $\dot{V}_j$  (in  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) het gemiddelde ademvolumetempo voor een persoon in leeftijdscategorie  $j$  (zie Tabel 3), en  $C_i(t)$  (in  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) de door NPK-PUFF berekende luchtconcentratie van radionuclide  $i$  op leefniveau.

Tabel 3 Ademvolumetempo van de beschouwde representatieve personen volgens ICRP 101 (ICRP 2006)

Representatief persoon	Ademvolumetempo ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
volwassene	0,917
eenjarig kind	0,217

### 3.4.3 De dosisbijdrage door externe bestraling vanuit de radioactieve wolk

De effectieve dosis voor een persoon in de leeftijdscategorie  $j$  ten gevolge van externe bestraling door submersie in radioactieve lucht wordt als volgt berekend:

$$E_{\text{ext,wolk},j}(\Delta t_d) = \sum_i DC_{i,j}^{\text{ext,wolk}} \int_0^{\Delta t_d} C_i(t) dt,$$

waarbij  $DC_{i,j}^{\text{ext,wolk}}$  (in  $\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$  per  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ ) de dosiscoëfficiënt is voor het dosistempo voor leeftijdscategorie  $j$  ten gevolge van externe bestraling door submersie in lucht die is besmet met radionuclide  $i$  en  $C_i(t)$  (in  $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) de door NPK-PUFF berekende luchtconcentratie van radionuclide  $i$  op leefniveau.

### 3.4.4 De dosisbijdrage door externe bestraling vanaf de bodem

Ervan uitgaande dat er na de periode  $\Delta t_d$  geen emissies meer optreden vanuit de centrale en dat de pluim in tijd  $\Delta t_d$  volledig is gepasseerd, zullen de opgelopen doses  $E_{\text{inh}}^{\Delta t_v}(t)$  en  $E_{\text{ext,wolk}}(t)$  ook niet meer toenemen voor  $t > \Delta t_d$ . Dit geldt uiteraard niet voor de component  $E_{\text{ext,grond}}(t)$  welke zal blijven toenemen indien men na het ongeval in het besmette gebied verblijft. Over de totale blootstellingsduur  $\Delta t_b$  wordt de totale effectieve dosis  $E_{\text{tot},j}(\Delta t_b)$  (Sv) voor een persoon in leeftijdscategorie  $j$  daarom berekend door:

$$E_{\text{tot},j}(\Delta t_b) = E_{\text{inh},j}^{\Delta t_v}(\Delta t_d) + E_{\text{ext,wolk},j}(\Delta t_d) + E_{\text{ext,grond},j}(\Delta t_b),$$

waarbij  $\Delta t_b = 168$  h voor de zeven-dagen-dosis en  $\Delta t_b = 8760$  h voor de eerstejaarsdosis.  $E_{\text{ext,grond},j}(\Delta t_b)$  wordt berekend met tijdsgeïntegreerde dosiscoëfficiënten  $DC_{i,j}^{\text{dep}}(\tau)$  (in Sv per  $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ ) voor nuclide  $i$ . Hierbij is  $\tau$  de integratietijd. Deze coëfficiënten, die gelden voor de natuurlijke omgeving zonder afscherming, bevatten de bijdrage van de ingroei van

radioactieve dochternucliden en zijn gecorrigeerd voor verticale migratie in de bodem op de langere termijn.

### **In de eerste zeven dagen na de start van de lozing (Interventies Schuilen en Evacuatie)**

In de berekening van de dosisbijdrage door externe bestraling vanaf de bodem in de eerste zeven dagen, nemen we aan dat de representatieve persoon zich buiten bevindt zonder afscherming. In dat geval kan  $E_{\text{ext,grond},j}(7 \text{ dagen})$  worden berekend middels de dosiscoëfficiënten  $DC_{i,j}^{\text{dep}}(\tau)$  en het tijdsafhankelijke depositietempo  $B_i(t)$  (in  $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ) tijdens pluimpassage (met  $t$  en  $\tau$  in uren):

$$E_{\text{ext,grond},j}(7 \text{ dagen}) = \sum_i \int_0^{\Delta t_d} DC_{i,j}^{\text{dep}}(168 - t) B_i(t) dt.$$

Hierbij wordt geïntegreerd over de periode van de verspreidingsberekening (48 uur of 120 uur, afhankelijk van het scenario) – en dus over de periode van pluimpassage – en gesommeerd over alle relevante radionucliden  $i$  die op de bodem deponeren vanuit de pluim.

### **In het eerste jaar na de start van de lozing (Interventie Tijdelijke relocatie)**

Voor dosisbijdrage door externe bestraling vanaf de bodem in het eerste jaar hanteren we een soortgelijke aanpak, maar wordt uitgegaan van normale leefomstandigheden. De representatieve persoon bevindt zich in dit scenario op verschillende locaties in een stedelijke omgeving: 20% buiten (10% in bestrate of geasfalteerde gebieden; 10% in niet-bestrate of niet-geasfalteerde gebieden) en 80% binnen. Het reductie-effect van de stedelijke omgeving (afscherming, wegwaaien en wegspoelen van activiteit) op het dosistempo wordt verdisconteerd via de tijdsafhankelijke locatiefactoren  $f_i(t)$ . Het relatieve reductie-effect op de totale effectieve dosis door externe bestraling vanaf de bodem in een jaar (ten opzichte van de dosis in de natuurlijke omgeving) is benaderd middels locatiefactoren gemiddeld over een jaar en gewogen met de hiervoor beschreven relatieve verblijfsfracties. Deze reductiefactor is 0,259 en de effectieve eerstejaarsdosis wordt derhalve als volgt benaderd:

$$E_{\text{ext,grond},j}(1 \text{ jaar}) \approx 0,259 \cdot \sum_i DC_{i,j}^{\text{dep}}(8760) \cdot \int_0^{\Delta t_d} B_i(t) dt,$$

waarbij  $DC_{i,j}^{\text{dep}}(8760 - t)$  uit de integraal is gehaald als  $DC_{i,j}^{\text{dep}}(8760)$  omdat  $\Delta t_d \ll 8760$  h. De migratie van activiteit in de bodem, verdisconteerd in  $DC_{i,j}^{\text{dep}}$ , speelt op de tijdschaal van een jaar wel een rol. De overgebleven integraal geeft de totale, vers gedeponeerde activiteit per  $\text{m}^2$  tijdens de pluimpassage.

Voor de berekeningen zijn de geïntegreerde dosiscoëfficiënten  $DC_{i,j}^{\text{dep}}(\tau)$  uit JRODOS gebruikt, welke gebaseerd zijn op dosistempocoëfficiënten van Petoussi-Henss, Schlattl et al. (2012) en een bodemmigratiefunctie zoals beschreven in UNSCEAR (2014). Locatiefactoren uit deze laatste referentie zijn gebruikt bij het bepalen van de effectieve eerstejaarsdosis. De functies voor migratie en locatie zijn feitelijk alleen toepasbaar op radiocaesium, maar zijn uit praktische overwegingen gehanteerd voor alle radionucliden.



## 4 Scenario's en brontermen

### 4.1 Scenario's

De ongevalsscenario's in deze studie zijn weergegeven in Tabel 4. Er zijn drie kernsmeltongevallen en een ongeval met een splijtstofopslagbassin (SOB). De drie kernsmeltscenario's zijn onderverdeeld in een scenario met beperkte emissie en een kort- en langdurige grotere emissie van radionucliden naar de atmosfeer. Het SOB-ongeval heeft twee varianten, één met en één zonder toepassing van filtering van de emissie.

Tabel 4 Kenmerken van de scenario's met de lozingsgegevens (fracties of absolute lozing). De scenario's vormen een uitgangspunt in deze studie en zijn aangeleverd door ANVS

SCENARIO	Aanvang en duur emissie (uur)	Filter actief?	Effect. hoogte emissie <sup>6</sup> (m)	Lozing (Bq) of emissiefracties <sup>7</sup> (%) per nuclide ten opzichte van de evenwichtskern bij afschakelen	
(A) Kernsmelt met beperkte emissie	2 / 4	Nee	25 <sup>8</sup>	Xe-133 I-131	8,4% 3,0E-05%
(B) Kernsmelt met korte lozingsduur	24 <sup>9</sup> / 4	Nee	25	Xe-133 I-131 Cs-134/137	100% 1,5% 0,8%
(C) Kernsmelt met lange lozingsduur	24 / 96	Nee	25	Xe-133 I-131 Cs-134/137	100% 1,5% 0,8%
(D) Splijtstofopslag ongeval ongefilterd	0 / 8	Nee	25 / 60 <sup>10</sup>	Xe-133 I-131 Cs-137	4,40E+17 Bq 2,47E+15 Bq 5,55E+15 Bq
(E) Splijtstofopslag ongeval gefilterd <sup>11</sup>	0 / 8	Ja	25	Xe-133 I-131 Cs-137	4,40E+17 Bq 2,47E+12 Bq 5,55E+12 Bq

De kernsmeltscenario's zijn gebaseerd op representatieve historische ongevallen. Voor het kernsmeltscenario met beperkte emissie is dat het *Three Mile Island*-ongeval (TMI) in 1979. Beide grotere emissies zijn geschaalde versies van het Fukushima Dai-ichi (FD) ongeval in 2011. Het ongeval met het splijtstofopslagbassin is gebaseerd op het oefenscenario van de Nationale Nucleaire oefening (NNO) uit 2018.

De scenario- en emissiegegevens in Tabel 4 zijn aangeleverd door de ANVS op basis van eerder overleg tussen ANVS en EPZ<sup>12</sup>. De keuze en

<sup>6</sup> Betreft een effectieve lozingshoogte en inclusief het effect van een eventuele warmteinhoud van de emissie.

<sup>7</sup> Lozingspercentages in procenten zijn ten opzichte van de evenwichtskern op het moment van afschakelen of absolute emissies in Bq geloosd naar de atmosfeer. Verval tussen tijdstip van afschakelen en emissie wordt in rekening gebracht in de brontermberekening.

<sup>8</sup> Emissie naar atmosfeer via *containment bypass*.

<sup>9</sup> De tijd tussen afschakelen en emissie is overeenkomstig gekozen aan de vroegere NL maatrap STC-CON1.

<sup>10</sup> Emissie via *containment bypass* (25 m) of *stack release* (60 m).

<sup>11</sup> Filterefficiëntie is 99% voor organisch jodium, 99,9% voor alle aerosolen en elementair jodium.

<sup>12</sup> Correspondentie met de ANVS dd. 26 juni 2020

verdere onderbouwing van deze scenario's zijn geen onderdeel van deze studie.

## 4.2 Inventaris

De kerninventaris voor de drie kernsmeltscenario's zijn afkomstig uit de Milieu Effect Rapportage (MER) van de Kerncentrale Borssele (EPZ 2010). Er is uitgegaan van de MOX 40%-kern bij volledige opbrand en na nul dagen verval. Voor de twee SOB-scenario's zijn de brontermen in absolute lozingswaarden (Bq) opgegeven. De gegevens over de kerninventaris van de ontladen splijtstofstaven uit de MER is hier niet benodigd.

## 4.3 Afleiding brontermen

Uit rekenkundig oogpunt is het ongewenst om alle radionucliden uit de inventarislijst door te rekenen in de verspreidingsberekening. Het opnemen van al deze nucliden maakt de vele modelberekeningen in deze probabilistische studie onnodig tijdrovend tegen relatief weinig winst in bijdrage aan het dosiseindpunt.

Met behulp van het RIVM Nuclidenreductieprogramma (BTMS)<sup>13</sup> kan op voorhand een schatting van de relatieve bijdragen van individuele nucliden aan de gewenste dosiseindpunten worden berekend. Voor de drie kernsmeltscenario's zijn hiermee brontermen afgeleid op basis van de opgegeven lozingsfracties uit Tabel 4, de MOX-40% kerninventaris en de tijd van insluiting tot aanvang emissie. De in beschouwing genomen nucliden zijn waar nodig uitgebreid met andere nucliden uit dezelfde groep, zie Tabel 5, Tabel 6 en Tabel 7. Radionucliden uit de overige groepen worden verondersteld niet of in verwaarloosbare hoeveelheden vrij te komen, omdat ze minder vluchtig zijn of omdat ze relatief dicht bij de lozingslocatie deponeren.

De brontermen voor de drie kernsmeltscenario's zijn tot stand gekomen door selectie van de radionucliden die samen naar verwachting meer dan 95% van de doses opleveren. Voor de ontbrekende fractie (<5%) is niet gecorrigeerd. Voor de twee SOB-scenario's is geen nuclidenreductieberekening toegepast, omdat voor deze scenario's de emissie niet in lozingsfracties maar in Becquerel is opgegeven.

De beperking tot edelgassen en de meest vluchtige groep van splijtstofproducten houdt in dat nucliden uit de overige groepen, waaronder ook een aantal alfa-stralers uit bijvoorbeeld de Lanthanidengroep niet in de brontermen zijn meegenomen. Voor de scenario's met aanzienlijke emissies naar de atmosfeer (Scenario B en C) en op relatief korte afstanden van de centrale, kan dit mogelijk een onderschatting van dosis via met name het inhalatiepad geven. Uitgaande van een hypothetische lozingsfractie van 0,01%<sup>14</sup> en bij gelijk veronderstelde verspreidingskarakteristieken, dragen deze alfa-stralers maximaal ongeveer 30% bij in de dosis.

<sup>13</sup> Bronterm manipulatiespreadsheet, BTMS revision 6974, RIVM

<sup>14</sup> De STC-CON1-lozing heeft een lozingsfractie van 0,01% voor de Lanthanidengroep

#### 4.3.1 Scenario A: Kernsmelt met beperkte emissie

De kenmerken en de bronterm van het kernsmeltscenario met beperkte emissie (Scenario A) zijn gegeven in Tabel 4 en Tabel 5. Tabel 5 geeft de totaal naar lucht geloosde activiteit (Bq) over de lozingsperiode van vier uur. Voor jodium geldt een longabsorptieklasse F met een deeltjesgrootte (AMAD) van 1  $\mu\text{m}$ . 50% komt vrij in elementaire vorm, 50% komt aerosol-gebonden vrij<sup>15</sup>.

Tabel 5 Emissie van de bronterm over de lozingsperiode van vier uur voor scenario kernsmelt met beperkte emissie (Scenario A) in Bq. Voor jodiumfractie en longklasse: zie tekst

Nucliden	Totale emissie <sup>16</sup> (Bq)
Kr-88	3,8E+16
Xe-135	5,5E+16
Kr-87	1,5E+16
Xe-133	2,1E+17
I-131	3,8E+11
I-133	7,0E+11

#### 4.3.2 Scenario B en C: Kernsmelt met korte en lange lozingsduur

De bronterm geldt voor beide scenario's en is afgeleid uit de opgegeven lozingsfracties: 100% voor de edelgassen, 1,5% voor de jodiumgroep en 0,8% voor de Cs-groep. De lozingspercentages van de Te- en Sb-groepen zijn, overeenkomstig de STC-CON1 bronterm, 0,5% en 1% (Bader and Slaper 2008). De bronterm is weergegeven in Tabel 6 en geeft de totale activiteit (Bq) geloosd naar de atmosfeer over de volledige lozingsperiode van vier (Scenario B) of 96 uur (Scenario C). Radioactief verval gedurende de insluiting van 24 uur is in rekening gebracht. De emissie van jodium betreft 50% elementair en 50% aerosol-gebonden nucliden<sup>15</sup>. Voor jodium en cesium is gerekend met longabsorptieklasse F, voor telluur is dat klasse M. Voor alle groepen bedraagt de aerosolgrootte (AMAD) 1  $\mu\text{m}$ .

Tabel 6 Emissie van de bronterm over de lozingsperiode van vier uur en 96 uur voor respectievelijk de kernsmeltscenario's B en C in Bq. Voor jodiumfractie en longklasse van de aerosolen: zie tekst

Nucliden	Totale emissie (Bq)
I-131	1,8E+16
Te-132	7,1E+15
Cs-137	1,5E+15
Cs-134	2,1E+15
I-133	1,7E+16
Xe-133	2,2E+18
Xe-135	1,2E+17

Het Fukushima-ongeval staat model voor de emissiescenario's B en C. De totale emissie naar de atmosfeer van het Fukushima-ongeval wordt in de literatuur echter geschat op 151 PBq I-131 en 14,5 PBq Cs-137 (Katata,

<sup>15</sup> De fractie jodium geeft de verhouding tussen elementair en aerosol-gebonden jodium. Deze fractie is toegepast op het aandeel I-131 in de bronterm. I-131 levert binnen de jodiumgroep veruit de belangrijkste bijdrage. De bijdrage van organisch gebonden jodium is beperkt en buiten beschouwing gebleven.

<sup>16</sup> Emissie over de volledige lozingsperiode. Verval tussen afschakeling van de reactor tot aan start lozing is verdisconteerd.

Chino et al. 2015) en is daarmee ongeveer een factor 10 hoger dan de emissie voor Scenario B en C. Deze factor 10 is aannemelijk vanwege het grotere thermisch vermogen van de Fukushima-reactoren en het hogere aantal emissiebronnen betrokken bij het ongeval. De emissies van Scenario B en C hebben betrekking op maar één kernreactor (van Borssele) met een significant lager thermisch vermogen.

#### 4.3.3

##### *Scenario D en E: Spleitstofopslagscenario zonder en met filtering*

De beide varianten van het SOB-scenario zijn opgegeven met een absolute lozingsomvang (Bq) voor de radionucliden Xe-133, Cs-137 en I-131. De brontermen voor de varianten met en zonder filtering zijn gegeven in Tabel 7. De emissie van jodium betreft 50% elementair en 50% aerosol-gebonden nucliden. Voor jodium en cesium is gerekend met longabsorptieklasse F. Voor alle groepen bedraagt de aerosolgrootte (AMAD) 1 µm. De filterefficiëntie bedraagt 99,9%.

*Tabel 7 Nucliden in de bronterm voor het SOB-scenario zonder en met filter volgens opgave in Tabel 4. Voor longklasse van de aerosolen: zie tekst*

<i>Nucliden</i>	<i>Emissie zonder filtering (Bq)</i>	<i>Emissie met filtering (Bq)</i>
Xe-133	4,40E+17	4,40E+17
I-131	2,47E+15	2,47E+12
Cs-137	5,55E+15	5,55E+12



## 5 Resultaten

### 5.1 Inleiding

In paragrafen 5.2-5.6 worden voor elk scenario de percentielafstanden behorend bij de beschouwde interventieniveaus gepresenteerd en besproken. Deze afstanden worden ook vergeleken met de preparatieafstanden uit het LCP-S (Rijksoverheid 2021): 10 km voor evacuatie, 20 km voor schuilen en 100 km voor de predistributie van jodiumtabletten voor kinderen. Daarnaast hebben we voor scenario D, het SOB-scenario zonder actief filter, onderzocht wat de invloed is van de gehanteerde lozingshoogte. Hiervoor hebben we de percentielafstanden bepaald voor een lozingshoogte van zowel 25 m als 60 m. Als laatste vergelijken we in paragraaf 5.7 voor scenario's A tot en met E de berekende percentielafstanden voor de interventie Schuilen voor een volwassen representatief persoon met de 3,5 km afstand uit de Voorzorgsmaatregel.

Om meer inzicht te geven in de onderliggende dosisverdelingen en verspreiding voor ieder scenario zijn in Bijlage 2 visualisaties toegevoegd van de verdelingen van effectafstanden en de percentielwaarden van de onderliggende doses.

### 5.2 Resultaten scenario A: Kernsmelt met beperkte emissie

*Tabel 8 De maximale afstand vanaf KCB tot waar de interventieniveaus uit Tabel 1 kunnen worden overschreden, is berekend voor 1008 hypothetische lozingen tussen 2015 en 2017. De gepresenteerde percentielafstanden corresponderen met het 50<sup>e</sup>-, 70<sup>e</sup>-, 80<sup>e</sup>-, 90<sup>e</sup>- en 95<sup>e</sup>-percentiel van deze 1008 afstanden voor scenario A, en zijn afgerond op hele kilometers*

Interventie	Percentielafstanden (km) tot KCB				
	50%	70%	80%	90%	95%
<b>Onmiddellijke evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Schuilen</b>					
<i>eenjarig kind</i>	2	4	5	7	9
<i>volwassene</i>	2	3	4	6	7
<b>Jodiumprofylaxe</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Tijdelijke relocatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Graasverbod</b>	-	2	2	3	4
<b>Sluiten van kassen</b>	-	-	1	3	4

Tabel 8 laat de percentielafstanden zien voor scenario A met een bronterm die voornamelijk edelgassen bevat en relatief weinig jodium. De doses zijn daarom voornamelijk afkomstig van de externe straling van de edelgassen uit de wolk. Dit is ook terug te zien in Tabel 8: van de directe maatregelen (Onmiddellijke evacuatie, Schuilen, Evacuatie, Tijdelijke relocatie en Jodiumprofylaxe) wordt alleen het interventieniveau voor Schuilen overschreden. Adequate maatregelen zullen dan ook gebaseerd moeten zijn op het voorkomen van het ontvangen van een externe stralingsdosis. Als we het percentiel van 95% aannemen voor de interventie Schuilen, dan vallen de bijbehorende afstanden voor zowel een eenjarig kind (9 km) als voor een volwassene (7 km) binnen de huidige preparatieafstand voor Schuilen van 20 km.

De interventieniveaus voor het Graasverbod en Sluiten van kassen kunnen ook worden overschreden tot enkele kilometers vanaf de Kerncentrale Borssele.

### 5.3 Resultaten scenario B: Kernsmelt met korte lozingsduur

Tabel 9 De maximale afstand vanaf KCB tot waar de interventieniveaus uit Tabel 1 kunnen worden overschreden, is berekend voor 1008 hypothetische lozingen tussen 2015 en 2017. De gepresenteerde percentielafstanden corresponderen met het 50<sup>e</sup>-, 70<sup>e</sup>-, 80<sup>e</sup>-, 90<sup>e</sup>- en 95<sup>e</sup>-percentiel van deze 1008 afstanden voor scenario B, en zijn afgerond op hele kilometers

Interventie	Percentielafstanden tot KCB (km)				
	50%	70%	80%	90%	95%
<b>Onmiddellijke evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	1	2	3	4
<i>volwassene</i>	-	-	-	1	2
<b>Evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	6	9	12	16	21
<i>volwassene</i>	4	6	8	11	14
<b>Schuilen</b>					
<i>eenjarig kind</i>	22	32	40	55	73
<i>volwassene</i>	16	24	30	42	55
<b>Jodiumprofylaxe</b>					
<i>eenjarig kind</i>	38	57	71	95	119
<i>volwassene</i>	11	16	21	29	36
<b>Tijdelijke relocatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	7	10	13	17	23
<i>volwassene</i>	5	7	9	13	17
<b>Graasverbod</b>	>250	>250	>250	>250	>250
<b>Sluiten van kassen</b>	>250	>250	>250	>250	>250

Tabel 9 geeft de effectafstanden voor scenario B. Van alle beschouwde scenario's resulteert dit scenario in de grootste effectafstanden. Daarnaast is dit het enige beschouwde scenario waarbij het interventieniveau voor Onmiddellijke evacuatie kan worden overschreden. Het 95-percentiel voor een eenjarig kind dat bij deze interventie hoort is 4 km. Dit betekent dat er 5% kans is dat door dit

lozingsscenario het interventieniveau voor een eenjarig kind op meer dan 4 km vanaf Kerncentrale Borssele overschreden kan worden.

De berekende percentielafstanden voor dit lozingsscenario vallen niet allemaal binnen de huidige preparatieafstanden voor zowel Evacuatie (10 km), Schuilen (20 km) en Predistributie van jodiumtabletten (100 km). Voor de Predistributie van jodiumtabletten is de kans minder dan 10% dat de preparatieafstand niet dekkend is, terwijl deze kans voor Evacuatie voor een volwassene ruim 10% is. In meer dan 30% van de hypothetische lozingen is de maximale afstand waar het interventieniveau voor Schuilen voor volwassenen wordt overschreden, groter dan de 20 km preparatieafstand.

Daarnaast liggen de effectstanden voor Evacuatie en Tijdelijke relocatie dicht bij elkaar. Deze afstanden zijn gebaseerd op de effectieve dosis die een representatief persoon oploopt in de eerste zeven dagen na aanvang van een lozing (Evacuatie), dan wel in het eerste jaar na een lozing (Tijdelijke relocatie). De dosis die deze persoon aanvullend oploopt in de periode ná de eerste zeven dagen na start lozing is dus klein ten opzichte van de dosis die al opgelopen is.

Verder zijn de berekende percentielen behorend bij de interventieniveaus voor het Graasverbod en het Sluiten van kassen allemaal groter dan de maximale beschouwde afstand (250 km vanaf Kerncentrale Borssele).

Voor dit scenario zijn ook de percentielafstanden berekend voor de criteria om ernstige deterministische effecten bij een foetus, eenjarig kind en een volwassene te vermijden en voor de criteria om de kans op stochastische effecten bij een foetus te verminderen (Tabel 2). De resultaten hiervan staan in Tabel 10.

Tabel 10 De maximale afstand vanaf KCB tot waar de criteria uit Tabel 2 kunnen worden overschreden, is berekend voor 1008 hypothetische lozingen tussen 2015 en 2017. De gepresenteerde percentielafstanden corresponderen met het 50<sup>e</sup>-, 70<sup>e</sup>-, 80<sup>e</sup>-, 90<sup>e</sup>- en 95<sup>e</sup>-percentiel van deze 1008 afstanden voor scenario B, en zijn afgerond op hele kilometers

Criterium	Percentielafstanden tot KCB (km)				
	50%	70%	80%	90%	95%
<b>Criteria ter voorkoming van ernstige deterministische effecten</b>					
<b>Externe bestraling</b>					
<b><math>AD_{RBM} &lt; 1 \text{ Gy-eq}</math></b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b><math>AD_{\text{fetus}} &lt; 0,1 \text{ Gy-eq}</math></b>					
<b><math>AD_{\text{fetus}} &lt; 1 \text{ Gy-eq}</math></b>	-	-	-	-	-
<b>Inwendige bestraling door inhalatie</b>					
<b><math>AD(30d)_{\text{thyroid}} &lt; 2 \text{ Gy-eq}</math></b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	1	2	3	5
<i>volwassene</i>	-	-	1	2	3
<b><math>AD(30d)_{RBM} &lt; 2 \text{ Gy-eq}</math></b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b><math>AD(30d)_{\text{lung}} &lt; 30 \text{ Gy-eq}</math></b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b><math>AD(30d)_{\text{colon}} &lt; 20 \text{ Gy-eq}</math></b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b><math>AD(\Delta')_{\text{fetus}} &lt; 0,1 \text{ Gy-eq}</math></b>	6	8	11	16	20
<b><math>AD(\Delta')_{\text{fetus}} &lt; 1 \text{ Gy-eq}</math></b>	-	1	2	3	4
<b><math>D_{\text{embryo}} (2-7w) &lt; 0,1 \text{ Gy}</math></b>					
<b><math>D_{\text{fetus,brain}} (8-15w) &lt; 0,3 \text{ Gy}</math></b>	-	-	-	-	-
<b>Criteria ter vermindering van de kans op stochastische effecten</b>					
<b><math>H_{\text{fetus}} \text{ in } 7d &lt; 100 \text{ mSv}</math></b>	30	43	55	74	93
<b><math>H_{\text{fetus}} \text{ in } \Delta' &lt; 100 \text{ mSv}</math></b>	30	43	55	74	93

Voor een eenjarig kind en een volwassene kan voor deterministische effecten alleen het criterium voor de schildklierdosis worden overschreden voor de berekende percentielen. Twee van de vier criteria ter voorkoming van ernstige deterministische effecten bij de foetus ten gevolge van inhalatie door de moeder, worden overschreden voor alle berekende percentielen. Het gaat om de twee criteria gebaseerd op de RBE-gewogen geabsorbeerde dosis, beschreven in de Safety Standards van het IAEA. Het criterium voor blootstelling aan externe bestraling voor de foetus ter voorkoming van deterministische effecten wordt hier niet overschreden.

## 5.4 Resultaten scenario C: Kernsmelt met lange lozingsduur

Tabel 11 De maximale afstand vanaf KCB tot waar de interventieniveaus uit Tabel 1 kunnen worden overschreden, is berekend voor 1002 hypothetische lozingen tussen 2015 en 2017. De gepresenteerde percentielafstanden corresponderen met het 50<sup>e</sup>-, 70<sup>e</sup>-, 80<sup>e</sup>-, 90<sup>e</sup>- en 95<sup>e</sup>-percentiel van deze 1002 afstanden voor scenario C, en zijn afgerond op hele kilometers

Interventie	Percentielafstanden tot KCB (km)				
	50%	70%	80%	90%	95%
<b>Onmiddellijke evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	3	4	4	5	6
<i>volwassene</i>	2	2	3	3	3
<b>Schulen</b>					
<i>eenjarig kind</i>	16	20	23	27	30
<i>volwassene</i>	11	14	16	18	21
<b>Jodiumprofylaxe</b>					
<i>eenjarig kind</i>	30	37	41	47	55
<i>volwassene</i>	7	9	10	12	14
<b>Tijdelijke relocatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	4	5	5	6	7
<i>volwassene</i>	2	3	3	4	4
<b>Graasverbod</b>	>250	>250	>250	>250	>250
<b>Sluiten van kassen</b>	194	229	247	>250	>250

Dit scenario heeft qua samenstelling en hoeveelheid dezelfde emissie als scenario B, met het verschil dat de lozingsduur 96 in plaats van 4 uur is. Omdat de meteorologische condities in 96 uur veel meer kunnen variëren dan in 4 uur, zal de verspreiding van radioactiviteit vaak niet gedomineerd worden door een enkele windrichting en dus ruimtelijker verdeeld zijn. Tabel 11 laat zien dat de percentielafstanden van dit scenario dan ook kleiner zijn dan die van scenario B. Ondanks deze kleinere percentielafstanden kan door grotere spreiding het betrokken gebied uiteindelijk toch groter zijn. Het is daarom belangrijk in kaart te brengen hoe verschillende omstandigheden zoals lozingsduur doorwerken in de grootte van het betrokken gebied.

De percentielafstanden behorende bij het 95<sup>e</sup>-percentiel voor Evacuatie en Jodiumprofylaxe zijn kleiner dan de bijbehorende preparatieafstanden. Het 95<sup>e</sup>-percentiel voor Schulen voor volwassenen (21 km) valt ongeveer samen met de preparatieafstand van 20 km.

Net als bij scenario B liggen de effectstanden voor Evacuatie en Tijdelijke relocatie dicht bij elkaar. De effectieve dosis die een representatief persoon aanvullend oploopt in de periode ná de eerste zeven dagen is hier dus ook klein ten opzichte van de dosis die al opgelopen is. De percentielafstanden voor het Graasverbod en het Sluiten van kassen zijn, net als bij scenario B, ook hier groot en overschrijden vaak de grenzen van het beschouwde domein.

## 5.5 Resultaten scenario D: SOB-scenario zonder filtering

Tabel 12. De maximale afstand vanaf KCB tot waar de interventieniveaus uit Tabel 1 kunnen worden overschreden is berekend voor 1008 hypothetische lozingen tussen 2015 en 2017. De gepresenteerde percentielafstanden corresponderen met het 50<sup>e</sup>-, 70<sup>e</sup>-, 80<sup>e</sup>-, 90<sup>e</sup>- en 95<sup>e</sup>-percentiel van deze 1008 afstanden voor scenario D (lozingshoogte op 25 m), en zijn afgerond op hele kilometers

Interventie	Percentielafstanden tot KCB (km)				
	50%	70%	80%	90%	95%
<b>Onmiddellijke evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	1	2	2	3
<i>volwassene</i>	-	-	1	2	3
<b>Schulen</b>					
<i>eenjarig kind</i>	7	9	11	15	19
<i>volwassene</i>	6	8	10	13	17
<b>Jodiumprofylaxe</b>					
<i>eenjarig kind</i>	11	16	19	26	33
<i>volwassene</i>	2	3	4	6	8
<b>Tijdelijke relocatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	3	4	5	6	8
<i>volwassene</i>	2	3	4	5	6
<b>Graasverbod</b>	>250	>250	>250	>250	>250
<b>Sluiten van kassen</b>	115	157	180	220	>250

Tabel 12 geeft de percentielafstanden voor scenario D. De lozingshoogte is op 25 m gesteld. Voor meer dan 95% van de hypothetische lozingen vallen de percentielafstanden voor zowel schulen, evacuatie als voor de predistributie van jodiumprofylaxe binnen de preparatieafstanden.

Daarnaast heeft de interventie Tijdelijke relocatie grotere effectafstanden dan Evacuatie voor dit lozingsscenario. De effectieve dosis die een representatief persoon in het eerste jaar na een lozing kan ontvangen, is dus significant hoger dan de dosis die deze persoon in de eerste zeven dagen na een lozing zal ontvangen. Dit komt met name door bodembesmetting van het gedeponeerde Cs-137 met een halfwaardetijd van ruim dertig jaar. Op basis van deze resultaten kan dit betekenen dat mensen die niet geëvacueerd zijn in de urgente fase van het ongeval, dit alsnog later in de vroege fase<sup>17</sup> moeten.

<sup>17</sup> In de vroege fase is er (in tegenstelling tot de urgente fase) geen dreiging meer op verdere escalatie van de situatie. Zie het LCP-S voor een gedetailleerde beschrijving van de fasering bij stralingsincidenten.

Tabel 13 De maximale afstand vanaf KCB tot waar de interventieniveaus uit Tabel 1 kunnen worden overschreden, is berekend voor 1008 hypothetische lozingen tussen 2015 en 2017. De gepresenteerde percentielafstanden corresponderen met het 50<sup>e</sup>-, 70<sup>e</sup>-, 80<sup>e</sup>-, 90<sup>e</sup>- en 95<sup>e</sup>-percentiel van deze 1008 afstanden voor scenario D, met lozingshoogte op 60 m in plaats van 25 m, en zijn afgerond op hele kilometers

Interventie	Percentielafstanden tot KCB (km)				
	50%	70%	80%	90%	95%
<b>Onmiddellijke evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Schulen</b>					
<i>eenjarig kind</i>	6	9	11	14	19
<i>volwassene</i>	5	7	9	12	15
<b>Evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	1	1
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Tijdelijke relocatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	1	2	3	4	5
<i>volwassene</i>	-	1	2	3	4
<b>Jodiumprofylaxe</b>					
<i>eenjarig kind</i>	11	16	19	26	33
<i>volwassene</i>	-	2	2	4	5
<b>Graasverbod</b>	>250	>250	>250	>250	>250
<b>Sluiten van kassen</b>	117	160	183	219	>250

Voor dit scenario is ook gekeken naar de percentielafstanden als de lozing plaatsvindt via de schoorsteen op 60 m hoogte in plaats van 25 m (Tabel 13). Vaak zal een grotere lozingshoogte tot minder radioactiviteit dicht bij de bron leiden. Relatief dicht bij KCB, tot enkele tientallen kilometers afstand, heeft een grotere lozingshoogte dan ook iets kleinere effectafstanden tot gevolg. De percentielstanden voor interventieniveaus die op grotere afstand van KCB worden overschreden, Graasverbod en Sluiten van kassen, zijn juist iets groter als op grotere hoogte wordt geloosd. Het verschil in lozingshoogte heeft dus een beperkte invloed op de overschrijding van interventieniveaus.

## 5.6 Resultaten scenario E: SOB-scenario met filtering

Tabel 14 De maximale afstand vanaf KCB tot waar de interventieniveaus uit Tabel 1 kunnen worden overschreden, is berekend voor 1008 hypothetische lozingen tussen 2015 en 2017. De gepresenteerde percentielafstanden corresponderen met het 50<sup>e</sup>-, 70<sup>e</sup>-, 80<sup>e</sup>-, 90<sup>e</sup>- en 95<sup>e</sup>-percentiel van deze 1008 afstanden voor scenario E, en zijn afgerond op hele kilometers

Interventie	Percentielafstanden (km) tot KCB				
	50%	70%	80%	90%	95%
<b>Onmiddellijke evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Evacuatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	1
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Schulen</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Jodiumprofylaxe</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Tijdelijke relocatie</b>					
<i>eenjarig kind</i>	-	-	-	-	-
<i>volwassene</i>	-	-	-	-	-
<b>Graasverbod</b>	5	7	8	9	11
<b>Sluiten van kassen</b>	2	5	7	10	13

Dit scenario heeft dezelfde emissie als scenario D (lozingshoogte 25 m), met het verschil dat de nucliden gefilterd worden voor lozing. Hierdoor blijft 99,9% van de radioactiviteit achter op het filter en wordt dus niet verspreid naar de omgeving. Hierdoor zijn de doses die een representatief persoon oploopt aanzienlijk lager dan bij scenario D en de interventieniveaus worden hierdoor bijna niet overschreden (Tabel 14). Alle percentielwaarden voor dit scenario vallen dan ook ruim binnen de drie preparatieafstanden. De interventieniveaus voor Graasverbod en Sluiten van kassen worden nog wel overschreden, maar deze afstanden zijn veel kleiner dan voor scenario's B-D.

## 5.7 Evaluatie Voorzorgsmaatregel

In deze paragraaf gaan we in op de vraag voor welke van de beschouwde ongevalsscenario's de Voorzorgsmaatregel toereikend is. In Tabel 15 staat voor elk scenario met welk percentiel de 3,5 km schuilgrens uit de Voorzorgsmaatregel overeenkomt, voor zowel een eenjarig kind als voor een volwassene. Bij scenario B en C zijn de effectieve doses dermate hoog, dat er bij elke hypothetische lozing wel een locatie op 3,5 km van KCB is waar het interventieniveau wordt overschreden. Het omgekeerde is waar voor scenario E: de effectieve doses zijn voor dit scenario relatief laag, waardoor het interventieniveau voor geen enkele hypothetische lozing wordt overschreden op een locatie op deze afstand.



Voor scenario A komt de 3,5 km uit de Voorzorgsmaatregel overeen met de afstand behorend bij het 70<sup>e</sup>-percentiel voor het eenjarig kind en het 77<sup>e</sup>-percentiel voor volwassenen. Voor scenario D geldt dit respectievelijk voor het 10<sup>e</sup>-percentiel en 18<sup>e</sup>-percentiel.

*Tabel 15 De maximale afstand vanaf KCB tot waar het interventieniveau Schuilen kan worden overschreden, is berekend voor circa duizend hypothetische lozingen tussen 2015 en 2017 voor scenario's A t/m E. De Voorzorgsmaatregel geeft voor de interventie Schuilen een afstand van 3,5 km tot KCB. Deze tabel geeft voor elk scenario met welk percentiel van deze circa duizend afstanden, behorende bij de interventie, de 3,5 km overeenkomt*

Scenario	Percentielafstanden tot KCB behorend bij 3,5 km tot KCB voor interventie Schuilen	
	eenjarig kind	volwassene
<b>A</b>	70%	77%
<b>B</b>	Alle lozingen overschrijden criterium op 3,5 km	
<b>C</b>	Alle lozingen overschrijden criterium op 3,5 km	
<b>D</b>	10%	18%
<b>E</b>	Nooit overschrijding criterium binnen 3,5 km van KCB	



## 6 Conclusies

### 6.1 Effectafstanden voor maatregelen ter beperking van de kans op stochastische effecten

Het kernsmeltscenario met kortdurende lozing (Scenario B) heeft de grootste effectafstanden voor overschrijding van de interventieniveaus ter beperking van de kans op stochastische effecten (Tabel 9). De resultaten voor dit scenario zijn daarom gebruikt in de vergelijking met de huidige preparatieafstanden van de Kerncentrale Borssele (Rijksoverheid 2021). De effectafstanden voor Evacuatie en Jodiumprofylaxe voor kinderen vallen in ongeveer 90% van alle weersomstandigheden binnen de huidige preparatieafstanden van respectievelijk 10 km en 100 km. Bij deze percentielwaarde is de effectafstand Schuilen 42 km, ruim boven de huidige preparatieafstand voor Schuilen van 20 km. Hierbij is uitgegaan van een volwassene als representatieve persoon, zoals voorgeschreven in het LCP-S. De effectafstanden zijn tot anderhalf maal groter indien kinderen de representatieve persoon vormen. Voor de overige scenario's (A, C, D en E) liggen de effectafstanden voor alle beschouwde percentielwaarden binnen de huidige preparatiezones.

Het interventieniveau voor de maatregel Tijdelijke relocatie (100 mSv jaardosis) kan worden overschreden in de beide grote kernsmeltscenario's (Scenario B en C) en het ongefilterde SOB-scenario (Scenario D). Uitgaande van volwassenen zijn de effectafstanden iets groter dan de afstanden voor Evacuatie. Dit kan een reden zijn om bij aanvang van het ongeval al een groter gebied te evacueren, waardoor een (tijdelijke) relocatie na passage van de pluim mogelijk kan worden voorkomen. De in dit rapport afgeleide rekenmethodiek voor de jaardosis houdt nog geen rekening met dosisreducties ten gevolge van het toepassen van maatregelen gedurende het eerste jaar. Dit kan een behoorlijke dosisreductie opleveren, waardoor de effectafstanden voor de maatregel Tijdelijke relocatie ook lager zullen uitvallen.

Voor Scenario B is de equivalente dosis van de foetus getoetst aan het IAEA-criterium van 100 mSv (Tabel 10). Het blijkt dat deze dosis wordt gedomineerd door de dosisbijdrage van de schildklier van de foetus tijdens blootstelling in de latere zwangerschapsweken. De effectafstand voor overschrijding van het IAEA-criterium is echter kleiner dan of gelijk aan de effectafstand van de maatregel Jodiumprofylaxe bij kinderen en zwangere vrouwen (Tabel 9). Jodiumprofylaxe voor kinderen en zwangere vrouwen levert een significante bijdrage aan de bescherming van de foetus tegen stochastische effecten.

In de kernsmeltscenario's (Scenario B en C) en de ongefilterde lozing van het SOB-scenario (Scenario D) worden de interventieniveaus voor de maatregelen Sluiten van kassen en Graasverbod voor hogere percentielwaarden overschreden tot afstanden van meer dan 250 km (Tabel 9, Tabel 11 en Tabel 12)<sup>18</sup>. Deze maatregelen zijn hierdoor al snel regio- of grensoverschrijdend. Voor de overige scenario's zijn deze

<sup>18</sup> 250 km is de maximale afstand die in de berekening in beschouwing is genomen.

afstanden beperkt tot de lokale omgeving, tot maximaal ongeveer 10 km.

## 6.2 Effectafstanden voor maatregelen ter voorkoming van ernstige deterministische effecten

Van de RBE-gewogen geabsorbeerde doses voor schildklier, longen, rode beenmerg en dikke darm geeft alleen de schildklierdosis een overschrijding van de IAEA-criteria ter voorkoming van ernstige deterministische effecten (hier:  $AD_{th}(30d) = 2 \text{ Gy-eq}$ ). De effectafstanden liggen tussen 1 en 2 km voor volwassenen en tussen 2 en 5 km voor kinderen op basis van respectievelijk de 80% en 95% percentielen.

Voor de bescherming van het ongeboren kind tegen deterministische effecten zijn twee methoden onderzocht: de methode gebaseerd op SSK/BfS (SSK 2014, Walter, Gering et al. 2014) en de methode van het IAEA (IAEA 2015). Het hierbij behorende IAEA-criterium biedt ruimte voor toepassing van een lage (100 mGy-eq) en een hoge overschrijdingswaarde (1000 mGy-eq), afhankelijk van het moment van de blootstelling gedurende de zwangerschap. Overschrijdingen van de criteria komen voor in de IAEA-methode tot 11-20 km (80-95%) bij een criterium van 100 mGy-eq en tot 2-3 km (80-95%) bij een criterium van 1000 mGy-eq. De SSK/BfS-methode levert geen effectafstanden voor overschrijding van het criterium. Het is op dit moment onduidelijk welke berekenwijze gevolgd moet worden en welk criterium moet worden gehanteerd.

In het LCP-S is een algemeen criterium voor het voorkomen van deterministische effecten opgenomen: 1000 mSv effectieve dosis in 48 uur (Tabel 1). Voor Scenario B kan de effectafstand hiervoor worden vergeleken met de effectafstand op basis van het IAEA-criterium ter voorkoming van deterministische effecten (in dit geval de  $AD_{th}(30d)$  schildklierdosis). De 1000 mSv effectieve dosis uit het LCP-S blijkt voor dit scenario een goede schatter voor de effectafstanden op basis van de IAEA-criteria. Dit geldt zowel voor volwassenen als voor kinderen. Voor de dosis van de foetus kan deze conclusie, vanwege een nog onduidelijk toetsingscriterium, nog niet worden getrokken.

## 6.3 Voorzorgsmaatregel

De berekende schuilafstanden van alle scenario's zijn vergeleken met de schuilafstand van 3,5 km van de Voorzorgsmaatregel. Een 3,5 km schuilafstand is passend voor het kernsmeltscenario met beperkte emissie (Scenario A) met een bijbehorende percentielwaarde van 77% voor volwassenen. Met andere woorden: bij een ongeval volgens Scenario A zal bij 77% van de weerscondities de Voorzorgsmaatregel schuilen tot 3,5 km toereikend zijn. Bij scenario's met een grotere emissie (Scenario's B, C, D) dekt de Voorzorgsmaatregel de gewenste schuilafstand niet af. Scenario E heeft in het geheel geen effectafstand voor de maatregel Schuilen.

## 7 Aanbevelingen

Uit de resultaten van dit onderzoek volgt een aantal aanbevelingen die verband houden met een verdere ontwikkeling van een stralingsbeschermingsstrategie.

1. Onderzoek het toevoegen van additionele scenario's in de uitwerking van de stralingsbeschermingsstrategie, die met betrekking tot de emissieomvang of emissieduur tussen de kernsmeltscenario's A en B/C liggen. De effectafstanden van de huidige kernsmeltscenario's liggen ver uit elkaar en bemoeilijken daardoor de toepassing van een *'graded approach'* in de beschermingsstrategie.
2. Onderzoek de optimalisatie van de beschermingsstrategie door toepassing van het referentieniveau (Rijksoverheid 2017) op basis van een residuele jaardosis en toepassing van een combinatie van beschermende maatregelen, zoals beoogd door de ICRP (ICRP, 2007, 2020).
3. Stel eenduidige uitgangspunten vast voor berekening van de verwachte en ontvangen dosis voor de toetsing aan interventieniveaus en aanvullende generieke criteria. Dit geldt in het bijzonder voor de definitie van de representatieve persoon voor de 'nieuw' geïntroduceerde (residuele) jaardosis en de RBE-gewogen geabsorbeerde dosis.
4. Onderzoek onder welke omstandigheden de Voorzorgsmaatregel effectief kan worden ingezet. Mogelijk kan de maatregel ook dienstdoen als een reflexmaatregel in situaties met een verwachte snelle en ernstige ontwikkeling van het ongeval, overeenkomstig het Belgisch noodplan. In geval van een groot kernsmeltscenario kan de Voorzorgsmaatregel worden uitgebreid naar een preventieve evacuatie ter voorkoming van ernstige deterministische effecten.
5. Onderzoek de verschillende analysemethoden en criteria voor de bescherming van het ongeboren kind tegen zowel deterministische als stochastische effecten. Overweeg de opname van deze criteria in de stralingsbeschermingsstrategie.



## 8 Referenties

Bader, S. and H. Slaper (2008). Inventarisatie en classificatie van maatregelzones bij kernongevallen, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.

Bengtsson, L., U. Andrae, T. Aspelien, Y. Batrak, J. Calvo, W. Rooy, E. Gleeson, B. Sass, M. Homleid, M. Hortal, K.-I. Ivarsson, G. Lenderink, S. Niemelä, K. Nielsen, J. Onvlee, L. Rontu, P. Samuelsson, D. Santos-Muñoz, A. Subias and M. Køltzow (2017). "The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system." Monthly Weather Review **145**.

EPZ (2010). Milieueffectrapportage Brandstofdiversificatie, N.V. Elektriciteits-produktiemaatschappij Zuid-Nederland EPZ.

IAEA (2005). Generic Procedures for Medical Response During a Nuclear or Radiological Emergency. Vienna, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.

IAEA (2015). Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. Vienna, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.

ICRP (1995). Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients. ICRP Publication 72. , ICRP.

ICRP (2001). Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. ICRP Publication 88., ICRP.

ICRP (2006). Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. ICRP Publication 101a., ICRP.

ICRP (2007). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103., ICRP.

Johansson, J., P. Kock, J. Boson, S. Karlsson, P. Isaksson, J. Lindgren, E. Tengborn, A. M. Blixt Buhr and U. Råverstam (2017). Review of Swedish emergency planning zones and distances, Swedish Radiation Safety Authority.

Katata, G., M. Chino, T. Kobayashi, H. Terada, M. Ota, H. Nagai, M. Kajino, R. Draxler, M. C. Hort, A. Malo, T. Torii and Y. Sanada (2015). "Detailed source term estimation of the atmospheric release for the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident by coupling simulations of an atmospheric dispersion model with an improved deposition scheme and oceanic dispersion model." Atmos. Chem. Phys. **15**(2): 1029-1070.

Korsakissok, I., R. Périllat, S. Andronopoulos, P. Bedwell, E. Berge, T. Charnock, G. Geertsema, F. Gering, T. Hamburger, H. Klein, S.

Leadbetter, O. C. Lind, T. Pázmándi, C. Rudas, B. Salbu, A. Sogachev, N. Syed, J. M. Tomas, M. Ulimoen, H. de Vries and J. Wellings (2020). "Uncertainty propagation in atmospheric dispersion models for radiological emergencies in the pre- and early release phase: summary of case studies." Radioprotection **55**: S57-S68.

Kutkov, V., E. Buglova and T. McKenna (2011). "Severe deterministic effects of external exposure and intake of radioactive material: basis for emergency response criteria." Journal of Radiological Protection **31**: 237.

Petoussi-Henss, N., H. Schlattl, M. Zankl, A. Endo and K. Saito (2012). "Organ doses from environmental exposures calculated using voxel phantoms of adults and children." Physics in Medicine and Biology **57**(18): 5679-5713.

Rijksoverheid (2016). Responsplan Nationaal Crisisplan Stralingsincidenten. I&M.

Rijksoverheid (2017). Besluit basisveiligheidsnormen stralingsbescherming. I&M.

Rijksoverheid (2020). Verordening basisveiligheidsnormen stralingsbescherming. I&W.

Rijksoverheid (2021). Landelijk Crisisplan Straling. I&W.

SSK (2014). Basic Radiological Principles for Decisions on Measures for the Protection of the Population against Incidents involving Releases of Radionuclides - Recommendation by the German Commission on Radiological Protection, Strahlenschutzkommission

Tomas, J. M., V. Peereboom, A. Kloosterman and A. van Dijk (2021). "Detection of radioactivity of unknown origin: Protective actions based on inverse modelling." Journal of Environmental Radioactivity **235-236**: 106643.

Tomas, J. M. and C. Twenhöfel (2019). The effects of uncertainties on the radiological assessment in the (pre-) release phase of a nuclear accident. HARMO: 19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO), Bruges, Belgium.

Tomas, J. M., J. van Dijk and C. M. Twenhöfel (2017). Modelling atmospheric Dispersion of radioactivity with NPK-Puff using Meteorological data from HIRLAM and Harmonie-Arome. 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO).

UNSCEAR (2014). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation UNSCEAR 2013 Report, Report to the General Assembly, Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.



Walter, H., F. Gering, K. Arnold, B. Gerich, G. Heinrich and U. Welte (2014). Simulation potentieller Unfallszenarien für den Notfallschutz in der Umgebung von Kernkraftwerken mit RODOS, Bundesamt für Strahlenschutz.



## Bijlage 1. Berekening van dosisgrootheden

In deze bijlage staat beschreven hoe verschillende dosisgrootheden worden berekend. In de eerste paragraaf wordt de RBE-gewogen geabsorbeerde dosis uitgelegd. In de tweede paragraaf wordt beschreven hoe verschillende dosiseindpunten voor de foetus worden berekend in deze studie.

### De RBE-gewogen geabsorbeerde dosis

De RBE-gewogen dosis voor orgaan of weefsel T,  $AD_T$ , is gedefinieerd als het product van de gemiddelde geabsorbeerde dosis in T door stralingssoort R ( $D_{T,R}$ ) en de relatieve biologische effectiviteit van R in het veroorzaken van een specifiek deterministisch effect in T ( $RBE_{T,R}$ ):

$$AD_T = D_{T,R} \times RBE_{T,R}$$

Vanwege de weging met  $RBE_{T,R}$  wordt hier de eenheid Gray-equivalent [Gy-eq] gebruikt.

$AD(\Delta)_T$  is de RBE-gewogen geabsorbeerde volgdosis voor een orgaan of weefsel T opgelopen door stralingssoort R in de periode  $\Delta$  na acute inname:

$$AD_T(\Delta) = \int_{t_0}^{t_0+\Delta} \dot{AD}_{T,R}(t) dt,$$

waarbij  $\Delta$  hier gelijk is aan 30 dagen. Om de hierboven genoemde reden wordt ook voor  $AD(30d)_T$  de eenheid Gray-equivalent [Gy-eq] gebruikt.

De beschouwde stralingssoorten in deze studie zijn gamma- en bètastraling. De deterministische effecten en bijbehorende RBE-waarden komen uit (Kutkov, Buglova et al. 2011) en zijn samengevat in Tabel 16.

Tabel 16 Gezondheidseffecten en bijbehorende RBE-waarden die beschouwd zijn in deze studie (uit: Kutkov, Buglova et al. (2011))

Orgaan/weefsel	Gezondheidseffect	Blootstelling	RBE
Schildklier	Acute schildklierontsteking	Intern $\gamma$ Intern beta	0,2 (alleen voor jodium-bèta stralers), anders 1
Rode beenmerg	Beenmergsyndroom	Extern $\gamma$ Intern $\beta, \gamma$	1 1
Longen	Pneumonitis	Extern $\gamma$ Intern $\beta, \gamma$	1 1
Dikke darm	Maag-darm-syndroom	Intern $\beta, \gamma$	1
Foetus	Verstoorde ontwikkeling of dood	Extern $\gamma$ Intern $\beta, \gamma$	1 1 <sup>a)</sup>

<sup>a)</sup> Uit: IAEA (2005): *Generic procedures for medical response during a nuclear or radiological emergency*, Tabel F1.

### De berekening van de stralingsdoses van de foetus

In paragraaf 3.2 zijn criteria beschreven voor maatregelen ter bescherming van de foetus. Hier wordt beschreven hoe de bijbehorende stralingsdoses worden berekend.

#### *De RBE-gewogen geabsorbeerde dosis van de foetus, $AD_{\text{foetus}}$ , ten gevolge van externe straling*

Voor de berekening van de RBE-gewogen geabsorbeerde dosis van de foetus door externe bestraling zijn geen dosisconversiecoëfficiënten bekend. Daarom wordt de dosis van de baarmoeder als benadering gehanteerd. Dezelfde aanpak wordt gehanteerd in de studies van Walter, Gering et al. (2014) en Johansson, Kock et al. (2017). In IAEA (2005) wordt een vergelijkbare benadering gedaan door de geabsorbeerde dosis van de torso van de moeder te beschouwen.

#### *De RBE-gewogen geabsorbeerde volg dosis van de foetus, $AD(\Delta')_{\text{foetus}}$ , ten gevolge van inhalatie door de moeder*

Voor het berekenen van de RBE-gewogen geabsorbeerde volg doses van de foetus,  $AD(\Delta')_{\text{foetus}}$ , met  $\Delta'$  de periode van ontwikkeling in de baarmoeder, kunnen de dosisconversiecoëfficiënten uit IAEA (2005) worden gebruikt (Tabel XIIB2-1 in die publicatie). Deze DCC's zijn gebaseerd op de effectieve dosis voor de foetus gedurende  $\Delta'$  na acute inname door de moeder. Hiermee is gemiddeld over de (reeds gevormde) organen door gebruik te maken van de weefselweegfactoren voor de representatieve persoon. Bovendien is ervan uitgegaan dat het moment van acute inname zodanig is, dat de RBE-gewogen geabsorbeerde volg dosis maximaal is.

De dosisconversiecoëfficiënten in IAEA (2005) zijn overgenomen uit ICRP-publicatie 88 (ICRP 2001), waarbij uitgegaan is van een (zwangere) werker die radioactief besmet stof inhaleert met een deeltjesgrootteverdeling met een AMAD van 5 micrometer. Omdat in de

huidige studie uitgegaan wordt van een lid van de bevolking als Representatieve persoon, hanteren we voor de in paragraaf 5.3 getoonde resultaten de dosisconversiecoëfficiënten voor een lid van de bevolking en bijbehorende AMAD van 1 micrometer.

*De geabsorbeerde volgdosis van de foetus in de periode twee tot zeven weken na conceptie,  $D(2-7w)_{\text{fetus}}$ , ten gevolge van inhalatie door de moeder*

Voor het berekenen van de geabsorbeerde volgdosis van het embryo in de specifieke periode twee tot zeven weken na conceptie, zijn geen dosisconversiecoëfficiënten bekend. Daarom nemen we aan dat het embryo aan dezelfde straling blootgesteld wordt als de baarmoederwand van de moeder. Hierbij kunnen de dosisconversiecoëfficiënten uit ICRP-publicatie 72 voor een blootstelling van  $\Delta'$ =dertig dagen na acute inname worden gebruikt (ICRP 1995). De aanname hierin is dat de foetus op het moment van inname twee weken oud is en de blootstelling van dertig dagen de blootstellingsperiode twee tot zeven weken na conceptie benadert.

*De geabsorbeerde volgdosis van de hersenen van de foetus in de periode acht tot vijftien weken na conceptie,  $D(8-15w)_{\text{fetus,brain}}$ , ten gevolge van inhalatie door de moeder*

Voor de geabsorbeerde volgdosis van de (ontwikkende) hersenen van de foetus in de periode acht tot vijftien weken na conceptie, kunnen de dosisconversiecoëfficiënten uit ICRP-88 worden gebruikt (ICRP, 2001). Bovendien is ervan uitgegaan dat het moment van acute inname zodanig is, dat de geabsorbeerde volgdosis maximaal is.

*De equivalente dosis van de foetus,  $H_{\text{fetus}}$*

De IAEA beschrijft in GSR Part 7 dat de equivalente dosis van de foetus moet worden bepaald door de equivalente dosis van de foetus door externe straling op te tellen bij de equivalente volgdosis van de foetus door inname van de moeder. Voor de equivalente volgdosis dient de waarde te worden gebruikt van het orgaan of weefsel waarvoor deze maximaal is, ook rekening houdend met de chemische samenstelling en het moment van inname ten opzichte van de conceptie ((IAEA 2015): Table II.2, Voetnoot f). Hiervoor zijn de dosisconversiecoëfficiënten uit ICRP-publicatie 88 gebruikt (ICRP 2001). Per radionuclide is de dosisconversiecoëfficiënt voor het orgaan en moment van inname gehanteerd die de hoogste waarde geeft.

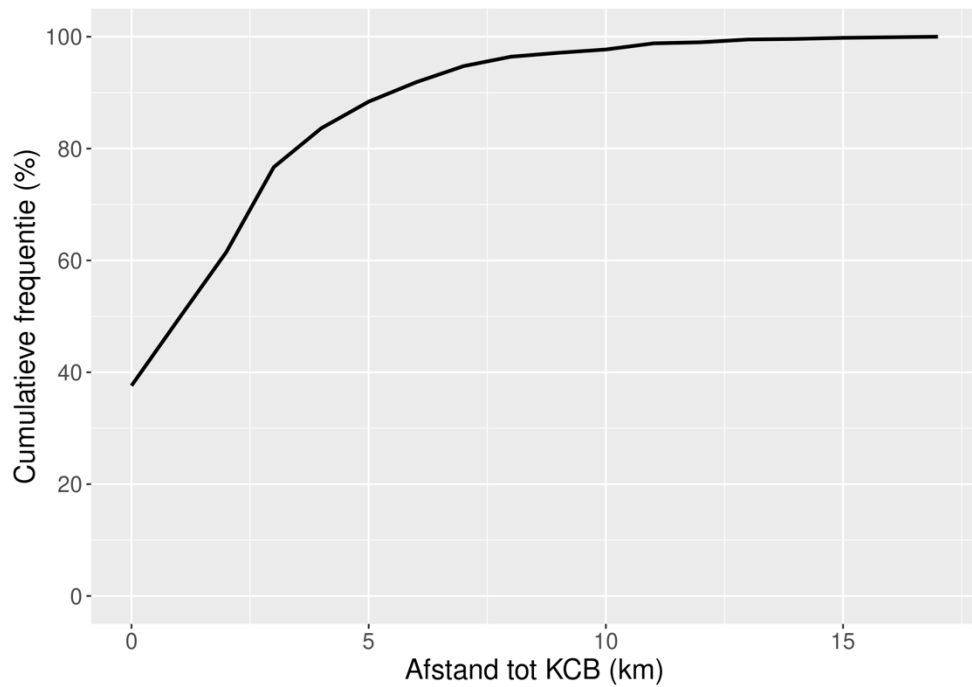
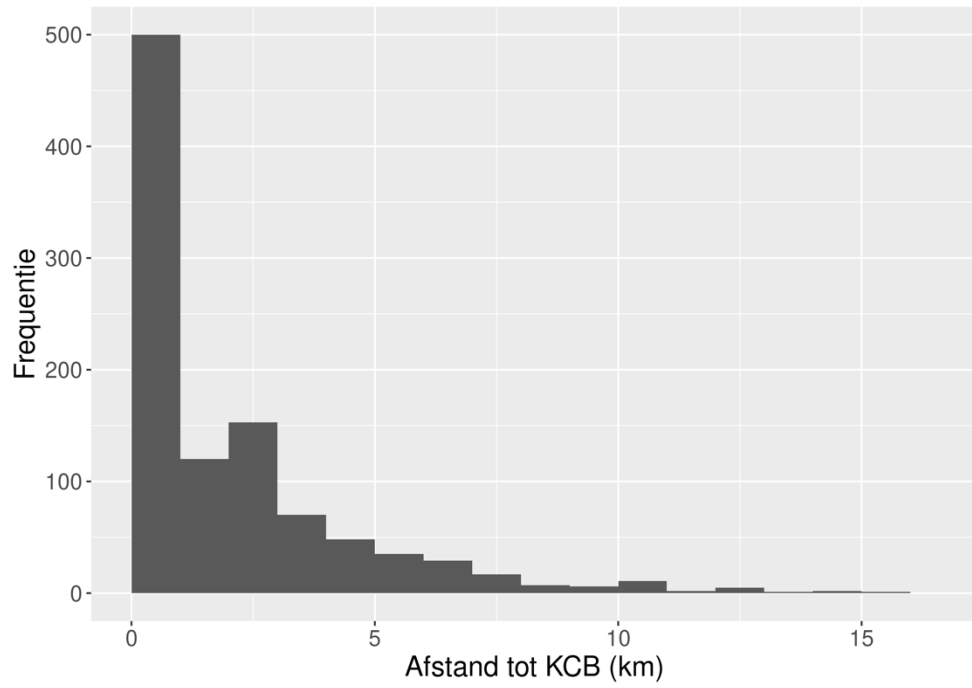
Voor de externe blootstelling wordt de equivalente dosis voor de baarmoeder van de moeder als benadering gebruikt, in lijn met de aanpak voor het beschouwen van deterministische effecten. De beschouwde blootstellingsperiode is afhankelijk van het gebruikte criterium (zie Tabel 2). Dit is zeven dagen of de periode van ontwikkeling in de baarmoeder. Voor de berekening van de dosis gedurende de ontwikkeling in de baarmoeder zijn uit praktische overweging de dosisconversiecoëfficiënten voor de periode van een jaar gebruikt.

## Bijlage 2. Visualisatie effectafstanden en dosisverdelingen

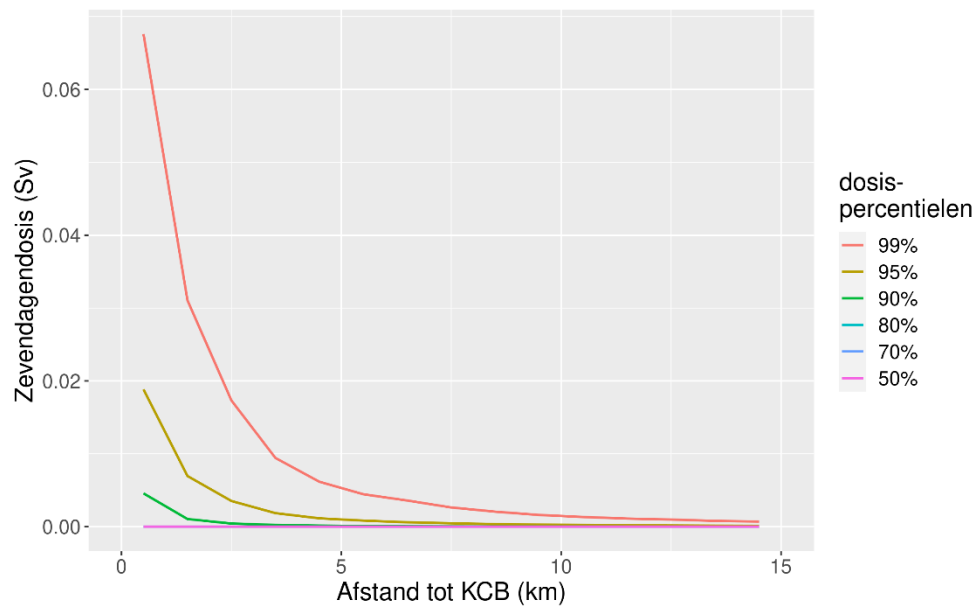
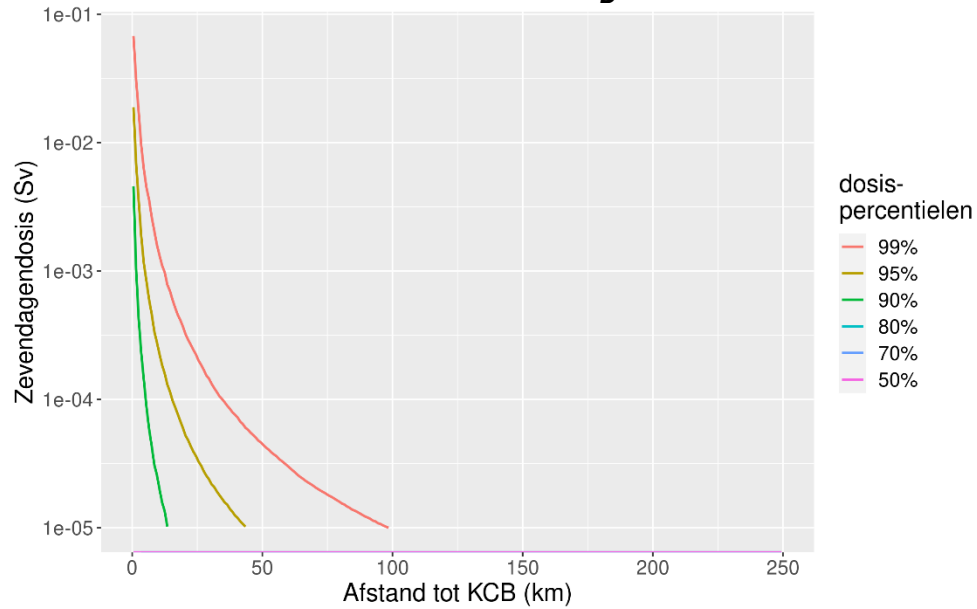
In deze bijlage worden voor elk scenario absolute en cumulatieve verdelingen van effectafstanden van de circa duizend hypothetische lozingen en de percentielwaarden van de onderliggende doses getoond. De percentielwaarden van de onderliggende dosis worden voor alle afstanden op een logaritmische schaal getoond en daarna voor afstanden tot 15 km vanaf Kerncentrale Borssele op lineaire schaal. De grafieken worden alleen voor de relevante interventies getoond, en deze kunnen per scenario verschillen. Voor Evacuatie, Schuilen (beide gebaseerd op de dosis opgelopen in zeven dagen) en Tijdelijke relocatie (jaardosis) worden grafieken getoond voor volwassenen. Voor Jodiumprofylaxe (schildklierdosis) is dit weergegeven voor een eenjarig kind.

## Scenario A

### Scenario A: Interventie Schuilen – volwassene



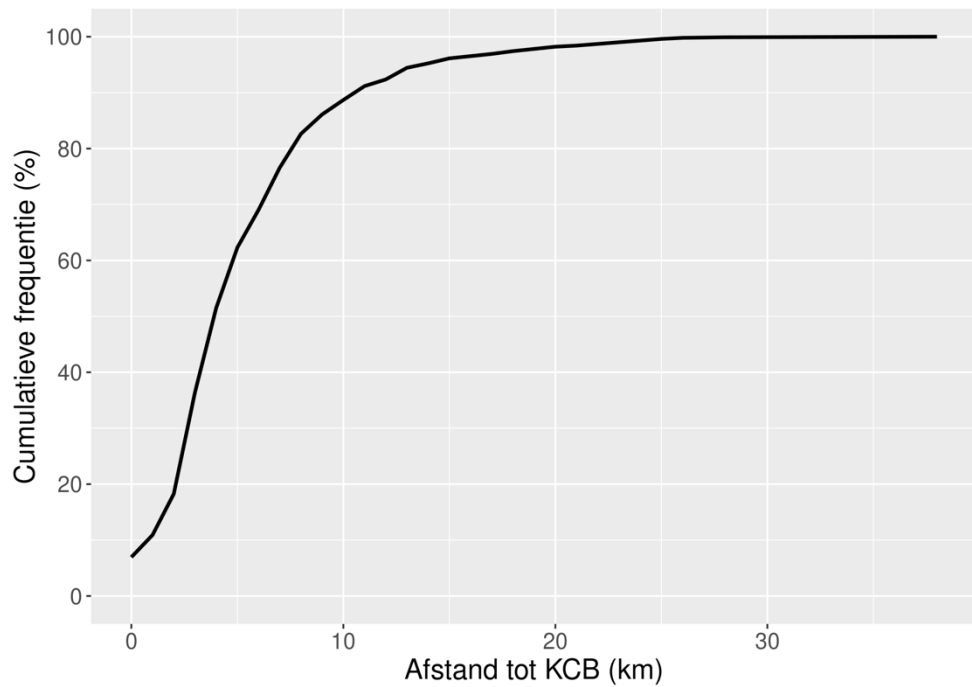
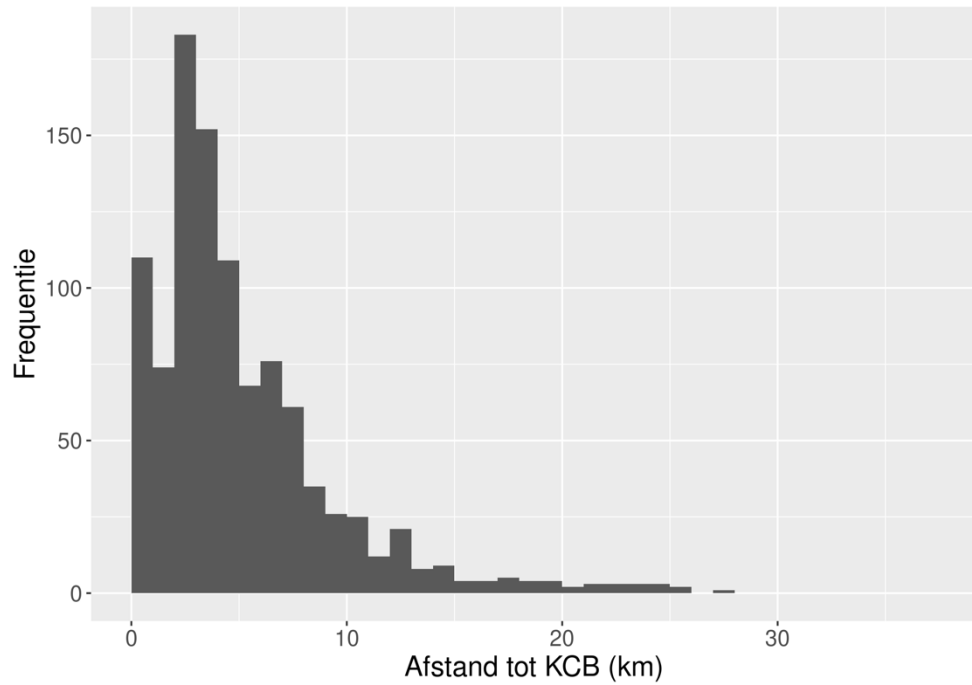
**Scenario A: Effectieve dosis in zeven dagen – volwassenen**



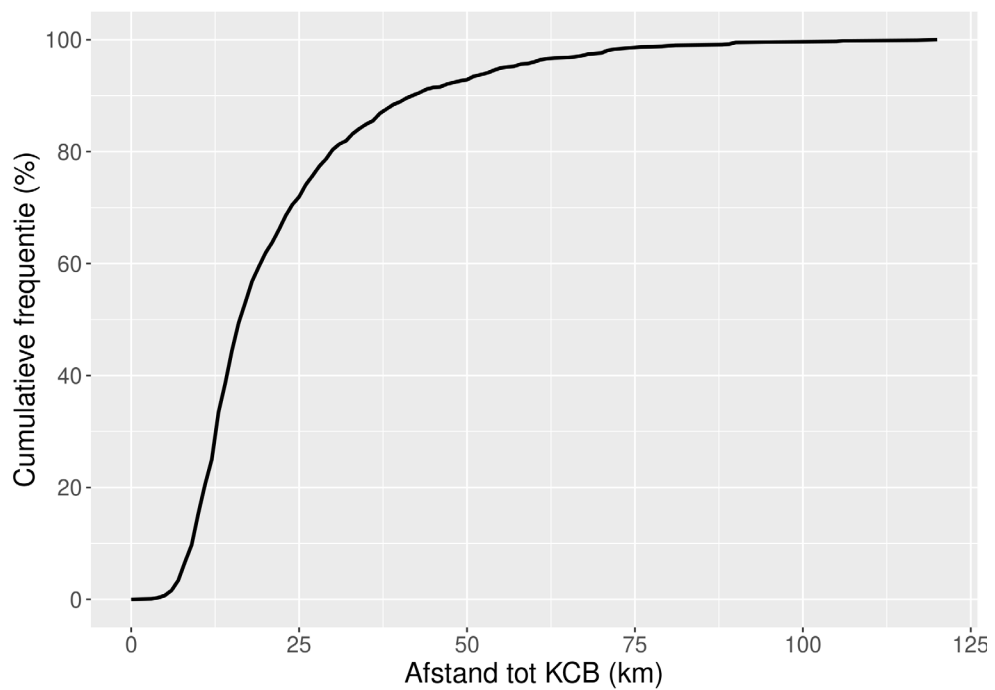
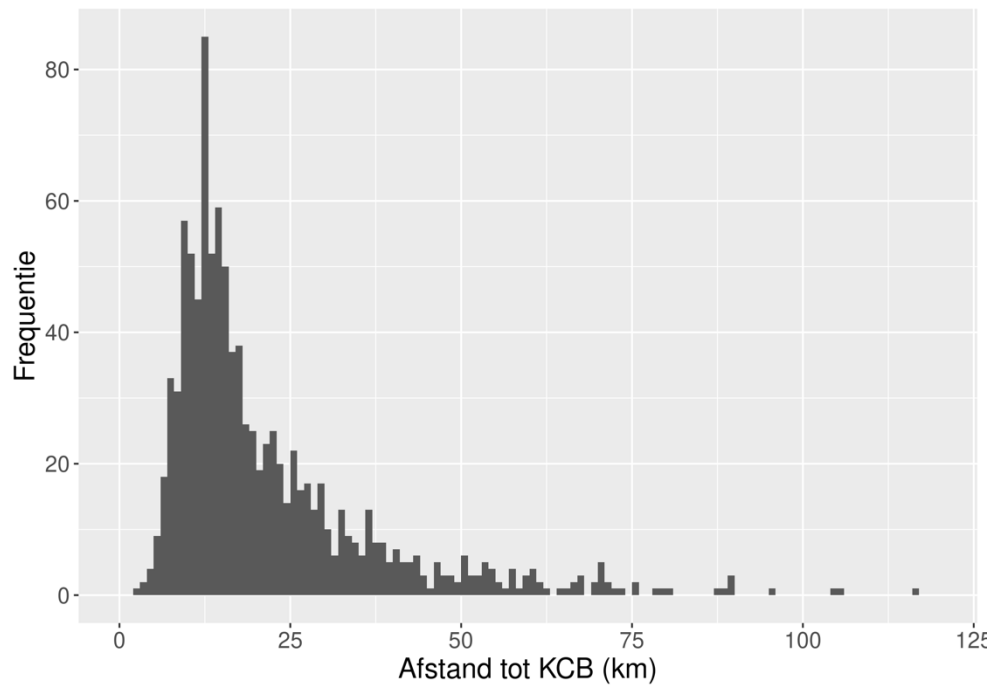


### Scenario B

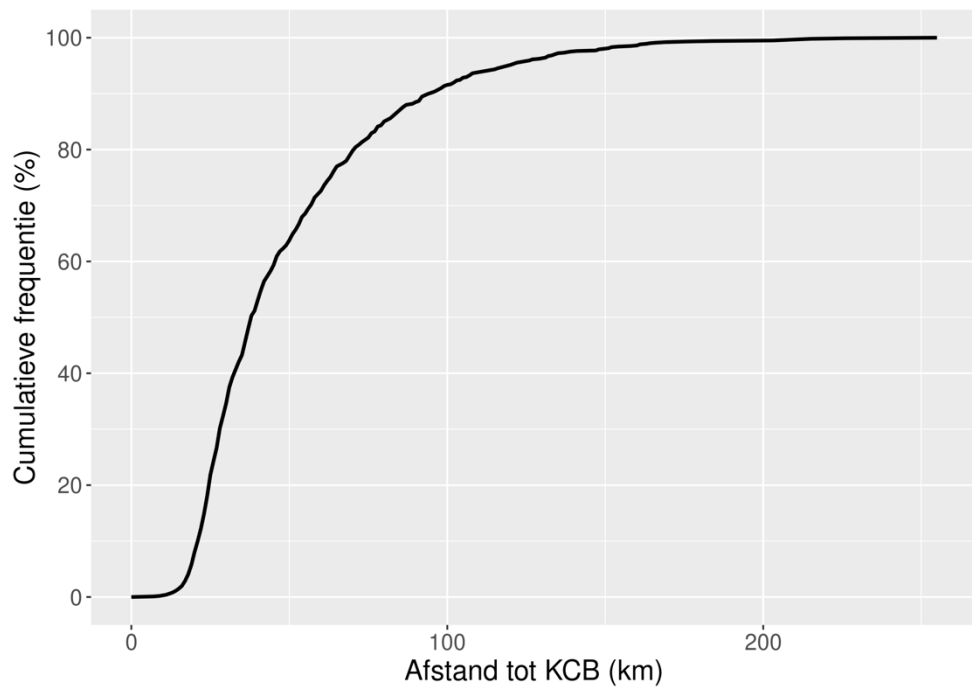
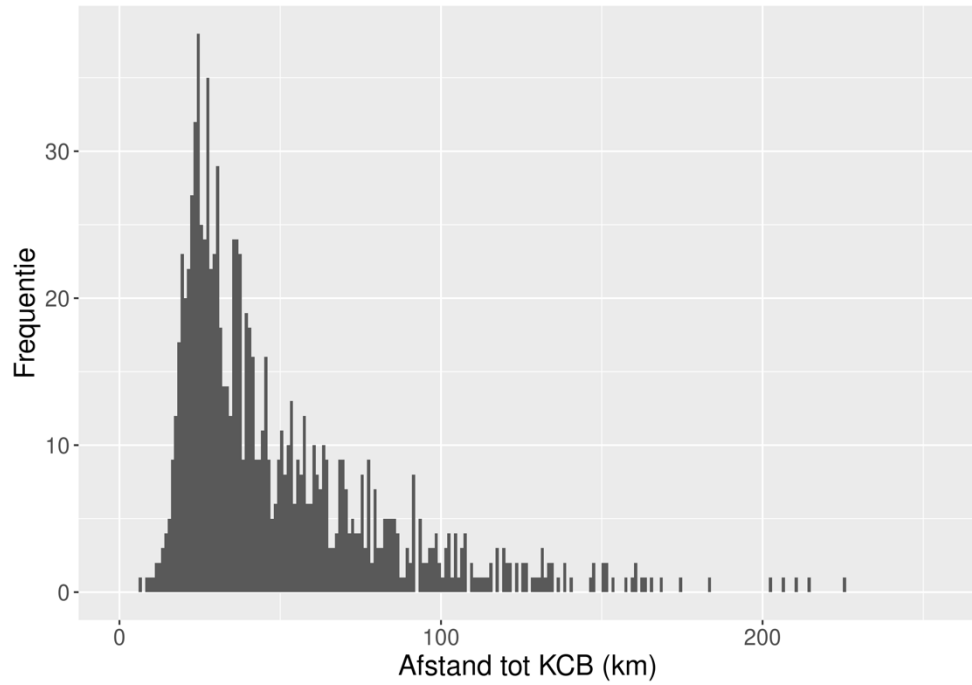
#### Scenario B: *Interventie Evacuatie – volwassene*



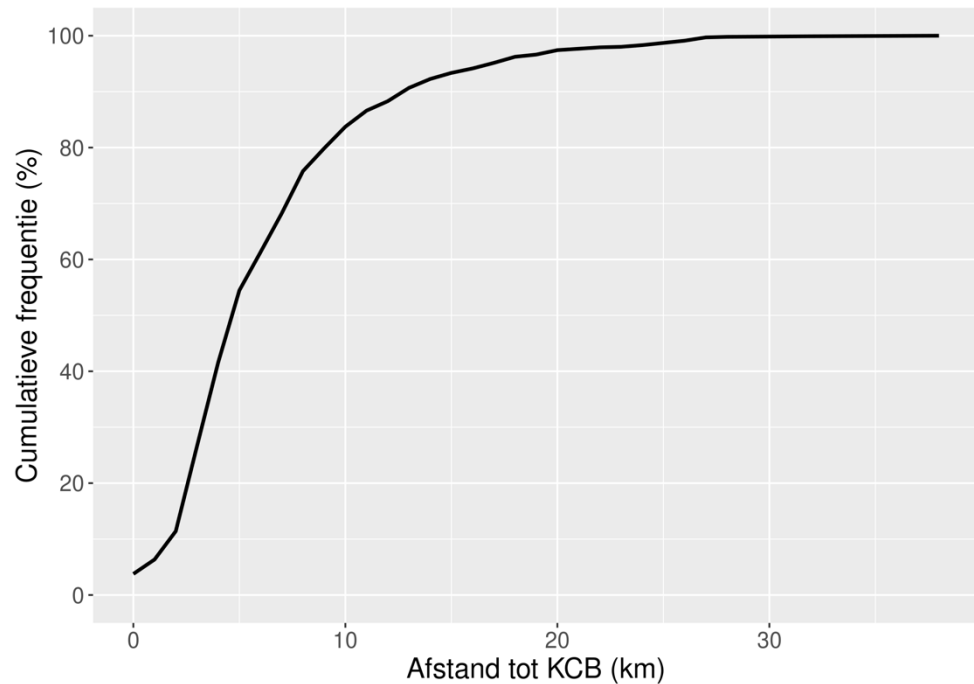
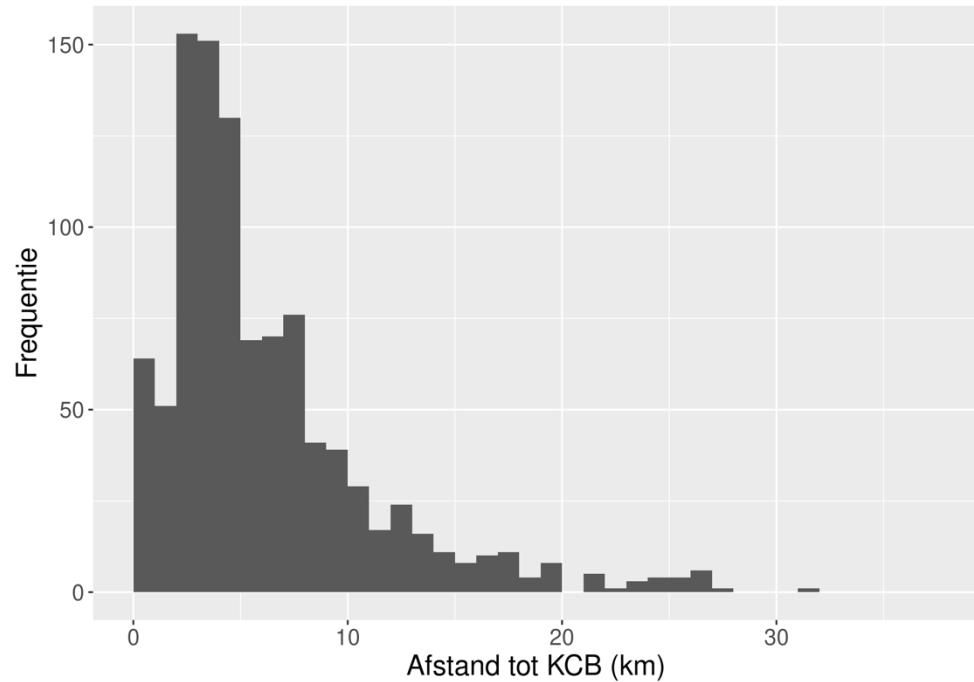
**Scenario B: Interventie Schuilen – volwassene**



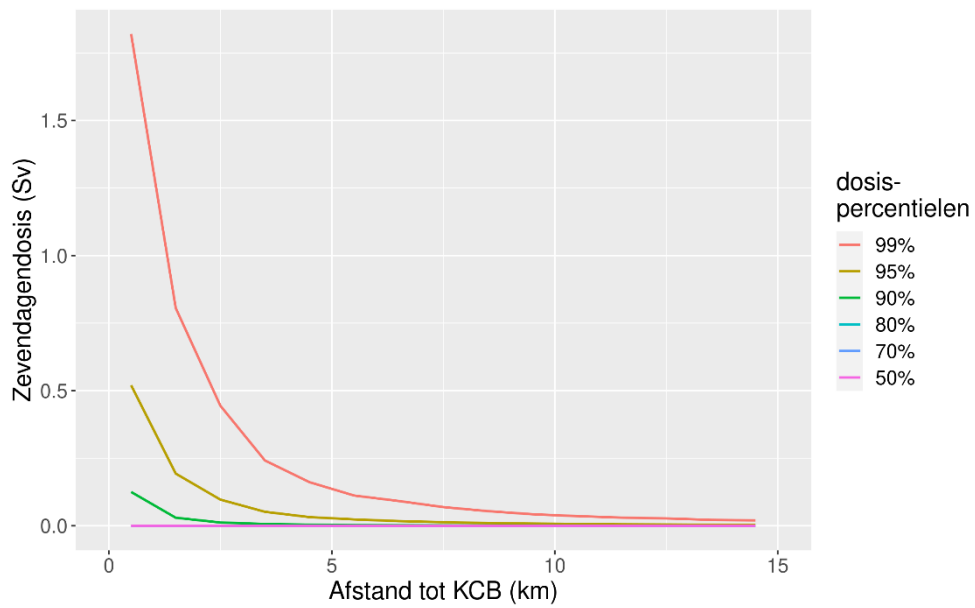
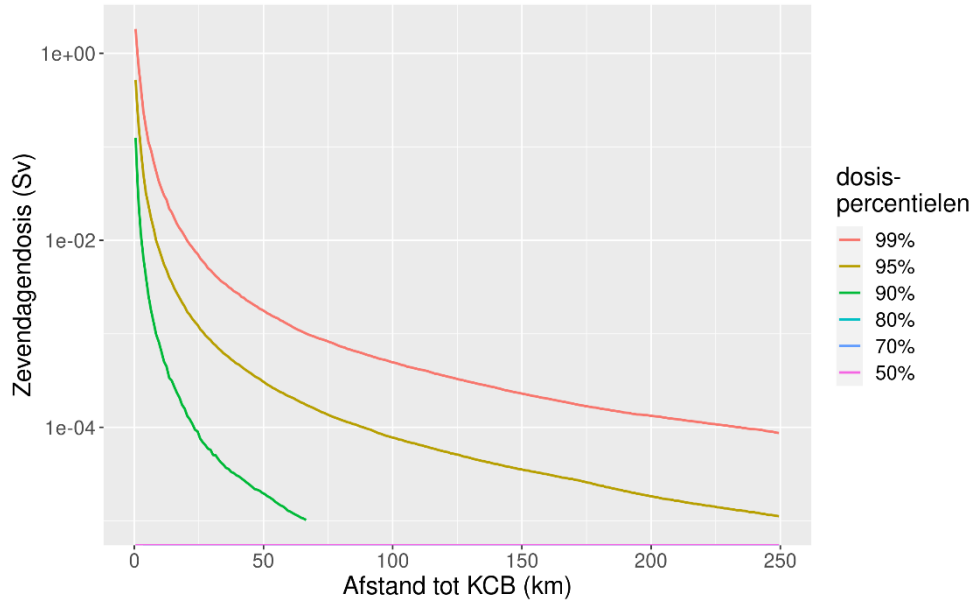
**Scenario B: Interventie Jodiumprofylaxe – eenjarig kind**



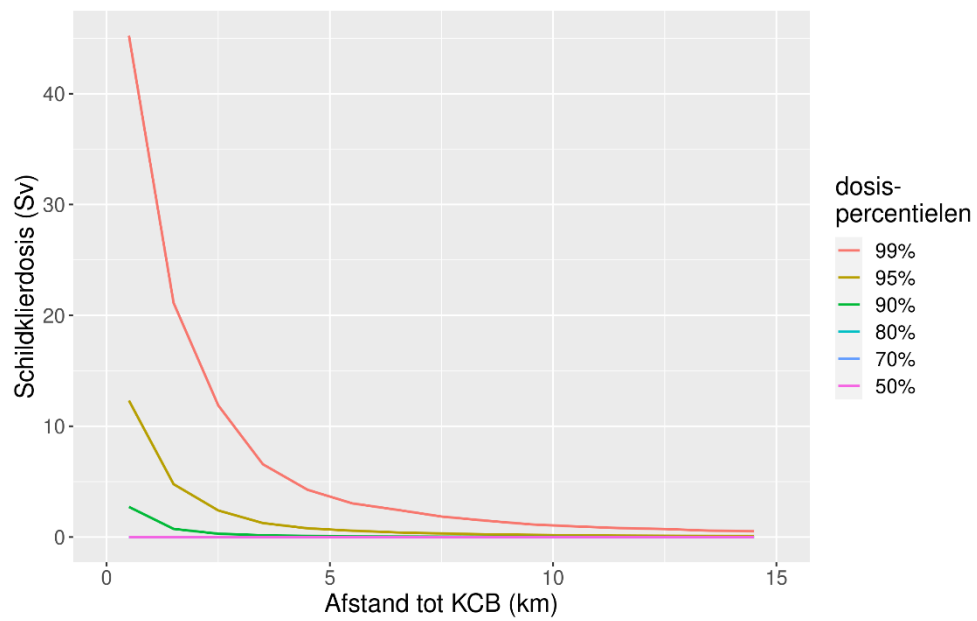
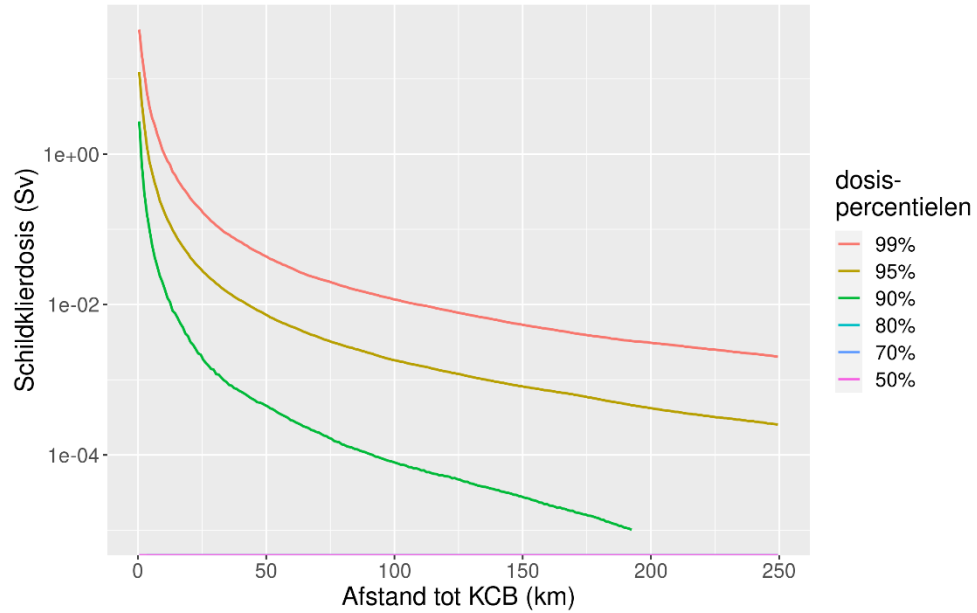
**Scenario B: Interventie Tijdelijke relocatie – volwassene**



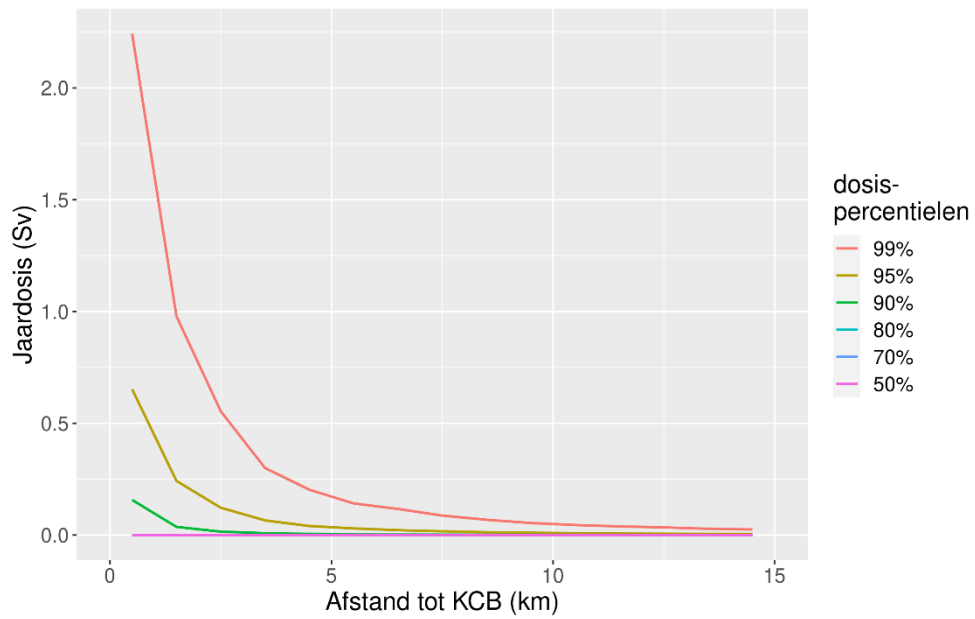
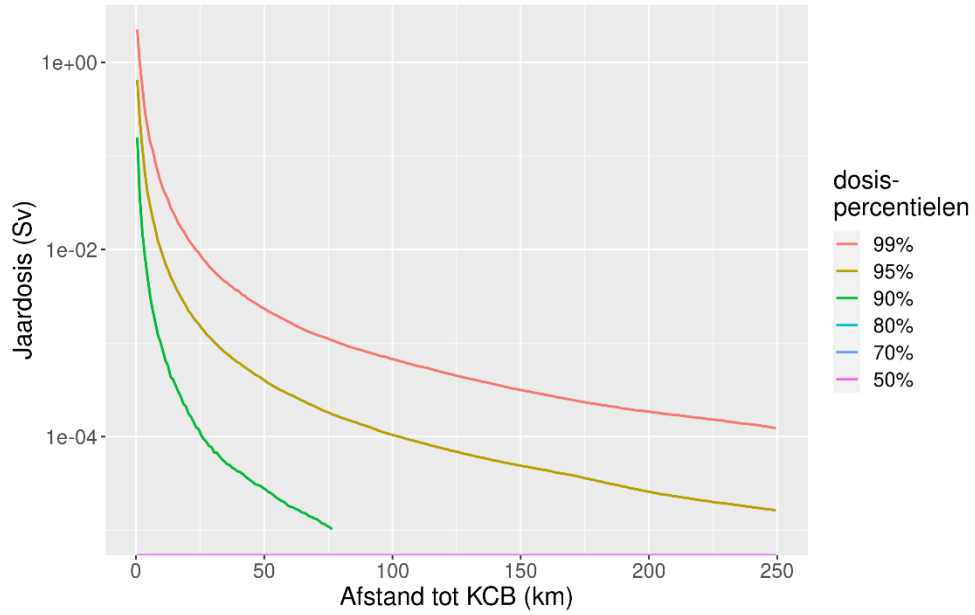
**Scenario B: Effectieve dosis in zeven dagen – volwassenen**



**Scenario B: Schildklierdosis – eenjarig kind**

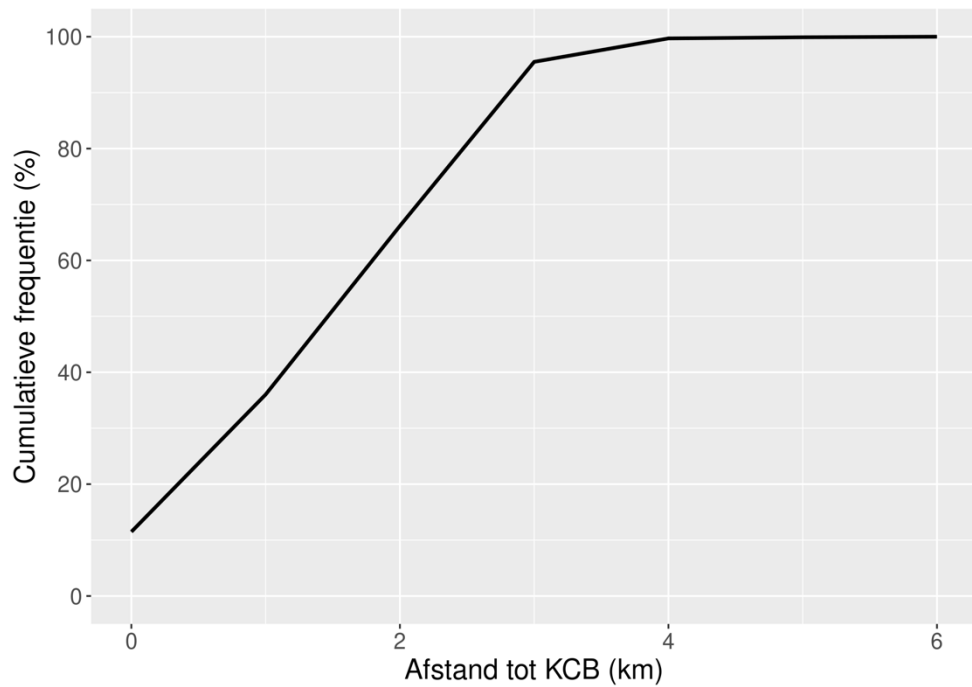
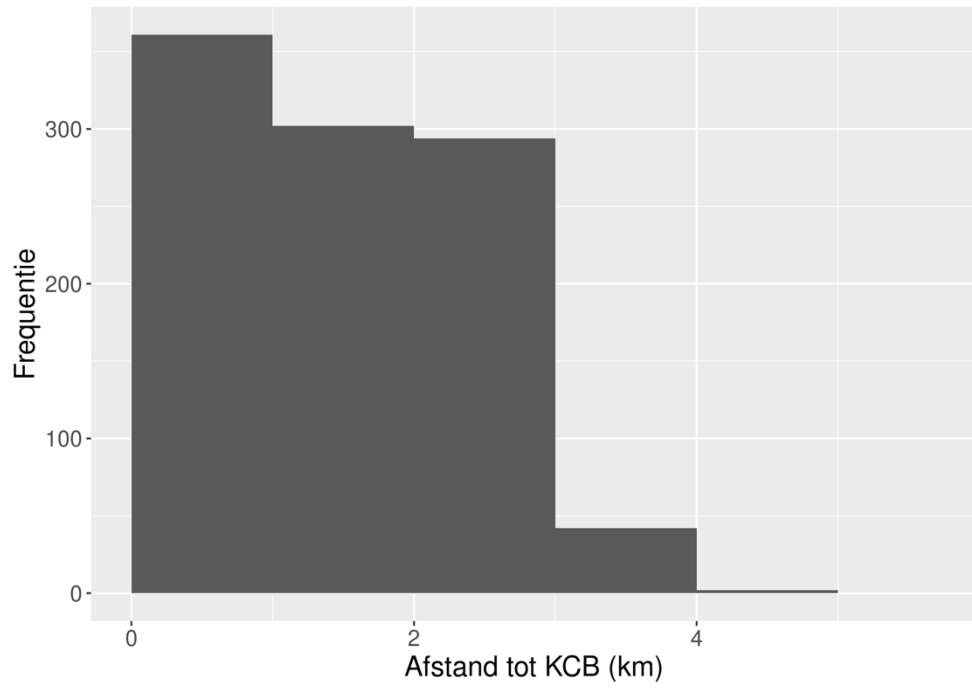


**Scenario B: Effectieve jaardosis – volwassenene**



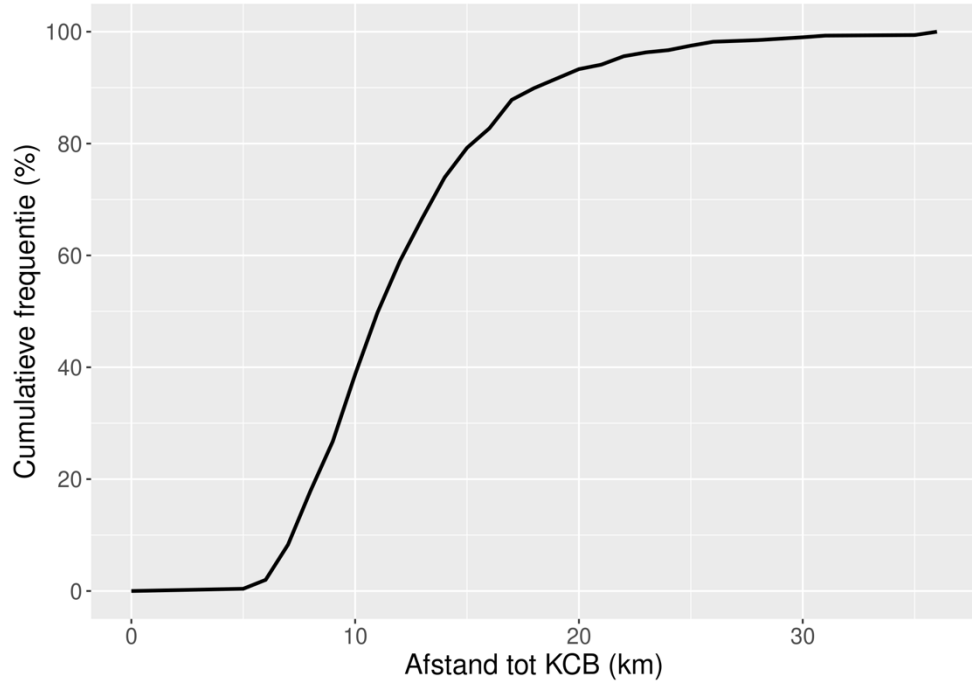
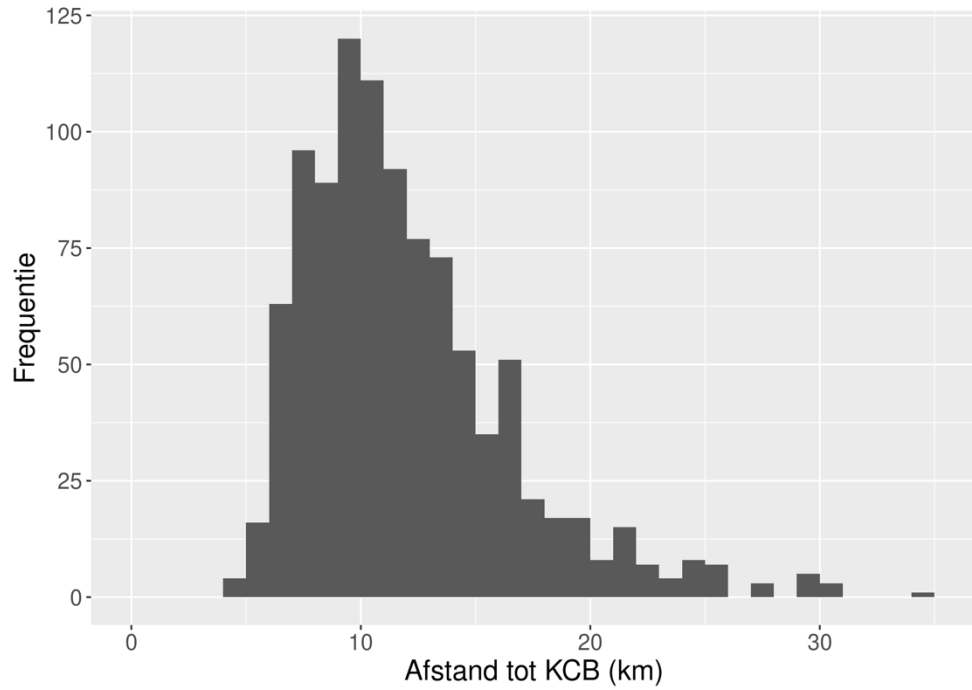
### Scenario C

#### Scenario C: Interventie Evacuatie – volwassene

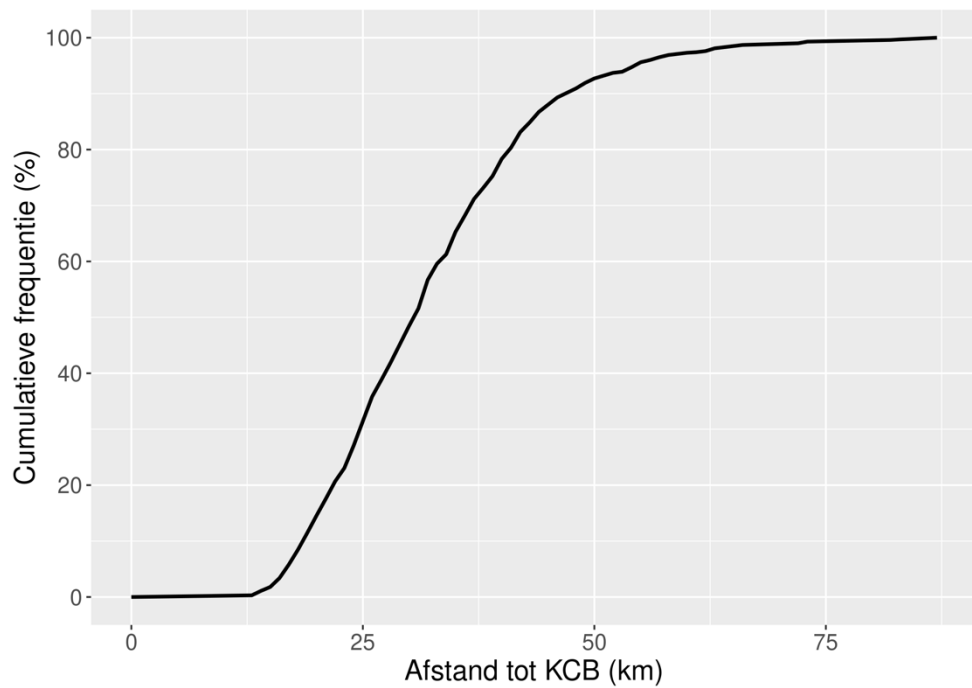
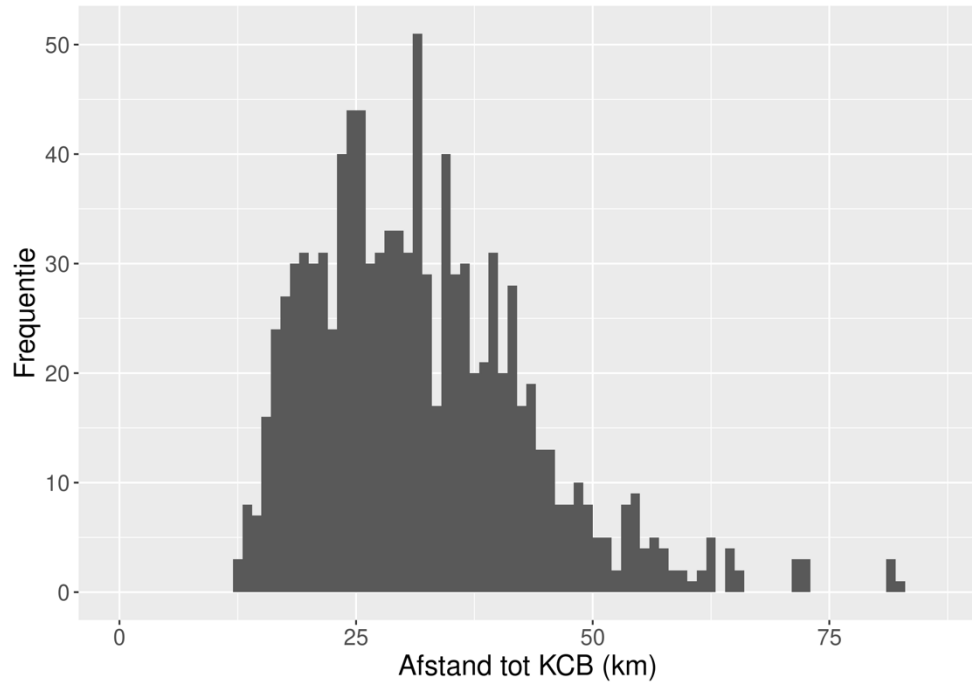




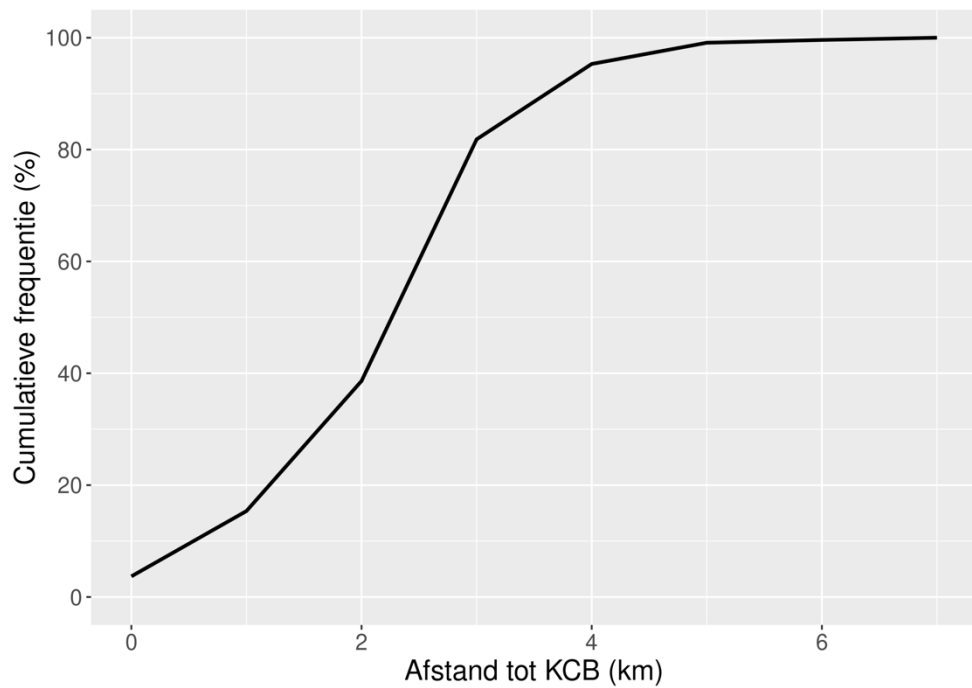
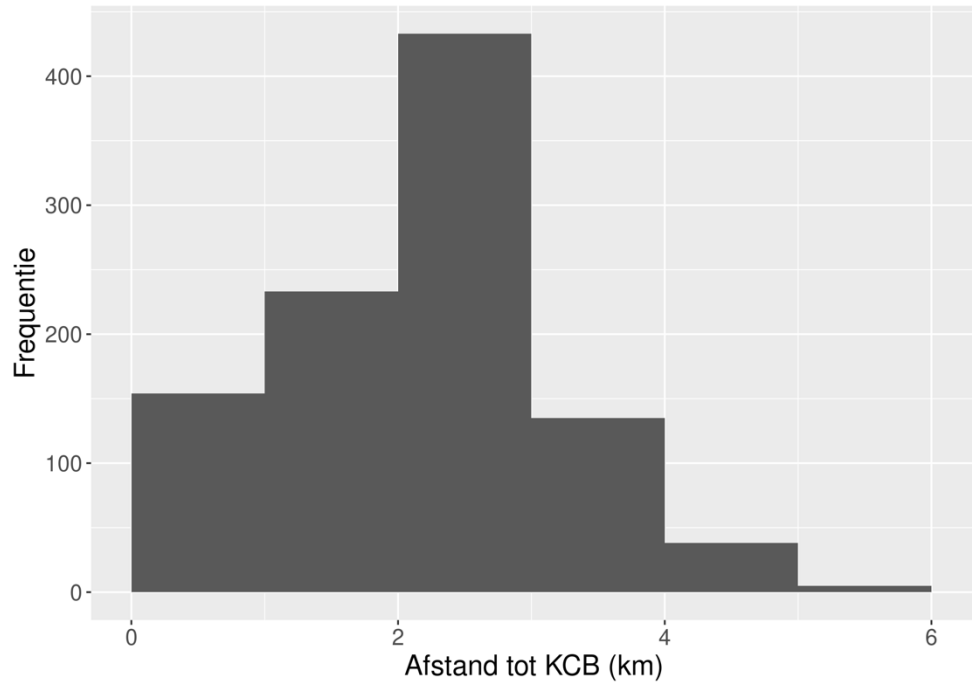
**Scenario C: Interventie Schuilen – volwassene**



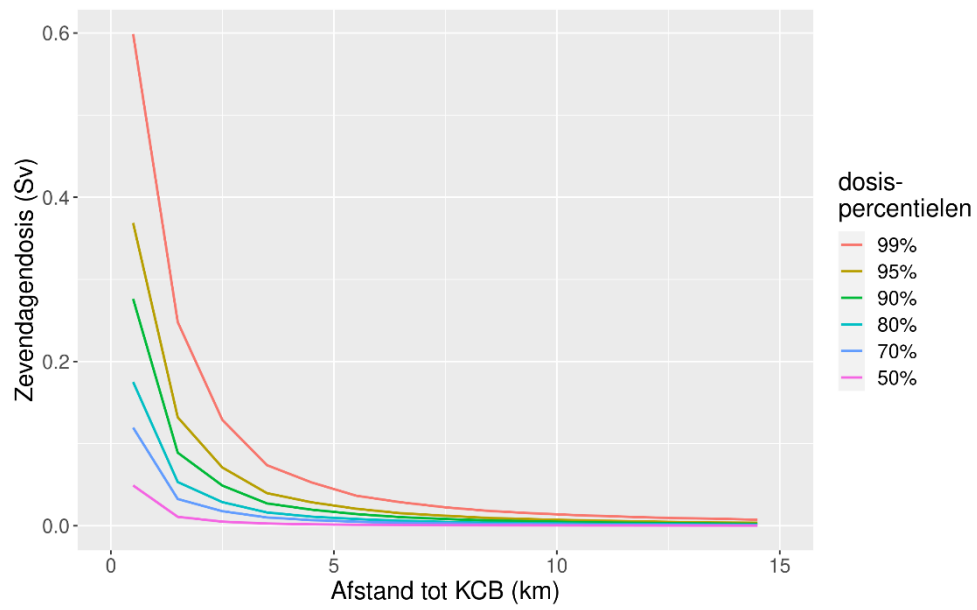
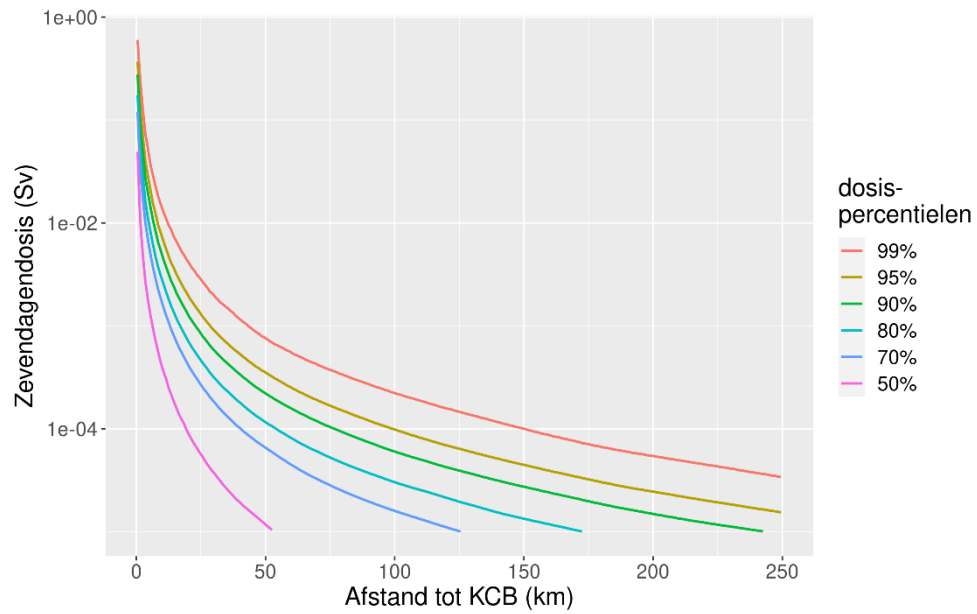
**Scenario C: Interventie Jodiumprofylaxe – eenjarig kind**



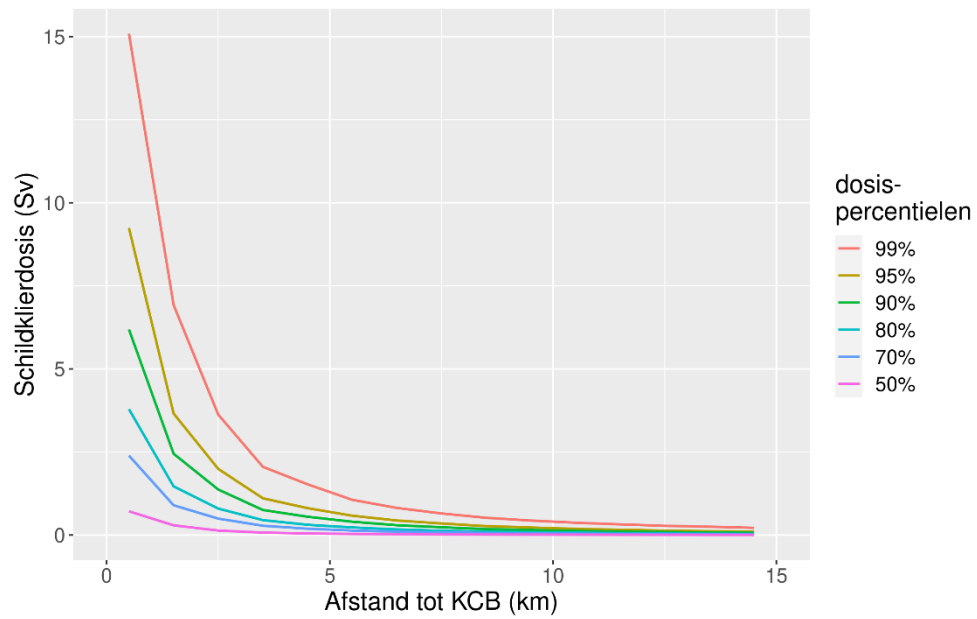
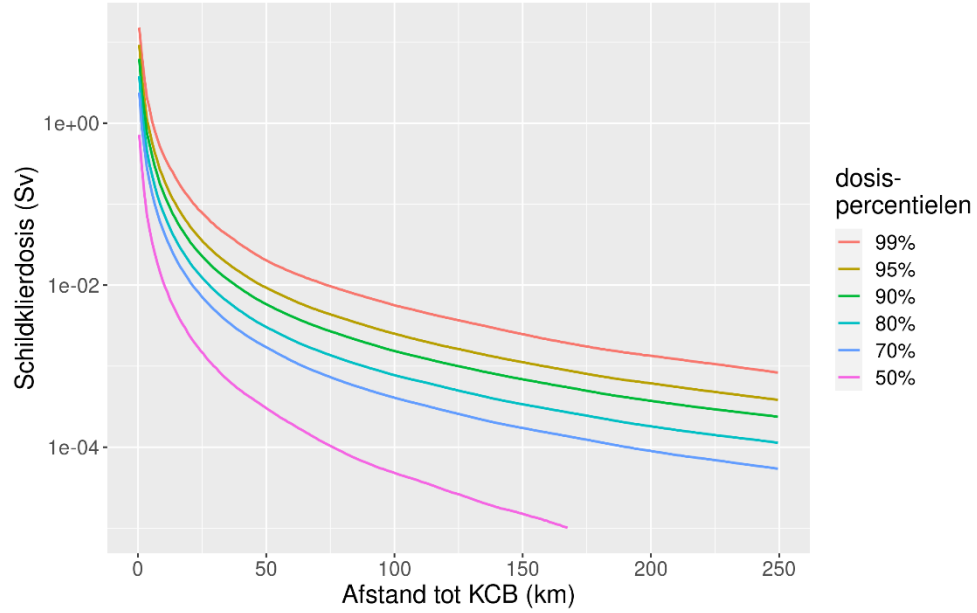
**Scenario C: Interventie Tijdelijke relocatie – volwassene**



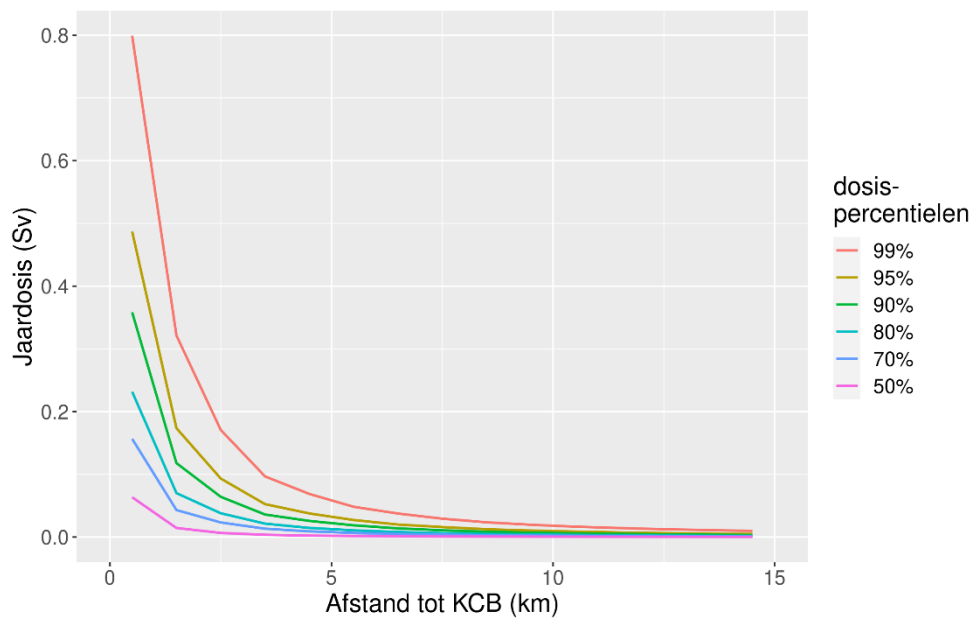
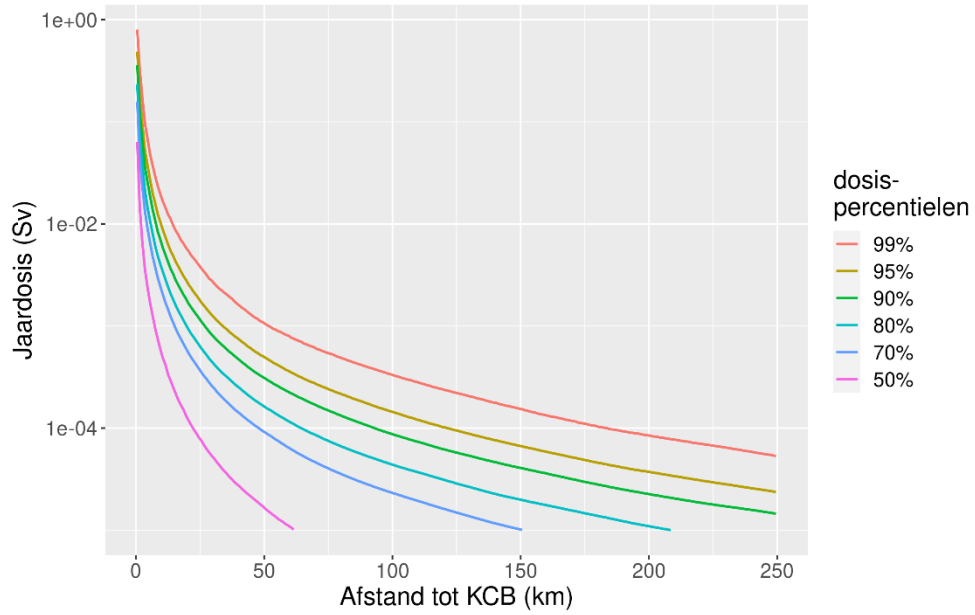
**Scenario C: Effectieve dosis in zeven dagen – volwassene**



**Scenario C: Schildklierdosis – eenjarig kind**

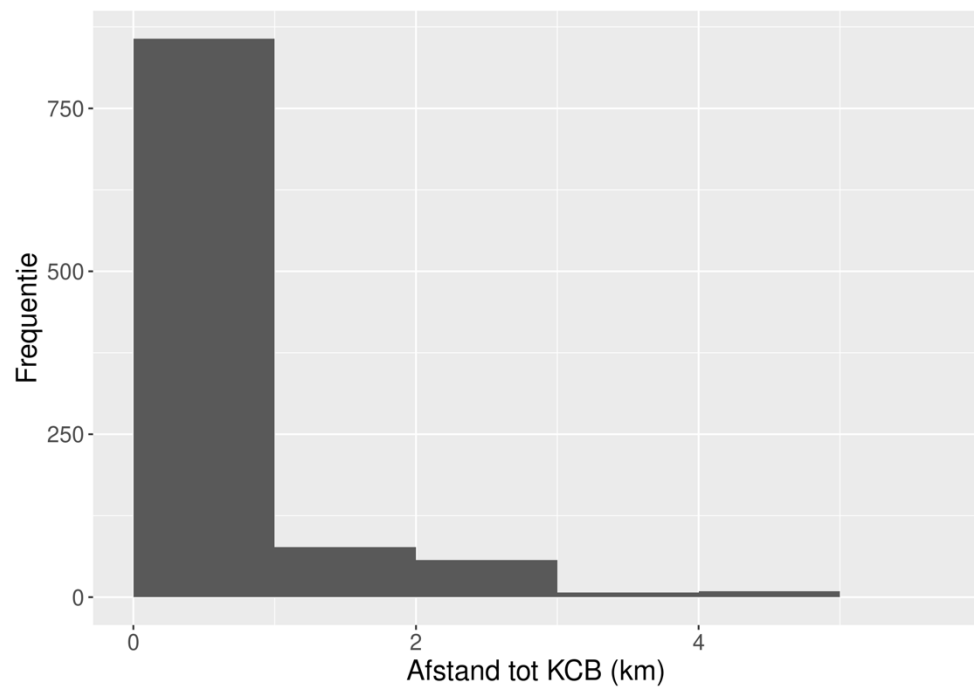
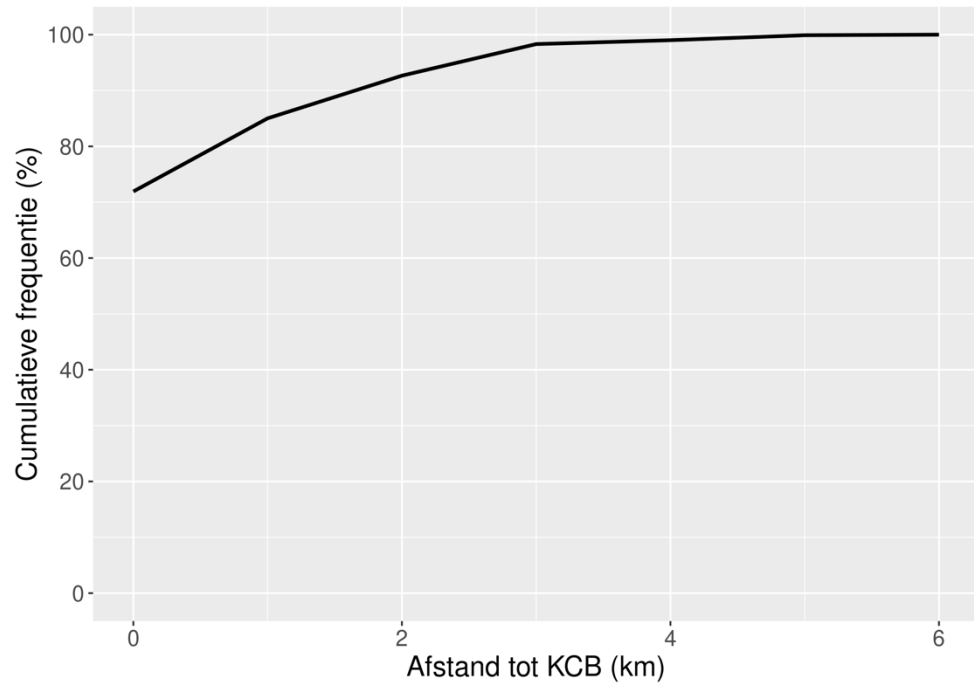


### Scenario C: Effectieve jaardosis – volwassene

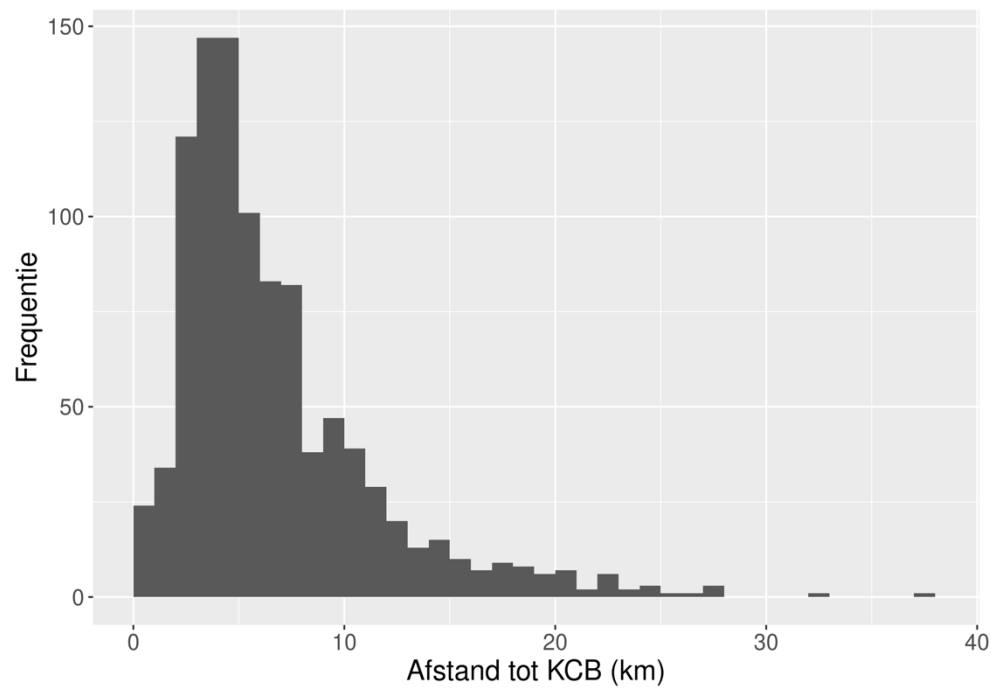
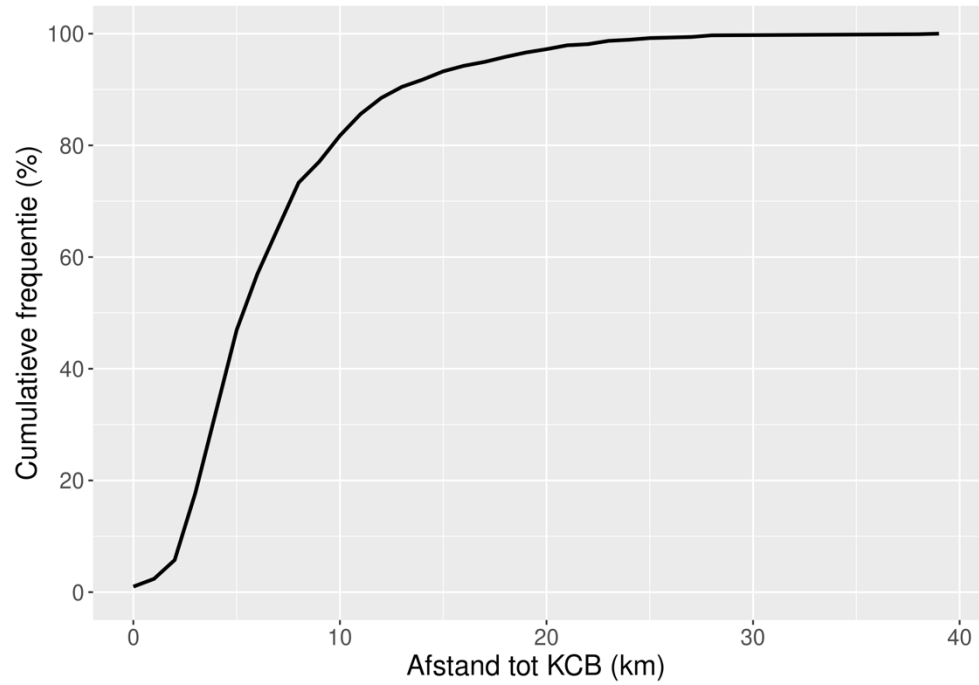


### Scenario D

#### Scenario D: Interventie Evacuatie – volwassene

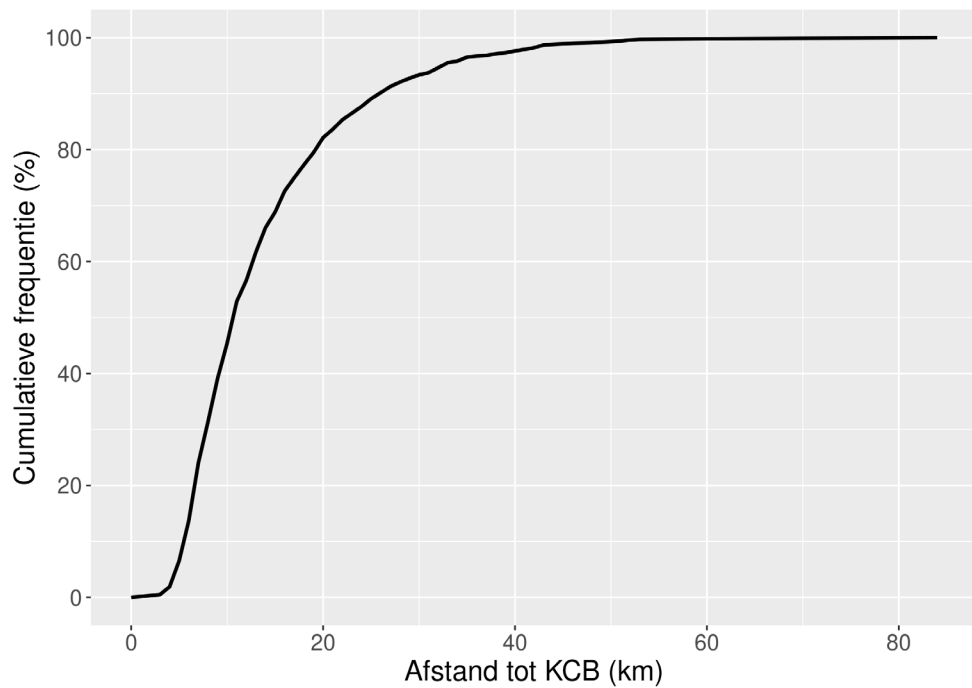
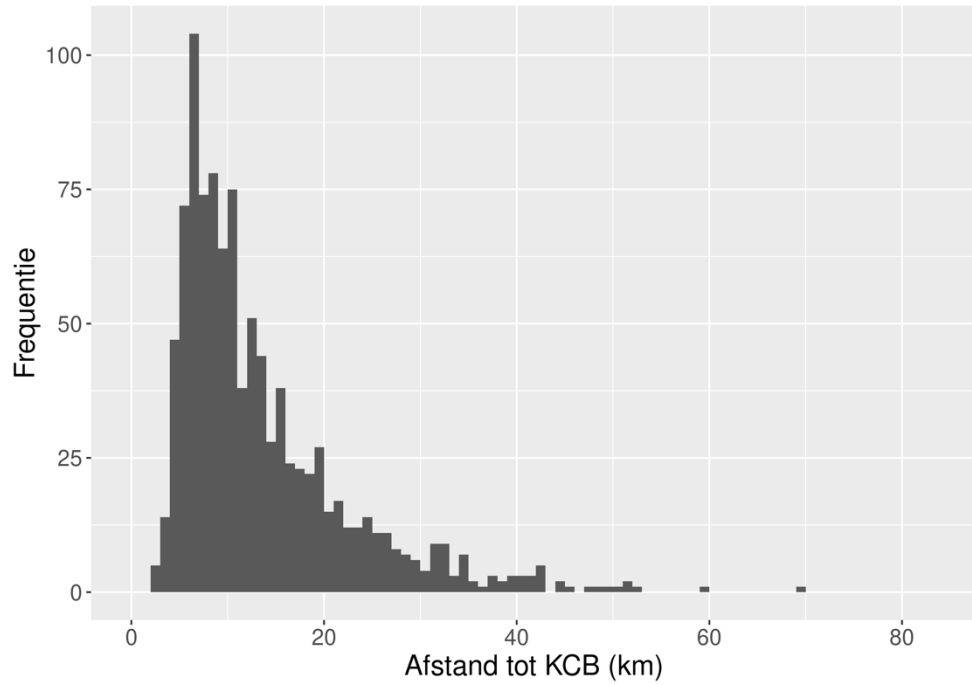


**Scenario D: Interventie Schuilen – volwassene**

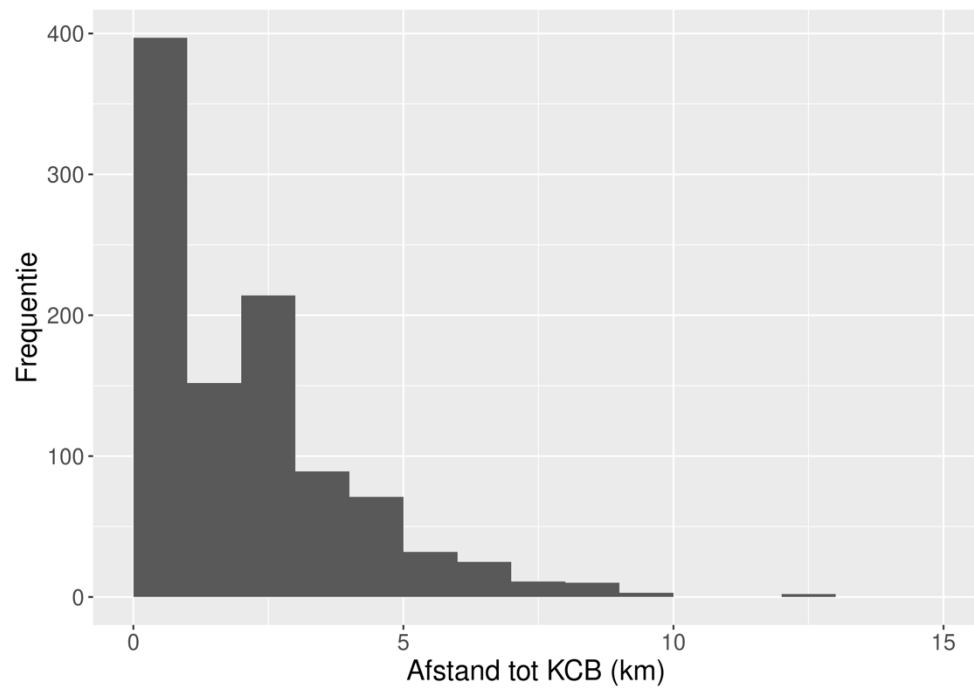
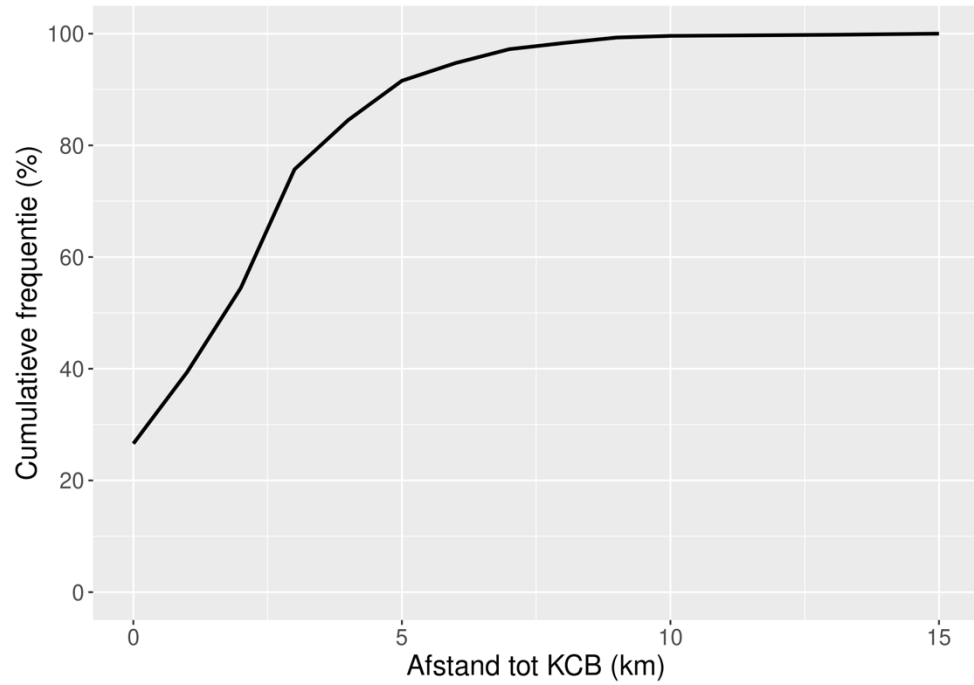




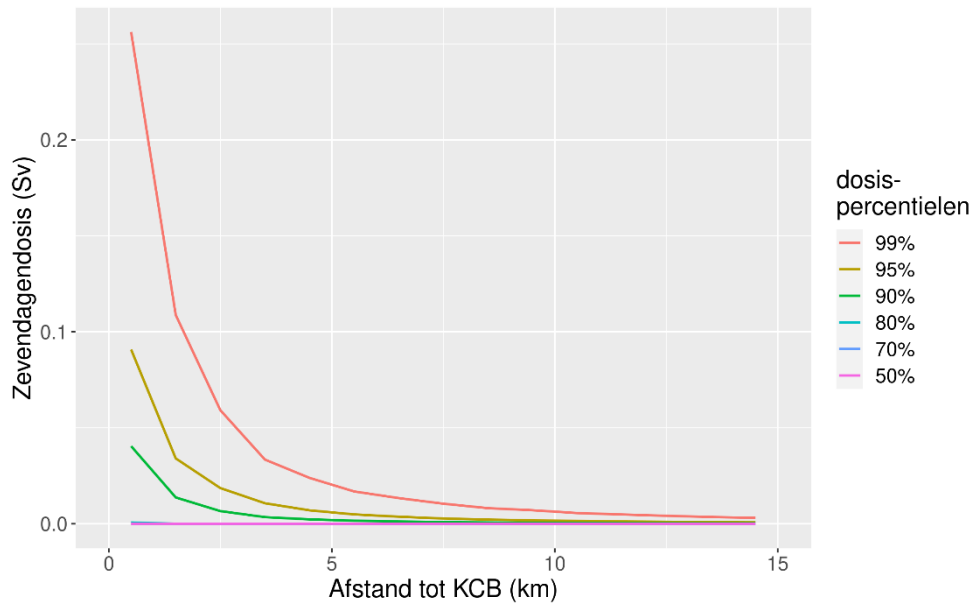
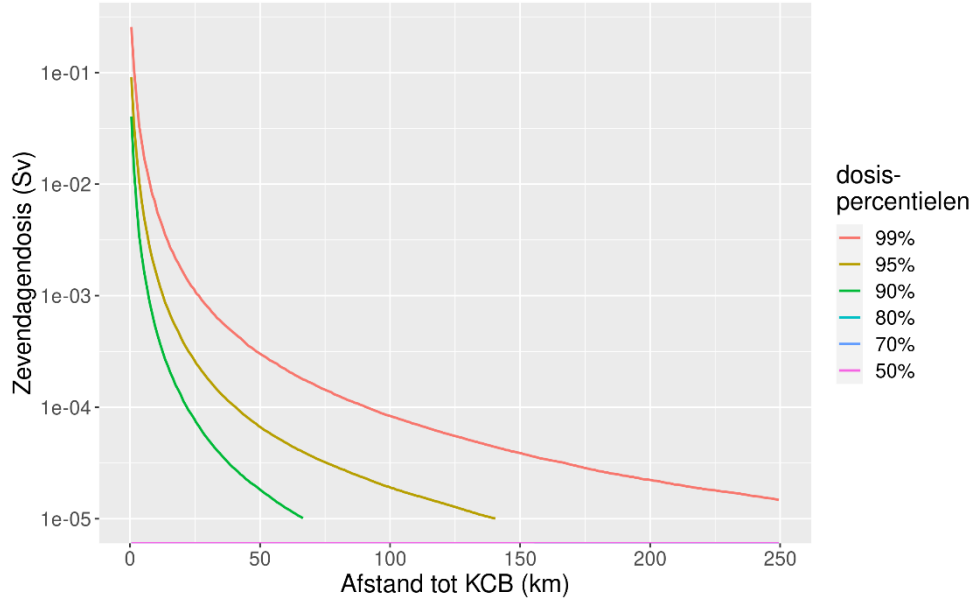
**Scenario D: Interventie Jodiumprofylaxe – eenjarig kind**



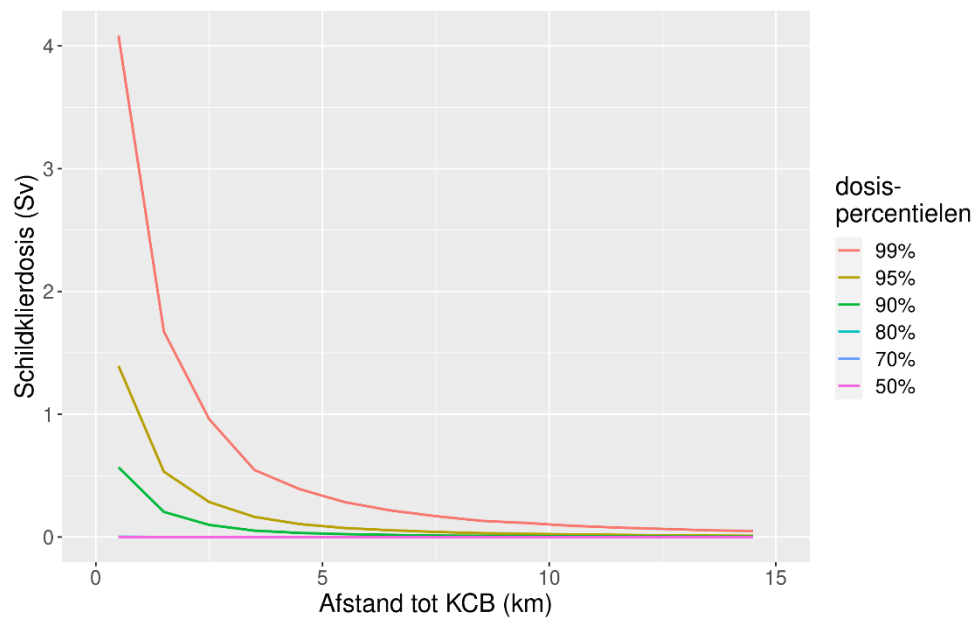
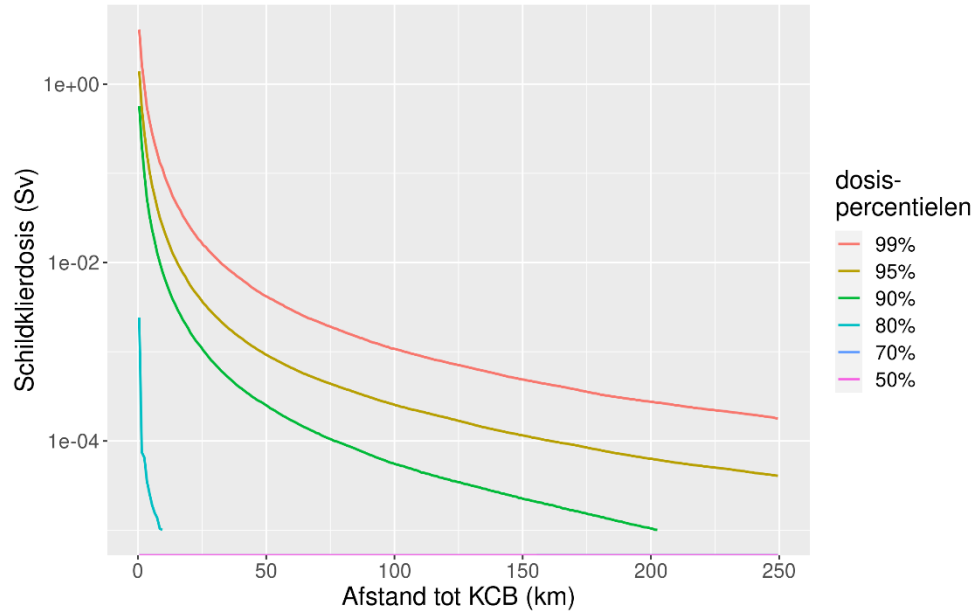
**Scenario D: Interventie Tijdelijke relocatie – volwassene**



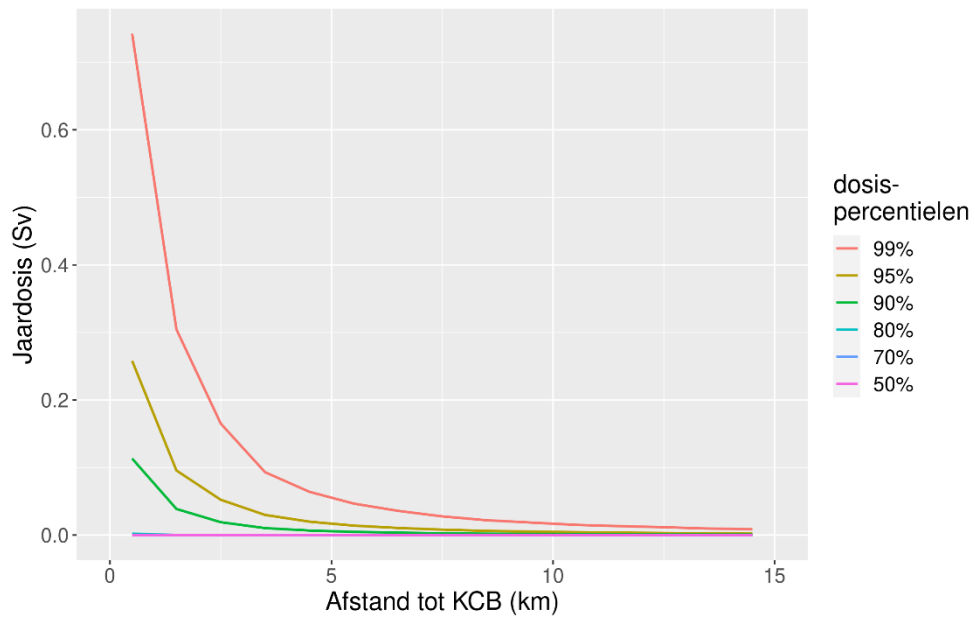
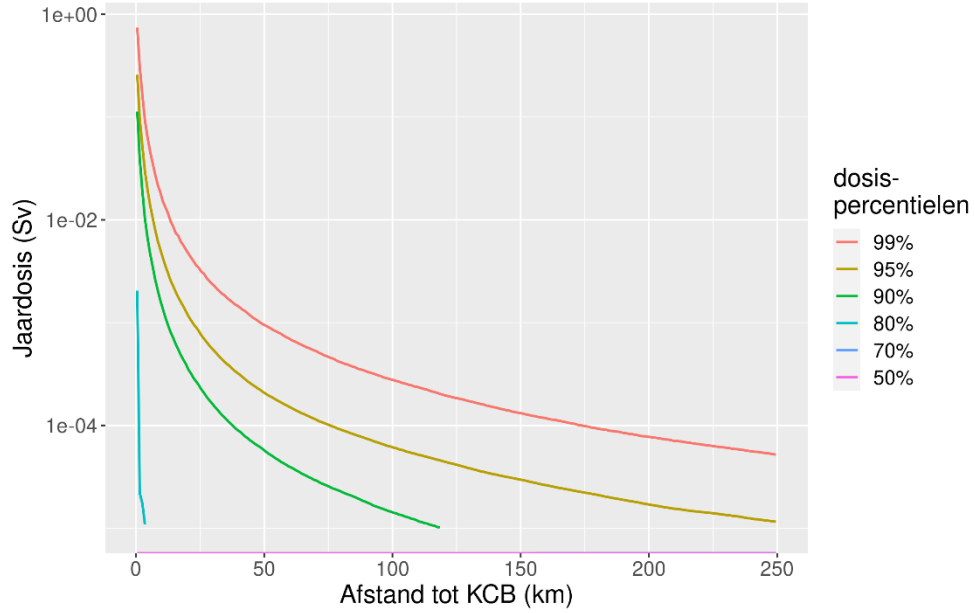
**Scenario D: Effectieve dosis in zeven dagen – volwassenen**



**Scenario D: Schildklierdosis – eenjarig kind**



**Scenario D: Effectieve jaardosis – volwassenene**



### **Scenario E**

Dit scenario geeft geen relevante overschrijdingen van interventies.



**RIVM**

*De zorg voor morgen begint vandaag*